



Ciclo de Palestras Sobre Controle Térmico de Satélites

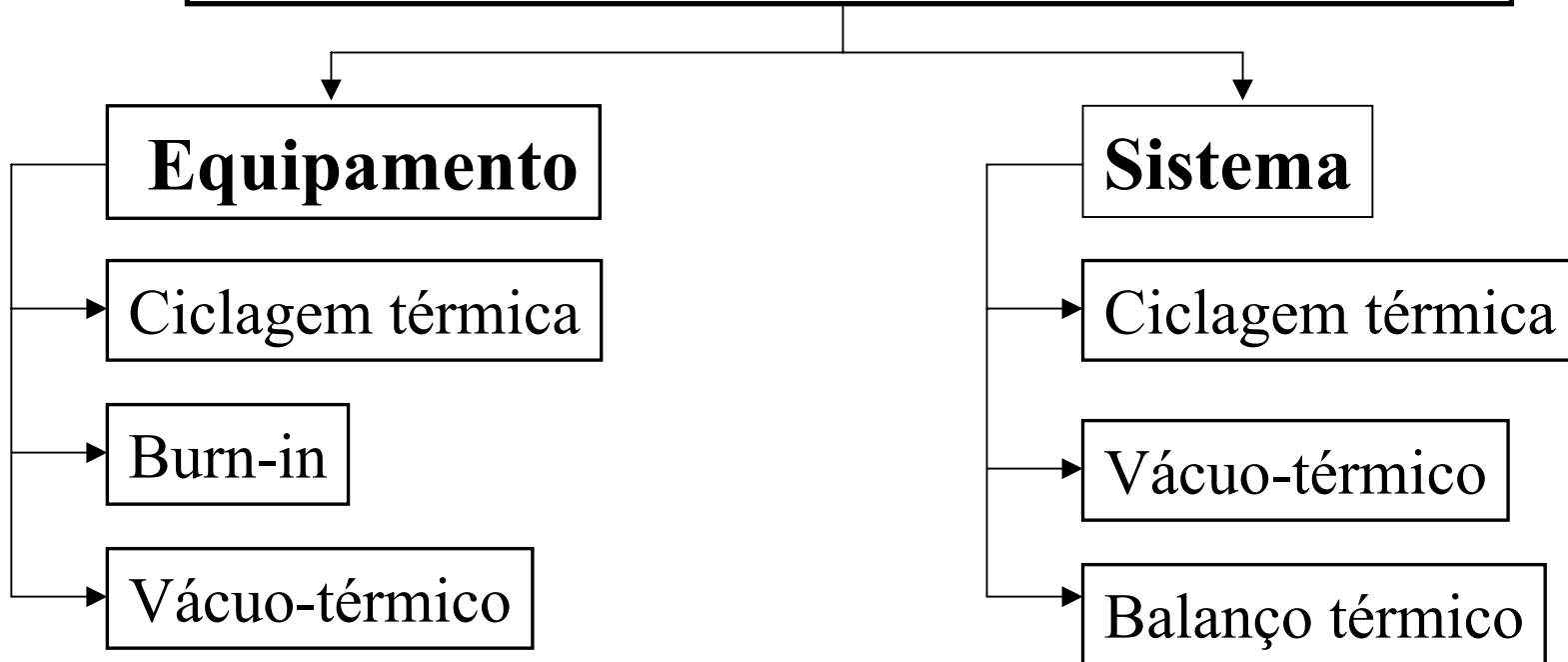
Testes Térmicos

Dr. Fabiano Luis de Sousa

Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

→ **Testes térmicos são realizados** em equipamentos e no satélite integrado de forma a **verificar seu comportamento em condições extremas de temperatura** e **identificar possíveis falhas** ocasionadas por processos de fabricação ou montagem. Eles são também utilizados para **ajustar/verificar o modelo matemático** do satélite integrado.

Principais Tipos de Teste Térmicos



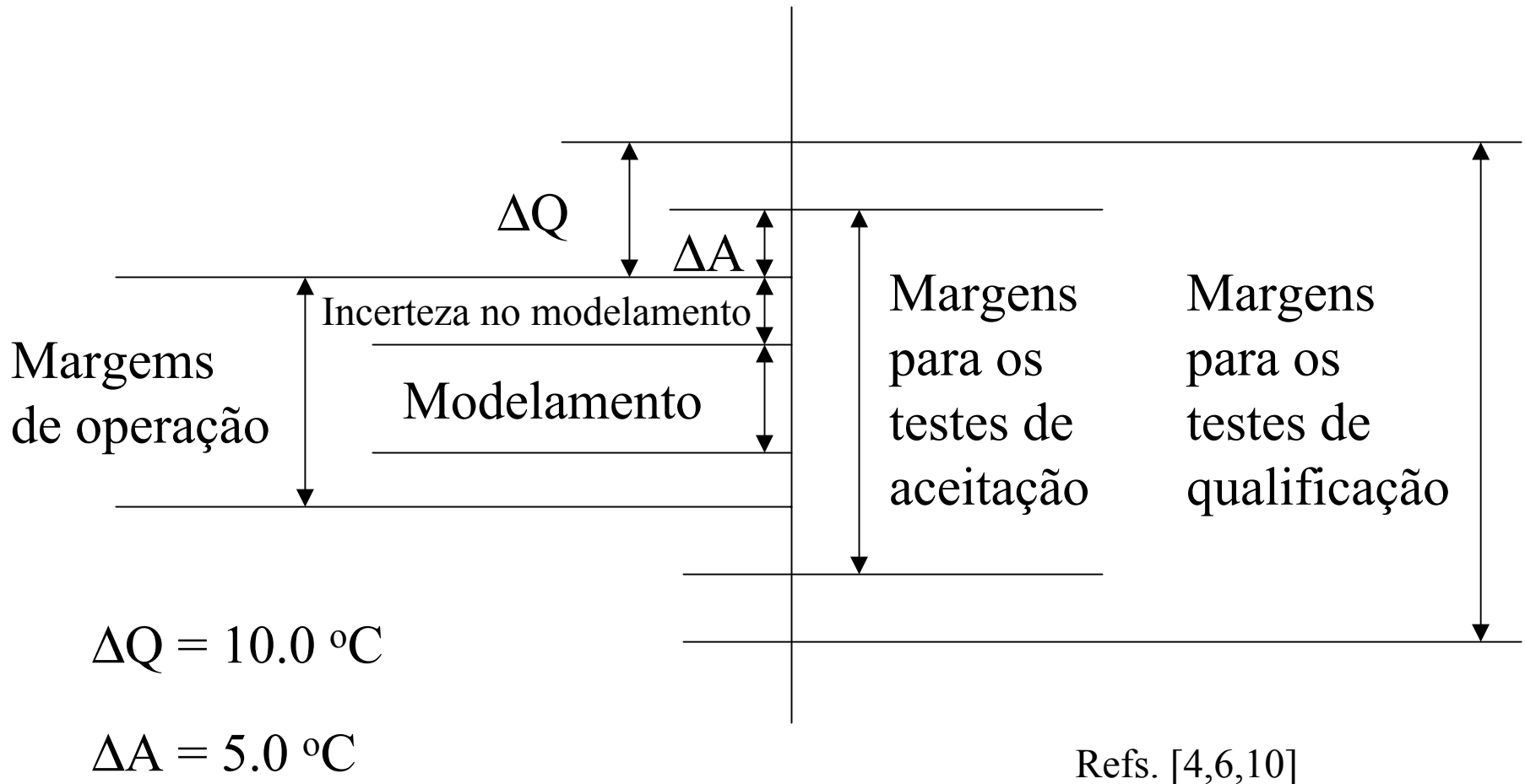
- ⇒ Ciclagem térmica: No teste de ciclagem térmica o equipamento ou sistema é levado à **extremos de temperatura por vários ciclos** e **verificada a performance** do mesmo em alguns patamares extremos e ao final do teste.
- ⇒ Burn-in: Neste teste o **equipamento é “ciclado” por um longo período** de forma a **precipitar a ocorrência de falhas**. É visto como uma extensão do teste de ciclagem térmica.
- ⇒ Termo-vácuo: Neste teste o equipamento ou sistema é **ciclado nos mesmos patamares da ciclagem térmica**, mas em um ambiente de vácuo e com **menos ciclos**.
- ⇒ Balanço térmico: Neste teste o **projeto térmico é verificado** e o **modelo matemático** do sistema integrado é **validado/corrigido**.

