

## **Subsistema de Controle de Atitude**

---

**Petrônio Noronha de Souza**

**Coordenação Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial – ETE  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
São José dos Campos, SP  
Novembro de 2002**

## 2.2 – Subsistema de Controle de Atitude (ACS) (\*)

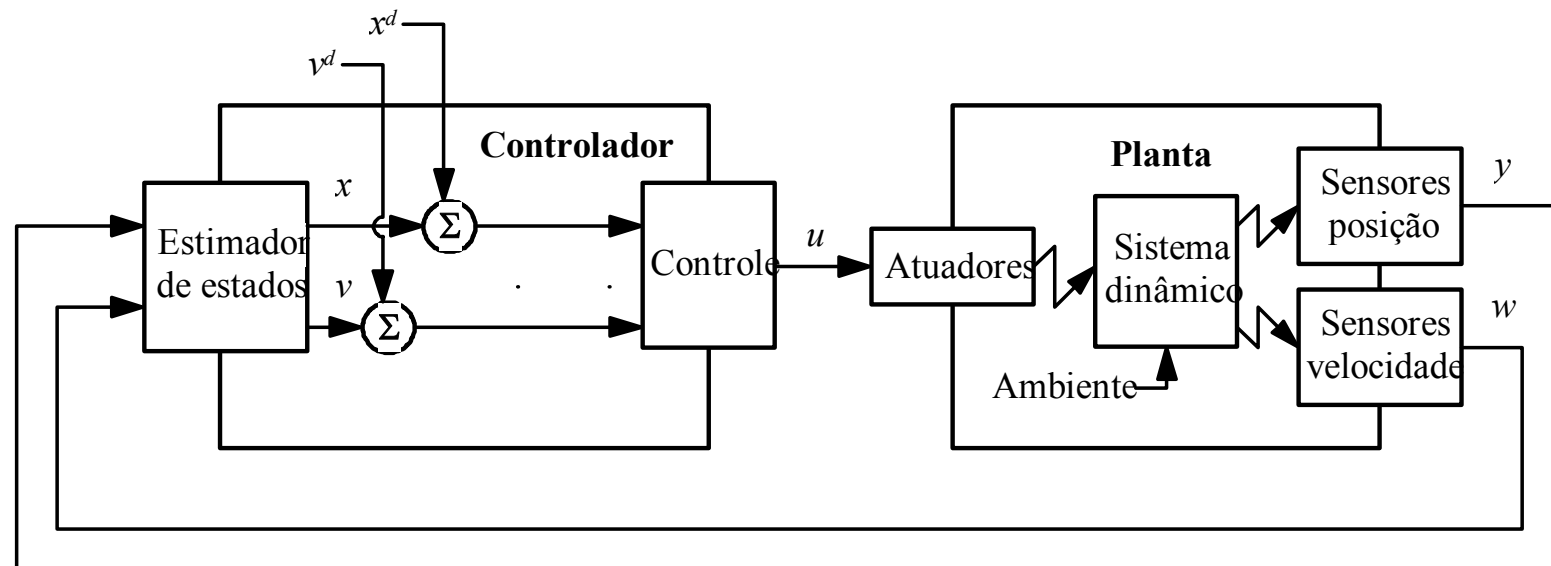
---

- O que é a **Atitude** de um satélite?
  - A Atitude de um satélite é a sua orientação no espaço.
- O movimento de um satélite rígido possui 6 graus de liberdade (3 translações e três rotações) e é normalmente modelado por meio de 12 variáveis de estado. São elas:
  - Movimento de translação do centro de massa: 3 Posições + 3 Velocidades lineares.
  - Movimento de rotação em torno do centro de massa: 3 Ângulos + 3 Velocidades angulares.
- Função do Subsistema de Controle de Atitude (Attitude Control System – ACS): *Apontar e conservar o apontamento do satélite com uma precisão e deriva (“drift”) previamente estabelecidos, tendo em vista sua missão*. Seqüência de ações de controle:
  1. Determinação da atitude do satélite por meio de sensores.
  2. Processamento dos dados por computador.
  3. Correção de atitude e órbita por meio de atuadores.
- Tipos principais de estabilização de satélites e precisões usualmente atingidas:
  - Gradiente de gravidade ( $> 5^\circ$ )
  - Spin ( $1^\circ$  a  $5^\circ$ )
  - Dual-spin ( $0,1^\circ$  a  $1^\circ$ )
  - 3-eixos ( $< 0,1^\circ$ )
- Os ACS freqüentemente incorporam também a função de controle de órbita. Nestes casos são conhecidos como Subsistemas de Controle de Atitude e Órbita (AOCS em inglês ou SCAO em português).

## 2.2 – Subsistema de Controle de Atitude: Descrição (\*)

A grande maioria dos satélites em órbita utiliza um sistema de controle dito embarcado, pelo qual a determinação e o controle da atitude são realizados de forma autônoma e independente por uma eletrônica (geralmente baseada em micro-computadores) a bordo da espaçonave. Manobras de atitude e órbita, quando necessárias, são realizadas através de comandos provindos de Terra, e interpretados e supervisionados pelo computador de controle. O controle de atitude é entretanto realizado automaticamente a bordo, em malha fechada, conforme mostrado na figura abaixo. As informações provindas dos sensores de atitude são processadas e filtradas por um estimador de estado, que as compara, a seguir, com uma referência previamente comandada (por exemplo, um apontamento geocêntrico). Os erros entre o estado estimado e a referência serão então usados pelo algoritmo do controlador, e este deverá acionar os atuadores de forma adequada, no sentido de reduzir ou eliminar estes erros.

