

Simulações Computacionais e o Ciclo de Vida de Projetos na Área Espacial

Curso de Inverno 2018
Engenharia e Tecnologia Espacial
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

18 de julho de 2018
São José dos Campos

Leonel F. Perondi

Sumário

I. Introdução

II. Ciclo de Vida de Sistemas Espaciais

III. Simulações Computacionais

IV. Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais

V. Controle de Atitude e Órbita

VI. Missão EQUARS

Fabricação de Sistemas – Breve Histórico



~1750

Fabricação artesanal



~1800

Intercambiabilidade de partes

Eli Whitney



~1900

Processos e metrologia

Taylor



~1915

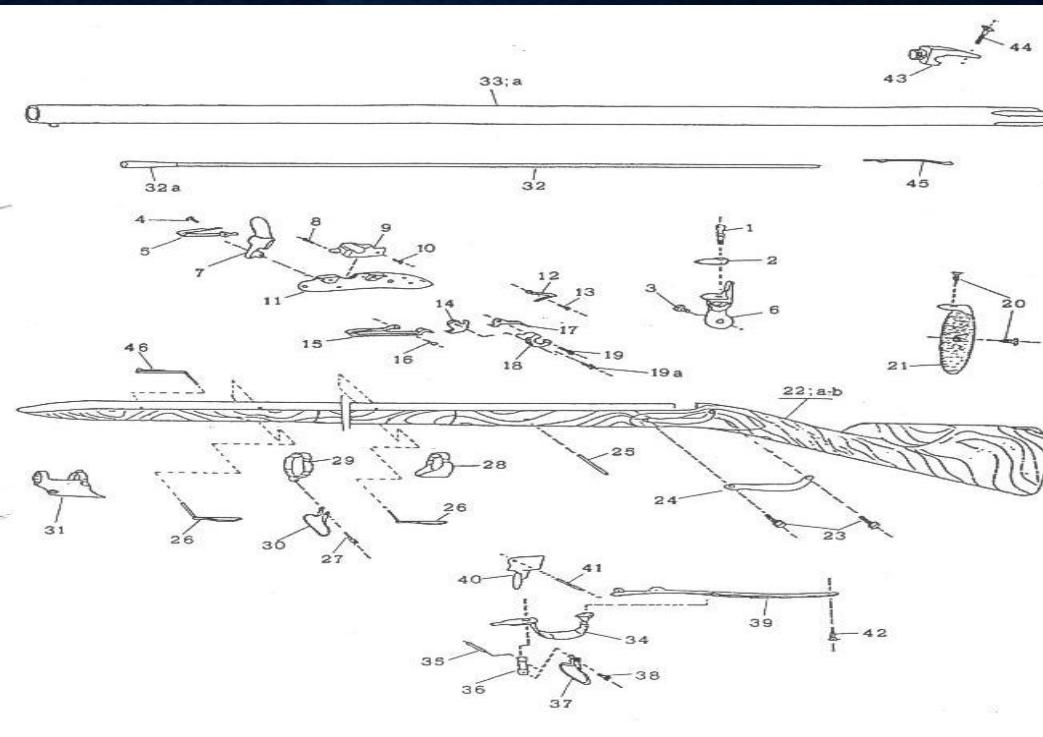
Linha de produção

Ford



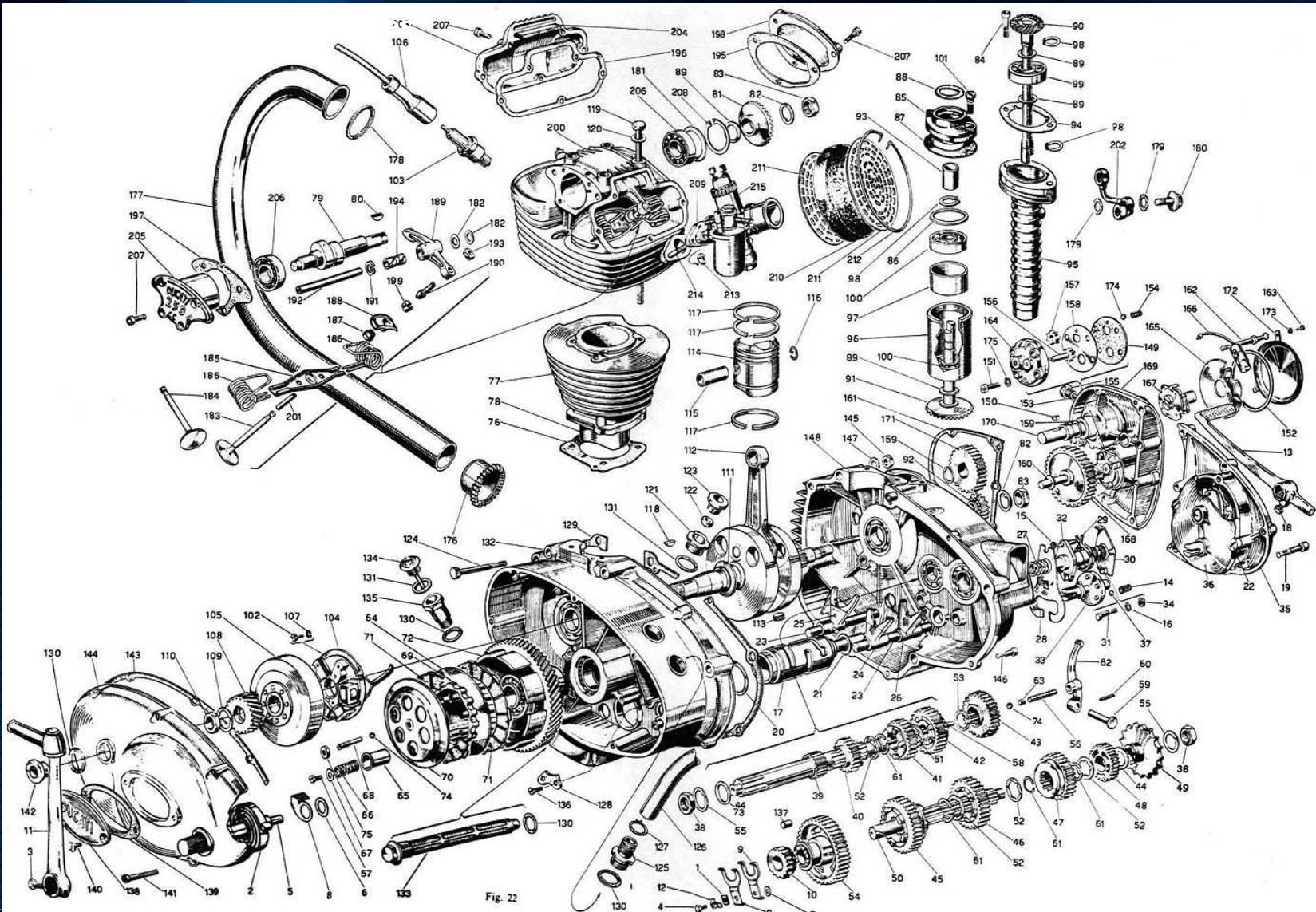
Fabricação Artesanal

1766 Charleville Musket



http://en.wikipedia.org/wiki/Charleville_musket

Fabricação Seriada



Fabricação de Sistemas – Breve Histórico

Grande transformação do sistema de produção:

- ~ 1750 - Produção artesanal
- ~ 1915 - Produção seriada de sistemas

Desenvolvimentos necessários para a fabricação seriada de sistemas:

- máquinas-ferramentas (energia, siderurgia)
- metrologia
- processos
- integração

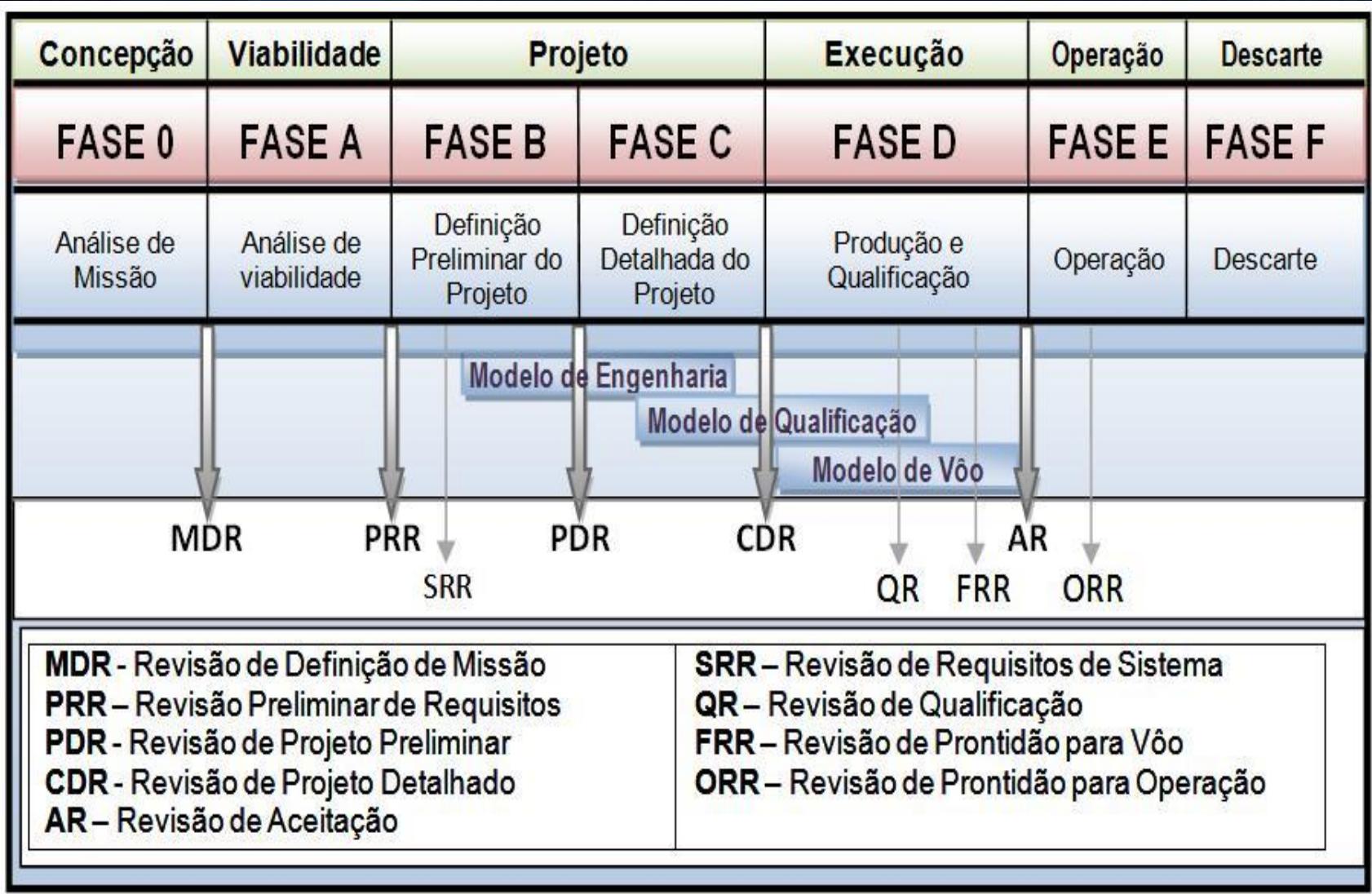
Novas disciplinas:

- Eng. de Sistemas
- Garantia da Qualidade

Nucleação de novos setores industriais:

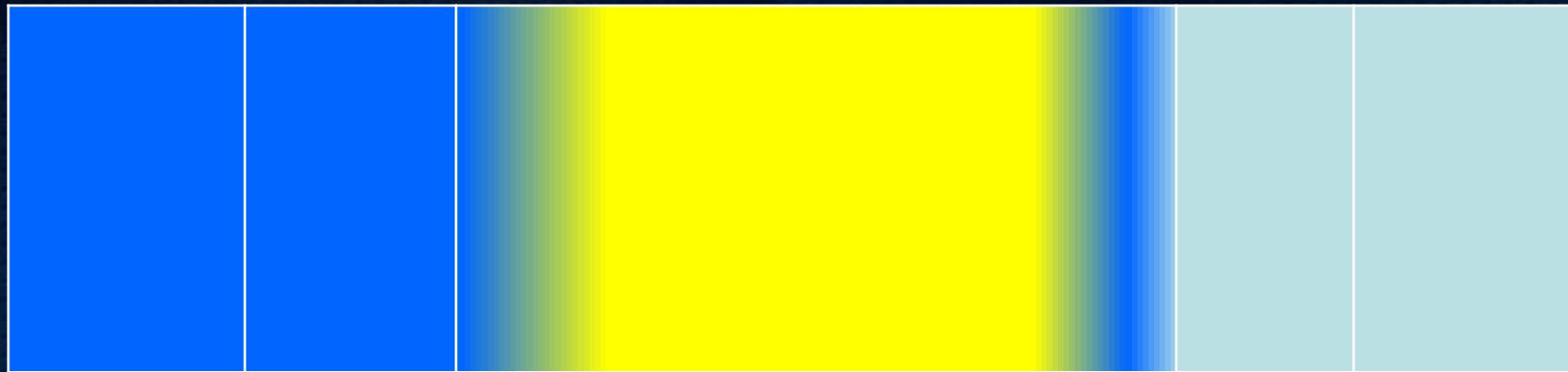
- transportes
- energia
- telecomunicações
- aeroespacial

Ciclo de Vida de Projetos - INPE



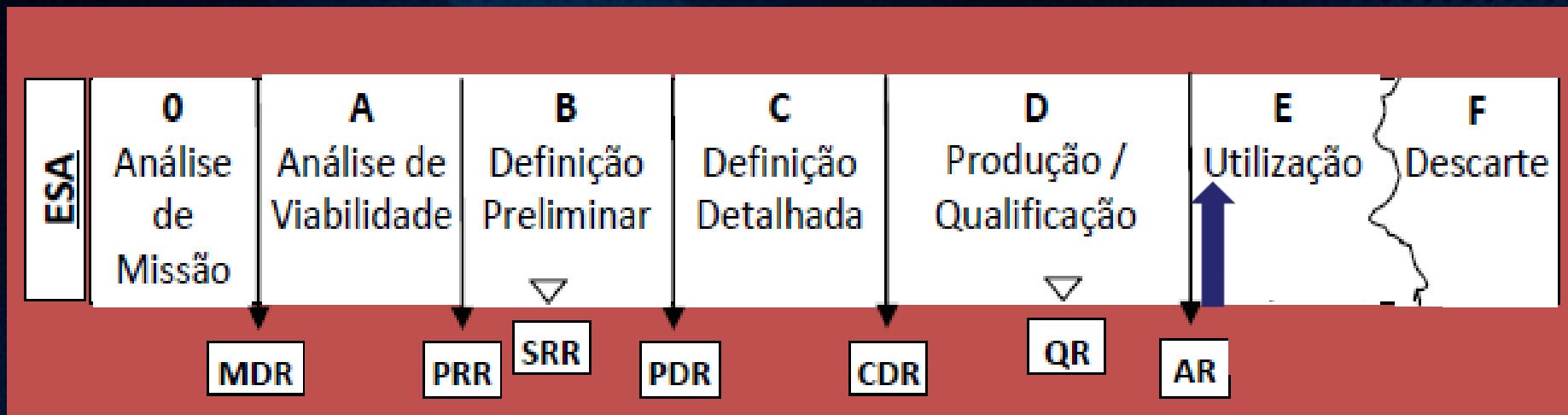
Capacitação Industrial

Concepção	Viabilidade	Projeto		Execução	Operação	Descarte
FASE 0	FASE A	FASE B	FASE C	FASE D	FASE E	FASE F
Análise de Missão	Análise de viabilidade	Definição Preliminar do Projeto	Definição Detalhada do Projeto	Produção e Qualificação	Operação	Descarte

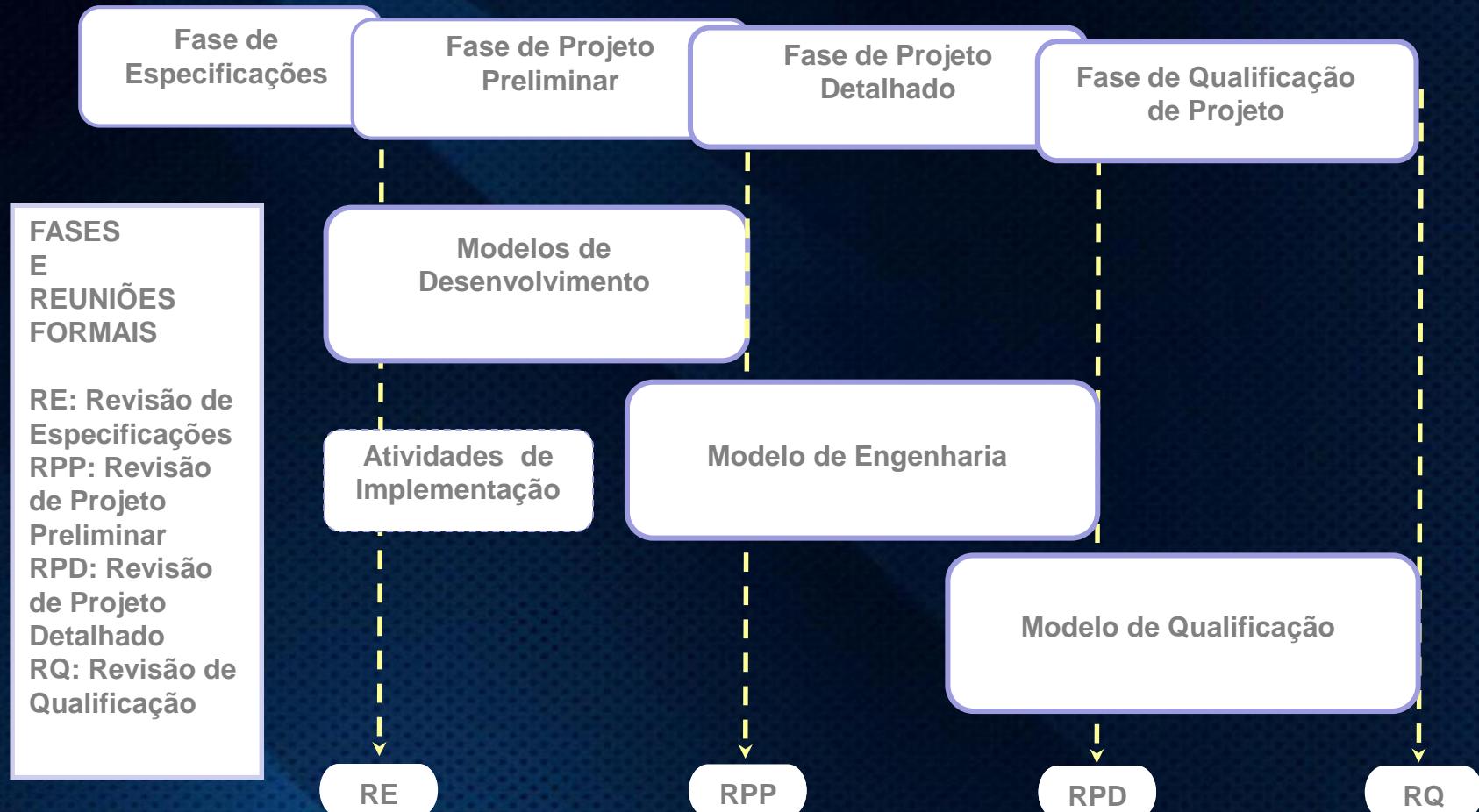


Capacitação da Indústria Nacional, nos últimos 10 anos, através de contratações relativas aos satélites – CBERS-2B (lançado em 2007), CBERS-3 (2013) e o CBERS-4 (2014).

