



Sensor de Estrelas Autônomo

Antonio Lopes
Márcio A. A. Fialho

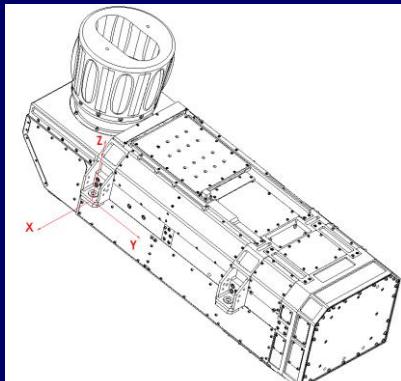
Grupo Eletro-óptica / DEA / ETE
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Imageadores CBERS

2^a geração

■ MUX

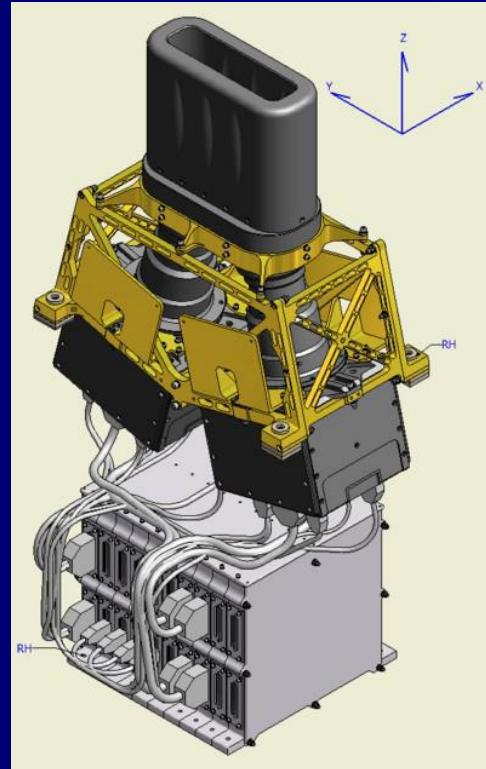
- 20 m
- 120 km
- 4 bandas
- 65 Mbit/s



Imageadores CBERS

2^a geração

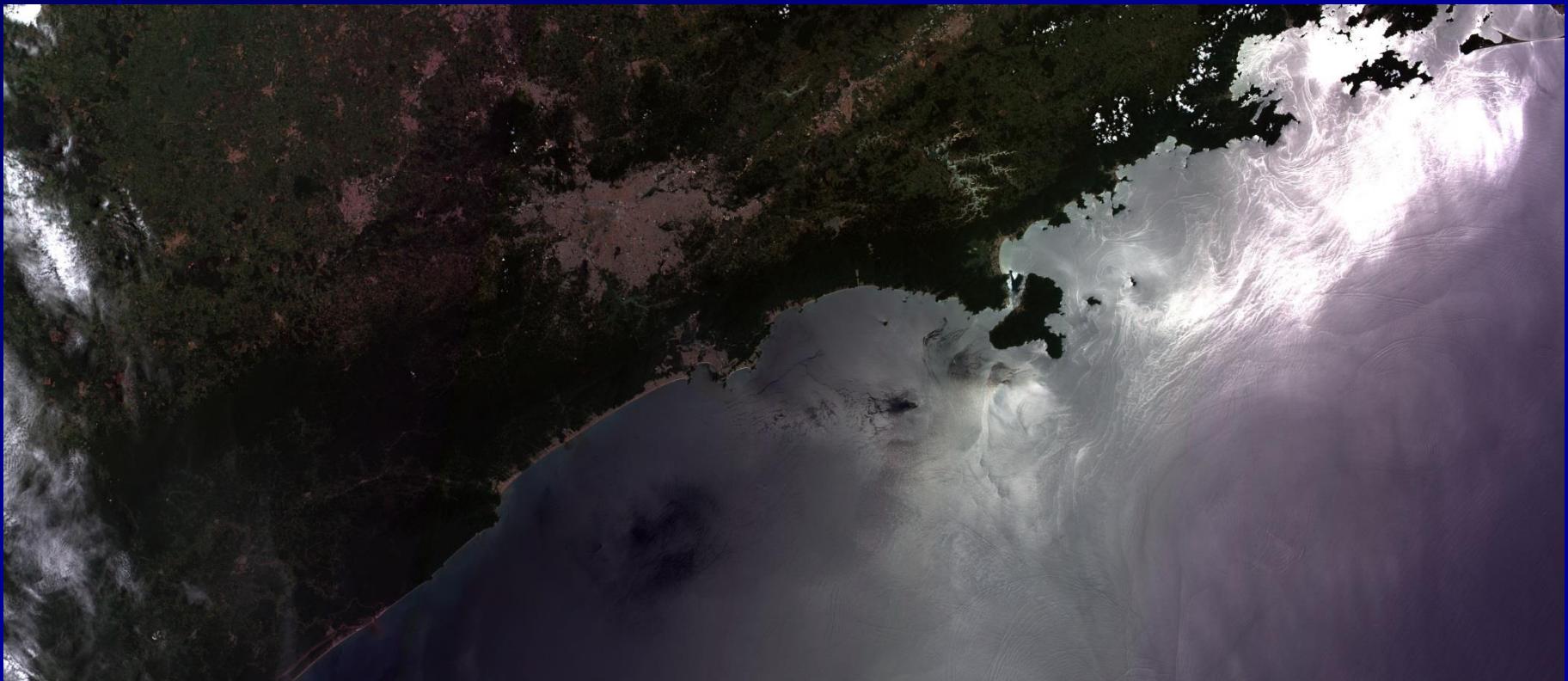
- WFI
 - 64 m
 - 860 km
 - 4 bandas
 - 51 Mbit/s



Imageadores CBERS

2^a geração

Litoral paulista (WFI - jan/2015)