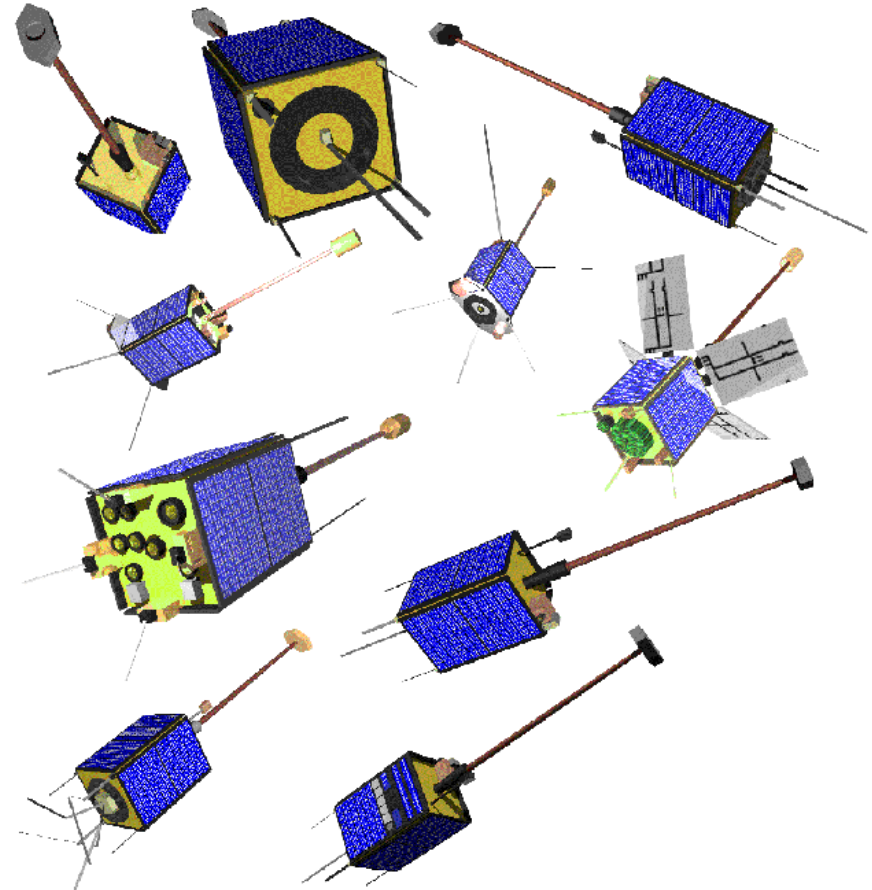
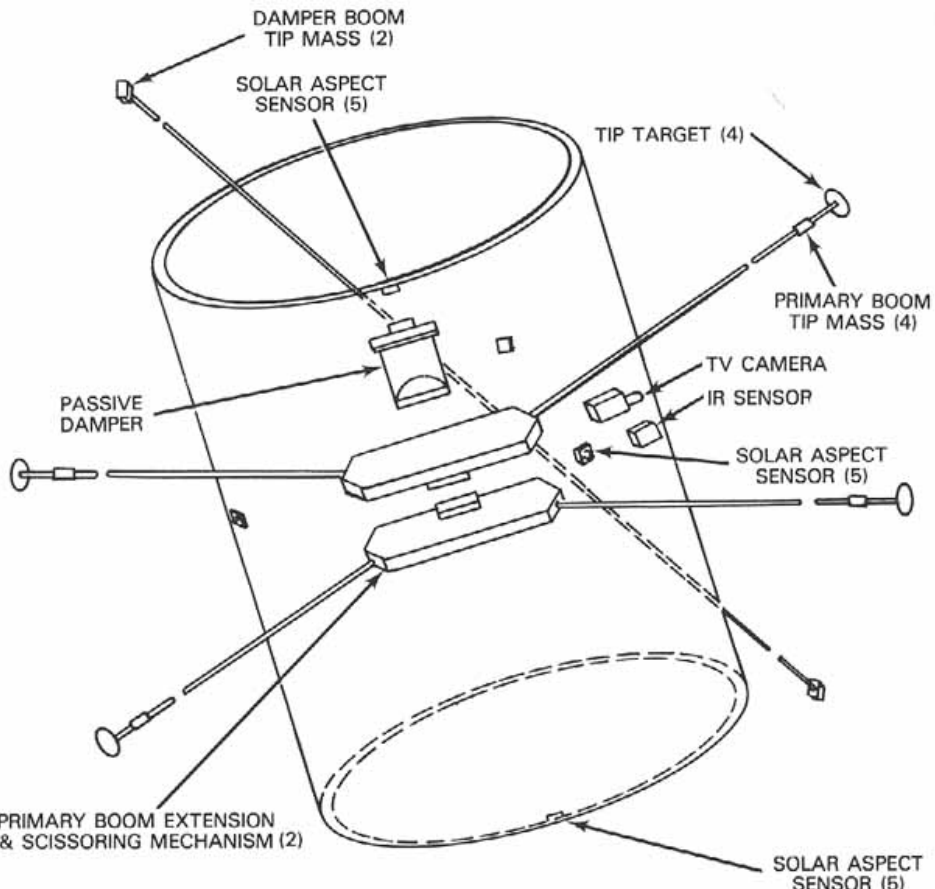
Os componentes embarcados são usualmente classificados em: sensores, atuadores, software e eletrônica.



(\*) Kuga, H.K. et al.,  
Laboratório de Simulação  
(LABSIM) de Sistemas de  
Controle de Atitude e  
Órbita (SCAO) de Satélites  
Artificiais, DMC/INPE.

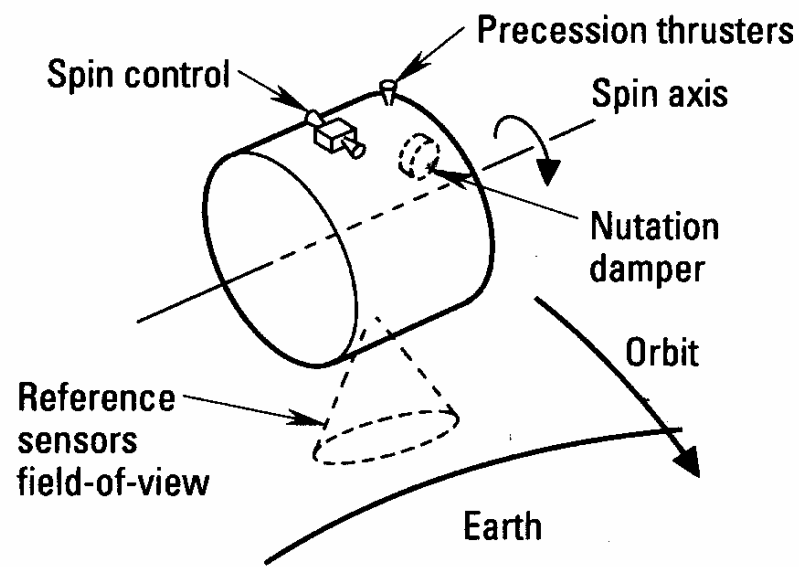
# 2.2 – Subsistema de Controle de Atitude: Técnicas de estabilização