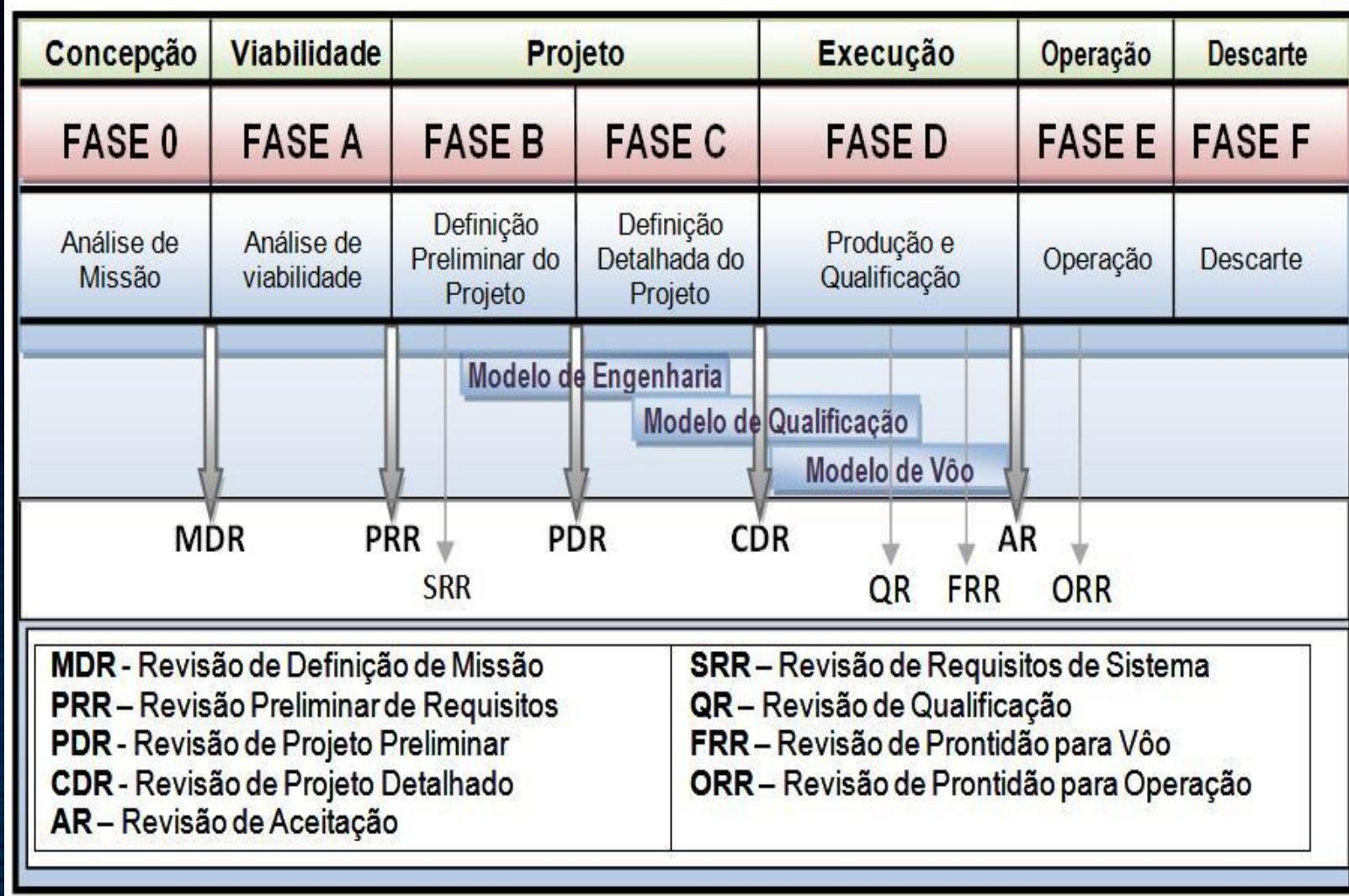
Ciclo de Vida de Projetos – ECSS



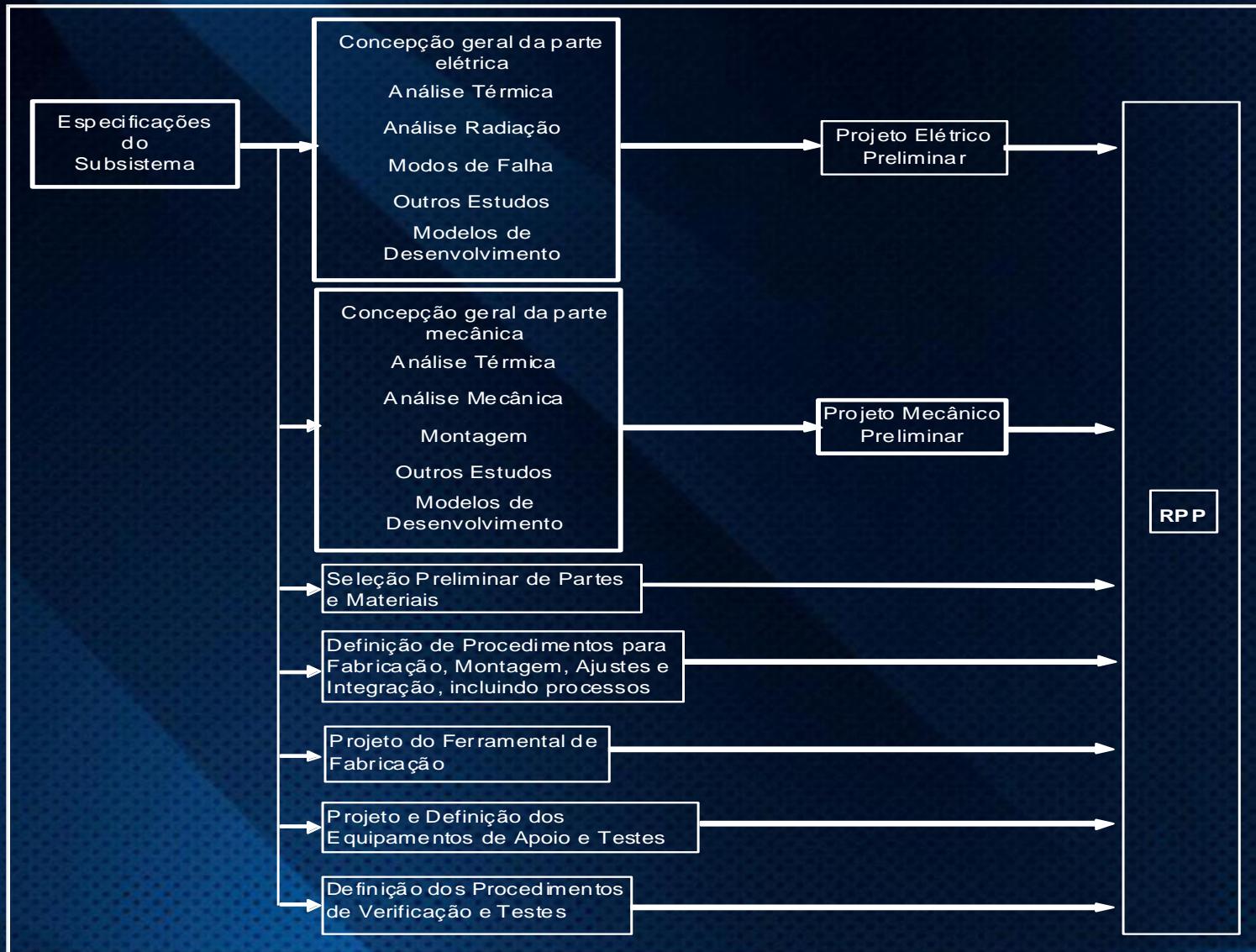
Plano de Desenvolvimento



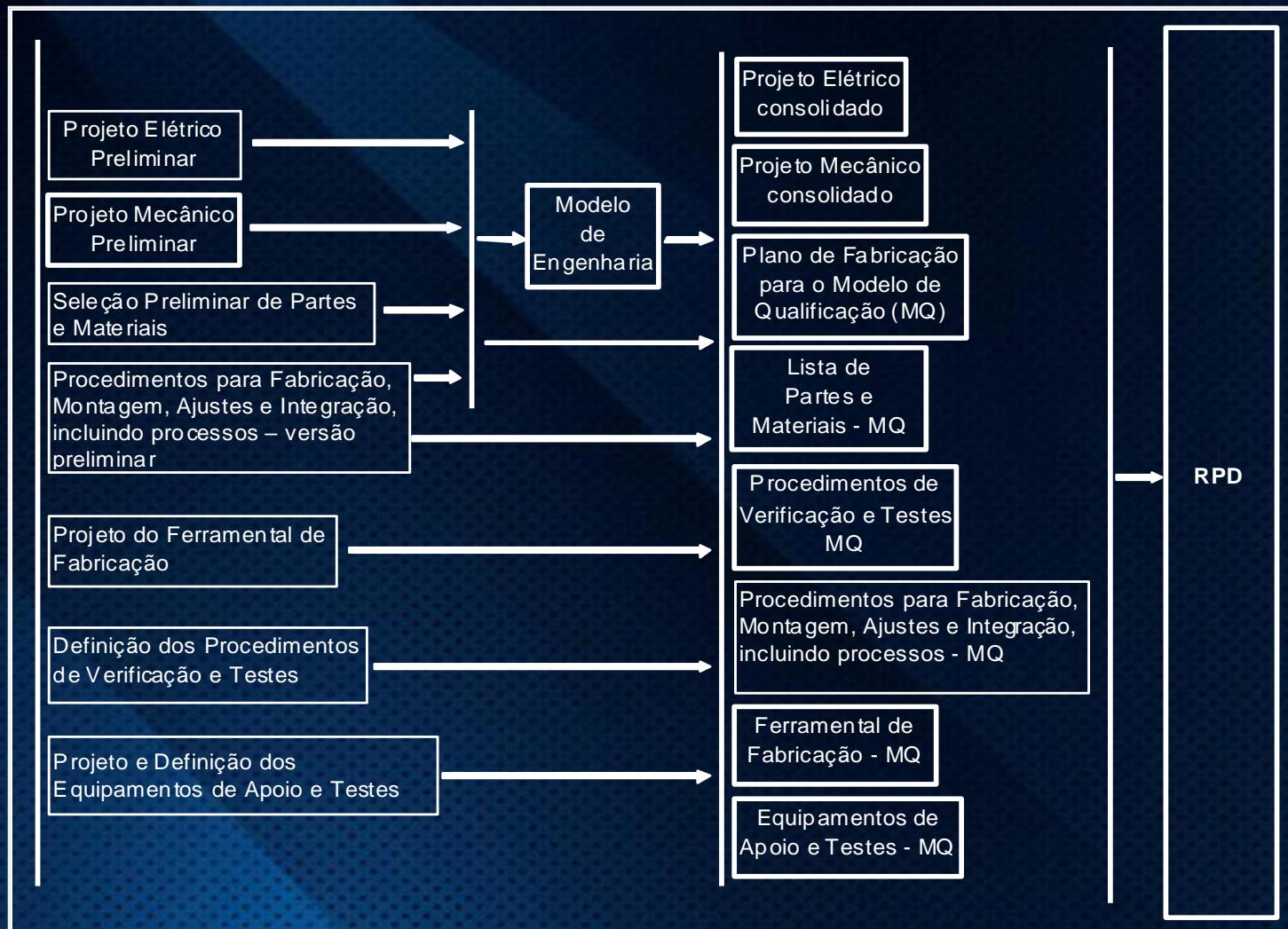
Ciclo de Vida de Projetos - INPE



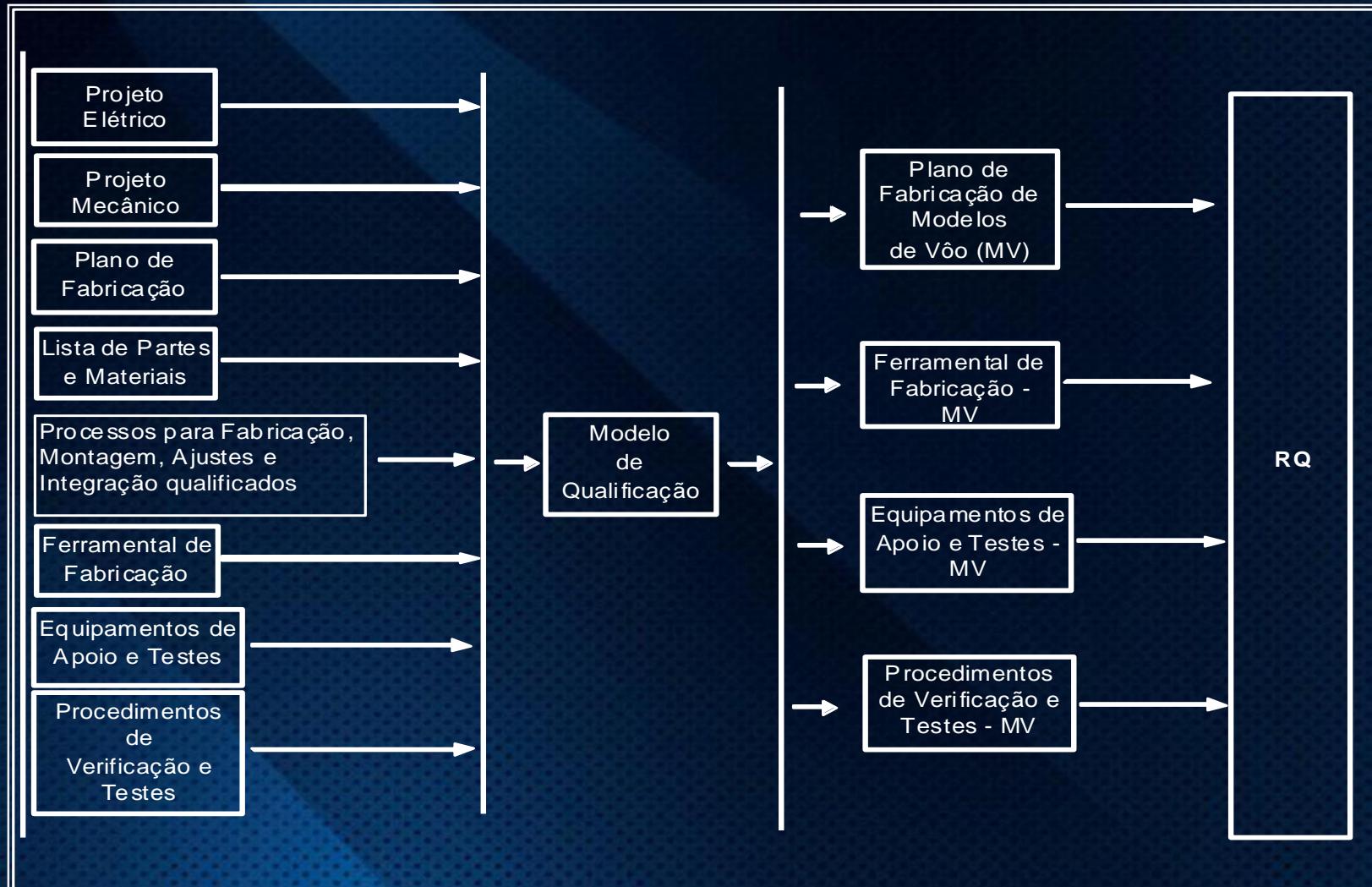
Fase de Projeto Preliminar



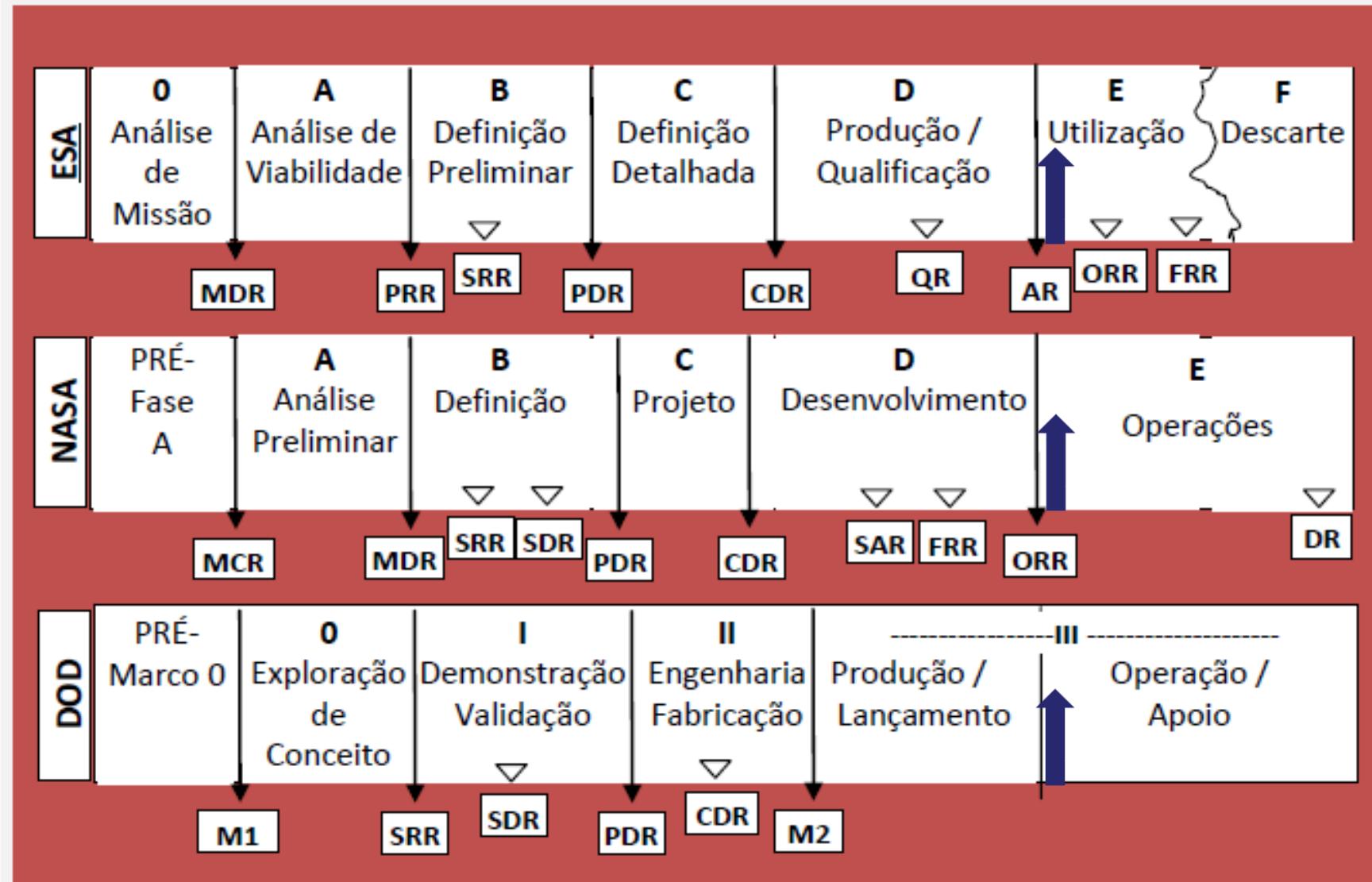
Fase de Projeto Detalhado



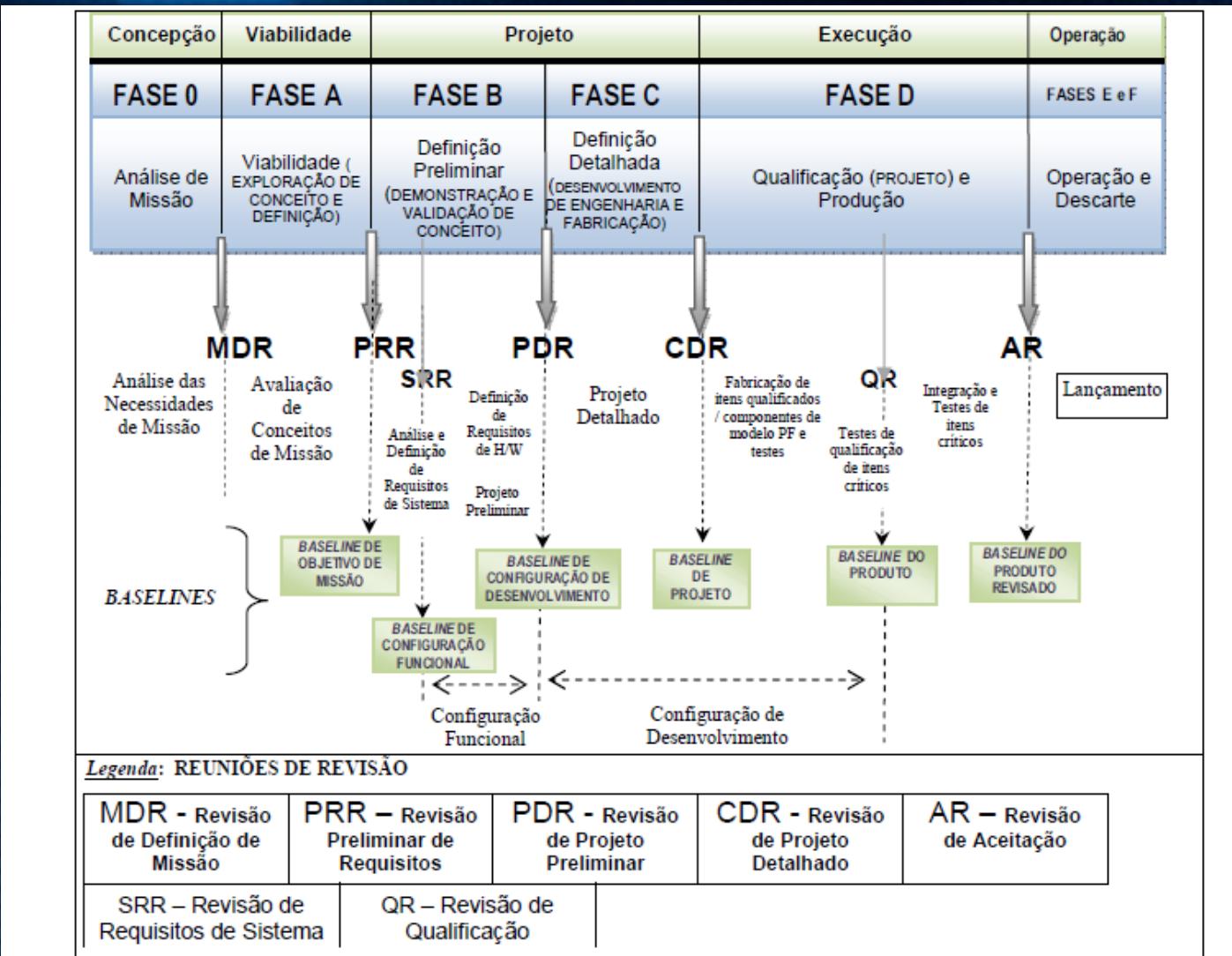
Fase de Qualificação de Projeto



ECSS x NASA x DOD



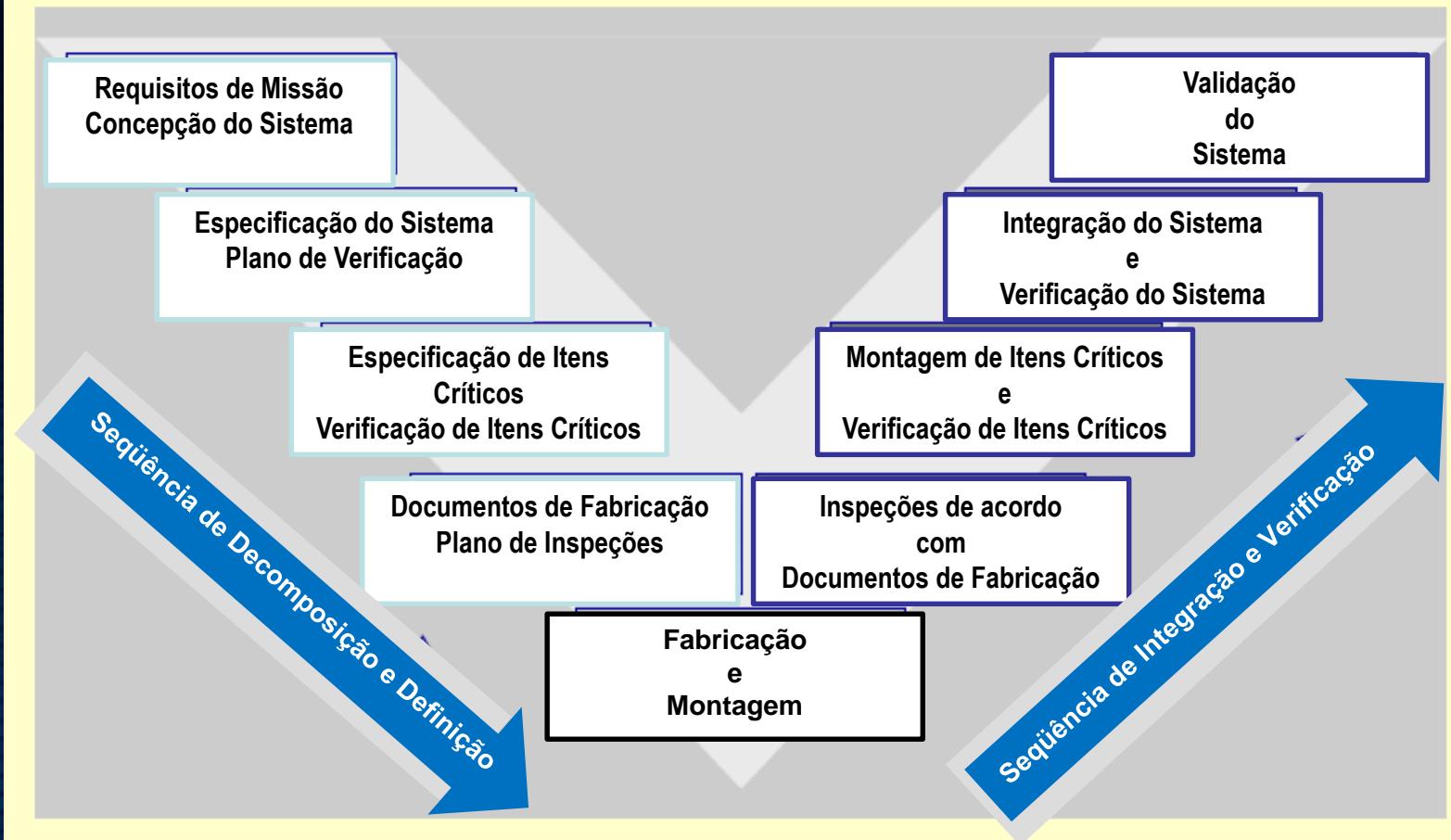
Gestão da Configuração - Linhas de Base



Fases do projeto e definição de *linhas de base* (adaptado de ECSS-M-ST-40C, p.32 (ECSS-2009))

Ciclo em V

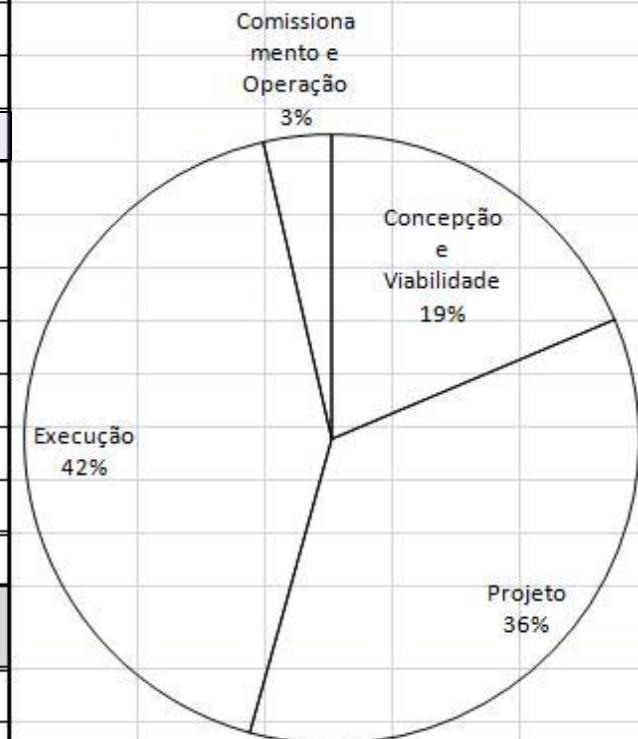
Ciclo de Projeto e Verificação: Ciclo em V



Falhas em Sistemas Espaciais

<i>Causa mais provável</i>	<i>Número de missões afetadas</i>	<i>%</i>
<i>Gerenciamento do Programa</i>	6,00	4,30
<i>Gerenciamento da Engenharia de Sistemas</i>	15,00	10,70
<i>Política, custos e cronograma</i>	5,00	3,60
<i>Projeto</i>	31,00	22,10
<i>Projeto de testes e Verificação</i>	16,00	11,40
<i>Projeto de Software</i>	3,00	2,10
<i>Teste e Verificação de Software</i>	8,00	5,70
<i>Produção e Manufatura</i>	25,00	17,90
<i>Teste e Verificação na Produção/manufatura</i>	26,00	18,60
<i>Planejamento da operação</i>	4,00	2,90
<i>Falha na intervenção inicial</i>	1,00	0,70
<i>Total</i>	140,00	100,00
<i>Fase do Ciclo de Vida do Projeto</i>	<i>Número de missões afetadas</i>	<i>%</i>
<i>Concepção e Viabilidade</i>	26,00	18,60
<i>Projeto</i>	50,00	35,70
<i>Execução</i>	59,00	42,10
<i>Comissionamento e Operação</i>	5,00	3,60
<i>Total</i>	140,00	100,00

Fase do Ciclo X Falhas



NEWMAN, J.S. Failure space: a systems engineering look at 50 space system failure. Acta Astronautica, Vol.48 No 5-12, 2001.

Simulações Computacionais

- Sistema

- Conjunto de elementos interagentes;

The INCOSE and ISO/IEC/IEEE definitions draw from this view of a system:

... an integrated set of elements, subsystems, or assemblies that accomplish a defined objective. These elements include products (hardware, software, firmware), processes, people, information, techniques, facilities, services, and other support elements. (INCOSE)
[4.1.46] ... combination of interacting elements organized to achieve one or more stated purposes.

(ISO/IEC/ IEEE 15288)

- Modelos e Simulações

- O projeto e a verificação de sistemas podem ser efetuadas via testes ou experimentos, com o sistema real ou um modelo do sistema.

Simulações computacionais e Ciclo de Vida

- Simulações computacionais têm aplicabilidade em diversas fases do ciclo de vida de uma missão espacial.
- **Fase 0**
 - Simulação da missão permite a definição e o refinamento de requisitos de missão.
- **Fase A**
 - Simulações de missão com diferentes arquiteturas de sistema auxiliam o processo seleção de uma arquitetura.

Simulações computacionais e Ciclo de Vida

- **Fase B e C**

- Simulações computacionais do sistema, com modelos para componentes individuais, auxiliam o projeto do sistema como um todo.

- **Fases D e E**

- Apoio à fase de comissionamento.
- Treinamento de operadores.
- Simuladores em solo para diagnósticos do sistema de controle de atitude e órbita.
- Apoio a operações (e descarte).
- Simuladores para apoio a aplicações.

SCD-1 e SCD-2 – Sistema de Coleta de Dados

MISSÃO DE COLETA DE DADOS:

Coleta de dados ambientais em localidades distribuídas pelo território nacional através de plataformas de coleta de dados locais e transmissão via satélite

Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais



Principais aplicações:

- Monitoração de Bacias Hidrológicas
- Previsão de Tempo e Clima
- Química da Atmosfera
- Oceanografia

Plataformas de Coleta de Dados (PCDs): Mais de 700 instaladas

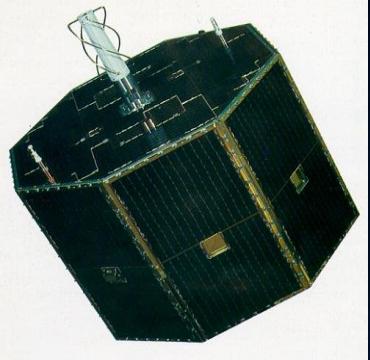
Satélites:

- SCD-1 (1993),
- SCD-2 (1998),
- CBERS-2 (2003, DCS desligado).

