



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

# ***Controle Térmico de Satélites***

**Rafael Lopes Costa**

[rafael.costa@inpe.br](mailto:rafael.costa@inpe.br)

(12)3208-6204 / (12)98813-7846

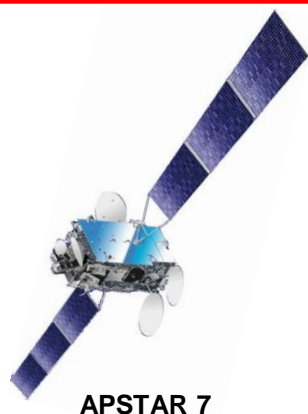
**Curso de Inverno 2018**

INTRODUÇÃO ÀS TECNOLOGIAS ESPACIAIS

São José dos Campos – SP, 17 de julho de 2018

# Alguns Tipos de Satélites

## Comunicações



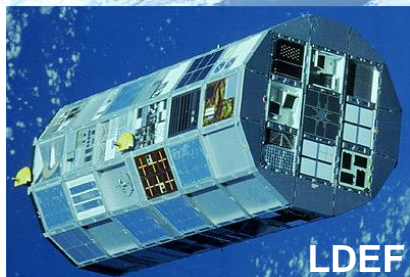
## Estações Espaciais



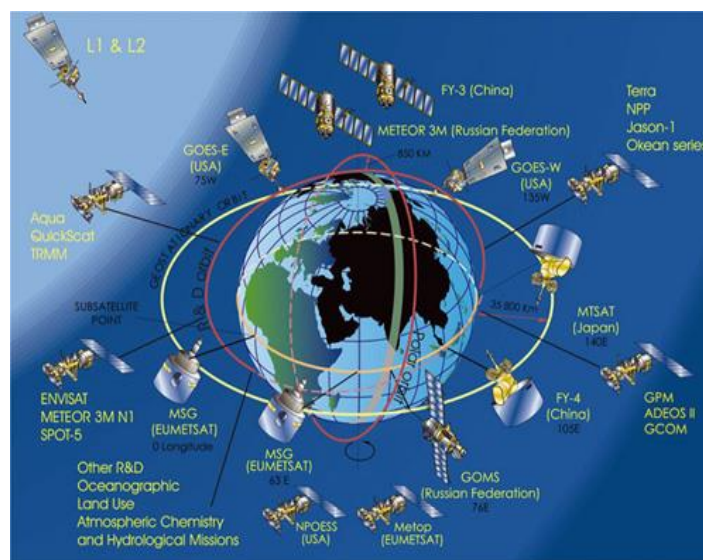
## Sensoriamento Remoto



## Científicos/Tecnológicos



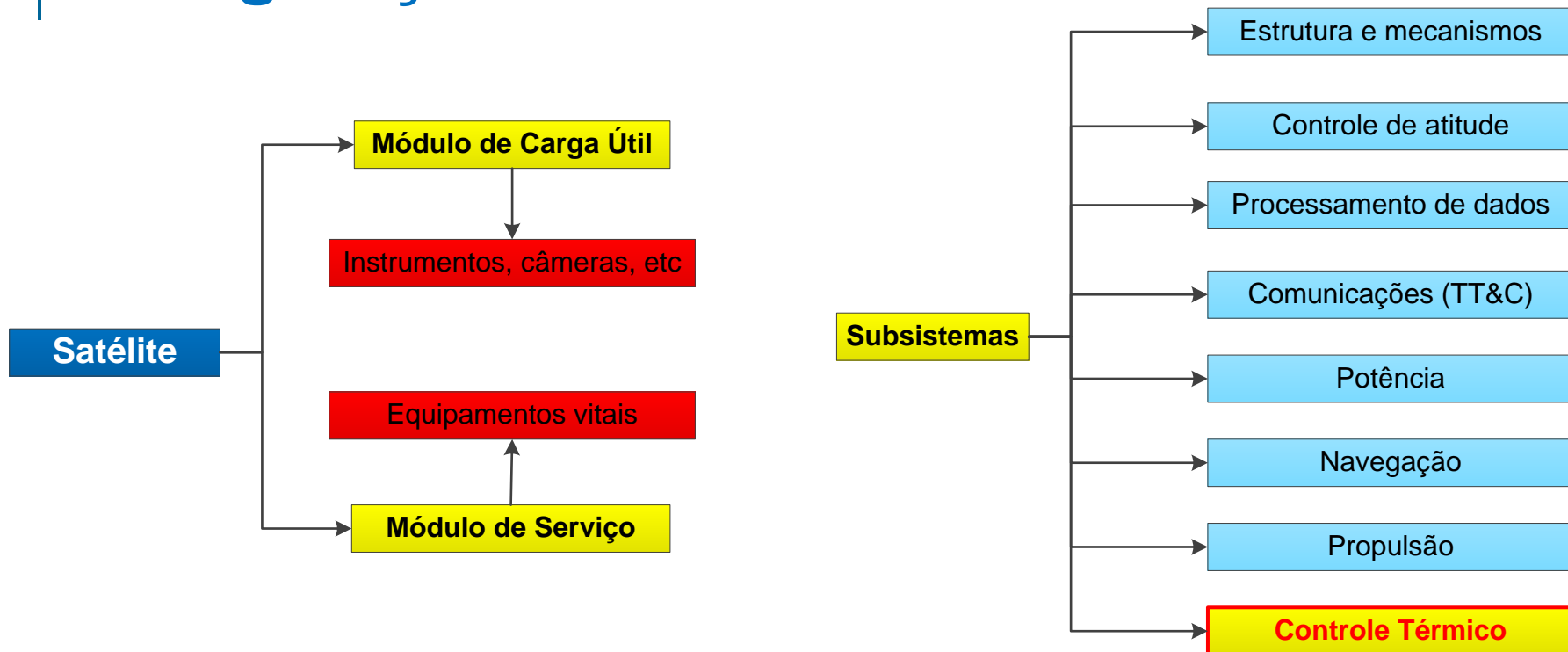
## Meteorológicos



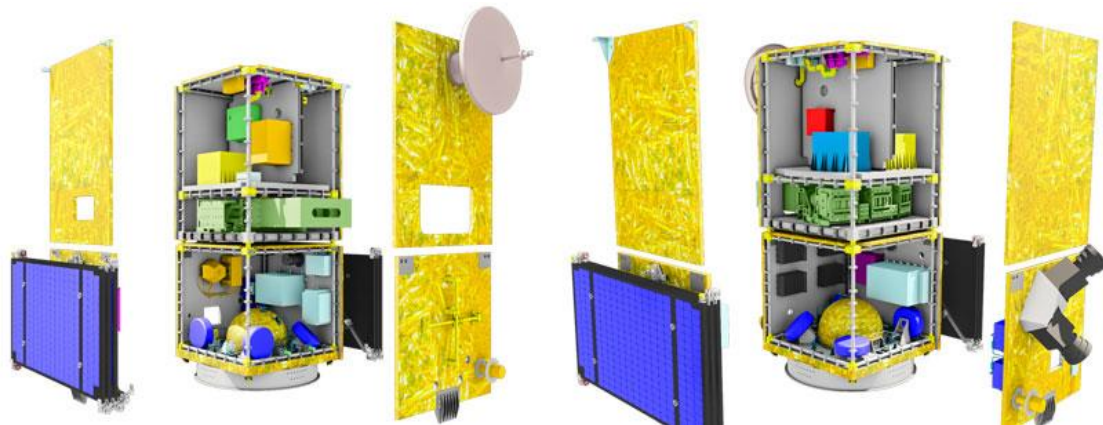