## 0. Gravity Gradient

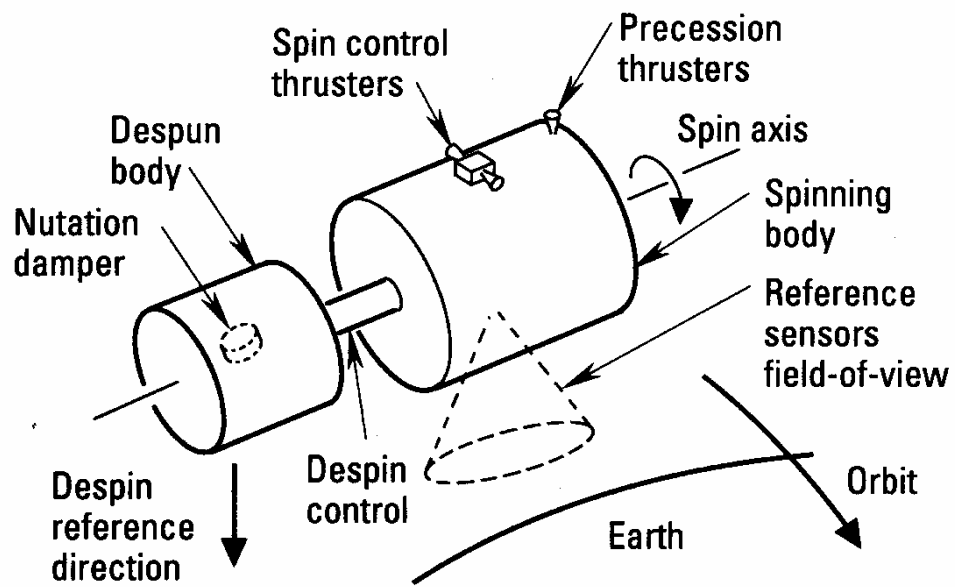


# 2.2 – Subsistema de Controle de Atitude: Técnicas de estabilização (cont.), [3]

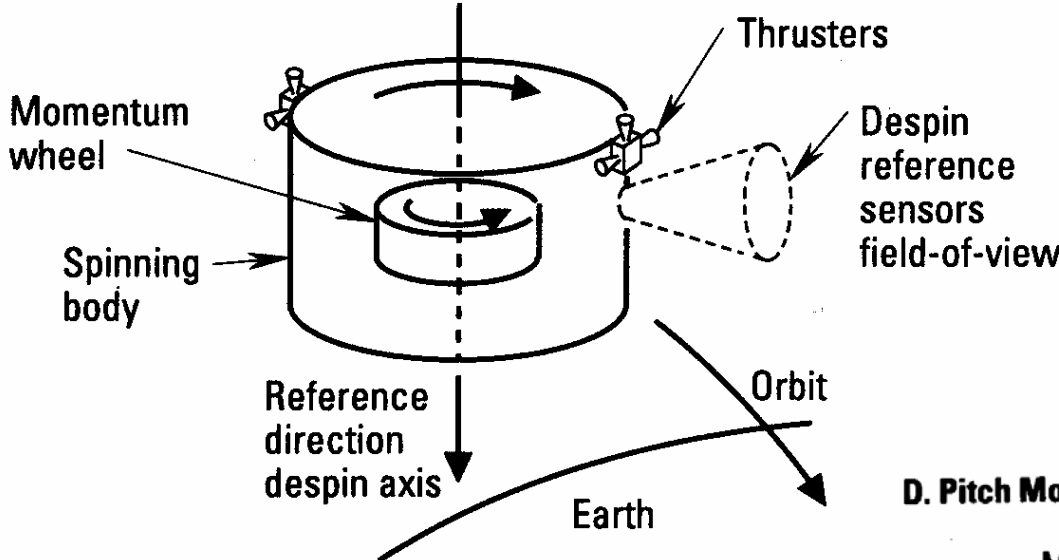
## A. Spin



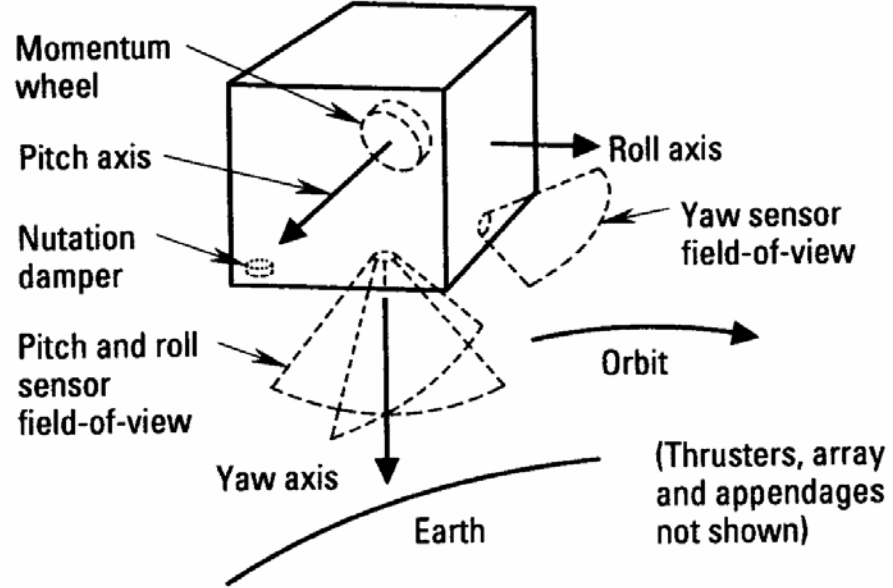
## B. Dual-Spin



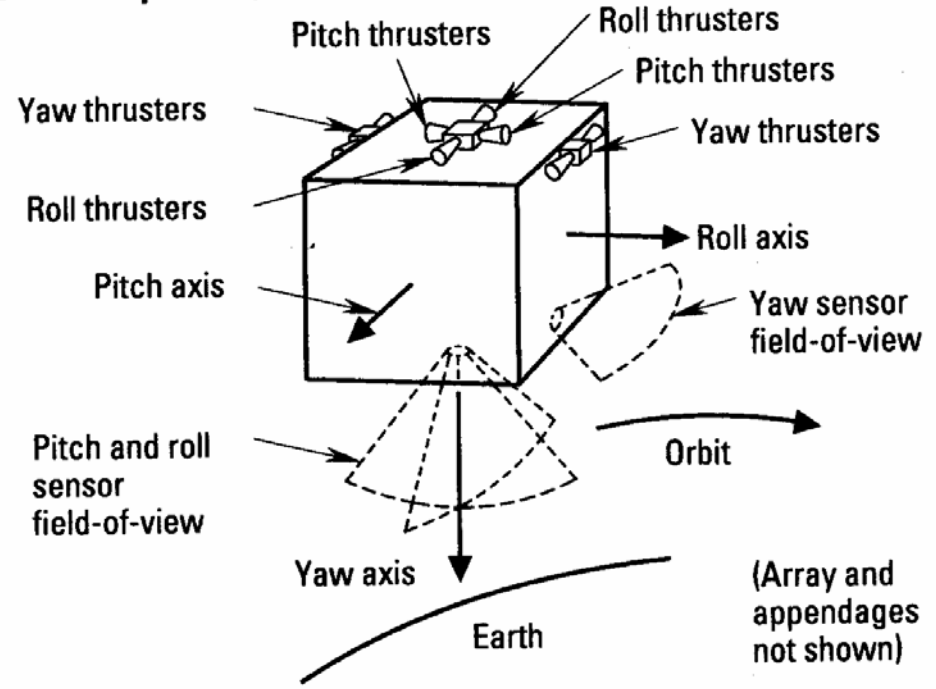
## C. Zero Momentum Spin



## D. Pitch Momentum Bias

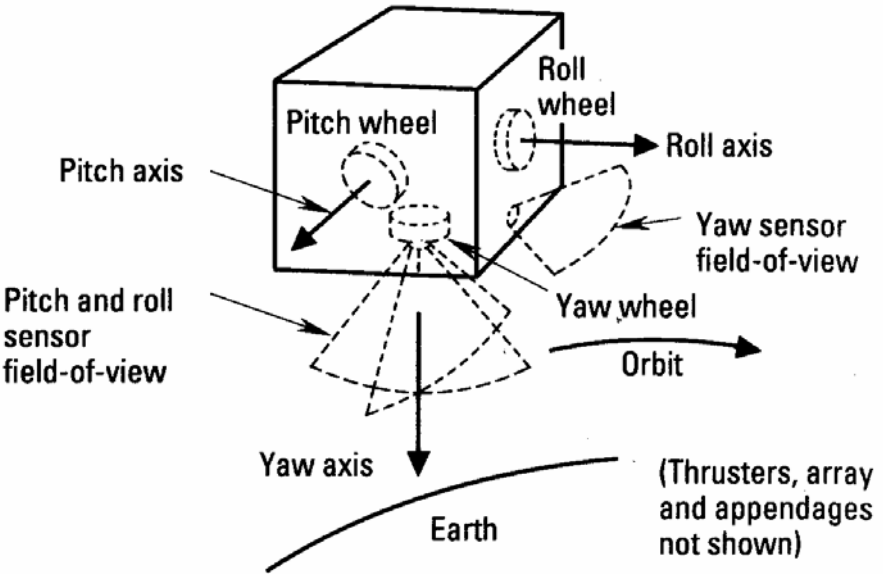


**E. Mass Expulsion (RCS)**

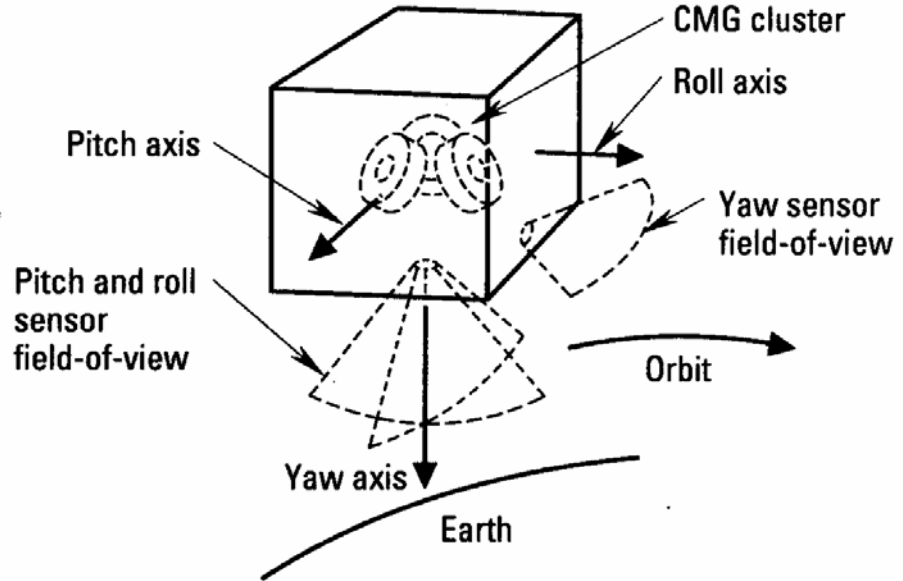


# 2.2 – Subsistema de Controle de Atitude: Técnicas de estabilização (cont.), [3]

## F. Zero Momentum Bias RWA

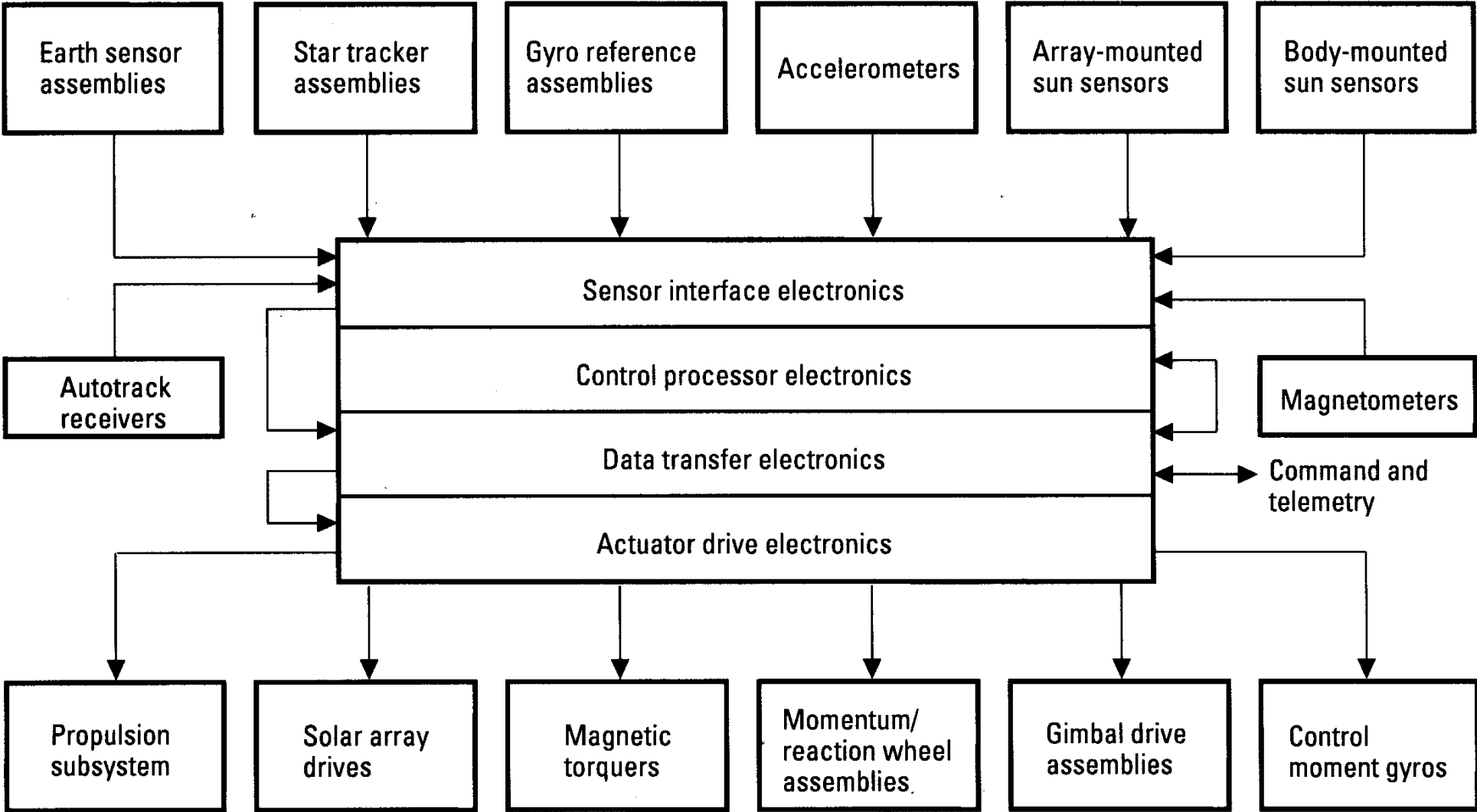


## G. Zero Momentum Bias CMG





## 2.2 – Subsistema de Controle de Atitude: Diagrama de Blocos, [3]



**Modular ACS Generic Block Diagram**

## 2.2 – Subsistema de Controle de Atitude, [3]

Fig.: Spacecraft Attitude Control

Tipos	Technique	Typical Missions	Typical Attitude Pointing Accuracy* (Deg)	Maneuvering		Spacecraft Examples
				Rates	Propellant Usage	
O	Gravity Gradient	Experimental Only	10.0 – 5.0	NA	NA	Pioneers, Explorer 5
A	Spin	Scientific, Scanning Sensors	1.0 – 0.1	Low	High	
