

**CENTRO PAULA SOUZA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA  
PROFESSOR MIGUEL REALE**

**EDSON BRAGA ALVES**

**Escâner de varredura laser**

**São Paulo  
2022**

CENTRO PAULA SOUZA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE  
ITAQUERA PROFESSOR MIGUEL REALE

**EDSON BRAGA ALVES**

**Escâner de varredura laser**

Trabalho acadêmico realizado como requisito parcial para a conclusão do curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica.

Orientador: Prof.Me. Felipe Ribeiro Toloczko

Coorientador: Prof.Me. Daniel José Toffoli

**São Paulo**  
**2022**

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho, in memory a minha querida mãe Maria Braga Alves a principal mentora e que tanto me apoiou nas horas mais difíceis da minha vida.

### **Agradecimentos**

Ao orientador Prof.Me.Felipe Ribeiro Toloczko e co-orientador Prof.Me. Daniel José Toffoli, pela orientação, confiança e apoio na realização deste trabalho.

## Resumo

Este trabalho tem por finalidade construir um escâner de varredura a laser, dotado de um sistema de aquisição de dados, utilizando-se de uma câmera de alta resolução e um apontador de luz estruturada em ângulo, onde os dados obtidos formarão uma nuvem de pontos que serão analisados e convertidos em coordenadas por um software de análise e composição de um objeto virtual tridimensional, que quantifica e classifica os pontos obtidos nas imagens, foram feitas 64 captas de imagens em quatro grupos de 16 imagens, tiradas a uma distância de 50 cm em um ângulo de 45°, quantidade mínima para formar o objeto 3D.

**Palavras-chave:** Escâner. Laser. Nuvem de pontos. Objeto virtual tridimensional. Luz estruturada.

## **Abstract**

This work aims to build a laser scanning scanner, equipped with a data acquisition system, using a high-resolution camera and an angle-structured light pointer, where the data obtained will form a cloud of points that will be analyzed and converted into coordinates by analysis and composition software of a three-dimensional virtual object, which quantifies and classifies the points obtained in the images, 64 images were captured in four groups of 16 images, taken at a distance of 50 cm at a 45° angle, the minimum amount to form the 3D object.

**Keywords:** Scanner. Laser. Cloud of points. Three-dimensional virtual object. Structured light.

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Formação da imagem . . . . .	14
Figura 2 – Matriz CCD . . . . .	15
Figura 3 – Os trilhos desaparecem no horizonte . . . . .	16
Figura 4 – Modelo básico de câmera Pin Hole . . . . .	18
Figura 5 – Descrição da relação entre um ponto 3D (X,Y,Z) e sua correspondente (u,v) . . . . .	19
Figura 6 – Distorção radial . . . . .	20
Figura 7 – Distorção Tangencial . . . . .	21
Figura 8 – LOLA ( <i>Lunar Orbiter Laser, Orbitador Lunar Laser</i> ) . . . . .	22
Figura 9 – Tempo de Voo . . . . .	23
Figura 10 – Padrão de Luz Estruturada . . . . .	24
Figura 11 – Sensor de profundidade . . . . .	30
Figura 12 – Plataforma Giratória . . . . .	31
Figura 13 – Tripe Universal . . . . .	32
Figura 14 – Triangulação . . . . .	33
Figura 15 – Geometria epipolar ou Visão Estereoscópica . . . . .	34
Figura 16 – Primeira imagem 1-16 . . . . .	35
Figura 17 – Imagem 4-16 . . . . .	35
Figura 18 – Imagem sem textura . . . . .	36
Figura 19 – Objeto final . . . . .	36
Figura 20 – KScan 3D . . . . .	37
Figura 21 – Mesh Lab . . . . .	37
Figura 22 – Dinossauro 20 cm . . . . .	38
Figura 23 – Pulverizador de Fragrâncias . . . . .	39

## **Lista de tabelas**

Tabela 1 – Comparação entre as características das fotogrametrias digital e analítica . . .	26
---	----



## **Lista de abreviaturas e siglas**

CCD

Charge-Coupled Device (Dispositivo Acoplado)

### Lista de símbolos

$(X, Y)$	Coordenadas no sistema de imagem
$(X, Y, Z)$	Coordenadas tridimensionais não homogêneas
$(X_1, X_2, X_3, X_4)$	Coordenadas tridimensionais homogêneas
$f$	Distância focal da câmera
LD	Luz Direta
LDf	Luz Difusa
LR	Luz Refletida
Z	Distância do objeto filmado até o orifício da câmera
k	Coeficiente de distorção de lente de câmera
$\lambda$	Fator de escala homogêneo da coordenada
$\mu$	Razão entre os fatores de escala da câmera

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo Específicos</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Imagem</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Imagem Digital</b>	<b>13</b>
<b>2.3</b>	<b>Imagem 3D</b>	<b>15</b>
<b>2.4</b>	<b>A Geometria Projetiva</b>	<b>16</b>
<b>2.5</b>	<b>Câmera</b>	<b>17</b>
<b>2.6</b>	<b>Calibração da Câmera</b>	<b>20</b>
<b>2.7</b>	<b>Técnicas de Formatação 3D</b>	<b>21</b>
<b>2.8</b>	<b>A Técnica Time -of-Fligth (Tempo de voo)</b>	<b>21</b>
2.8.1	Principio do Funcionamento	22
<b>2.9</b>	<b>A Técnica da Luz Estruturada</b>	<b>23</b>
<b>2.10</b>	<b>A Triangulação a Laser</b>	<b>24</b>
<b>2.11</b>	<b>A Historia da Fotogrametria</b>	<b>24</b>
2.11.1	Fotogrametria Digital	26
2.11.2	Fotogrametria Analítica	26
<b>2.12</b>	<b>Sensor de Profundidade Microsoft Kinect</b>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>O método da Triangulação</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Formando a Imagem 3D</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>38</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>40</b>
	<b>Referências</b>	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Como o acesso às tecnologias de imagens digitais tem-se tornado algo comum, principalmente com a popularização das câmeras fotográficas digitais, com tamanho e preços reduzidos e mídias com capacidade para armazenar estas informações.

No entanto, com internet de alta velocidade e computadores com grande capacidade de processamento, surge uma nova tendência para visualização de objetos: a visualização tridimensional.

Em geral, a criação de modelos tridimensionais a partir de objetos é feita por sistemas CAD (*Computer Aided Design, Desenho Assistido por Computador*)/CAM (*Computer Aided Manufacturing, Manufatura Assistida por Computador*)/CAE (*Computer Aided Engineering*) (engenharia reversa), porém, quando existe uma morfologia complexa no modelo, a criação através destes sistemas se torna complexa e é difícil obter uma representação fiel do modelo real.

Em meio a essa dificuldade, surge o escâner 3D como facilitador na transferência de modelos reais para modelos digitais, utilizando a luz como a principal ferramenta neste processo.

Com base nos experimentos de Albert Einstein foi postulado que a luz é constituída de pacotes discretos e bem definidos de energia, denominados na época de “Quanta de Luz” e posteriormente passaram a ser conhecidos como “fótons”(LEWIS, 1926).

Atualmente, entende-se que a luz possui um comportamento dual, propagando-se como onda eletromagnética e interagindo como matéria composta de pequenas partículas, possibilitando diversas aplicações, como por exemplo: apalpadores de luz, utilizado para determinar as dimensões de um objeto a distância, sem propriamente toca-lo(SANTOS, 1993).

O princípio de funcionamento do sistema de varredura consiste na emissão de um pulso laser (*Light Amplificativo by Stimulated of Radiation, Amplificação da luz por emissão, estimulada de radiação*), de elevada frequência, emitido de uma plataforma, e posteriormente refletido por um alvo (objeto de estudo). Durante o processo, a imagem é capturada por uma câmera de alta resolução, e com o registro do experimento capturado, as imagens geradas são analisadas e tratadas digitalmente(WOLF; BRINKER, 1994) .

Esta tecnologia foi aprimorada a partir do sistema de RADAR (*Radio Detection and Ranging, Detecção e alcance de rádio*), detecção e telemetria , de rádio sistema de detecção de objetos a distância, utilizando ondas de rádio, desenvolvido durante a Segunda Guerra Mundial.

Há uma necessidade significativa na aplicação de um sistema que possa medir com precisão os elementos no ambiente monitorado, com por exemplo: a utilização de tal aparato na indústria, mais precisamente no setor de metrologia, auxiliando no setor de análise de qualidade, e propiciando maior eficiência na coleta dos dados (BÖSERMANN, 2005) .

