



**Centro de Instrução Almirante Wandenkolk - CIAW**  
**Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA**



**Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistemas de Armas**



**TSA:** Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Apontamento e Rastreamento de Alvos com Gimbal



Jozias **Del Rios** Cap Eng



[delriosjdrvgs@fab.mil.br](mailto:delriosjdrvgs@fab.mil.br)



(12) 98177-9921

Abril 2018

# **TECNOLOGIA DE SENSORES E ATUADORES EM ARMAMENTOS GUIADOS**

## **Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal**

Instrutor: Cap Eng Jozias **DEL RIOS**

Autor do Material: Jozias **DEL RIOS** – rev. 04.mai.2016

# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

### TÓPICOS

1. Revisão de Conceitos Preliminares
2. Gimbal topologia Pitch-Yaw
3. Gimbal topologia Pitch-Roll
4. Conceitos de **LoS** e **FoV**
5. Rastreo de alvo

# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

## MOTIVAÇÃO

Conjunto de articulações coordenadas ortogonais  
para apontamento e estabilização bidirecional  
de mira, sensor, armamento ou designador  
(pontaria)

Aplicações:

- Detector **IR** (míssil ar-ar, **IRST**, câmera **FLIR**)
- Designador Laser (pod)
- Radar de feixe estreito (míssil, diretor de tiro, )
- Câmeras de vídeo “TV”

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Apontamento e Rastreamento de Alvos com Gimbal

## MOTIVAÇÃO

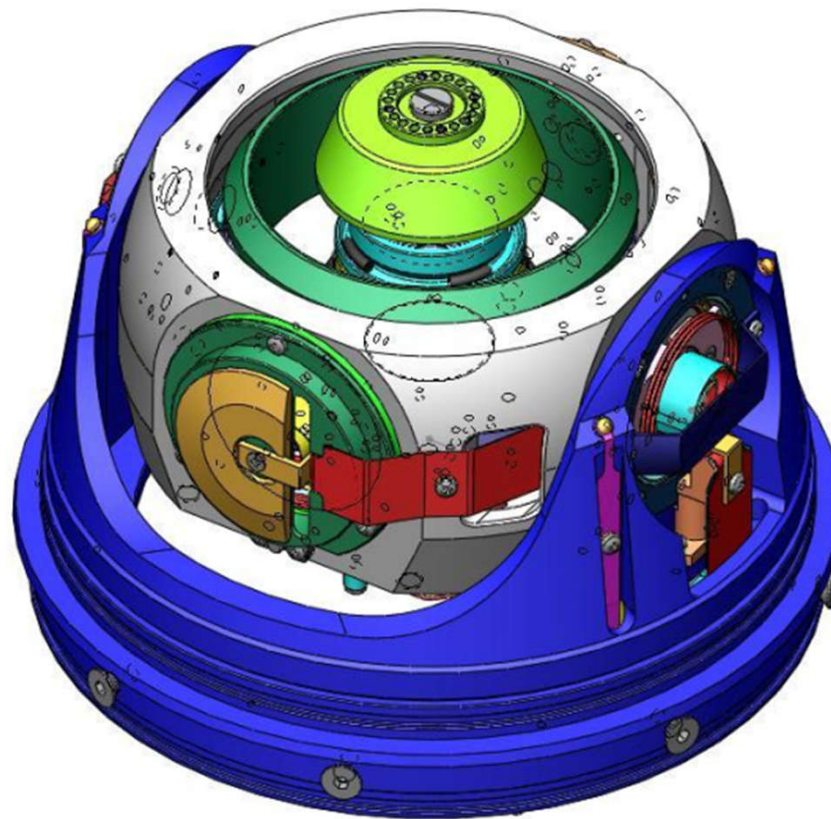
Exemplo: **POD** imageador **FLIR/EO** e designador Laser  
RAFAEL Litening 4:



# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

## MOTIVAÇÃO

Exemplo: Autodiretor (Seeker) **IR** do míssil **MAA1-B**



(versão invalidada de projeto cancelado)

# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Apontamento e Rastreamento de Alvos com Gimbal

## MOTIVAÇÃO

Exemplo: Canhão naval 76mm



Elevation:  $-15^{\circ} / +85^{\circ}$ , speed:  $35^{\circ}/s$ , accel.:  $72^{\circ}/s^2$

Azimuth:  $360^{\circ}$ , speed:  $60^{\circ}/s$ , accel.:  $72^{\circ}/s^2$



Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

## MOTIVAÇÃO

### Infra Red Search and Track (IRST)



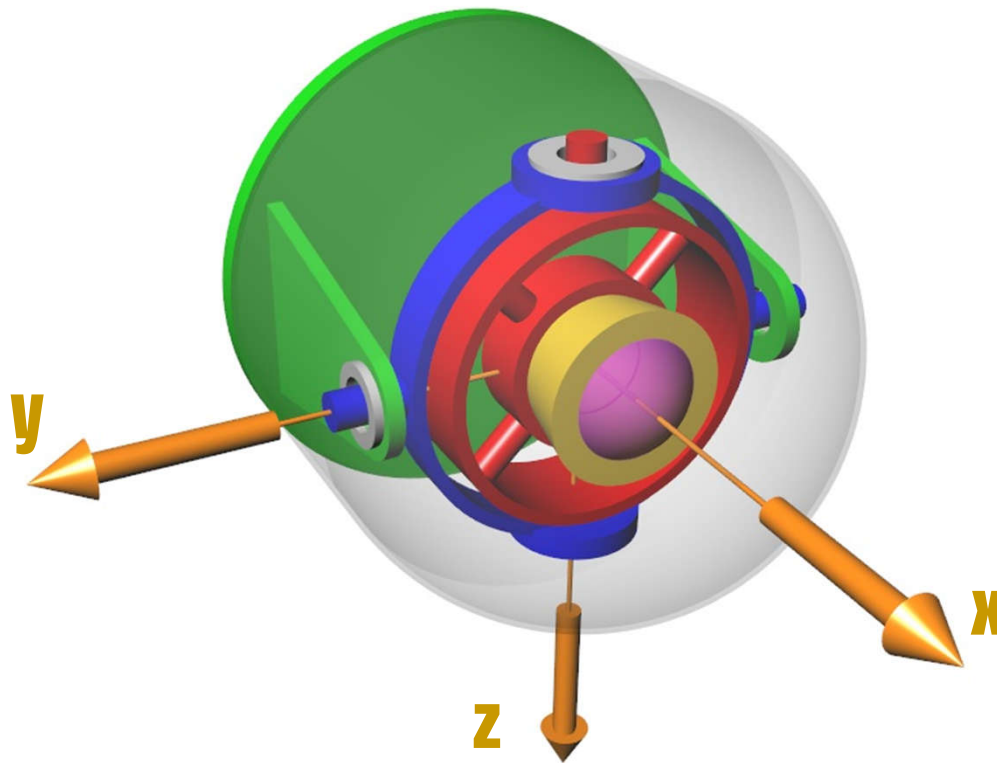


# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

### GIMBAL PITCH-YAW

- Castelo: Suporte externo fixo (eg. fixado ao corpo de um míssil)
- Quadro Externo: motor/encoder em relação ao castelo.
- Quadro Interno: motor/encoder em relação ao quadro externo.