Níveis de Teste

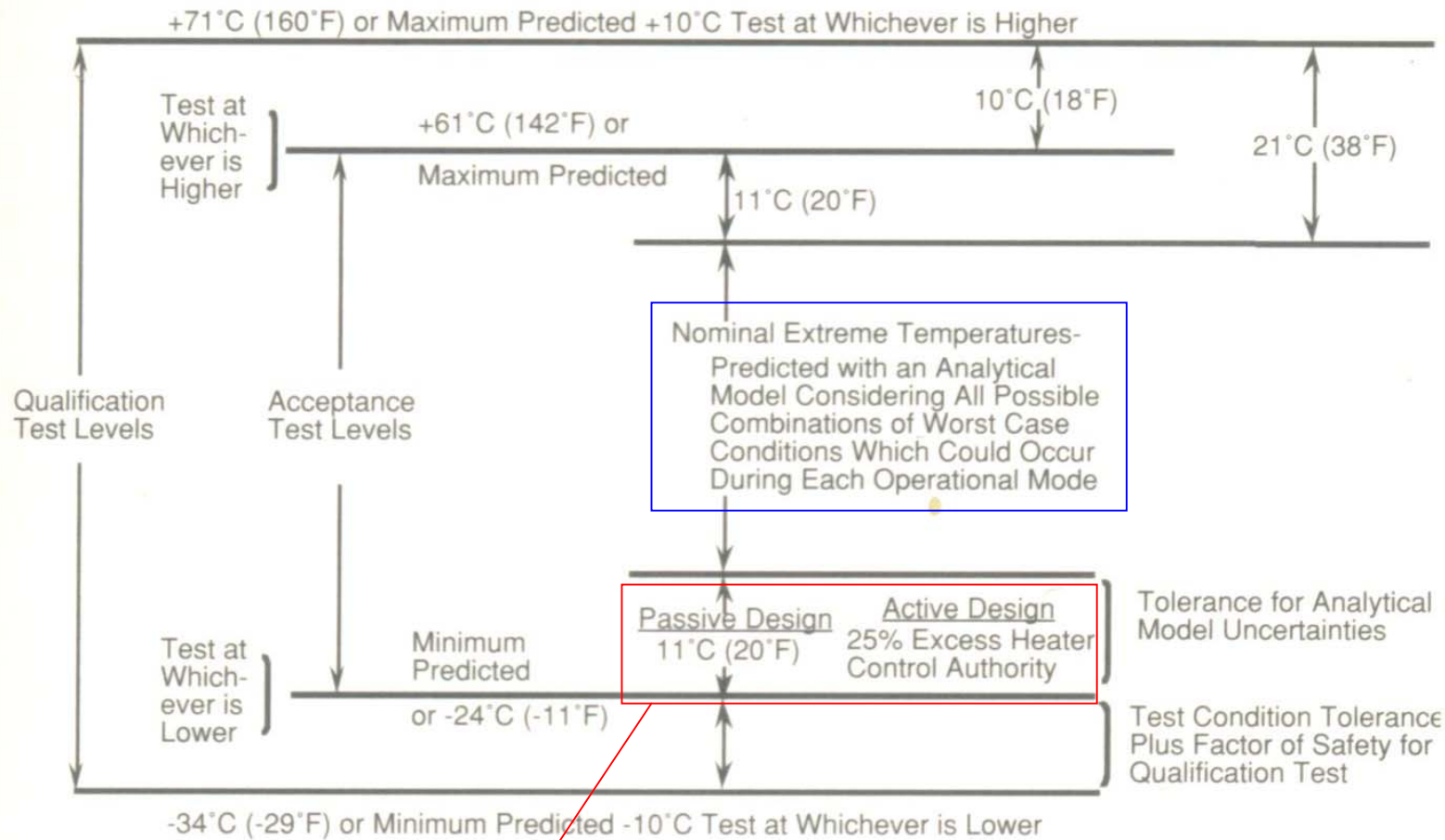
Qualificação: Têm por objetivo **verificar se o equipamento/sistema opera sem perda de performance em condições extremas de temperatura**, não esperadas de ocorrerem em órbita. São realizados normalmente somente nos modelos de qualificação/desenvolvimento do componente/sistema.

Aceitação: O equipamento/sistema é levado à extremos de temperatura ligeiramente superiores aos previstos de serem encontrados em órbita. Têm por **objetivo identificar eventuais problemas ocasionados por falhas na fabricação/montagem ou de material**. É realizado nos modelos de vôo do componente/sistema.

Definição das Margens de Temperatura Para Realização dos Testes Térmicos de Aceitação e Qualificação



Margens de temperatura para equipamentos - norma MIL-STD-1540B



Ref. [10]

$\pm 11^{\circ}\text{C}$ é uma margem de incerteza decorrente de comparações extensivas entre previsões de temperatura por modelos e dados de voo.

Uma margem de $\pm 5.5^{\circ}\text{C}$ pode ser usada se os modelos forem validados por um TBT.

Parâmetros de Teste Para Equipamentos, segundo a Norma MIL-STD-1540B

Thermal Cycling Test Parameters	Qualification - Para. 6.4.3	Acceptance - Para. 7.3.3
Temperature Range (differential)	105-deg C	85-deg C minimum
Temperature Extremes	Minimum predicted with -10-deg C environmental design margin, to maximum predicted with +10-deg C environmental design margin, or at least -34-deg C to +71-deg C	Minimum predicted to maximum predicted, or at least -24-deg C to +61-deg C
Number of Cycles	3X acceptance (24 cycles minimum)	8 cycles minimum
Dwell	1-hour minimum at temperature extremes (each cycle)	1-hour minimum at temperature extremes (each cycle)

Margens (± 10 °C para qualificação e ± 5 °C para aceitação) a partir das previstas ou range mais severo

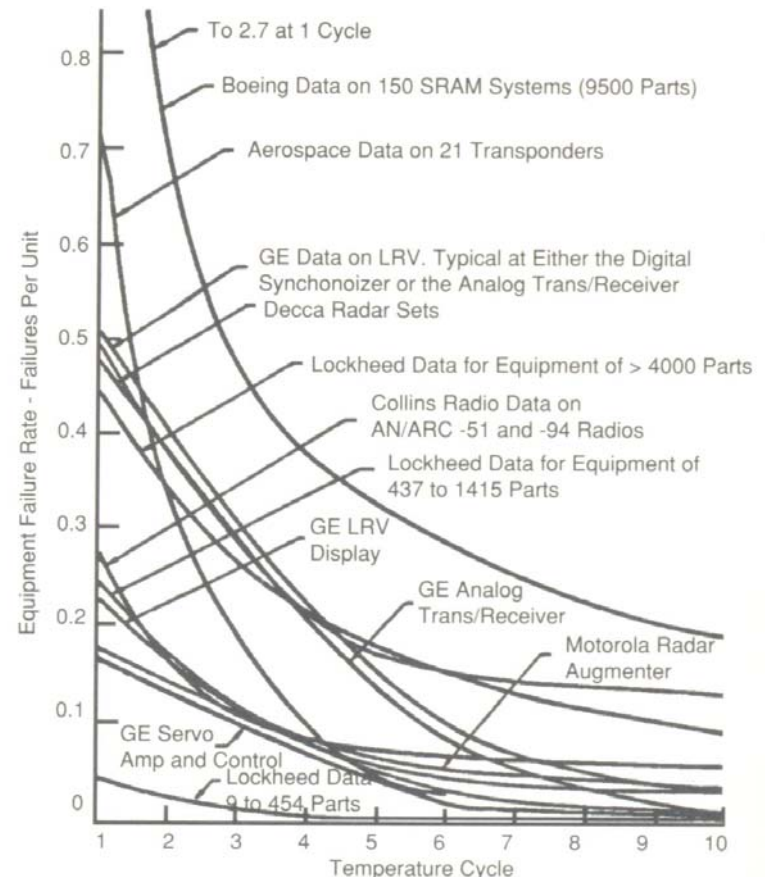
Mínimo de 24 ciclos para qualificação e oito ciclos para aceitação

Tempo mínimo de 1h em cada patamar de temperatura. Estabilização é considerada quando temperatura, antes do patamar varia ± 3 °C/h.

