



## **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

Arquitetura Física e Funcional de um Míssil



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**

## Arquitetura Física e Funcional de um Armamento Guiado

Instrutor: Cap Eng Jozias **DEL RIOS**

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

# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### TÓPICOS

1. Subsistemas de um míssil típico
2. Estados de um míssil típico
3. Hardware do atuador elétrico
4. Barramento de comunicação e mensagens

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

## MÍSSIL

Para exemplificar, ilustraremos com um míssil fictício/genérico ar-ar de curto alcance (SRAAM) com guiamento por sensor infravermelho



Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

## MÍSSIL: COMPOSIÇÃO FÍSICA

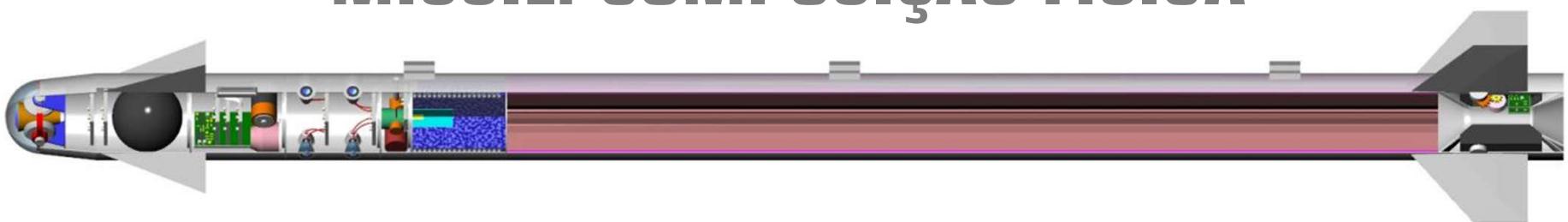


Separaremos nosso míssil-exemplo em seus **subsistemas** e **componentes** principais.

Geralmente, um míssil é constituído por **seções cilíndricas** unidas por cintas ou flanges.

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

## MÍSSIL: COMPOSIÇÃO FÍSICA



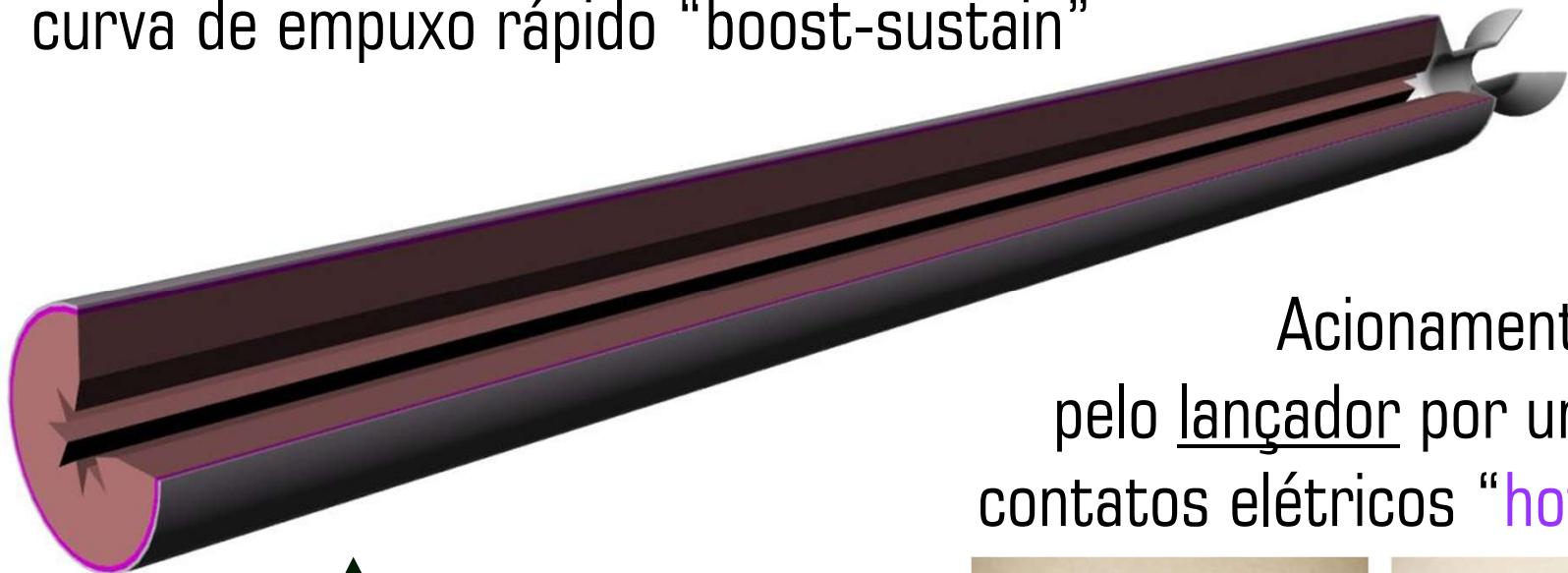
- **Célula** aerodinâmica (airframe) e apêndices
- **Atuadores** das superfícies de controle de voo
- **Propulsores** (motor-foguete e turbinas)
- Cabeça-de-Guerra (**CDG** ou **WH**)
- **SAU** (Safe and Arm Unit)
- Espoleta de proximidade (**Fuze**)
- Eletrônica (central e **GNC**) e acessórios
- Autodiretor (sensor) (**seeker**)

## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

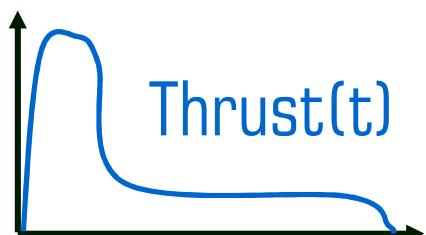
### MÍSSIL: MOTOR-FOGUETE (PROPULSOR)



Motor-foguete a **propelente sólido** com geometria de grão para curva de empuxo rápido “boost-sustain”



Acionamento direto  
pelo lançador por um par de  
contatos elétricos “**hot shoes**”

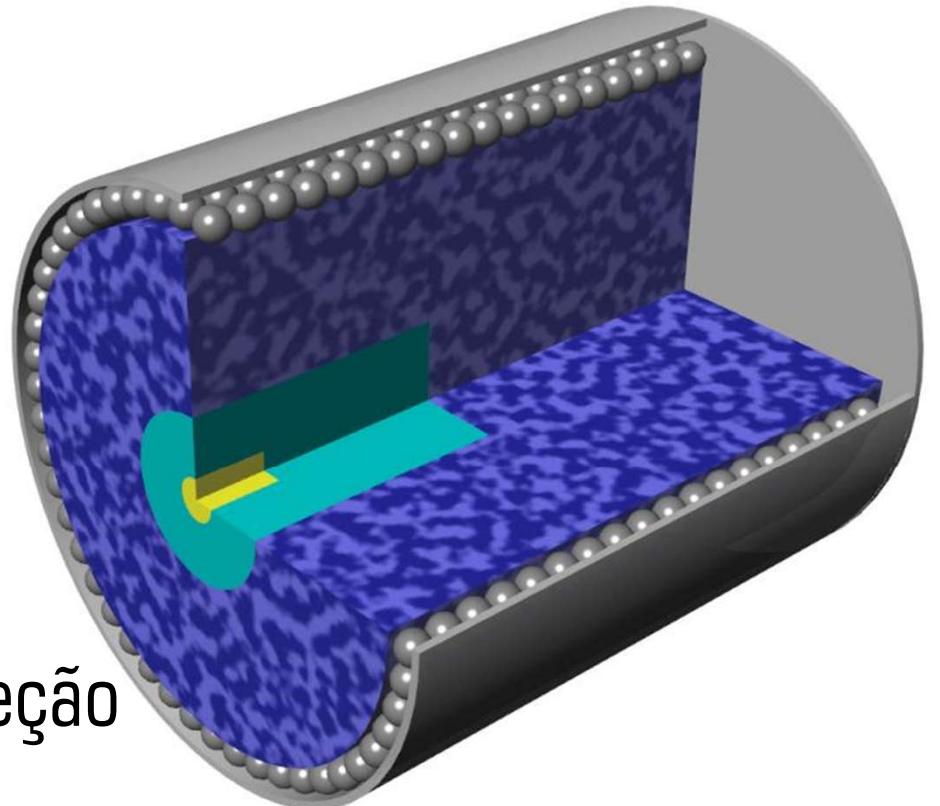


Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

## MÍSSIL: CABEÇA-DE-GUERRA



- Fragmentos pré-formados
- Trem-explosivo
- Explosivo secundário
- Reforçadores
- Otimizar a direção de projeção dos fragmentos



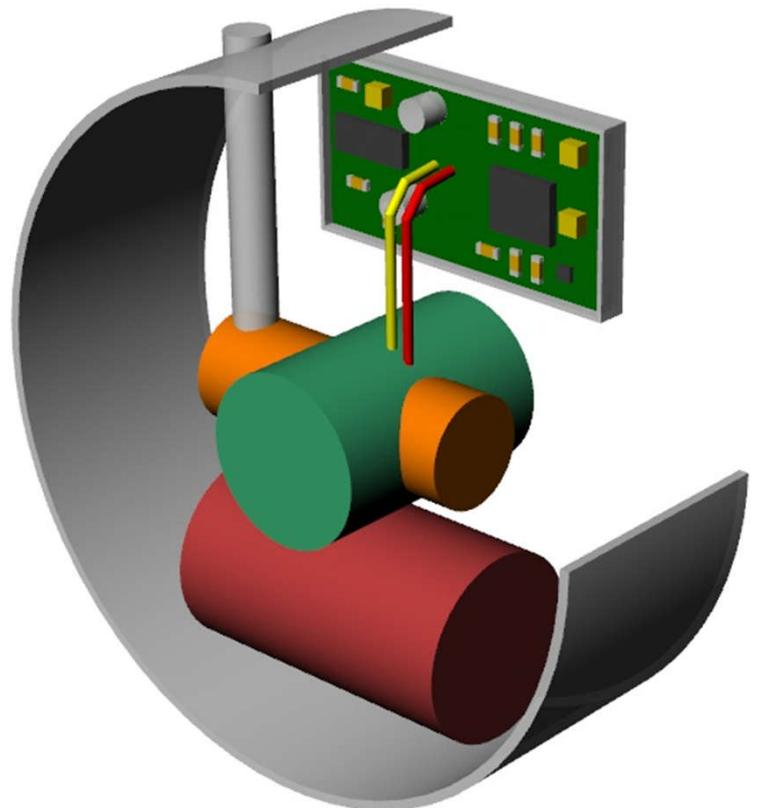
## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### MÍSSIL: SAU



Armar e Segurança de manuseio:

- Pino de segurança manual:  
**“REMOVE BEFORE FLIGHT”**
- Pino de segurança do lançador.
- Iniciador (explosivo primário)
- Dispositivo servomecânico para alinhamento do trem explosivo
- Eletrônica para **retardo** e sensor de aceleração