Com o uso do laser tem-se a possibilidade de medir com rapidez e precisão as menores cavidades de uma peça mecânica. Esta técnica ganhou significativa eficiência com o advento dos medidores eletrônicos de distâncias e direções, instrumentos integrados, que convencionou-se chamar de estações totais(WOLF; BRINKER, 1994).

Os medidores laser foram significativamente melhorados e passaram a realizar a medição sem a necessidade de refletor, o que permitiu a determinação remota de coordenadas sem tocar o objeto. A evolução da tecnologia de controle de servomecanismos, aplicada a estes equipamentos, assegurou o desenvolvimento da estação total robotizada, que permite a medição programada de pontos sem a presença do operador (TOMMASELLI, 2003).

As câmeras de profundidade 3D, como o sensor Microsoft Kinect, foram popularizados pelos videogames de 3ª geração, assim foram criadas muitas oportunidades para computação gráfica, o que favoreceu o uso em inúmeras aplicações, como na área de telemetria e fotogrametria (SARBOLANDI, 2015).

Neste trabalho, é proposto um estudo da tecnologia empregada nos “Scanners” de varredura, utilizados nos sistemas de escâneres LIDAR (Light Detection and Ranging, Detecção e alcance de luz), tecnologia baseada na telemetria com o uso do laser (LIGHITI; HARVEY, 2002).

## **1.1 Objetivos**

A proposta deste trabalho visa a criação de um modelo virtual tridimensional através de um escâner 3D.

O objetivo deste trabalho é estudar a tecnologia da fotogrametria com o uso do sensor Microsoft Kinect e descrever suas características, apresentando suas vantagens e desvantagens perante dispositivos similares.

Também é objetivo abordar os aspectos construtivos de um sistema de escaneamento.

O projeto envolve a construção de uma plataforma giratória, fundamental para explanação do estudo, e para se determinar quais são as dificuldades envolvidas.

## **1.2 Objetivo Específicos**

- Levantar material bibliográfico sobre o uso do Microsoft Kinect em pesquisas;
- Identificar as dificuldades de construção de um sistema de escaneamento;
- Estudar os aspectos que envolvem a luz, como instrumento de medição.
- O outro aspecto, a ser estudado neste trabalho, é montar relato do desenvolvimento da fotogrametria, quais as contribuições históricas relevantes para humanidade, bem como demonstrar o seu atual estágio de desenvolvimento.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Imagem

O desenvolvimento da imagem se confunde com a história da arte e da humanidade, quando se verifica sua importância no contexto histórico, social político e econômico, a qual expressa valores de uma época.

A revolução da imagem teve seu impulso em meados do século XIX. Com a invenção da fotografia, a iconografia apresentou um avanço de transformações em relação aos séculos anteriores.

A partir da segunda metade do século XX com a invenção da fotografia e com o avanço tecnológico, a imagem teve seu universo significativamente ampliado, aumentando a sua importância na fixação de ideias e elementos.

O termo imagem origina-se na expressão latina *imago*, que significa figura, sombra e imitação.

Segundo (CASASÚS, 1979), “A imagem é tida como a representação inteligível de alguns objetos com capacidade de ser reconhecida pelo homem necessitando concretizar-se materialmente”.

### 2.2 Imagem Digital

Matematicamente uma imagem digital pode ser representada por uma função discreta.

Segundo (GOMES, 1994) uma imagem 2D é definida, por uma função de duas dimensões  $f(X, Y)$  onde o X e o Y são coordenadas planas, e a amplitude de  $f$  de qualquer par de coordenadas  $(X, Y)$  é chamada de intensidade ou nível de cinza naquele ponto, conhecida como imagem monocromática.

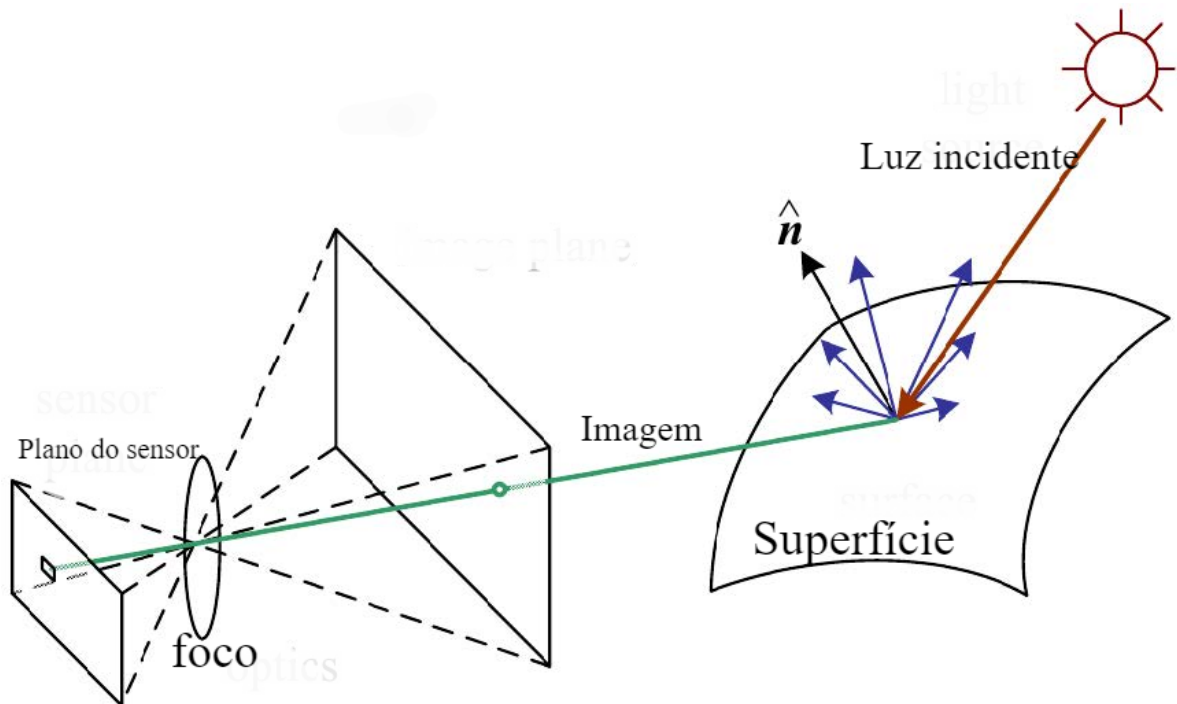
No caso das imagens coloridas existem mais de um sinal sendo uma função  $f(X, Y)$  para cada cor, como, por exemplo, imagens que usam o padrão RGB, é formada pela soma das cores primárias aditivas do vermelho, verde e o azul.

As imagens digitais segundo (GOMES, 1994) são codificadas num formato estabelecido, capaz de ser entendido pelo computador.

Estas imagens podem ser criadas no próprio computador ou numa máquina fotográfica digital dentre as quais resultam da conversão de fotografia e slides para o formato digital.

A imagem é uma projeção discreta 2D de uma cena real 3D, conforme a figura 1.

**Figura 1 – Formação da imagem**



Fonte: Ponti, Moacir (2017)

O funcionamento de uma câmera digital é similar ao funcionamento das câmeras comuns. A principal diferença é que, após capturar e focalizar a imagem seu armazenamento se dará por meio de um dispositivo eletrônico e não o filme.

Este dispositivo, conhecido como CCD (*Charge-Coupled Device*), converte a intensidade de luz que incide sobre ele em valores digitais armazenáveis na forma de Bits e Bytes.

Existem dois tipos de CCD que podem ser utilizados em função da aplicação da câmera:

O primeiro tipo é o CCD linear, que é nada mais que uma fileira com milhares de elementos fotossensíveis.

As câmeras que usam este tipo de CCD são usadas, em geral, em estúdios fotográficos para fotos estáticas de alta definição.

Não são câmeras indicadas para objetos em movimento, e podem apresentar resultados ruins quando se utiliza iluminação piscante, como lâmpadas fluorescentes.

Este tipo de CCD captura 7000X7000 pontos.

O segundo tipo é o CCD do tipo Array que é uma matriz com milhares de elementos fotossensíveis que capturam os pontos da imagem na câmera de uma vez só.