Ref. [10]

- Testes funcionais são realizados nos patamares quente e frio no primeiro e último ciclo e depois do equipamento ter retornado à temperatura ambiente.

- Testes funcionais adicionais podem ser realizados nos patamares intermediários.
- Falhas que podem ser detectadas durante um TCT incluem: soldas defeituosas, conexões crimpadas “frouxas”, problemas de drifting, conexões de fios quebradas, pinos de conectores defeituosos, componentes danificados e problemas gerados por coeficientes de expansão térmica não compatíveis.
- Os cinco parâmetros que mais influenciam na detecção de falhas em um TCT são: **i)** o número de ciclos; **ii)** os níveis de temperatura; **iii)** a taxa de mudança de temperatura entre os patamares (mínimo de 1°C/min); **iv)** o perfil operação/não operação do equipamento (incluindo partidas a frio e a quente) e **v)** o tempo de permanência nos extremos de temperatura (deve ser suficiente para que o equipamento atinja equilíbrio térmico internamente).



- No teste de Burn-in procura-se “stressar” o equipamento por mais ciclos.
- O teste é realizado por um tempo total de, no mínimo, 300 horas.
- Em alguns casos pode ser conduzido apenas no patamar superior de temperatura (condição ideal para se detectar problemas de “drifting”).

Burn-In Test Parameters	Qualification	Acceptance - Para. 7.3.9
Temperature Range (differential)	No	85-deg C
Temperature Extremes	qual.	Minimum predicted to maximum predicted or at least -24-deg C to +61-deg C
Number of Temperature Cycles	test specified by	18 cycles minimum including thermal cycling test cycles
Total Operating Time	MIL-STD-1540B	300-hour minimum including thermal cycling time (or 100 cycles minimum for cycle-sensitive components)
Dwell		1-hour minimum at temperature extremes

Não é realizado em nível de qualificação

Mínimo de 18 ciclos.

Tempo total do teste no mínimo de 300 hs

Ref. [10]

- O principal objetivo do TVT é verificar a funcionalidade do equipamento em condições térmicas extremas sob ambiente de vácuo (usado também para “screening”).

Thermal Vacuum Test Parameters	Qualification - Para. 6.4.2	Acceptance - Para. 7.3.2
Temperature Range (differential)	105-deg C	85-deg C
Temperature Extremes	Minimum predicted with -10-deg C environmental design margin, to maximum predicted with +10-deg C environmental design margin, or at least -34-deg C to +71-deg C	Minimum predicted to maximum predicted, or at least -24-deg C to +61-deg C
Number of Cycles	3 cycles minimum	1 cycle minimum
Dwell	12-hour minimum at temperature extremes	12-hour minimum at temperature extremes
Pressure	10 ⁻⁴ Torr or Less	10 ⁻⁴ Torr or less

Níveis de temperatura são os mesmos do TCT

Número de ciclos menor que em um TCT (rec. 4 ciclos)

Tempo em um patamar bem maior que no TCT (garantir estabilização da temperatura interna no ambiente de vácuo)

Pressão ambiente $\leq 10^{-5}$ Torr

Ref. [10]

- Testes funcionais são realizados nos patamares frio e quente no primeiro e ultimo ciclos e na volta do equipamento à temperatura e pressão ambiente.
- Testes funcionais menores podem ser realizados nos ciclos intermediários.

Parâmetros de Teste Para Sistema, segundo a Norma MIL-STD-1540B

TCT Sistema

- O TCT para Sistema têm a mesma função do TCT para equipamentos, mas é realizado com estes integrados.
- Não é requerido para o satélite integrado.

Thermal Cycling Test Parameters	Qualification - Para. 6.2.9	Acceptance - Para 7.1.8
Temperature Range Differential	Maximum possible within constraints, with minimum of 70°C	Maximum possible within constraints, with minimum of 50°C
Temperature Extremes	Not Specified in Para. 6.2.9	No specified in Para. 7.1.8
Number of Cycles	No. of cycles = 125 percent of acceptance test = 50 minimum	40 minimum
Dwell	Duration not specified. On last cycle only, at each temperature extreme, for functional test.	Duration not specified. On last cycle only, at each temperature extreme, for functional test.

Extremos de temperatura não definidos

Tempo em cada patamar não especificado

Ref. [10]

- O TVT de Sistema é realizado basicamente para verificar a performance do sistema integrado quando submetido a extremos de temperatura.

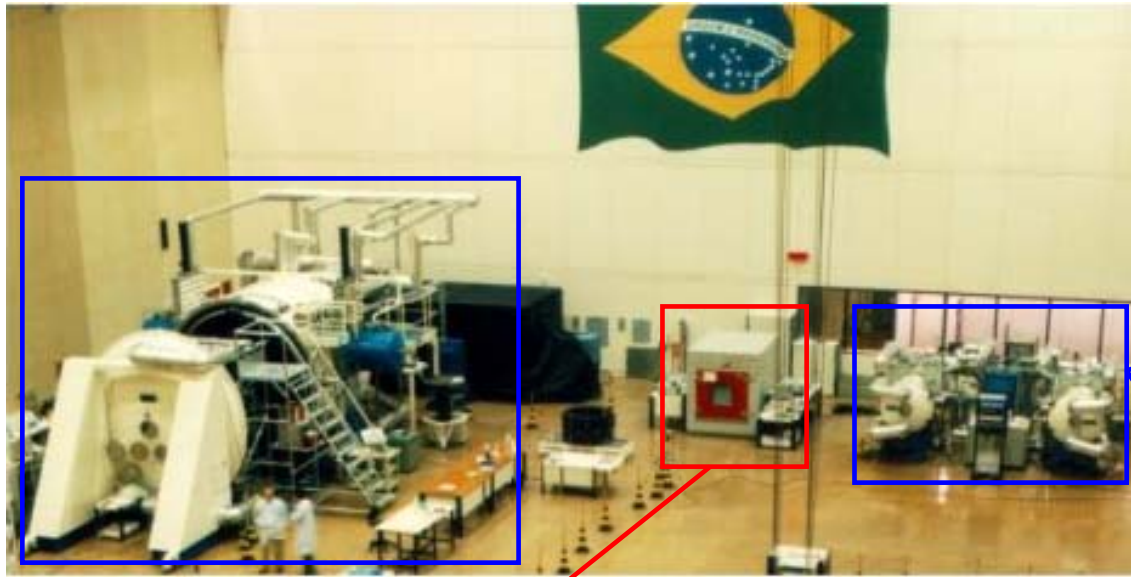
Thermal Vacuum Test Parameters	Qualification - Para. 6.2.7	Acceptance - Para. 7.1.7
Temperature Range and Extremes	Minimum predicted to maximum predicted temperature environments plus environment design margin of 10°C, for one component in each vehicle equipment area	Minimum predicted to maximum predicted temperature environments, for one component in each vehicle equipment area
Number of Cycles	Minimum of 8 cycles	Minimum of 4 cycles if thermal cycling not performed
Dwell	Minimum of 8 hours soak at each temperature extreme of each cycle	Minimum of 8 hours soak at each temperature extreme of each cycle
Pressure	10 ⁻⁴ Torr or less	10 ⁻⁴ Torr or less

Extremos de temperatura definidos por modelo térmico, ou TBT, mais margens (Aceit.= zero.).

Temperatura controlada por pelo menos 1 equipamento/compart.