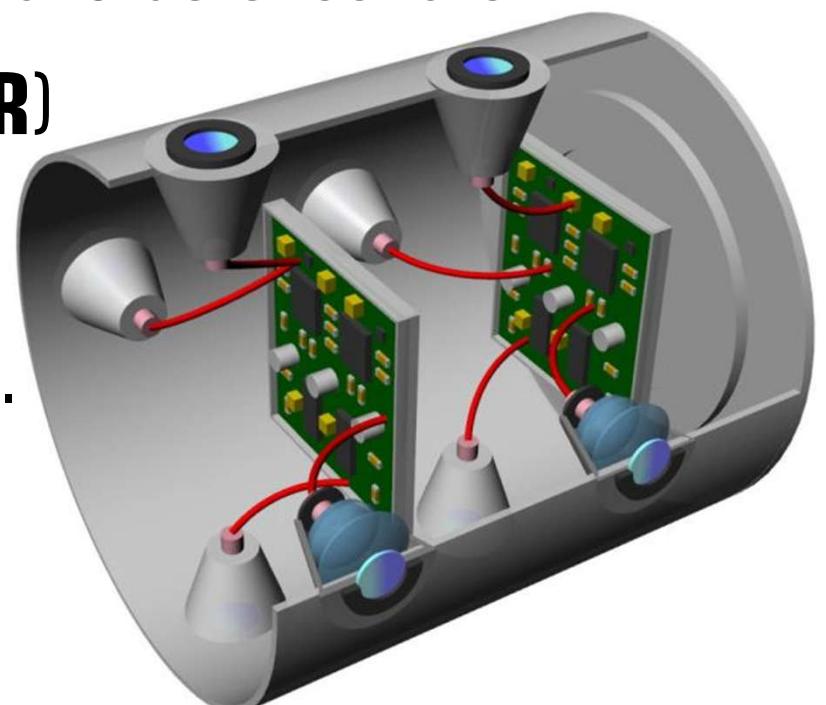
Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

## MÍSSIL: ESPOLETA DE PROXIMIDADE



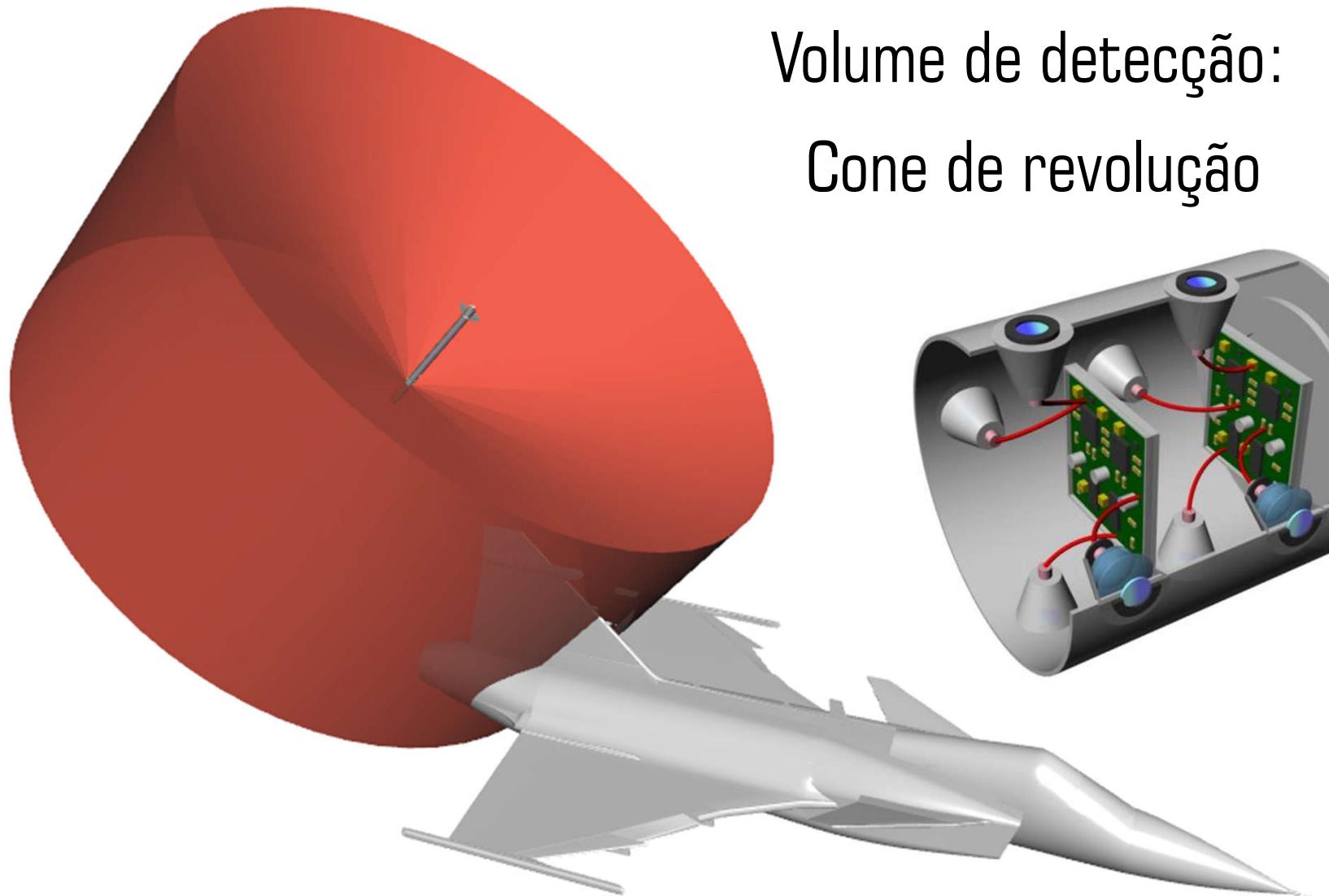
Detectar a proximidade do alvo (Laser ou Radar)

- Atraso otimizado para a geometria de encontro
- Baixa taxa de falso alarme (**FAR**)
- Todos os setores (360°)
- Insensibilidade à nuvens, sol, ...
- Neste exemplo: Laser →



Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

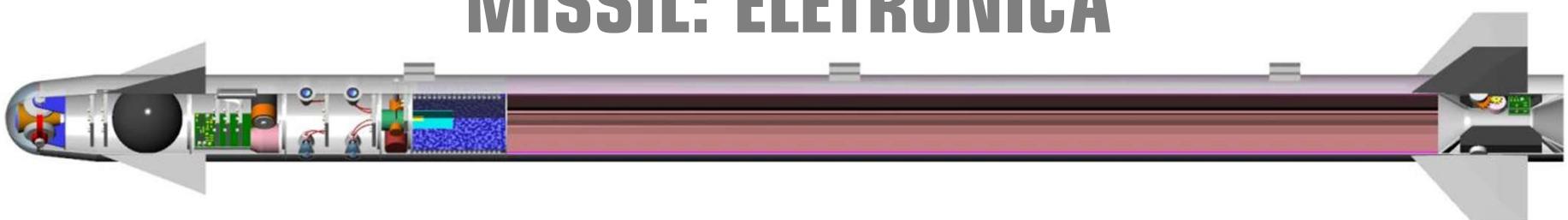
## MÍSSIL: ESPOLETA DE PROXIMIDADE



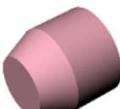
Volume de detecção:  
Cone de revolução

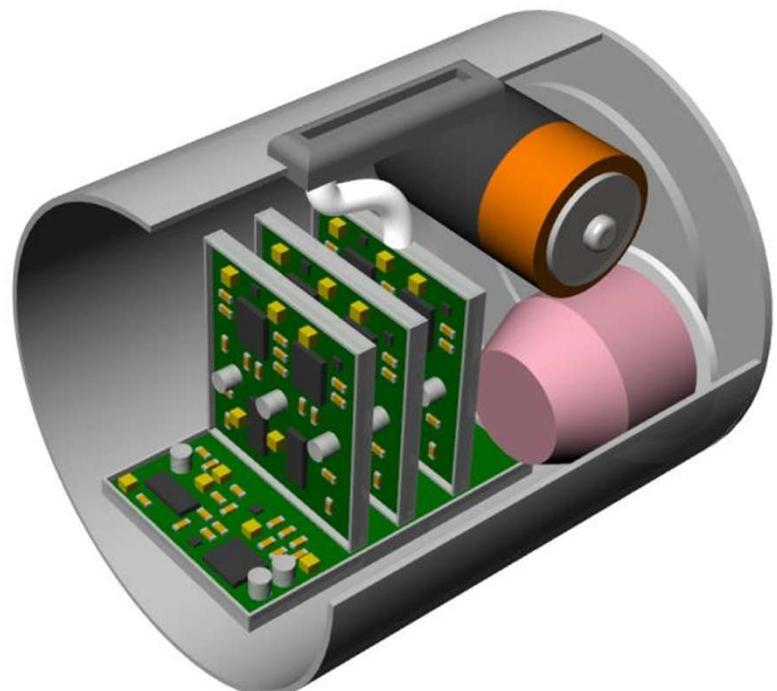
Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

## MÍSSIL: ELETRÔNICA



Placas eletrônicas e outros componentes:

- Coordenação central.
- Alimentação em voo. 
- Plataforma inercial (**IMU**) 
- Comunicação com o lançador, através do cabo umbilical
- Executa os algoritmos de **GNC**:  
**Guiamento, Navegação & Controle**(autopilotos)



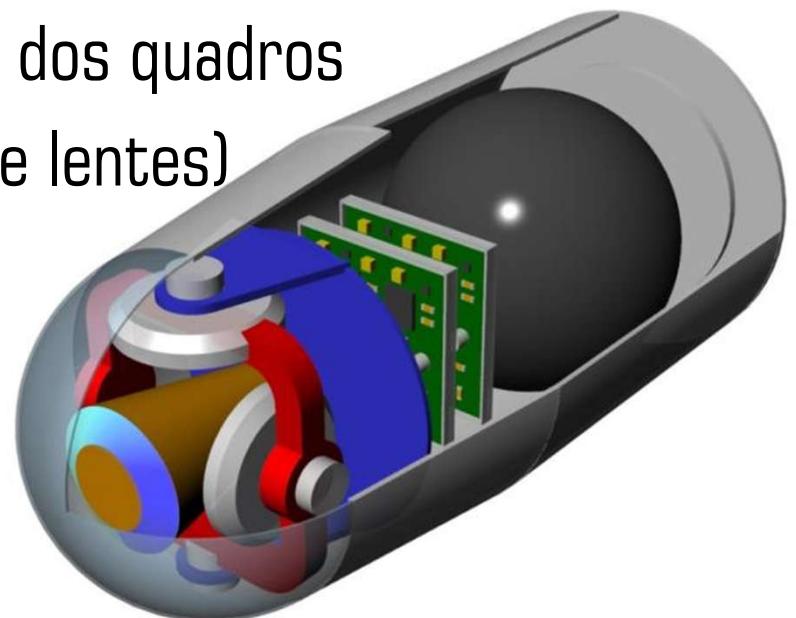
## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### MÍSSIL: AUTODIRETOR



Procurar, Detectar e Rastrear (Scan/Detect/Track)

- Reservatório de gás refrigerador (vaso de pressão)
- Processamento de sinais e controle dos quadros
- **Telescópio**: óptica (espelhos, filmes e lentes)
- Plataforma estabilizada (**Gimbal**)
- Refrigeração (Cooler)
- Sensor infravermelho (**IR**)
- **Dome**: transparente no IR
  - Proteção aerodinâmica (térmica e estrutural) e diminuição do arrasto.