B	Dual Spin	Communication Satellites	0.15 – 0.05	Low	High	DSCS-II, Tiros, Intelsat, Galileo, HS376
C	Zero Momentum Spin	Scanning Sensors	0.15 – 0.05	High	Low	
D	Pitch Momentum Bias	Earth Pointing Sensors/Antennas	0.15 – 0.05	Low	Low	Vela, DSP FLTSATCOM, TDRS, Satcom, Eurostar
E	Mass Expulsion Reaction Control System (RCS)	Interplanetary Earth Orbiting	0.5 – 0.1	Only High	Moderate	
F	Zero Momentum Bias-Reaction Wheel Assembly (RWA)	Scientific, Astronomical	0.5 – 0.001	Low	Low	Shuttle, Apollo, LEM, Ranger, Mariner, Voyager, MMS OGO, HEAO, GRO, Nimbus
G	Zero Momentum Bias-Control Moment Gyro (CMG)	Orbiting Platforms	0.5 – 0.001	High	Low	

\*Also a function of the attitude sensors used.

## 2.2 – Subsistema de Controle de Atitude: Descrição de seus componentes (\*)

### Sensores

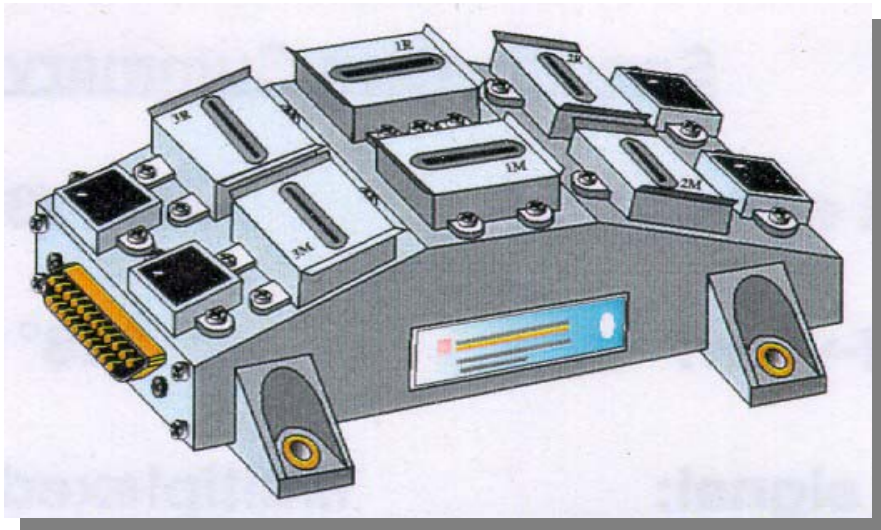
- **Sensores solares:** Utilizam-se os sensores solares para determinar a direção do sol relativa ao satélite. Existem diversos tipos de sensores solares, com diferentes formas de atuação e diferentes precisões, normalmente diferenciados em sensores digitais e analógicos.
- **Magnetômetros:** Estes sensores medem a projeção do campo magnético da Terra na direção do eixo sensor. É comum, portanto, que se utilizem em satélites magnetômetros de três eixos, de forma a determinar a direção do campo magnético de forma unívoca.
- **Sensores de horizonte (ou de Terra):** Este tipo de sensor utiliza um detector de radiação infra-vermelha, e com isso consegue detectar a zona de transição entre a temperatura do espaço e a temperatura da Terra (daí o nome de horizonte).
- **Sensores de estrelas:** São dispositivos capazes de identificar determinadas estrelas (dentro de um conjunto previamente selecionado) no campo visual do sensor, e com isso, determinar suas coordenadas com relação ao satélite.
- **Giroscópios ou Girômetros:** Os giroscópios são aparelhos dotados de um rotor que gira em velocidades elevadas, e com isso seus mancais sentem deslocamentos angulares da base. Dois tipos principais de giros se destacam: giros de velocidade (“rate gyros”) e giros de velocidade integrada (“rate integrated gyros”).
- **Sensores de navegação:** Receptores GPS que fornecem dados que permitem o cálculo de posicionamento e medidas brutas para processamento refinado.

