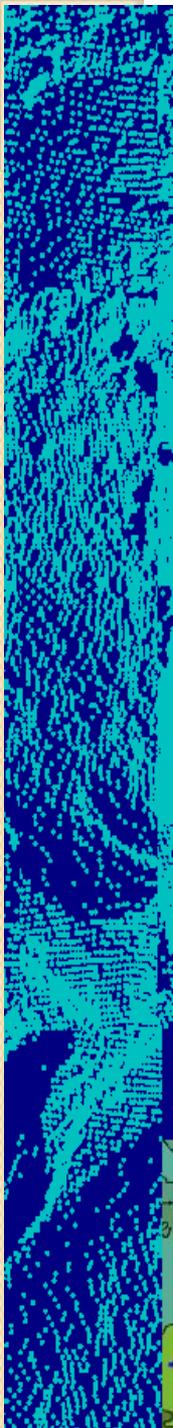


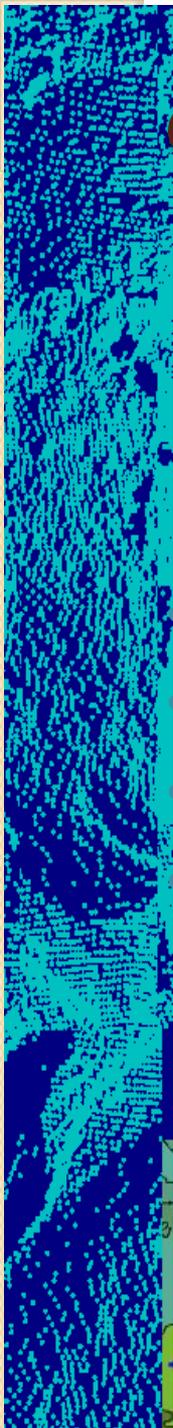


PROCESSAMENTO DE NUVEM DE PONTOS 3D
CGEO- 7028

**Range Imaging : utilização câmeras
de profundidade para coletas de
dados 3D**

UFPR – Departamento de Geomática
Prof. Jorge Centeno
2023
copyright@ centenet

- 
- ANDREY AUGUSTO ALVES DE OLIVEIRA. Modelagem tridimensional de superfícies utilizando imagem TOF - estudo com a câmara pmd camcube 2.0
http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/26166/Dissertacao_OLIVEIRA_2011.pdf?sequence=1
 - Robert Lange. **3D Time-of-Flight Distance Measurement with Custom Solid-State Image Sensors in CMOS/CCD-Technology**
<http://dokumentix.ub.uni-siegen.de/opus/volltexte/2006/178/pdf/lange.pdf>

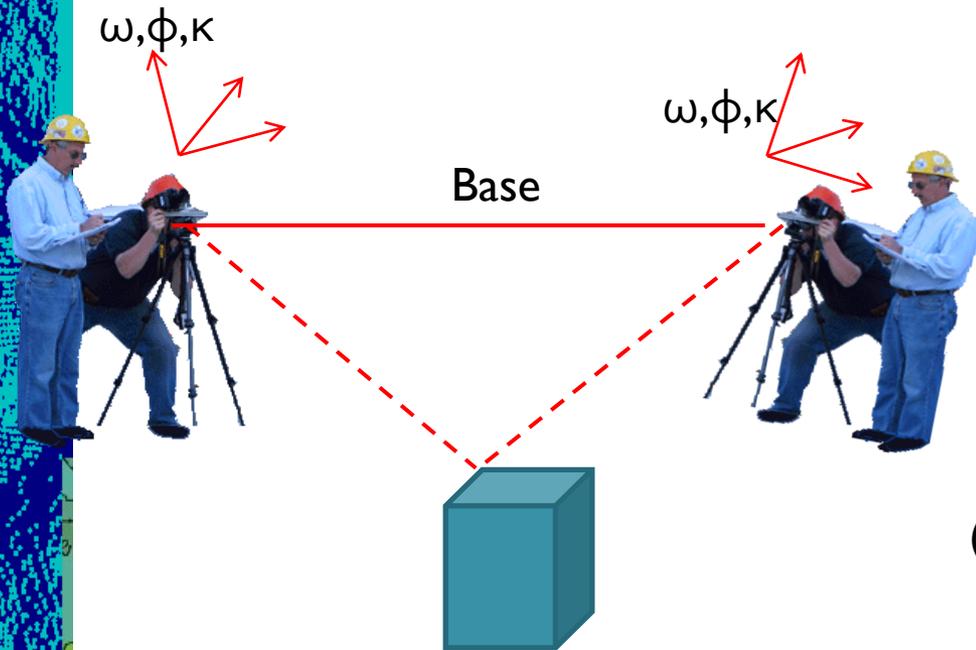
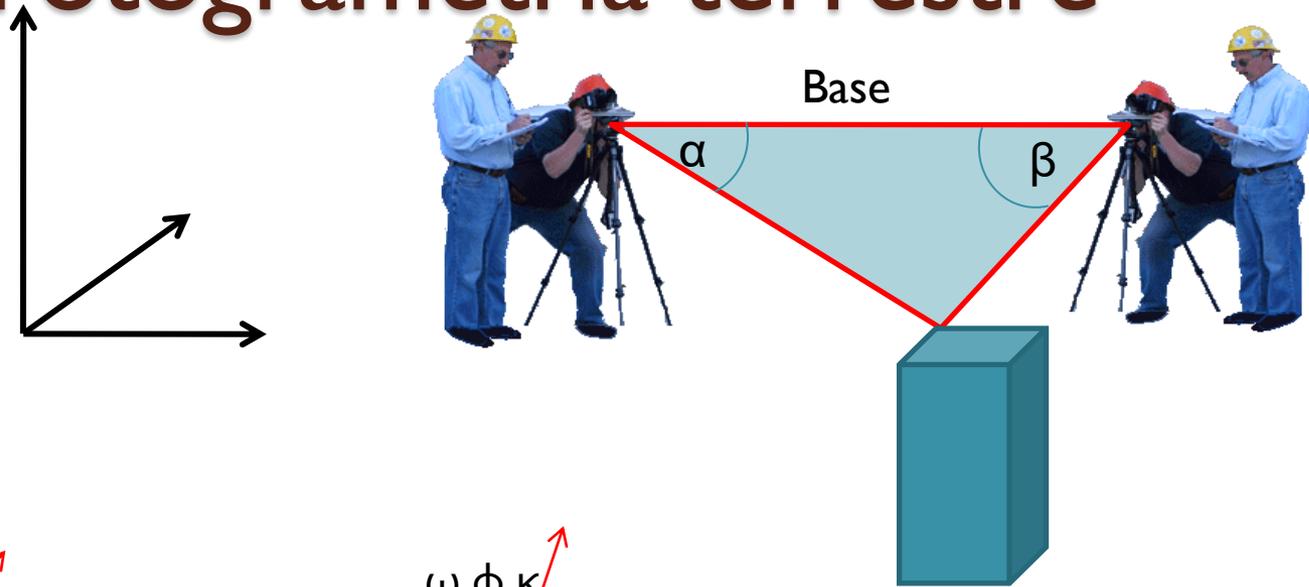


coleta de dados tridimensionais

Métodos de coleta de dados tridimensionais a curta distância

- Topografia
- Fotogrametria
- Laser scanner
- Câmaras de distância

Fotogrametria terrestre



$$(x,y,z)=f(\omega_1,\phi_1,\kappa_1; \omega_2,\phi_2,\kappa_2, B)$$

Fotogrametria terrestre

- Método clássico de coleta de imagens para a formação de modelos estereoscópicos que permitem a visão tridimensional.
- Os ângulos (ω, ϕ, κ) são obtidos com ajuda da distancia focal e as coordenadas de imagem (duas ou mais imagens)
- As imagens são capturadas usando sensores digitais CCD ou CMOS
- Posteriormente, as imagens são processadas
- Atualmente o processo é digital.



Institute of Natural Resource Sustainability



CMOS & CCD
<http://gadgetophilia.com/>

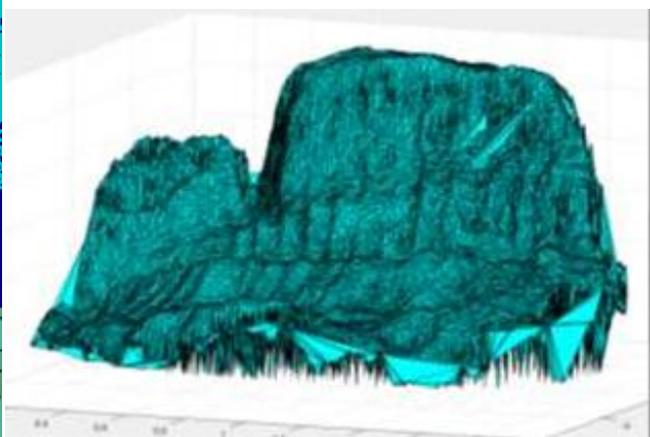
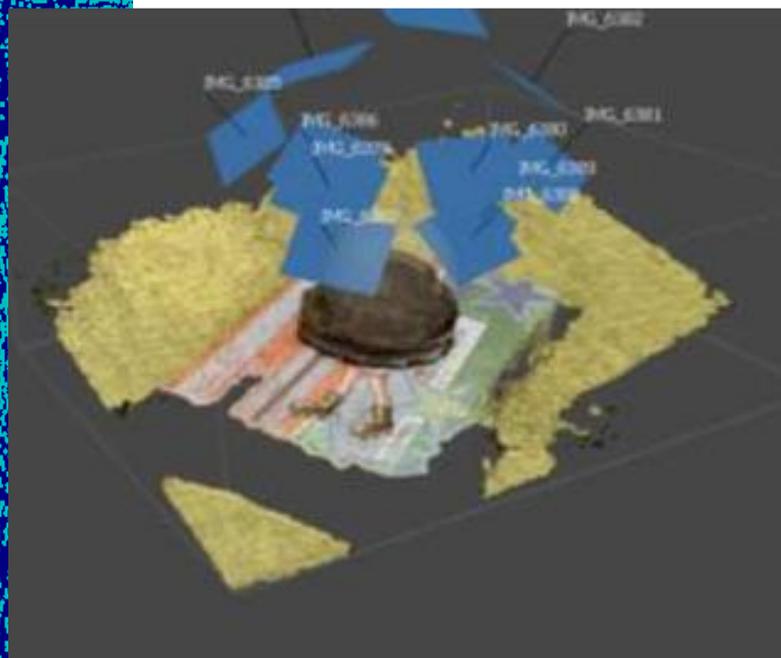
Exemplo: Igreja Matriz de Nossa Senhora do Porto (Morretes PR)



Detecção de pontos manual

Foram tomadas várias fotos, das quais as 28 foram selecionadas. Nestas fotos foram marcados aproximadamente 430 pontos, que foram todos correlacionados em duas ou mais fotos para a reconstituição do modelo.

O resultado pode ser complementado com as texturas derivadas das fotografias.