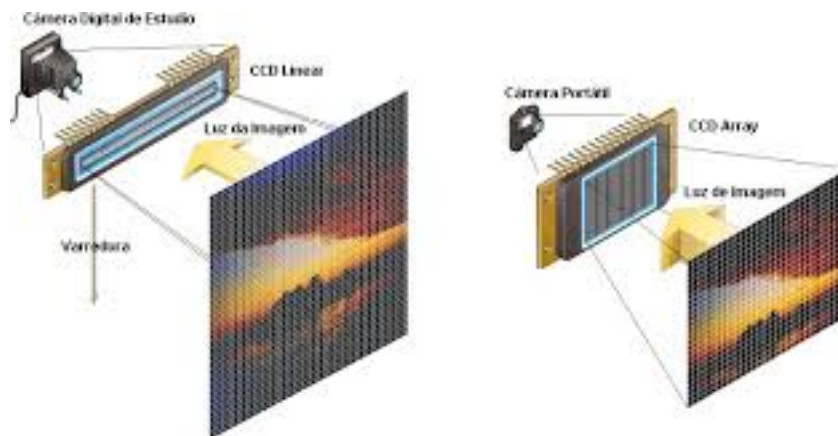
Esta técnica é quase equivalente à foto comum no tempo captura, mas normalmente produz imagens de qualidade inferior às conseguidas com o CCD linear (em geral, capturam 1000X1000 pontos).

As câmeras que utilizam este tipo de CCD são as mais populares do mercado porque são mais acessíveis, de fácil uso e portabilidade. Podemos destacar também que, até o momento, não

se produziu nenhum CCD que reproduza a qualidade ou resoluções de imagem da fotografia comum.

A figura, ilustra um sistema de coordenadas de um dispositivo de captura, no seu arranjo de câmera de estúdio, com CCD Linear e o arranjo utilizado nos CCD de câmeras mais populares figura 2.

**Figura 2 – Matriz CCD**



### 2.3 Imagem 3D

Na modelagem de linhas, planos e pontos em um espaço tridimensional se utiliza geralmente a geometria Euclidiana.

Este caso especial pode ser representado por um desenho perspectivo como o da Figura 3.



**Figura 3 – Os trilhos desaparecem no horizonte**



Fonte:PIXBAY

## 2.4 A Geometria Projetiva

Segundo (MORVAN, 2009) , a geometria projetiva consiste em um arranjo matemático para imagem de múltiplas vistas em 3D e computação grafia tridimensional.

Os pontos no infinito não podem ser modelados, considerados como casos especiais. No entanto, a geometria projetiva constitui um arranjo atrativo para contornar estas desvantagens.

No espaço Euclidiano, um ponto definido em três dimensões é representado por um vetor de três elementos  $(X Y Z)^T$   $(X Y Z)$  *Transposto*.

No espaço projetivo, este mesmo ponto é descrito utilizando um vetor de quatro elementos

$$(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (2.1)$$

de forma que (MORVAN, 2009) :

$$X = X_1/X_4, \quad (2.2)$$

$$Y = X_2/X_4, \quad (2.3)$$

$$Z = X_3/X_4, \quad (2.4)$$

$$\text{Sendo } X_4 \neq 0 \quad (2.5)$$

O conjunto  $(X, Y, Z)^T$  é normalmente chamado de coordenadas não-homogêneas e o conjunto  $(X_1, X_2, X_3, X_4)$ , é chamado de coordenadas homogêneas (MORVAN, 2009).

## 2.5 Câmera

Imagens geradas por câmeras são obtidas através da detecção de luz parte desta luz, gerada por fonte, como o sol ou uma lâmpada é irradiada, até que seja incidida sobre um objeto.

Uma parte desta irradiação é absorvida enquanto outra é percebida na forma de cor, e captada por um sensor de imagem da câmera.

O entendimento da geometria envolvida neste processo é importante para aplicações de visão computacional como a utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

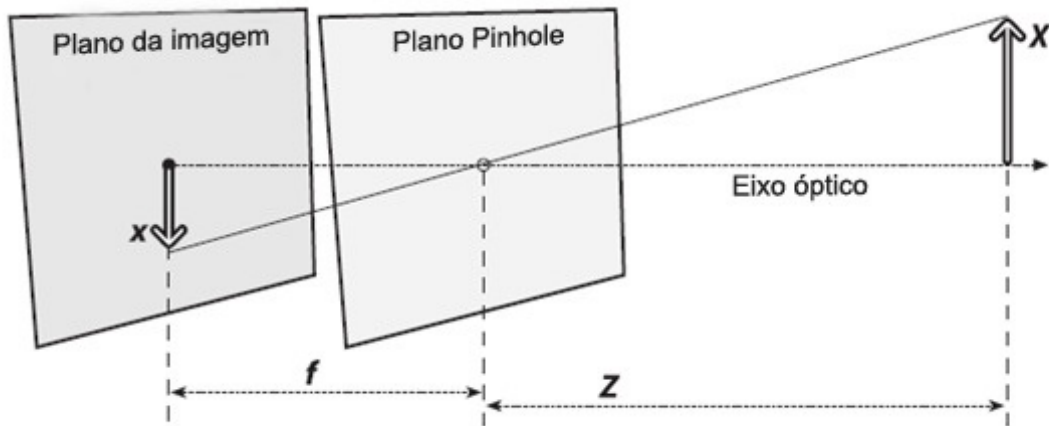
Um modelo simples, mas útil, de como isso acontece é o “*pinhole camera model*”.

Um *pinhole* é uma parede imaginária com um pequeno furo em seu centro que bloqueia todos os raios de luz com exceção daqueles que passam pela abertura no centro (BRADSKI; KAEHLER, 2008).

Após a passagem da luz pelo orifício do modelo pinhole, esta é projetada em um plano de imagem. E o resultado disto é uma imagem definida neste plano sempre em foco.

A distância do objeto com relação ao tamanho da imagem será definida pelo seu comprimento focal ( $f$ ). No modelo pinhole, esta distância é precisamente a distância entre o orifício e o plano da imagem formada, conforme a figura 4.

Figura 4 – Modelo conceitual de uma câmera PinHole



Fonte: Adaptado de Bradski e Kaehler

Através da semelhança de triângulos, pode-se chegar a seguinte definição:

$$-X = f \frac{X}{Z} \quad (2.6)$$

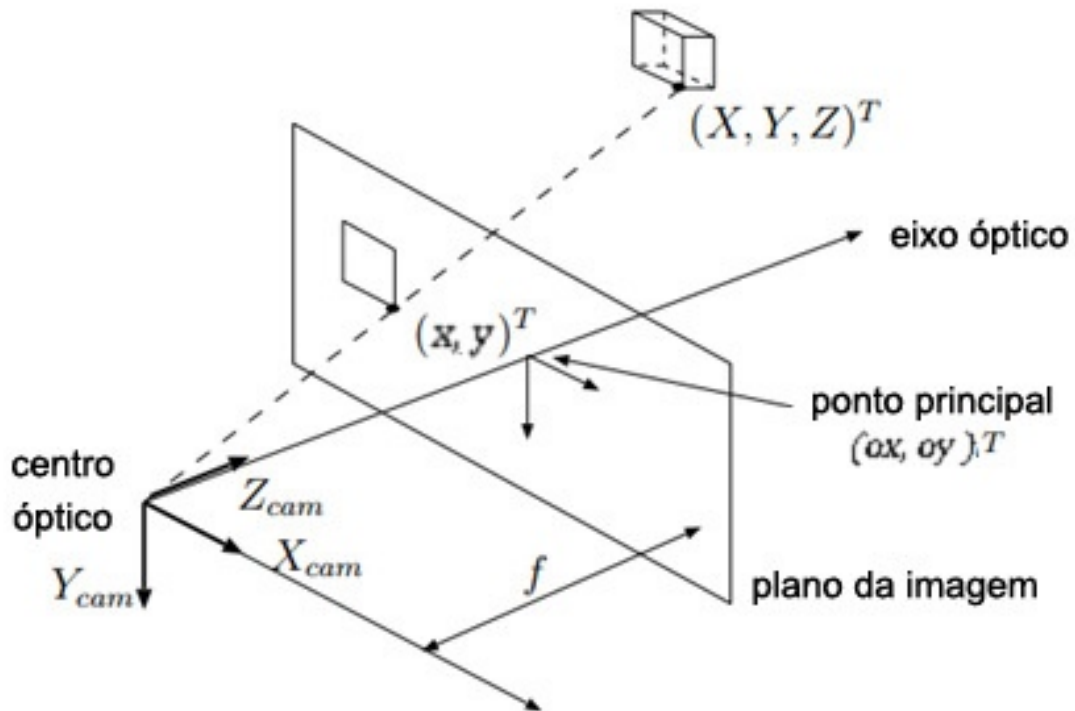
E através dessa definição, a projeção de um ponto tridimensional real  $(X, Y, Z)^T$  projetado sobre um plano de imagem com coordenadas em pixels  $(X, Y)^T$ , pode ser escrita como:

$$X = f \frac{X}{Z} \quad (2.7)$$

$$Y = f \frac{Y}{Z} \quad (2.8)$$

O sinal negativo agora deixa de existir, pois o plano da imagem não é mais considerado como estando de ponta cabeça, a figura 5 mostra esta transformação.