## Navegação



# Configuração de um Satélite

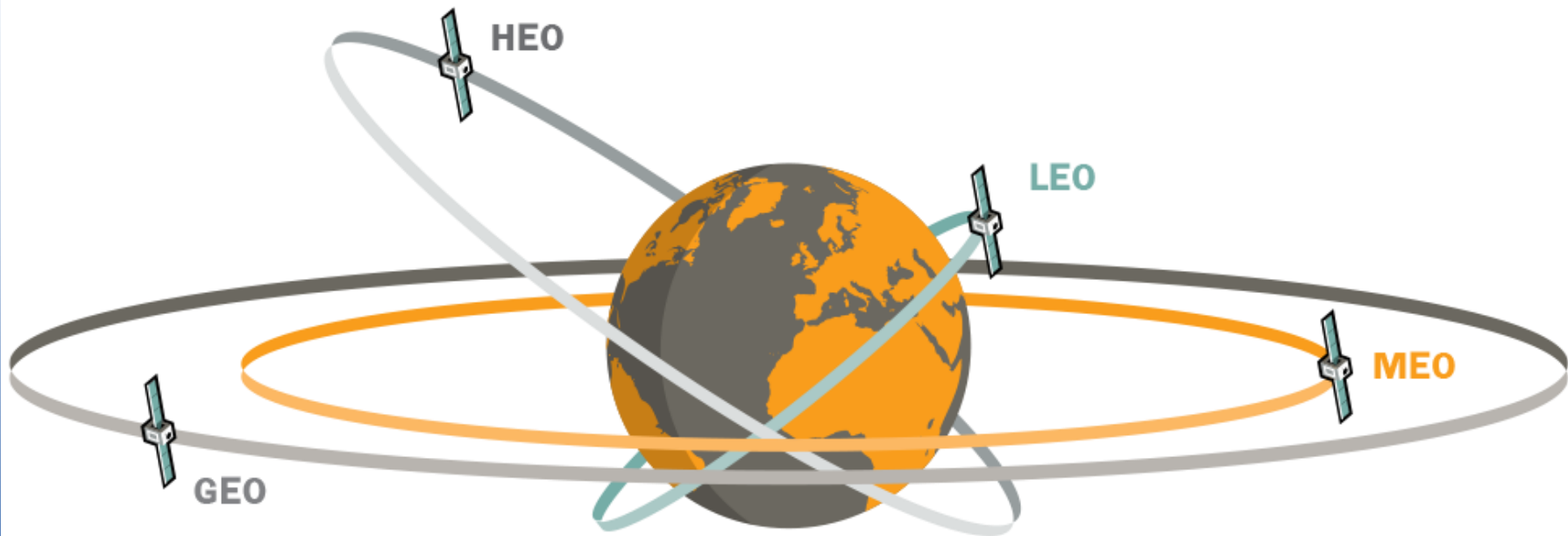


**Amazonia-1**  
INPE/Brasil





# Tipos de Órbitas Terrestres



**LEO** = Low Earth Orbit (100 – 1,500 km)

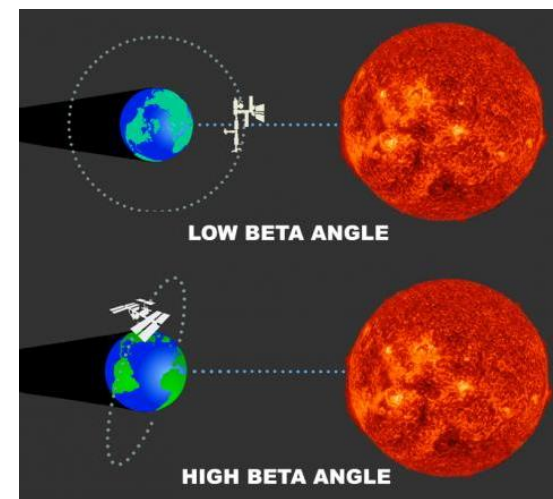
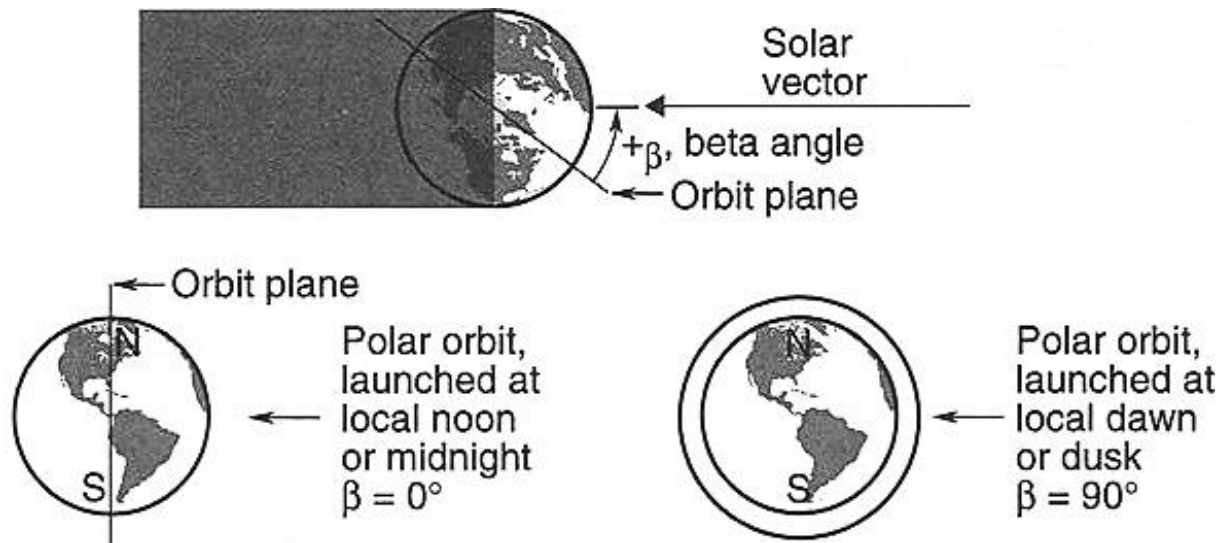
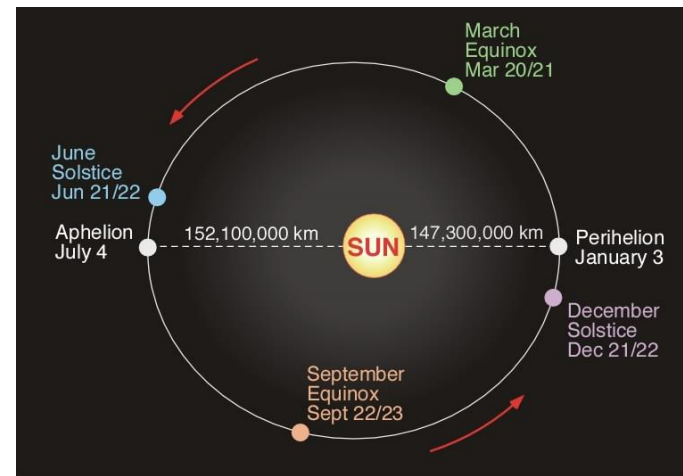
**MEO** = Medium Earth Orbit (5,000 – 10,000 km)

**GEO** = Geostationary Orbit (36,000 km)

**HEO** = Highly Elliptical Orbit

# Principais Parâmetros Orbitais para o Controle Térmico

- ☐ Ângulo de inclinação da órbita
- ☐ Atitude do satélite
- ☐ Altitude da órbita
- ☐ Variação da Constante Solar ( $\pm 3,5\%$ )
- ☐ Ângulo Beta ( $\beta$ )