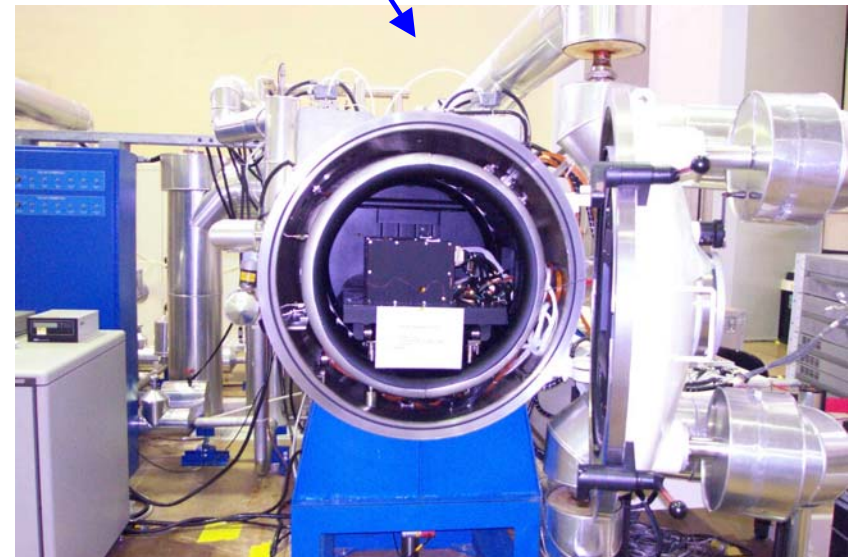
Critério para considerar início do patamar
 $R_{temp} < 3 \text{ } ^\circ\text{C/h}$

Ref. [10]



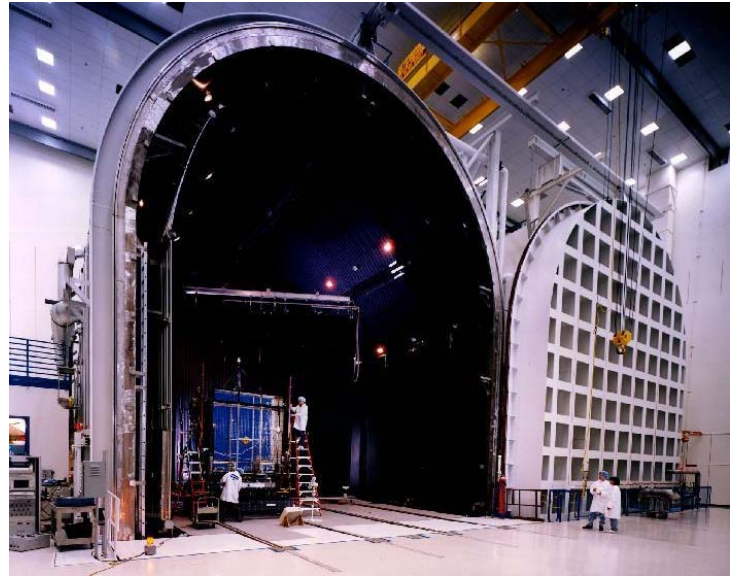
CVTs 250 1

Câmara Climática





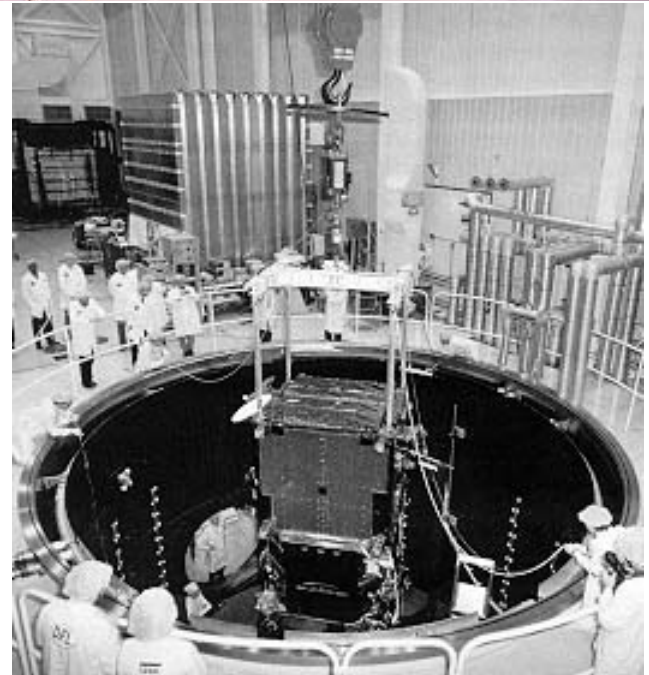
CBERS FM2 TVT



CVT Hughes



Astrium - Cluster II



CAS - Radarsat

Teste de Balanço Térmico

- O Teste de Balanço Térmico (TBT) é realizado de forma a verificar em solo se o projeto térmico do satélite está correto e validar o modelo numérico do mesmo.
- Em um TBT, são reproduzidas condições críticas, do ponto de vista térmico, que o satélite encontrará em órbita.

Baixas Cargas
Térmicas Externas

Dissipação baixa
nos equipamentos

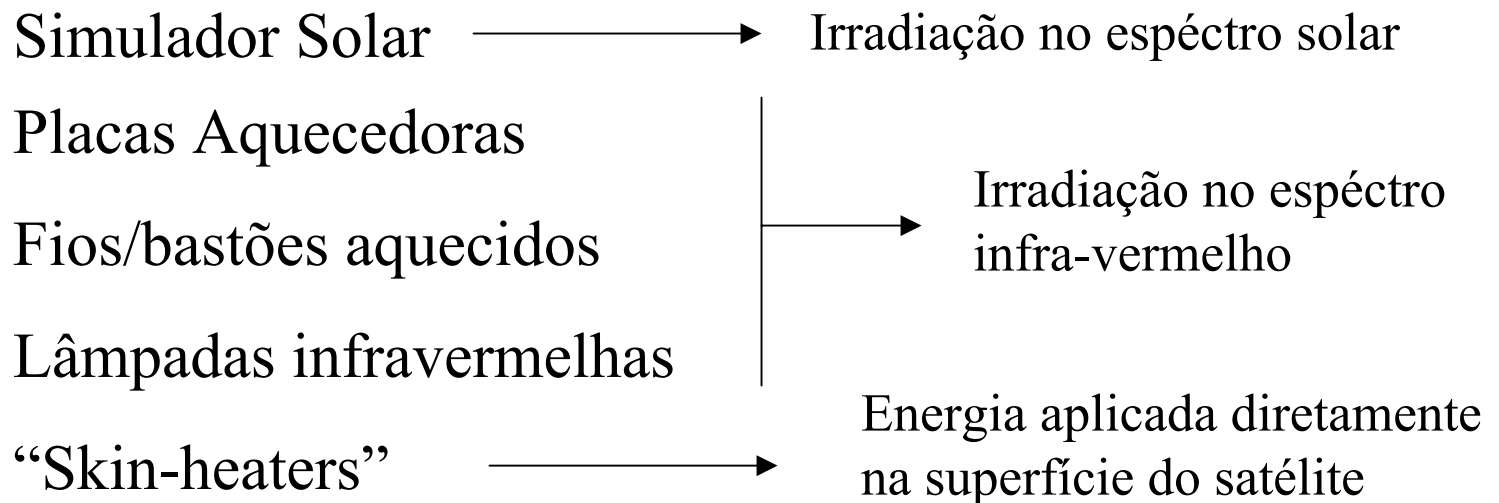
Propriedades
Termo-ópticas não
degradadas