Figura 5 – Descrição da relação entre um ponto 3D  $(X,Y,Z)$  e sua correspondente  $(u,v)$



Fonte: Adaptado de Morvan, (2009)

Para evitar operações não lineares uma reformulação das equações anteriores utilizando-se da geometria projetiva pode ser realizada, tal que (MORVAN, 2009):

$$(\lambda x, \lambda y, \lambda)^T = (Xf, Yf, Z)^T \quad (2.9)$$

onde:

$\lambda = Z$  que representa o fator de escala homogêneo da coordenada.

O modelo pode ser exposto na forma matricial como segue:

$$\lambda \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Além disso, imagens tem sua origem, (coordenada  $(0,0)$  dada em pixels), geralmente no canto superior esquerdo, mas a origem do sistema de coordenadas da câmera se refere ao centro da imagem ou  $(0_x 0_y)^T$  como mostrado na Figura 5.

Portanto, é necessária uma transformação de coordenadas. Utilizando-se do sistema de coordenadas homogêneas, pode-se reescrever a matriz de projeção da equação anterior da seguinte forma:

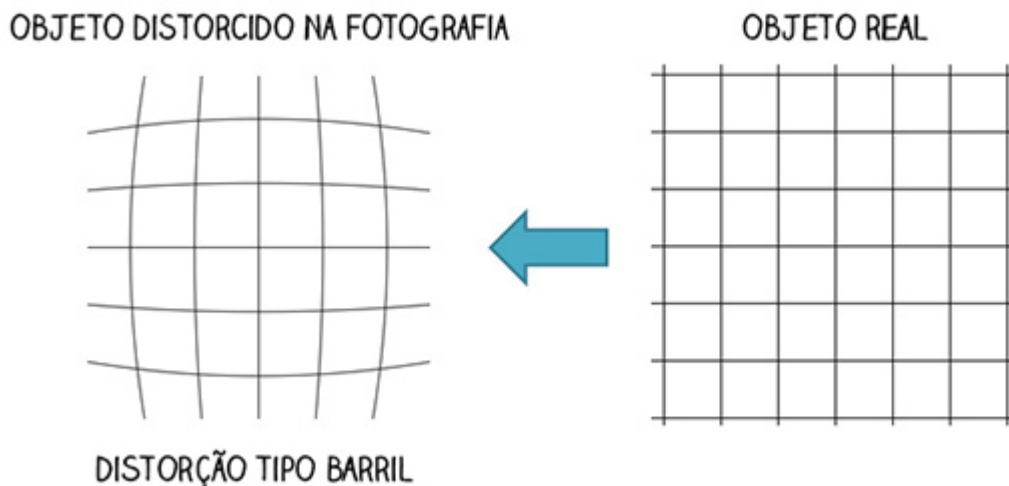
$$\lambda \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & 0_x & 0 \\ 0 & f_y & y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = [M \ 0_3] P \quad (2.11)$$

Considerando  $P = (X, Y, Z, 1)^T$  pode ser definida como a matriz que contém os parâmetros intrínsecos da câmera e seus valores poderão ser obtidos através do processo de calibração da câmera.

## 2.6 Calibração da Câmera

Segundo (MORVAN, 2009) devido às distorções que podem ocorrer nas imagens capturadas por câmeras, elas podem ser de dois tipos: as distorções radiais e distorções tangenciais conforme a figura 6.

Figura 6 – Distorção radial

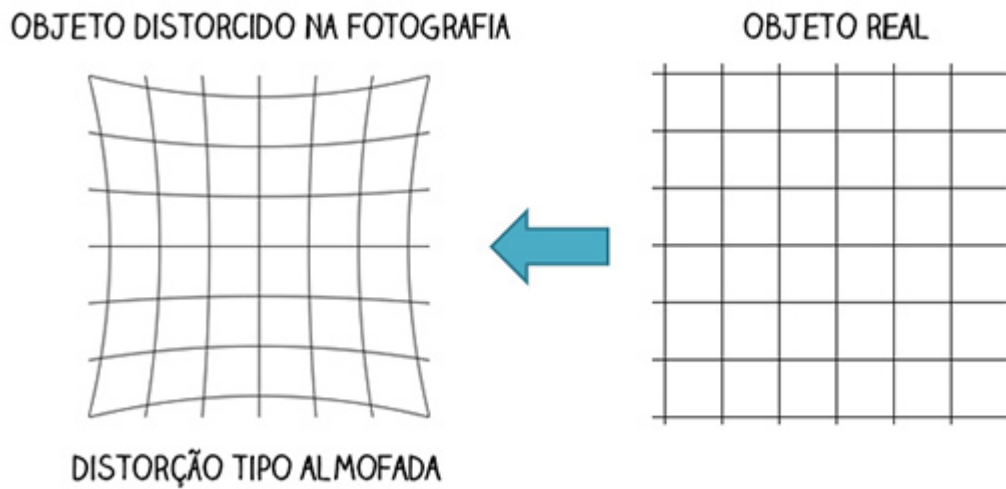


Fonte: Cameraneon.com

Esses defeitos estão relacionados a qualidade limitada dos componentes que compõe a câmera e o seu processo de montagem que acarretam desalinhamento do sensor de captura de imagem em relação à lente da câmera.

Possíveis distorções radiais normalmente se manifestam, as de forma de barril que é a mais comum, e a com o efeito almofada figura 7.

**Figura 7 – Distorção tangencial**



## 2.7 Técnicas de Formatação 3D

Conforme o modelo de escâner, pode-se reproduzir alguns detalhes específicos com maior resolução.

A melhor resolução, está relacionada com sua velocidade de coleta e processamento dos dados, bem como a sua acurácia homogênea dos pontos medidos.

Os modelos, estão relacionados com a técnica empregada na formação do modelo 3D.

A captura e conversão de uma cena real tridimensional por mecanismos de captura como escâner ou Câmera Digital.

O primeiro processo da aquisição de imagens é a redução de dimensionalidade, o dispositivo de captura deve converter uma cena real tridimensional em uma representação bidimensional.

Quando a imagem é formada a partir de um processo físico, como de uma câmera de filme fotográfico, os seus valores são proporcionais as energias irradiada por uma fonte.

A função  $f(X, Y)$  então é representada pela relação de dois componentes, a iluminância  $i(X, Y)$  e reflectância  $r(X, Y)$  .

## 2.8 A Técnica Time -of-Fligth (Tempo de voo )

Essa técnica envolve o envio de pulsos de luz para o objeto-alvo , a fim de medir a distância entre o emissor e a superfície do objeto.