Roteiro

■ Introdução

- Malha de Controle
- Sensores de Atitude
- Sensores de Estrelas

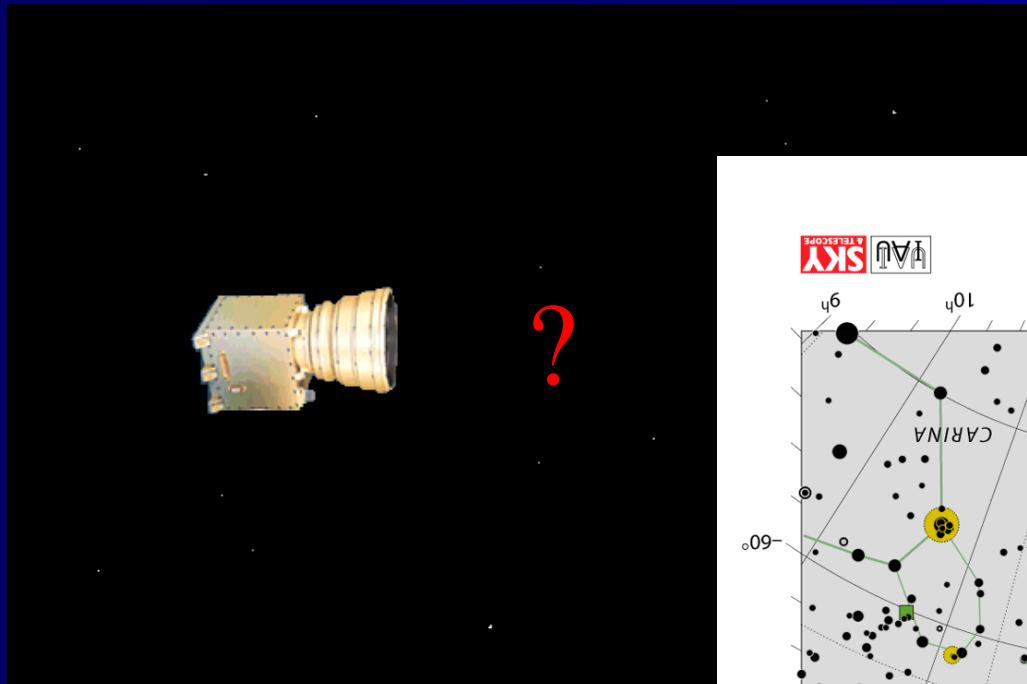
■ Histórico

■ Sensor de Estrelas Autônomo

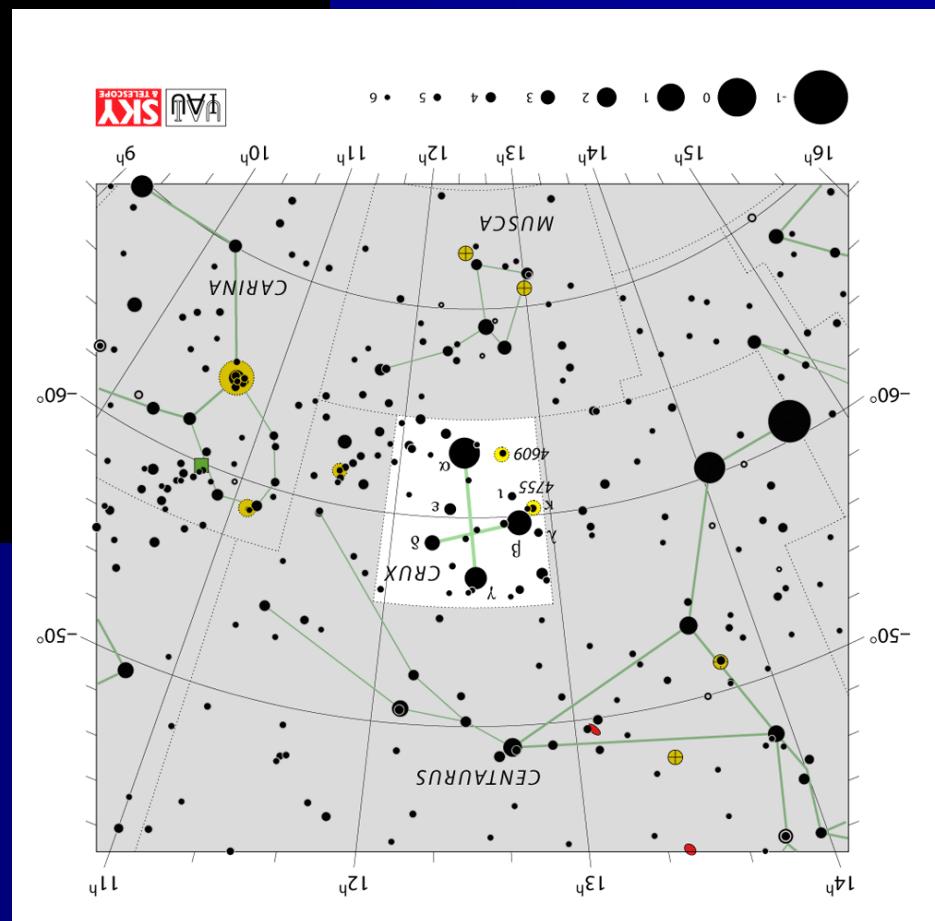
- Características / Arquitetura / Projeto / Gerenciamento
- Mecânica / Óptica / Eletrônica / Software
- Resultados
- Infraestrutura de Testes

■ Estágio Atual

Para que serve um sensor de estrelas?

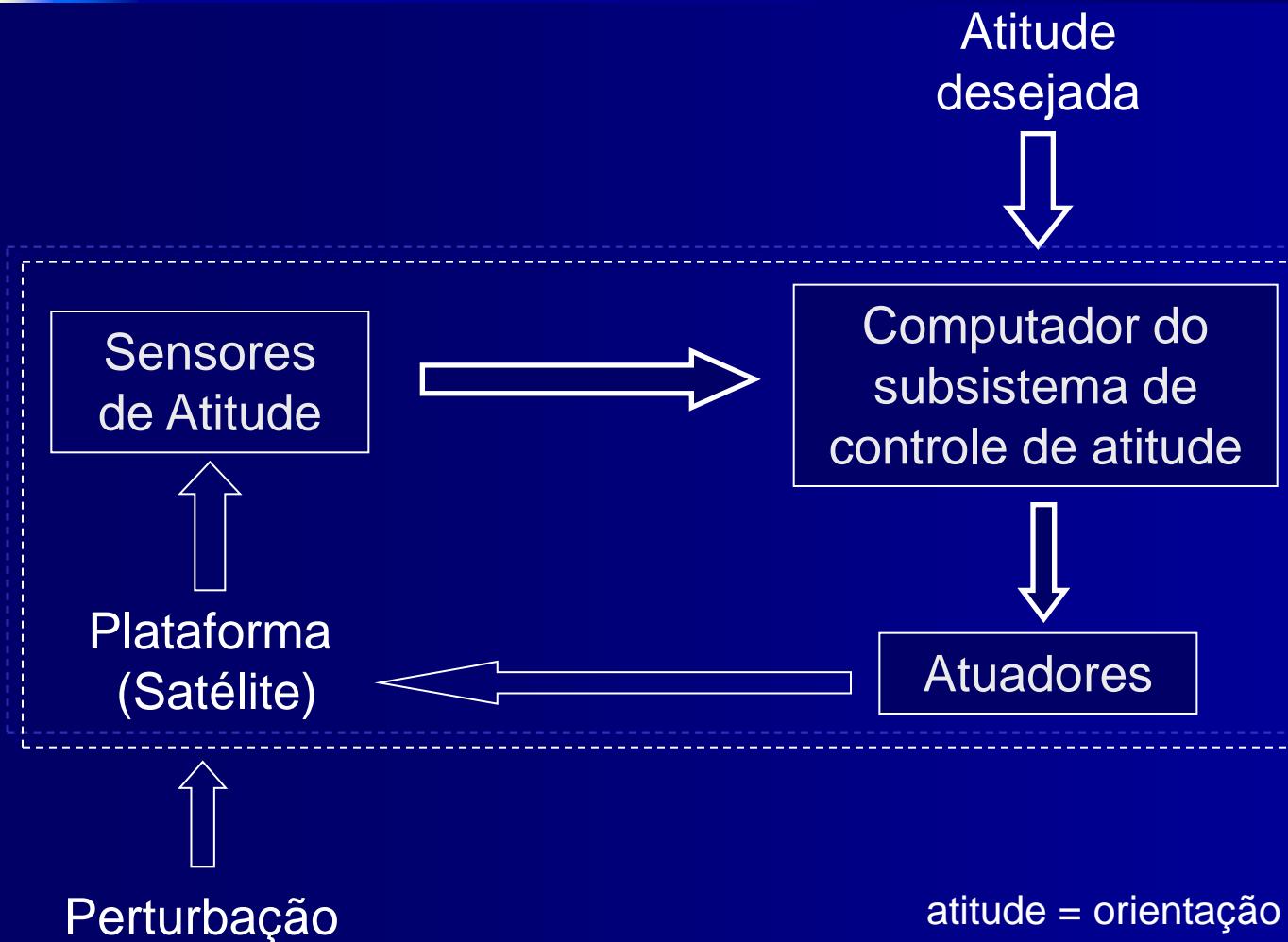


→ Quatérnios e
timestamp



Introdução

Malha de controle de atitude



Introdução

Malha de controle de atitude

■ Tipos de sensores de atitude

- Sensores solares
- Sensores de horizonte
- Magnetômetros
- Giroscópios
- Sensores Estelares ✓
- ...



Introdução

Classificação dos sensores de estrelas

■ Campo de visada e precisão

■ Campo estreito

- $< 5 \times 5^\circ$
- $< 3''$

■ Campo largo

- $10 \times 10^\circ$ a $25 \times 25^\circ$ 
- $3''$ a $1'$ 

Introdução

Classificação dos sensores de estrelas

■ Montagem

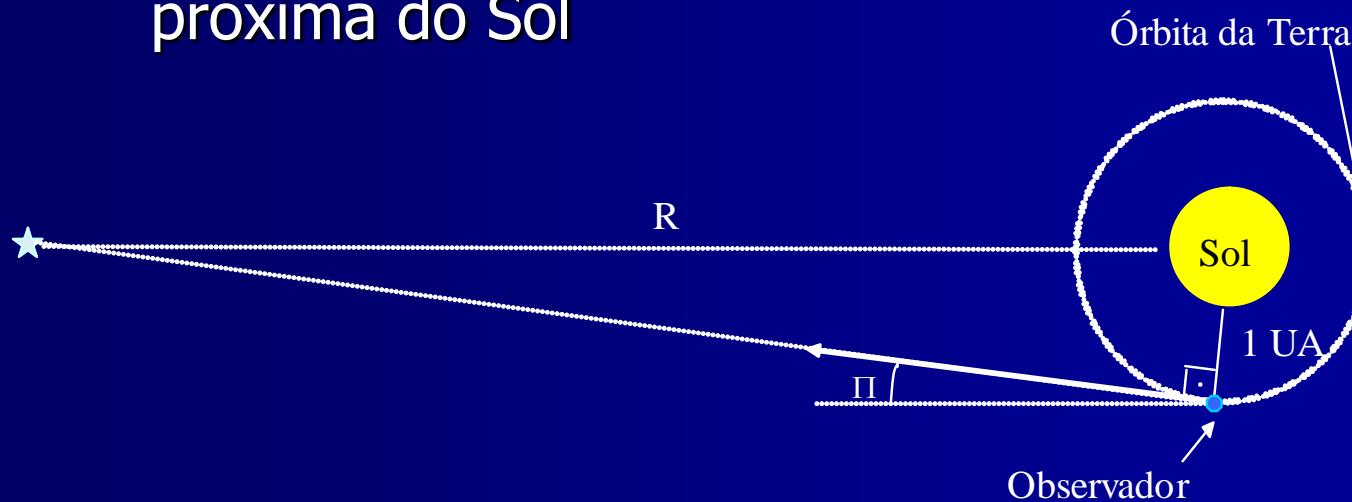
- Móvel (*gimbaled star trackers*)
- Para plataformas estabilizadas em rotação
- De cabeça fixa ✓
 - CCD
 - CMOS – APS