Altas Cargas
Térmicas Externas

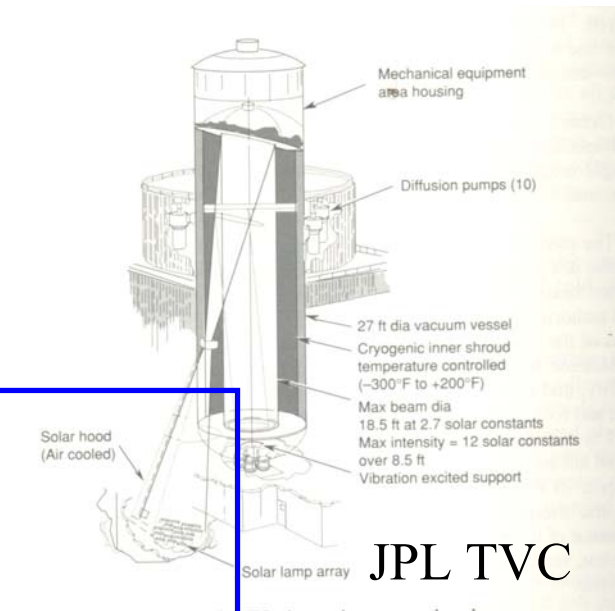
Dissipação alta nos
equipamentos

→ Podem ser simulados
vários casos operacionais
e não operacionais

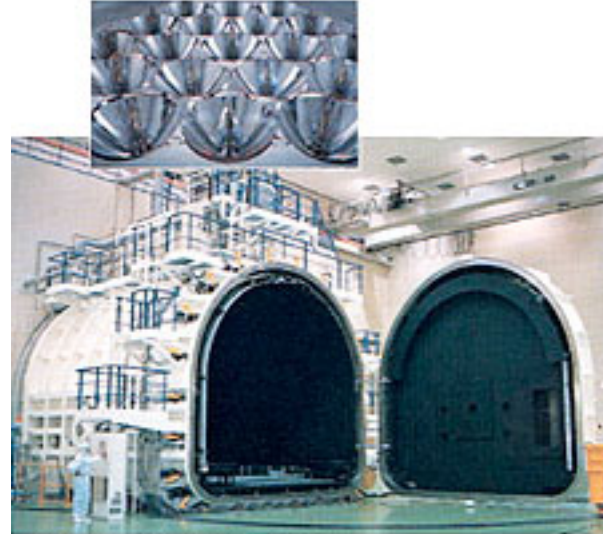
- O TBT pode ser realizado em uma “maquete térmica” ou no próprio modelo de vôo do satélite.
- No primeiro caso, os equipamentos são simulados por “dummies” que reproduzem as dimensões físicas, propriedades termo-ópticas, dissipação de calor (via aquecedores elétricos - “heaters”) e capacidade térmica daqueles.
- A simulação das cargas térmicas externas (Solar, albedo, radiação infra-vermelha da Terra) pode ser feita de diversas formas:



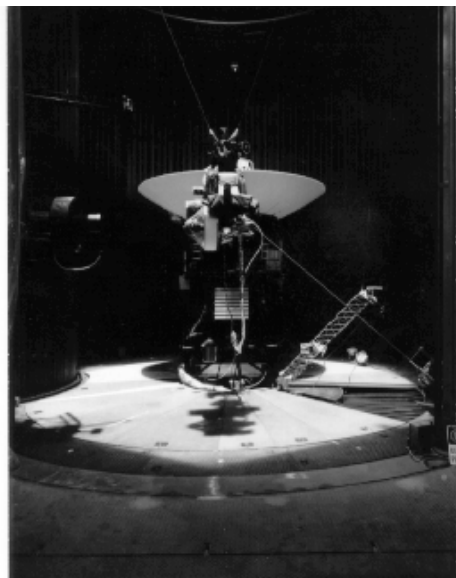
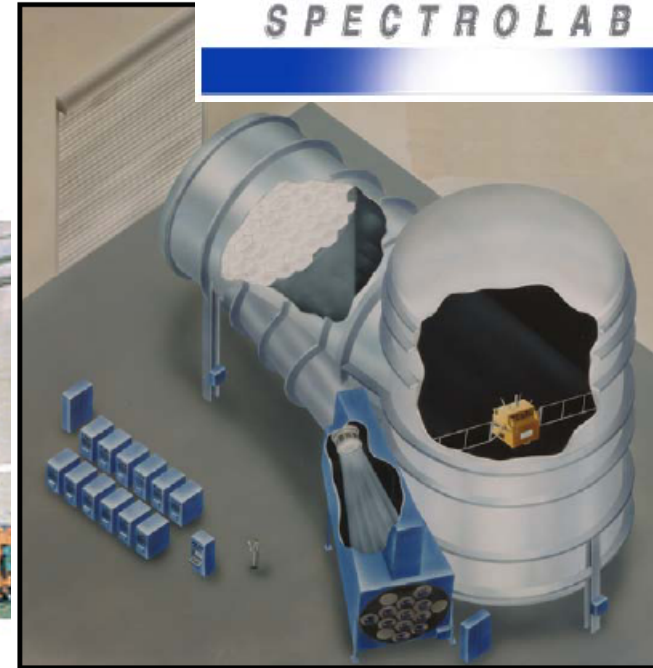
CVTs com Sim. Solar



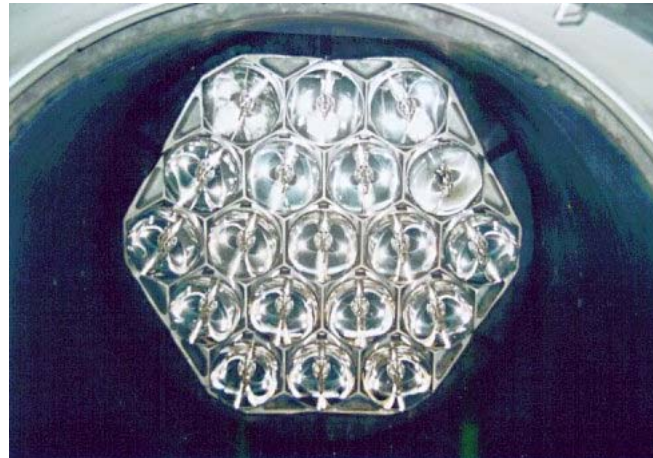
High-powered water-cooled xenon short-arc lamps used in solar simulators



NASDA's solar simulator
 (photograph courtesy of NASDA)



Voyager



Performance

ISRO

- **Target Volume:** 4 m diameter x 4 m long (10 lamps @ 16 kW)
 Expandable to: 4.5 m diameter (12 lamps @ 16 kW)
- **Uniformity:** +/- 4% in central plane
 +/- 6% throughout test volume
- **Irradiance Range** 0 - 1.7 kW/m²
- **Stability and Control Accuracy:** +/- 5%

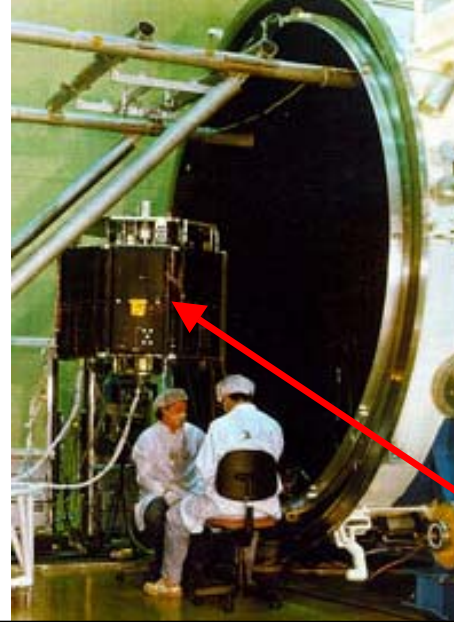
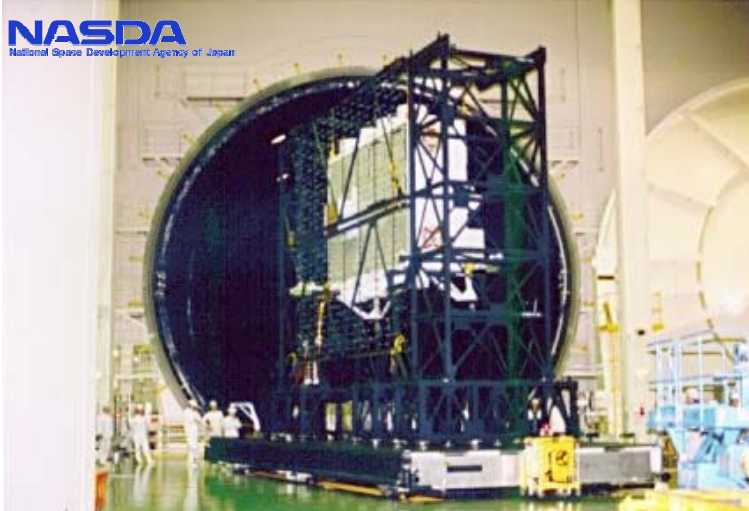
Simulação Car. Térm. Ext.