### Atuadores

- **Bobinas magnéticas:** Por serem leves, de custo reduzido e por consumirem energia renovável (energia elétrica provinda dos painéis solares), são largamente utilizadas em satélites artificiais. As bobinas, devido à interação do campo magnético gerado por elas com o campo magnético da Terra, geram um torque.
- **Propulsores a jato de gás:** Jatos de gás são motores capazes de gerar impulsos elevados no satélite, tanto em termos de forças quanto em torques. São utilizados, com frequência, em manobras de órbita e atitude, porém tem emprego reduzido na estabilização e controle da atitude, pois neste caso deve-se contar com dispositivos capazes de gerar torques da ordem de grandeza dos torques de perturbação (da ordem de 10<sup>-4</sup> Nm).
- **Rodas de reação e volantes de inércia:** Estes dispositivos consistem de rotores que trocam momento angular com o satélite sempre que são acelerados ou freados através de um motor comandado pela eletrônica de controle.

### Eletrônica de controle

- O computador utilizado em controle de atitude consiste de uma ou mais CPUs, banco de memória, sistemas de chaveamento de equipamentos e interfaces de entrada e saída. A interligação do computador com os diversos equipamentos que constituem o SCAO é geralmente realizada individualmente, o que resulta numa configuração radial. Há uma tendência atual, todavia, de utilizar-se um barramento principal, ao qual todos os equipamentos se conectam. Os computadores possuem interfaces de aquisição de dados digitais e analógicos, bem como saídas digitais para comandar os equipamentos.



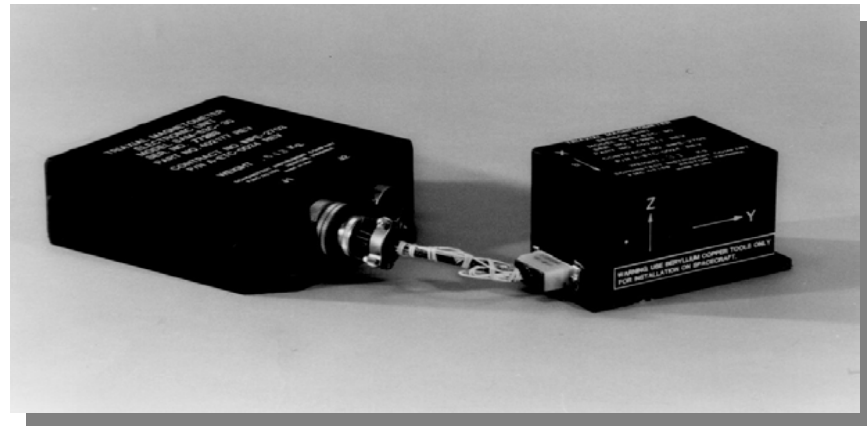
### Sensores de posição

- **Sensor Solar**

- Tipo: digital gray code
- Faixa de precisão: 0,005 a 1°
- Fabricantes: Barnes, Adcole, Ithaco, TRW
- Tipo: analógico piramidal com faixa de precisão de 0,5 a 5°

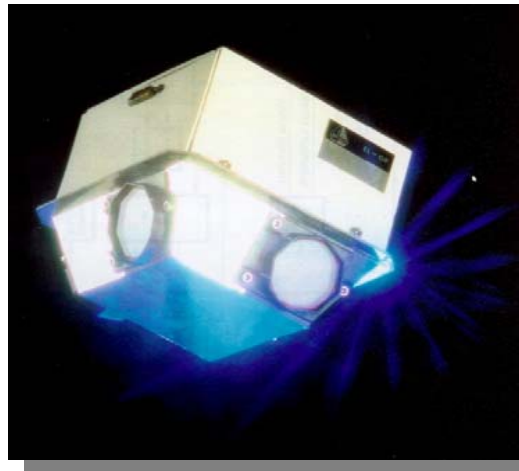
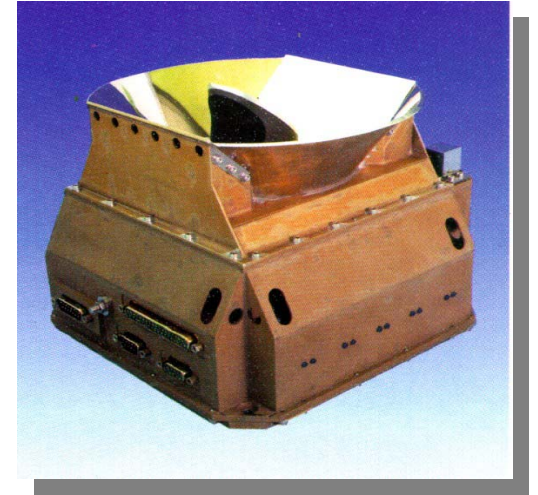
- **Magnetômetro**

- Tipo: fluxgate
- Faixa de precisão: 0,1 a 5° (depende da contaminação)
- Fabricantes: Ithaco, Crouzet, Schonstedt



### • *Sensor de Terra*

- Tipo: de varredura
- Faixa de precisão: 0,15 a 1°
- Fabricantes: Ithaco, Sodern
- Tipo: digital
- Faixa de precisão; 0,15 a 1°
- Fabricantes: Barnes, Elop



- ***Sensor de estrelas***

- Tipo: grade de detectores
- Faixa de precisão: 0,0003 a 0,02°

- Fabricantes: Sodern, Cal, Honeywell, Hughes



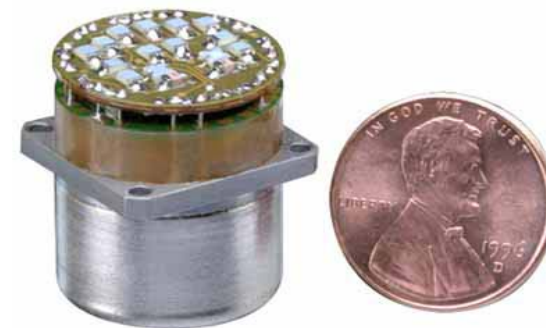
### Sensores de velocidade

#### • *Giroscópios ou Girômetros*

- Tipo: ring laser ou fibra ótica
- Faixa de precisão: 0,003 a 1°/h
- Fabricantes: Sextant, Litton