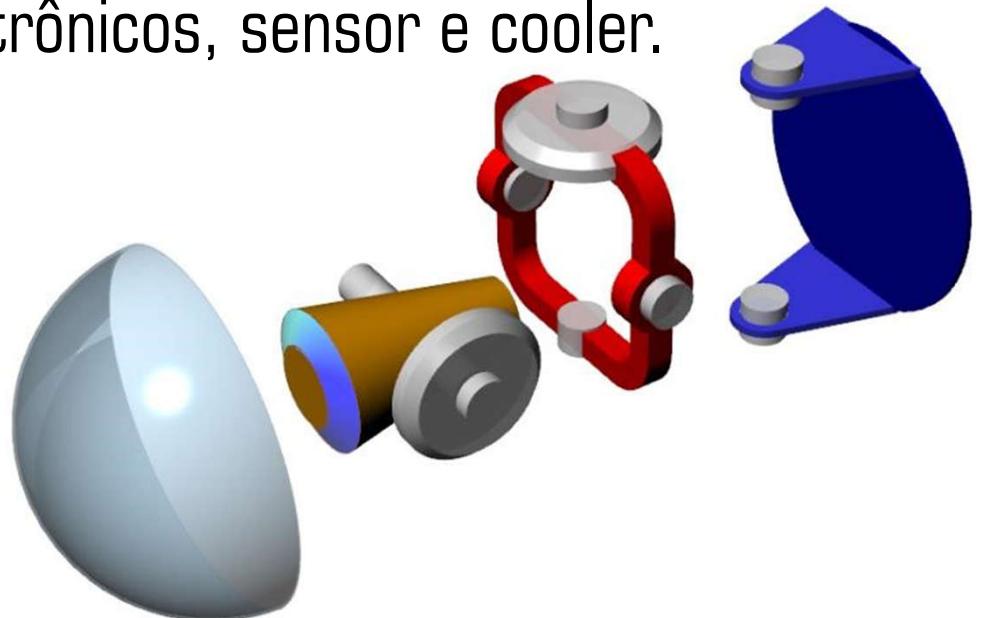
## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### MÍSSIL: AUTODIRETOR (GIMBAL)



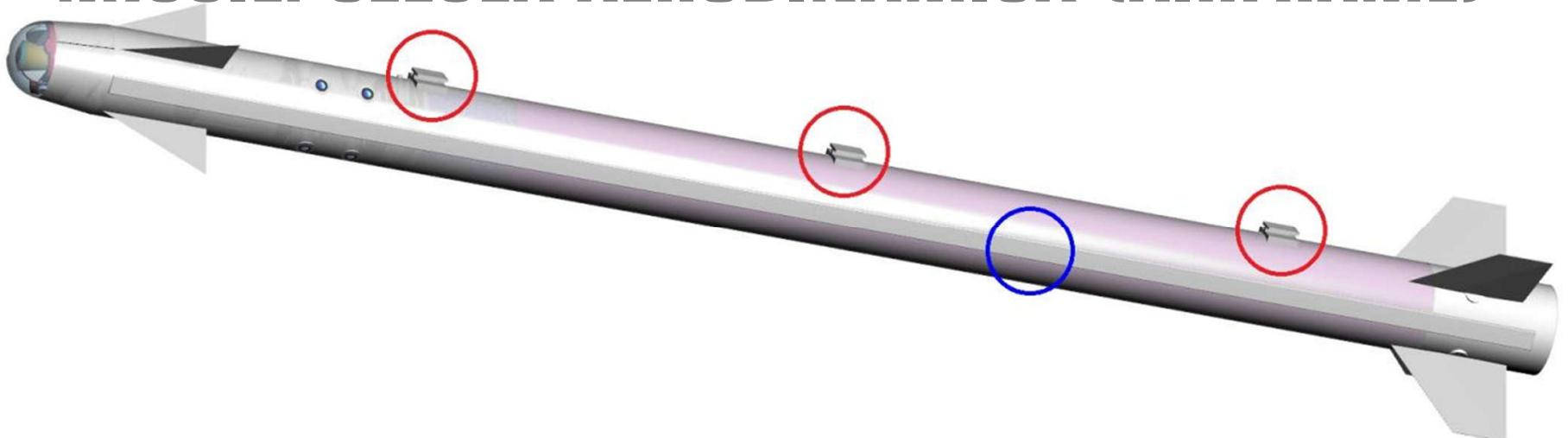
Topologia **Pitch-Yaw**: [Castelo](#), [Quadro Externo](#) e [Quadro Interno](#)

- Girômetro para medir a **Vel. Ang. Inercial da Linha de Visada**
- **Telescópio** com elementos optrônicos, sensor e cooler.
- Motores de torque
- Encoders angulares
- Juntas rotativas:
  - Tubulação de gás
  - Cablagem elétrica para:
    - Sensor infravermelho, girômetro, motores, encoders

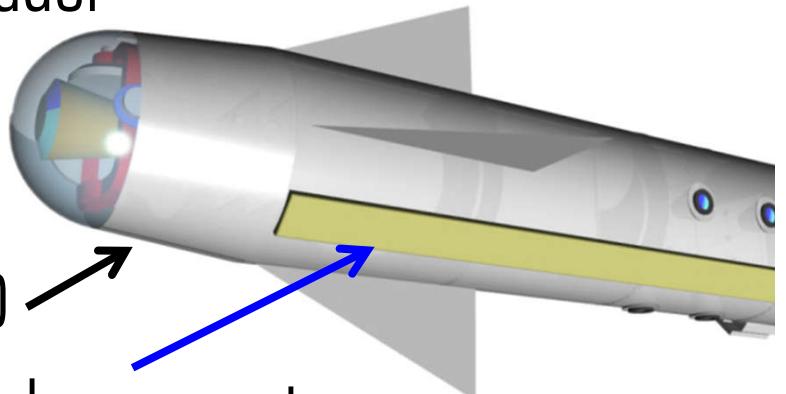


Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

## MÍSSIL: CÉLULA AERODINÂMICA (AIRFRAME)



- Cabides para encaixe no trilho do lançador
- Canards (sustentação aerodinâmica)
- Profundores (superfícies de controle)
- Ombros (tangência do dome ao corpo)
- Canaleta para acomodação externa do barramento

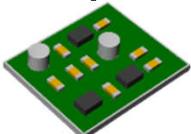
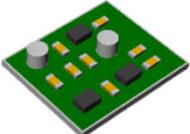


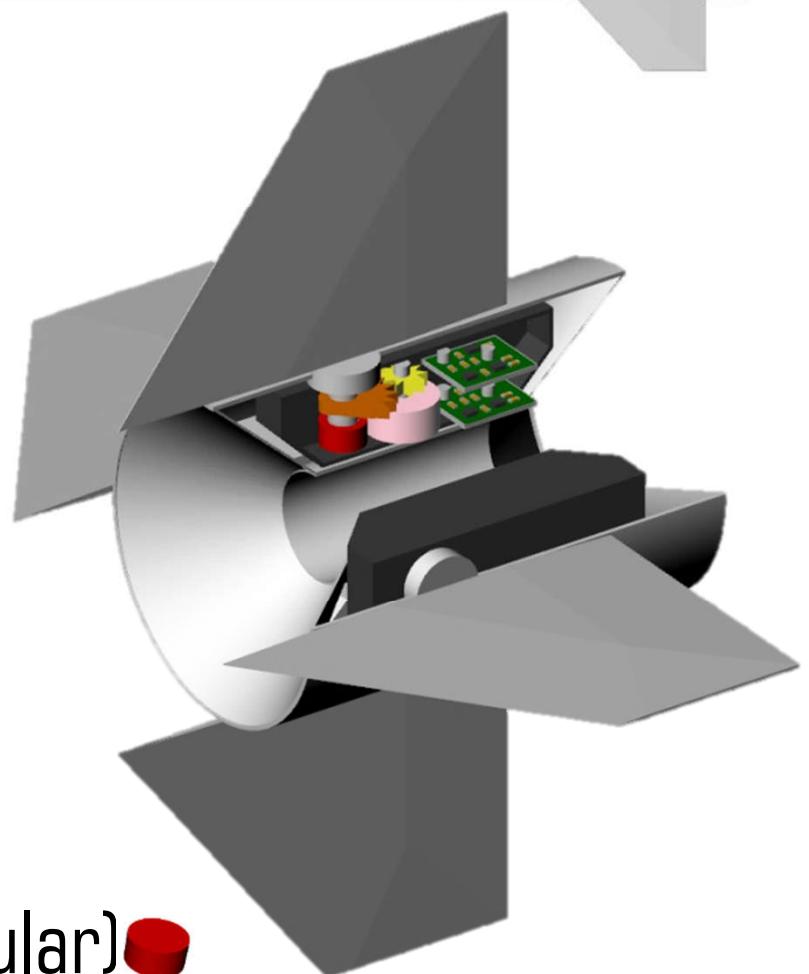
## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### MÍSSIL: ATUADORES



4 atuadores independentes:

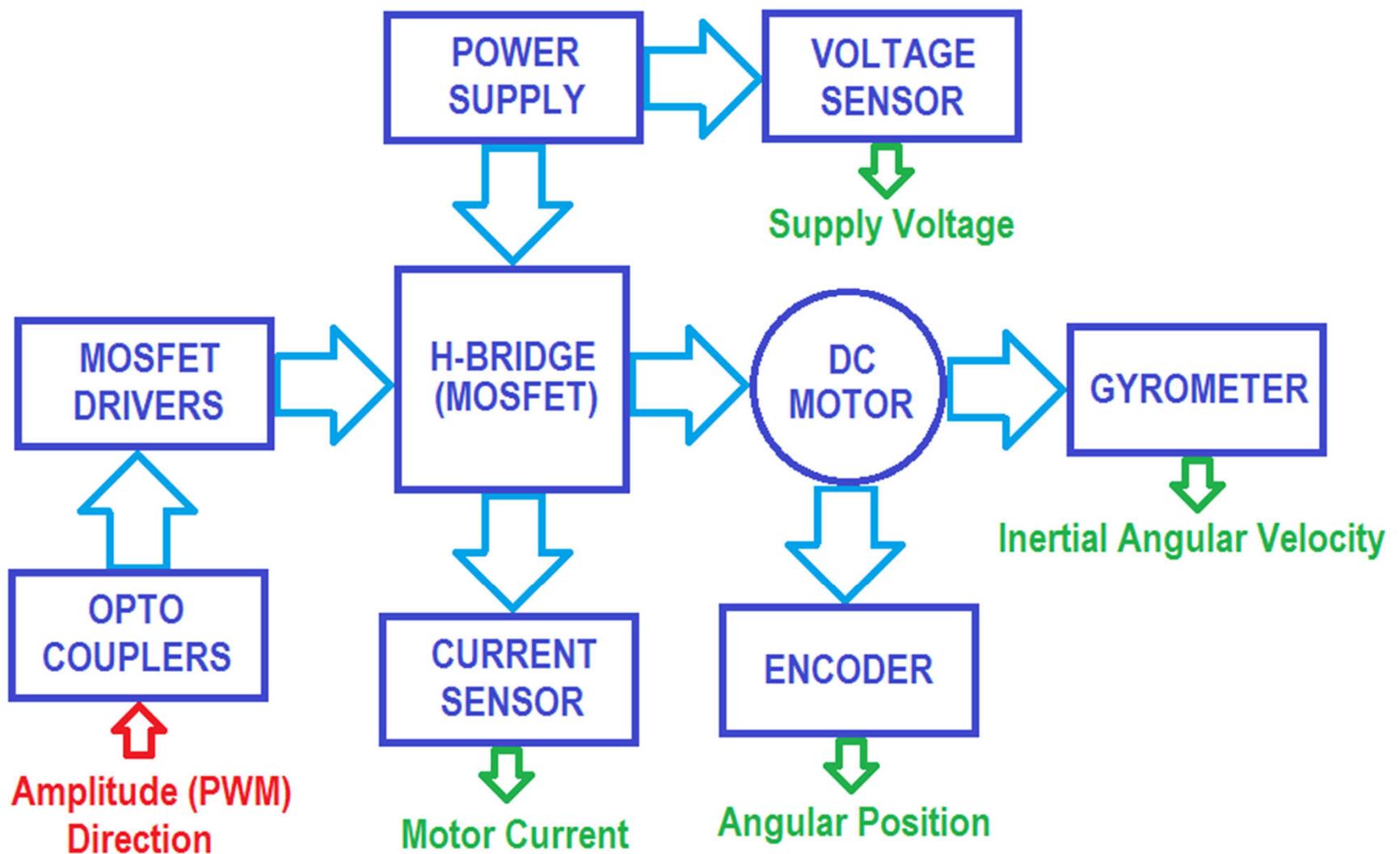
- Placa digital 
- Placa de potência 
- Motor elétrico DC 
- Profundores (empenas) 
- Acoplamento (redução) 
- Sistema de travamento
- Encoder (sensor de posição angular) 



# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### MÍSSIL: ATUADORES – PLACA DE POTÊNCIA



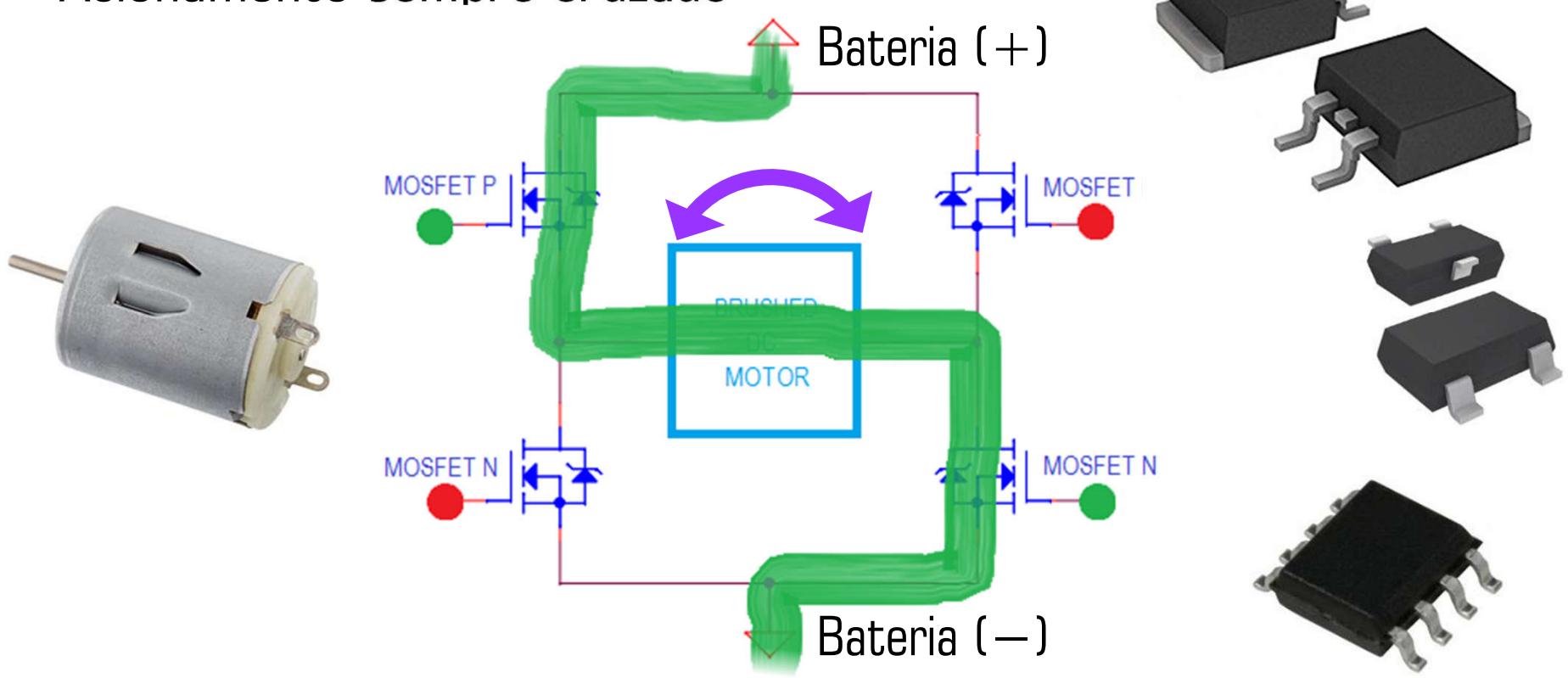
# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

## ATUADORES: COMPONENTE PONTE-H

**H-BRIDGE:** são 4 transistores tecnologia MOSFET ([interruptores](#))

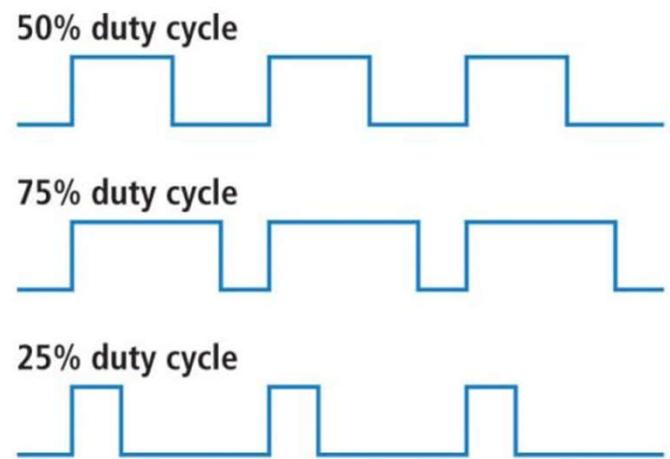
- Resistência elétrica quando conduz: de  $0,005\Omega$  até  $0,500\Omega$
- Acionamento sempre cruzado



## ATUADORES: ACIONAMENTO

Acionamento chaveado:

- Pulse Width Modulation (**PWM**)
- Frequência constante (5–100 kHz)
- Variação da largura do pulso
- Indutor do motor faz a potência média eficaz
- Mínimo  $\sim 25\%$  de duty-cycle para vencer o atrito seco.
- Satura em 100%  $\rightarrow$  Velocidade máxima  $\rightarrow$  Limite de slew rate
- Proteções do Servomecanismo:
  - Batente (end stop) de software: 1 grau do batente mecânico.
  - Sensor de corrente excessiva/coerente e temperatura.



Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

## NOÇÃO VISUAL DE PWM

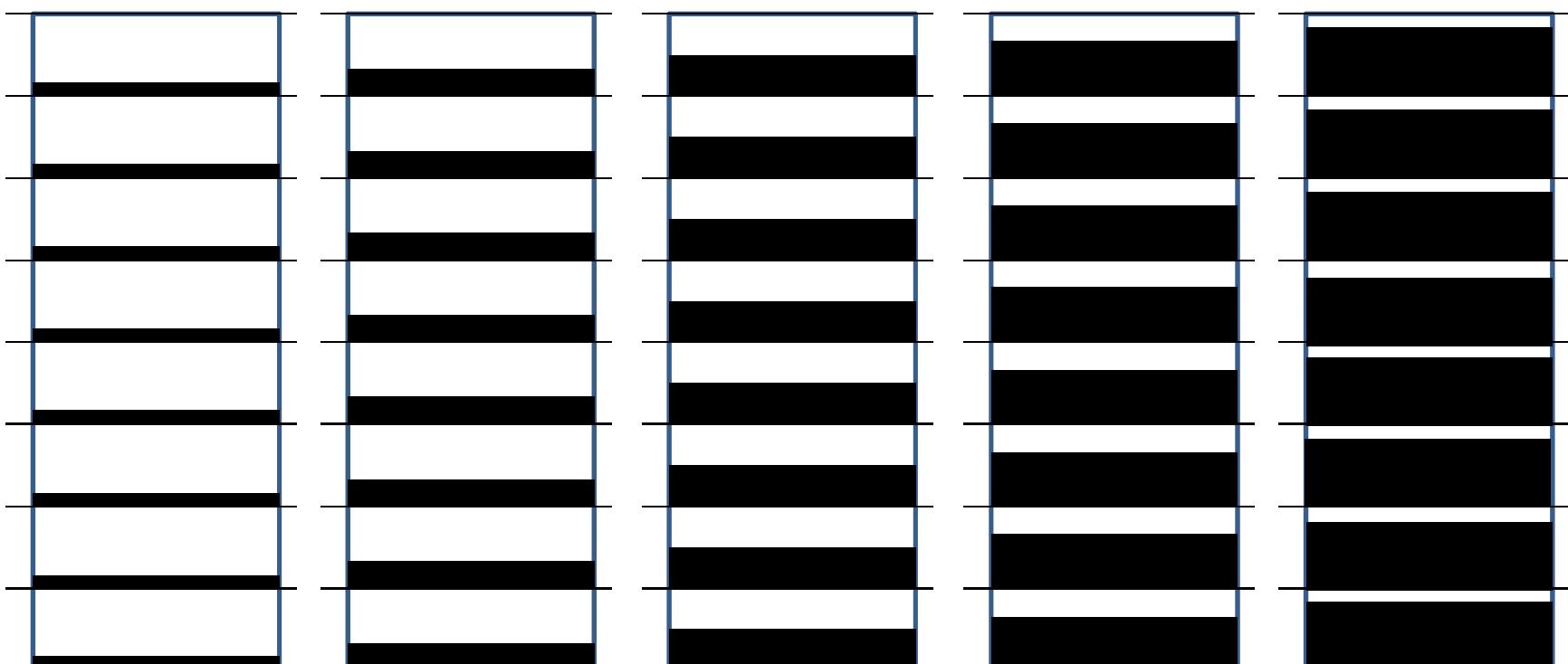
18%

34%

50%

67%

83%



Valor médio eficaz:



## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

# ATUADORES: MALHAS de CORRENTE e POSIÇÃO

### Malha de Controle de Posição:

- Compara a posição angular atual com a referência desejada.
- Calcula o torque desejado para atingir a posição.