**x:** Forward

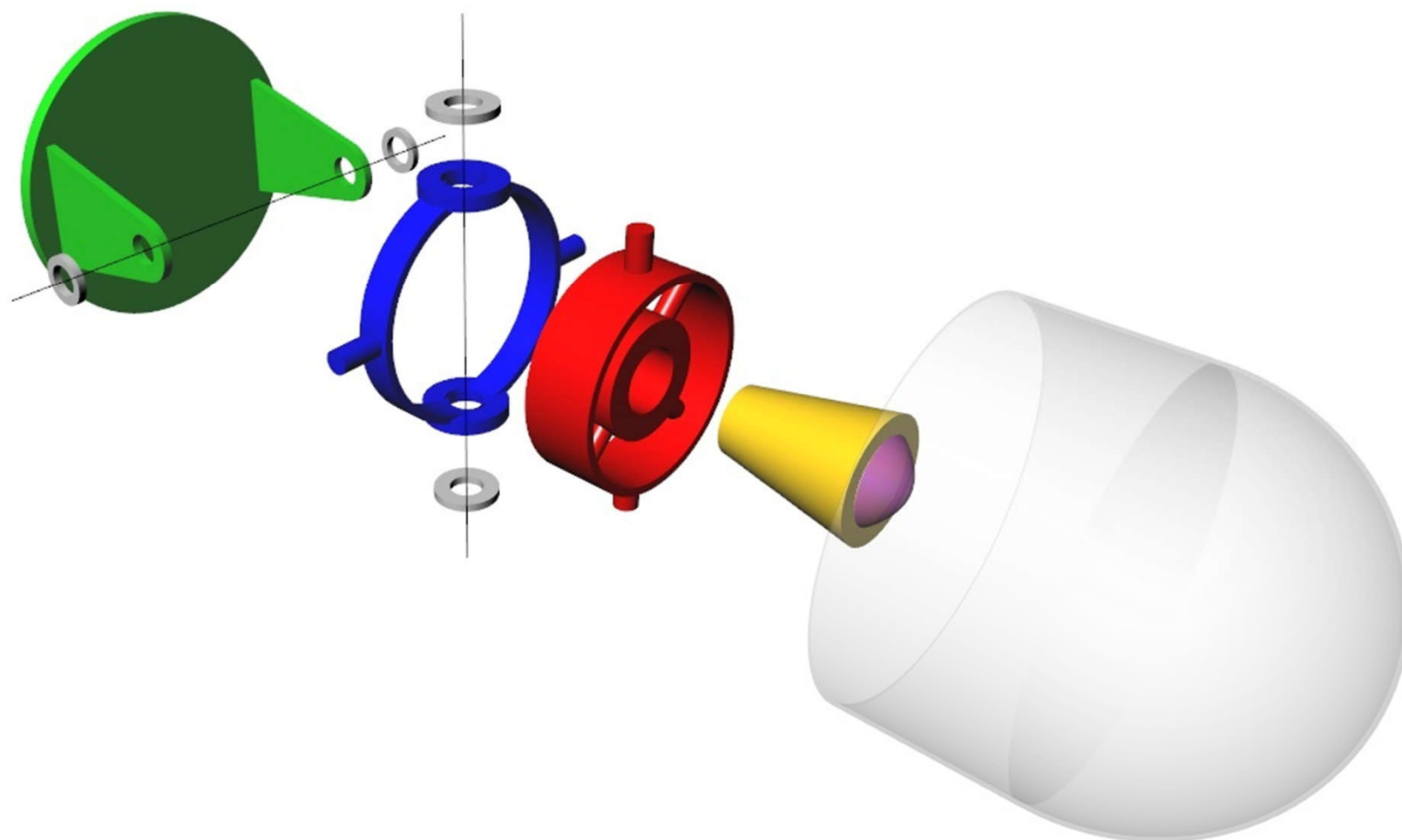
**y:** Right

**z:** Down

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

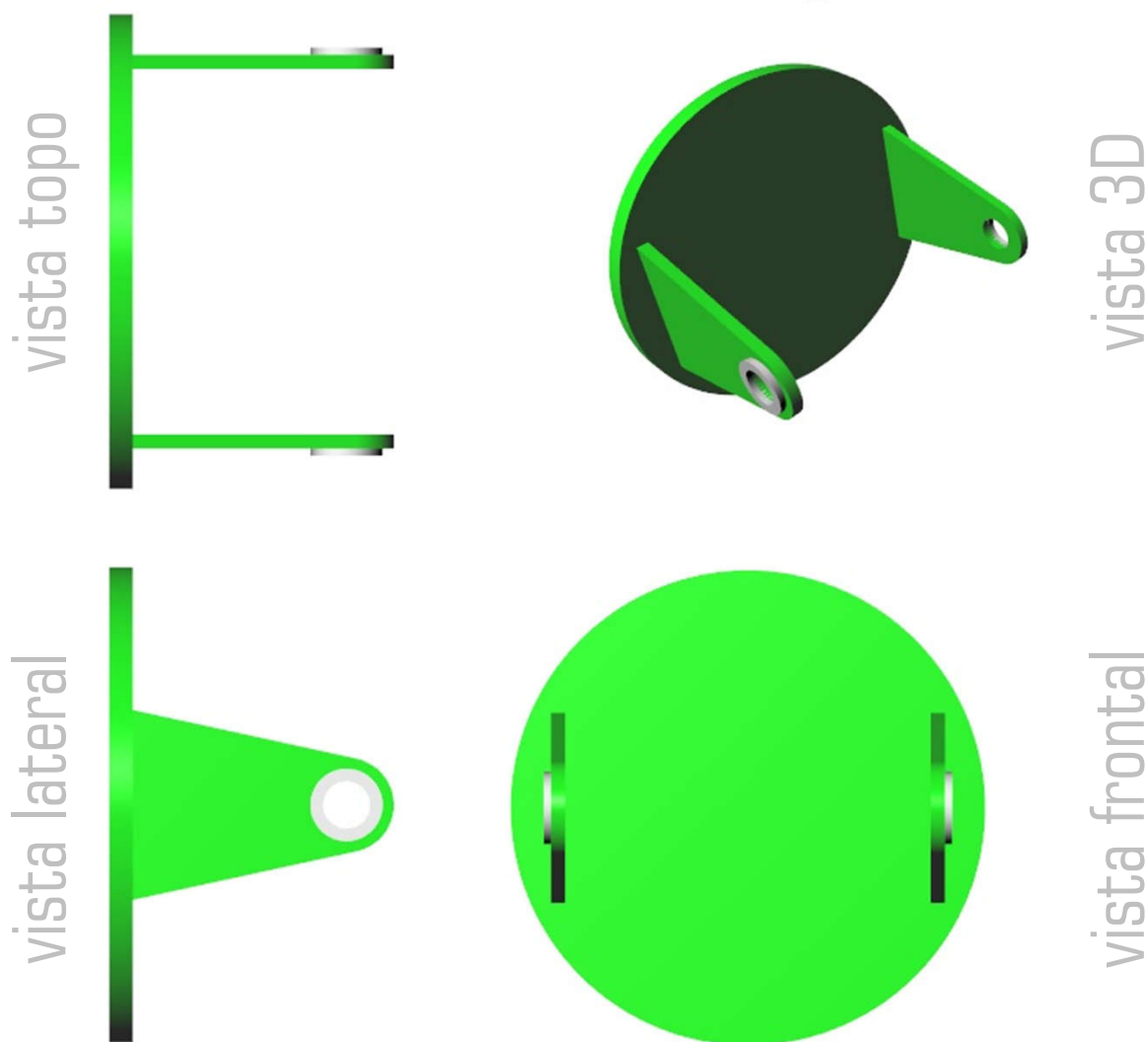
## GIMBAL PITCH-YAW – VISTA EXPLODIDA

Castelo, Quadro Externo, Quadro Interno, Sensor, Óptica, Dome



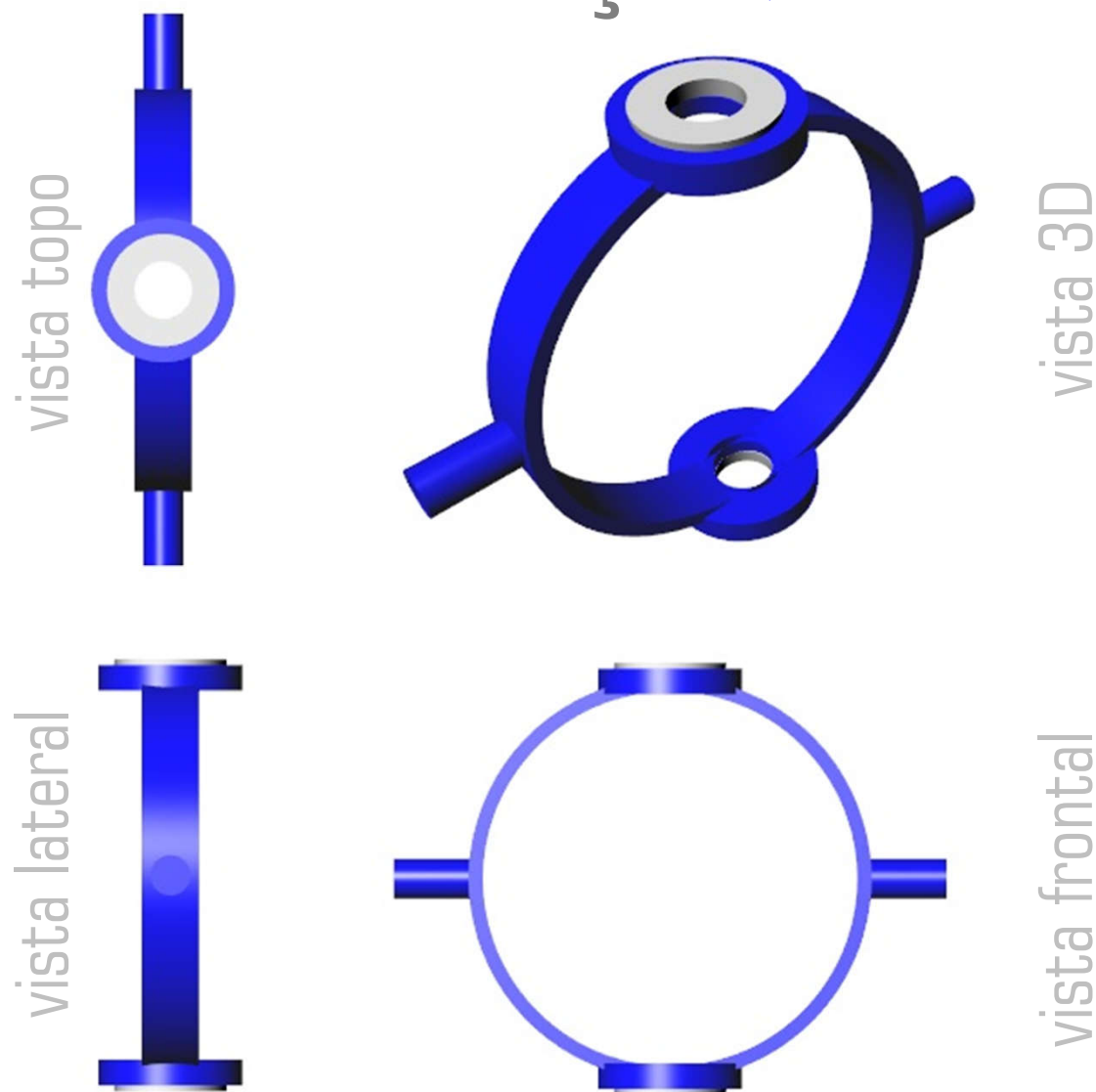
Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

**GIMBAL PITCH-YAW – PEÇA: CASTELO**



Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

**GIMBAL PITCH-YAW – PEÇA: QUADRO EXTERNO**



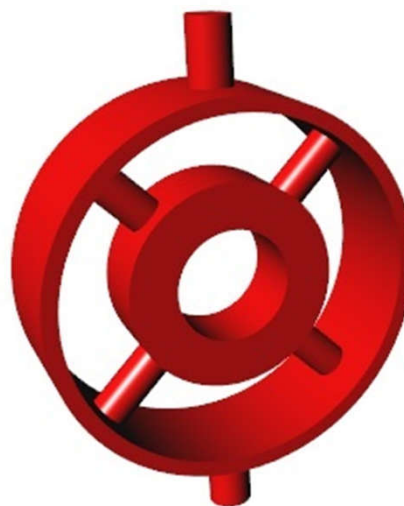
Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