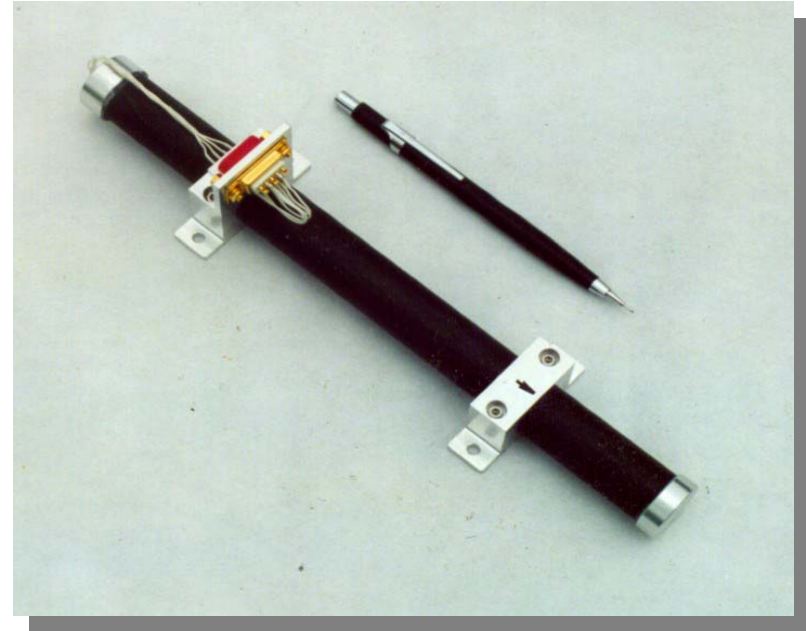
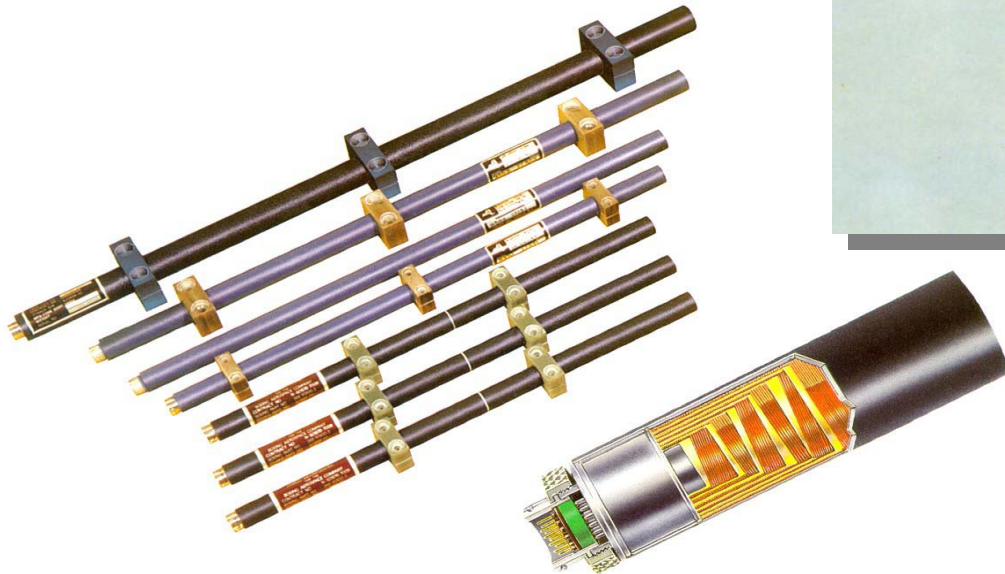
- Tipo: dry tuned
- Faixa de precisão: 0,003 a 1°/h





### Atuadores

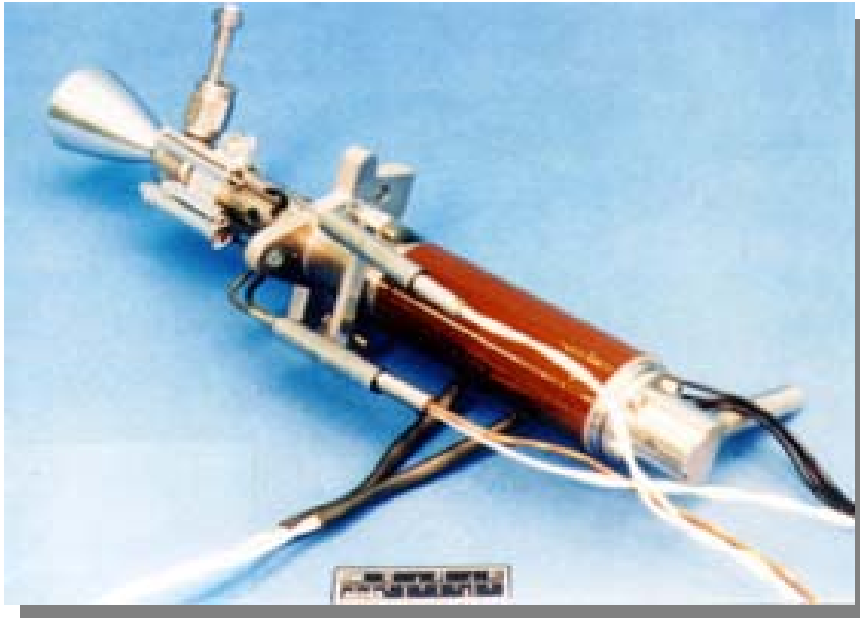
- *Bobinas Magnéticas*



- Tipo: núcleo
- Faixa de atuação: 10  $\mu$ Nm a 0,04 Nm
- Fabricantes: Ithaco, Fokker, Hughes, Lockheed

### • *Propulsores*

- Tipo: gás frio
- Faixa de atuação: 0,1 a 5 N
- Fabricantes: Moog, Bendix, Honeywell