■ Autonomia

- Não autônomos
- Autônomos ✓

Introdução

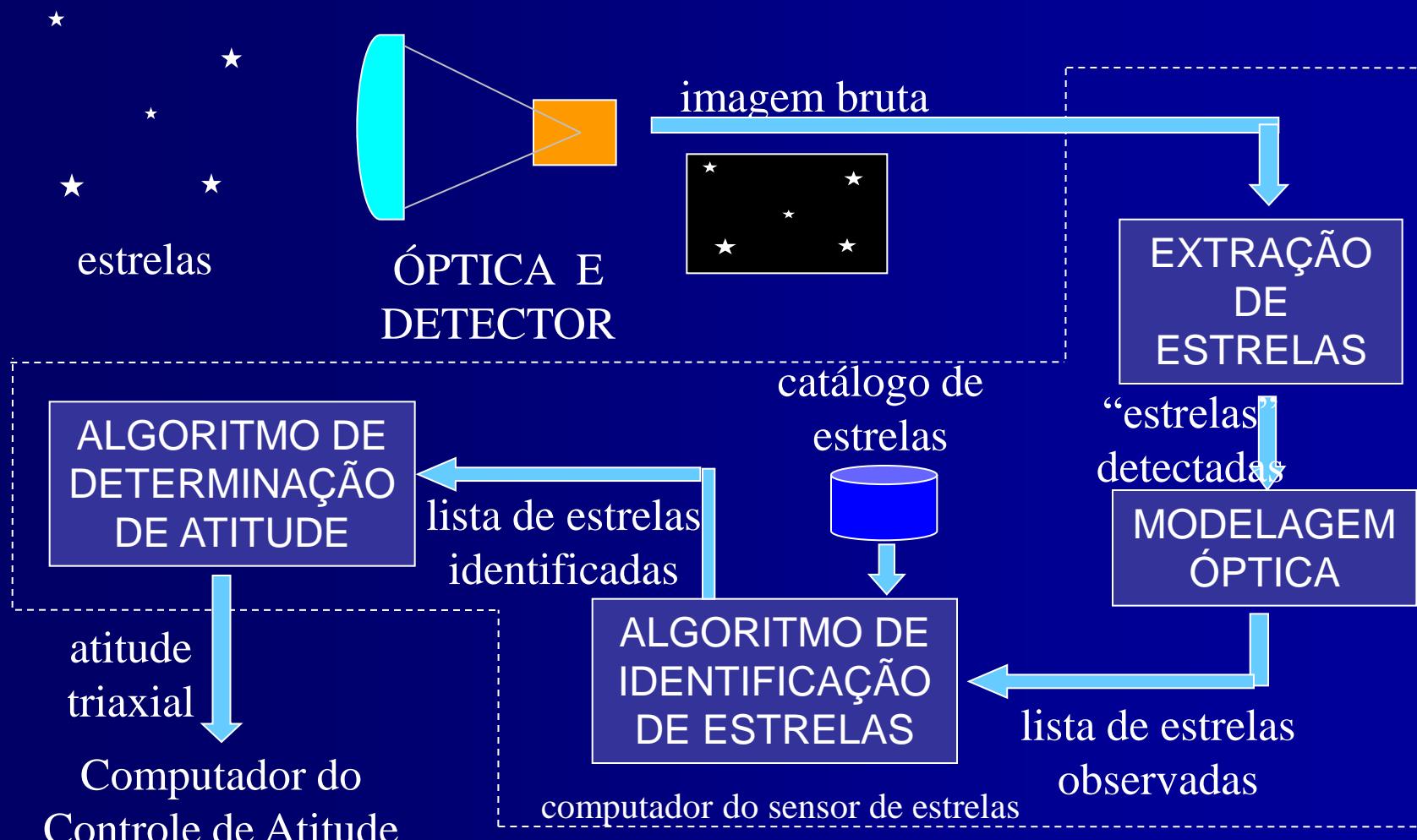
- Porque usar estrelas?
 - Estrelas estão muito afastadas
Ângulo de paralaxe $< 1''$ para estrela mais próxima do Sol



- Referência precisa de altitude

Introdução

Funcionamento do sensor de estrelas autônomo



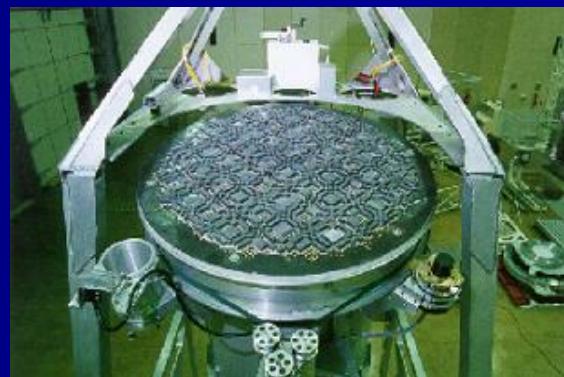
Histórico - INPE

Linha de Pesquisa em Eletro-óptica

- Protótipo de laboratório com sensor CCD

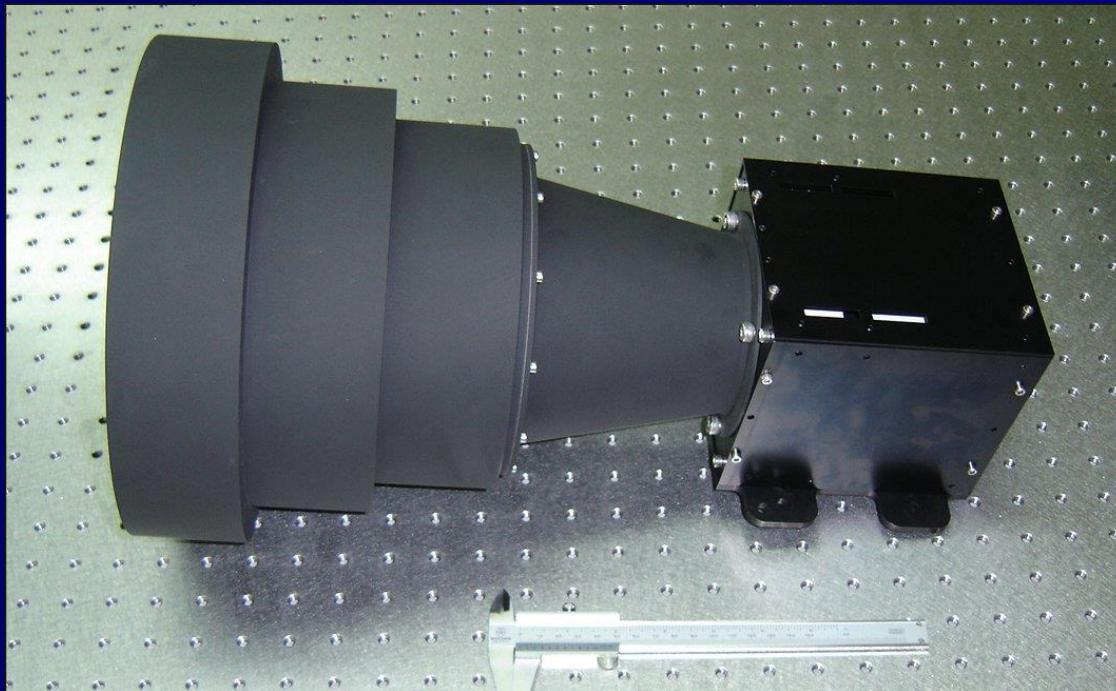


- Sensor de estrelas com CCD + CPLD + μ P (Telescópio MASCO)



Sensor de Estrelas - INPE

Sensor de Estrelas Autônomo (SEA)



Sensor de Estrelas - INPE

Características principais

- Campo de visada
 - $\approx 25^\circ \times 25^\circ$
- Precisão
 - Direção do eixo óptico: $3''$ (1σ)
 - Ângulo de giro: $20''$ (1σ)
- Massa
 - $\approx 4\text{kg}$
- Volume
 - $\approx 180 \times 140 \times 160\text{ mm}$ (sem protuberâncias e sem *baffle*)
- Consumo
 - ≈ 5 a 10 W

Sensor de Estrelas - INPE

Características principais

- Modos de operação
 - *Stand-by*
 - Imageamento
 - Determinação autônoma de atitude
 - Manutenção (*debug / update / upgrade*)

Sensor de Estrelas - INPE

Arquitetura / Projeto

■ Áreas de projeto

- Óptica
- Eletro-óptica
- Mecânica
- Térmica
- Eletrônica
- Software

■ Assuntos envolvidos

- Astronomia
- Física
- Arquitetura de computadores
- Computação (SEA e GSE)
- Gerenciamento de projetos