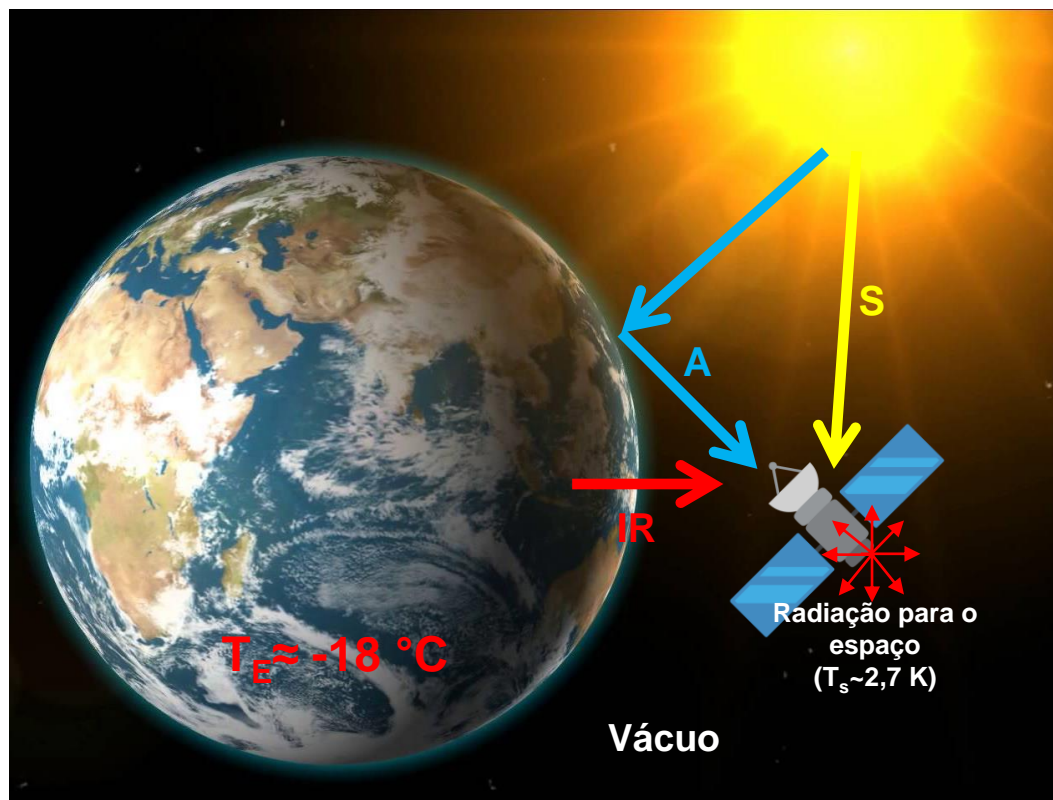
# Ambiente Térmico Orbital

Cargas térmicas na órbita terrestre

Radiação solar direta ( $S \approx 1370 \text{ W/m}^2$ )

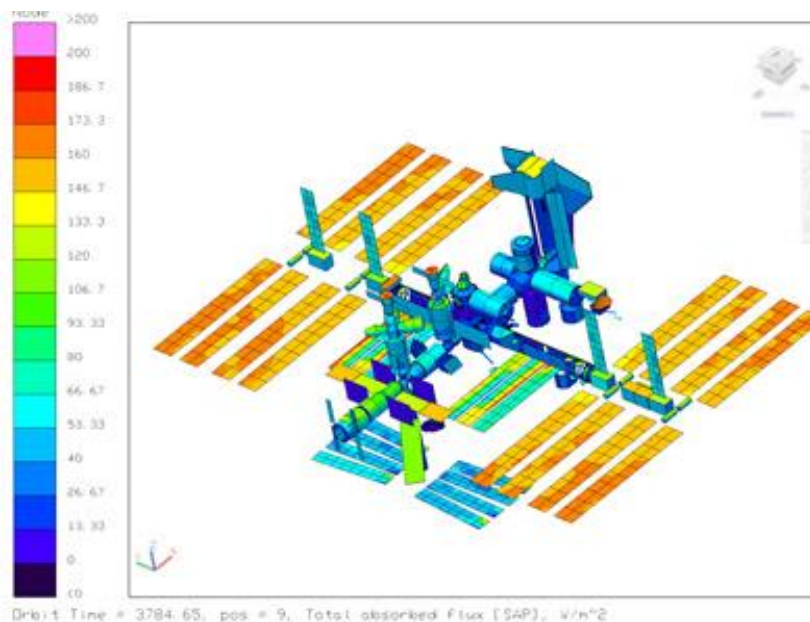
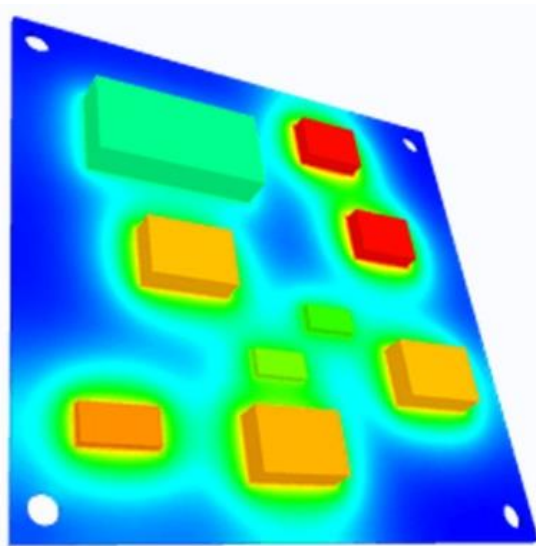
Albedo ( $A \approx 0,1 - 0,9$ )

Radiação da Terra ( $IR \approx 240 \text{ W/m}^2$ )



# Objetivos do Controle Térmico

- ❑ Manter as **temperaturas, gradientes e transientes** dos componentes mecânicos, elétricos e eletrônicos do satélite dentro dos limites estabelecidos, em condições operacionais e não-operacionais, em todas as fases da missão.

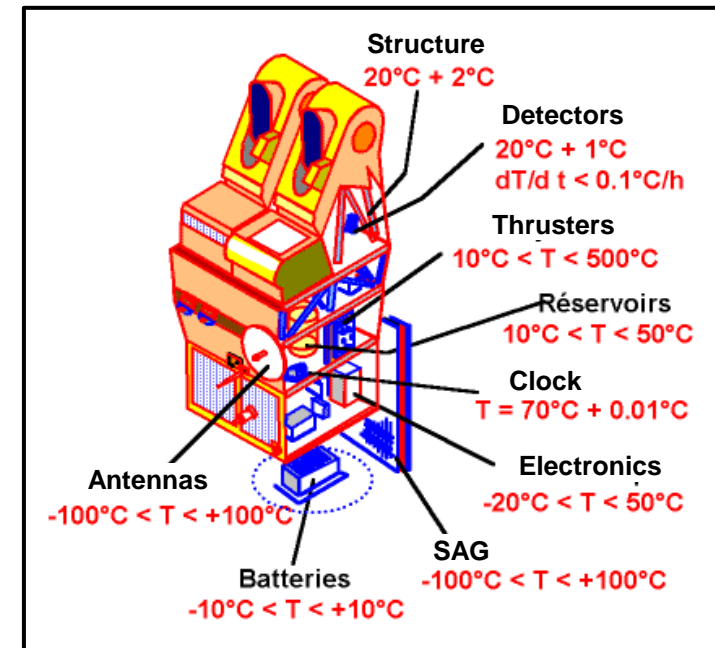


# Faixas de Temperaturas Típicas em Satélites

## Faixas de temperatura típicas para o CBERS 04A

Equipment Description	Operating Temperature Range		Non-Operating (*) Temperature Range	
	Tmin	Tmax	Tmin	Tmax
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)
<b>Platform Equipment</b>				
General Electronic Boxes	-10	45	-30	65
Propulsion System (**)	9	60	9	65
Battery Assembly	-5	15	-10	25
Solar Array Generator	-80	95	-80	100
Rate Integration Gyro Assembly	0	45	-5	50
Infrared Earth Sensor	0	30	-5	35
Analog Sun Sensors 1 (body)	-50	50	-60	60
Analog Sun Sensors 2 (SAG)	-80	80	-90	90
Digital Sun Sensor	-30	50	-40	60
"0-1" Sun Sensor	-50	50	-60	60
BAPTA	-20	60	-30	60
Star Sensor	0	40	-10	50
Momentum Wheel	0	55	-10	65
Structural Panels	-100	100	-100	100
<b>Payload Equipment</b>				
General Electronic Boxes	-10	45	-30	65
MUX Optical Mechanism	-10	45	-20	45
WPM Optical Mechanism	-10	45	-10	45
WFI Optical Mechanism	-10	45	-10	45
Solid State Recorder	-10	45	-30	60
Antennas	-90	90	-90	90

## SPOT 4

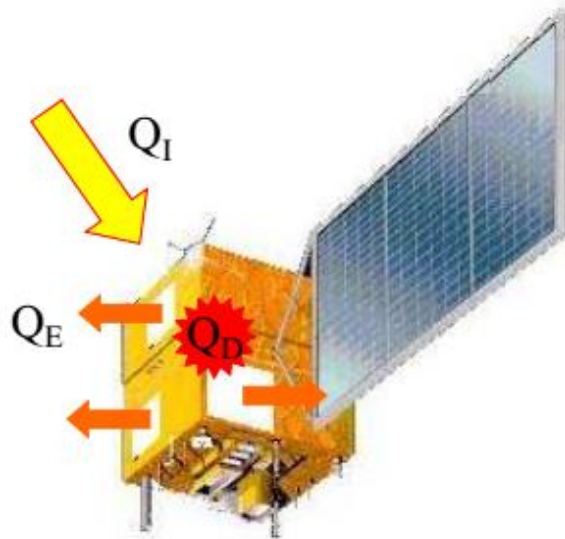




# Trocas Térmicas no Satélite

## Exterior do satélite

(somente radiação)