**GIMBAL PITCH-YAW – PEÇA: QUADRO INTERNO**

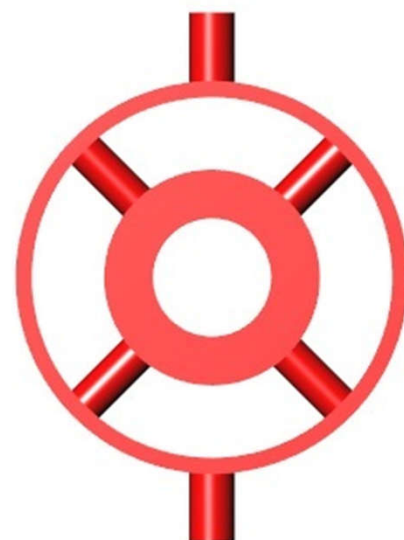
vista topo



vista lateral



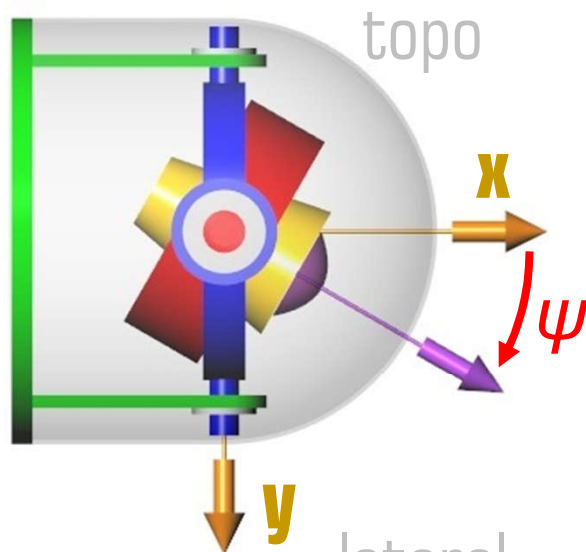
vista 3D



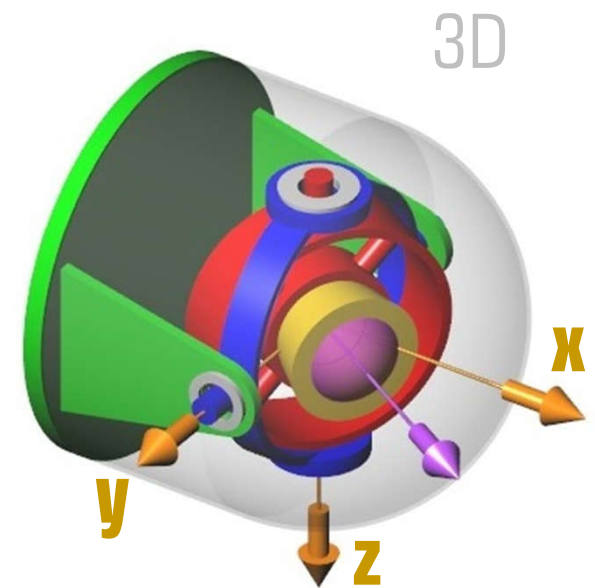
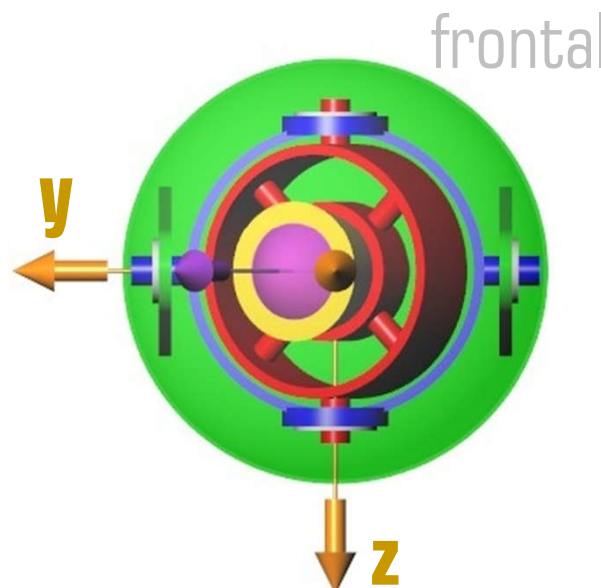
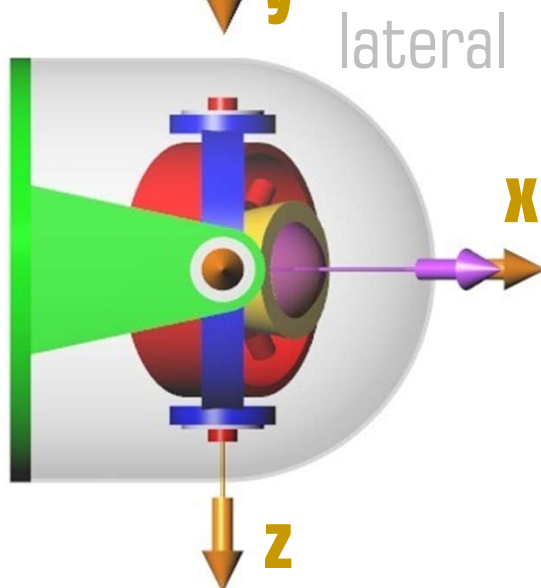
vista frontal

# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

## GIMBAL PITCH-YAW – MOVIMENTO **QUADRO INTERNO**

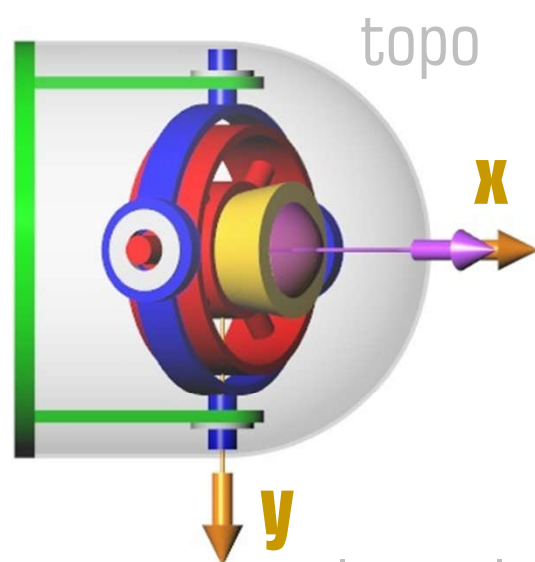


Vistas de topo, lateral e frente  
do movimento controlado do  
Quadro Interno (yaw)  
para um ângulo positivo  $\psi$

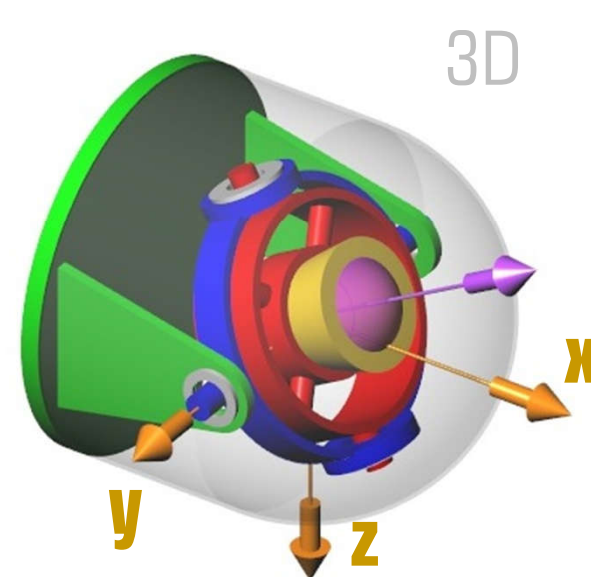
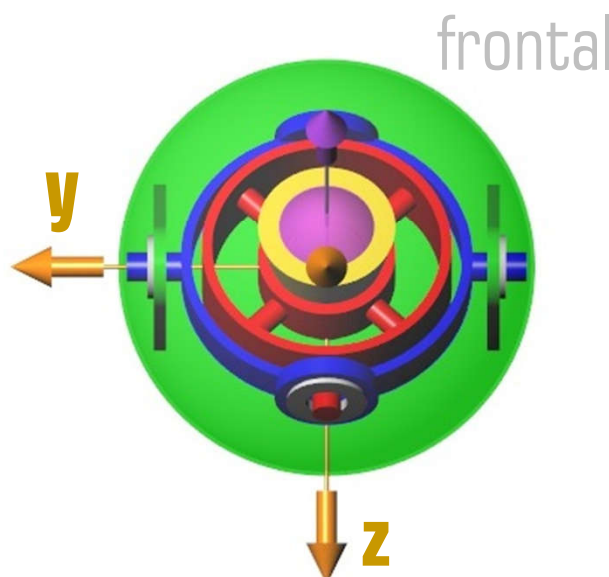
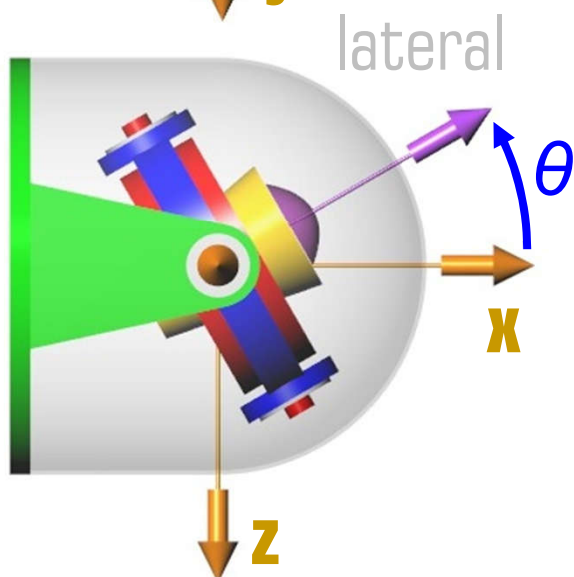


# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

## GIMBAL PITCH-YAW – MOVIMENTO **QUADRO EXTERNO**



Vistas de topo, lateral e frente  
do movimento controlado do  
Quadro Externo (pitch)  
para um ângulo positivo  $\theta$





# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

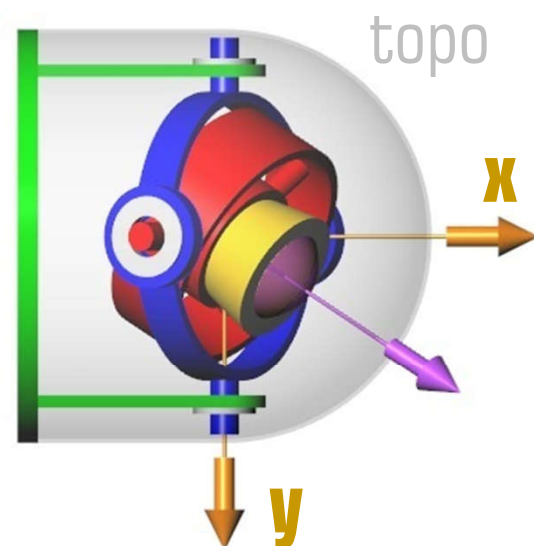
## Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

### GIMBAL PITCH-YAW

- Vetor de apontamento do gimbal: **g**
- Eixo longitudinal (Boresight): eixo **x** (forward)
- Comando de **Pitch-Angle**  $\theta$  ao redor do eixo **y** (right)
- Comando de **Yaw-Angle**  $\psi$  ao redor do eixo **z** (down)
- Combinando os movimentos coordenados:
  - Ângulo entre **g** e eixo **x**: **Look-Angle**  $\lambda$  (Ângulo de Visada)
  - Projeção de **g** no plano **yz** produz um **Roll-Angle**  $\varphi$

# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

## GIMBAL PITCH-YAW – COORDENADO

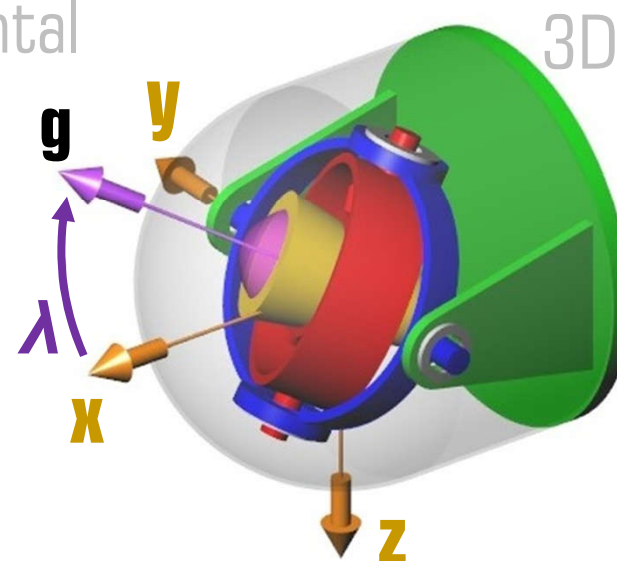
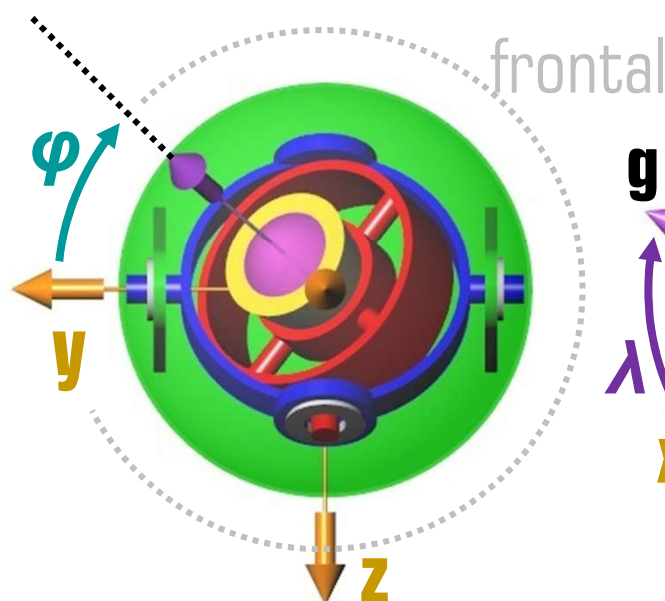
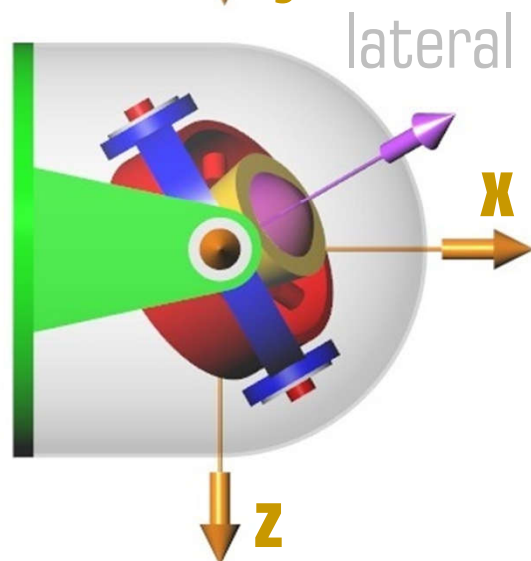


Comando de **Pitch-Angle**  $\theta$

e de **Yaw-Angle**  $\psi$

formando **Look-Angle**  $\lambda$

e **Roll-Angle**  $\phi$



## GIMBAL PITCH-YAW – RELAÇÕES

- Limites dos comando de **Pitch**:  $-90^\circ < \theta < +90^\circ$
- Limites dos comando de **Yaw**:  $-90^\circ < \psi < +90^\circ$
- Limite do **Look**-Angle resultante:  $0^\circ < \lambda < +90^\circ$
- Limite do **Roll**-Angle resultante:  $-180^\circ < \varphi < +180^\circ$

$$\begin{cases} \text{Look-Angle: } \lambda = \arccos(\cos \theta \cdot \cos \psi) \\ \text{Roll-Angle: } \varphi = \text{atan2}(\sin \theta, \tan \psi) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{Pitch-Angle: } \theta = \arctan(\tan \lambda \cdot \sin \varphi) \\ \text{Yaw-Angle: } \psi = \arcsen(\sin \lambda \cdot \cos \varphi) \end{cases}$$

## GIMBAL PITCH-YAW – VETOR DE APONTAMENTO

Opções p/ obter o vetor de apontamento por rotações sucessivas:

- (A) **Yaw**  $\psi$  ao redor do **eixo z** e depois **Pitch**  $\theta$  ao redor do **eixo y**
- (B) **Pitch**  $\theta$  ao redor do **eixo y** e depois **Yaw**  $\psi$  ao redor de um certo **eixo z'**
- (C) **Look**  $\lambda$  ao redor do **eixo z** e depois **Roll**  $\varphi$  ao redor do **eixo x**

Fórmula de Rotação de Rodrigues:

Rotação de um vetor  $\vec{u}$  por um ângulo  $\alpha$  ao redor do eixo  $\hat{v}$

$$\vec{u}' = \vec{u} \cos \alpha + (\hat{v} \times \vec{u}) \sin \alpha + \hat{v} (\vec{u} \cdot \hat{v}) (1 - \cos \alpha)$$

## GIMBAL PITCH-YAW – VETOR DE APONTAMENTO

Fórmula de Rotação de Rodrigues:

Rotação de um vetor  $\vec{u}$  por um ângulo  $\alpha$  ao redor do eixo  $\hat{v}$

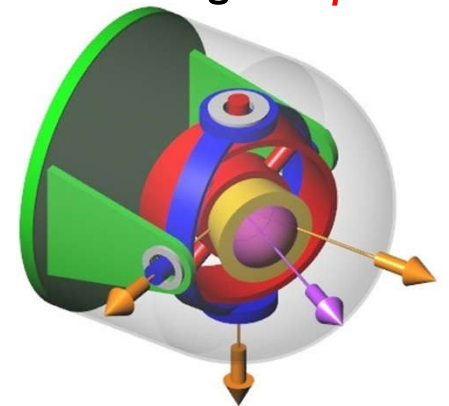
$$\vec{u}' = \vec{u} \cos \alpha + (\hat{v} \times \vec{u}) \sin \alpha + \hat{v} (\vec{u} \cdot \hat{v}) (1 - \cos \alpha)$$

Exemplo (A): Rotação primeiro em **Yaw** e depois em **Pitch**:

**Yaw**: Rotação de vetor  $\hat{x}$  (boresight) ao redor do eixo  $\hat{z}$  por um ângulo  $\psi$

$$\vec{g}' = \hat{x} \cos \psi + (\hat{z} \times \hat{x}) \sin \psi + \hat{z} (\hat{x} \cdot \hat{z}) (1 - \cos \psi)$$

$$\vec{g}' = \hat{x} \cos \psi + \hat{y} \sin \psi$$



## GIMBAL PITCH-YAW – VETOR DE APONTAMENTO

Rotação de um vetor  $\vec{u}$  por um ângulo  $\alpha$  ao redor do eixo  $\hat{v}$

$$\vec{u}' = \vec{u} \cos \alpha + (\hat{v} \times \vec{u}) \sin \alpha + \hat{v} (\vec{u} \cdot \hat{v}) (1 - \cos \alpha)$$

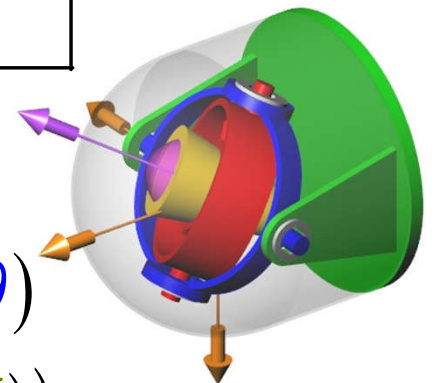
**Pitch:** Rotação de  $\vec{g}'$  ao redor do eixo  $\hat{y}$  por um ângulo  $\theta$

$$\vec{g} = \vec{g}' \cos \theta + (\hat{y} \times \vec{g}') \sin \theta + \hat{y} (\vec{g}' \cdot \hat{y}) (1 - \cos \theta)$$

$$\vec{g} = (\hat{x} \cos \psi + \hat{y} \sin \psi) \cos \theta + \left( \hat{y} \times (\hat{x} \cos \psi + \hat{y} \sin \psi) \right) \sin \theta + \hat{y} \left( (\hat{x} \cos \psi + \hat{y} \sin \psi) \cdot \hat{y} \right) (1 - \cos \theta)$$

$$\vec{g} = \hat{x} \cos \psi \cos \theta + \cancel{\hat{y} \sin \psi \cos \theta} - \hat{z} \cos \psi \sin \theta + \cancel{\hat{y} \sin \psi (1 - \cos \theta)}$$

$$\vec{g} = \hat{x} \cos \psi \cos \theta + \hat{y} \sin \psi - \hat{z} \cos \psi \sin \theta$$



# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

### GIMBAL PITCH-YAW – DEMONSTRAÇÕES

$$\vec{g} = \hat{x} \cos \theta \cos \psi + \hat{y} \sin \psi - \hat{z} \sin \theta \cos \psi$$

$$\cos \lambda = \hat{g} \cdot \hat{x}$$

$$\cos \lambda = \cos \theta \cos \psi$$

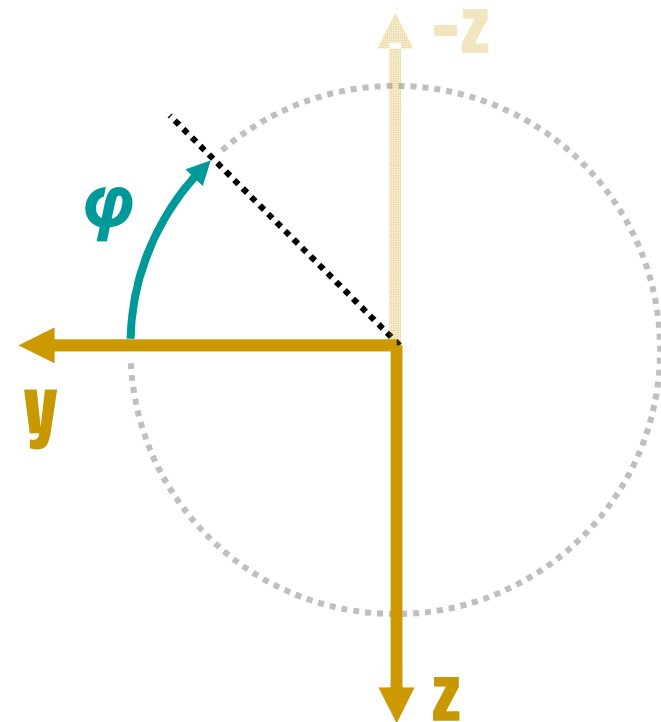
$$\lambda = \arccos(\cos \theta \cos \psi)$$

---

$$\tan \varphi = \frac{\text{proj}_{-\hat{z}} \vec{g}}{\text{proj}_{\hat{y}} \vec{g}} = \frac{-\hat{g} \cdot \hat{z}}{\hat{g} \cdot \hat{y}}$$

$$\tan \varphi = \frac{\sin \theta \cos \psi}{\sin \psi} = \frac{\sin \theta}{\tan \psi}$$

$$\varphi = \text{atan2}(\sin \theta, \tan \psi)$$





## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

### GIMBAL PITCH-YAW – APONTAMENTO LOOK-ROLL

Rotação de um vetor  $\vec{u}$  por um ângulo  $\alpha$  ao redor do eixo  $\hat{v}$

$$\vec{u}' = \vec{u} \cos \alpha + (\hat{v} \times \vec{u}) \sin \alpha + \hat{v} (\vec{u} \cdot \hat{v}) (1 - \cos \alpha)$$

Look: Rotação do Vetor  $\hat{x}$  (boresight) ao redor do eixo  $\hat{z}$  por um ângulo  $\lambda$

$$\vec{g}' = \hat{x} \cos \lambda + (\hat{z} \times \hat{x}) \sin \lambda + \hat{z} (\cancel{\hat{x} \cdot \hat{z}}) (1 - \cos \lambda)$$

$$\vec{g}' = \hat{x} \cos \lambda + \hat{y} \sin \lambda$$

---

Roll: Rotação do Vetor  $\vec{g}'$  ao redor do eixo  $\hat{x}$  por um ângulo  $\varphi$

$$\vec{g} = \vec{g}' \cos \varphi + (\hat{x} \times \vec{g}') \sin \varphi + \hat{x} (\vec{g}' \cdot \hat{x}) (1 - \cos \varphi)$$

$$= \cancel{\hat{x} \cos \lambda \cos \varphi} + \hat{y} \sin \lambda \cos \varphi + \hat{z} \sin \lambda \sin \varphi + \hat{x} \cos \lambda (1 - \cancel{\cos \varphi})$$

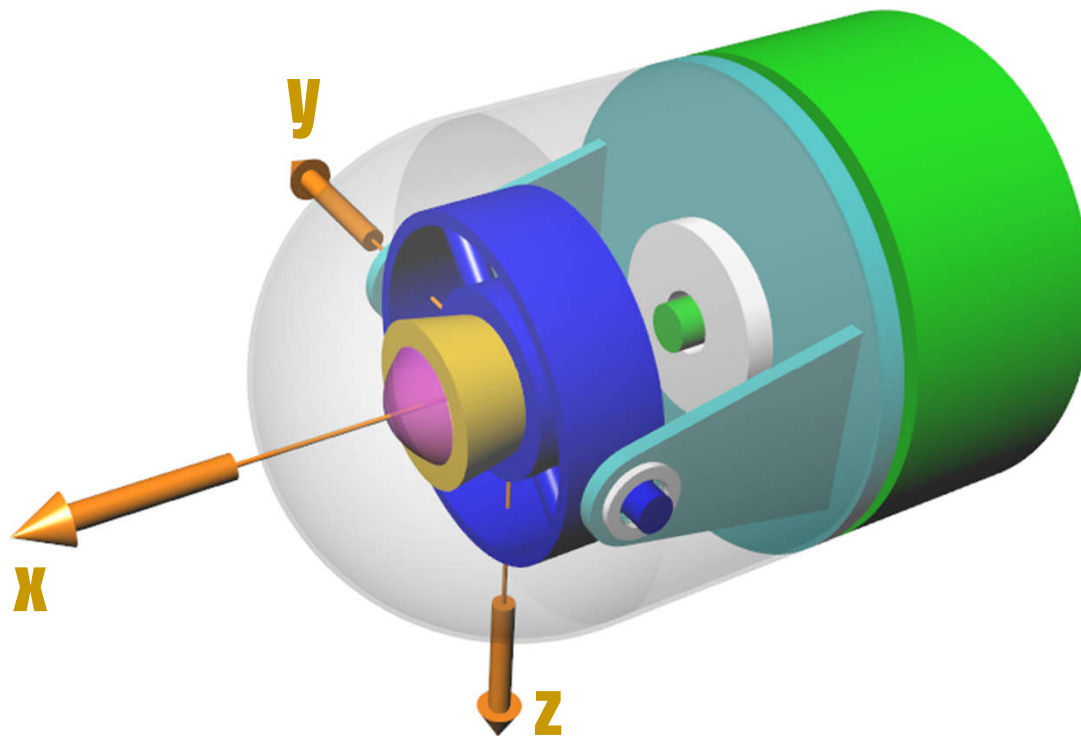
$$\vec{g} = \hat{x} \cos \lambda + \hat{y} \sin \lambda \cos \varphi + \hat{z} \sin \lambda \sin \varphi$$

# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

### GIMBAL PITCH-ROLL

- Corpo: fixado ao veículo.
- Castelo: motor/encoder com movimento de rolamento.
- Quadro: motor/encoder em relação ao castelo.