### Malha de Controle de Corrente:

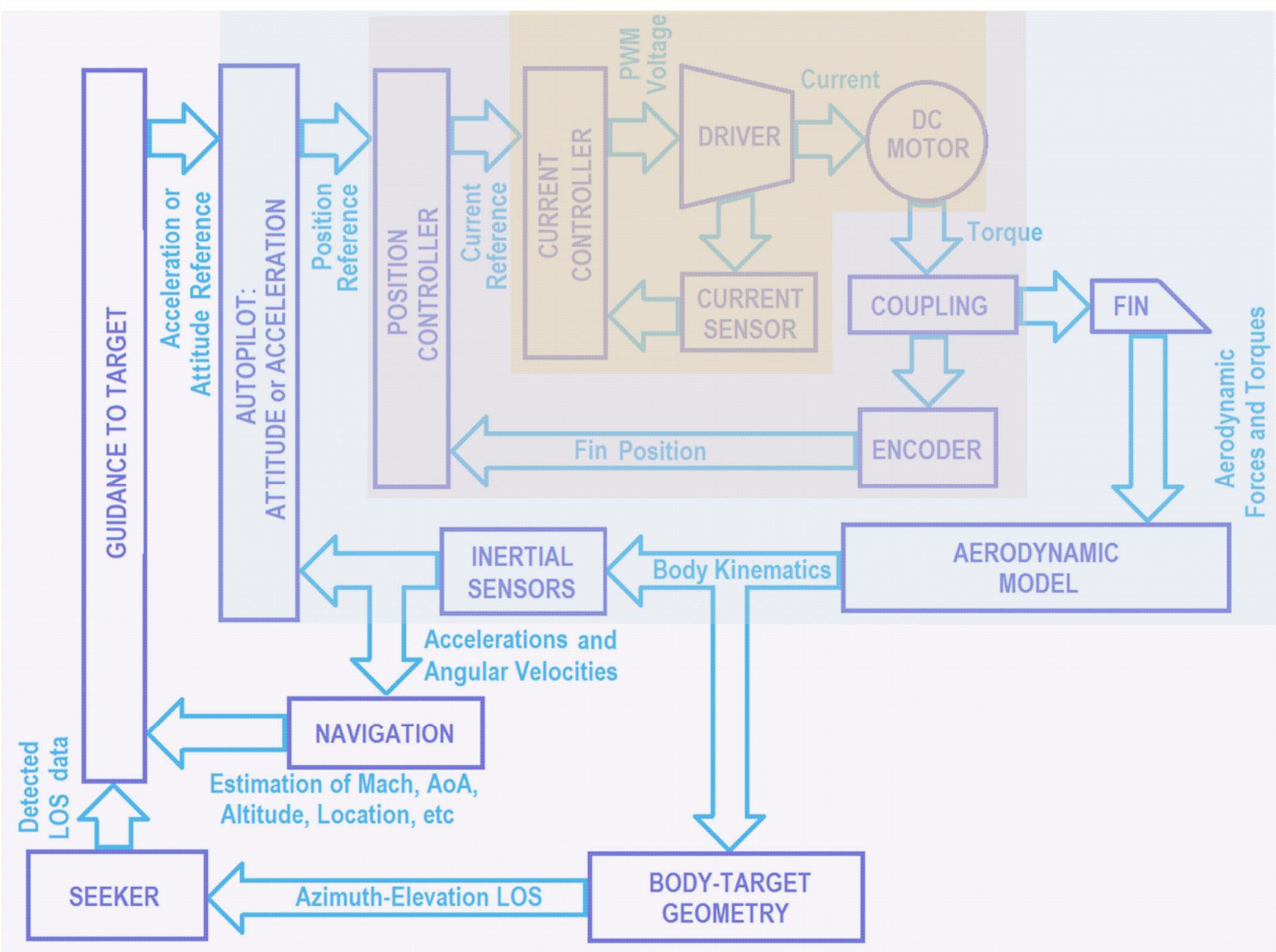
- Compara a corrente atual com a referência desejada.
- Calcula o duty-cycle do PWM considerando a tensão da bateria.
- Vantagem: Compensa tolerâncias do motor e da fonte.
  - Variação por fabricação, temperatura, velocidade, idade, ...

$$V_b = K_b \omega_m$$

$$M = K_T \cdot i_a$$

$$V_m = V_b + R_m \cdot i_a$$

$$V_m = PWM \cdot E_{batt}$$



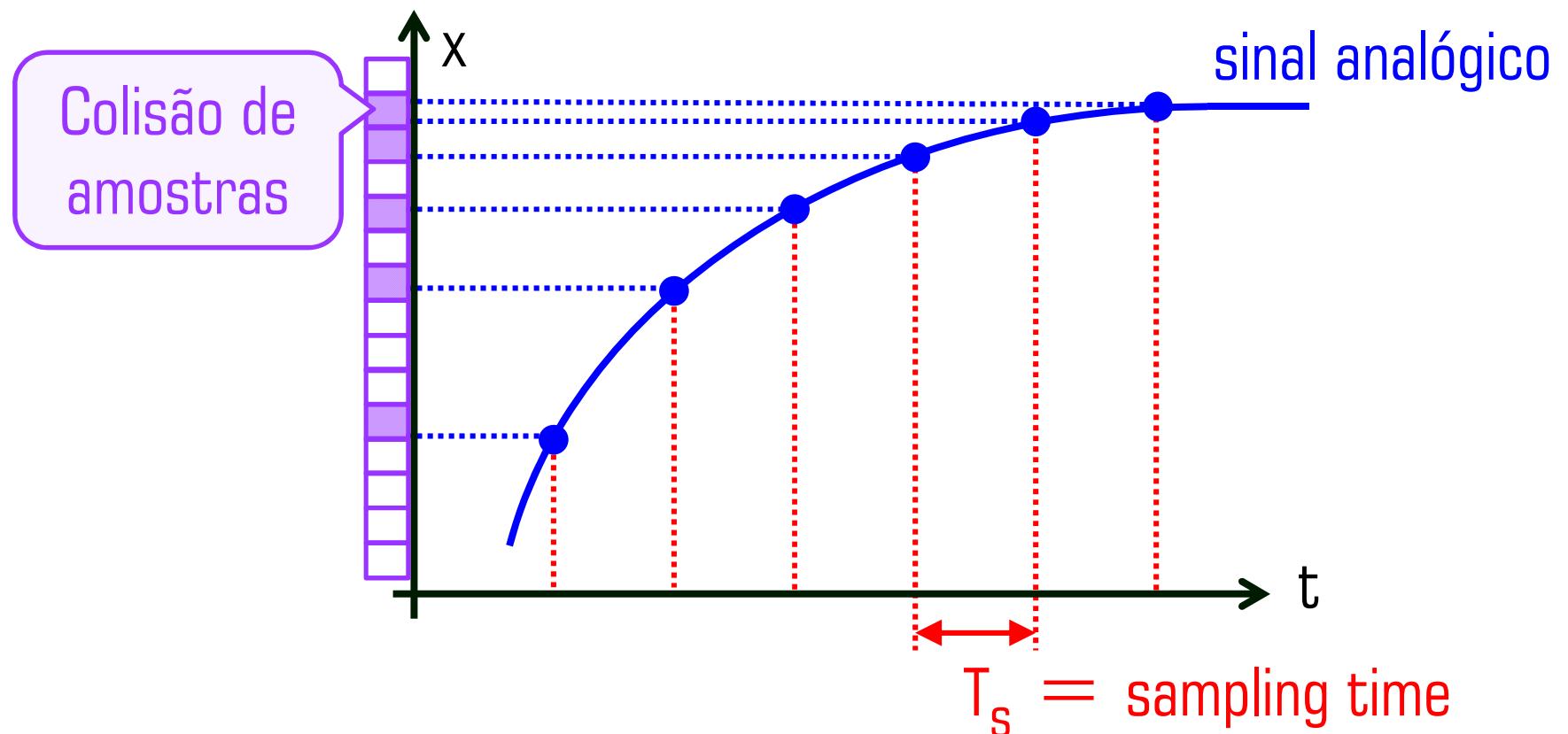
## NÃO-LINEARIDADES DOS CONTROLADORES DIGITAIS

- Discretização: Taxa de amostragem e ciclo de controle.
  - Ciclo de amostragem, processamento e atuação.
  - Exemplo: taxa de 100 Hz  $\rightarrow T_S = 10 \text{ ms}$
- Quantização: resolução de sensor e de saída do atuador.
  - Exemplo: Encoder de  $360^\circ/12$  bits  $\rightarrow 360^\circ/2^{12} = 0,09^\circ$
  - Exemplo: **PWM** só pode alterar em múltiplos de 5%.
- Retardo: amostragem, processamento, comunicação e atuação
  - Exemplo: 5 ms

## SINAL DIGITAL: DISCRETIZAÇÃO e QUANTIZAÇÃO

Discretização: Taxa de amostragem do sinal (temporal)