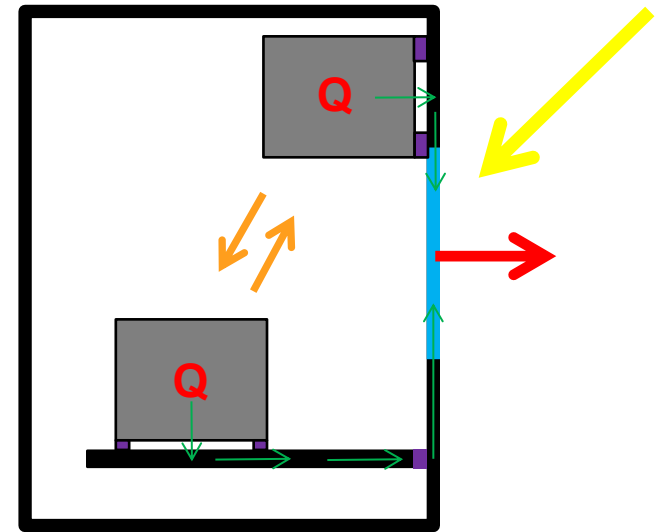
Balanco térmico global

$$Q_{out} = Q_{in} + Q_D$$

$$A\epsilon\sigma T^4 = \alpha Q_i + Q_D$$

## Interior do satélite

(radiação e condução)



- **Dissipação dos equipamentos**
- **Acoplamento nas interfaces (RTC)**
- **Trocas condutivas na estrutura**
- **Trocas radiativas no int. do compartimento**
- **Dimensionamento dos radiadores**



# Modelo Térmico Matemático (TMM)

TMM é a ferramenta que simula o comportamento térmico do satélite.

## **Entradas:**

- Dados do satélite (geometria, materiais, revestimentos, acoplamentos nas interfaces, etc.)
- Dados de órbita e atitude do satélite (ambientais)

## **Saída:**

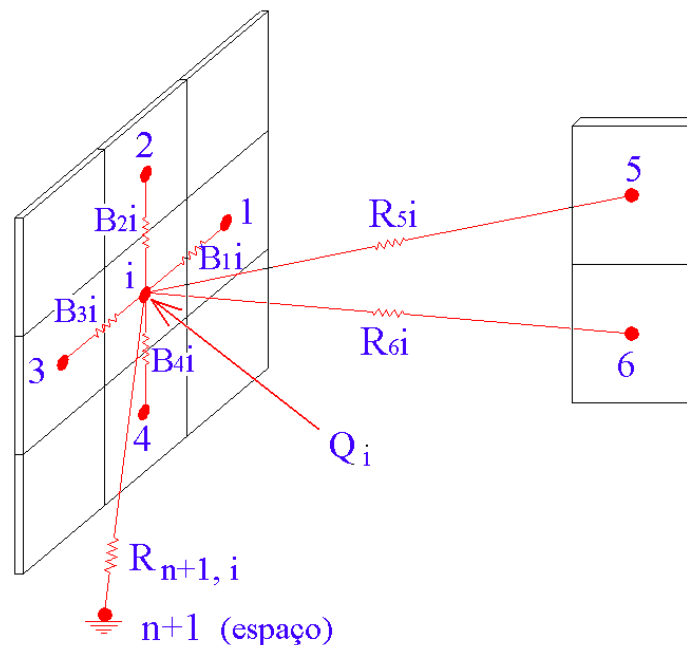
- Temperaturas

## **Finalidade:**

- Usado para fazer análises térmicas e definir o projeto térmico com redução de testes experimentais

# Modelo Térmico Matemático (TMM)

## □ Analogia elétrica:



## □ Equacionamento de balanço:

$$m_i C_{p_i} \frac{dT_i}{dt} = \underbrace{\sum_{j=1}^{n+1} R_{ji} \sigma (T_j^4 - T_i^4)}_{\text{Trocas por radiação}} + \underbrace{\sum_{j=1}^n B_{ji} \sigma (T_j - T_i)}_{\text{Trocas por condução}} + \underbrace{Q_i}_{\text{Fluxo imposto}}$$

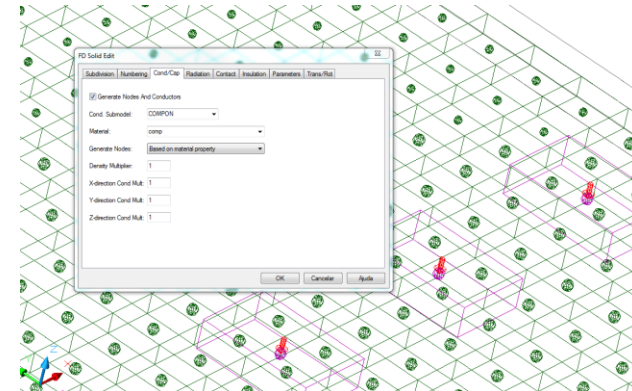
$i = 1 \dots n$

Variação da energia interna
Trocas por radiação
Trocas por condução
Fluxo imposto

# Etapas da Análise Térmica

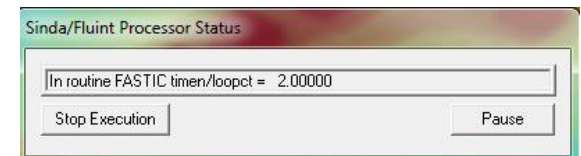
## 1. Pré-processamento

- Estabelecer a divisão nodal
- Determinar dos coeficientes das equações:
  - $m_i C_{p_i}$  - capacitância térmica
  - $R_{ji}$  - condutâncias radiativas
  - $B_{ji}$  - condutâncias condutivas
  - $Q_i$  - cargas térmicas internas ou externas



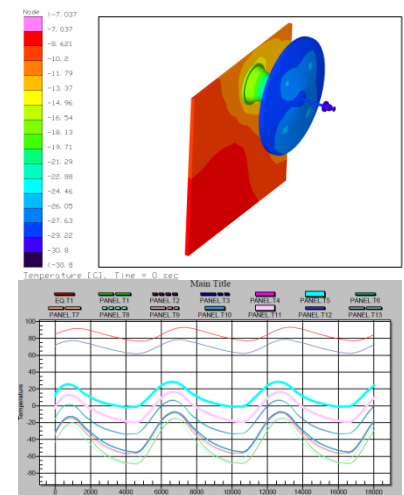
## 2. Processamento

- Resolver o sistema de equações



## 3. Pós-processamento

- Apresentação das temperaturas ou fluxos em forma de mapas ou gráficos

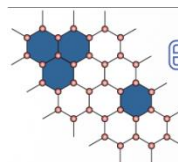
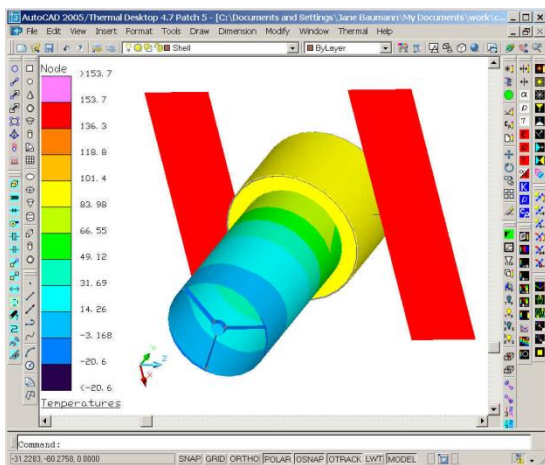
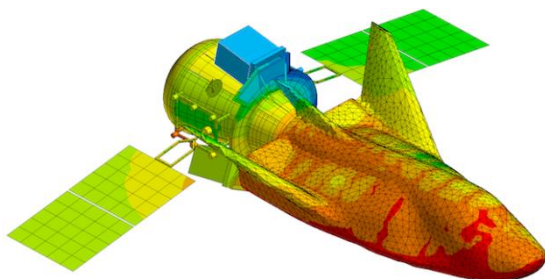


$$m_i C_{p_i} \frac{dT_i}{dt} = \underbrace{\sum_{j=1}^{n+1} R_{ji} \sigma (T_j^4 - T_i^4)}_{\text{Trocas por radiação}} + \underbrace{\sum_{j=1}^n B_{ji} \sigma (T_j - T_i)}_{\text{Trocas por condução}} + \underbrace{Q_i}_{\text{Fluxo imposto}} \quad i = 1 \dots n$$