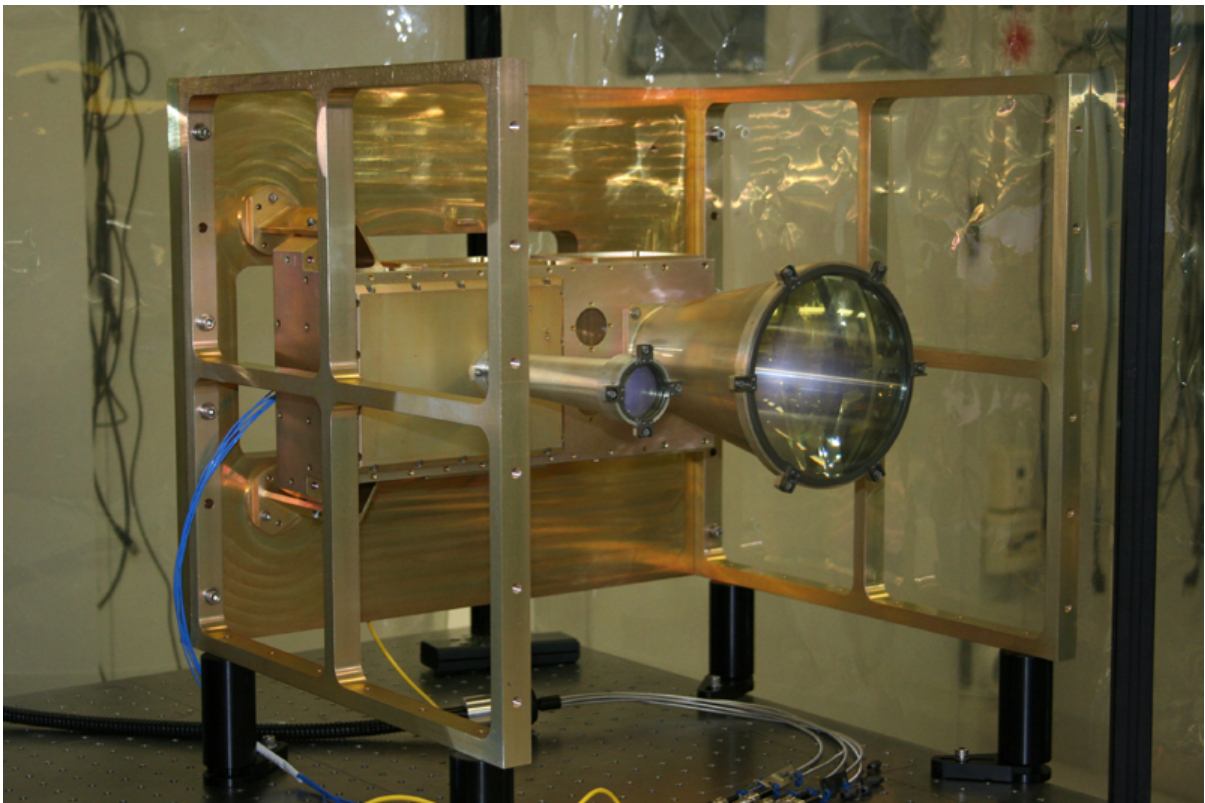
Essa técnica realiza o cálculo do tempo entre a emissão e a recepção do feixe de luz.

A partir destes dados é possível calcular a distância e posteriormente gerar as coordenadas cartesianas (x,y,z) dos pontos medidos, essa técnica foi usada no módulo de pouso do programa Apolo da Nasa.

Com a primeira patente do laser (Pat. N.º 3,353 115 T.H.MAIMONA em 14 de novembro de 1967), os primeiros ensaios resultam no sistema de navegação do programa espacial APOLO da NASA entre 1961 e 1972.

O Escâner orientador de pouso lunar LOLA (*LUNAR ORBITER LASER, Orbitador Lunar a Laser* ), projeto composto de 5 canhões lasers, e de uma câmera, o dispositivo gerava os dados, necessários para os cálculos da distância da nave com relação ao solo lunar , estabelecendo uma relação entre o tempo de envio do laser e a captação pela câmera estabelecendo os parâmetros no auxílio do pouso na Lua, o equipamento é mostrado na figura 8.

**Figura 8 – LOLA (*Lunar Orbiter Laser, Orbitador Lunar Laser*)**



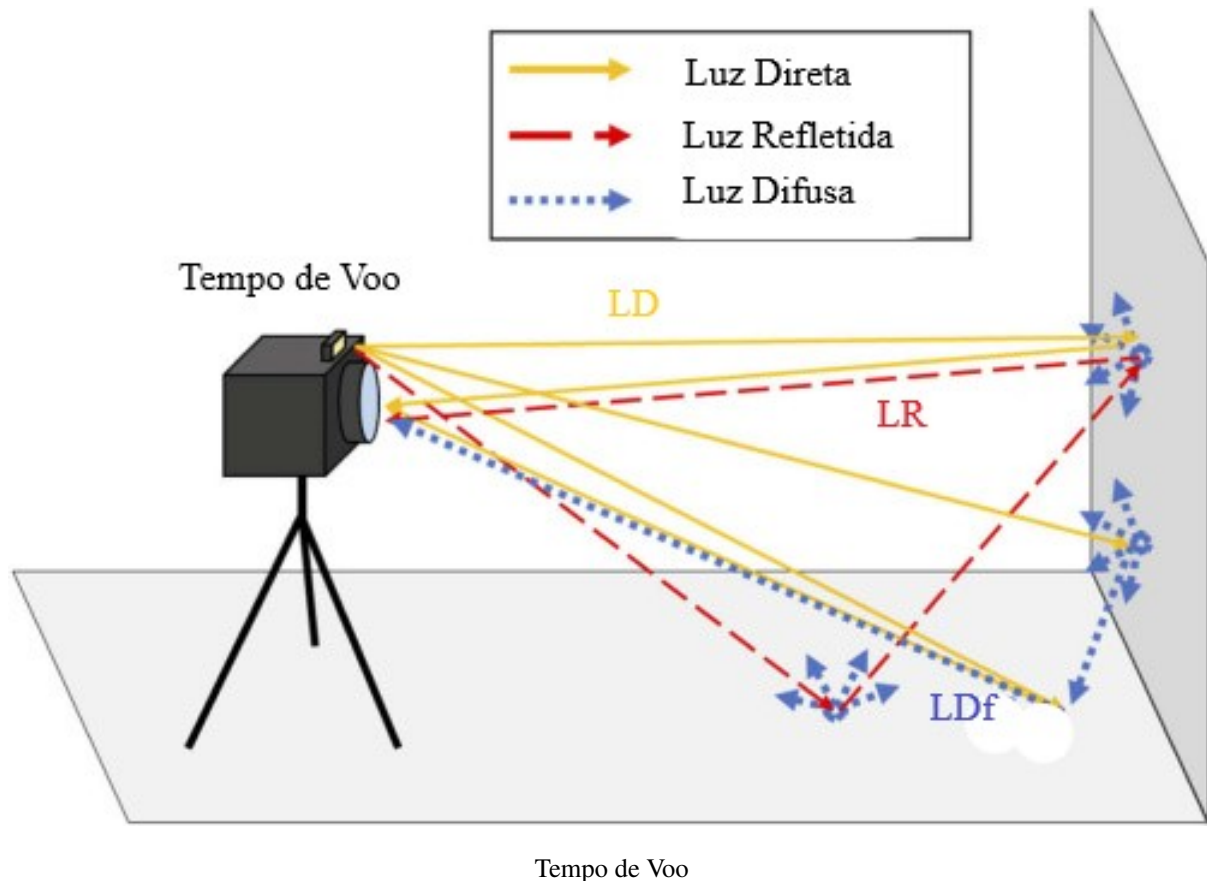
Nasa programa Apolo 1961 a 1972

### 2.8.1 Princípio do Funcionamento

A distância (LD) é determinada pela equação onde a diferença de tempo( $\Delta t$ ) do sinal

emitido e o seu retorno, percorrido na velocidade Luz  $C=300 \times 10^3 \text{ km/s}$ , o tempo de ida e de volta do feixe de laser também é considerado, dividindo-se a constante pela metade (BOEHLER; BORDAS; MARBS, 2003) como ilustrado na figura 9.

Figura 9 – Tempo de Voo



## 2.9 A Técnica da Luz Estruturada

Com essa técnica o equipamento é formado por uma câmera e um projetor. A fonte de luz do projetor emite padrões geométricos em determinado objeto. A câmera, é utilizada para capturar as deformações desses padrões na superfície do objeto.

Esse escâner utiliza um projetor que ilumina a cena com um padrão estruturado de luz infravermelha. A câmera, que está alinhada horizontalmente em relação ao projetor, captura esses pontos que são invisíveis e ilustrados na figura 10.



**Figura 10 – Padrão de Luz Estruturada**



[https://pt.wikipedia.org/wiki/Luz\\_estruturada](https://pt.wikipedia.org/wiki/Luz_estruturada)

## **2.10 A Triangulação a Laser**

O dispositivo emite um padrão laser sobre o objeto de estudo, enquanto o sensor ótico calibrado com o emissor identifica a posição desse padrão e calcula a informação de profundidade por triangulação.

## **2.11 A Historia da Fotogrametria**

Nessa seção será realizado um breve histórico da fotogrametria, que pode ser visto com maiores detalhes no trabalho de (ASP, 1980).

Os desenvolvimentos que conduziram ao presente estado da arte da Fotogrametria são muito anteriores ao invento da fotografia.

Aristóteles, em 350 A.C. mencionava como projetar imagens por meio ótico.