Usuários do Sistema:

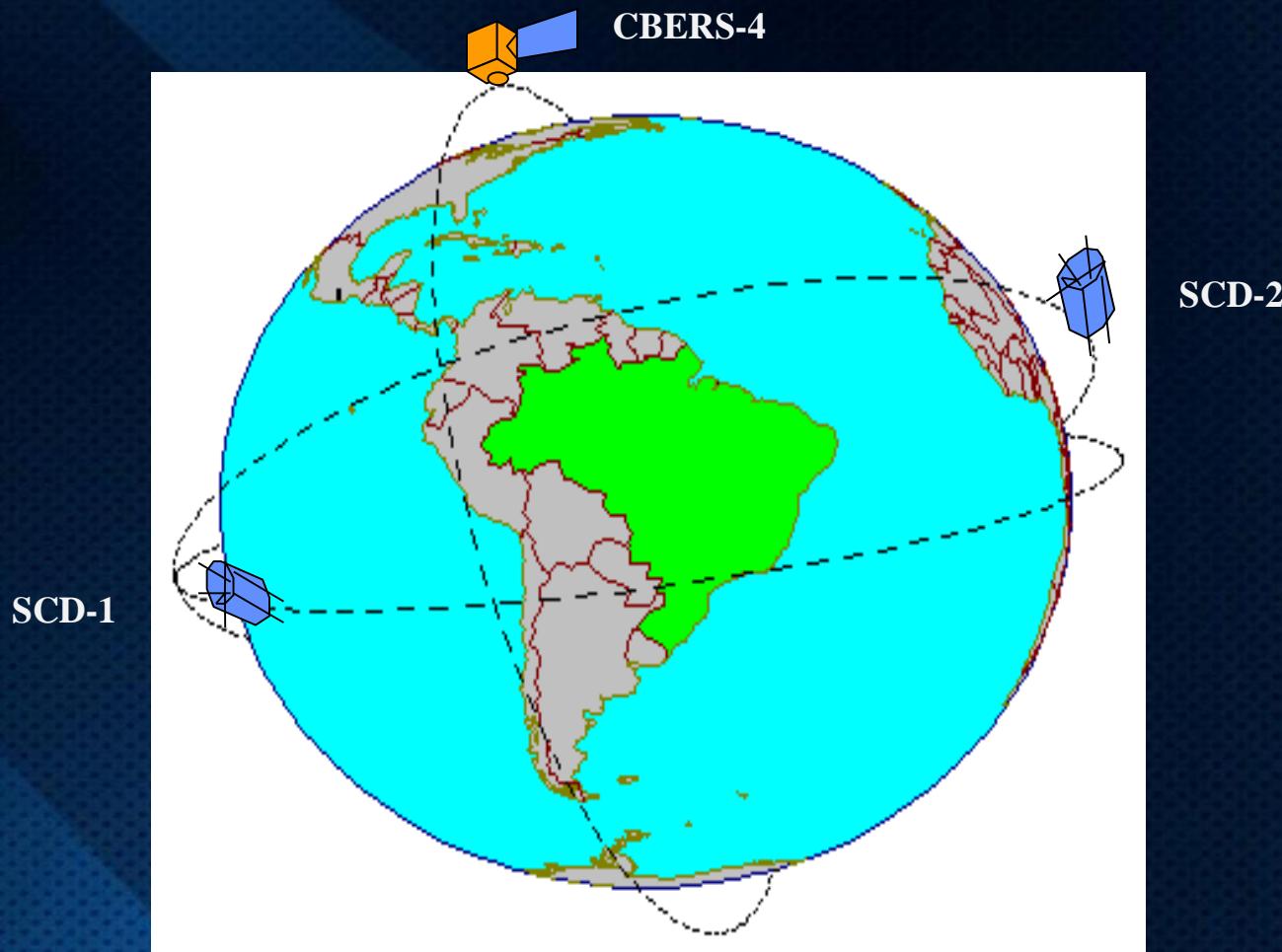
- Mais de 100 organizações

CARACTERÍSTICAS DO SCD-1 e SCD-2

	 SCD-1	 SCD-2
Tempo de Vida	1 ano c/ 75% de confiabilidade	2 anos c/ 65% de confiabilidade
Órbita	25º circular a 750 km	25º circular a 750 km
Índice de Nacionalização	73%	85%
Custo (MUS\$)	19	11
Velocidade de Rotação	120 rpm a 0 rpm (sem controle)	34 rpm (controle ativo)
Carga Útil Experimental	Computador de Bordo e Experimento Célula Solar	Roda de Reação e Experimento Célula Solar
Orientação do Eixo de Rotação	variável	sempre perpendicular ao Sol
Probabilidade de Acesso ao Satélite	90%	100%

Segmento Espacial

SCD-1, SCD-2 e CBERS-4

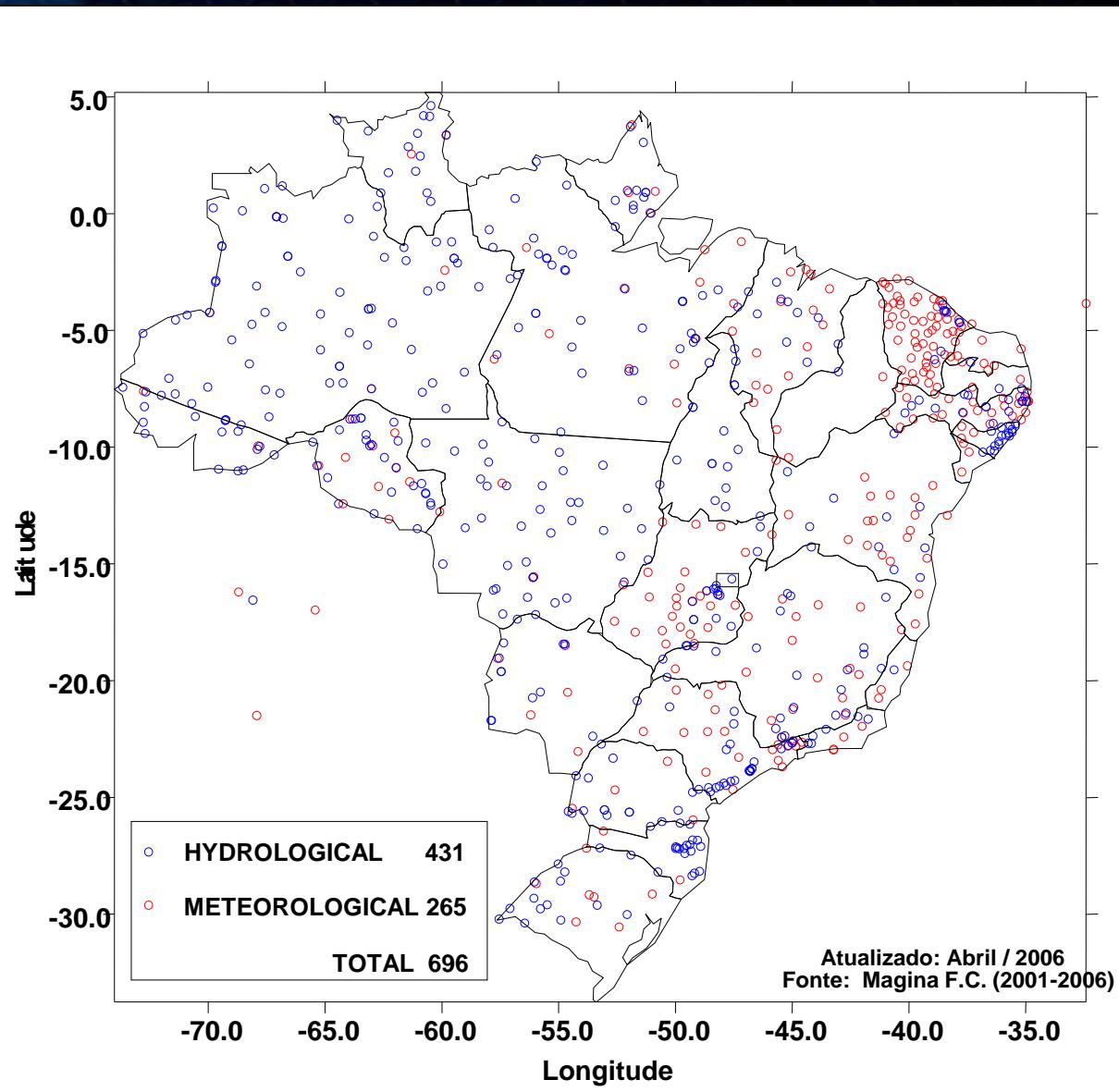


Wilson Yamaguti - Curso de Inverno - 2007 - INPE, SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, 10 a 26/07/2007

Segmento Solo

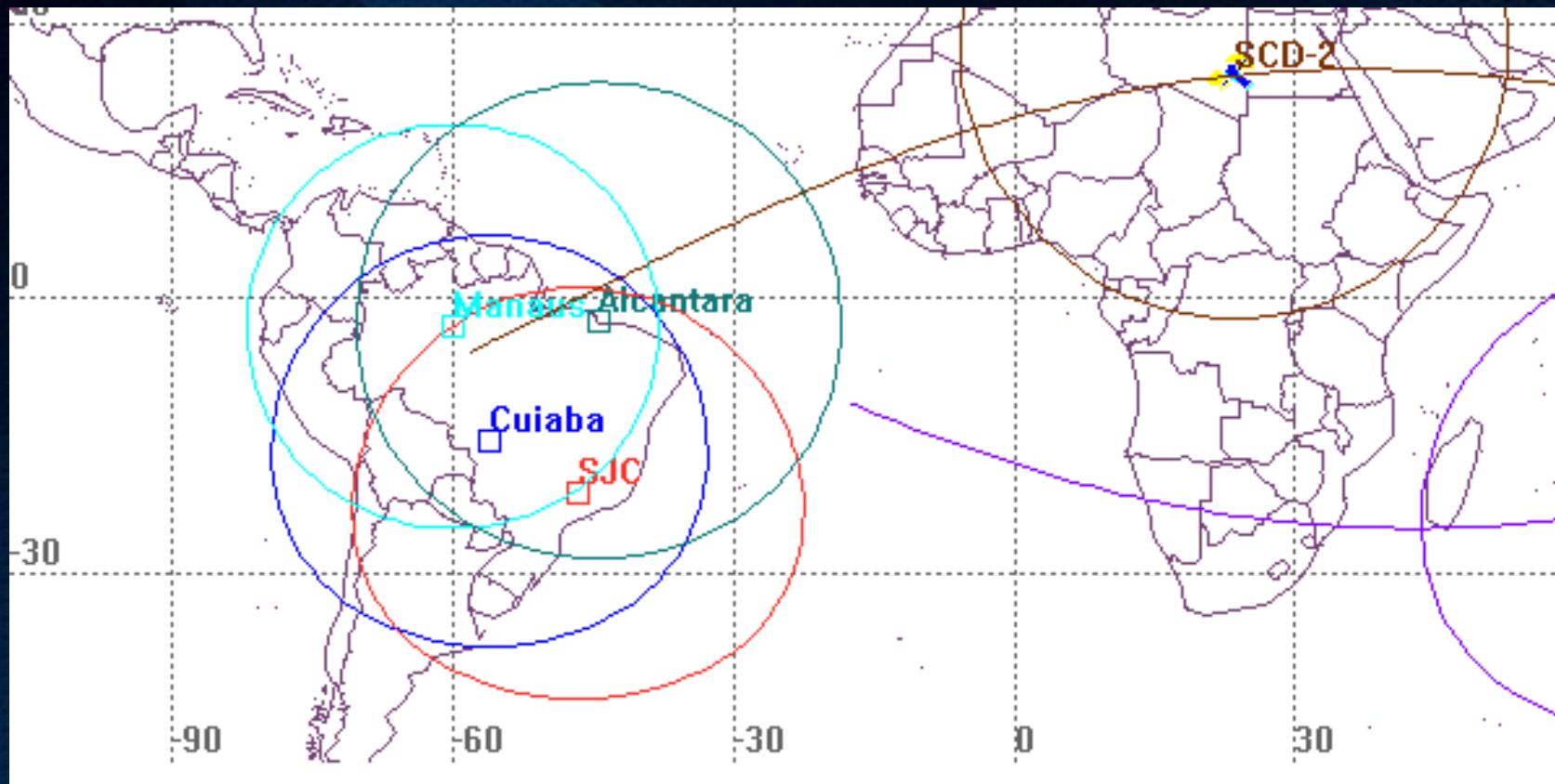


Distribuição de PCDs - 2006

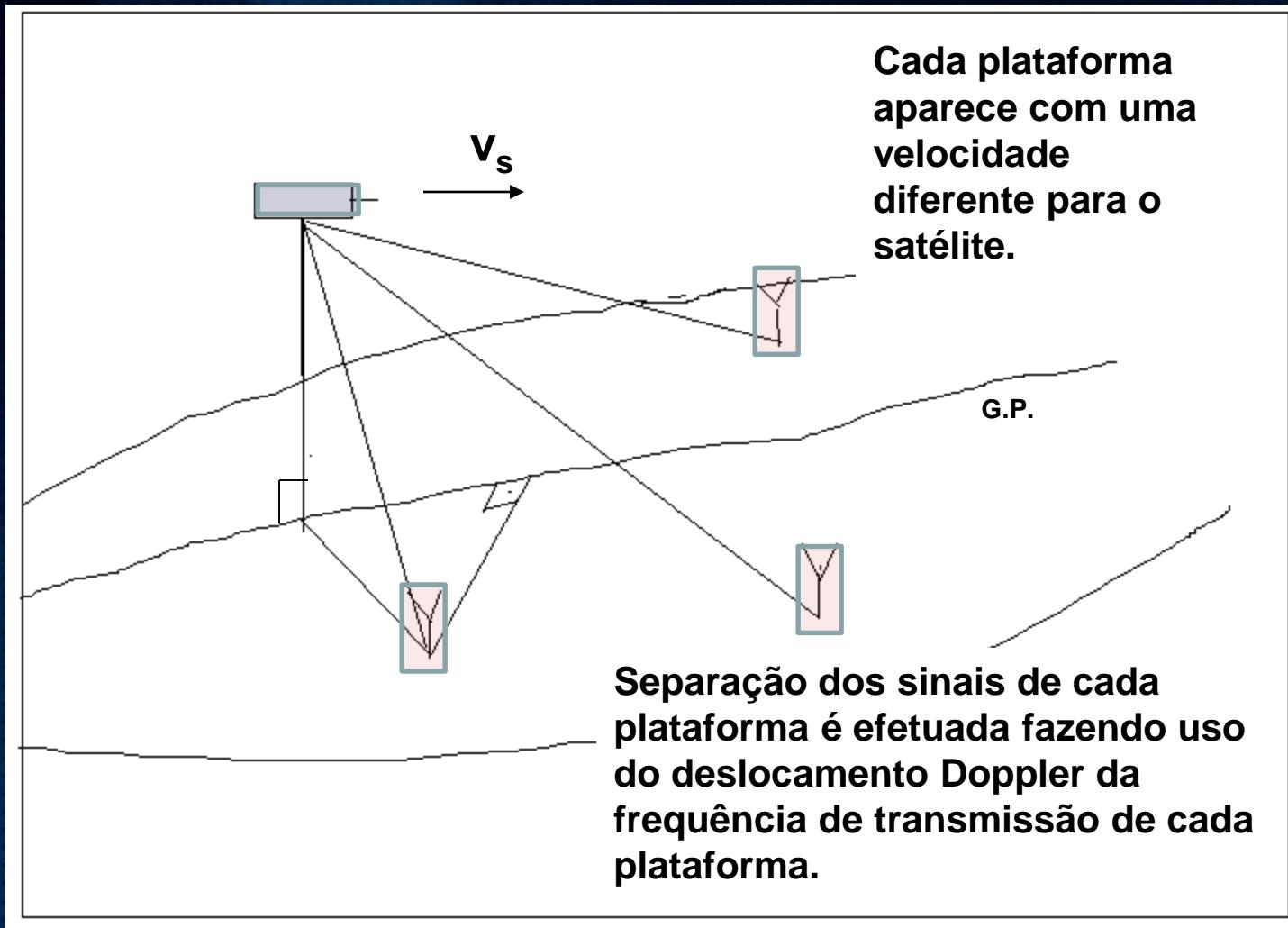


Wilson Yamaguti - Curso de Inverno - 2007 - INPE, SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, 10 a 26/07/2007

Estações



Princípio de Operação do Sistema



Transponder Coleta de Dados

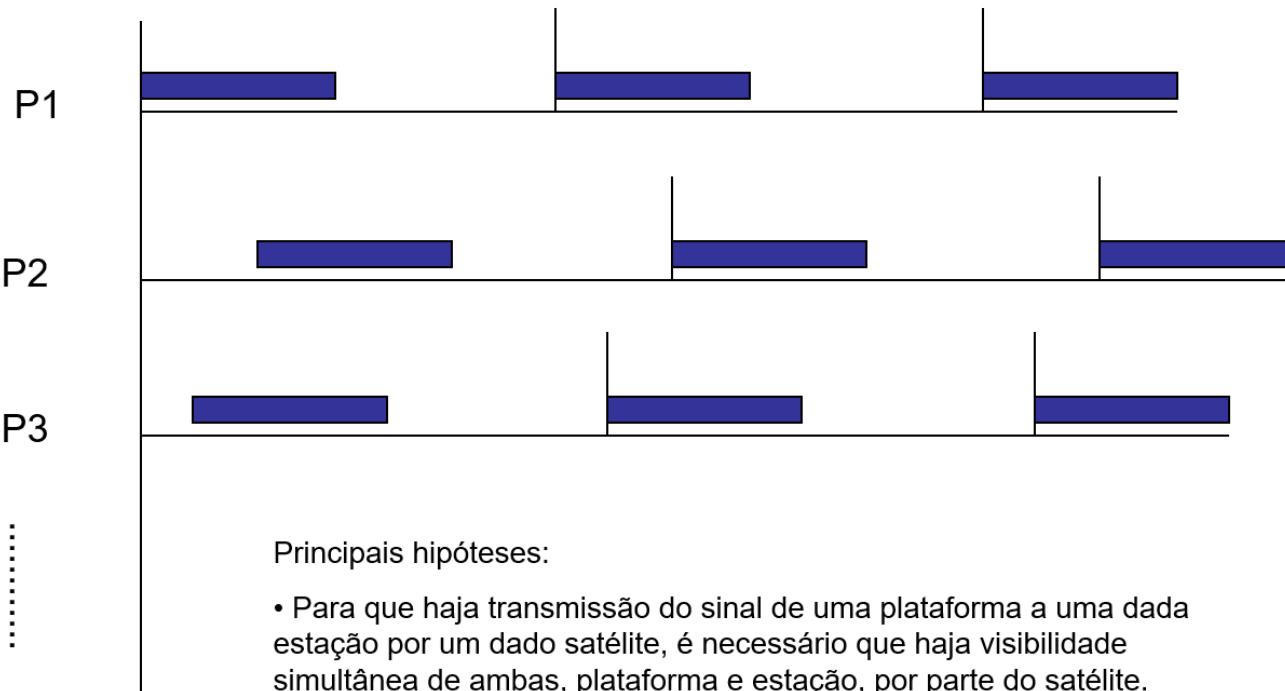
- Sensor ->A/D -> dado digital -> O.E.M.-> TCD
 - O.E.M (401.62 – 401.65 MHz)
 - TCD -> O.E.M -> Estação recepção -> decodificação (PROCOD – Proc. de Coleta de Dados)
 - O.E.M. 2.2 GHz