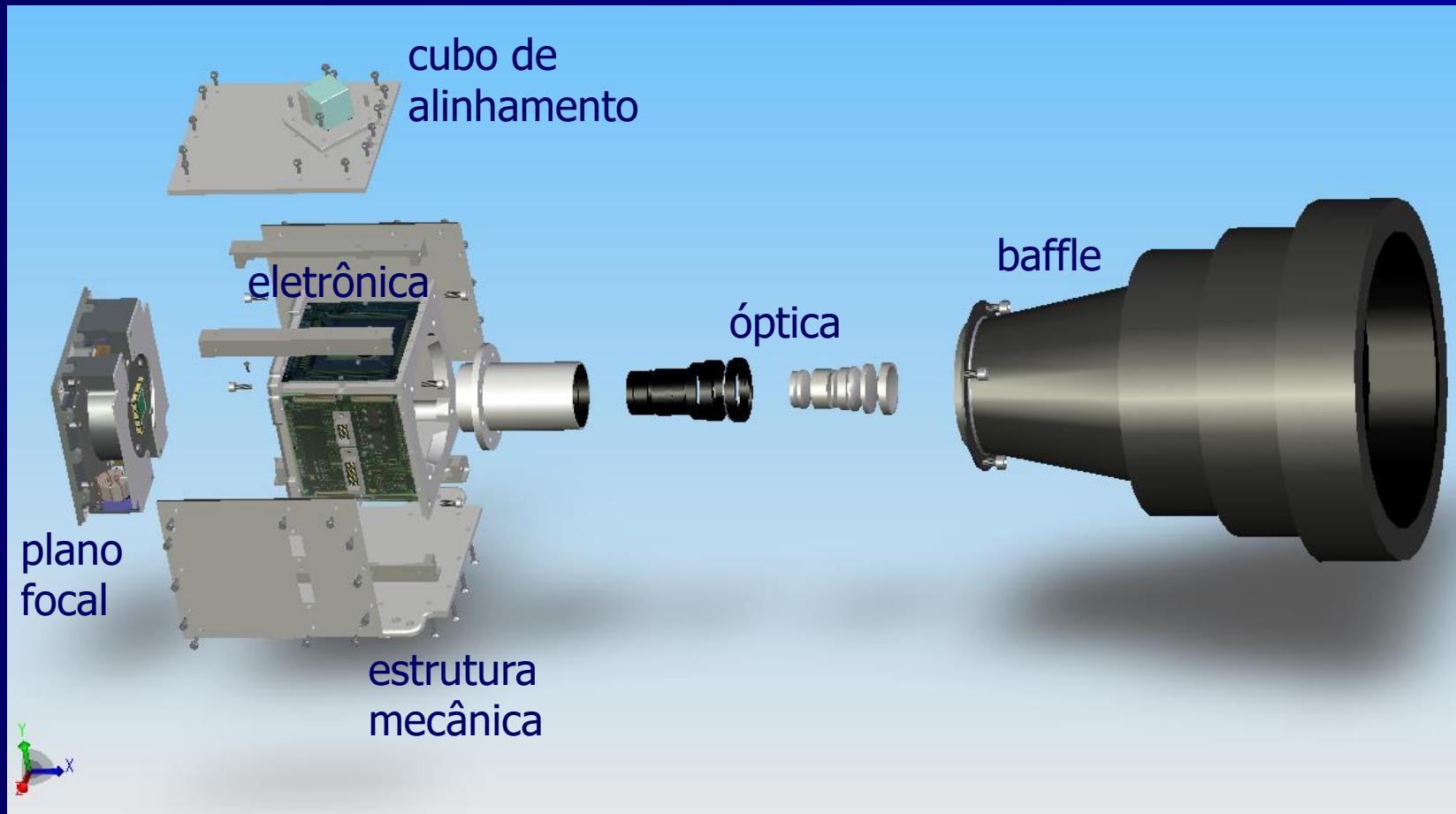
Sensor de Estrelas - INPE

Gerenciamento

- Plano de desenvolvimento de projetos espaciais
 - Concepção (documentação)
 - Projeto Preliminar (funcional)
 - Modelos (fabricação, montagem e testes)
 - Engenharia (EM)
 - Qualificação (QM)
 - Voo (FM)

Sensor de Estrelas - INPE

Arquitetura / Projeto



Sensor de Estrelas - INPE

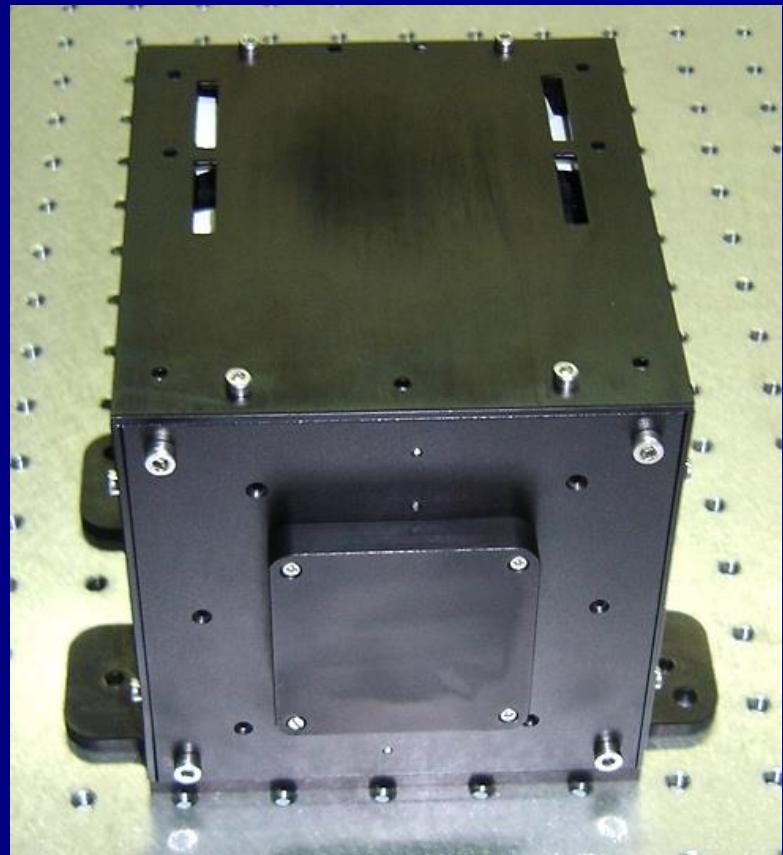
Mecânica

■ Funções

- Estabilidade estrutural (alinhamento)
- Prover pontos de fixação no satélite
- Controle térmico
- Blindagem contra radiação

■ Material

- Alumínio (> parte)



Sensor de Estrelas - INPE

Óptica/Mecânica

■ *Baffle*

Impede a incidência de reflexos da luz do Sol ou da Terra no campo de visada da óptica



Sensor de Estrelas - INPE

Óptica

■ Objetiva óptica

- Projeta imagem das estrelas na área do detector
- Deve ter qualidade compatível, além de tolerar vibração e radiação

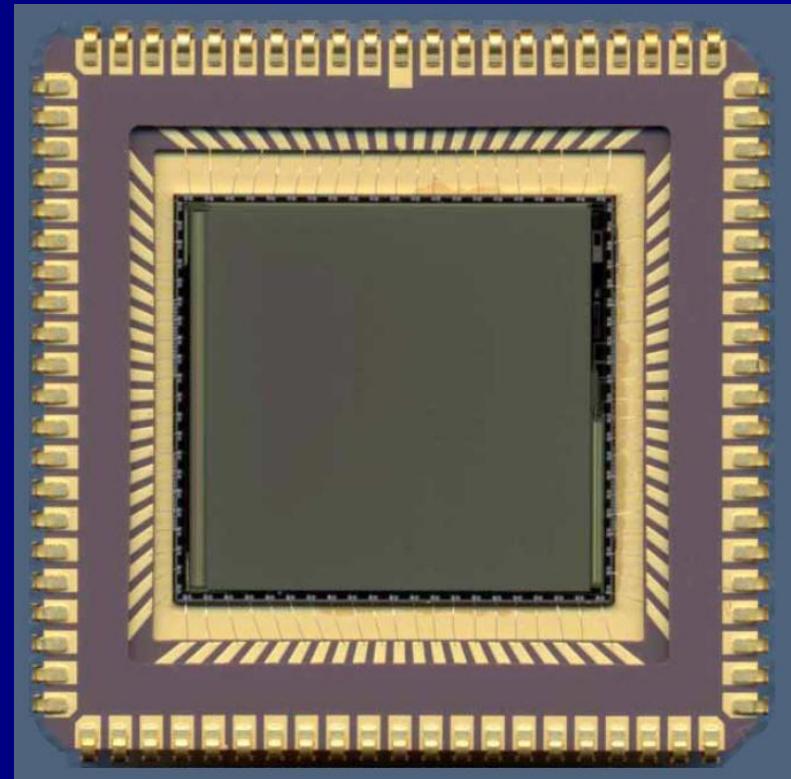


Sensor de Estrelas - INPE

Sensor de imagem

■ Sensor

- Tipo: CMOS-APS
- Monocromático (UV próximo, visível, IV próximo)
- 1024×1024 pixels (1 megapixel)
- 10 bpp (bits por pixel)
- Rad-hard