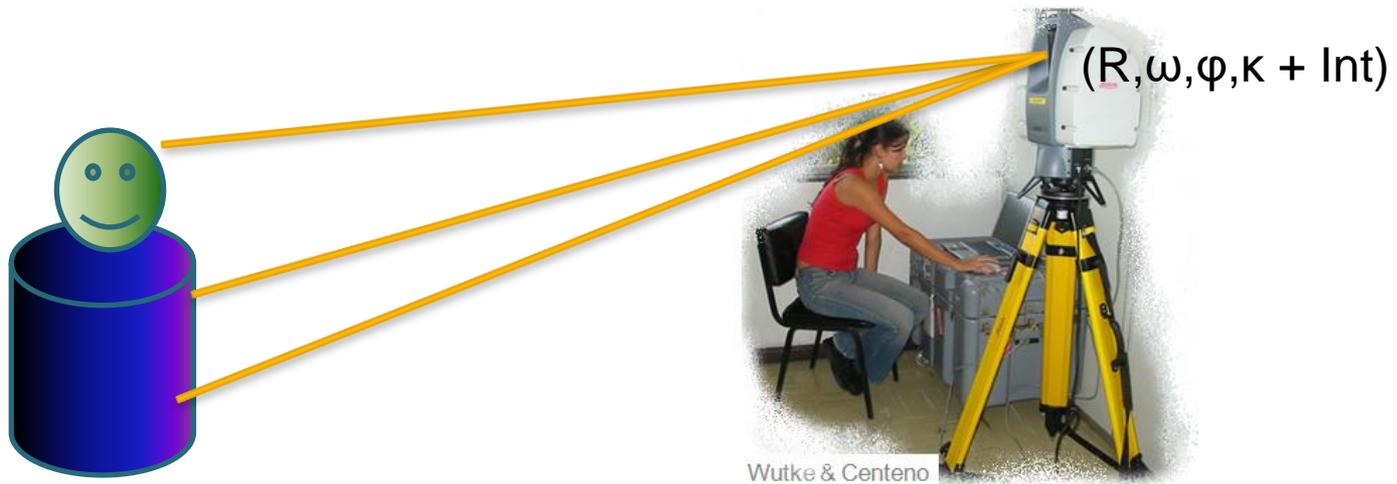


- Detecção automática
- SIFT

- Ou várias fotos, buscando pontos homólogos com ajuda de PDI.

Laser scanner

Método relativamente novo (final do século passado) baseado na emissão e medição de raios laser. Oferece a vantagem de coletar uma grande quantidade de pontos da superfície do objeto em curto tempo.



Comparação

Fotogrametria

- Cobre uma grande área instantaneamente, possibilita a obtenção de filmes (dinâmica);
- São necessárias pelo menos duas fotos
- Dados de cor (RGB).

Laser Scanner

- Fornece diretamente uma grande quantidade de coordenadas 3D
- Não é instantâneo, faz varredura.
- Apenas informação de uma banda espectral, geralmente IV.
- Ver artigo Tommaselli (Geodesia on-line)

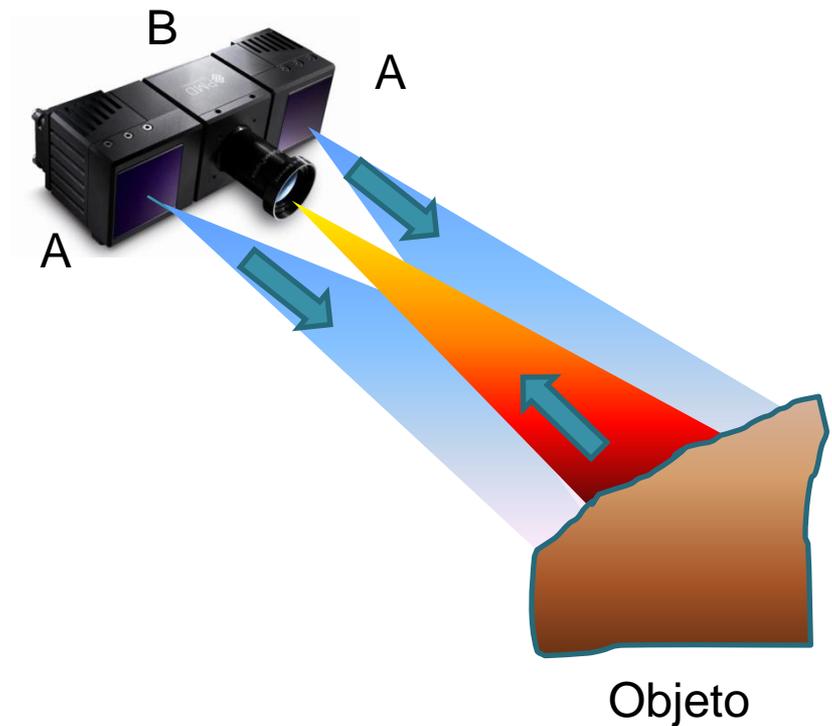
Câmaras de profundidade (*range cameras*)

São equipamentos que

- usam a tecnologia CMOS (similar a uma câmara digital)
- para medir distancia entre sensor e ponto (de maneira similar ao laser scanner)

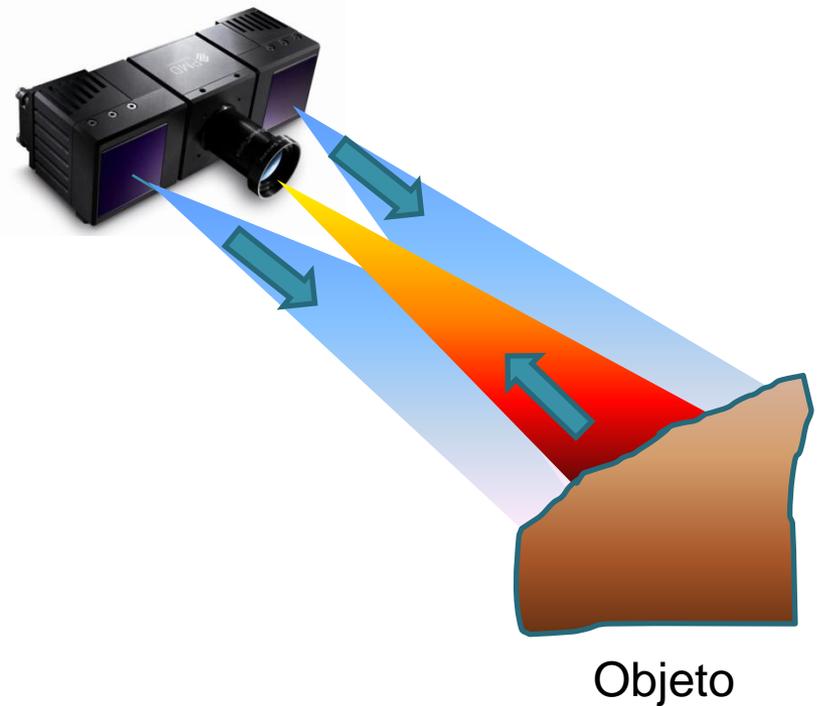
○ equipamento consiste de:

- Uma fonte artificial de radiacao eletromagnética (A)
- E uma câmara com CMOS (B)



Vantagens/Desvantagens

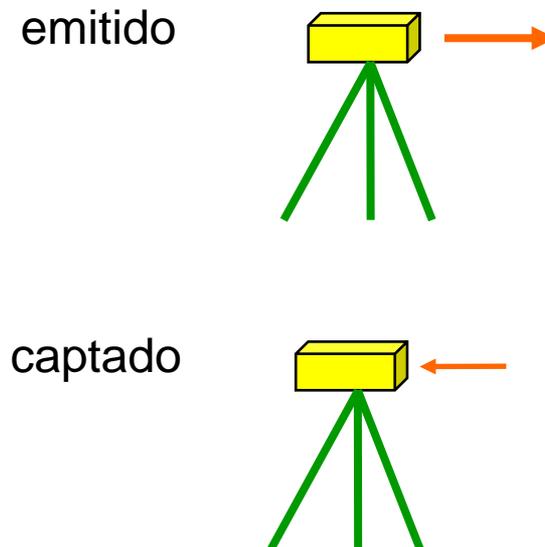
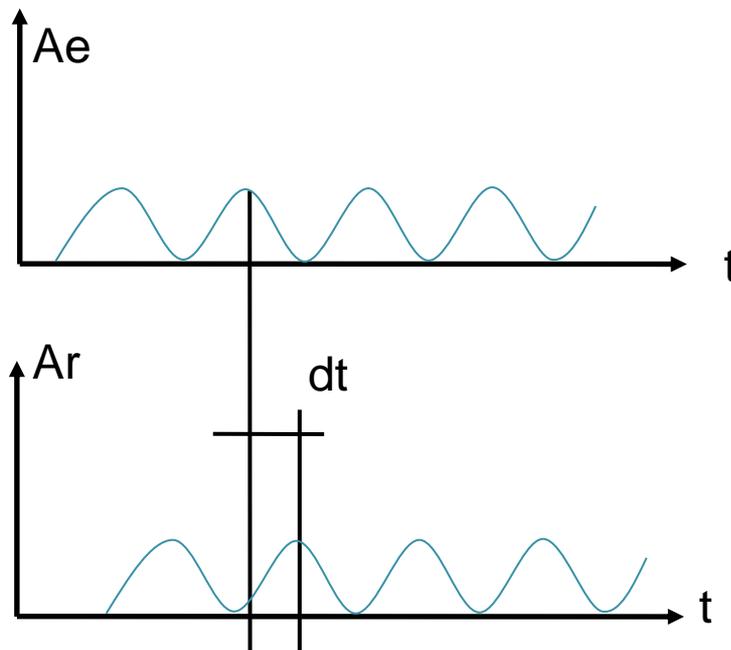
- Cobre uma grande área instantaneamente, possibilita a obtenção de filmes (MOVIMENTO!)
- Fornece diretamente uma grande quantidade de coordenadas 3D
- Uma imagem é suficiente para estimar a distância
- Apenas informação de uma banda espectral, geralmente IV.