Lâmpadas infra-vermelhas

IABG

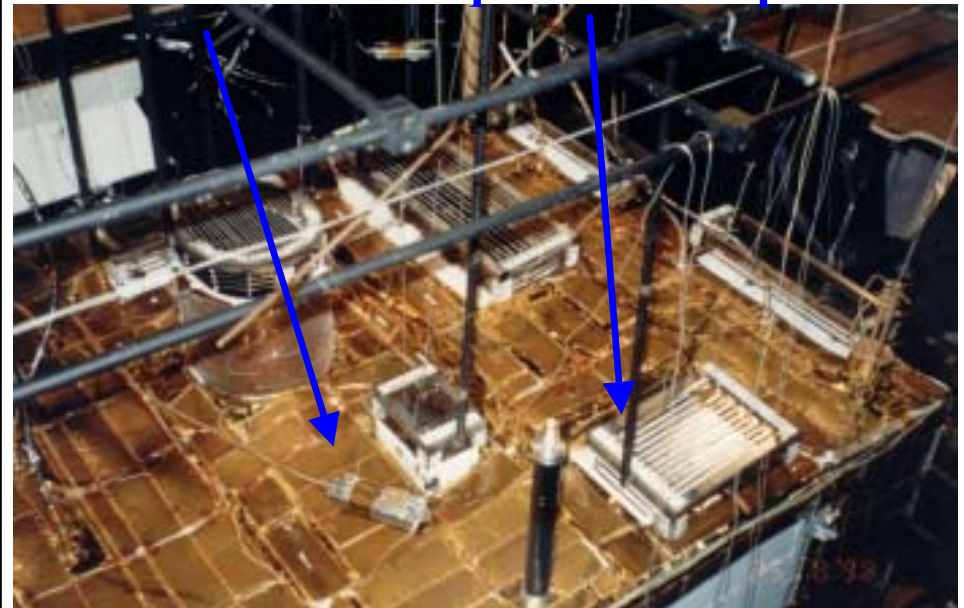


NASDA
National Space Development Agency of Japan



Placas
aquecedoras ao
redor do SCD1

CBERS FM1 “top panel” Skin heaters Aquecedores tipo “fio”



TESTE DE BALANÇO TÉRMICO DO CBERS - TM

- Realizado na CVT KM-4, em Huairou, China, em abril de 1997.
- Utilizado o Modelo Térmico (TM) do satélite.
- Objetivos:
 - i) Verificar o projeto térmico do satélite.
 - ii) Validar o modelo térmico do satélite.
 - iii) Verificar o projeto térmico das câmeras imagiadoras.
 - iv) Verificar o projeto térmico do compartimento das baterias integrado no satélite.
 - v) Qualificar uma técnica de simulação das cargas térmicas externas com fontes infra-vermelhas.

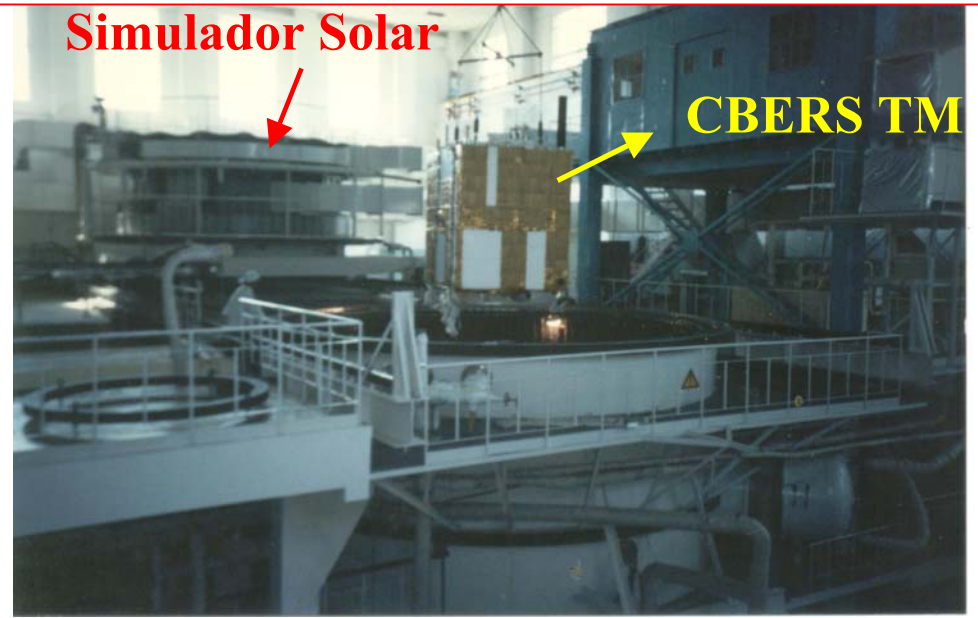
- 14 casos de teste realizados:
 - 11 em regime permanente, com 6 condições diferentes.
 - 5 casos em regime permanente utilizados para qualificar IR array.
 - 1 caso em regime permanente com TM na condição de “emergência”.
 - 3 casos em regime transiente.
- Aprox. 700 sensores de temperatura.
- Cargas térmicas internas (nos “dummies”) simuladas com heaters.
- Cargas térmicas externas simuladas com fontes IV e heaters.
- Medidores de fluxo de radiação (radiômetros) utilizados para medir fluxo proveniente das fontes IV (3 tipos utilizados).
- Duração total do teste: aprox. 30 dias



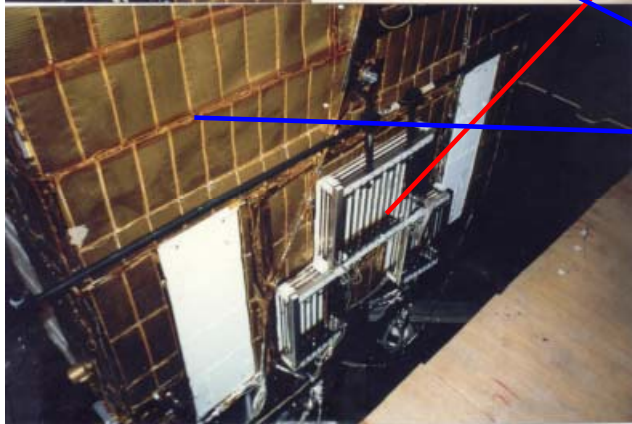
CVT KM4



Porta lateral KM4



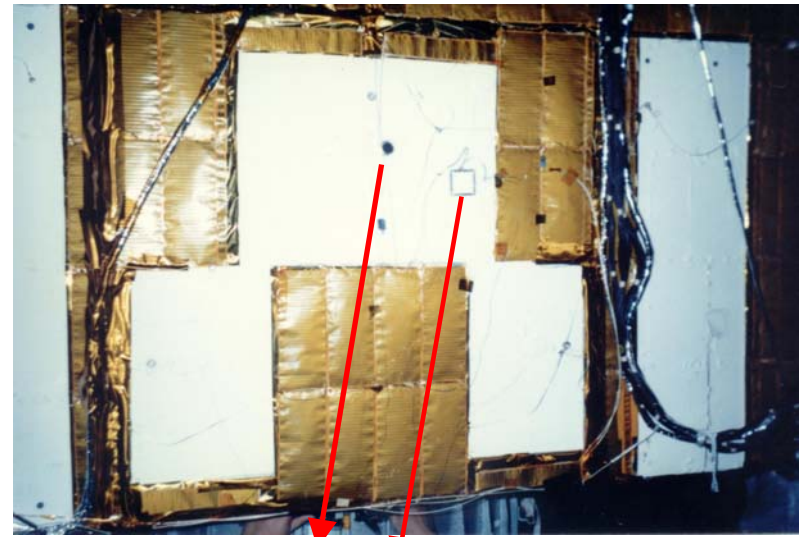
Porta superior KM4



Fontes IV
Heaters



“Dummy” do painel solar.