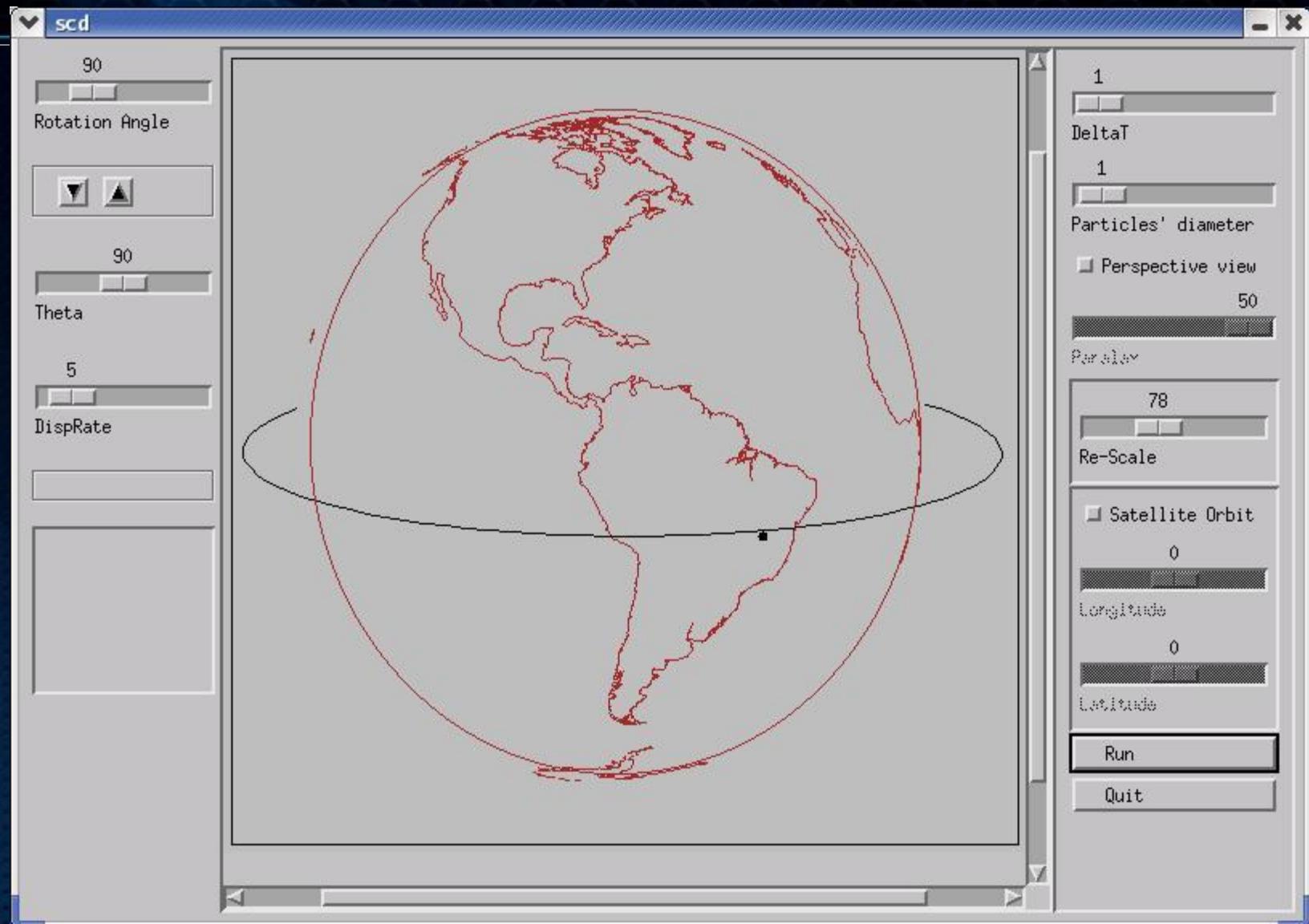
Efeito Doppler

- $w \sim w' (1 + v/c)$
- Valores típicos
 - $v \sim 7 \text{ km/s}$ $c \sim 300.000 \text{ km/s}$
 - $\Delta w \sim 10 \text{ KHz}$

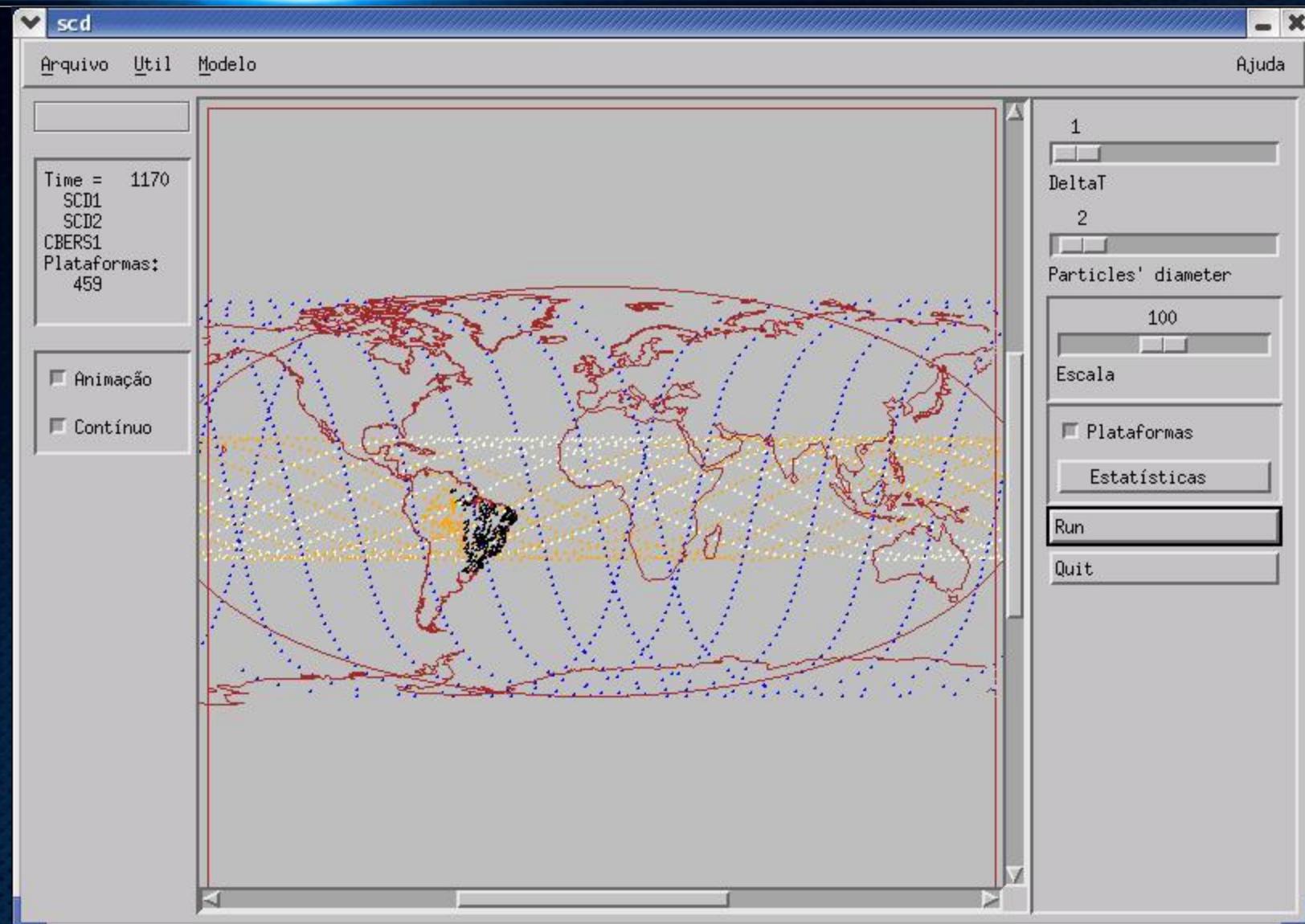
Modelo - Colisão



Simulação (con...



Simulação (con...



Simulação (con)

Plataformas

NPacks SuccPacks Coll_Freq Coll_Chan

Satelites: SCD1 SCD2 CBERS1				
Estações: CUIABA ALCANTARA SANTA_MARIA				
Plat.	numpacks	succpacks	nerr_freq	nerr_tcoll
0	1247	53.81	45,23	0.96
1	1237	63.95	34,36	1.70
2	1247	54.13	45.31	0.56
3	1208	16.72	83,28	0.00
4	889	64.79	33,75	1.46
5	916	64.08	35,15	0.76
6	907	59.21	39,47	1.32
7	933	57.13	40,94	1.93
8	996	46.08	53,31	0.60
9	1018	53.14	46,56	0.29
10	961	32.78	65,97	1.25
11	1036	50.29	49,42	0.29
12	915	35.52	63,83	0.66
13	928	43.43	55,39	1.19
14	1074	55.40	44,04	0.56
15	979	63.13	35,34	1.53
16	979	52.91	46,48	0.61
17	1039	62.85	36,00	1.15
18	1094	52.83	46,07	1.10
19	966	50.52	47,62	1.86
20	1102	53.72	45,74	0.54

Global SCD1 SCD2 CBERS1 Global CUIABA ALCANTARA SANTA_MARIA OK

Simulação (con...



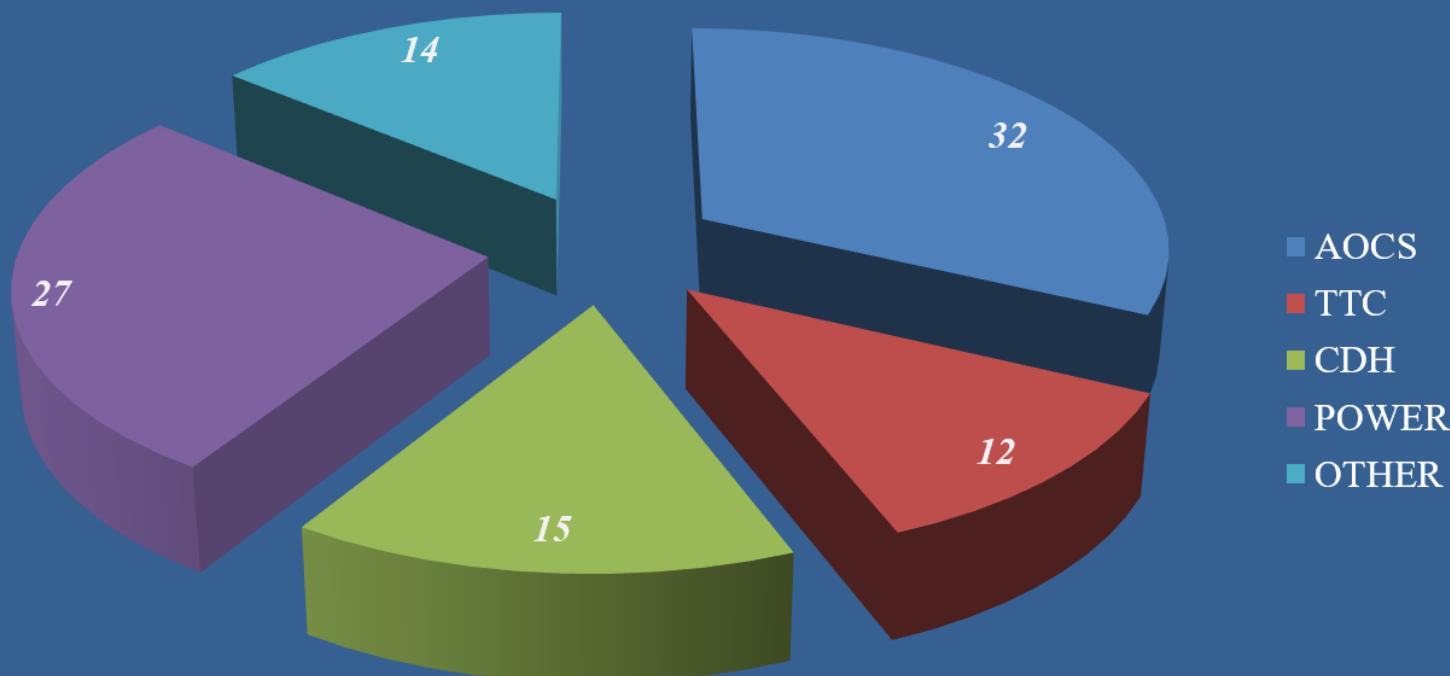
Simulação do Subsistema de Controle de Atitude e Órbita de Satélites

Modelo geral para o subsistema de controle



Adaptado a partir de: H.A. van Ingen Schenau, L.C.J. van Rijn, J. Spaai, NLR-TP-98236, National Aerospace Laboratory NLR, The Netherlands.

CAUSAS DE FALHAS EM ÓRBITA



Tafazoli, M., A study of on-orbit spacecraft failures,
Acta Astronautica 64 (2009) 195–205

DIAGRAMA DE BLOCOS LÓGICO DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE ATITUD E ÓRBITA COM EMULAÇÃO DO COMPUTADOR DE BORDO – EMULAÇÃO DE TODOS OS EQUIPAMENTOS

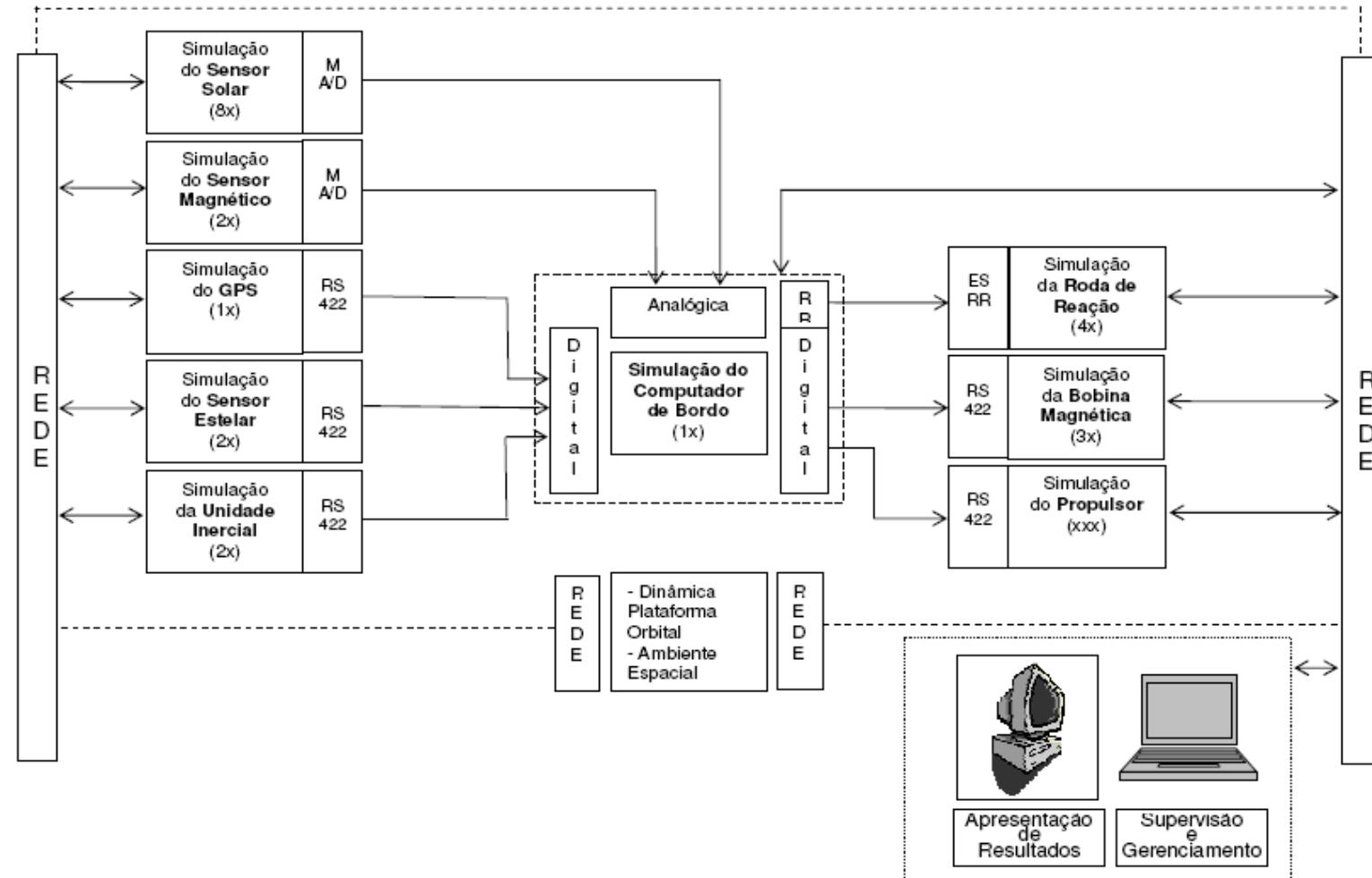


DIAGRAMA DE BLOCOS LÓGICO DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE ATITUD E ÓRBITA COM COMPUTADOR DE BORDO NO LOOP DE SIMULAÇÃO – EMULAÇÃO DE TODOS OS EQUIPAMENTOS COM POSSÍVEL EXCEÇÃO DA UNIDADE INERCIAL

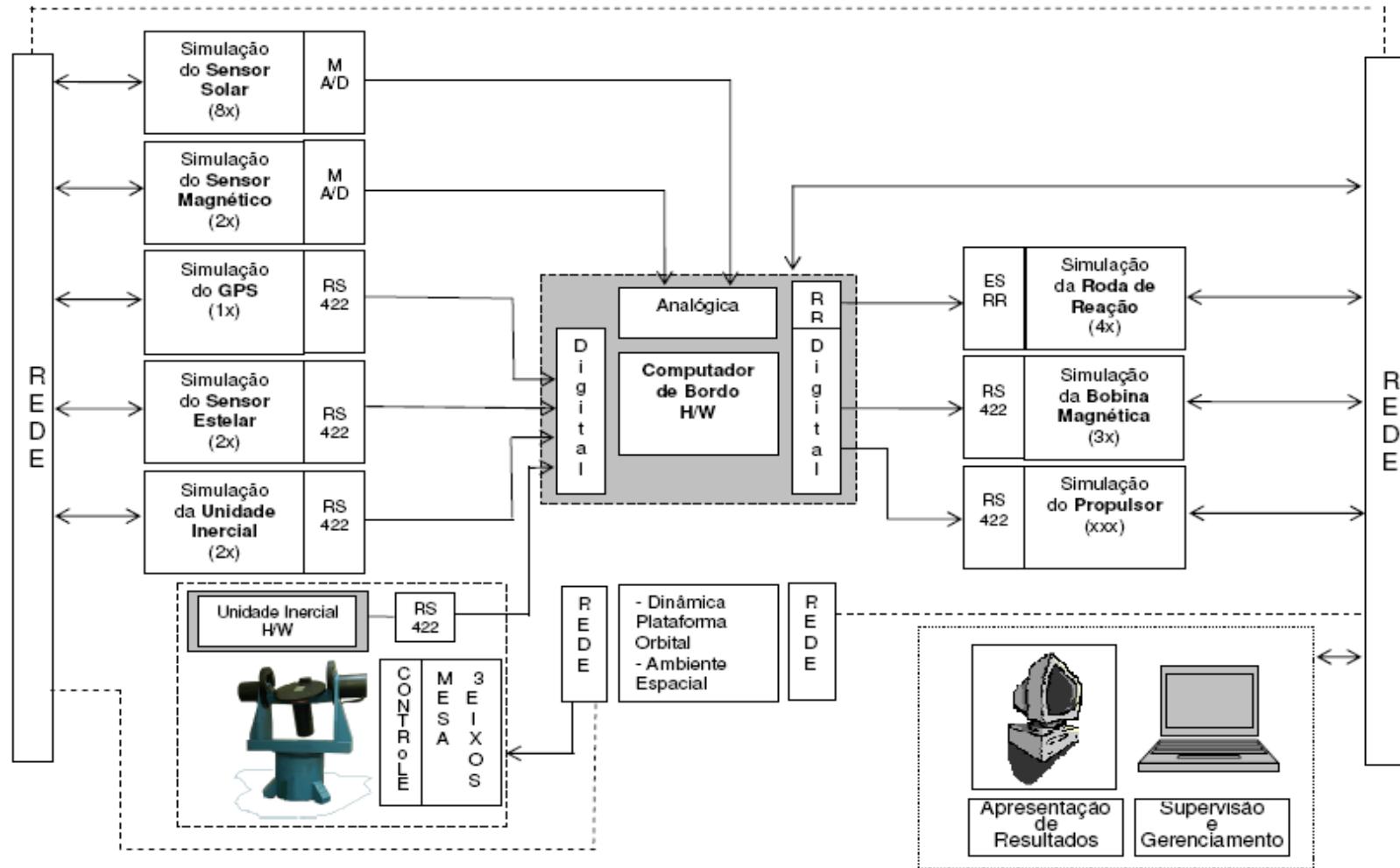


DIAGRAMA DE BLOCOS LÓGICO DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE ATITUD E ÓRBITA COM COMPUTADOR DE BORDO NO LOOP DE SIMULAÇÃO – CONFIGURAÇÃO COM MÁXIMO NÚMERO DE EQUIPAMENTOS NO LOOP DE SIMULAÇÃO