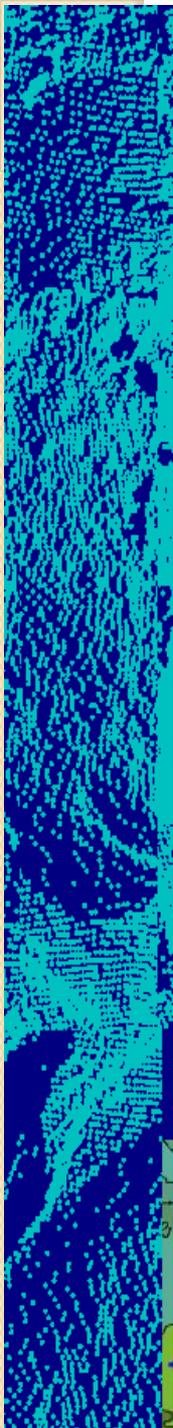


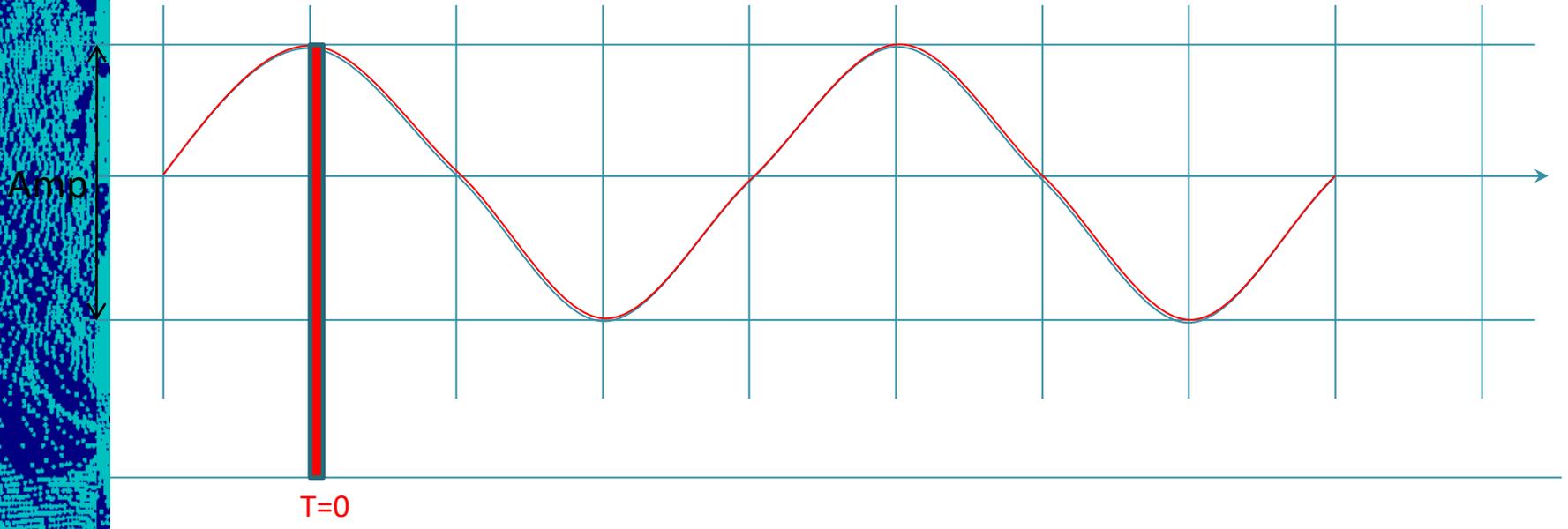
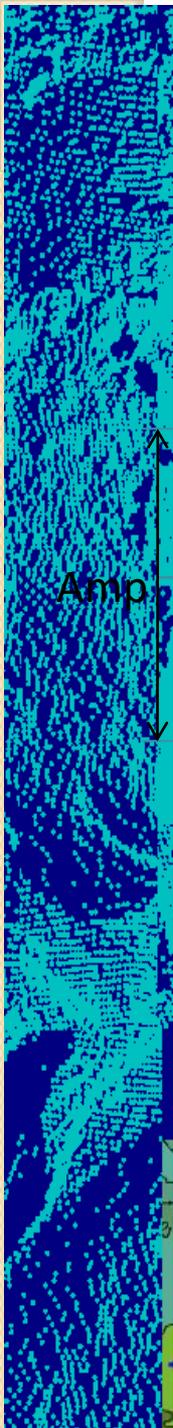
Retardo do pulso refletido

A energia usada é modulada como um sinal retangular (50%)

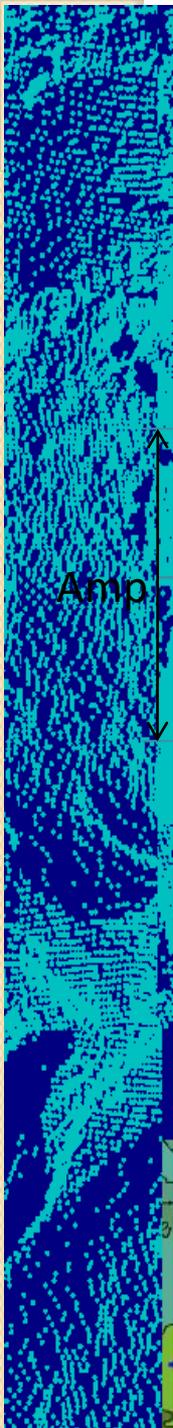
O sinal captado pelo sensor sofre um atraso em relação ao sinal emitido em função da distancia à superfície.



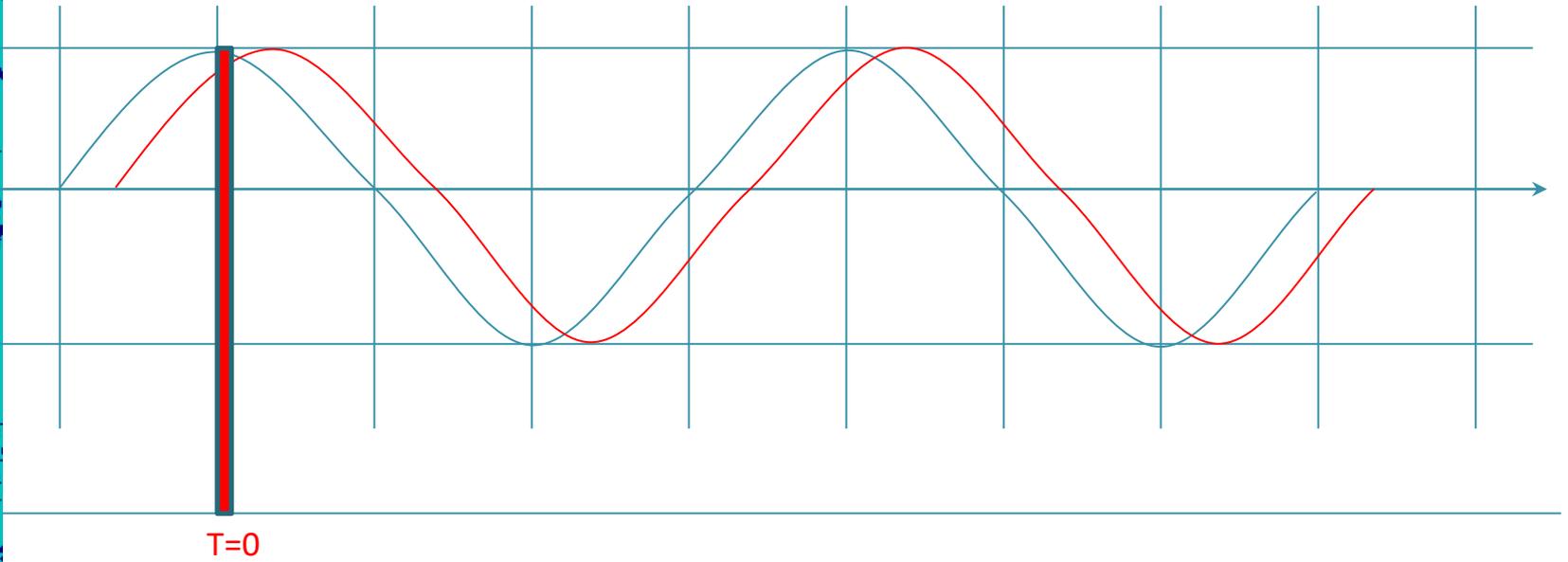
- 
- A diferença de fase é estimada a partir da correlação entre o sinal emitido e o sinal de retorno



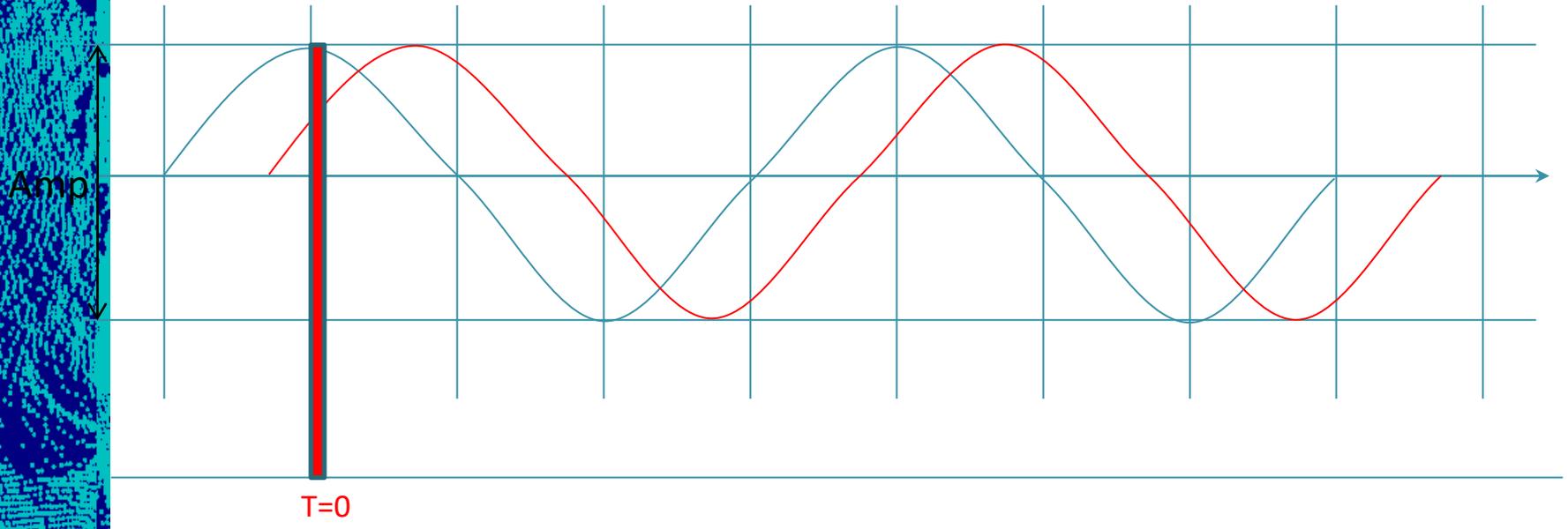
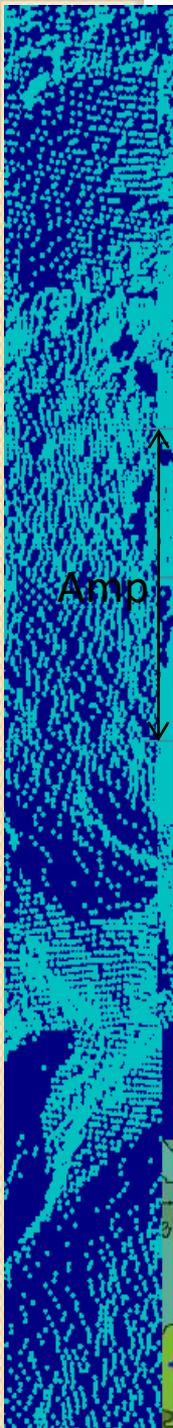
Se a diferenca de fase é nula,
O objeto está a $d=0$ ou...?