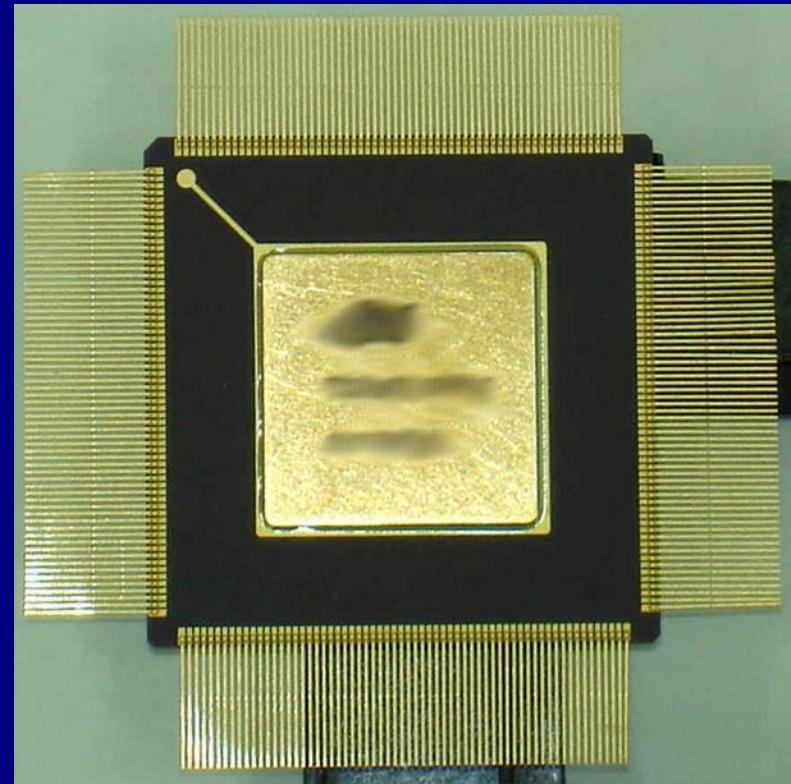


Sensor de Estrelas - INPE

Eletrônica

■ Processador ERC32

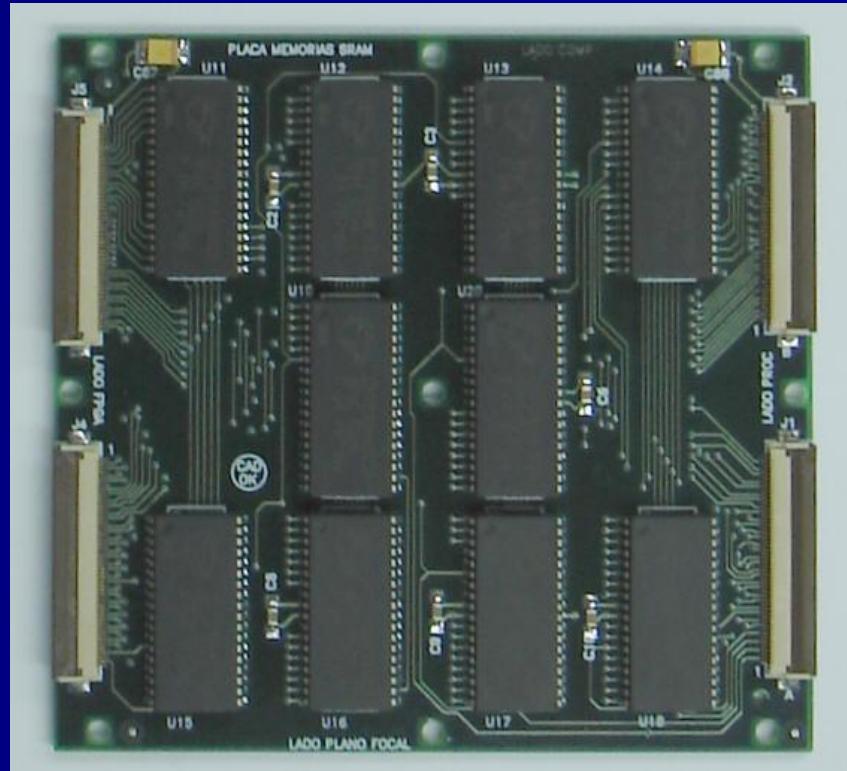
- RISC (SPARK V7) de 32 bits
- 12 MHz, 12 MIPS, 3 MFlops
- 0,3 W
- 3,3 V
- Rad-hard



Sensor de Estrelas - INPE

Eletrônica

- Memórias
 - PROM
 - 32 KB
 - Partida (BIOS)
 - SRAM
 - 4 MB
 - Memória de sistema
 - EEPROM
 - 512 KB
 - Armazenamento de programas e dados

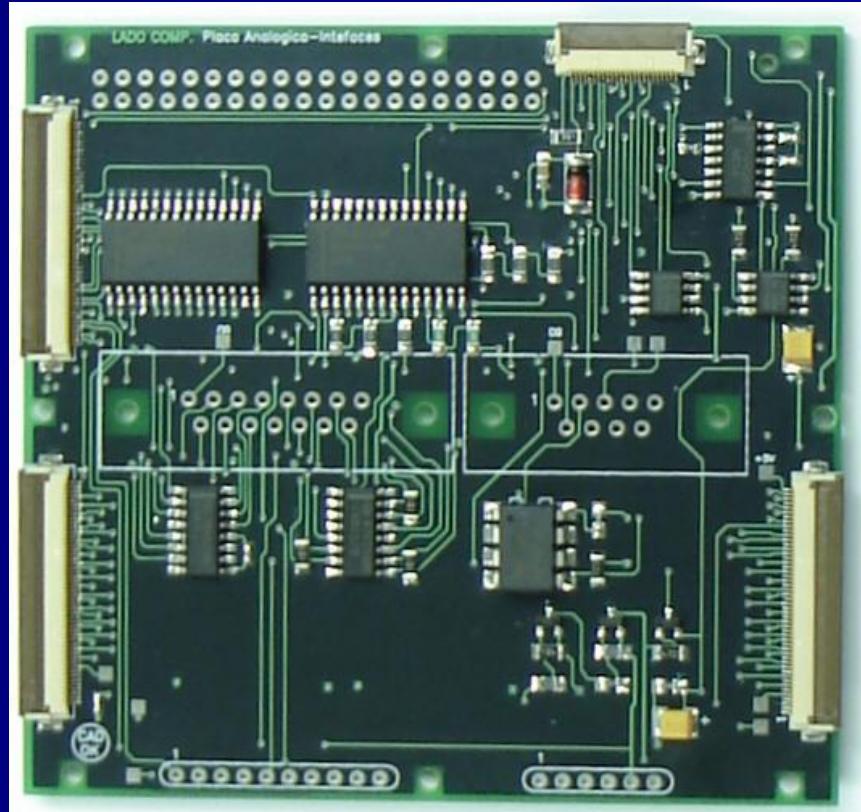


Sensor de Estrelas - INPE

Eletrônica

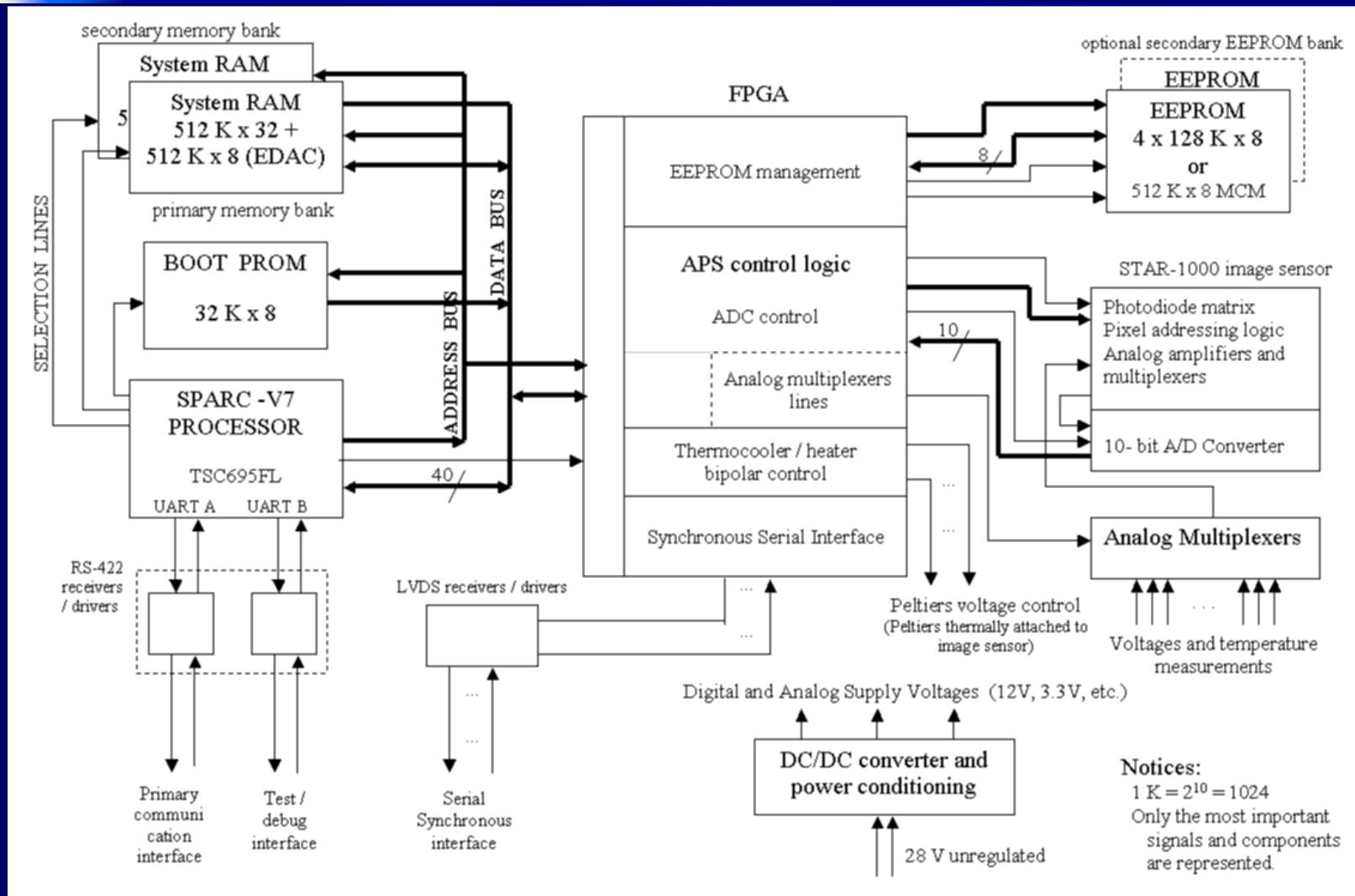
■ Outros

- FPGA
- Fonte de alimentação
- Sensores de temperatura e tensão
- etc.