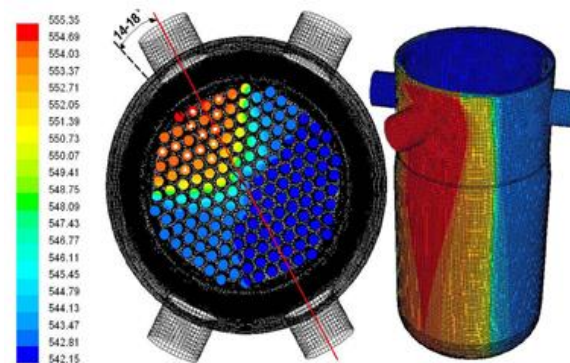
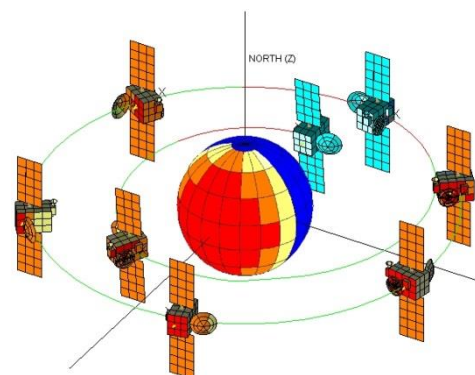
Variação da energia interna
Trocas por radiação
Trocas por condução
Fluxo imposto

# Softwares para Projeto e Análise Térmica de Satélites

## Thermal Desktop® SINDA/FLUINT



ESATAN-TMS  
thermal modelling suite







# Elementos e Dispositivos de Controle Térmico

- Revestimentos térmicos: tintas, fitas, tratamentos superficiais e superfícies óticas refletoras (OSR)
- Mantas Multicamada Super-isolantes (MLI)
- Elementos nas interfaces (condutivas ou isolantes)
- Radiadores
- Capacitores térmicos

**PASSIVOS**

- Venezianas Térmicas
- Tubos de Calor (HP), CPL e LHP

- Aquecedores elétricos
- Cryocoolers
- Resfriadores termoelétricos
- Circuitos com bombeamento mecânico

**ATIVOS**

- Sensores de temperatura (termopares, termistores, RTD)
- Termostatos
- Controladores de estado sólido

**MONITORAMENTO  
E CONTROLE**

# Revestimentos Térmicos

## Tipos usados em satélites:

- Tintas
- Tratamentos superficiais
- Fitas adesivas
- Refletores solares (OSR)

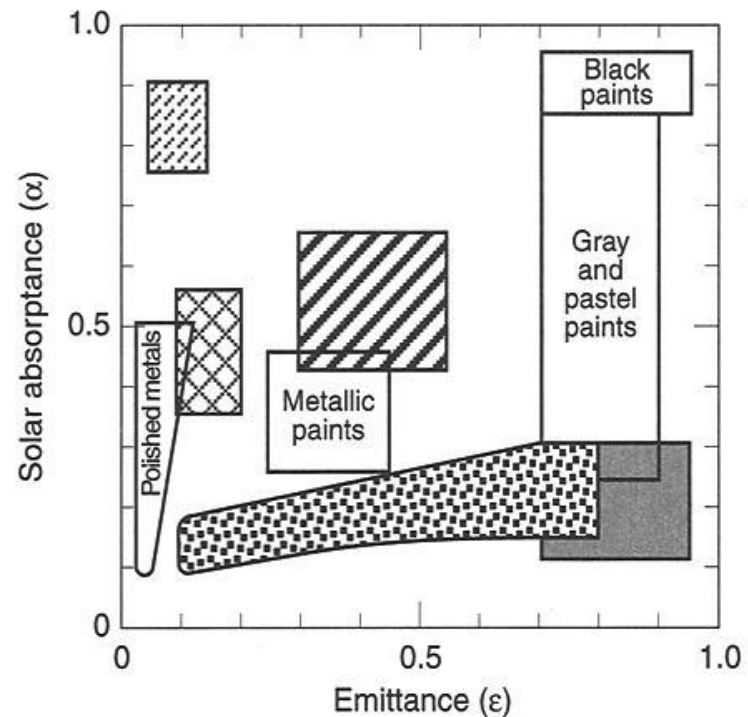
## Propriedades óticas importantes:


- Emissividade no espectro infravermelho  
 $\epsilon_{IR} = 0 \sim 1$  (corpo negro,  $\epsilon_{IR} = 1$ )

$$Q_{emit} = A_{emissão} \epsilon_{IR} \sigma T^4$$

- Absortividade no espectro solar  
 $\alpha_s = 0 \sim 1$  (corpo negro,  $\alpha_s = 1$ )

$$Q_{abs} = A_{projetada} \alpha_{IR} S$$




 Selective blacks (solar absorbers)

 Sandblasted metals and conversion coatings

 White paints and second-surface mirrors

 Bulk metals (unpolished)

 Dielectric films on polished metals

# Revestimentos Térmicos - exemplo

## Problema:

- Esfera no espaço a grande altitude (albedo e radiação terrestre desprezíveis)
- Radiação de fundo do espaço desprezível
- Sem dissipação de calor interna
- ❑ Qual revestimento aplicar na superfície da esfera para manter a mesma entre -10 e +45 °C?

❑ **Fluxo absorvido (solar):**  $Q_{in} = A_p \alpha_s S$

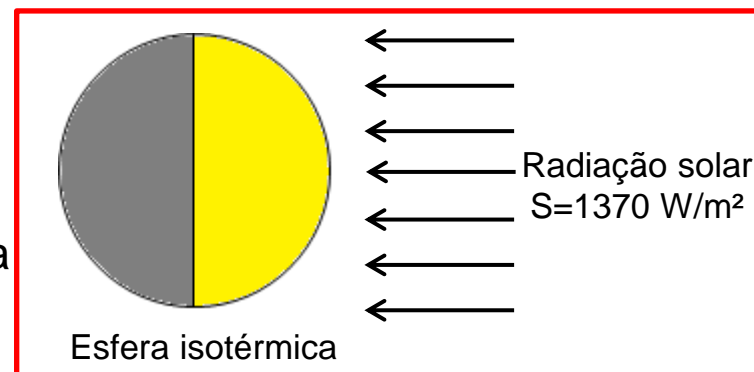
❑ **Fluxo emitido (IR):**  $Q_{out} = A_T \epsilon_{IR} \sigma T^4$

❑ **No equilíbrio:**  $Q_{out} = Q_{in}$

❑ **Temperatura de equilíbrio:**

$$T = \sqrt[4]{\frac{A_p \alpha_s S}{A_T \epsilon_{IR} \sigma}} \longrightarrow T = \sqrt[4]{\frac{\alpha_s S}{\epsilon_{IR} 4\sigma}}$$

Modelo de satélite isotérmico esférico

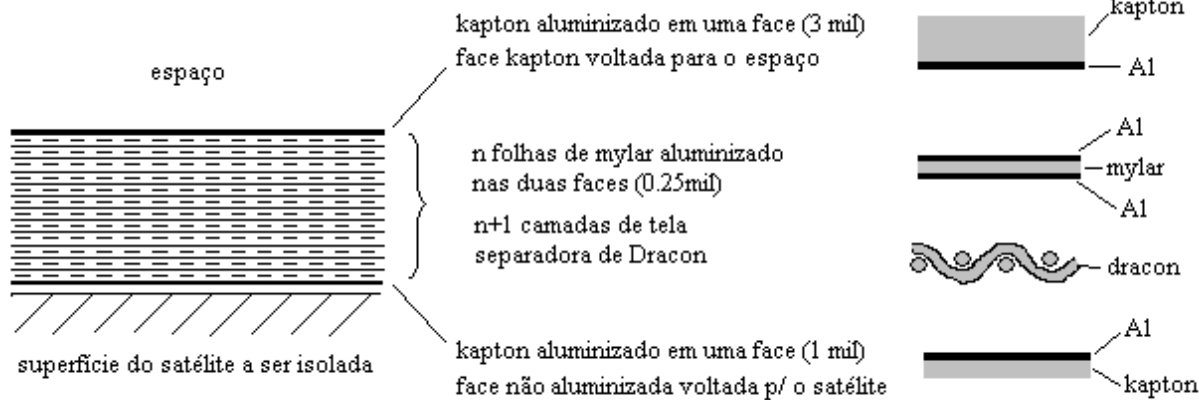


$A_p$  = área projetada (círculo)