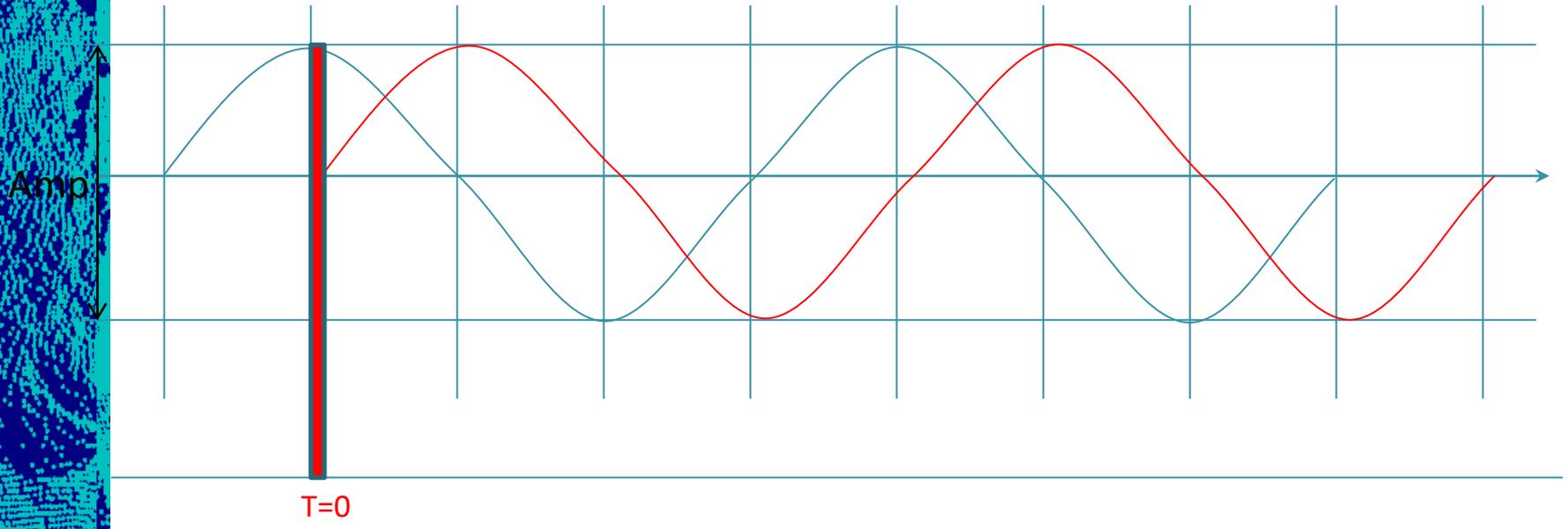
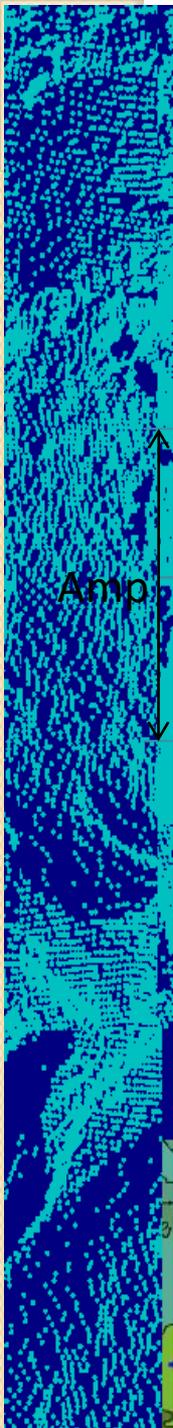
Amp

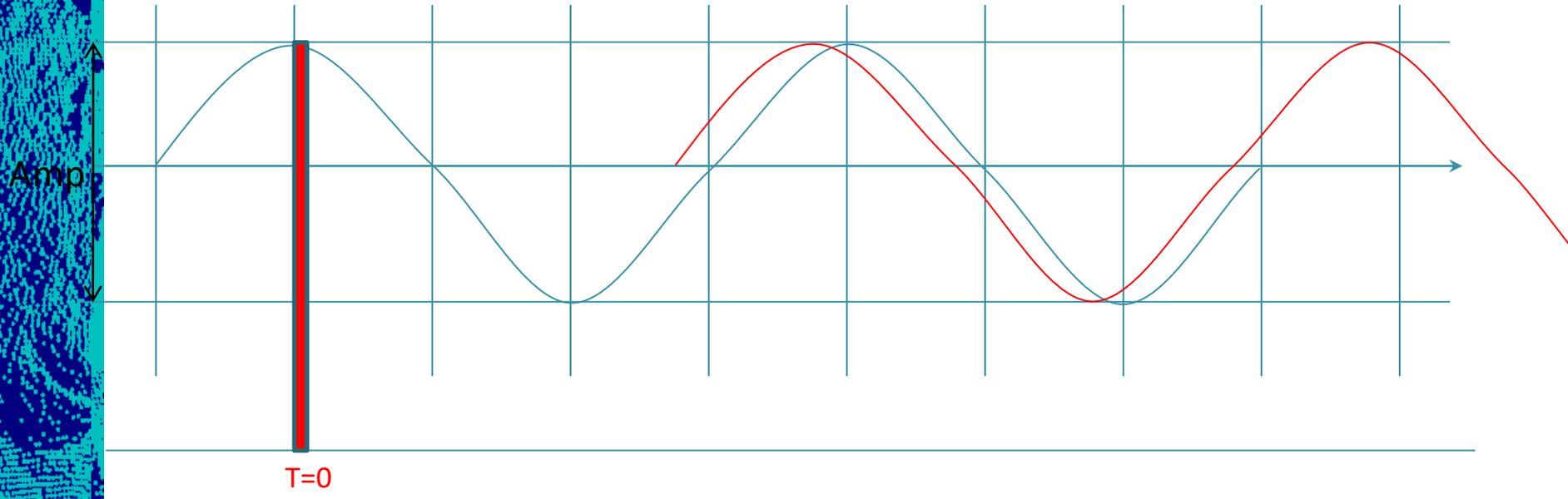
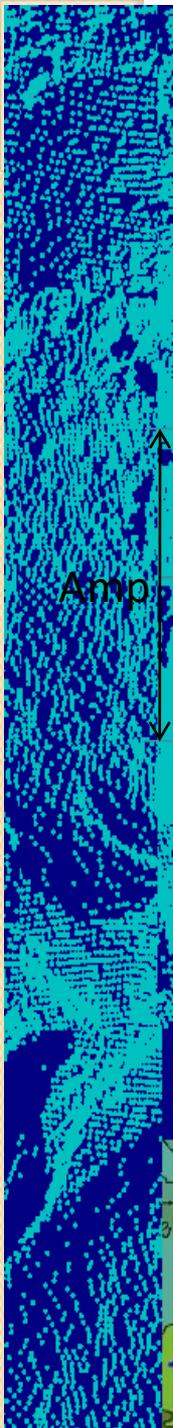


Se a diferenca de fase é nula,
O objeto está a $d=0$ ou...?



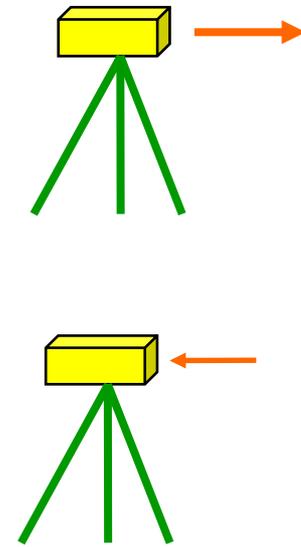
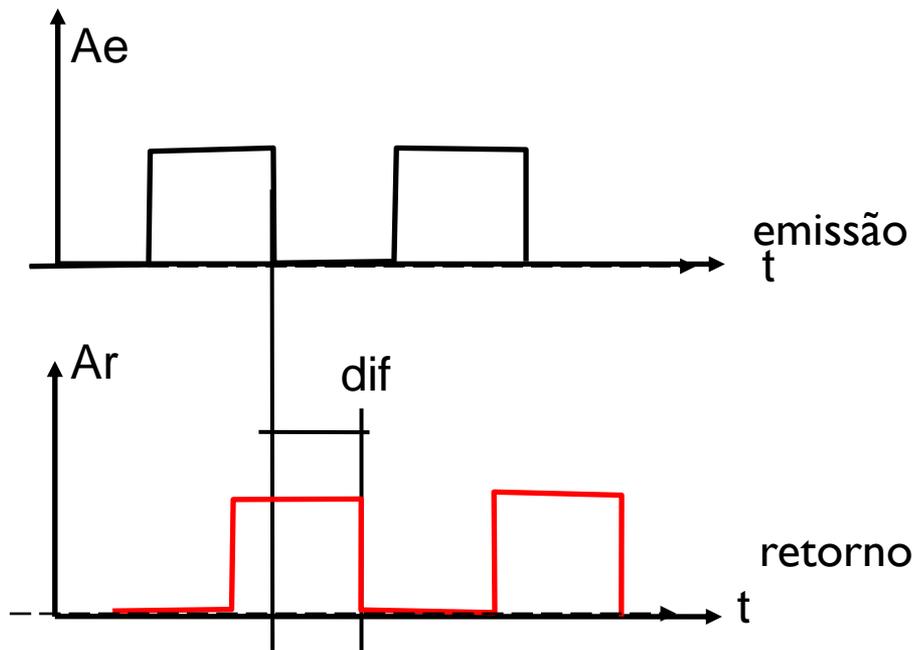
Se a diferenca de fase é nula,
O objeto está a $d=0$ ou...?





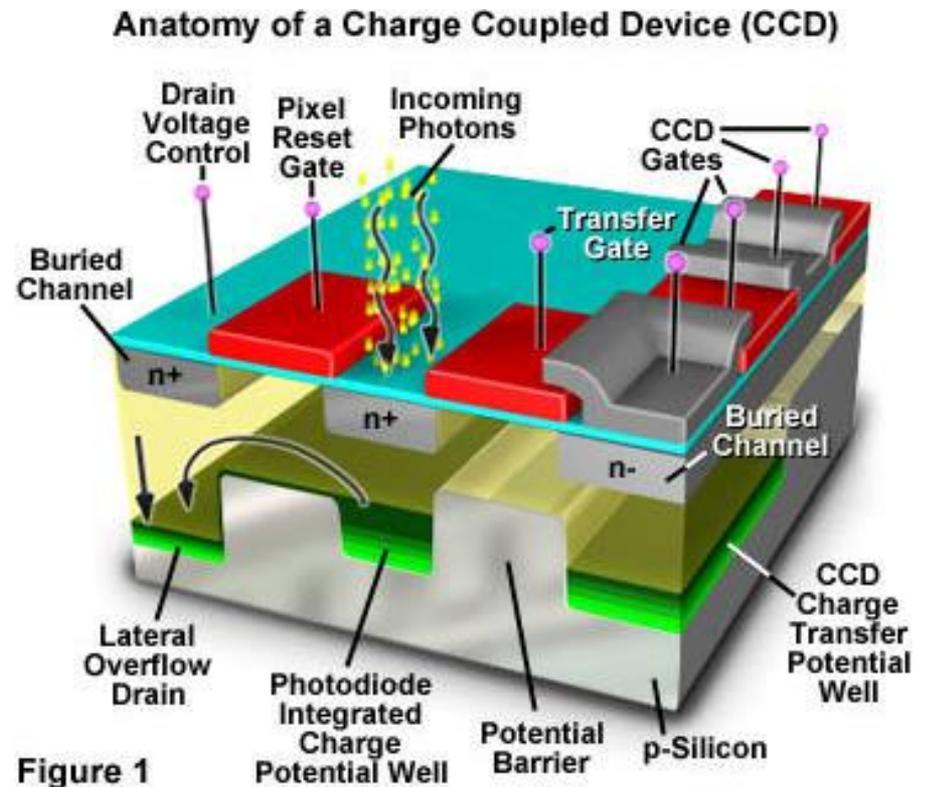
Sistema de pulsos

A energia usada é modulada como um sinal retangular (pulso)



CCD/CMOS tradicional

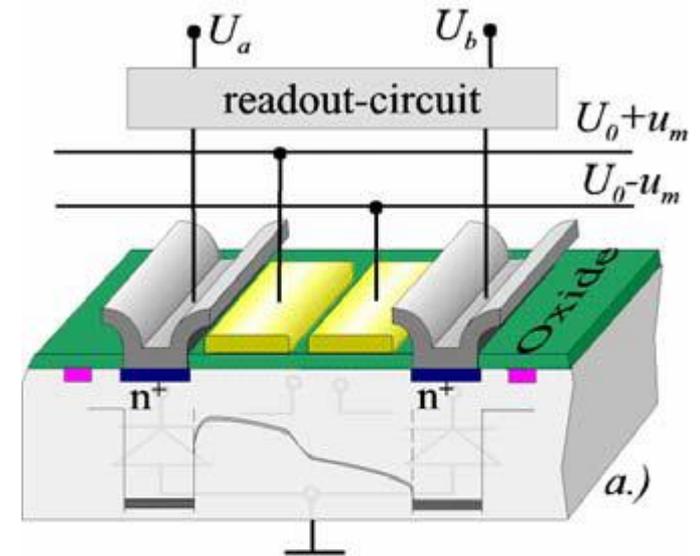
Como funciona o
CCD tradicional?
CMOS?