Leonardo da Vinci, em 1492 demonstrou graficamente os princípios da aerodinâmica e da projeção ótica. Também projetou mecanismos para o polimento de lentes.

Evidentemente, a prática fotogramétrica só pôde se desenvolver após a invenção da fotografia por Louis Daguerre em 1839.

Um ano depois, o geodesta francês Arago demonstrou a viabilidade do uso de fotografias nos levantamentos topográficos.

Recentemente, foram reconhecidos também os experimentos do químico brasileiro de origem francesa, Hercule Florence, que, na mesma época, em Campinas, S.P., inventou um processo heliográfico semelhante ao de Daguerre.

Os primeiros experimentos para verificar o uso da fotogrametria em mapeamento topográfico foram conduzidos pelo coronel francês Aimé Laussedat, em 1849, que obteve fotografias a bordo de balões.

Percebendo as dificuldades então existentes para a obtenção de fotos aéreas, Laussedat concentrou seus esforços no mapeamento usando fotogrametria terrestre.

Em reconhecimento ao seu pioneirismo, Laussedat recebeu o título de “Pai da Fotogrametria”.

Em 1909 o alemão Carl Pulfrich iniciou experimentos com estéreo pares, estabelecendo os fundamentos de muitos dos procedimentos instrumentais até hoje utilizados.

A invenção do avião permitiu um avanço na fotogrametria, que era, até então, praticamente limitada à fotogrametria terrestre.

Em 1913, o avião foi utilizado pela primeira vez para a tomada de fotografias aéreas visando mapeamento.

Durante a Primeira Guerra às aerofotos foram intensamente utilizadas, especialmente em atividades de reconhecimento.

No período entre às duas Guerras Mundiais, a Aerofotogrametria tornou-se uma tecnologia largamente utilizada para a produção de mapas.

Neste período desenvolveram-se equipamentos de restituição utilizados até recentemente; é o caso do Multiplex e do Estereoplanógrafo.

Deste período datam alguns métodos usados até hoje, como às técnicas de orientação empírica e a aerotriangulação analógica.

O processo de produção passou a ser desenvolvido por grandes companhias privadas na Europa e América.

Durante a Segunda Guerra as técnicas fotogramétricas foram utilizadas para atender às necessidades de mapas. A fotointerpretação foi utilizada em grande escala para fins de reconhecimento e inteligência.

Com o advento do computador permitiu progressos ainda maiores na ciência fotogramétrica. Inicialmente (década de 50) foi utilizado para cálculos de blocos de aerotriangulação.

Atualmente estamos assistindo à substituição da Fotogrametria analógica e analítica pela Fotogrametria Digital.

### 2.11.1 Fotogrametria Digital

A fotogrametria digital tem como sua principal característica a sua condição de utilizar imagens na forma numérica ao invés de imagens de películas, a aquisição dessa imagem na forma numérica é feita principalmente por câmeras digitais ou escâner.

Quando comparada aos demais métodos de levantamento topográfico, a fotogrametria digital, traz novas funções, como:

- Os recursos para processamento de imagens,
- Correlação,
- Automação de operações,
- Funções de contraste,
- Brilho, nitidez, equalização e análise multi-espectrais,
- A medição automática de pontos fotogramétricos no processo de orientação e aerotriangulação,
- Um menor custo,
- Ausência da necessidade de equipamentos de transferência de pontos.

Enquanto se utilizam todos os recursos otimizados e automatizados, mantendo a qualidade similar à dos sistemas analíticos, a produtividade da fotogrametria digital pode ser 3 vezes maior.

### 2.11.2 Fotogrametria Analítica

A fotogrametria analítica segundo (COELHO; BRITO, 2007)) é um tratamento matricial com soluções utilizando múltiplas imagens e uma análise completa da propagação de corretor analítico de imagens.

Na tabela 1 é feita uma comparação das características entre a fotogrametria digital e a fotografia analítica:

**Tabela 1 – Comparação entre as características das fotogrametrias digital e analítica**

---

Características	Fotogrametria Digital	Fotogrametria Analítica
	Depende dos seguintes parâmetros: Sistema ótico;	Depende dos seguintes parâmetros: Sistema ótico;
	Resolução geométrica e radiométrica do sensor (CCD);	Sensibilidade, resolução geométrica e radiométrica do filme;
Qualidade de Visualização	Conjunto de dispositivos da câmara CCD; Rigidez geométrica do CCD; Monitor de visualização; Dispositivos de visualização estéreos; Performance da placa de vídeo gráfica	Conjunto de mecanismos e dispositivos do sistema da câmara; Certificação da calibração da câmara. Os parâmetros de métricos da câmara não devem exceder os limites de precisão pronunciados pelo fabricante. Vantagens: Permite um melhor reconhecimento de detalhes pormenores que 10 cm no solo.

---

Características	Fotogrametria Digital	Fotogrametria Analítica
Mobilidade das Imagens	O desempenho depende da capacidade da placa de vídeo, do processador gráfico e da capacidade do monitor de atualização da tela (taxa de frequência vertical e horizontal)	O desempenho depende do mecanismo do restituidor (manivela pedal).
Ampliação e Redução Visual da Imagem	Capacidade de ampliação visual da imagem superior à analítica, embora dependa da resolução da imagem e do monitor. Sendo que a área útil do o limite no campo de visão	Capacidade de ampliação e redução visual inferior ao sistema digital.
Precisão das Medidas fotogramétricas	Depende da resolução do monitor e da qualidade das imagens.	Depende da qualidade das imagens e da precisão do equipamento.
Desempenho do Equipamento	Depende da capacidade de processamento que está relacionada ao processador, à memória, ao vídeo e à capacidade de armazenamento do computador	Depende uma parte da capacidade do computador, mas também da parte óptico-mecânica e das engrenagens mecânicas para os movimentos XYZ e de rotações do restituidor.
Funcionalidade	Multitarefa, permite: o processamento digital de imagens, a aerotriangulação automática, a geração automática do MDT, a geração de ortofotos, a integração em ambientes SIGs e outros	Tarefas limitadas, permitindo apenas: a orientação interna e externa, a coleta de pontos para a aerotriangulação e, a restituição. A geração de MDT é efetuada manualmente através da perfilagem do modelo e da coleta dos pontos

Características	Fotogrametria Digital	Fotogrametria Analítica
Manutenção do Sistema	<p>Atualizações de softwares;            Atualizações de “Hardwares” e outros dispositivos (monitores, placas gráficas para visualização estereoscópica, mouse, etc);            Organização dos diretórios; “Backups”.</p>	<p>Reparos e substituição de parafusos ou “encoders”, engrenagens, etc..            Alinhamentos dos componentes óticos e mecânicos; Reparos em outros problemas mecânicos;            Calibração, limpeza e lubrificação. Obs: Exige a disponibilidade de pessoal altamente especializado.</p>

## 2.12 Sensor de Profundidade Microsoft Kinect

O sensor de Profundidade Microsoft Kinect (figura 11) é um sensor de movimento desenvolvido pelo centro de pesquisa da Microsoft em parceria com a Prime Sense . O equipamento foi criado com a finalidade de ser um acessório inovador , para que o usuário pudesse interagir com o console Xbox 360 por meio de gestos e comando de voz. Desde que, foi lançado , o Kinect se tornou o periférico de games mais vendido pós-lançamento, entrando no livro dos Recordes (RECORDS,2011).

No entanto, a Microsoft não havia previsto que seu sensor se tornaria muito popular nas mãos de pesquisadores de todo mundo.

De Modo que em apenas seis dias apos seu lançamento, ele foi submetido a um procedimento de engenharia reversa.

Na figura 11 é mostrado o sensor de profundidade e sua composição.