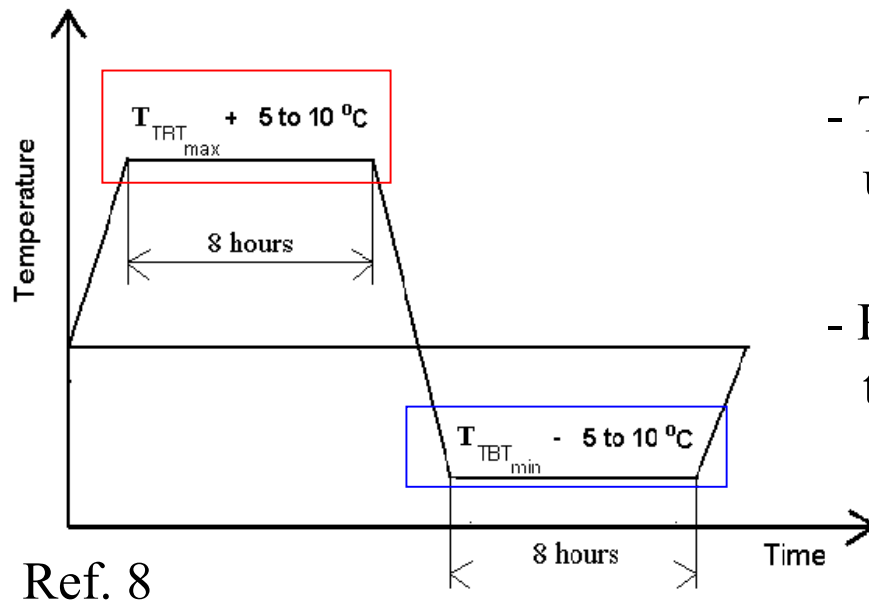


Radiômetros sobre o painel das baterias.

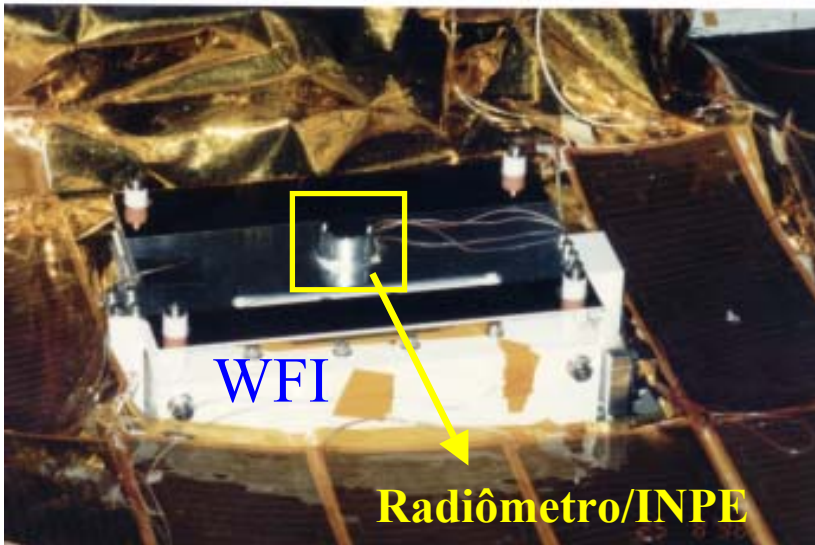
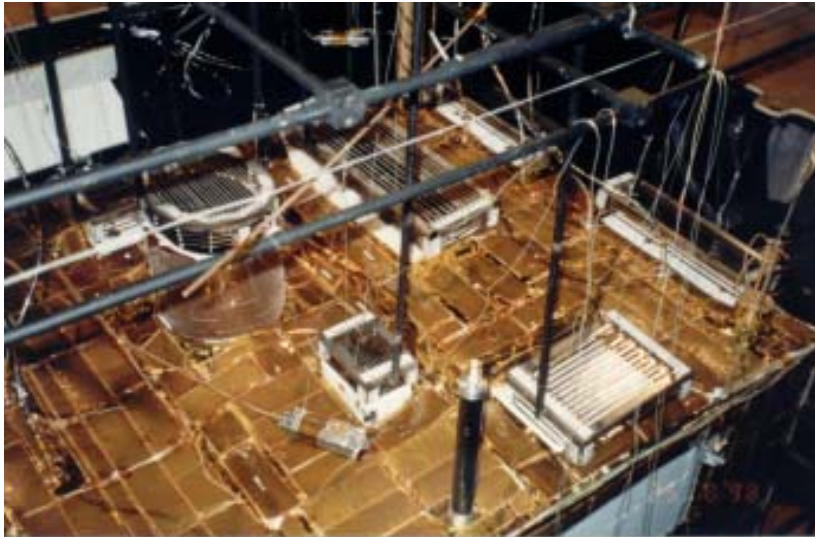
Outro exemplo: TBT e TVT combinados

TBT/TVT do CBERS modelo de voo 1 (FM1)

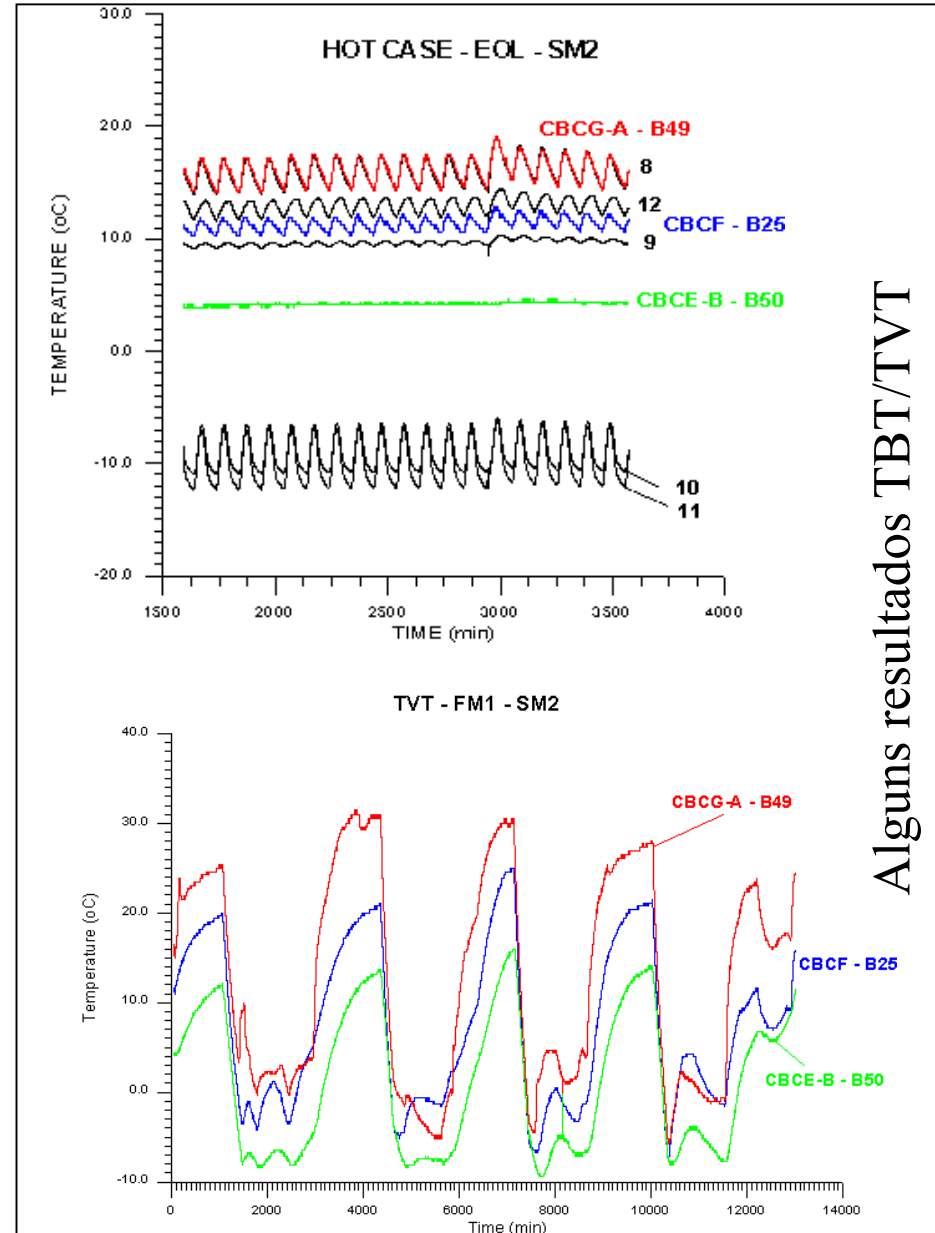
- Teste realizado na KM4 em julho de 1998.
- TVT realizado em seqüência ao TBT.
 - TBT: 3 casos transientes similares aos realizados para a TM.
 - TVT: 4 ciclos, cada um com o perfil:



- Testes funcionais realizados nas 3 últimas horas de cada patamar.
- Pontos de controle (temperatura) do teste pré-definidos.