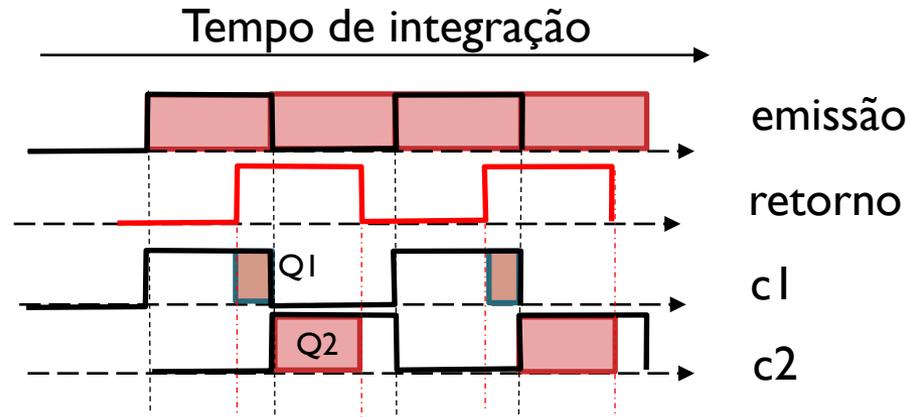
FONTE. www2.informatik.hu-berlin.de

Princípio de operação

- O sensor CMOS utiliza dois elementos fotosensível para cada pixel (PMD).
- 2 eletrodos transparentes (amarelos)
- Camada de isolante (oxide)
- Substrato
- Diodos de leitura (readout)



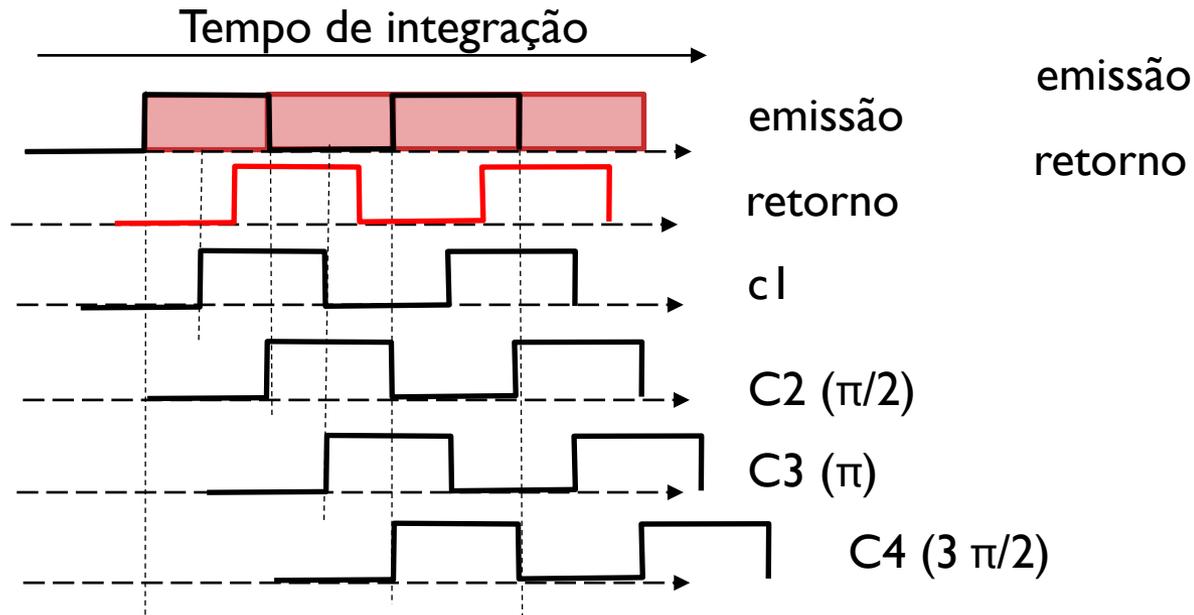
método que usa pulso.



- O objeto é iluminado por um breve período (Δt), e a energia refletida é amostrada em cada pixel, em paralelo, usando dois intervalos defasados, C1 e C2, com o mesmo Δt .
- As cargas elétricas acumuladas durante essas amostras, Q1 e Q2, são medidas e usadas para calcular a distância:

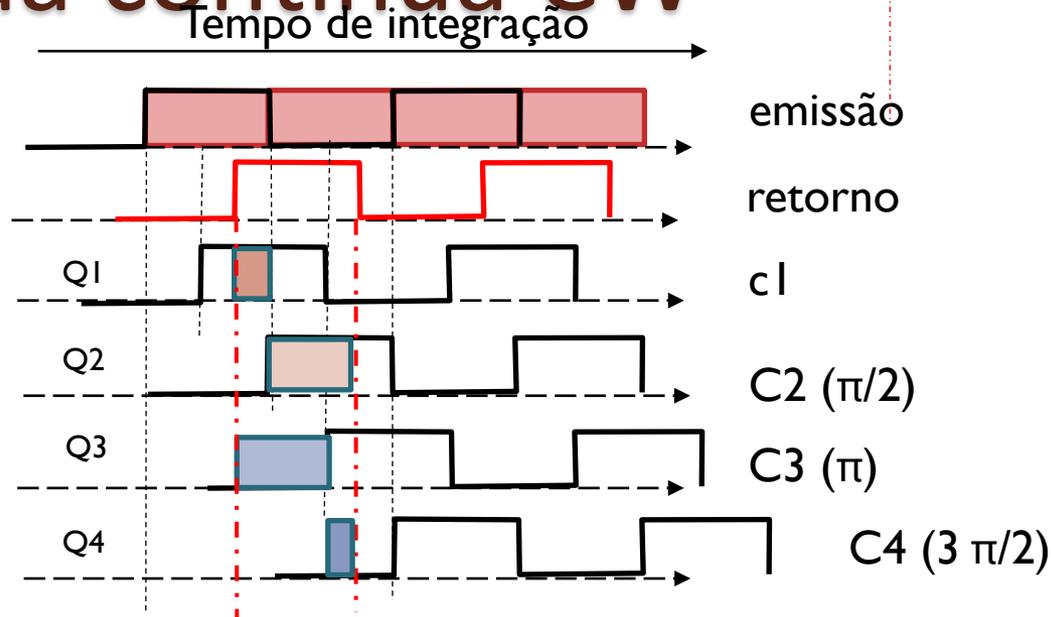
$$d = 0,5 c dt \left(\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \right)$$

Onda contínua CW



- Onda contínua (continuous wave CW) :
- O retorno é uma onda contínua. Para modelar a diferença de fase são coletadas quatro amostras, defasadas de 90 graus em relação à onda emitida.

Onda contínua CW

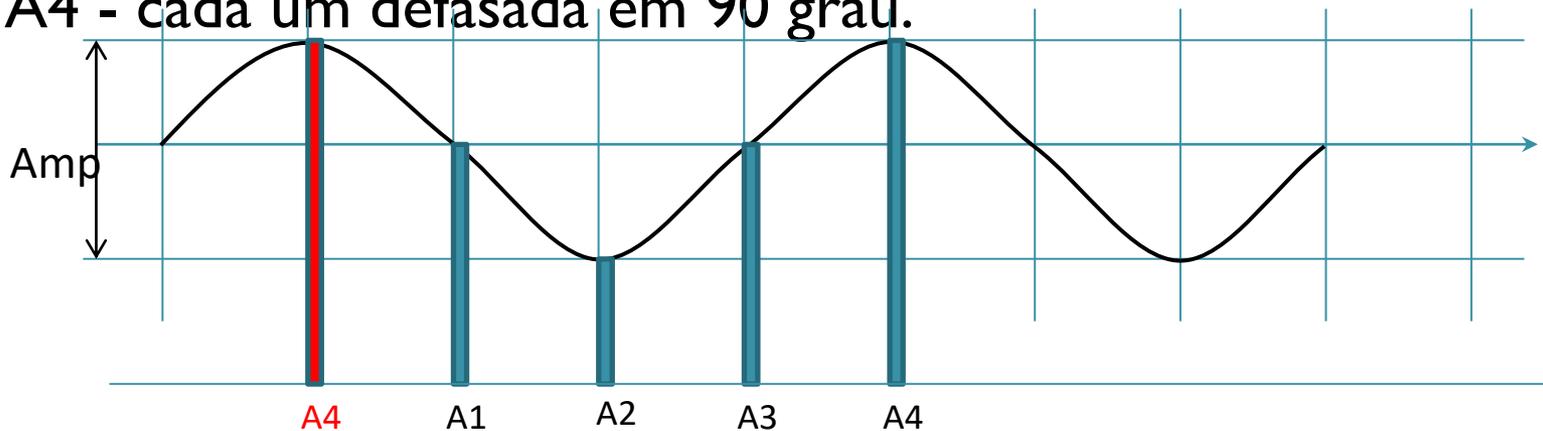


- Onda contínua (continuous wave CW) :
- O retorno é uma onda contínua. Para modelar a diferença de fase são coletadas quatro amostras, defasadas de 90 graus em relação à onda emitida.

$$\Phi = \text{atan} \left(\frac{Q1 - Q3}{Q2 - Q4} \right)$$

Análise da função de Autocorrelação

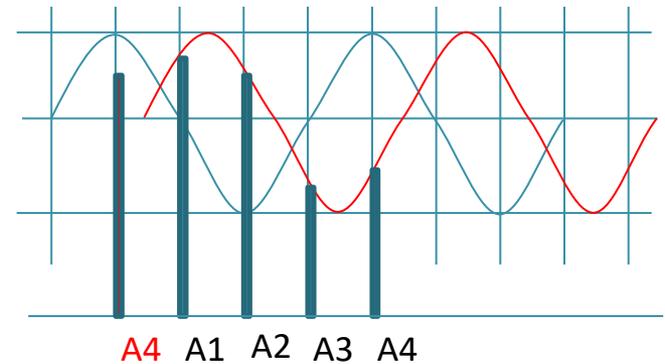
- Em onda contínua:
- Para calcular a distância entre o alvo e câmera, a função de Autocorrelação do sinal emitido e o recebido é analisada.
- Para modelar a diferença de fase do sinal recebido, quatro amostras da função correlação são suficientes, A1, A2, A3 e A4 - cada um defasada em 90 grau.