**x:** Forward

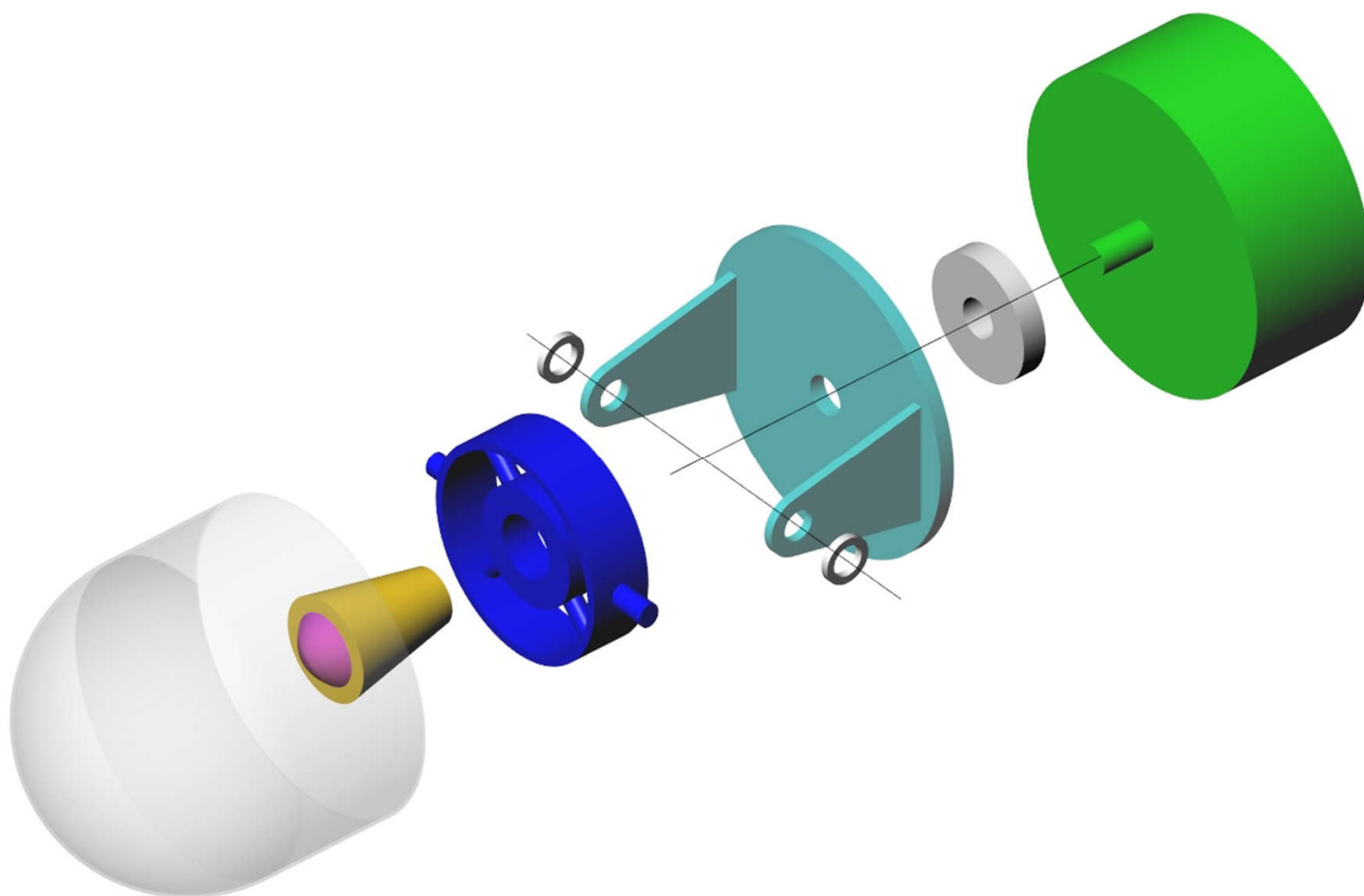
**y:** Right

**z:** Down

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

## GIMBAL PITCH-ROLL – VISTA EXPLODIDA

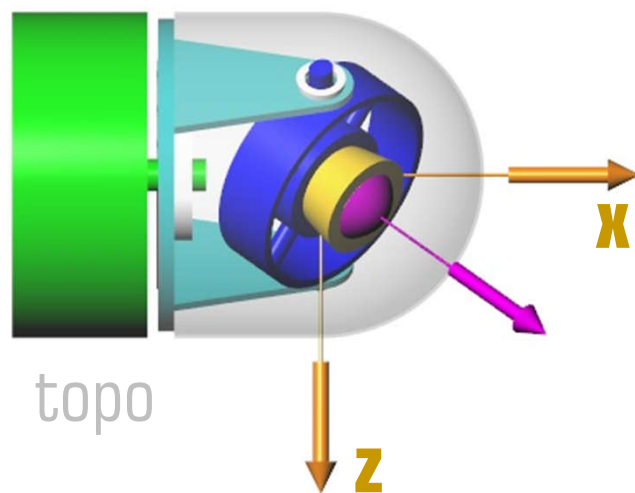
Corpo, Castelo, Quadro, Sensor, Óptica, Dome



# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

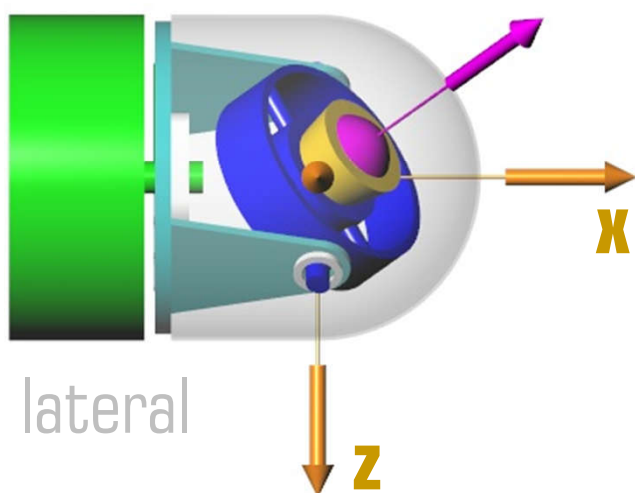
## Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

### GIMBAL PITCH-ROLL



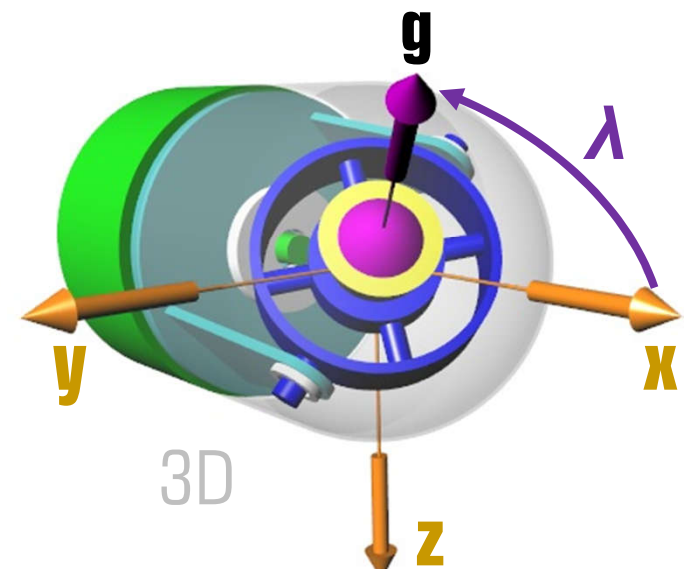
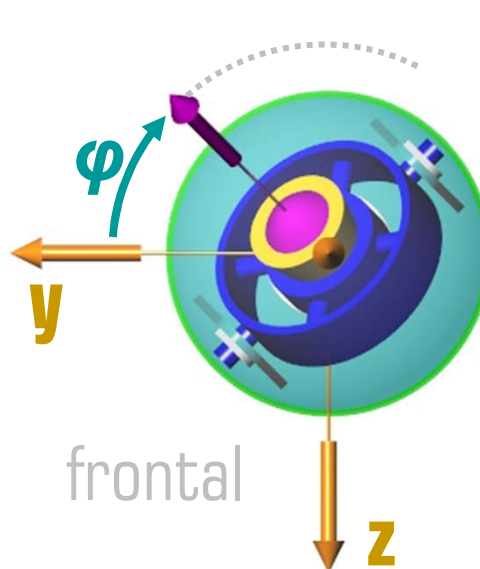
Servomecanismo de **Roll**:

ângulo  $\varphi$  rotaciona todo o Castelo



Servomecanismo de **Pitch**:

ângulo  $\lambda$  rotaciona o Quadro



## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

### GIMBAL PITCH-ROLL – ANÁLISE COMO SENSOR

- Por não ter “quadro interno”, este gimbal tem características óptico-mecânicas mais eficientes para apontamento “side-looking” com **Look-Angle**  $\lambda = 90^\circ$
- Motor, Encoder e Mancais não estarão obstruindo significativamente o feixe óptico de entrada.
- Motores irradiam calor na forma de **radiação infravermelha**. A transmissão ou as reflexões internas interferem nas leituras do detector infravermelho, que é extremamente sensível (exige um nível de ruído de fundo muito reduzido).

## CAMPO e LINHA de VISADA – FoV e LoS

**FoV** = **F**ield **o**f **V**iew

- Cone espacial onde se pode detectar.
  - Instantâneo **iFoV**: considera somente o sensor e óptica.
    - Geralmente um cone estreito, entre 0,5 e 3,0° total.
    - Cone centrado no **LoS**.
  - Total, também **FoR** (**F**ield **o**f **R**egard): considerando o Gimbal
    - SRAAM 3ª geração: aprox. 40° ao redor de boresight.
    - SRAAM 4ª geração: aprox. 80° ao redor de boresight.

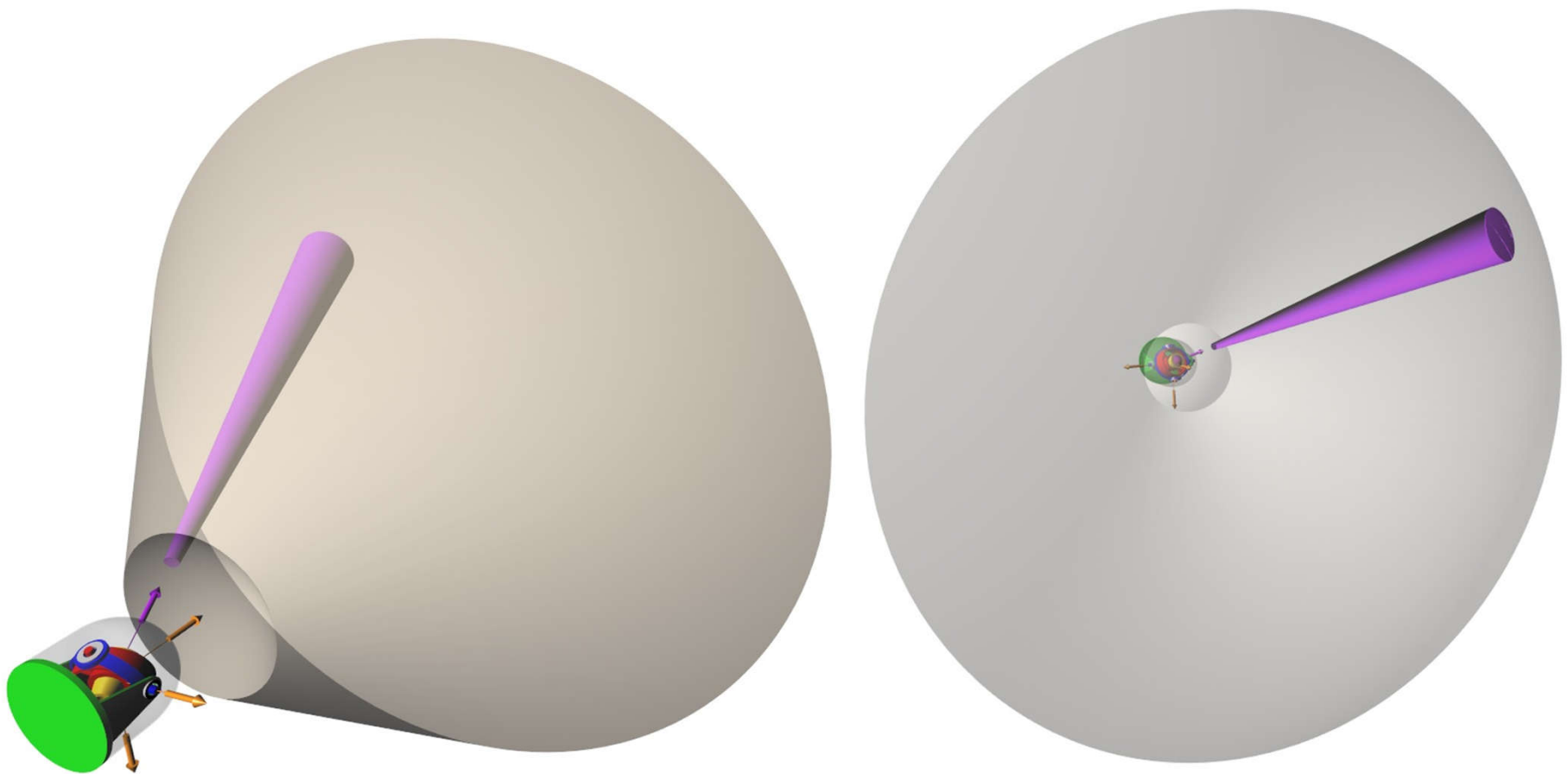
**LoS** = **L**ine **o**f **S**ight

- Reta que inicia no detector e tem a direção do apontamento

# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal

### CAMPO de VISADA – **iFoV** e **FoV** Total (**FoR**)



**iFoV** deve acomodar o erro entre reta Míssil-Alvo e **LoS**.  
Rastreo perdido caso a reta Míssil-Alvo saia do cone do **iFoV**.