Figura 11 – Microsoft Kinect

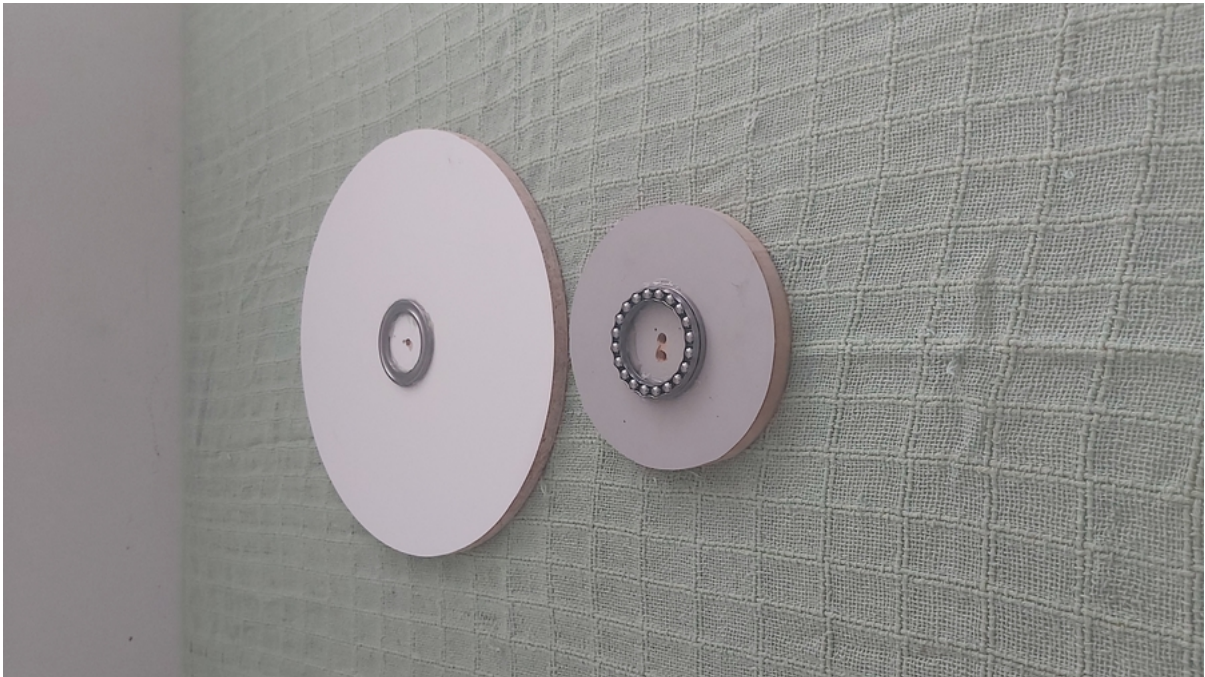


Microsoft

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho visa a compor um objeto 3D, com a utilização de um sistema que propicie a utilização da Técnica da fotogrametria. O sistema usou uma plataforma composta por um disco de 320 mm que dispõe em seu centro um rolamento Axial 51109 45x65X14 conforme a figura 12.

**Figura 12 – Plataforma Giratória**



Autor

Foi utilizado um tripé universal originalmente preparado para suportar uma câmera fotográfica e através de uma adaptação realizada com cola quente, para suportar o Sensor Microsoft Kinect mostrado na figura 13.



**Figura 13 – Tripe Universal**

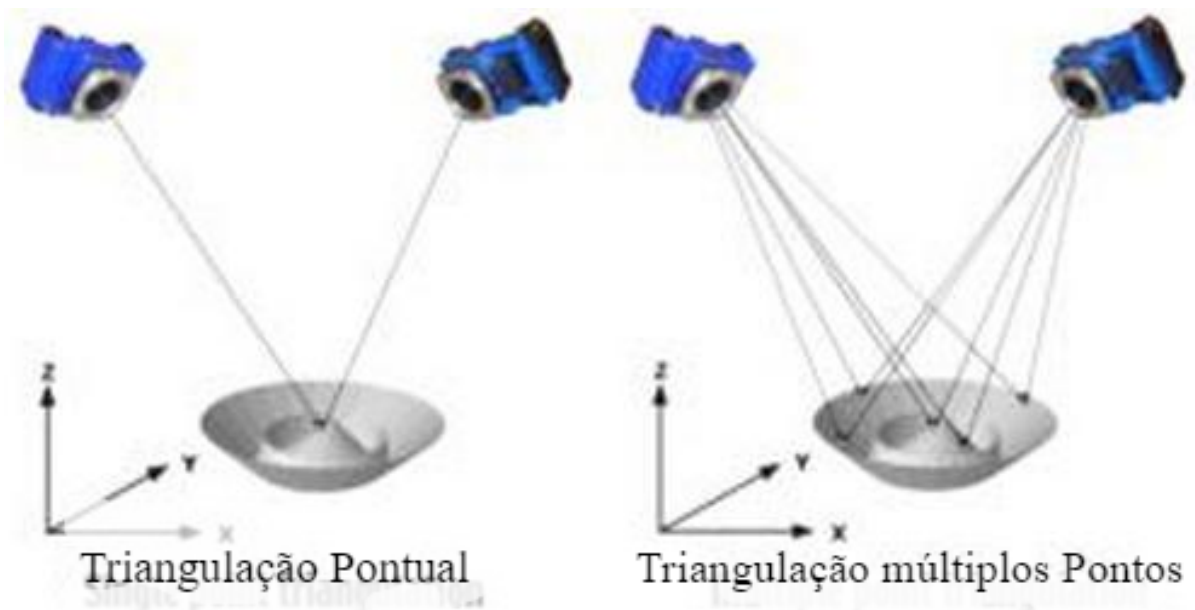
Autor

### **3.1 O método da Triangulação**

Para calcular as coordenadas no espaço de um ponto da cena são utilizadas duas imagens, obtidas de perspectivas diferentes.

De cada um dos pontos homólogos, é possível imaginar um raio que passa pela pupila da lente da câmera e se propaga no espaço.

A intersecção desses dois raios define a posição global daquele ponto, conforme ilustrado na figura 14 em um processo de triangulação.

**Figura 14 – Técnica de Triangulação**

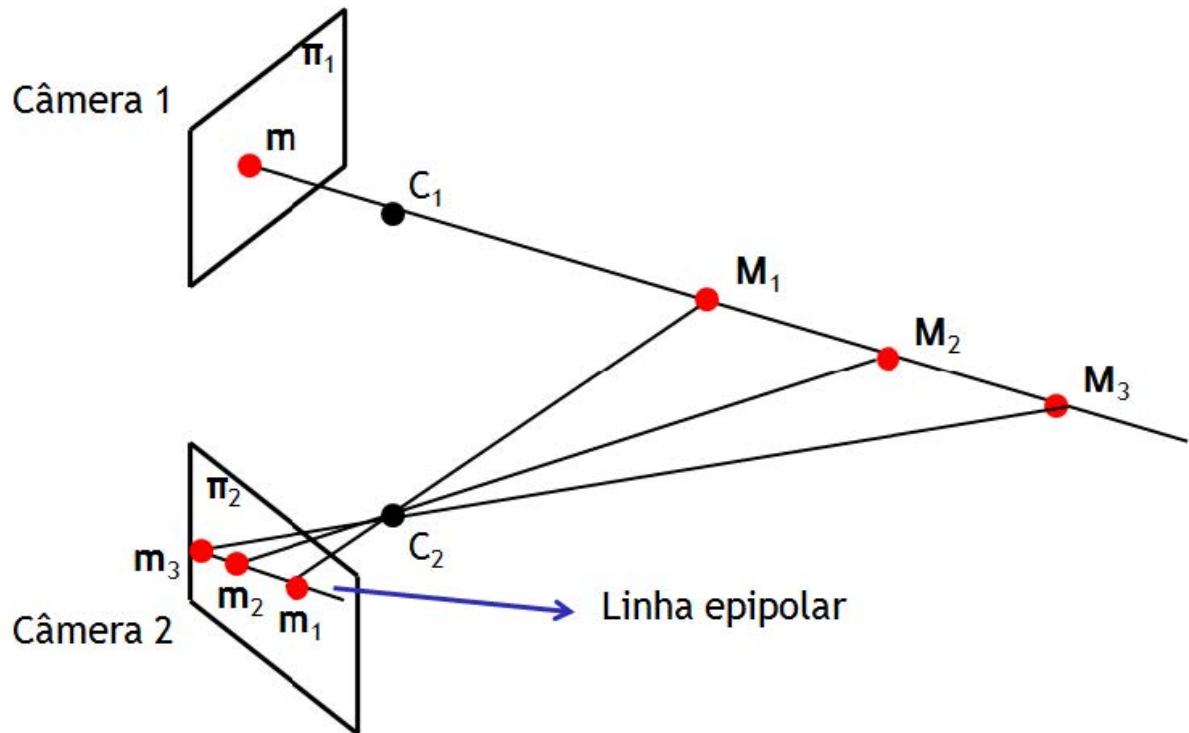
Geodetic.com

Para facilitar a determinação dos pontos homólogos de um ponto da cena é utilizada geometria epipolar ou visão estereoscópica, que depende somente dos parâmetros de calibração das câmeras.