fase

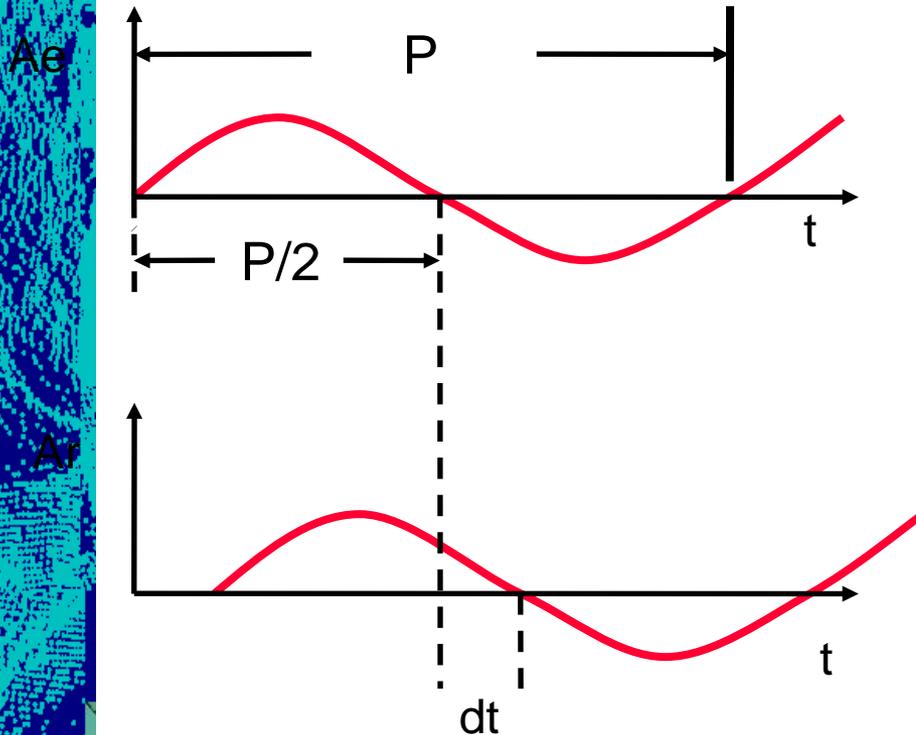
- A diferença de fase ϕ é dada por:

$$\Phi = \text{atan} \left(\frac{A1 - A3}{A2 - A4} \right)$$



A distância ao objeto ?

O tempo de viagem da onda e diretamente proporcional à diferença de fase entre o sinal recebido e o emitido.



$$P \cong 2\pi$$
$$dt \cong \Phi$$

P : período da onda
 dt : retardo da onda
 Φ : diferença de fase

então:

$$dt = \frac{\Phi P}{(2\pi)} + n P$$

n= número de ciclos completos (podem ser desprezados).

$$dt = (\Phi P) / (2\pi)$$

ou, em termos de frequência (f_{mod}):

$$dt = \Phi / (2\pi f_{\text{mod}})$$

com isto, a distância (R) é:

$$R = 0,5 * c * dt$$

$$R = c * \Phi / (4\pi f_{\text{mod}})$$

Um exemplo: PMD[vision]®CamCube 3.0.

PARÂMETROS	VALOR PADRÃO	OBSERVAÇÕES
Tipo do sensor:	PhotonICs PMD41k-S	(200x200 pixels)
Distância de medição:	0,3 – 7metros	Precisão na medida de distância (1σ): < 3mm Para área central da imagem obtida à 2m do sensor, com refletividade de 90%.
Taxa de captura de dados (3D):	40 fps	
Campo de visão:	40°x40°	Montagem da lente CS: f=12,8mm
Comprimento de onda da fonte:	870nm	Infra-vermelho próximo

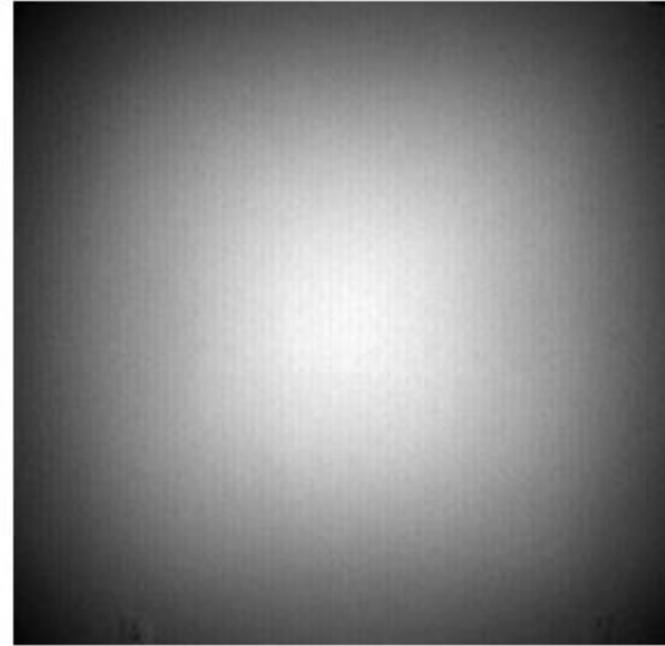
FONTE: Adaptado de PMD Technologies (2009)



Coleta de dados



a



b

Imagem obtida com câmara infravermelha

- A) Dispositivo iluminando uma parede branca
- B) detalhe da área iluminada

PMD Flexx



flexx2 3D Camera



38,000 3D Pixels

224 x 172 Resolution

56 x 44 Degree Field-of-View

VCSEL with 940-nm Wavelength

Encased, CE Certified, Class 1 Laser Product

Transformação de sistemas câmara para objeto

- $$Z = r \cos\left(\text{atan}\left(\frac{r}{f}\right)\right)$$

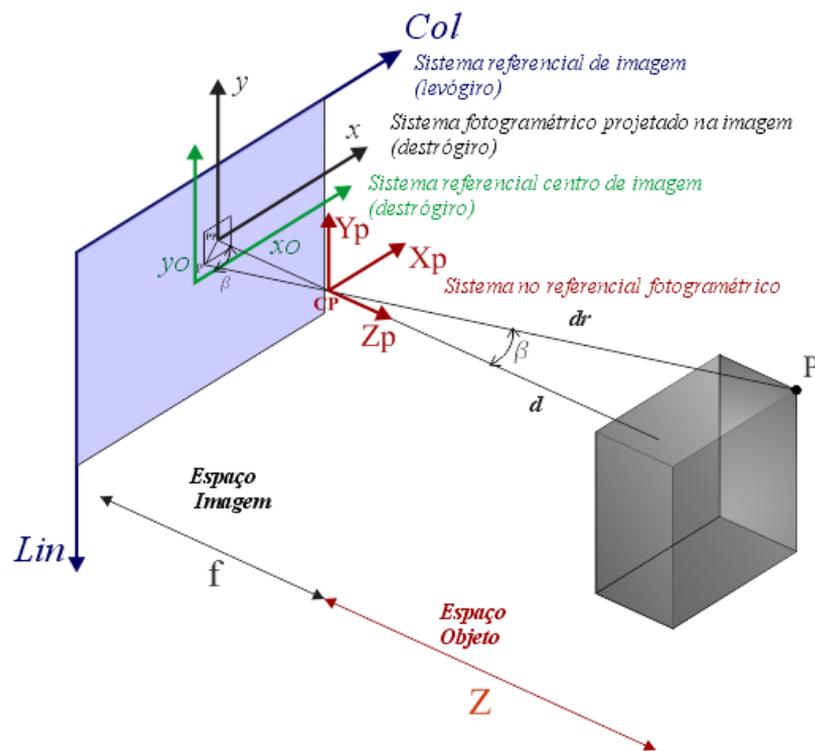
r=distância do pixel ao centro da imagem

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

f=distância focal

Escala:

- $E = Z/f$
- $X = x * E$
- $Y = y * E$



Erros esperados

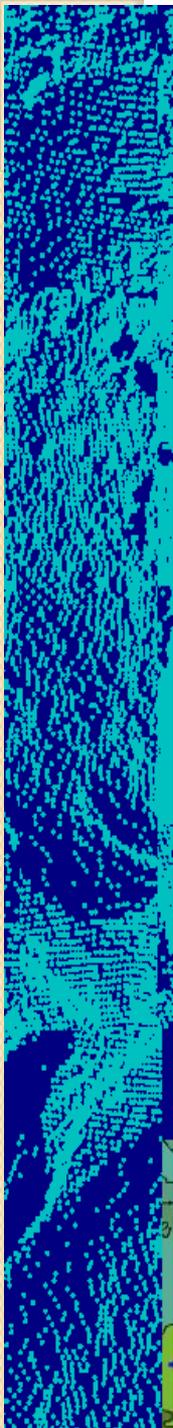
Segundo Gokturk et al. (2004), a resolução em distância (Range) R_R é dada por:

$$R_R = C / (2 f_m) \cdot (A / P \cdot q_e \cdot r \cdot T)^{1/2}.$$

- f_m : freqüência modulada,
- q_e : eficiência quântica,
- T : tempo de integração (integration time),
- P : Potencia óptica da fonte,
- r : reflectância,
- A : área total iluminada (target),
- C : constante.

A resolução pode ser melhorada

- Variando o tempo de integração (aumentando), porém evitando saturação do sensor.
- Minimizando a área iluminada, o que é um fator crítico devido à baixa resolução espacial do sensor.



Uma camera PMD tem dois parâmetros que podem ser variados pelo usuário:

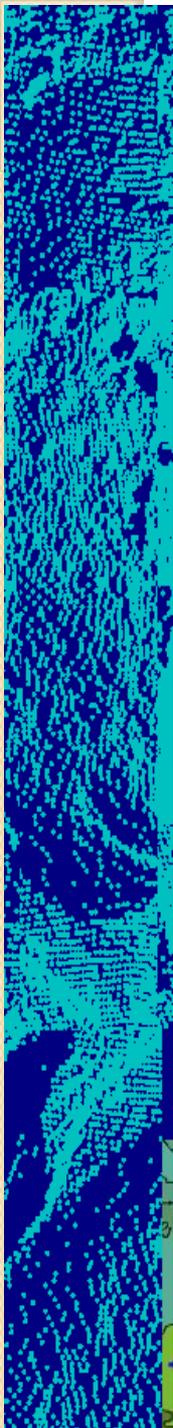
- the modulation frequency
- the integration time.

Experimento: mudança do tempo de integração

The PMD camera has two adjustable parameters: the modulation frequency and the integration time.

Imagens de uma parede plana foram obtidas desde várias distâncias, com diferentes tempos de integração, e o desvio padrão da distância medida foi calculado para cada experimento.