Sensor de Estrelas - INPE

Eletrônica



Sensor de Estrelas - INPE

Software

■ Requisitos

- Determinar atitude com precisão
- Ter baixa probabilidade de insucesso e baixíssima probabilidade de engano
- Poder ser atualizado em órbita
- Rodar em *hardware* limitado

Sensor de Estrelas - INPE

Software

■ Requisitos

- Determinar atitude com precisão
 - Para uma precisão de $3''$ (1σ)
→ estrelas devem ser medidas com precisão na faixa de $8''$ (1σ)
 - Cada pixel corresponde a $\approx 1,5' = 90''$!
- Solução
 - Calcular o baricentro de uma estrela com base no conjunto de pixels adjacentes

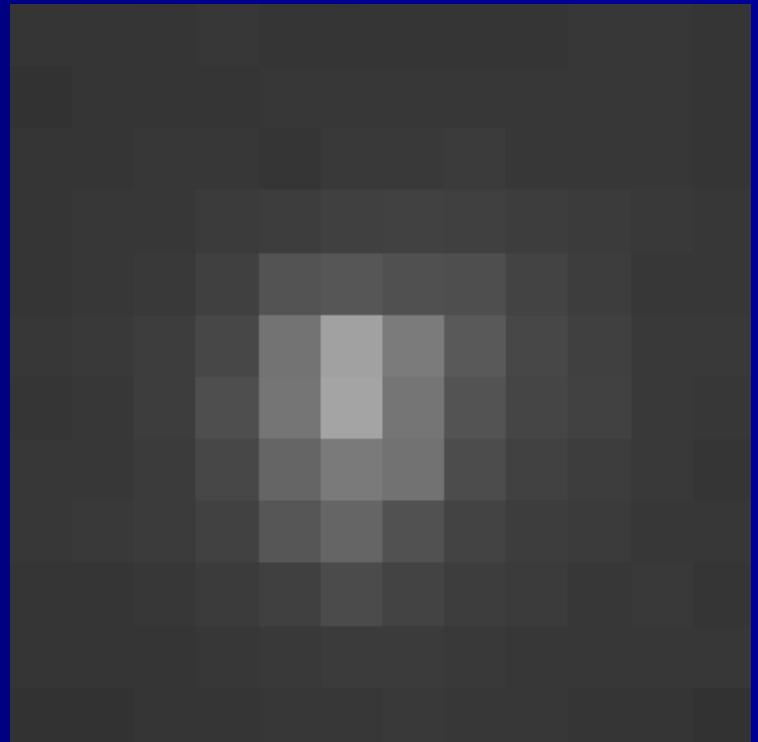
Sensor de Estrelas - INPE

Software

$$B = \sum_{i=1}^n (b_i - b_R)$$

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot (b_i - b_R)}{B} + 0,5$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot (b_i - b_R)}{B} + 0,5$$



Sensor de Estrelas - INPE

Software

■ Requisitos

- Determinar atitude com precisão
- Ter baixa probabilidade de insucesso e baixíssima probabilidade de engano
 - Taxa de sucesso: > 99 %
 - Taxa de engano: < 10^{-6} (0,0001 %)

→ calibração radiométrica e geométrica
(GSE)

Sensor de Estrelas - INPE

Software

■ Requisitos

- Determinar atitude com precisão
- Ter baixa probabilidade de insucesso e baixíssima probabilidade de engano
- **Poder ser atualizado em órbita**

Solução:

- Programa de partida armazenado em PROM
- Algoritmos de reconhecimento de padrão, catálogo de estrelas, etc., armazenados em memória reprogramável (EEPROM)

Sensor de Estrelas - INPE

Software

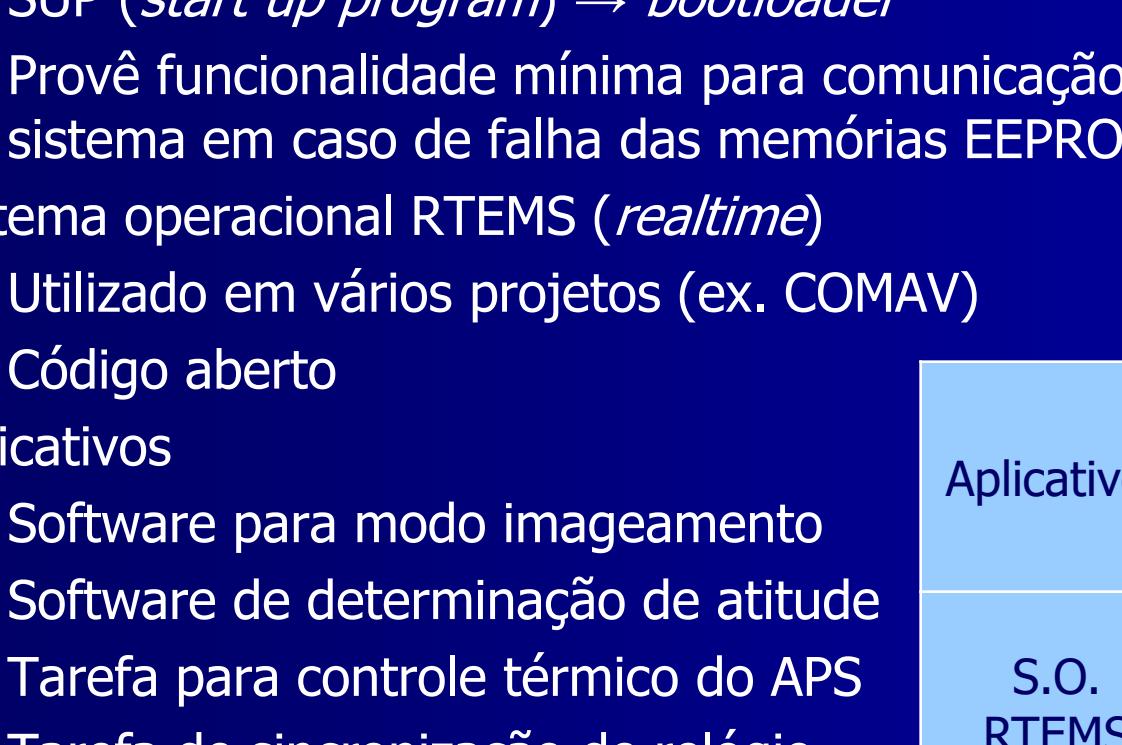
■ Requisitos

- Determinar atitude com precisão
- Ter baixa probabilidade de insucesso e baixíssima probabilidade de engano
- Poder ser atualizado em órbita
- Rodar em um *hardware* limitado
 - 4 MB de memória
 - Processador de 12 MHz

→ software "enxuto"

Sensor de Estrelas - INPE

Software

- Software de Partida
 - SUP (*start up program*) → *bootloader*
 - Provê funcionalidade mínima para comunicação com o sistema em caso de falha das memórias EEPROM
 - Sistema operacional RTEMS (*realtime*)
 - Utilizado em vários projetos (ex. COMAV)
 - Código aberto
 - Aplicativos
 - Software para modo imageamento
 - Software de determinação de atitude
 - Tarefa para controle térmico do APS
 - Tarefa de sincronização de relógio
 - Tarefa de *housekeeping*