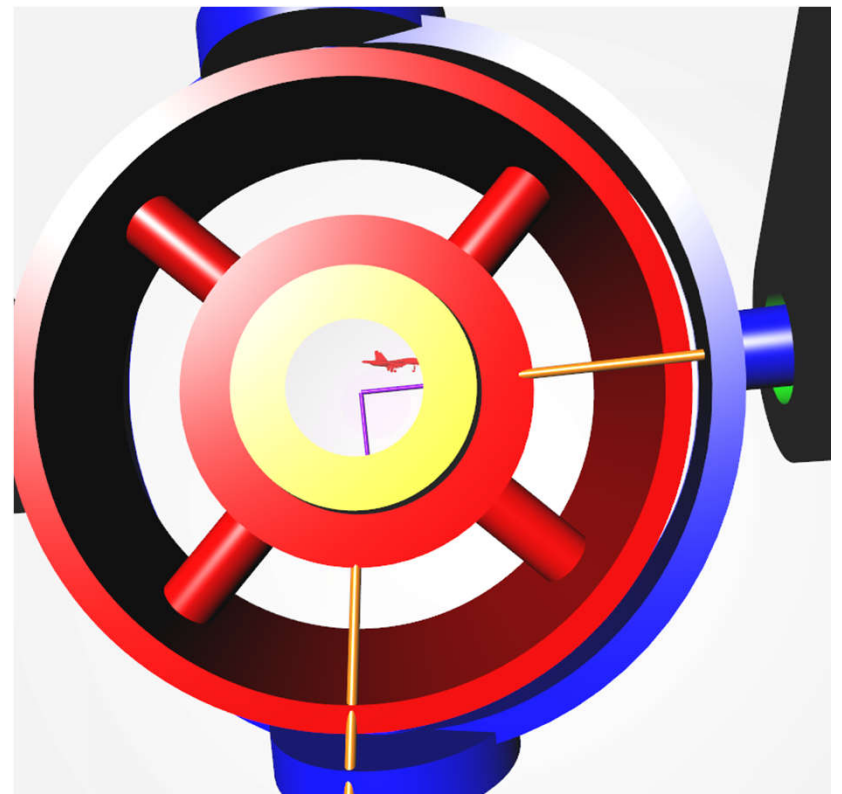
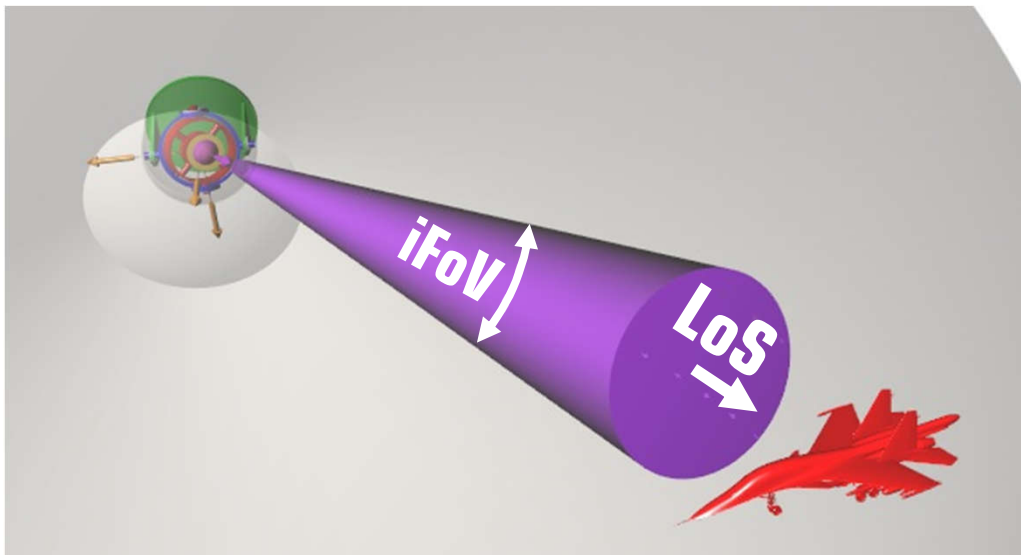


## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Apontamento e Rastreo de Alvos com Gimbal



### RASTREIO do ALVO

- Quando um alvo “hot spot” entra no **iFoV**, pode ser rastreado:
  - Gimbal controlado para manter o **alvo** no centro do **LoS**.



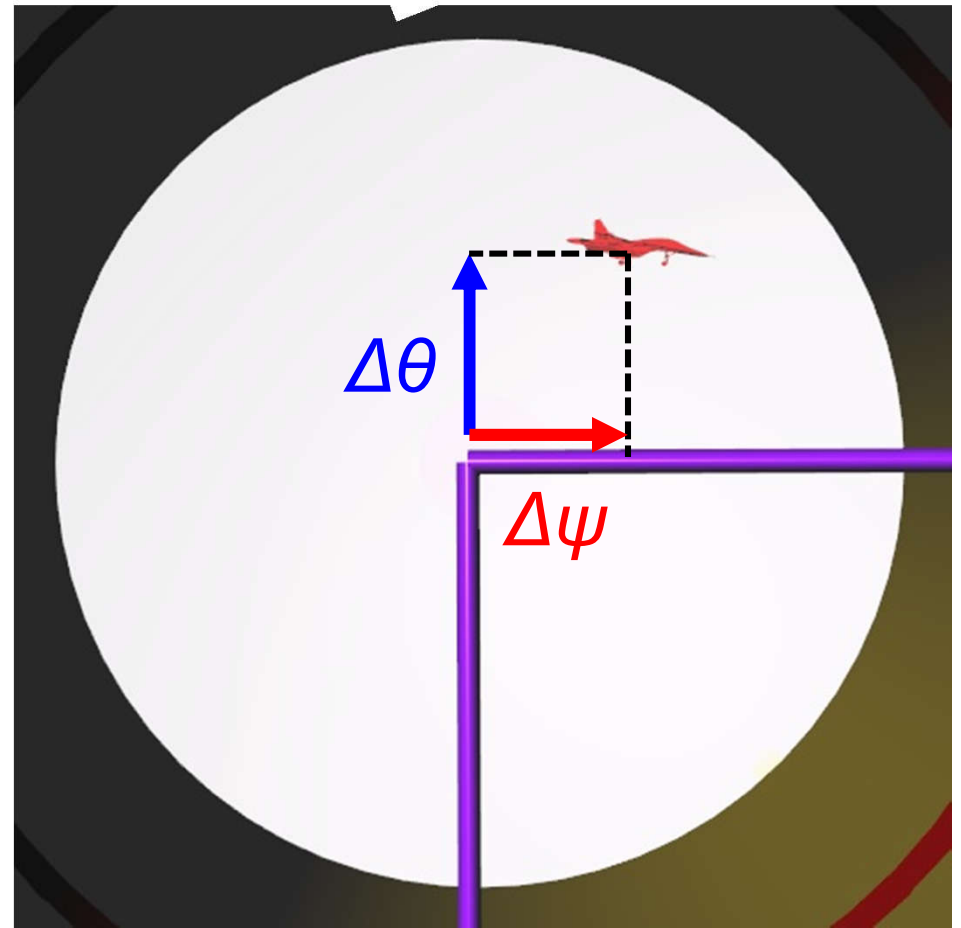
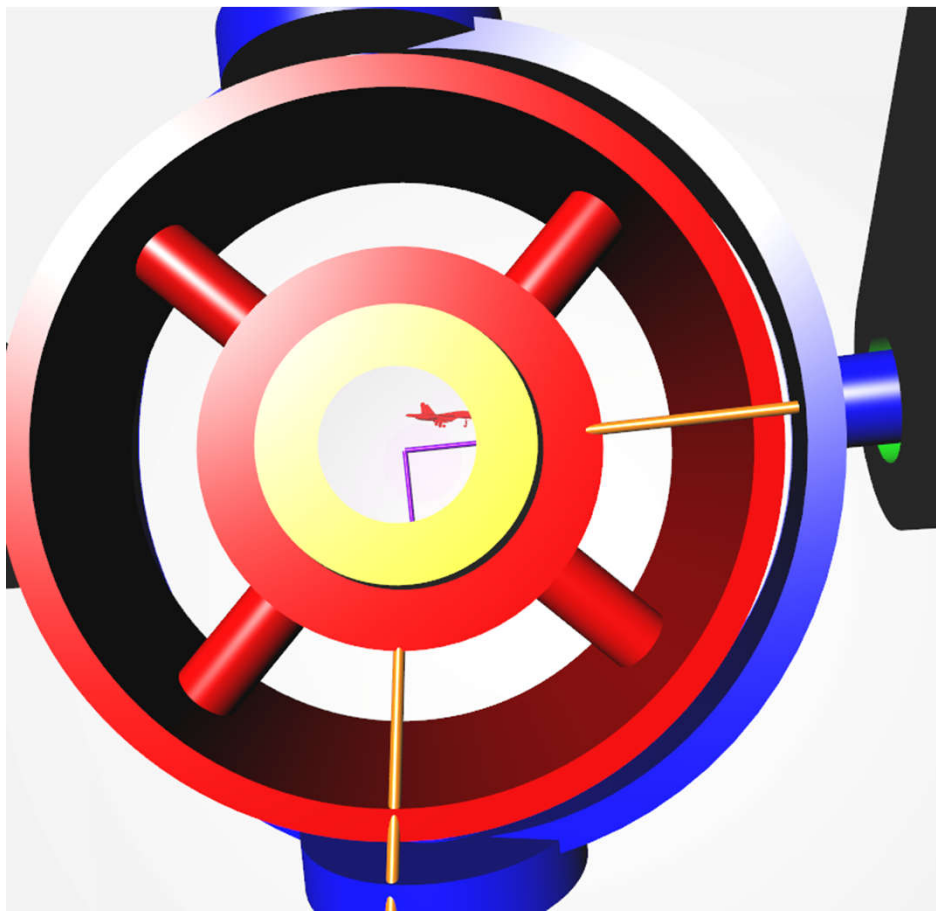
# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Apontamento e Rastreamento de Alvos com Gimbal