Distance [cm]	Integration time [μ s]
108	500
125	1000
172	1500
215	1700
260	1800
310	1900
360	2000
430	2500
390	3000
550	3500
600	4000
650	4500
	5000
	5300
	5500
	6000
	7000

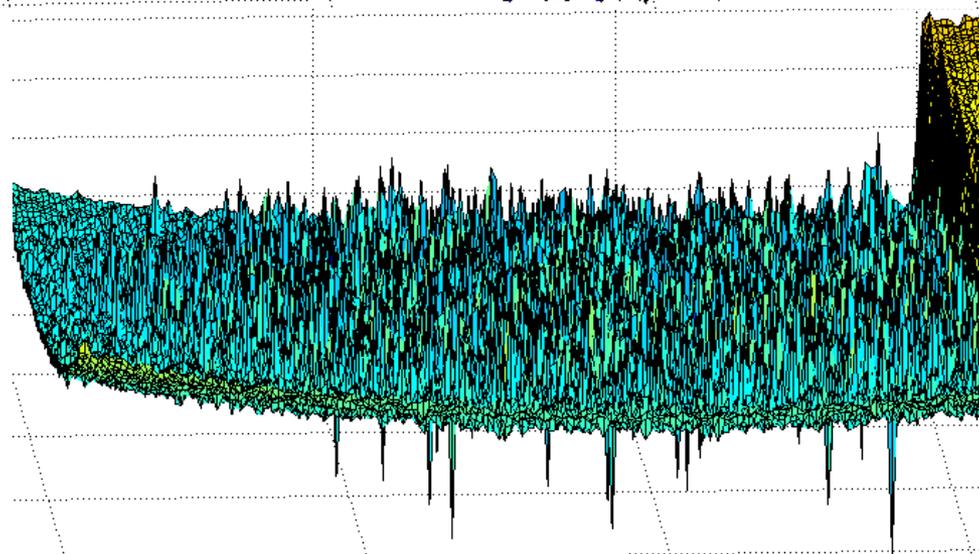
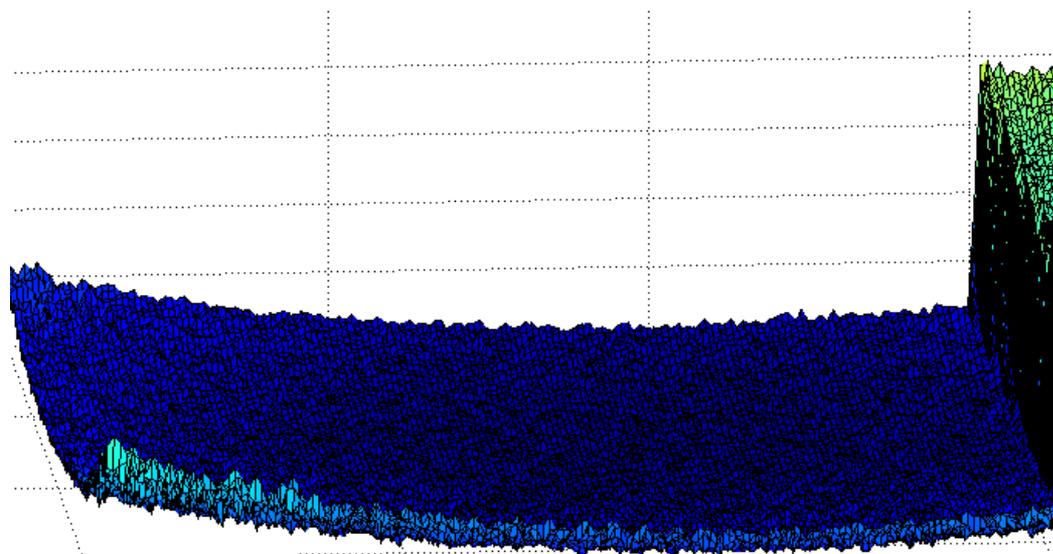


Distância 110cm

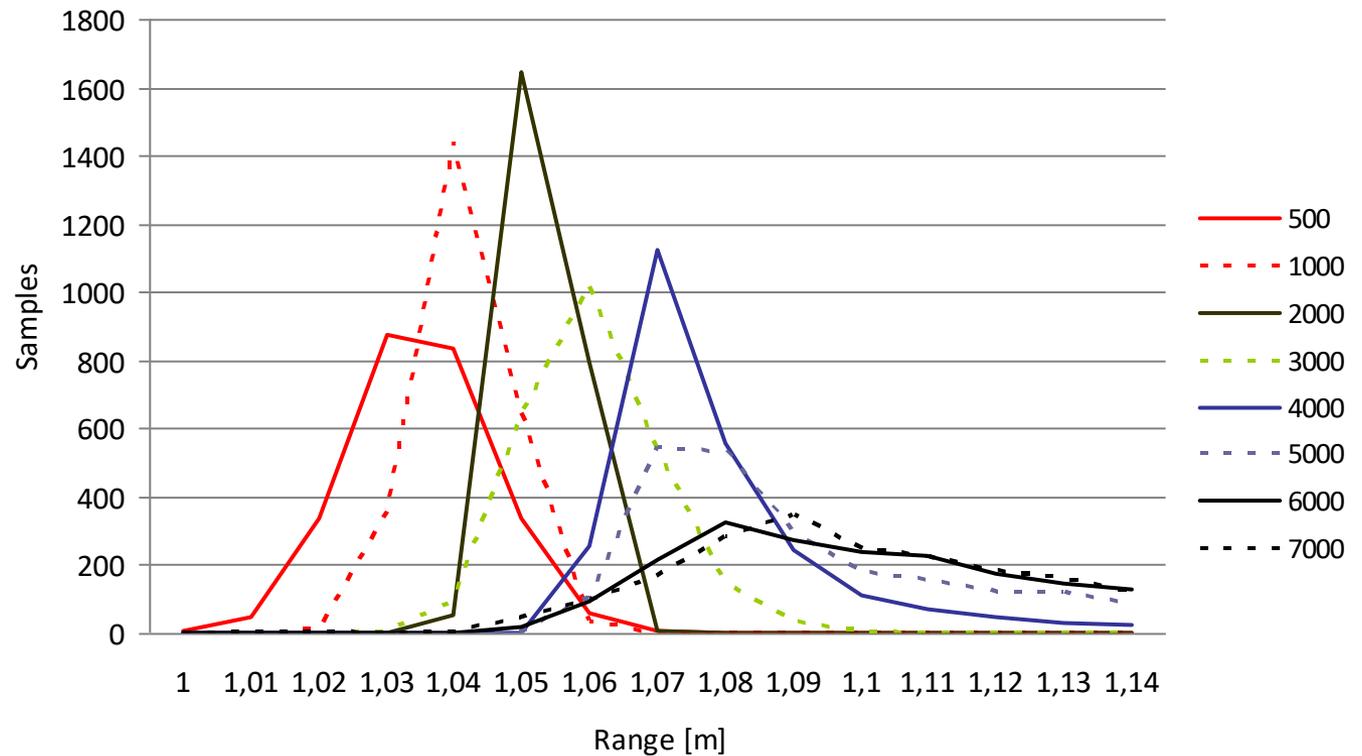
Tempo de integração:

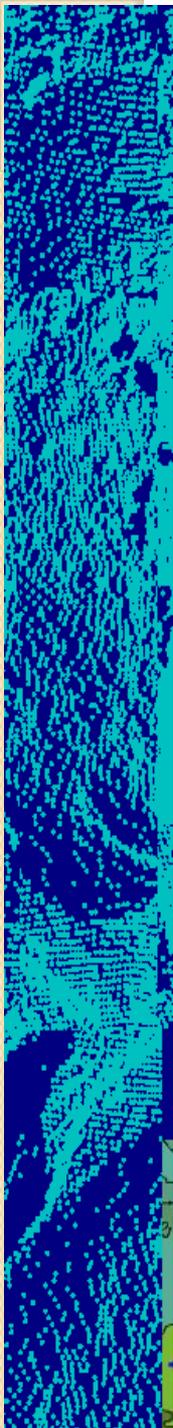
a) 1800 μs

b) 6000 μs



- Histograma de freqüências para distância de 110cm. A dispersão é maior para tempos de integração maiores.



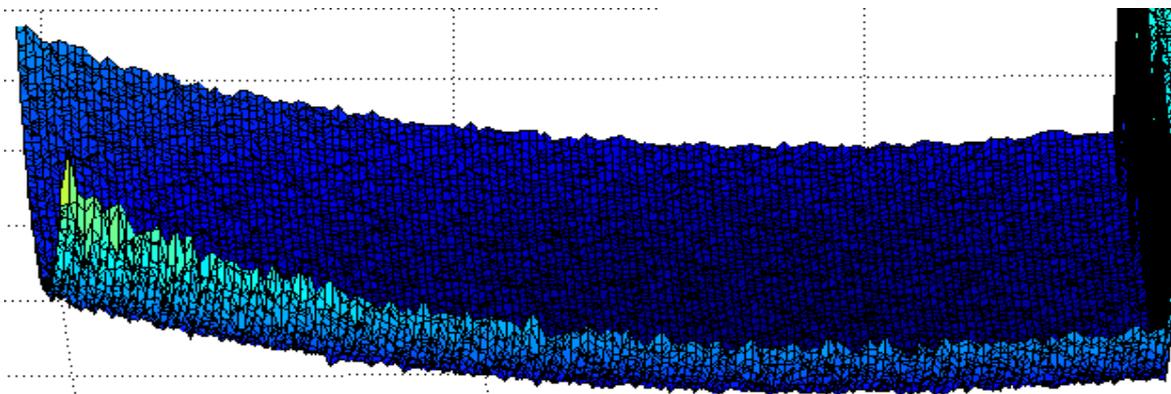
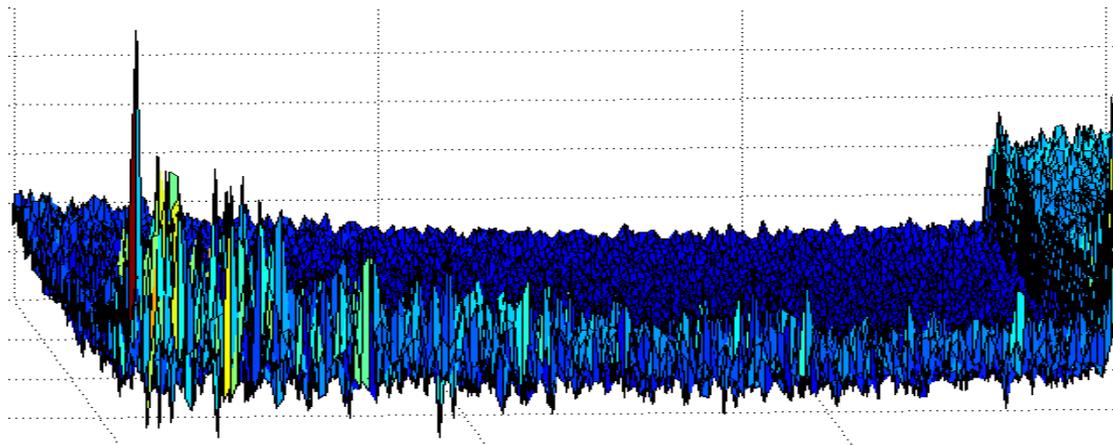