Aplicativos

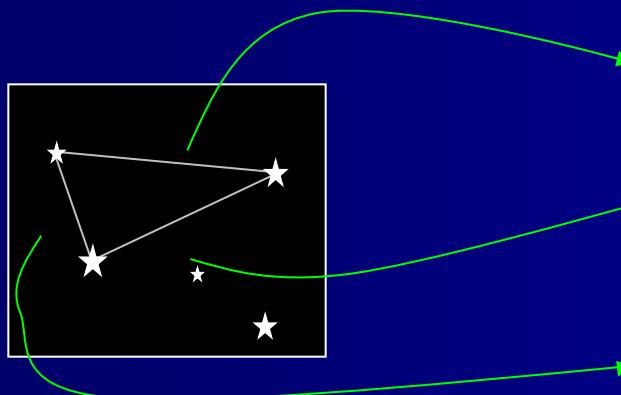
S.O.
RTEMS



Sensor de Estrelas - INPE

Algoritmos – Identificação de estrelas

seleção de
um triângulo
na lista de
estrelas
observadas



busca no catálogo de
estrelas que formam
o mesmo triângulo



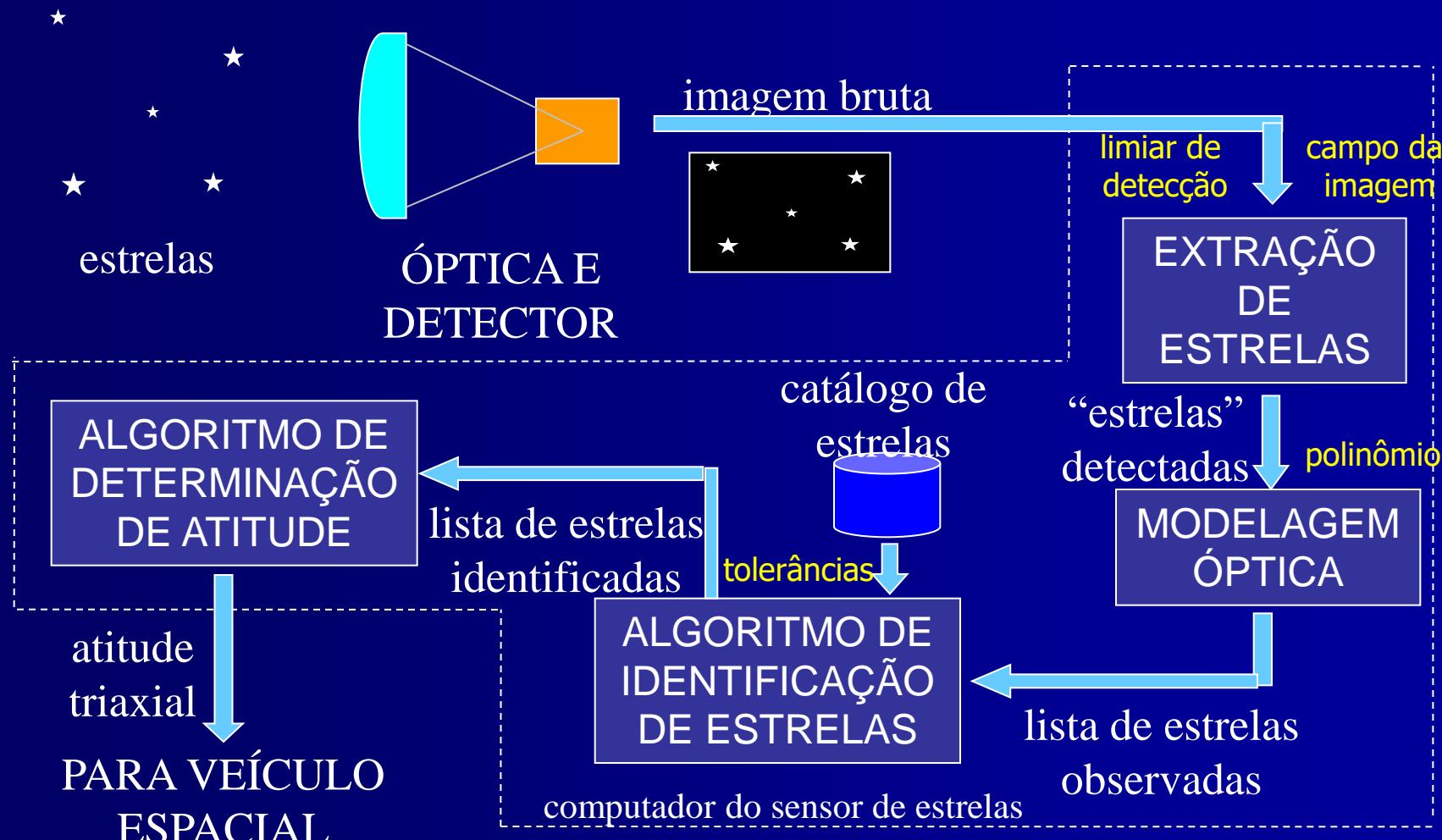
estrelas
identificadas
(falta confirmar
identificação)

Identificação das
demais estrelas
(para confirmar identificação)

lista de estrelas
identificadas

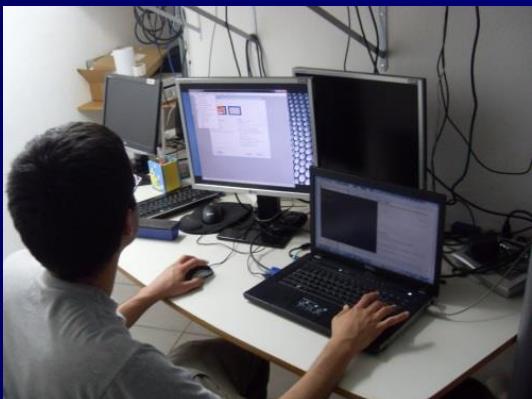
Sensor de Estrelas - INPE

Software - Dificuldades



Sensor de Estrelas - INPE

Resultados



Atitude determinada com sensor de estrelas:

ascensão reta : 20,415036°

declinação : -23,344961°

ângulo de giro : 149,421052°

Attitude telemetry msg version = 2

Telemetry length = 56

Contents:

```
02 02 00 00 00 00 01 00 00 00 0C 40 BD E7 00
00 00 00 32 00 7A 00 3F D6 90 5A A8 84 14 07
BF E9 34 0C 05 96 AD AD 3F D1 DA 57 79 F5 7F 70
BF DA F8 05 BD F7 5B 96
```

AAD in Tracking mode.

Attitude acquired successfully.

AAD image counter = 12

AST Timestamp = 7655

Star ID results: StarsSelected = 50 StarsIdentified = 0 StarsObsUnknown = 122 StarsNotObserved = 122

Q0=0,352560677114809 Q1=-0,787603388705454 Q2=0,278951520062029 Q3=-0,421388087762744

Attitude matrix:

```
[ 0,489236257895935 -0,736536064070279 0,467078698173549 ] ==> Xast
[ -0,142276585871287 -0,595774036814861 -0,790449663274725 ] ==> Yast
[ 0,860468045354646 0,320262272804928 -0,396266096888009 ] ==> boresight
```

RA = 20,4150364832625 deg.

dec = -23,3449607035198 deg.

roll = 149,421052165831 deg.

Detalhe de uma
imagem do campo
estelar



Sensor de Estrelas - INPE

Resultados

- Trabalhos acadêmicos
 - Teses de mestrado/doutorado
 - Trabalhos de graduação
 - Vários artigos em congressos e revistas

Sensor de Estrelas - INPE

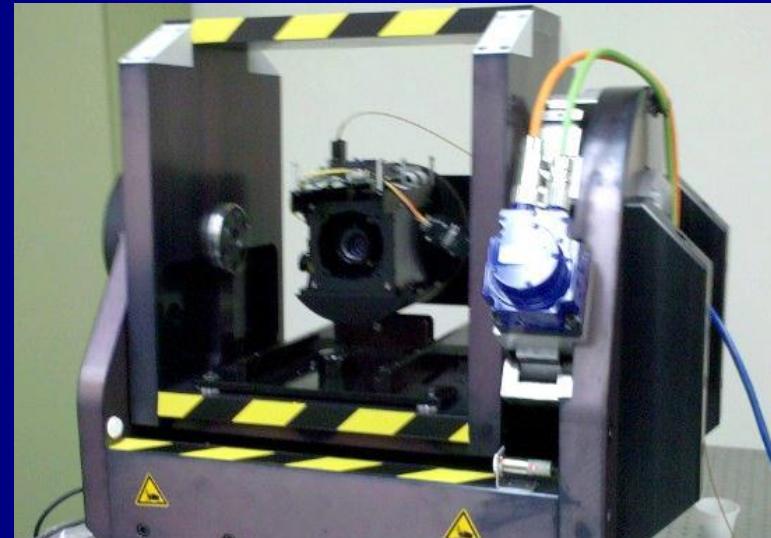
Infraestrutura de testes

Configuração

- GSE (*ground support equipment*) controlado por computador industrial
- Bancada de calibração (AzEl, colimador, mesa óptica e fonte de luz multiespectral)
- Simulador de cena, para testes funcionais e dinâmicos