A geometria estereoscópica, restringe a região de busca de pontos homólogos, uma vez que o ponto da cena projetado em uma das imagens deve se encontrar sobre a linha epipolar apresentada na figura 12 (ZAVWIESKA, 2000).

Na figura 15 é mostrado o processo de captura da Geometria epipolar ou visão estereoscópica.

Figura 15 – Geometria epipolar



### 3.2 Formando a Imagem 3D

Para formação deste objeto foi necessária obtenção de 16 imagens no ângulo de  $45^\circ$  a 50 cm do objeto e com luz incidente as imagens foram tiradas sequencialmente a cada  $22.5^\circ$  de uma cadeira giratória.

A composição do objeto 3D é formado através da soma de todas as imagens de tiradas em ângulos.

A figura 16 mostra a primeira imagem que fará parte da composição do objeto 3D.

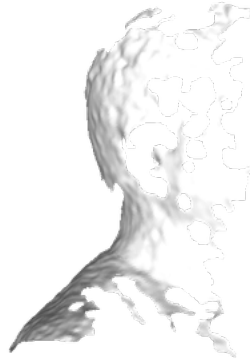
**Figura 16 – Primeira imagem 1-16**



**Figura 17 – Imagem 4-16**



**Figura 18 – Imagem sem textura**



**Figura 19 – Objeto final**



Para desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas nuvens de pontos capturados pelo sensor Microsoft Kinect e montado pelo software distribuído gratuitamente pela empresa 3DD Solutions o Kscan 3D conforme a figura 20.

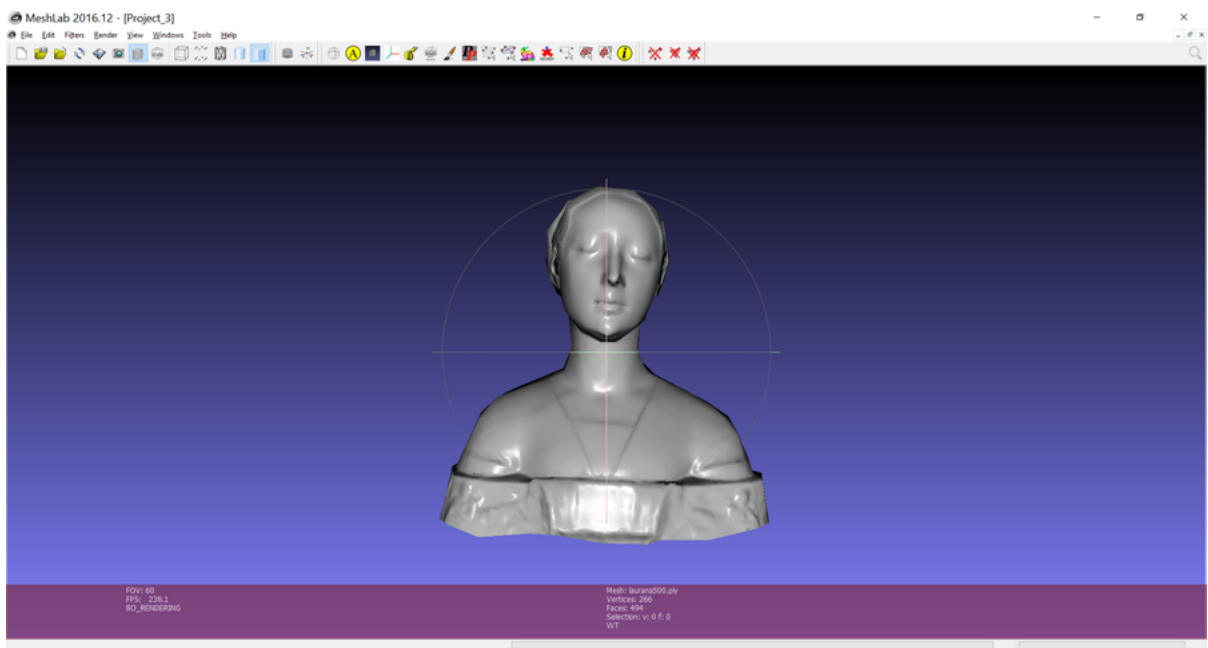
**Figura 20 – KScan 3D**



3DD Solutions

O software formou um arquivo no formato PLY que posteriormente pode ser corrigido em outro software como o Mesh Lab que se trata de um software fundamental no tratamento de imagens 3D que dispõe de vários filtros figura 21.

**Figura 21 – Mesh Lab**



Mesh Lab

## 4 RESULTADOS

Para obtenção dos resultados foi realizado 4 ensaios com dois modelos distintos, onde foi constatado a necessidade de um ponto de luz para evitar sombras e obter mais consistência na formação do modelo 3D.

Não foi possível compor o objeto 3D devido à dimensão do objeto, porque as imagens não davam o alinhamento correto no momento na formação.

O primeiro modelo, o dinossauro figura 22, a dimensão do modelo é de 20 cm.

**Figura 22 – Dinossauro 20 cm**



Autor

O Segundo modelo se trata de um pulverizador de fragrância com formato simples.

O modelo não apresenta muita reentrância como o modelo anterior, o dinossauro.

A captura não foi bem sucedida, devido à falta de iluminação direta, o que ocasionou na formação buracos no objeto 3D.

A figura 23 mostra o modelo pulverizador de fragrâncias.

**Figura 23 – Pulverizador de Fragrâncias**



Autor



## **5 CONCLUSÃO**

Por meio deste trabalho, foi possível criar o modelo 3D representativos de uma face humana a partir do sensor Microsoft Kinect, onde foi utilizado a face do autor para essa composição.

Para cumprir os objetivos firmados a este trabalho, realizou-se uma revisão teórica sobre os fundamentos empregados na renderização baseada em nuvem de pontos.

Considerando os requisitos propostos e a interpretação dos resultados apresentados, pode-se afirmar que em linhas gerais, os objetivos foram alcançados este trabalho não se propôs a implementação da reconstrução de superfície a partir de nuvens de pontos, nem a manipulação da nuvem somente da manipulação da visualização das imagens.

### Referências

- ASP, A. S. of P. Manual of photogrammetry. Falls Church, 1980.
- BOEHLER; BORDAS; MARBS. Investigating Laser Scanner Accuracy. **The International Archives of Photogrammetry , Remote Sensing and Spatial Information Sciences.**, Antalya, v. 34, n. 5/C15, p. 696 – 701, 3 2003.
- BÖSERMANN. **Advances in Photogrammetric Measurement Solutions:** Computer in Industry. 8. ed. [S.l.]: ELSEVIER, 2005. v. 56. 886-893 p.
- BRADSKI; KAEHLER. **OPEN CV.** [S.l.]: O’Reilly Media , Inc., 2008.
- CASASÚS. **Teoria da Imagem.** Rio de Janeiro: Salvat, 1979.
- COELHO; BRITO. **Fotogrametria digital.** 2. ed. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2007. 196 p.
- GOMES. Computação Gráfica: Imagem. IMPA, Rio de Janeiro, 1994.
- LEWIS. A conservação do fóton. **Nature**, Bibicode, 1926.
- LIGHTI; HARVEY. The Effects of Reflecting Surface Material Properties on Time-of- Flight Laser Scanner Measurements. **Symposium on Geospatial Theory, Processing and Application - Ottawa, 2002**, Processing and Applications, Ottawa, 2002.
- MORVAN. **Acquisition, Compression and Rendering of Depth and Texture for Multi-View Video.** 2009. Dissertação (Mestrado ) — University of Eindhoven.
- SANTOS. **Sistema optoeletronico automatizado para a medição de roscas externas de precisão:** Tese. 1993. 207 p. Dissertação (Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/157785/90642.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 14/10/2022.
- SARBOLANDI. Kinect range sensing : Structured\_ light versus time-of-flight Kinect. In: . [s.n.], 2015. p. 1 – 58. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/15405.0559.pdf>.
- TOMMASELLI. Um Estudo Sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamentos 3D a Curta Distância. **GEODÉSIA online - Revista da Comissão Brasileira de Geodésia**, 4 2003. ISSN 1415-1111.
- WOLF; BRINKER. Elementary Surveying. Harper Collins College Publishers, New York, 1994.
- ZAVWIESKA. **TOPOGRAPHY OF SURFACE AND SPINAL DEFORMITY.** Amisterdam: The International Archives of Photogrammetry And Remote Sensingg, 2000. XXXIII.