$A_T$  = área total (esfera)

Revestimento	$\alpha_s$	$\epsilon_{IR}$	$\alpha/\epsilon$	T (°C)
OSR	0.07	0.80	0.09	<b>-122</b>
Tinta preta	0.95	0.87	1.09	<b>+12</b>
Tinta branca	0.23	0.86	0.27	<b>-73</b>
Alumínio polido	0.15	0.05	3.00	<b>+94</b>
Ouro polido	0.30	0.05	6.00	<b>+163</b>
Aço inox polido	0.42	0.11	3.82	<b>+117</b>

# Mantas Multicamadas Super-Isolantes (MLI)



$$\varepsilon^* = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \left( \frac{1}{n+1} \right)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon^*}{1 - \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_{ext}}}$$

$$\alpha_{eff} = \varepsilon_{eff} \frac{\alpha_{ext}}{\varepsilon_{ext}}$$

## Exemplo:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.04$$

$$n = 15$$

$$\alpha_{ext} = 0.4$$

$$\varepsilon_{ext} = 0.7$$

$$\varepsilon_{eff} = \mathbf{0.001} \text{ (teórico)}$$

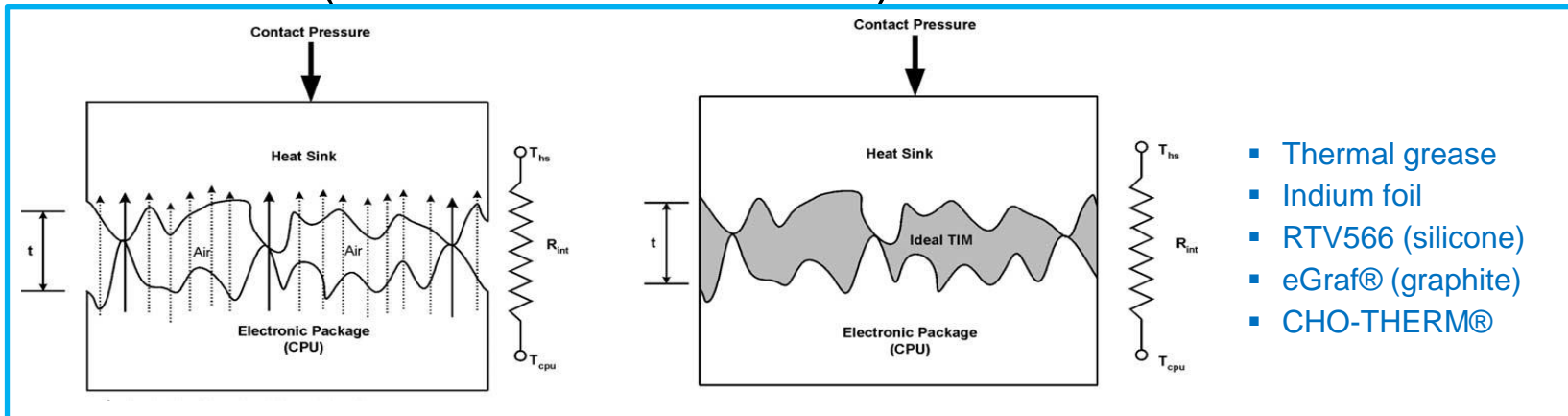
$$\alpha_{eff} = \mathbf{0.0006} \text{ (teórico)}$$



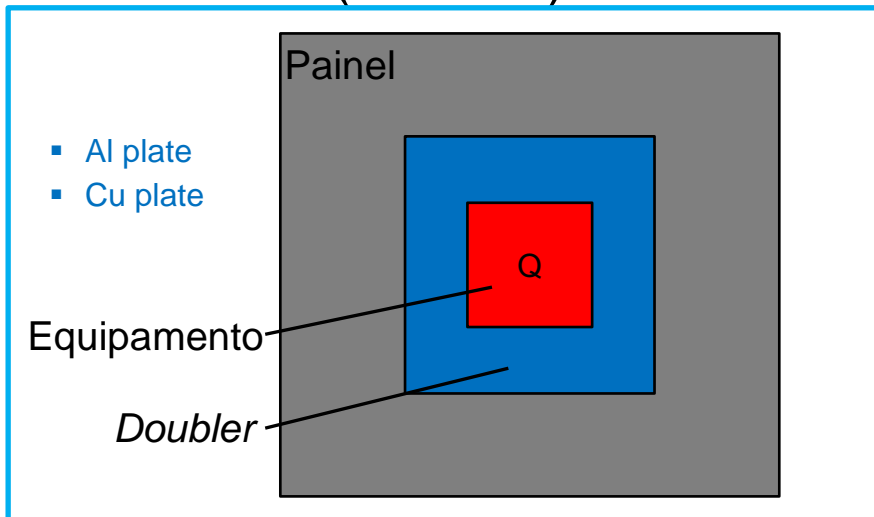
CBERS-4

# Interfaces de Contato - Montagens

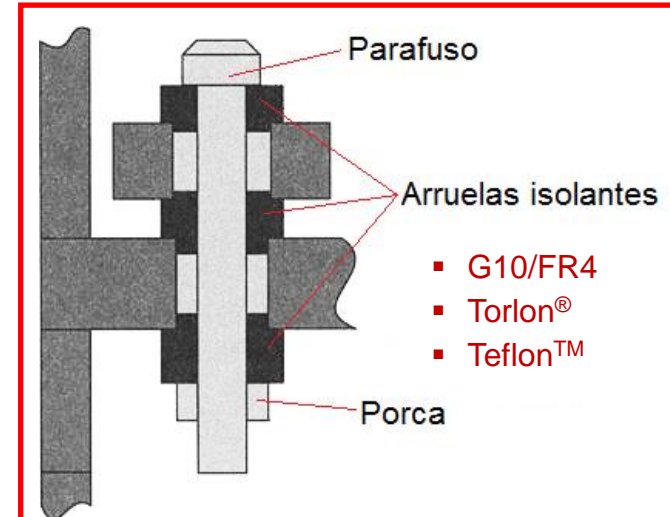
## Condutiva (materiais de interface)



## Condutiva (*doubler*)



## Isolante





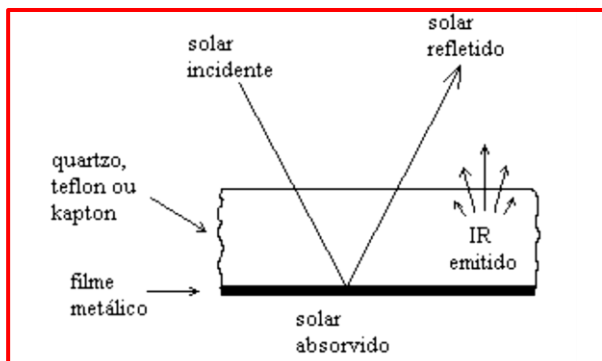
# Radiadores

## Radiadores em satélites:

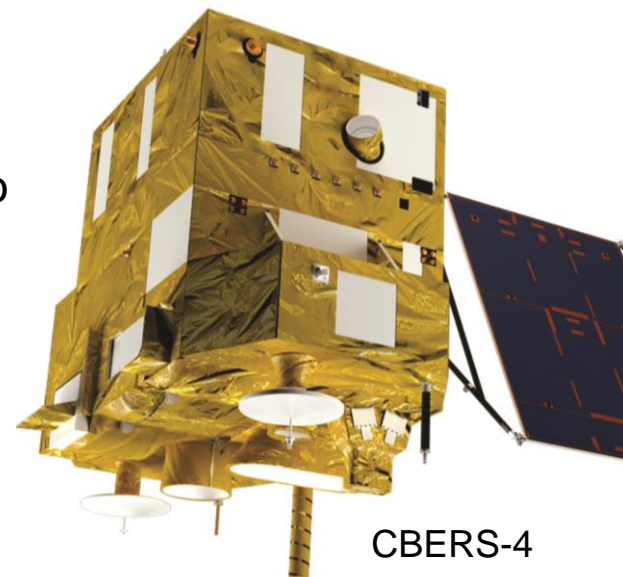
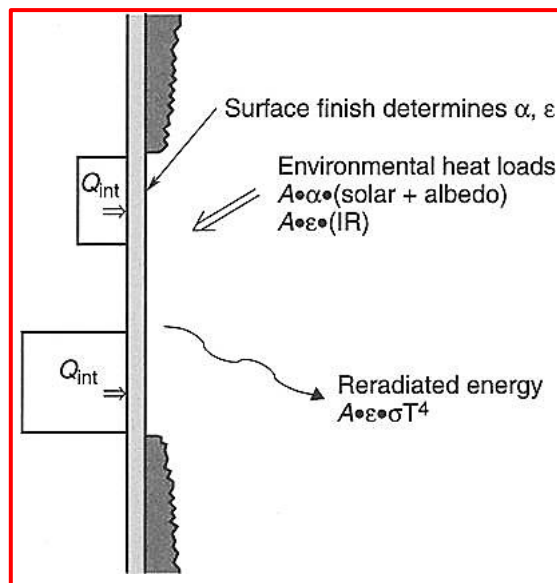
- Rejeitam o excesso de calor do satélite para o espaço
- Revestimento refletor solar (baixo  $\alpha_s$ )
- Revestimento com alto poder de emissão (alto  $\epsilon_{IR}$ )
- Importante: razão  $\alpha_s/\epsilon_{IR}$  baixa