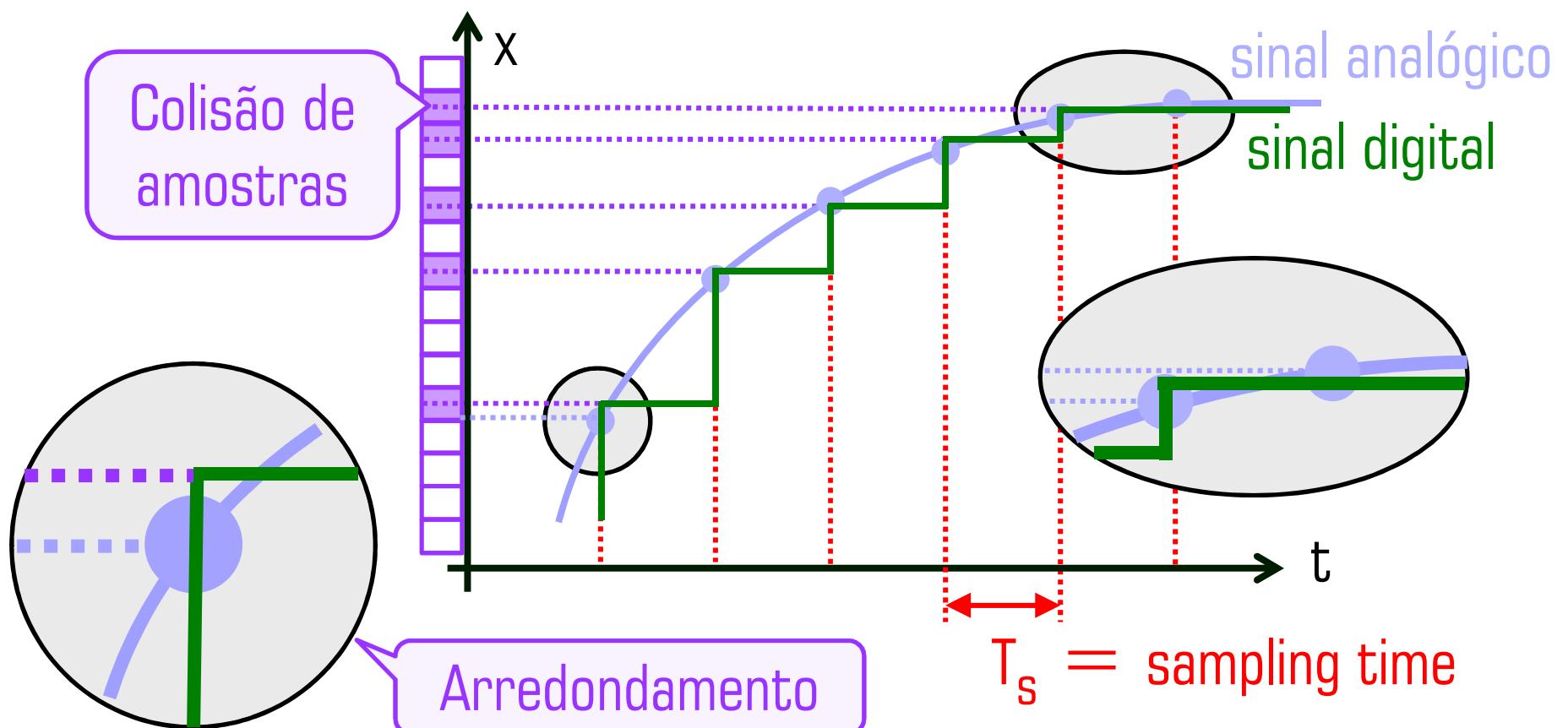
Quantização: Resolução de sensor e de atuação (amplitude)



## SINAL DIGITAL: DISCRETIZAÇÃO e QUANTIZAÇÃO

Discretização: Taxa de amostragem do sinal (temporal)

Quantização: Resolução de sensor e de atuação (amplitude)





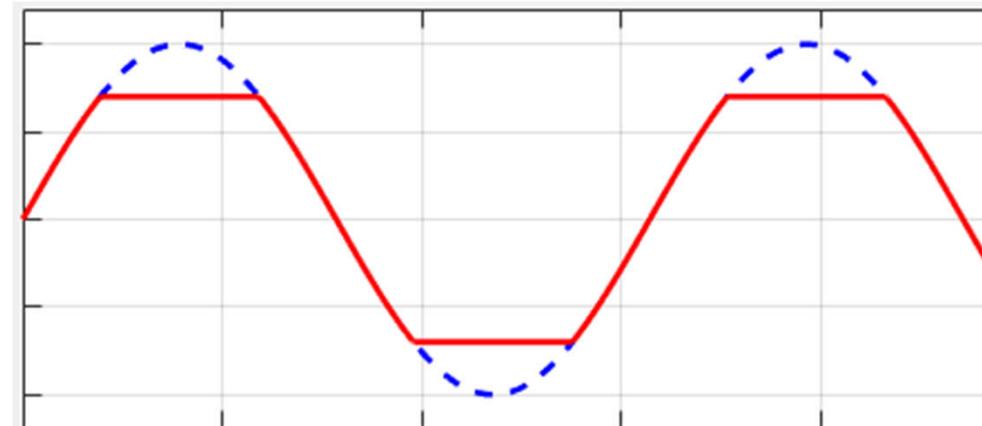
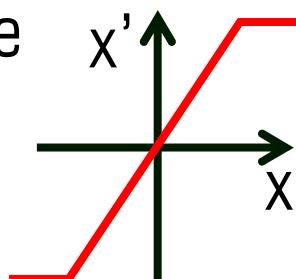
# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### NÃO-LINEARIDADES DOS ATUADORES ELETROMECÂNICOS

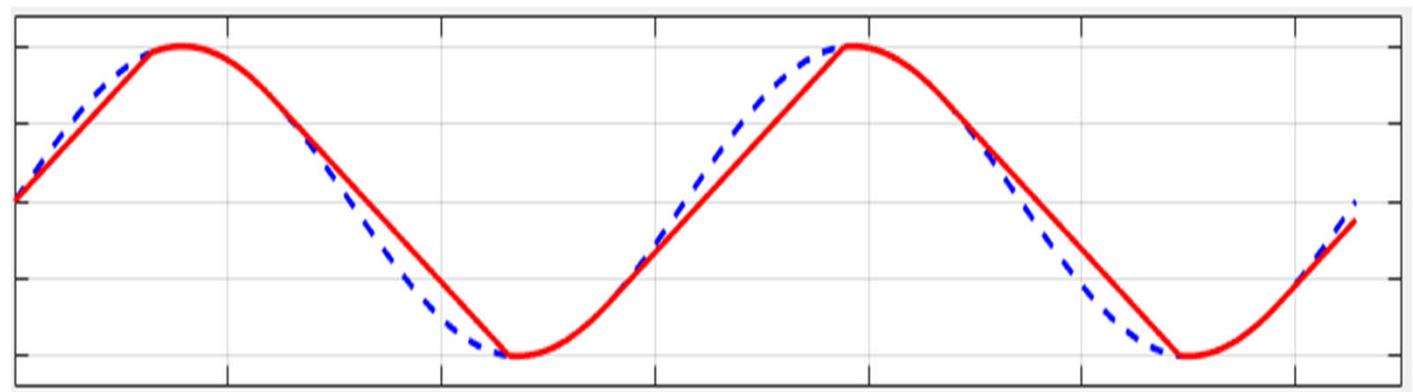
Saturação da amplitude executada → **Batente**

Saturação de  
amplitude  
“clamp”



Saturação do esforço do controlador (**PWM** 100% duty cycle)

**SLEW RATE  
LIMIT**  
(velocidade  
máxima)



Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

## NÃO-LINEARIDADES DOS ATUADORES ELETROMECÂNICOS

- Atrito seco:
  - para sair do repouso
  - para inverter sentido (**zona morta**)
- Folgas (backlash):
  - descontinuidade de torque
  - vibração
  - efeito de **histerese**
  - desgaste por impacto

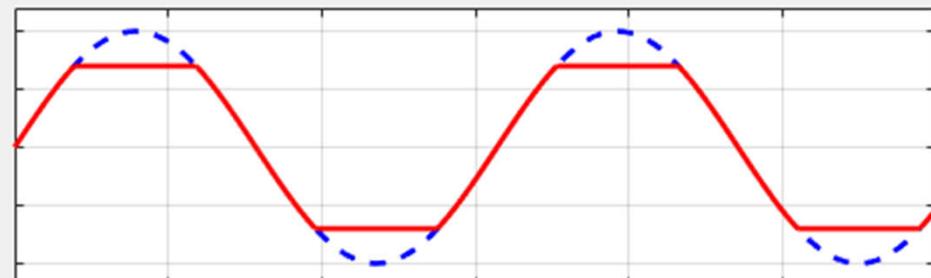
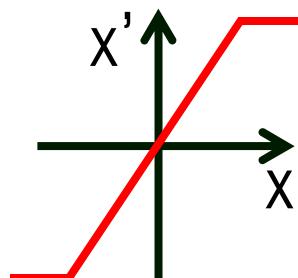


# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

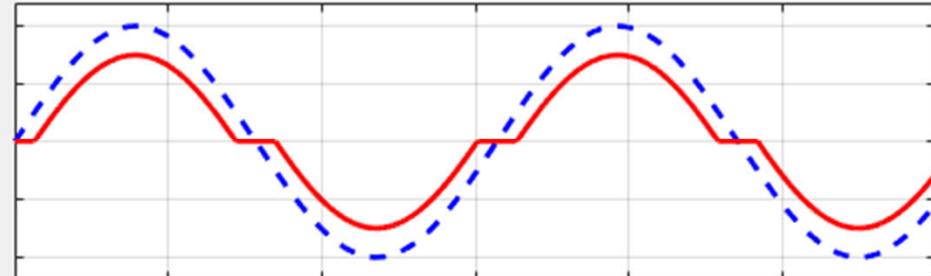
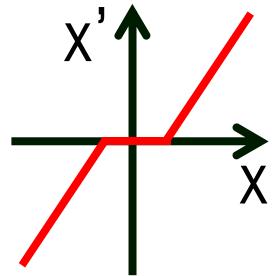
## Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### SATURAÇÃO, ZONA MORTA e HISTERESE

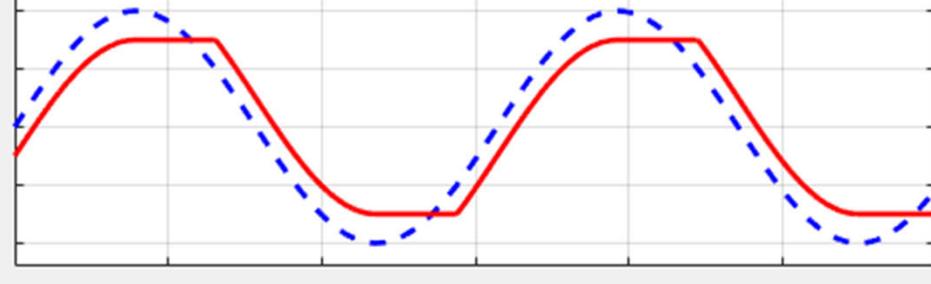
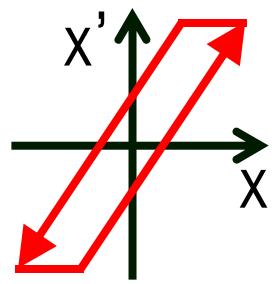
Saturação de  
amplitude  
“clamp”



Zona Morta  
“dead zone”  
(atrito)



Histerese  
“backlash”  
(folga)



## MÍSSIL: SUBSISTEMAS PARA ENSAIOS EM VOO

Substitui a cabeça-de-guerra no míssil em desenvolvimento:

- Transmissor de telemetria: antena e rádio transmissor de uma seleção das mensagens no barramento, para análise do voo.
- Teledestruição: receptor para o comando de destruição remota, caso seja detectado parâmetros fora da **segurança do ensaio**. Pirotécnico que rompe o míssil ao meio.