Rack de controle do GSE



AzEl – Mesa de 2 eixos com erro de posicionamento menor que 1 arcseg

Sensor de Estrelas - INPE

Infraestrutura de testes

Sistema de calibração



Mesa óptica, com colimador e AzEl

Sensor de Estrelas - INPE

Infraestrutura de testes

Ajuste de foco



Procedimento de ajuste de foco do SEA

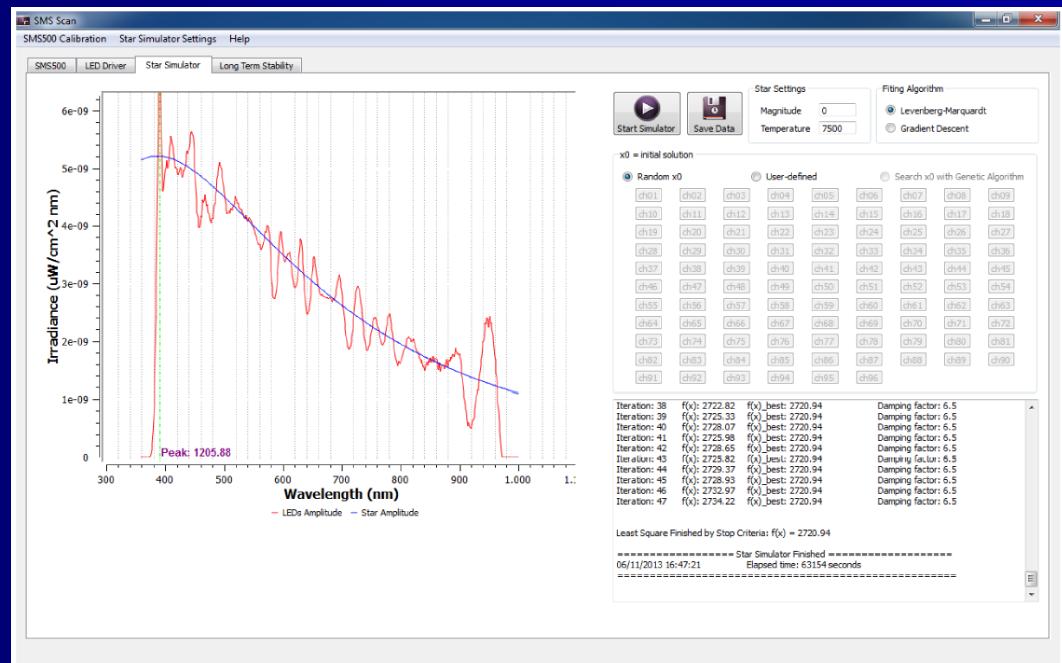
Sensor de Estrelas - INPE

Infraestrutura de testes

Fonte de luz com espectro ajustável



Detalhe da fonte de luz multiespectral baseada em LEDs para sistema de calibração do SEA



Software de controle para fonte de luz (extraído de [1])

- [1] Borges, Marcos Eduardo Gomes. Fonte de Luz Espectralmente Sintonizável baseada em LEDs para Calibração do Sensor de Estrelas, com aplicação do paradigma de Computação Evolutiva. Dissertação de Mestrado. INPE

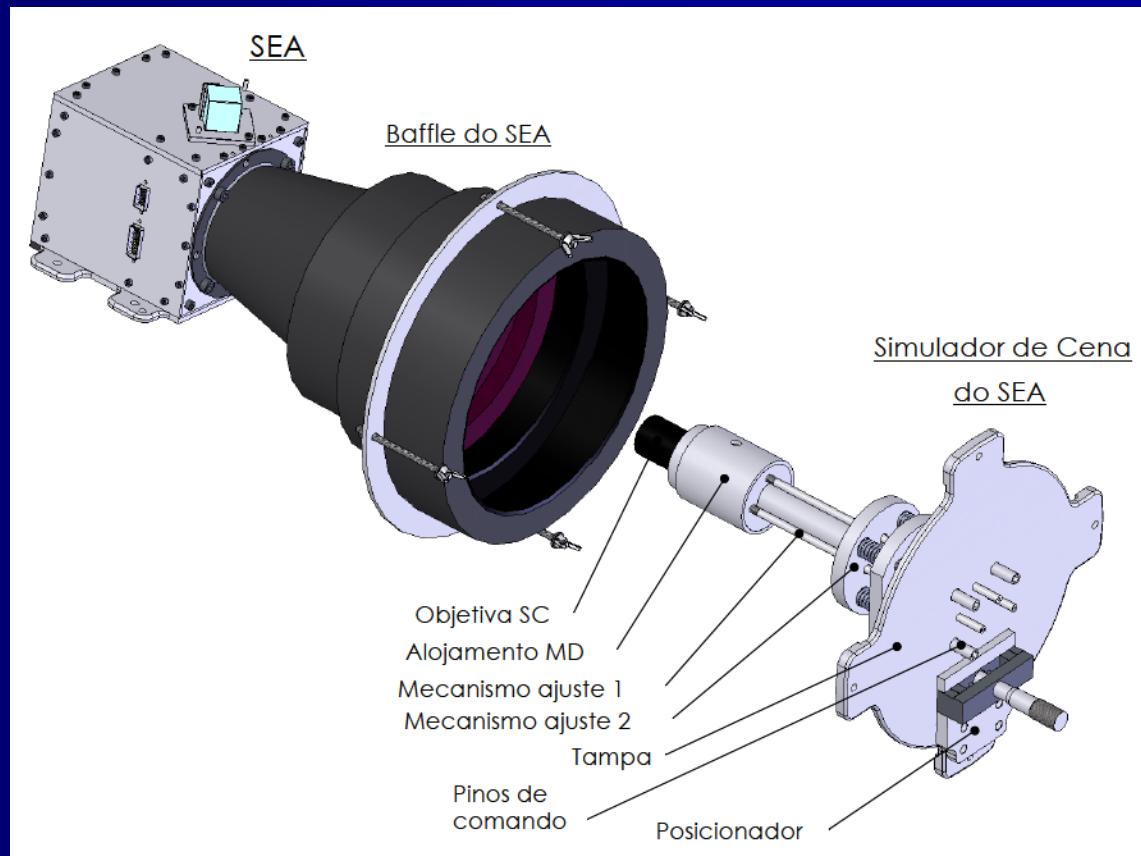
Sensor de Estrelas - INPE

Infraestrutura de testes

Simulador de Cena

Possibilita a realização de testes funcionais e testes dinâmicos com o SEA

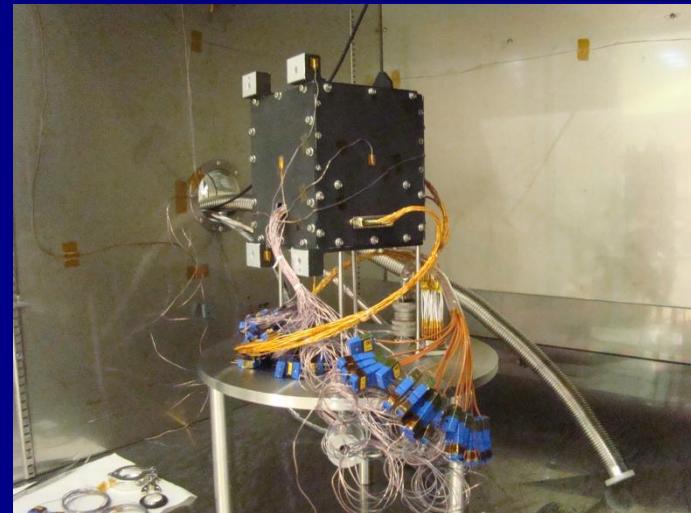
Emprega softwares de propagação de órbita e de geração de mapas do céu



Sensor de Estrelas - INPE

Atividades atuais

- protoMirax (3 modelos)
 - Concluir testes em laboratório e calibração dos dois MVs
 - Realizar testes em balão estratosférico



Sensor de Estrelas - INPE

Perspectivas futuras

- Avaliar resultados de voo e realimentar projeto
- Concluir documentação para o caso de futura contratação na indústria
- Aprimoramentos (compactação, upgrade nos componentes, emprego de COTS, ...)

Bibliografia

- WERTZ, James R. (Ed.). **Spacecraft attitude determination and control.** Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1978. 879p.
- ALBUQUERQUE, Bráulio F. C. **Estudo dos erros sistemáticos inerentes a um sensor de estrelas de cabeça fixa, quanto à localização relativa de estrelas.** 2005. 194f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais /Mecânica Espacial e Controle) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- ALBUQUERQUE, B. F. C; FIALHO, M. A. A. **Estudo das fontes de erro existentes no sensor de estrelas autônomo em desenvolvimento no INPE.** São José dos Campos: INPE, 2005. (Publicação interna da Divisão de Eletrônica Aeroespacial: DEA-EO-005/05)
- BORGES, Marcos Eduardo Gomes. Fonte de Luz Espectralmente Sintonizável baseada em LEDs para Calibração do Sensor de Estrelas, com aplicação do paradigma de Computação Evolutiva. Dissertação de Mestrado. INPE
- CABEZA, Jorge Mejía, **Um sensor estelar para o apontamento fino do telescópio MASCO.** 1997. 104f. Dissertação (Mestrado em Ciência Espacial/Astrofísica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- CARVALHO, Gustavo Baldo, **Levantamento de técnicas de identificação de estrelas e desenvolvimento de um ambiente de simulação e testes para análise de seus desempenhos em aplicações espaciais.** 2001. 290f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- FIALHO, Márcio Afonso Arimura. **Ambiente de simulações e testes de algoritmos para sensores de estrelas autônomos.** 2003. 120f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
- FIALHO, Márcio Afonso Arimura. **Estudo comparativo entre dois algoritmos de identificação de estrelas para um sensor de estrelas autônomo de campo largo.** 2007. 237f. Tese de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.