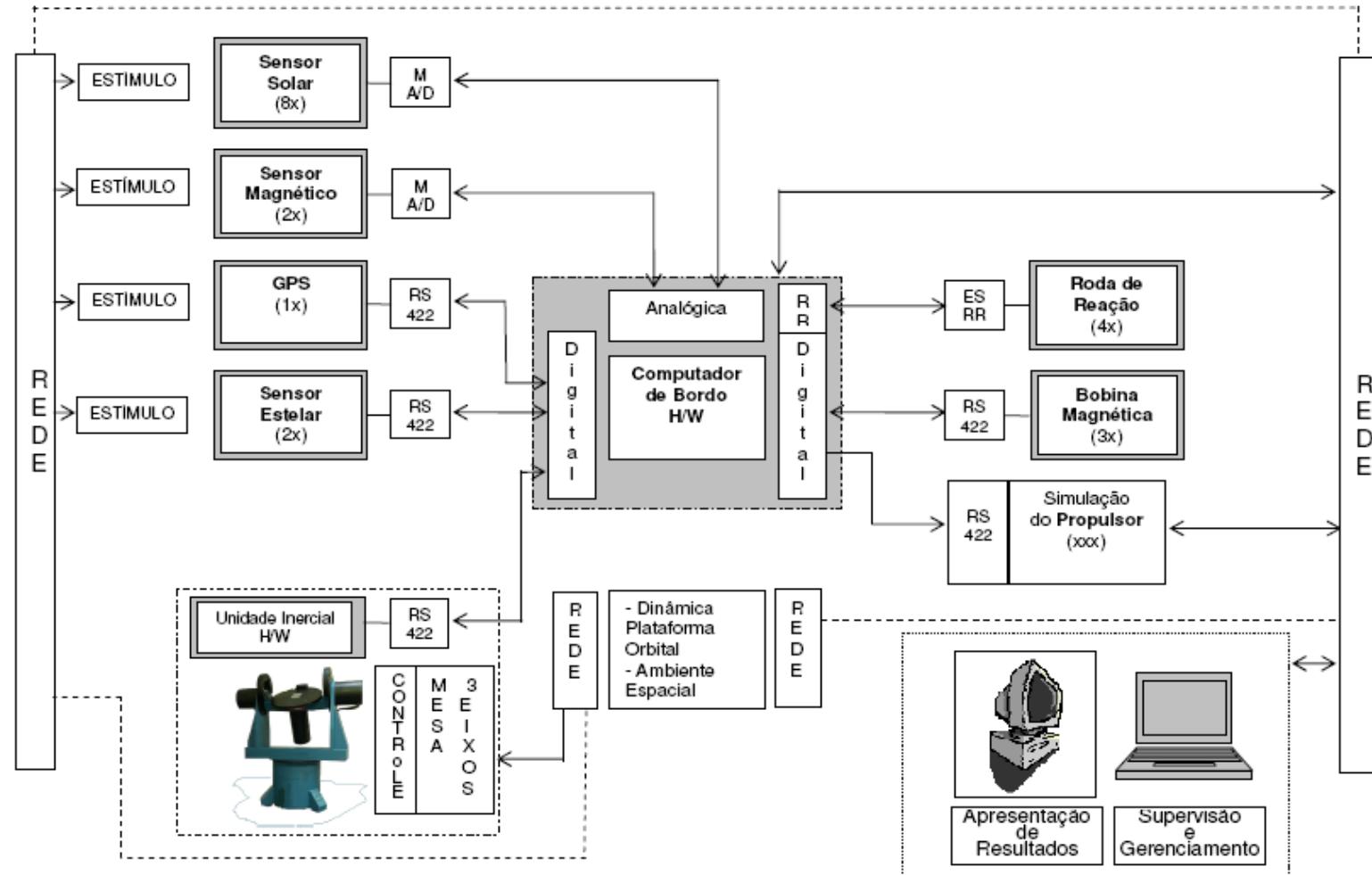
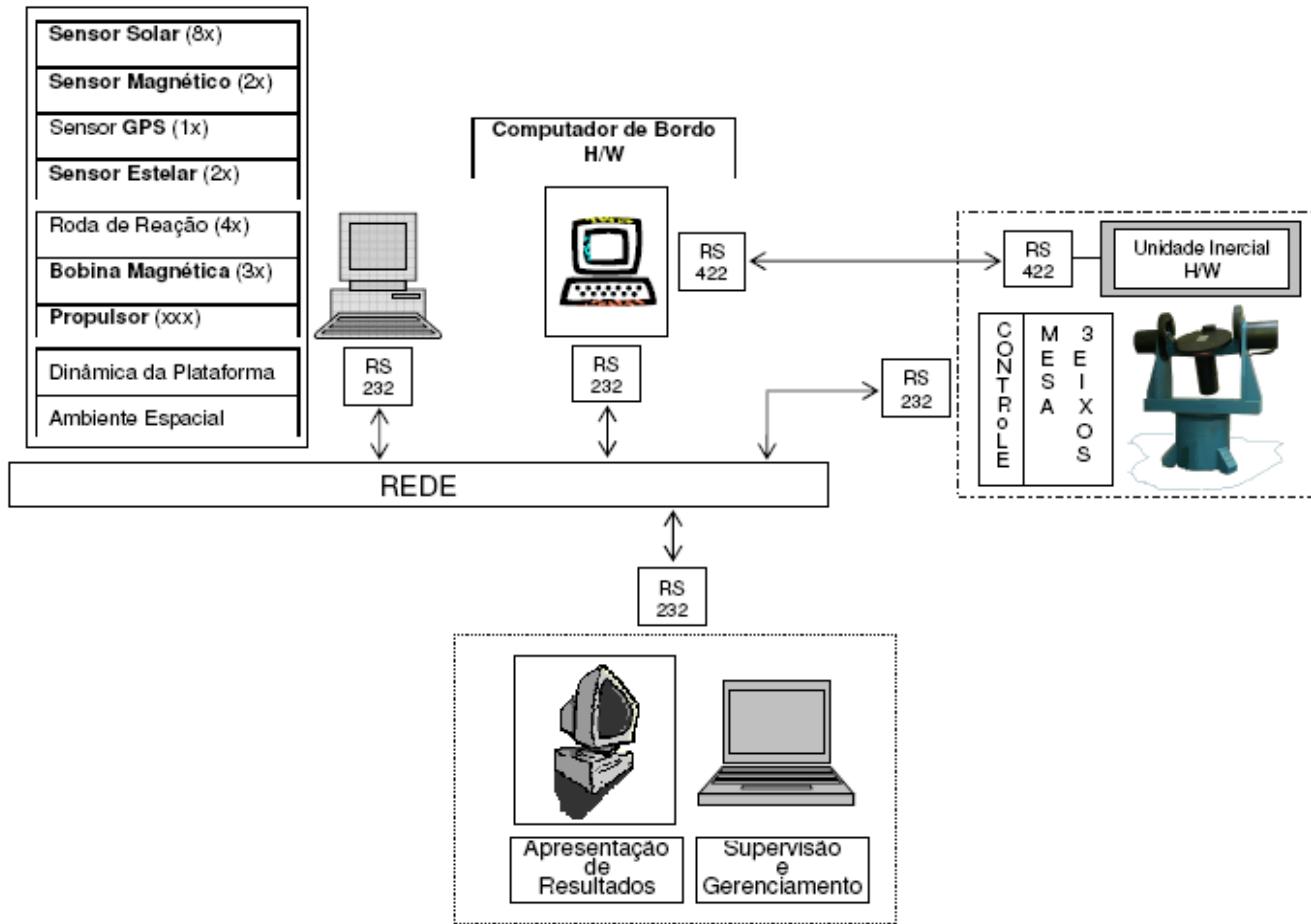
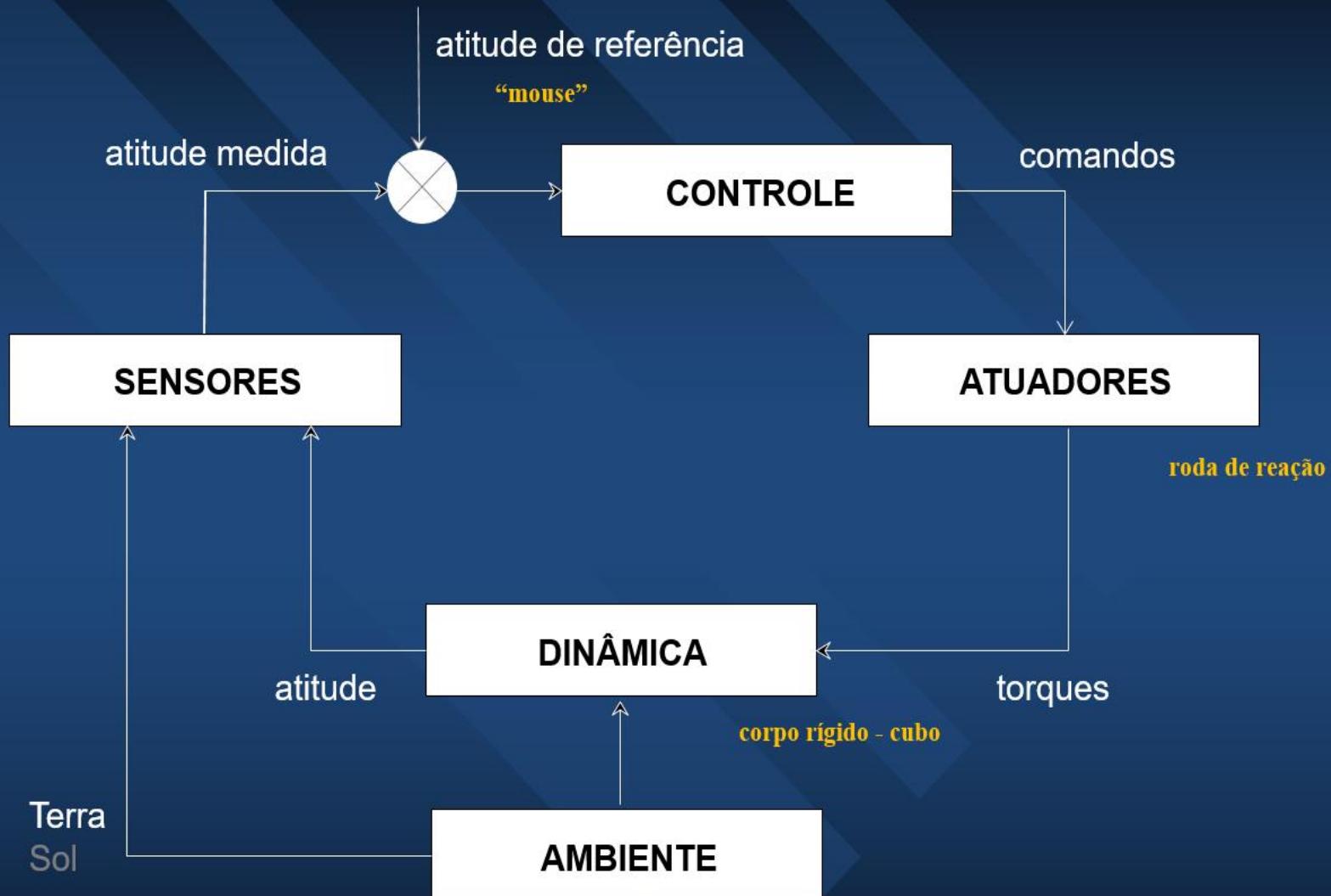


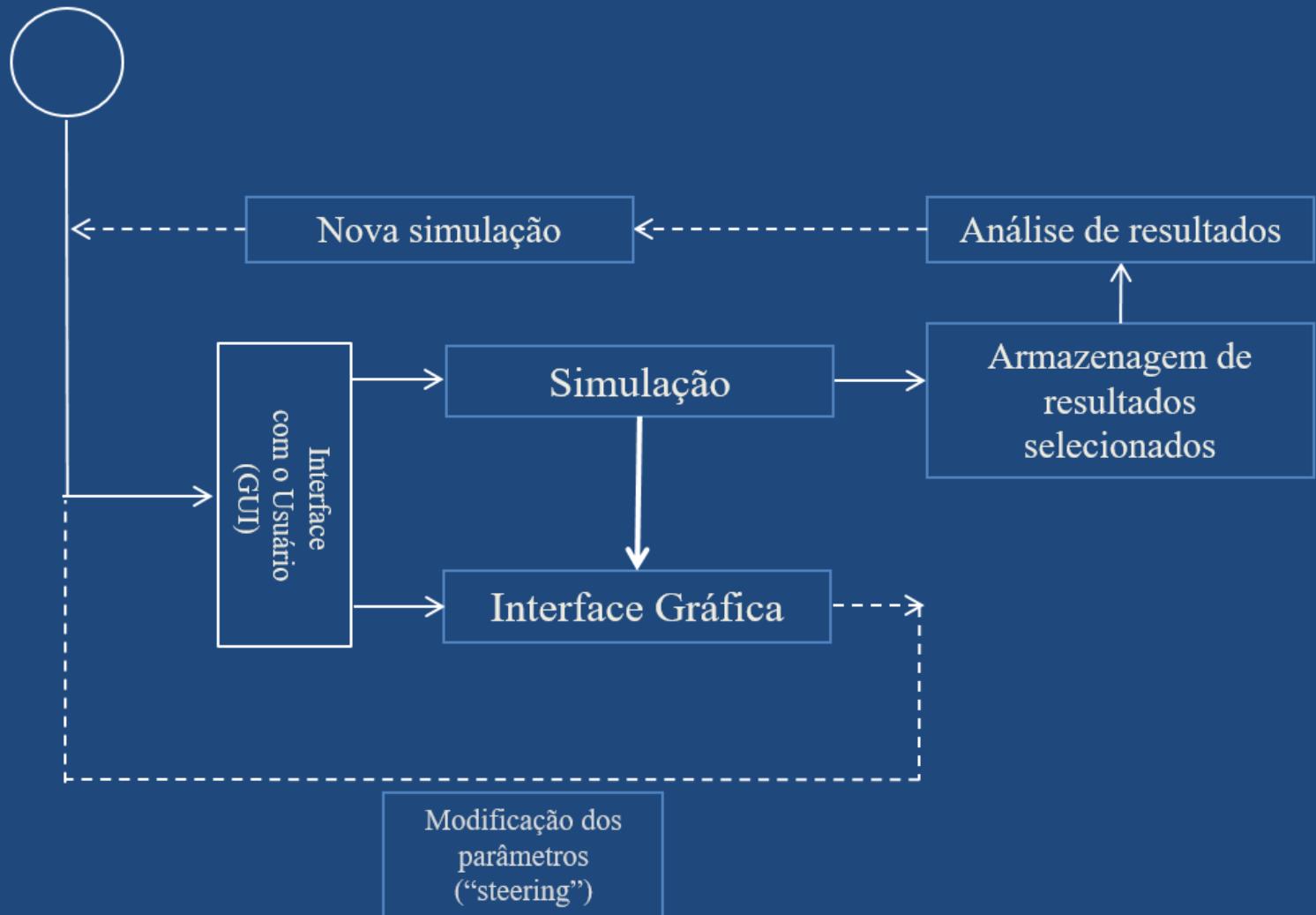
DIAGRAMA DE BLOCOS FÍSICO DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE DE ATITUD E ÓRBITA COM COMPUTADOR DE BORDO E UNIDADE INERCIAL NO LOOP DE SIMULAÇÃO – EMULAÇÃO DOS DEMAIS EQUIPAMENTOS