Distância 170cm

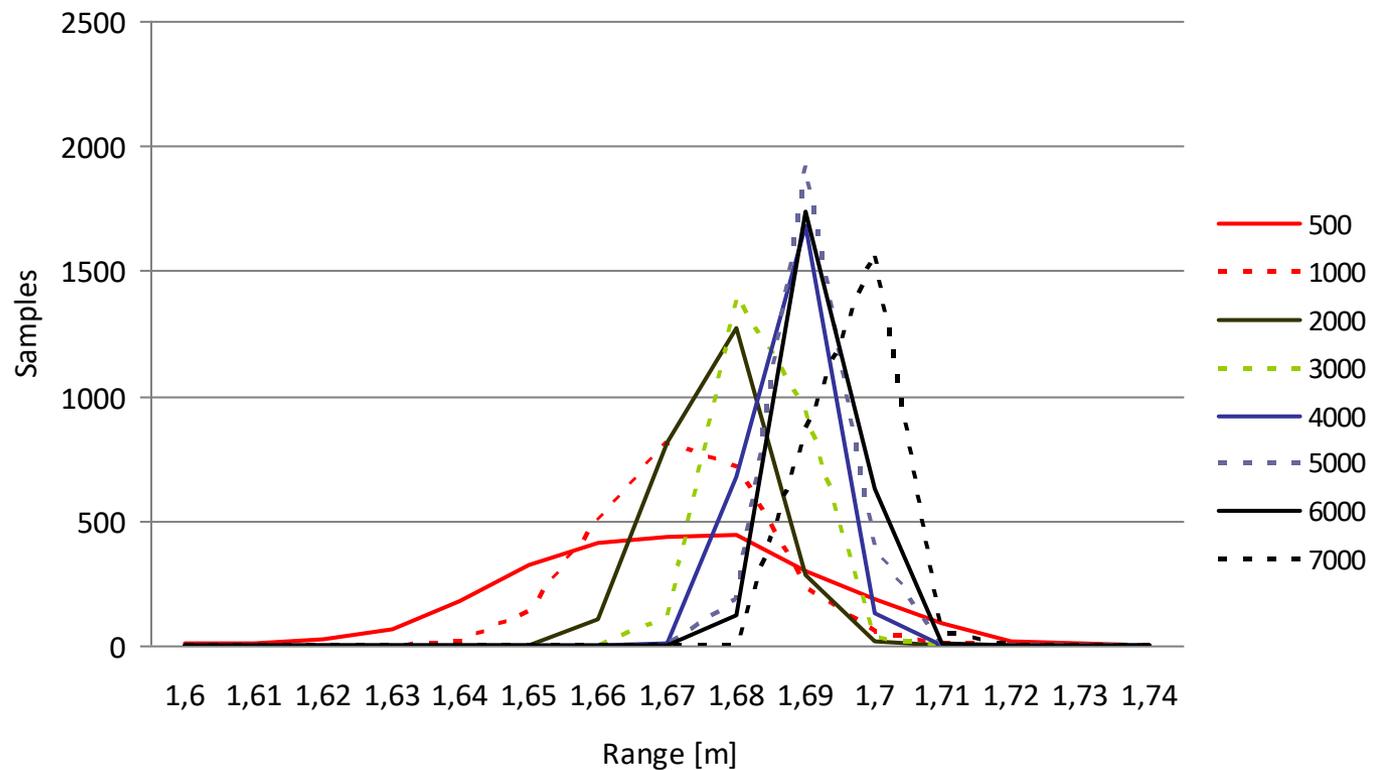
Tempo de integração:

a) 500 μ s

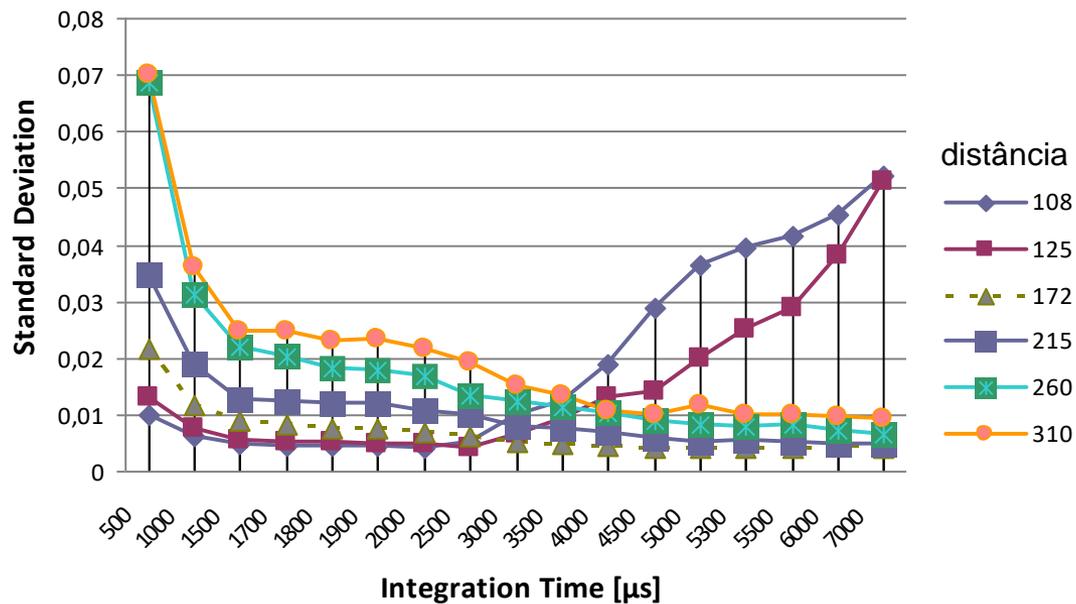
b) 6000 μ s



Histograma de freqüências para distância de 170cm. Para tempos de integração baixos ocorre maior dispersão dos dados.

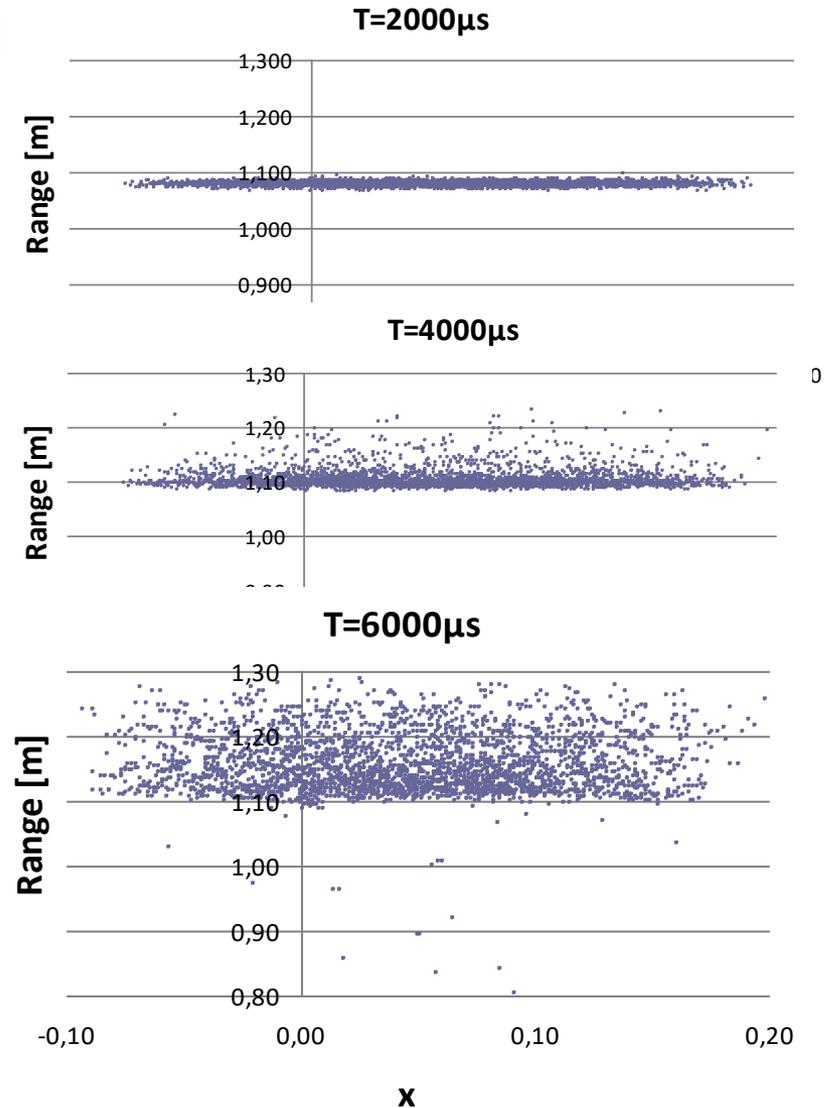


- Para curtas distâncias, o sensor é saturado com altos tempos de integração, originando medições erradas.
- Para grandes distâncias, os maiores erros ocorrem devido à pouca iluminação do objeto.



Experimento 2: Distância: I

- tempos de integração: $t = 2000\mu\text{s}$, $t = 4000\mu\text{s}$ e $t = 6000\mu\text{s}$.
- Dispersão maior quando o tempo de integração é alto (saturação)
- Para um período de integração maior, a distância medida é maior (deslocamento para longe do sensor).



Considerações finais

Uma das grandes vantagens do uso de “câmaras de profundidade” em comparação com métodos convencionais de fotogrametria terrestre é o fato da tomada de dados ser mais simples, pois não é exigida a superposição necessária para a geração do estereopar. Os dados lidos em uma única tomada já são tridimensionais.

- **Não são necessários pontos homólogos para a geração do modelo tridimensional, somente para amarrar os dados obtidos de diferentes estações de medição.**

O resultado obtido se encontra em um sistema polar e é facilmente convertido a um sistema ortogonal com a orientação interior do equipamento (calibração).

Consideracoes finais

- Diferentemente da fotografia, este tipo de levantamento não requer iluminação solar, pois possui um emissor de radiação eletromagnética. Por isso também é necessário evitar o efeito da radiação exterior que pode prejudicar a imagem.

Como opera com uma fonte própria de iluminação, os dados podem ser coletados no escuro e é apropriado para ambientes internos (pequena distância e ambiente escuro).

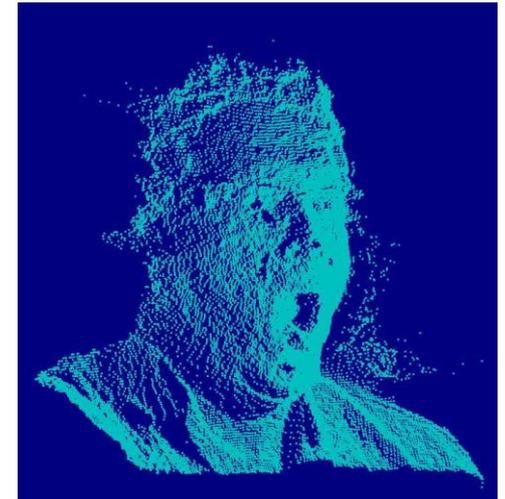
Características importantes:

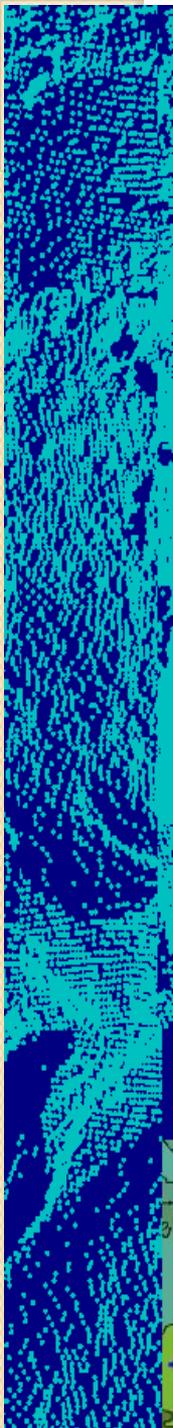
Alta densidade de pontos coletados e, conseqüentemente, altíssima redundância na descrição discreta dos objetos;

É possível realizar o controle de qualidade durante a coleta e refazer a varredura, caso necessário;

É possível combinar vários modelos numéricos gerados de diferentes posições, o que permite cobrir quase toda superfície visível dos objetos;

Operação remota, o que significa que o objeto não precisa ser tocado;





Desafios

- Como aproveitar as características deste sensor?
- É possível usar estas imagens para determinar geometria de objetos?
- Como aproveitar a dinâmica das imagens na indústria e engenharia?
- Qualidade dos dados?
- Complementar com fotogrametria?
- Automação?