Revestimento	$\alpha_s$	$\epsilon_{IR}$	$\alpha/\epsilon$
Tinta branca	0.23	0.86	0.27
OSR	0.07	0.80	0.09
Teflon, Ag	0.08	0.81	0.10

### Second-surface mirror



### Balanco térmico no radiador



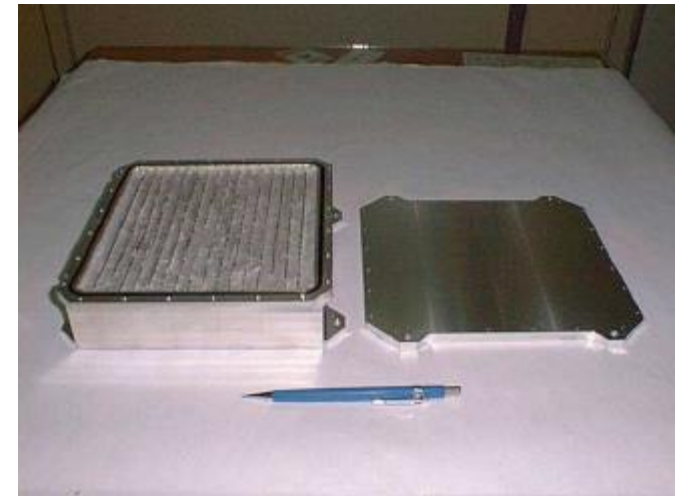
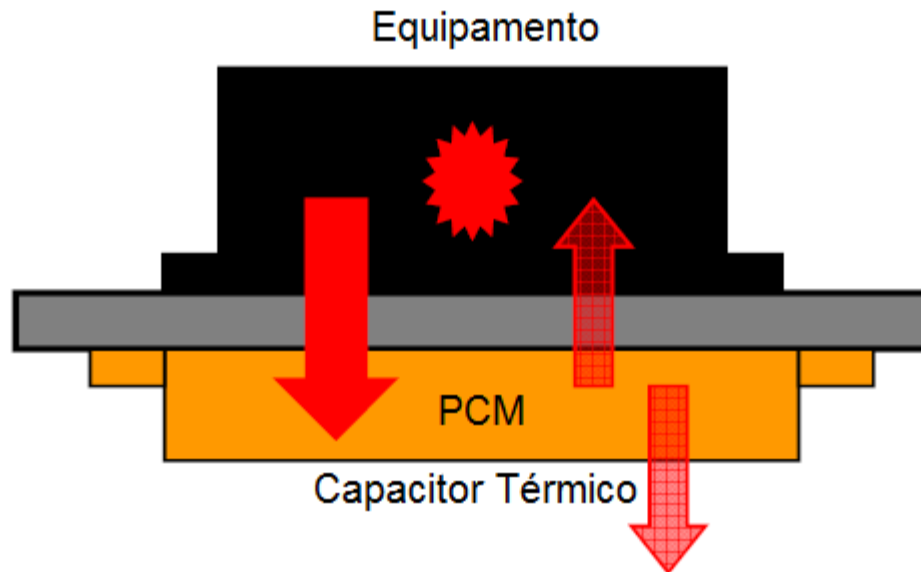
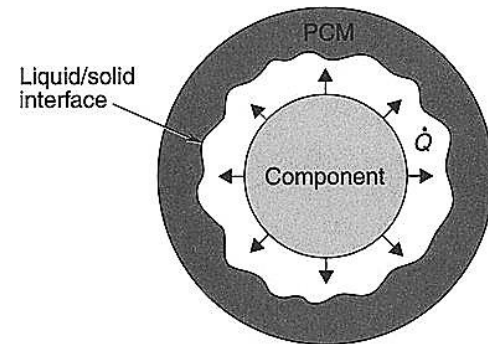
CBERS-4



ISS

# Capacitores Térmicos (PCM)

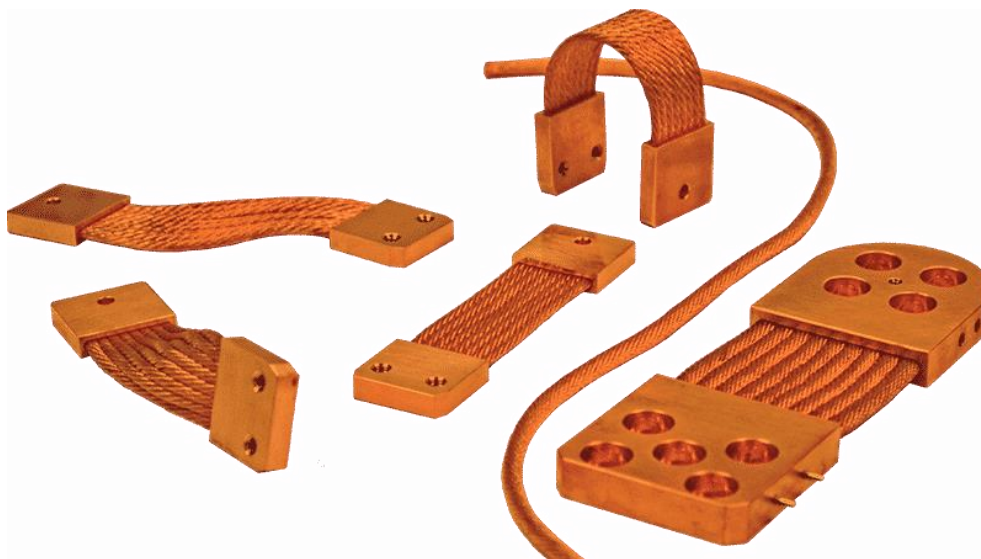
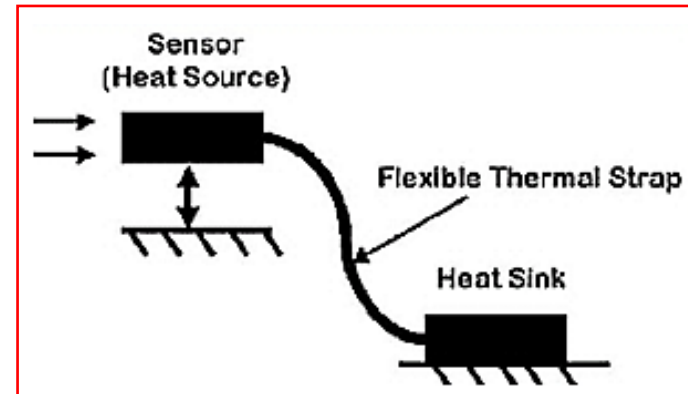
- Utilizados para absorver alta dissipação de calor em períodos curtos de tempo
- Utilizam calor latente para estabilizar a temperatura
- Material mais utilizado: parafina