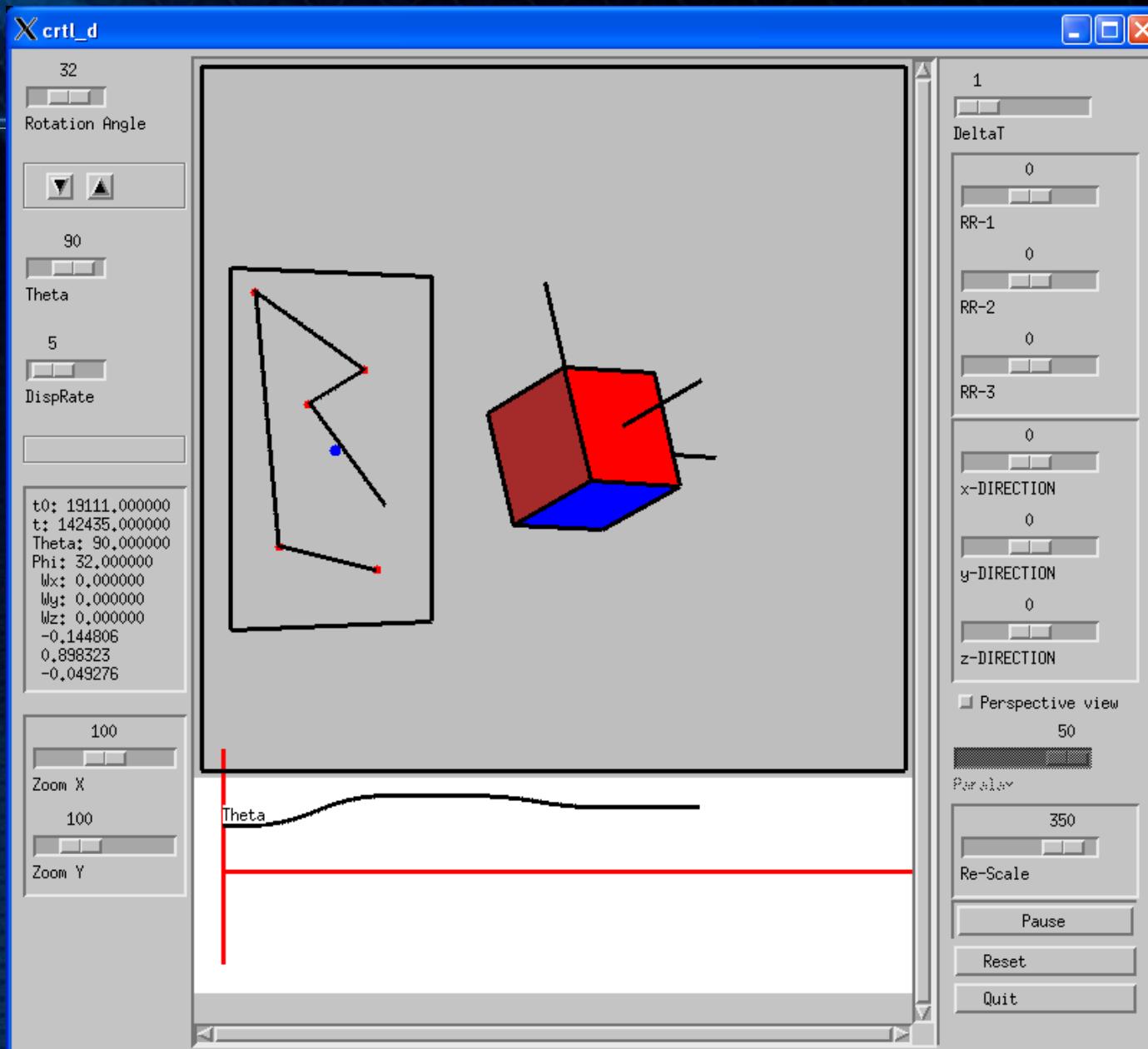


Modelo Implementado



Simulações Interativas





X cctrl_e



32

Rotation Angle

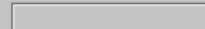


63

Theta

5

DispRate



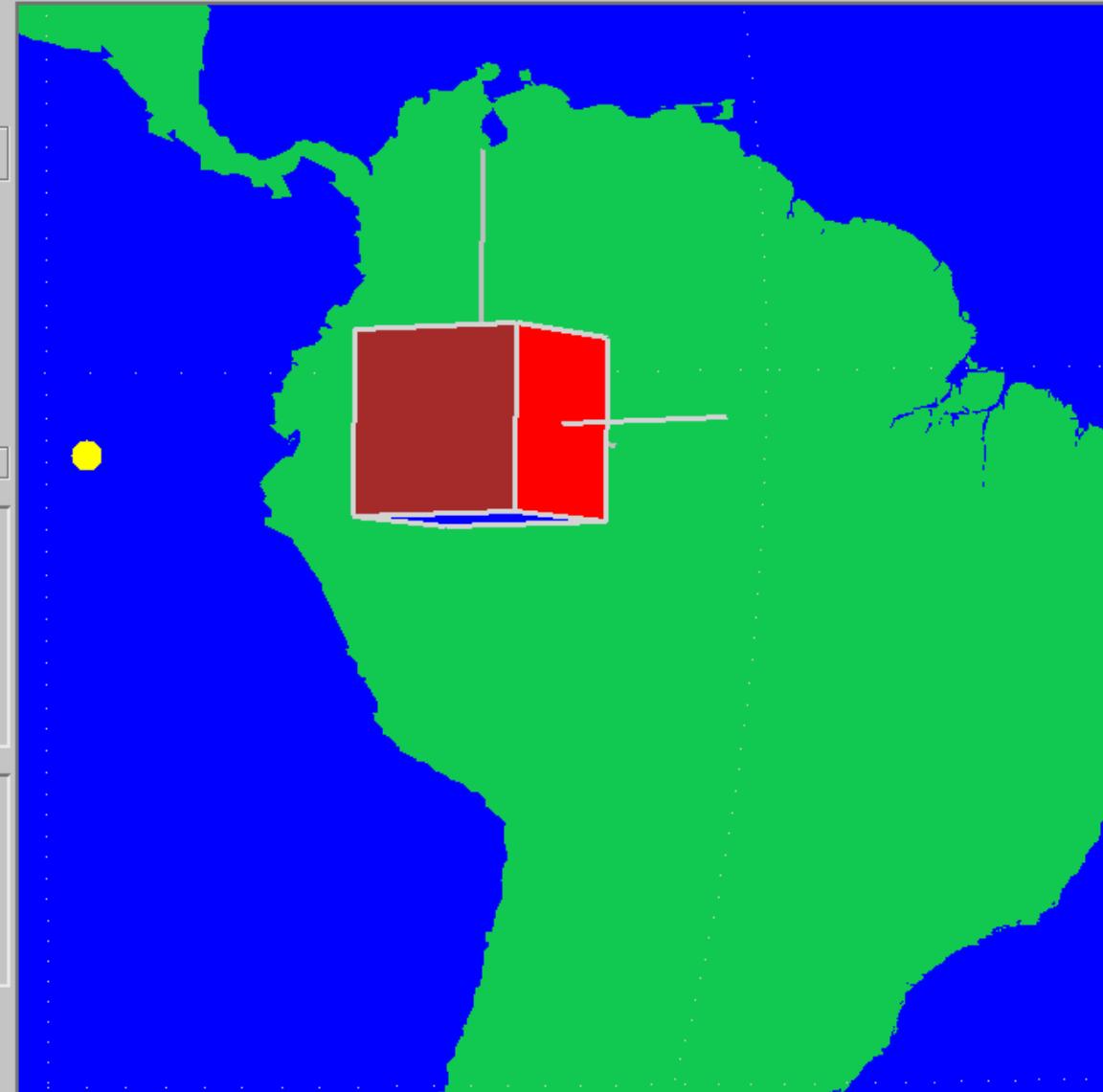
```
t0: 3.000000
t: 28990.000000
Theta: 63.000000
Phi: 32.000000
Wx: 0.000000
Wy: 0.000000
Wz: 0.000000
-0.445014
0.962467
-0.455226
```

14

Zoom X

100

Zoom Y



65

DeltaT

0

RR-1

0

RR-2

0

RR-3

0

x-DIRECTION

0

y-DIRECTION

0

z-DIRECTION

Perspective view

50

Parallel

350

Re-Scale

Run

Reset

Quit

X crtL_e



32

Rotation Angle

63

Theta

5

DispRate

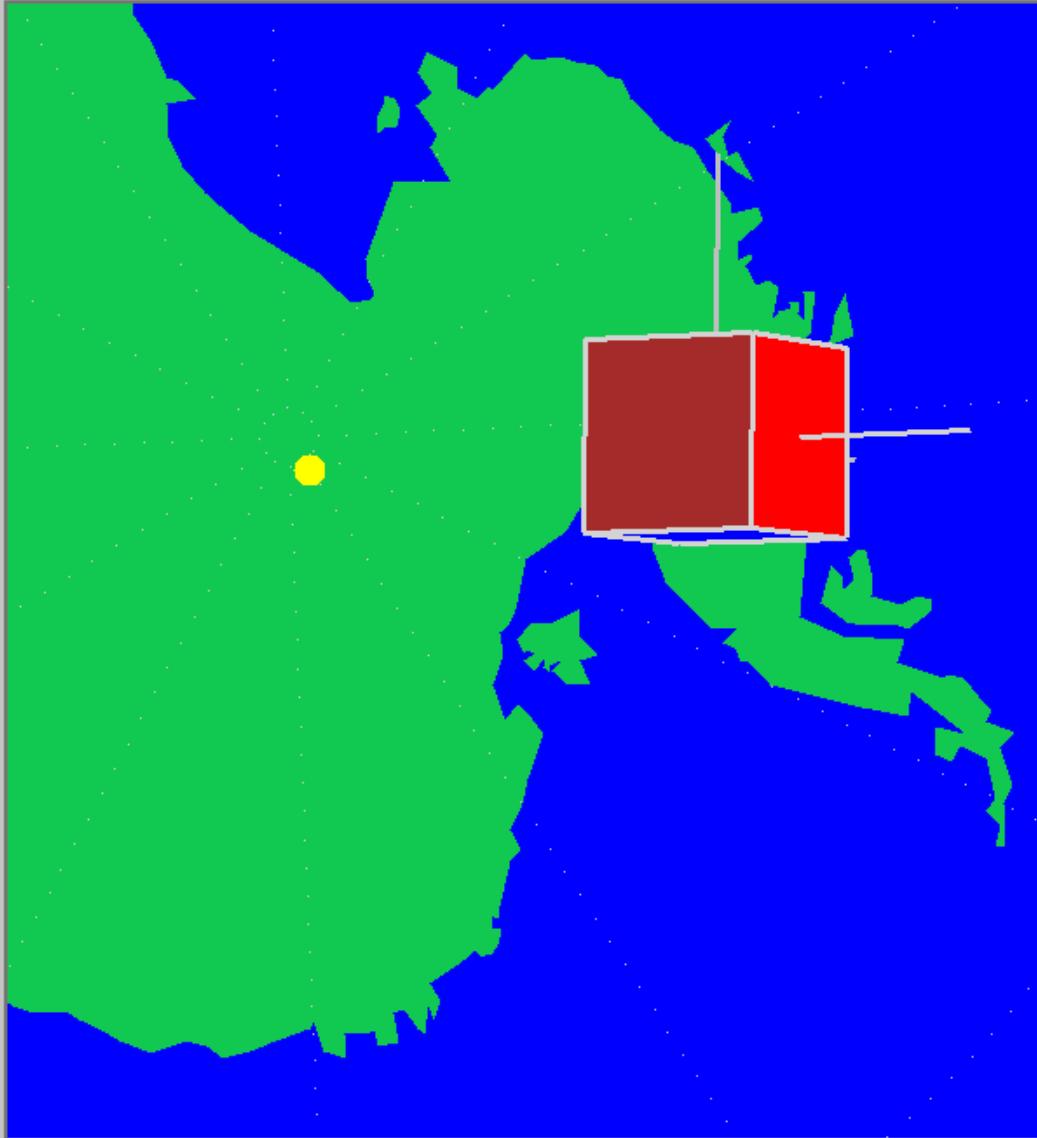
```
t0: 3.000000
t: 25970.000000
Theta: 63.000000
Phi: 32.000000
Wx: 0.000000
Wy: 0.000000
Wz: 0.000000
-0.444592
0.962624
-0.454439
```

17

Zoom X

100

Zoom Y



65

DeltaT

0

RR-1

0

RR-2

0

RR-3

0

x-DIRECTION

0

y-DIRECTION

0

z-DIRECTION

Perspective view

50

Parallel

350

Re-Scale

Run

Reset

Quit

X ctrl_d



32

Rotation Angle

90

Theta

5

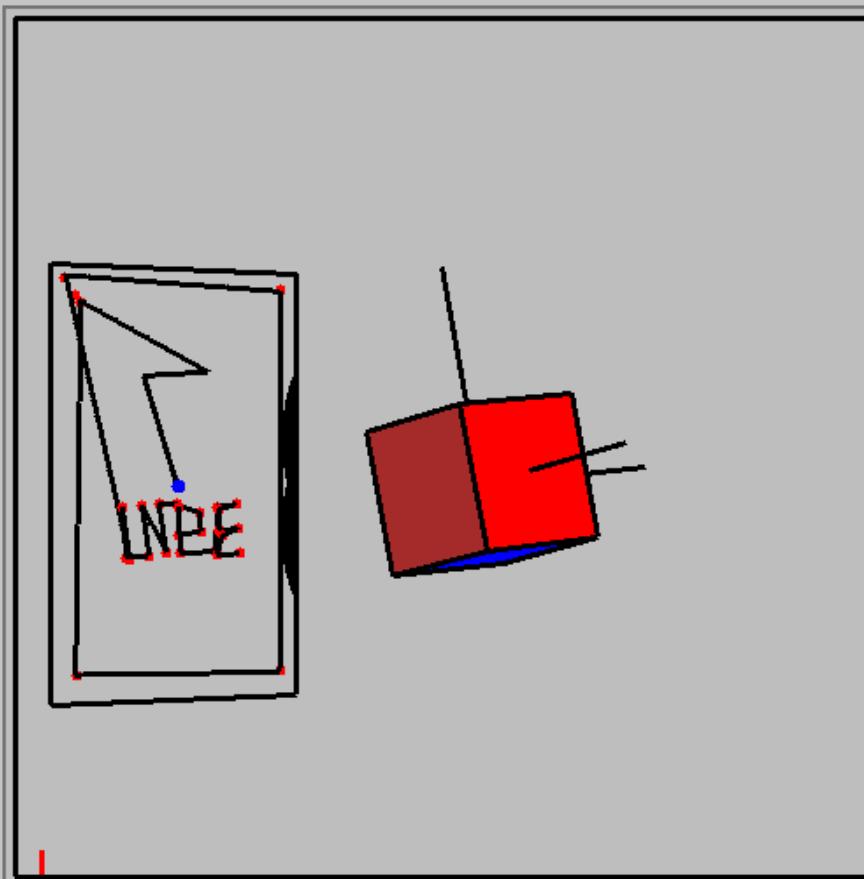
DispRate

```
t0: 19111.000000
t: 114685.000000
Theta: 90.000000
Phi: 32.000000
Wx: 0.000000
Wy: 0.000000
Wz: 0.000000
0.022935
0.937128
0.080301
```