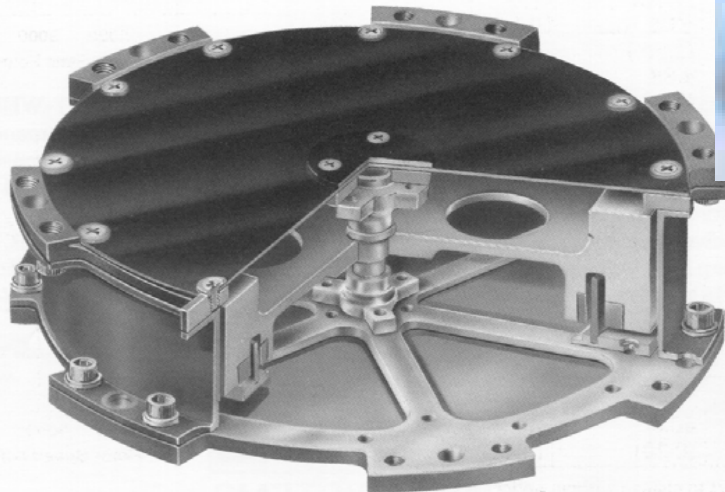
- Tipo: monopropelente (hidrazina)
- Faixa de atuação: 0,5 a 9.000 N
- Fabricantes: Moog, Kaiser Marquardt, SEP, Hamilton Standard, TRW

### • *Rodas de Reação*

- Tipo: momento angular nulo (roda de reação)
- Faixa de atuação: 0,001 a 1 Nm
- Fabricantes: Teldix, Ithaco



- Tipo: momento angular embarcado (volante de inércia)
- Faixa de atuação: 0,001 a 1 Nm
- Fabricantes: Ithaco, Teldix, Bendix, Honeywell



### Eletrônica computadorizada

- CPU: 8086, 80386 “radiation hardened”.
- Memória: de 32K a mais de 1Mbyte de RAM e ROM.
- Interfaces: digitais, analógicas, RS232, etc.
- Arquitetura: estrela ou tipo bus.



## 2.2 – Subsistema de Controle de Atitude: Arquiteturas

	Requisitos	Estabilização	Sensores	Atuadores
Tipo 0	Terra-apontado	Gradiente de gravidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>• não são necessários magnetômetro e sensor solar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mastro</li> <li>• amortecedor de libração</li> <li>• bobinas ou volante</li> </ul>
Tipo A	Inercial	Rotação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• magnetômetro e sensor solar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• amortecedor de nutação e bobinas</li> </ul>

	Requisitos	Estabilização	Sensores	Atuadores
Tipo B Tipo C Tipo D	Terra-apontado	Dual-spin ou momento embarcado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• magnetômetro, sensor solar e sensor de Terra</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• volante de inércia, amortecedor, bobinas</li> <li>• volante de inércia, amortecedor e jatos</li> </ul>
Tipo A	Inercial	Rotação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• magnetômetro e sensor solar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• bobinas, jatos e amortecedor de nutação</li> </ul>

## 2.2 – Subsistema de Controle de Atitude: Arquiteturas (cont.)

Tipo F  
Tipo G

Requisitos	Estabilização	Sensores	Atuadores
Terra-apontado	Estabilização em 3 eixos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sensor de Terra, sensor solar e girômetros</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• rodas de reação e bobinas</li><li>• rodas de reação e jatos</li></ul>
Inercial	Estabilização em 3 eixos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sensor de estrela, sensor solar e girômetros</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• rodas de reação e bobinas</li><li>• rodas de reação e jatos</li></ul>

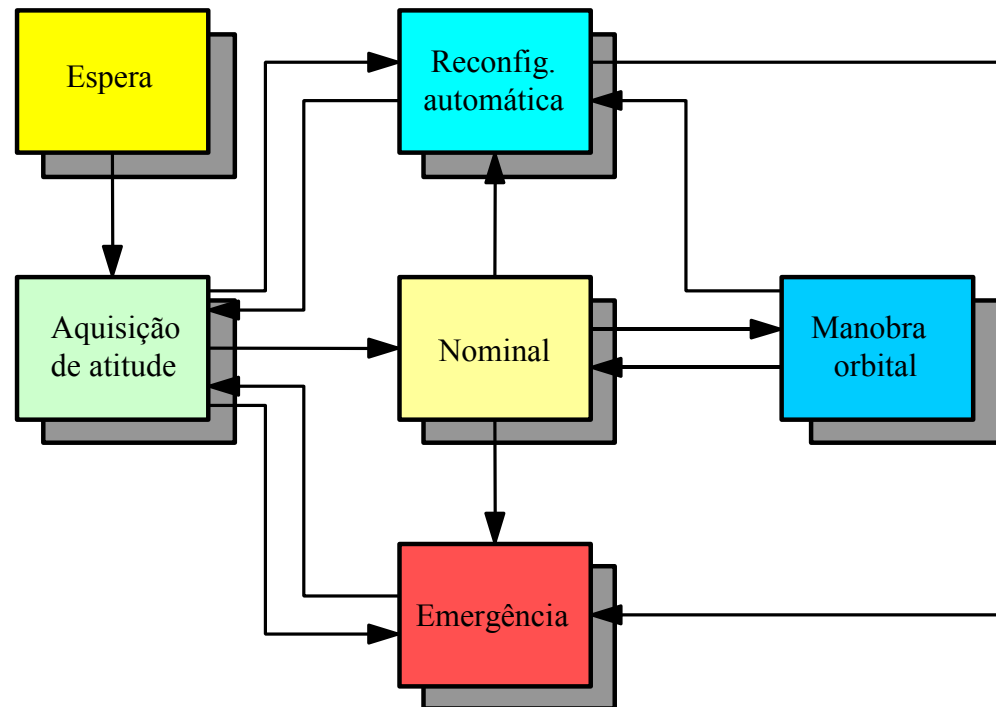
Tipo F  
Tipo G

Tipo F  
Tipo G

Requisitos	Estabilização	Sensores	Atuadores
Menor que $0,1^\circ$	Estabilização em 3 eixos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sensor de estrela e girômetros mais precisos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• rodas de reação e bobinas</li><li>• rodas de reação e jatos</li></ul>

## 2.2 – Subsistema de Controle de Atitude: Software embarcado, [8]

- **Codificação:** Assembler, C++ ou ADA.
- **Modos de operação:** vários, em função da missão.
- **Módulos:** leitura dos sensores, determinação da atitude, leis de controle, comando dos atuadores, reconhecimento e recuperação de falha, reconfiguração automática e modo de emergência.



## 2.2 – Subsistema de Controle de Atitude: Testes, [8]

- Testes de software:
  - Simulação da atitude, testes da lei de controle.
  - Teste do software de controle e supervisão do ACS.
  - Teste do software embarcado (C++ ou ADA).
- Testes com a eletrônica de controle:
  - Teste do software embarcado.
  - Teste funcional dos equipamentos embarcados.
- Testes com “hardware in-the-loop”:
  - Malha aberta.
  - Malha fechada, com estímulo elétrico.
  - Teste do sistema em malha fechada, com estímulo físico em mesa de 3 eixos.