## MÍSSIL: OUTROS SUBSISTEMAS

Outros subsistemas, ausentes no nosso míssil-exemplo:

- Receptor de Data-Link: rádio para telecomando, recebendo a posição do alvo ou comandos de voo (guiamento passivo).
- Empuxo vetorado (TVC): articulação da tubeira do motor-foguete ou aletas para **desvio direcional** da força de empuxo.
- Espoleta de impacto:
  - ou acelerômetro para detectar **desaceleração brusca**.
  - ou interruptor elétrico para detectar **esmagamento**.

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

## **ESTADOS FUNCIONAIS – MÍSSIL AR-AR**

Cativo - Aquisição

Cativo - Rastreio

Sequência de Lançamento

Voo Livre – Cruzeiro

Voo Livre – Guiamento

Voo Livre – Terminal

Estados Excepcionais

## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### ESTADO CATIVO - AQUISIÇÃO

Enquanto preso ao trilho do lançador, o autodiretor procura alvos ao redor de um vetor de apontamento/designação proveniente de:

- Radar aeroembarcado (da aeronave lançadora)
- Orientação do capacete (**HMS**: Helmet Mounted Sight)
- Posição recebida via data-link (radar de outra aeronave)
- Vetor fixo “boresight” (apontamento fixo para frente)
- Sensor do autodiretor deverá estar refrigerado para conseguir detectar alvos → Tempo de cool-down

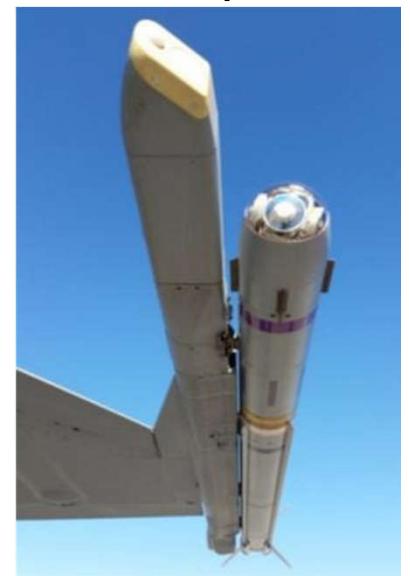


## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### ESTADO CATIVO - RASTREIO

Emissão de calor detectada e acompanhada (rastreada) pelo autodiretor “Target Locked” “Lock-on condition”.

- Gimbal controlado → alvo no centro do sensor
- Alvo no alcance infravermelho do míssil
- **LOBL**: Lock-on Before Launch



Piloto comanda “Cage” para que o autodiretor retorne ao estado **escravizado** a um vetor de apontamento/designação.

- Uso se rastreio do sol, reflexo no mar, “clutter”, amigo, etc.

Lançar somente se o alvo estiver no alcance cinematográfico do míssil.

Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

## SEQUÊNCIA DE LANÇAMENTO

1. Disparo e verificação da **bateria térmica** do míssil
2. O míssil verifica eletronicamente os subsistemas (**BIT**)
3. Solenoide no lançador **destrava** um dos cabides (detentor)
4. O lançador faz o disparo do **motor-foguete**  
\* Operacionalmente, tolerado retardo de até 1 segundo.



Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados  
Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

## SEQUÊNCIA DE LANÇAMENTO

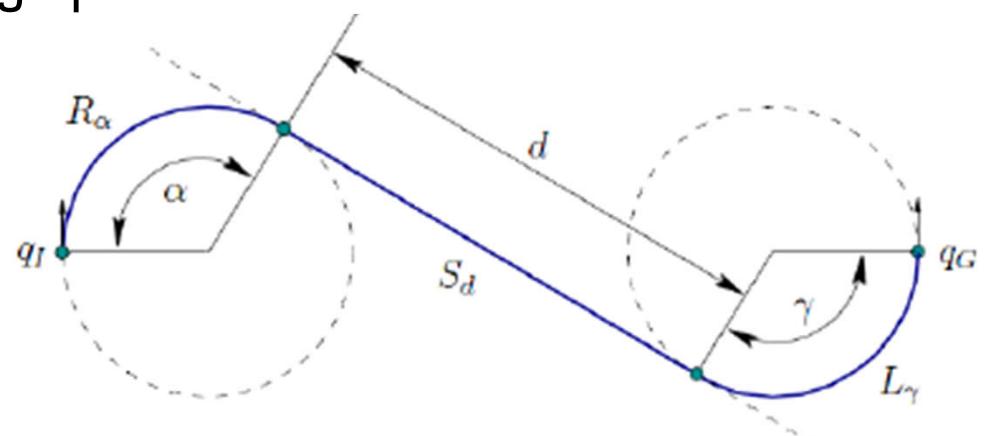


5. Segurança: detecção do rompimento do **cabo umbilical**
6. Segurança: detecção de **aceleração** axial ( $>30g$ )
7. Após retardo: superfícies de controle são **destravadas**
8. Após retardo: alinhamento do trem explosivo na **SAU**

Distância segura de detonação da aeronave lançadora.  
Sendo conservador:  $\sim 300$  metros

## ESTADO VOO LIVRE - CRUZEIRO

- Caso **LOAL**: Lock-on After Launch
  - Autodiretor busca o alvo na direção mais provável:
    - Última posição do alvo conhecida (extrapolação).
    - Posição atualizada recebida externamente por data-link.
  - Guiamento por Waypoints (coordenadas ou rumos).
  - Planeio (maximiza **Lift/Drag**) para aumento de stand-off.
  - Caminho de Dubins:
    - Arcos circulares
    - Retas tangentes



## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### ESTADO VOO LIVRE - GUIAMENTO

- Autodiretor continua rastreando o alvo.
- Girômetro junto ao detector fornece a medida de **VAILV**  
**Velocidade Angular Inercial da Linha de Visada**
  - Linha de Visada (**LOS**): segmento Míssil → Alvo.
- Guiamento por “Navegação Proporcional” produz uma referência para o comando de aceleração lateral (**LATAX**)
- Plataforma inercial fornece a aceleração lateral atual.
- **Autopilotos** calculam a deflexão de profundores necessária.
- Superfícies de controle obedecem os comandos.
- Perfil aerodinâmico do corpo corrige a trajetória

# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

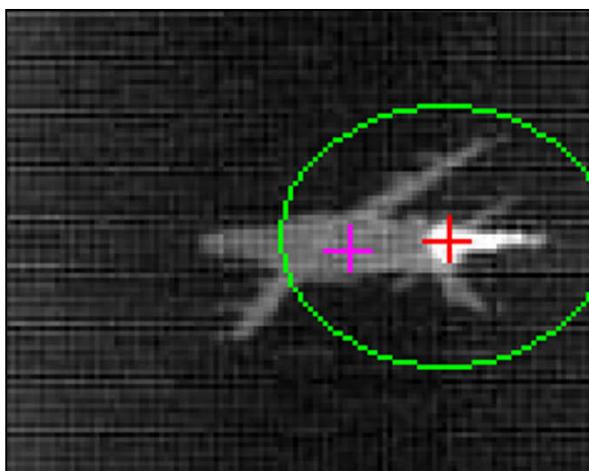
## Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### ESTADO VOO LIVRE - TERMINAL

**Regra:** **Miss**Distance < **Detection**Distance < **Lethal**Distance

#### Funcionamento:

- Espoleta de proximidade ativada para detectar alvos.
- Espoleta de impacto monitorada pelo processador central.
- Timer de autodestruição iniciado.
- **Sinal de detonação:** enviado para o iniciador pirotécnico.



## ESTADOS EXCEPCIONAIS

Falha cativo: verificações (**BIT** Built-in Tests) encontraram panes:

→ Míssil não operacional, não poderá ser lançado.

Míssil preso: míssil não saiu do trilho, umbilical não foi rompido.

→ Bateria térmica consumida, oportunidade perdida.

Perda de rastreio do alvo em voo livre: míssil poderá tentar voltar a procurar o alvo em posição extrapolada (estimada) do alvo.

Jettison: descarte para melhorar Qualidade de Voo ou safety:

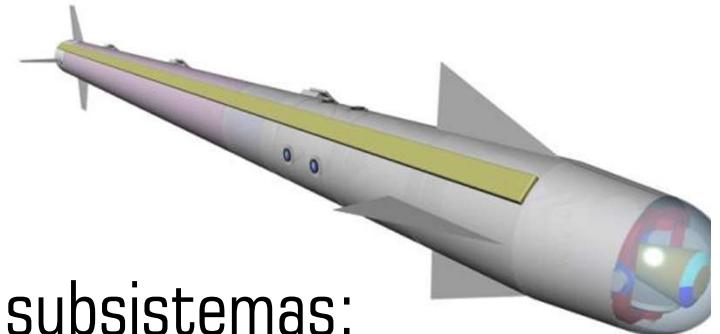
→ Bateria térmica inativa e motor-foguete disparado.  
→ Lança normal sem “target lock” → autodestruição.

Auxiliary Jettison: sem foguete, destrava e alija por gravidade.

## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

### Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

# BARRAMENTO DE DADOS



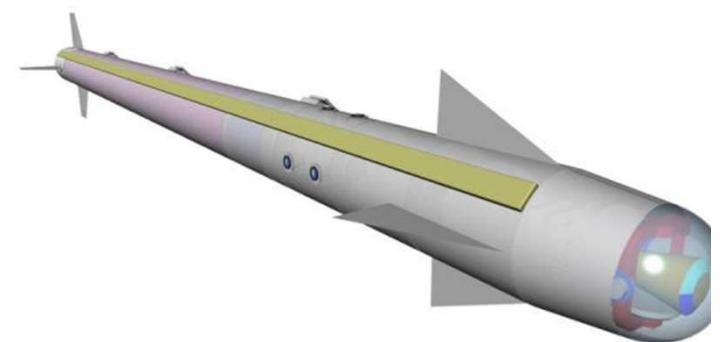
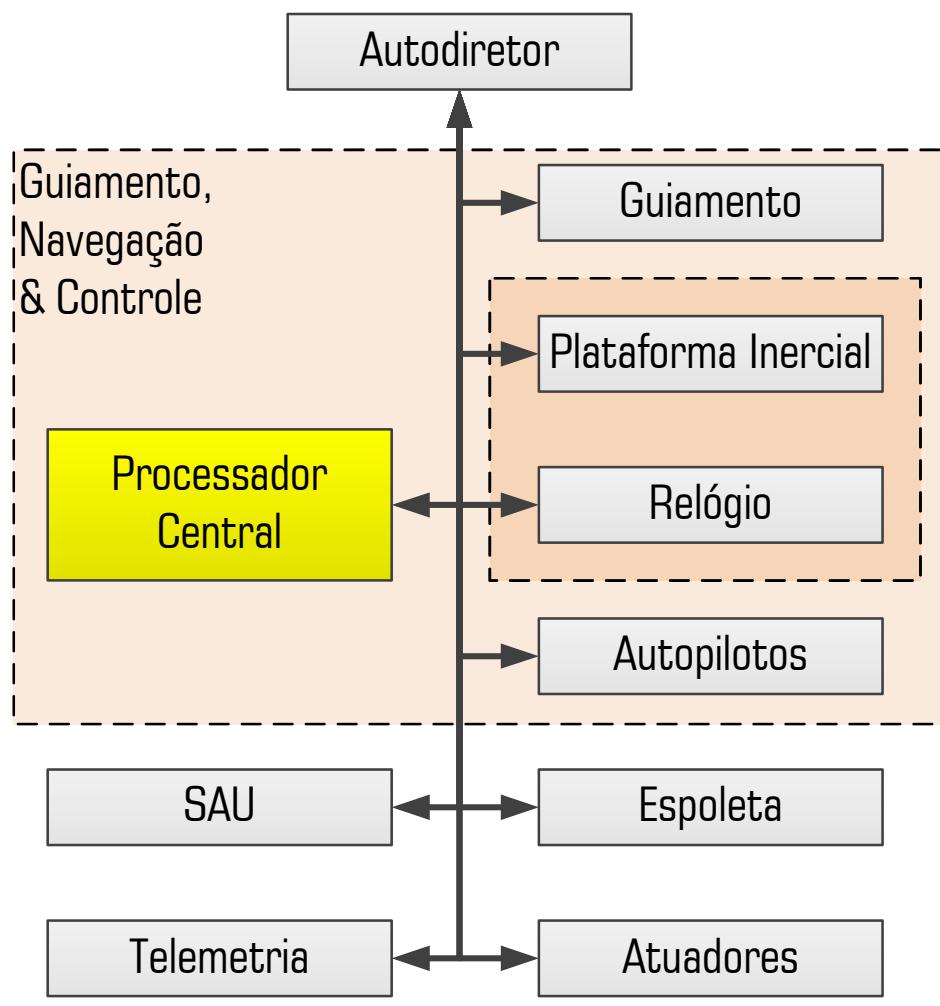
- É a “espinha dorsal” eletrônica do míssil.
- Distribui energia elétrica, alimentando os subsistemas:
  - Cativo: energia provém da aeronave, através do cabo umbilical.
  - Em voo: energia provém de baterias ou geradores.
- Rede de distribuição de dados entre os subsistemas
  - Através de mensagens de “**comandos**” e “**status**”
  - Constituído por 1 ou 2 pares de fio trançados.
    - Alta velocidade e imune às interferências eletromagnéticas.
  - Análogo ao barramento **MIL-STD-1553B** das aeronaves.
  - Exemplos de barramentos em mísseis: **CAN 2.0B**, **RS-485**, ...



# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### ESTRUTURA DO BARRAMENTO DE DADOS

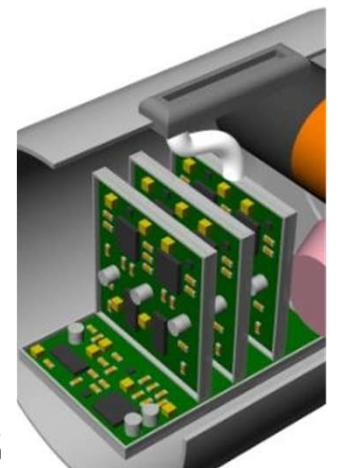


No barramento, só  
trafega uma mensagem  
de cada vez.

Processador Central  
gerencia o tráfego de  
mensagens.

## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

# BARRAMENTO: PAPEL DA ELETRÔNICA



**Processador Central** deve:

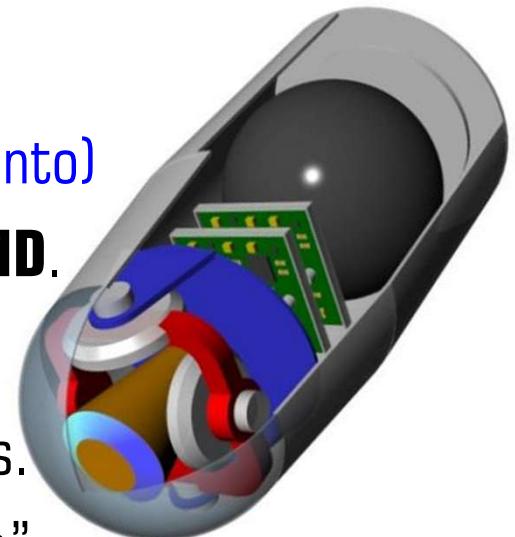
- Coordenar o barramento: periodicamente enviando os “**comandos**” e observando os “**status**” nos tempos corretos.
  - Gerenciar estados, monitorando subsistemas.
- Comunicação com o **lançador da aeronave**, através do umbilical.
- Autorização para destravamento de empennas.
- Monitorar espoletas e gerar sinal de detonação.

## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### BARRAMENTO: AUTODIRETOR

Status: Direção de apontamento atual

- Coordenadas (Elevação, Azimute) ou (Elevação, Rolamento)
- Informa para onde está olhando → mostra no **HUD/HMD**.



Status: Estado de operação:

- Não-refrigerado → incapaz de detectar alvos distantes.
- Refrigerando → Preparação “warm-up” ou “cool-down”.
- Busca de alvos, com/sem autorização de rastreio
- Rastreamento autônomo de alvo adquirido.

Status: VAILV: Velocidade Angular Inercial da Linha de Visada

Comando: Direção de apontamento designada.

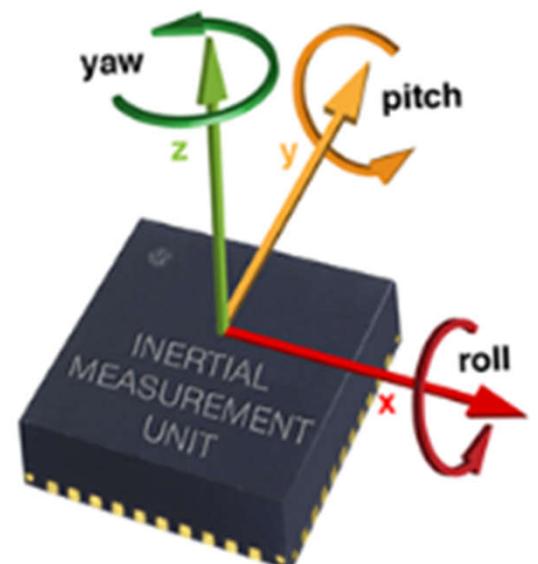
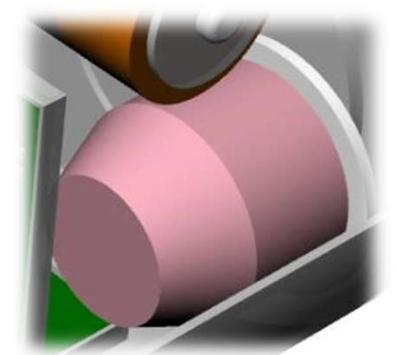
Comando: Troca de estado. Exemplo: rastreando → designado

## BARRAMENTO: PLATAFORMA INERCIAL

**IMU**: Inertial Measurement Unit

Plataforma inercial insere os “status”:

- Relógio: Base de tempo precisa, para referência única.
- Acelerações lineares: iniciais nos 3 eixos.
- Velocidades angulares: iniciais nos 3 eixos.



# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### BARRAMENTO: ATUADOR

Status: Deflexão (Posição) Angular atual

- Finalidade: análise por telemetria

Status: Estado de operação:

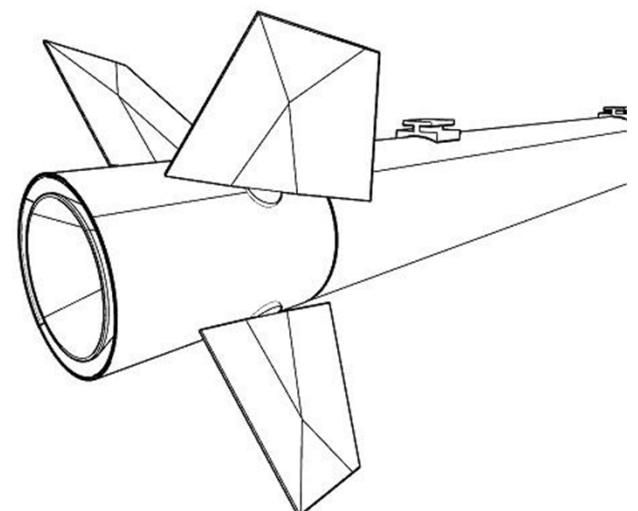
- Operacional / Travado / Pane



Comando: Deflexão angular comandada

Comando: Destravamento dos profundos.

- Após separação segura.



## Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### BARRAMENTO: CAN

Barramentos aeronáuticos são certificados no pior caso de uso.

Em mísseis, é criado uma **agenda** das mensagens:

Planejar uma agenda periódica/cronológica de mensagens, onde cada terminal envia sua mensagem no **slot esperado**.

Exemplo: **barramento CAN**

Taxa de dados: 1 Mbps (1 milhão de bits por segundo)

Comprimento da mensagem: aproximadamente 100 bits total

Conteúdo útil da mensagem: dois números escalares reais

Capacidade de trafegar até  
**20 mil números de ponto-flutuante por segundo.**

# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### CAN2.0B – FORMATO de MENSAGEM

<b>SOF</b>	Identificador	Tamanho	Dados	<b>CRC</b> check	<b>ACK</b>	<b>EOF</b>
1	31 bits	4 bits	0-64 bits	16 bits	2	7

**SOF**: Start-of-Frame

Identificador: código de tipo, remetente e/ou destinatário.

Dados: carga útil de 0 até 8 bytes, de tamanho definido.

**CRC check**: cálculo para verificação de integridade da mensagem.

**ACK**: (acknowledgement) aviso de recebimento pelo receptor.

**EOF**: End-of-Frame

Aproveitamento:  $64/125 = 50\%$

# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

### BARRAMENTO: CAN

Estimando o uso de dados pelos componentes e subsistemas:

SS	Dados	Números	Taxa	Total
AD	Vetores de apontamento (Designação e Atual)	4	200 Hz	800
AD	Velocidade Angular Inercial da Linha de Visada	3	200 Hz	600
IMU	Acelerômetros e Girômetros	6	200 Hz	1200
IMU	Relógio	1	1000 Hz	1000
ATU	Deflexão comandada e executada	4x 2	200 Hz	1600
ATU	Corrente elétrica nos motores	4x 1	200 Hz	800
GCN	Referências de autopilotos	3	20 Hz	60
GCN	Dados de navegação calculados: posição, velocidade, estimativa de Mach, AoA, alvo estimado, etc	20	20 Hz	400
CP	Gerenciamento de estados	20	10 Hz	200
	<b>TOTAL</b>		<b>6660 números por segundo</b>	

# Tecnologia de Sensores e Atuadores em Armamentos Guiados

## Arquitetura Física e Funcional de um Míssil

# VISUALIZAÇÃO TELEMÉTRICA