100

Zoom X

100

Zoom Y

Theta



1

DeltaT
RR-1
RR-2
RR-3
x-DIRECTION
y-DIRECTION
z-DIRECTION Perspective view

50

Parallel

350

Re-Scale

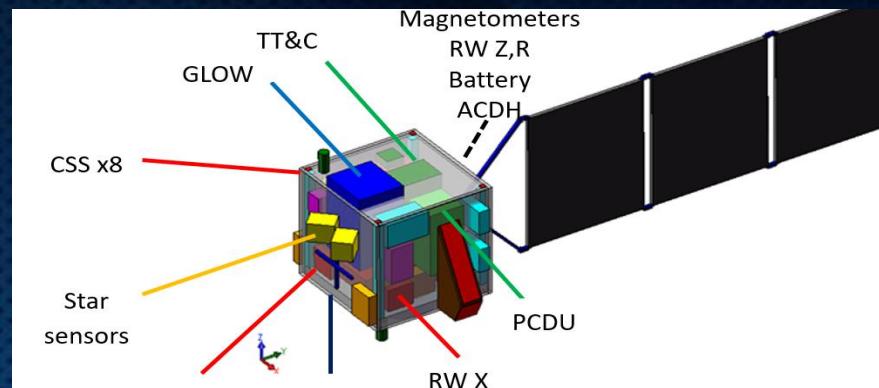
Pause

Reset

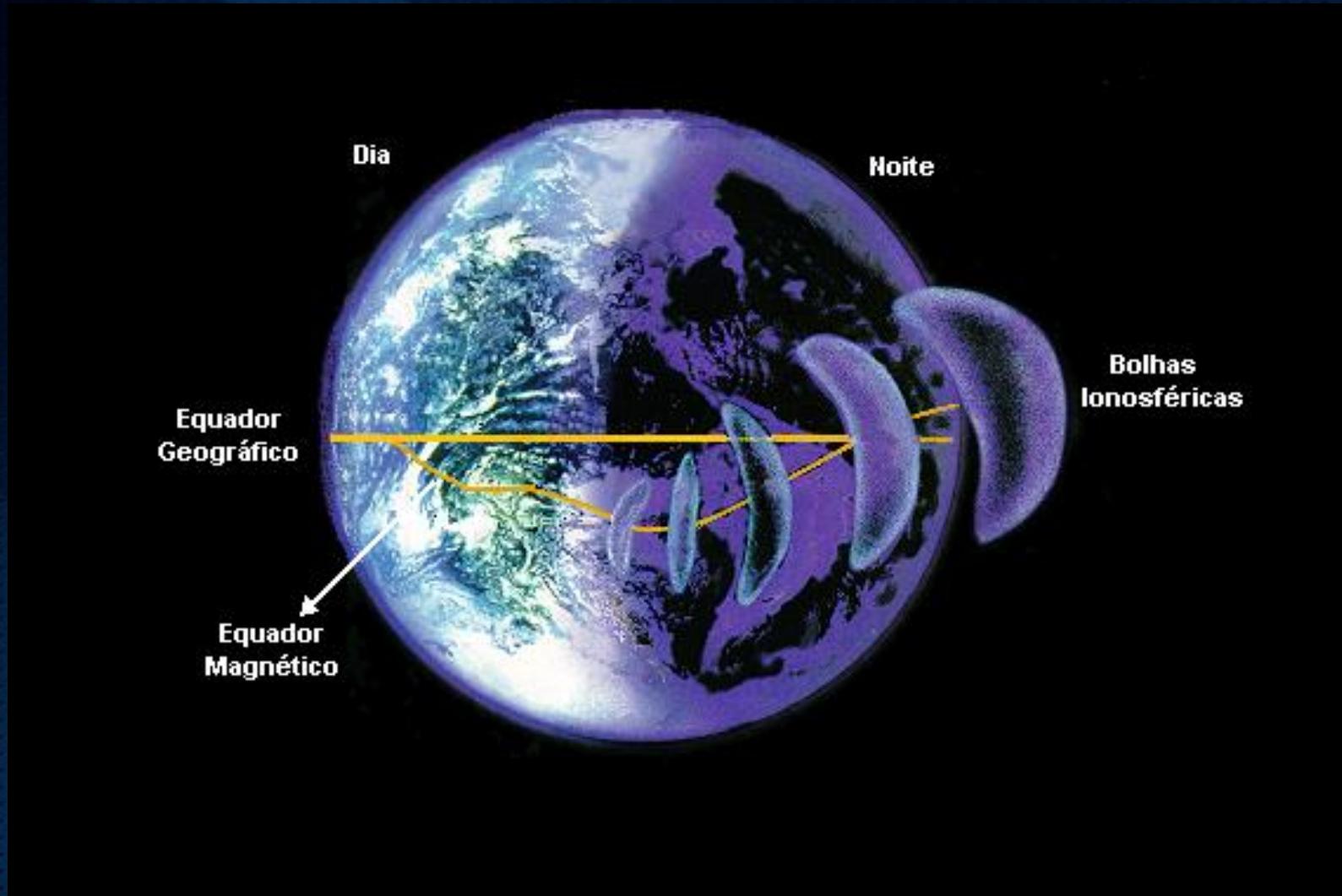
Quit

Missão EQUARS 2017

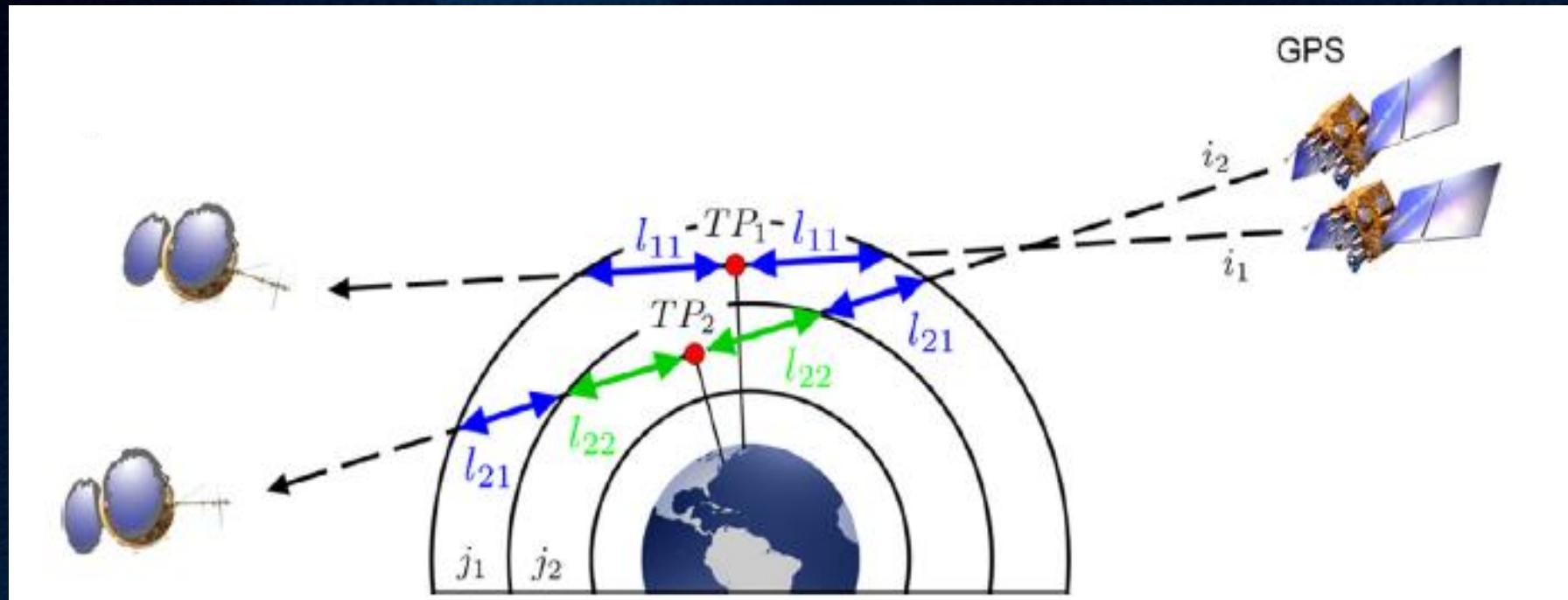
Promover o avanço do conhecimento dos efeitos de acoplamento dos fenômenos atmosféricos equatoriais, entre as regiões da baixa e alta atmosfera, sobre o balanço fotoquímico e energético da atmosfera, a dinâmica da atmosfera neutra e a eletrodinâmica do plasma ionosférico.



Bolhas ionosféricas

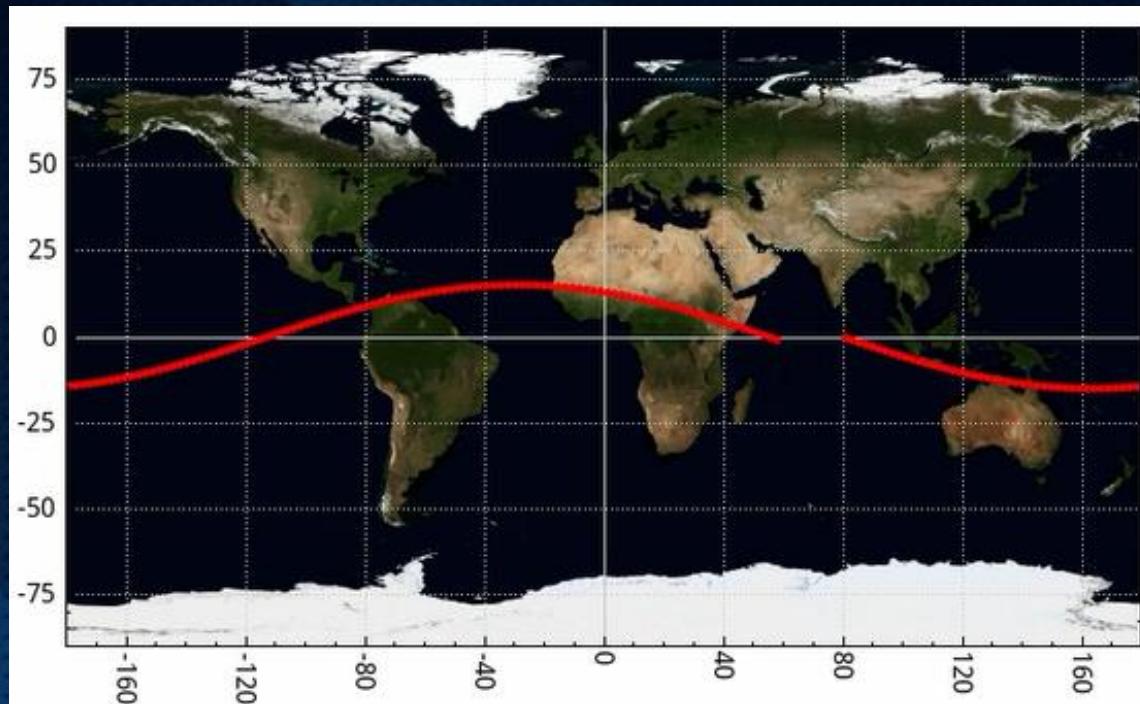


Refração Sinal GPS Irregularidades Ionosféricas



Órbita

Nominal Orbit: 635 km, 15° inclination



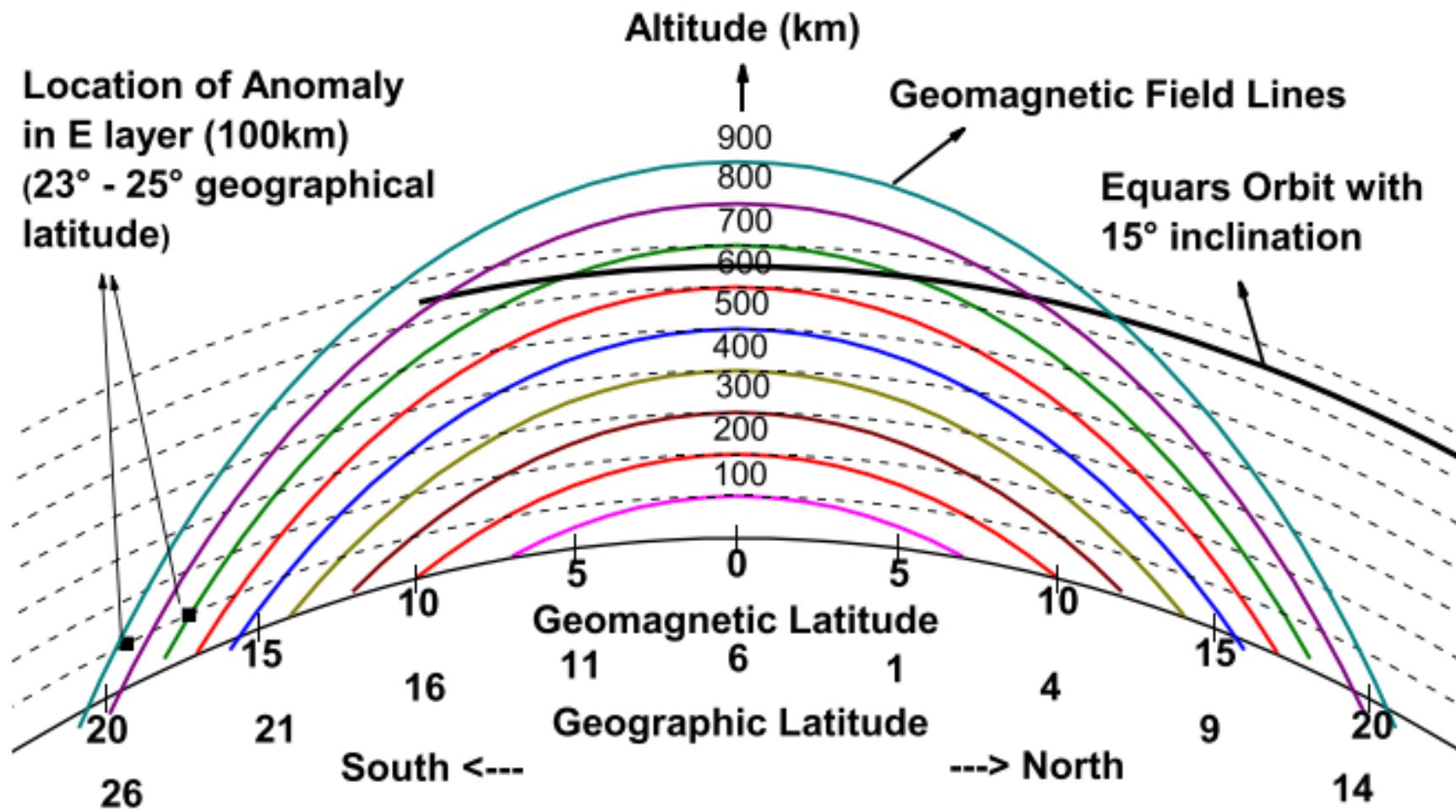
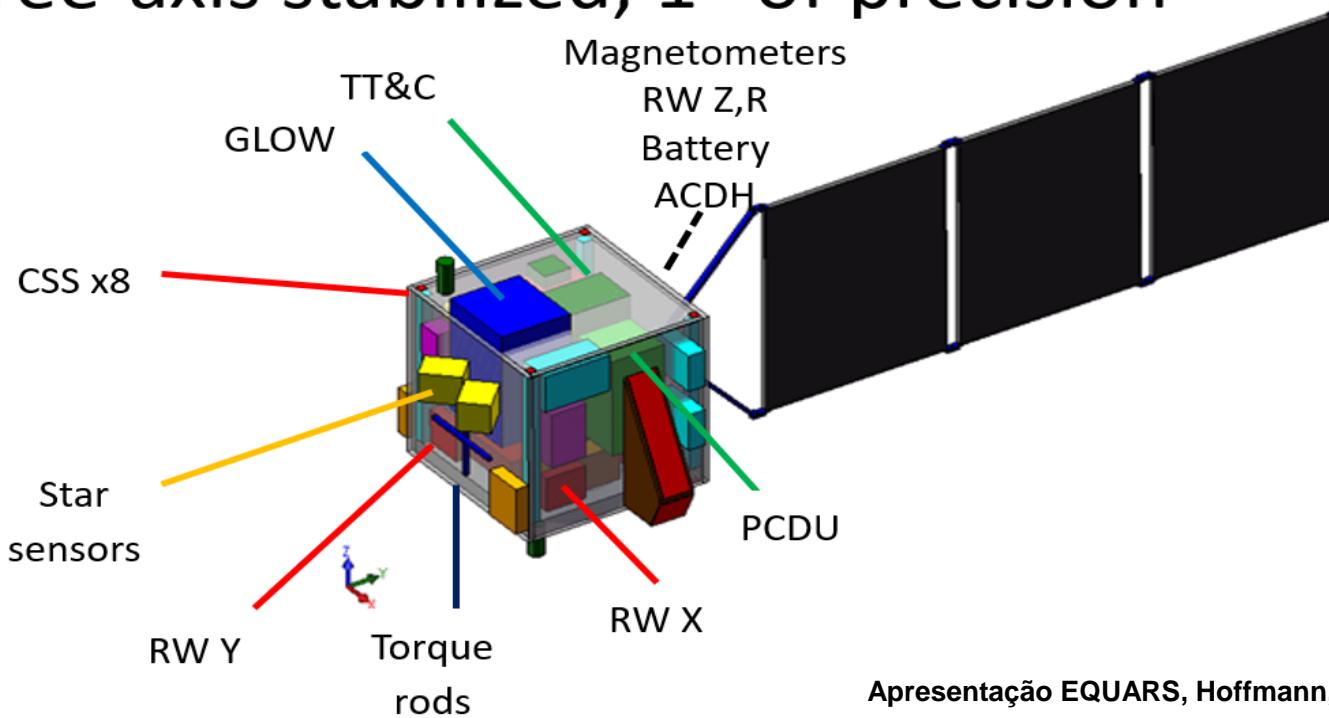


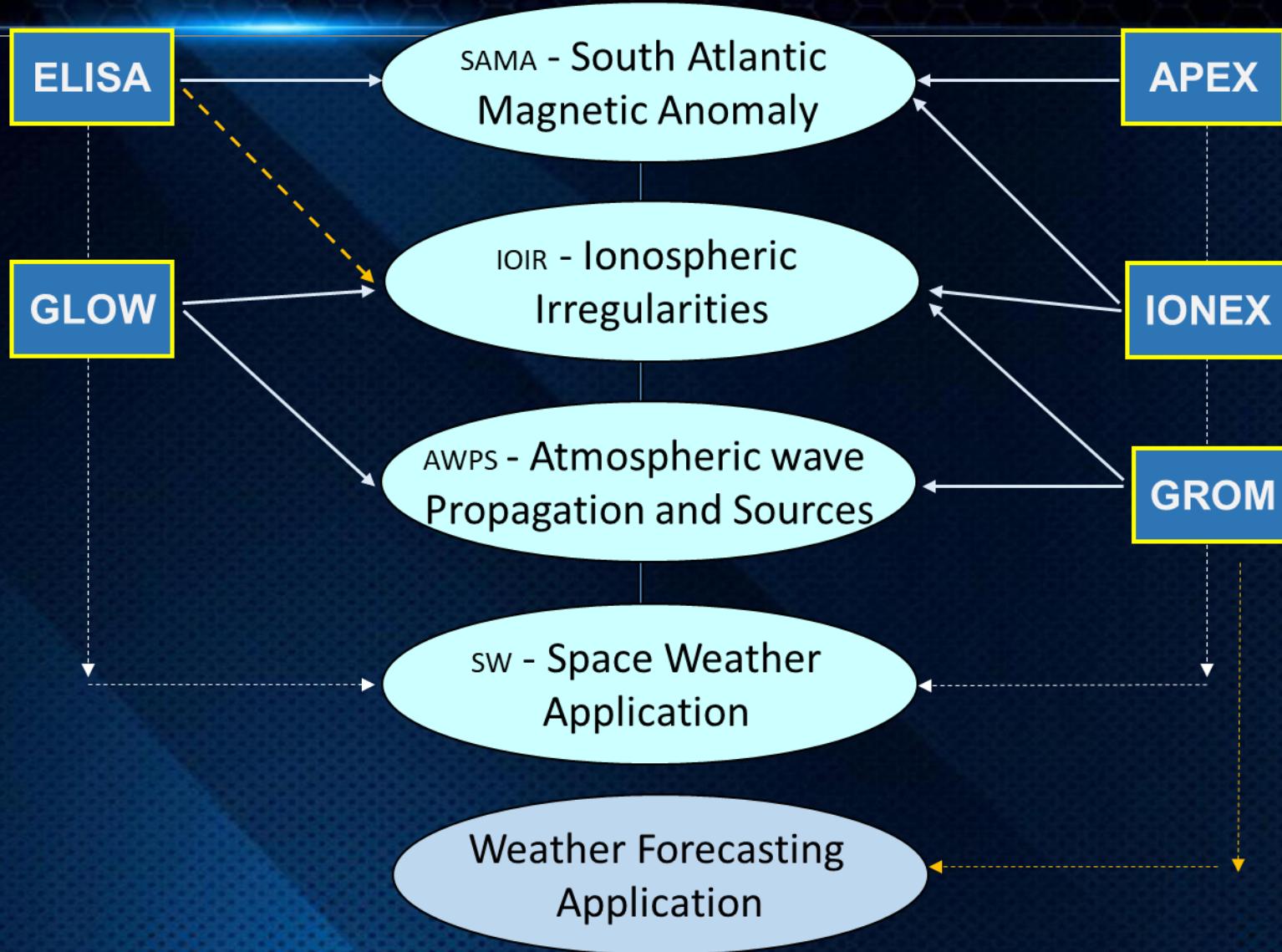
Fig. 1. Schematics of the EQUARS orbit intercepting the geomagnetic field lines that guide electrons down to the SAMA. Field lines are drawn using the dipole approximation.

Space Segment

- Total mass = 120kg (PL = 34,5 kg)
- Power consumption = 180 W
- Three-axis stabilized, 1° of precision



Apresentação EQUARS, Hoffmann, L.T., CEA-INPE, 2017.



Data flow from satellite to end users