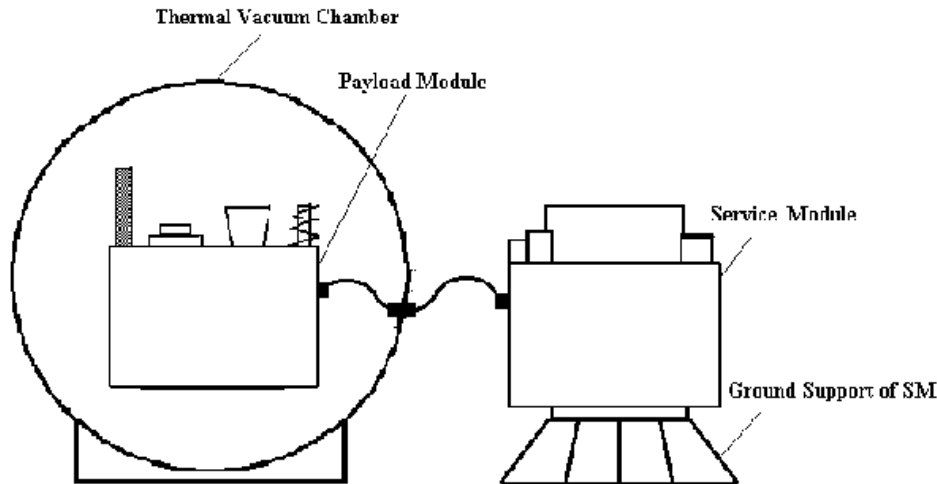
Ref. 8



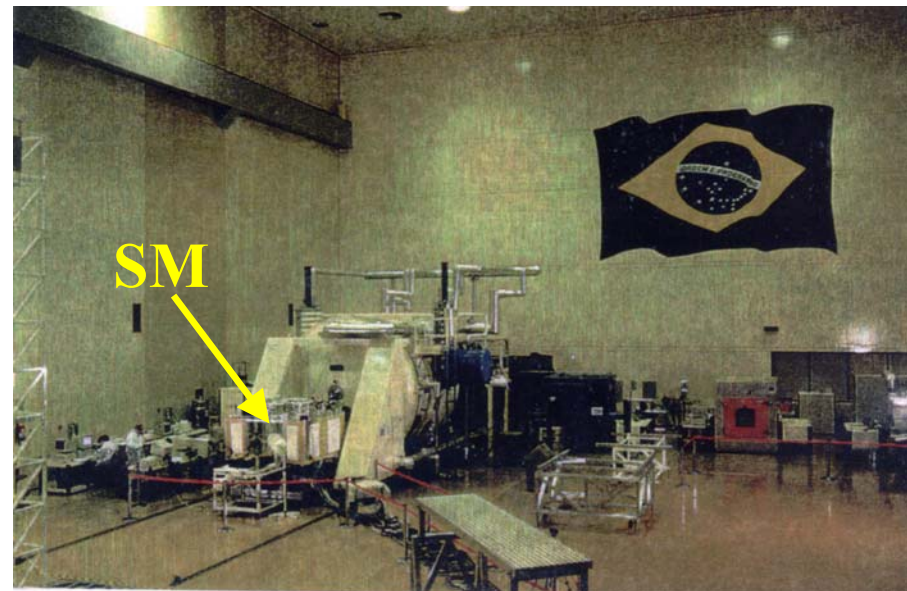
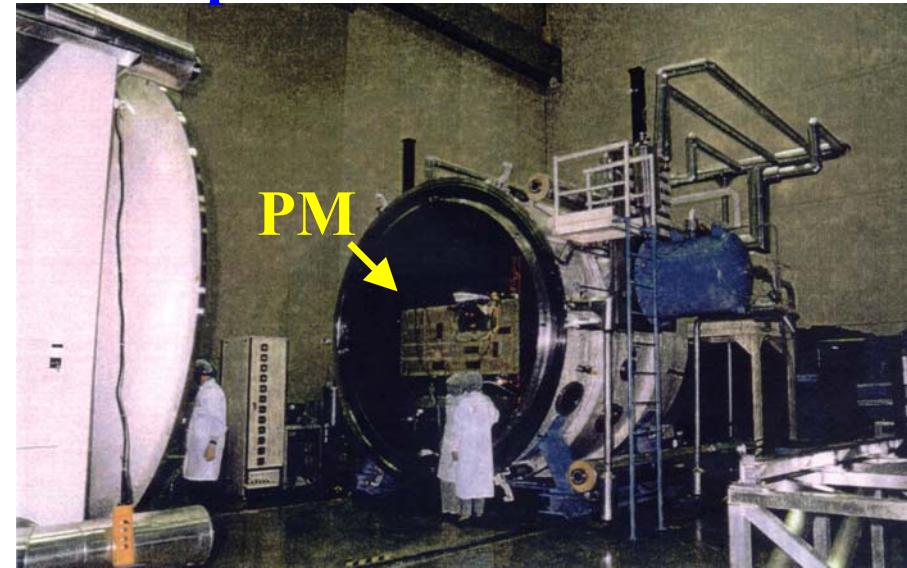
Alguns resultados TBT/TVT

TVT CBERS FM2 no LIT

- O TVT de aceitação do CBERS FM2 foi realizado no LIT/INPE (Ago/Set, 2001)
- Similar ao TVT realizado no FM1, mas realizado com os módulos separados o satélite integrado não cabe na CVT do LIT (3x3 m)



Ref. 9



REFERÊNCIAS

- [1] Garcia, E.C., Sorice, A.F., Almeida, J.S. e Santos, M.B. Report of Thermal Vacuum Test of CBERS FM2 Payload Module. LIT01-CBERS-TR-031, 2001.
- [2] Garcia, E.C., Sorice, A.F., Almeida, J.S. e Santos, M.B. Report of Thermal Vacuum Test of CBERS FM2 Service Module. LIT01-CBERS-TR-031, 2001.
- [3] Karan, R.D. Satellite Thermal Control for Systems Engineers. Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 16, AIAA publishing, 1998.
- [4] Leite, R.M.G., Muraoka, I. Controle Térmico de Satélites. Apostila e Curso PROPESA, 1993.
- [5] Panetti, A. Spacecraft Subsystems: Thermal. In Space Mission Analysis and Design, Third Edition (Wertz, J.R. and Larson, W.J., Editors), Microcosm Press, 1999.
- [6] Space Engineering: Mechanical - Part 1: Thermal Control. European Cooperation for Space Standardization - ECSS, ECSS-E-30 Part 1A, 2000.
- [7] Sousa, F.L. CBERS Thermal Balance Test Results. CBB-ITRP-065, 1997.
- [8] Sousa, F.L. An Overview of CBERS FM1 Thermal Balance and Thermal Vacuum Tests Results. CB-ITRP-096.
- [9] Sousa, F.L., Garcia, E.C., Fu, P, Z. e Tong, W. Guidelines For CBERS FM2 Thermal Vacuum Test. CB-HVP-001, 1998.
- [10] Welch, J.W. Thermal Testing. In Satellite Thermal Control Handbook (Gilmore, D.G. - Editor). The Aerospace Corporation Press, 1994.