### RASTREIO do ALVO



- Gimbal **Pitch-Yaw**:
  - Gerados erros cartesianos ( **Azimute** , **Elevação** )



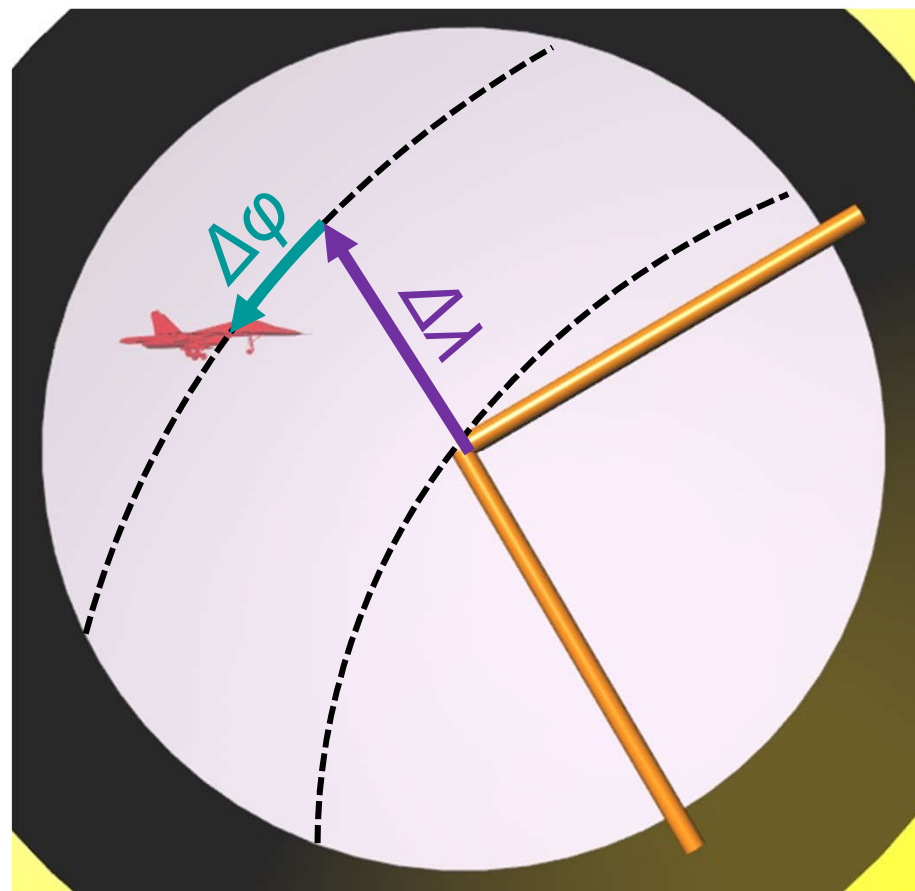
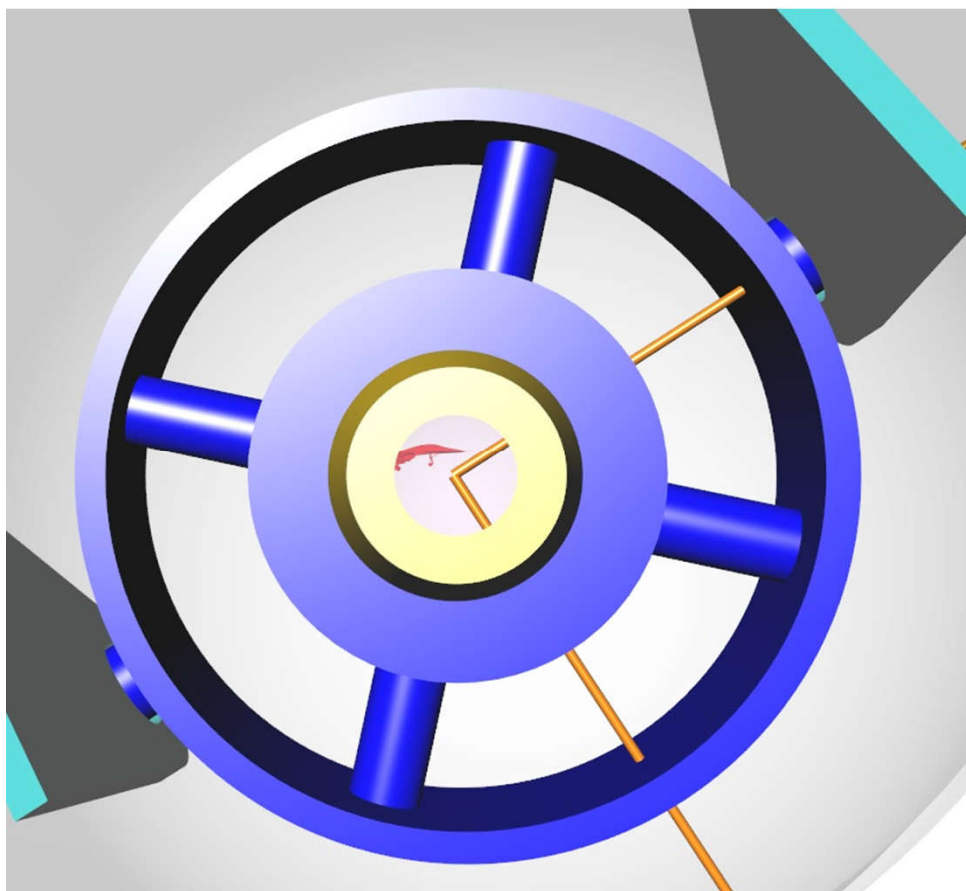
# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Apontamento e Rastreamento de Alvos com Gimbal

### RASTREIO do ALVO



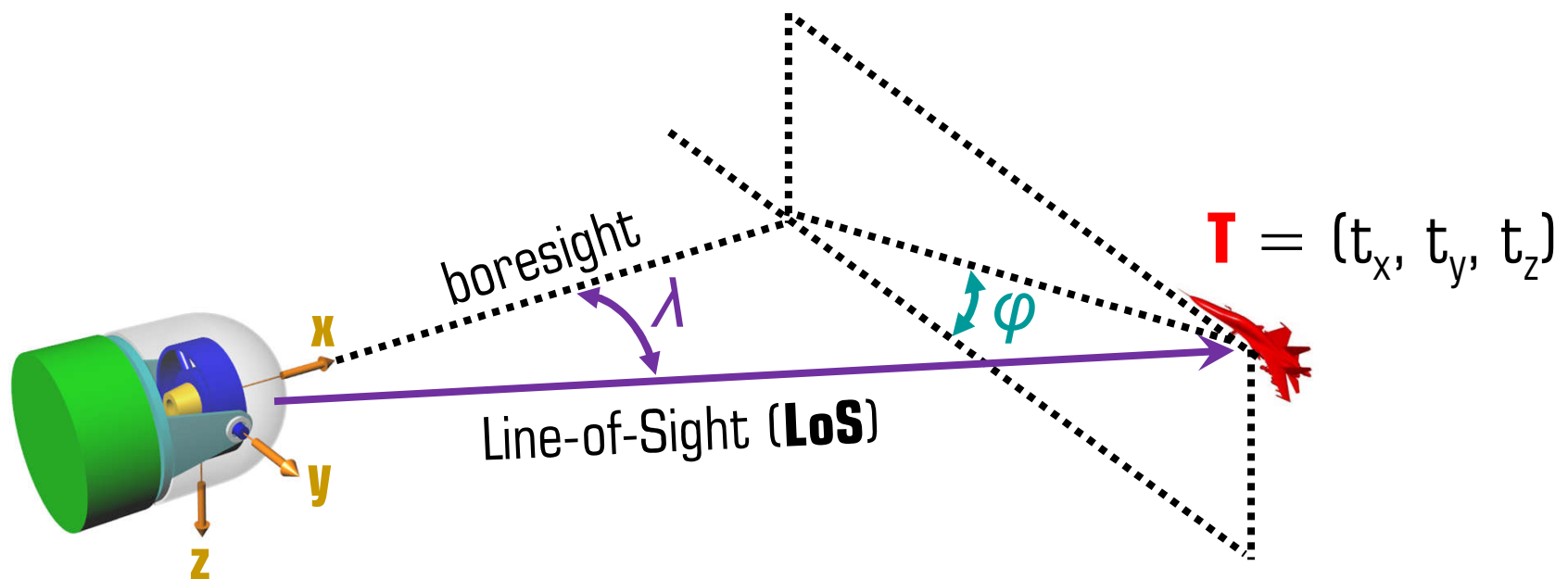
- Gimbal **Pitch-Roll**:
  - Gerados erros polares ( **Rolamento** , **Elevação** )



# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Apontamento e Rastreamento de Alvos com Gimbal

### ÂNGULOS a partir do LoS Míssil-Alvo



$$\cos \lambda = \frac{t_x}{\text{LoS}}$$

$$\tan \phi = \frac{-t_z}{t_y}$$

$$\lambda = \arccos \left( \frac{t_x}{\sqrt{t_x^2 + t_y^2 + t_z^2}} \right)$$

$$\phi = \text{atan2}(-t_z, t_y)$$