# Thermal Straps

## Aplicações espaciais:

- Utilizados para drenar a dissipação de calor de equipamentos e sensores
- Flexíveis e altamente condutivos
- Não transmitem vibrações



cobre

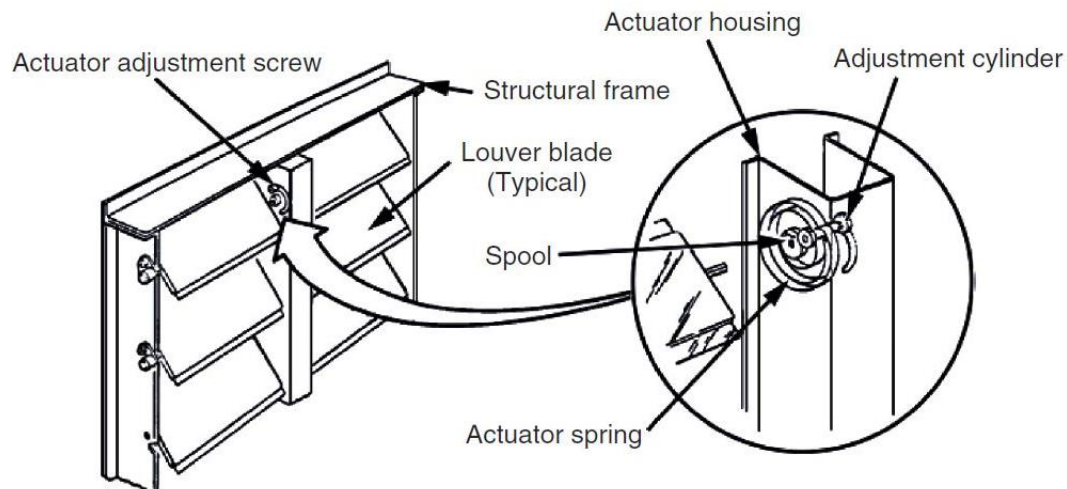


grafite

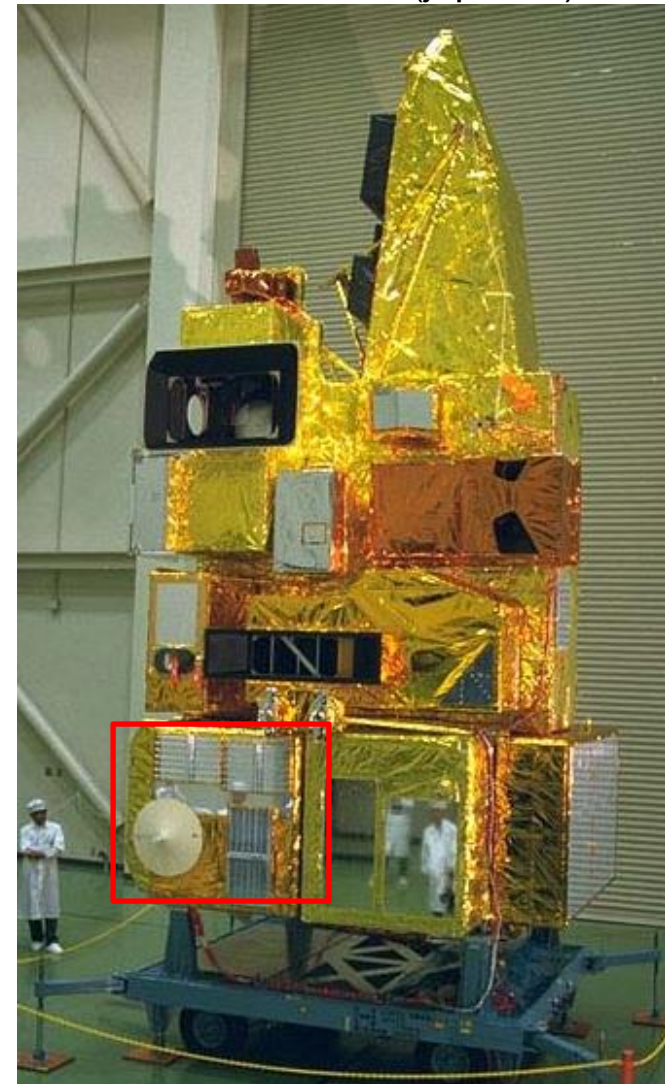
# Venezianas Térmicas

## Características das venezianas em satélites:

- Controlam a emissão de calor
- Emissividade efetiva variável com a abertura de aletas ( $0 - 90^\circ$ )
- Evitam que equipamentos/compartimentos fiquem muito frios
- Economizam energia elétrica
- Têm massa maior que radiadores comuns
- Confiabilidade menor que radiadores comuns



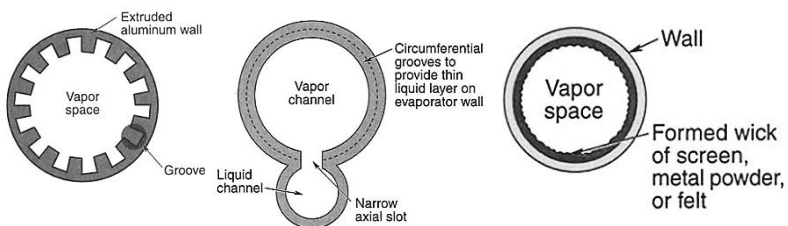
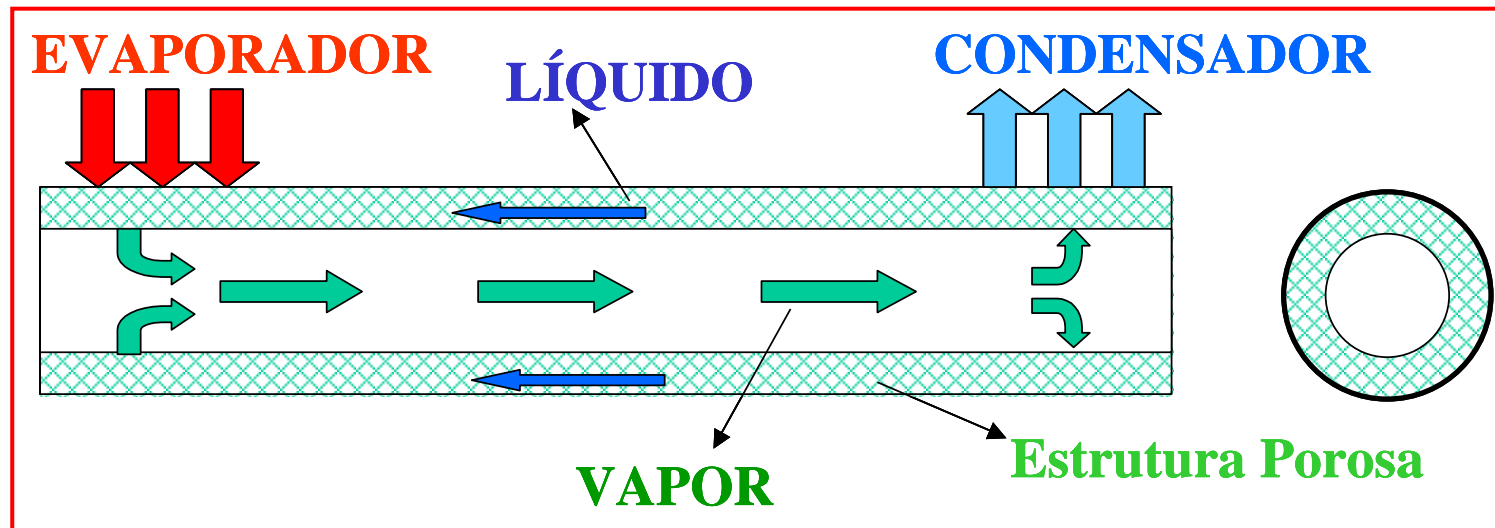
Satélite ADEOS (japonês)





# Tubos de Calor (HPs)

- Super-condutor de calor
- Transporte de calor pelo fluido de trabalho

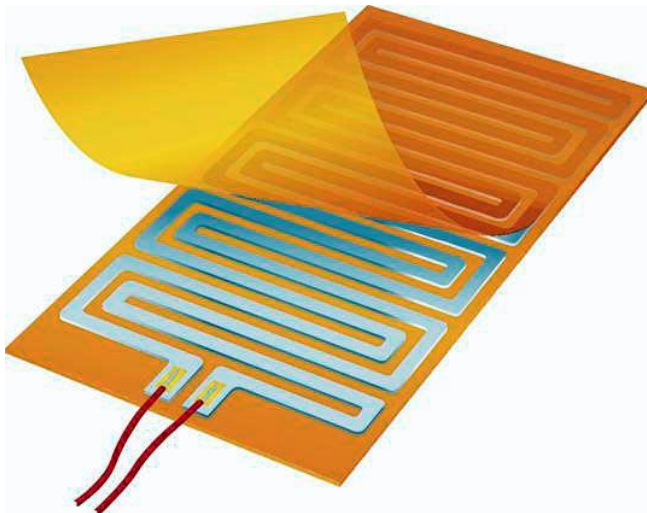




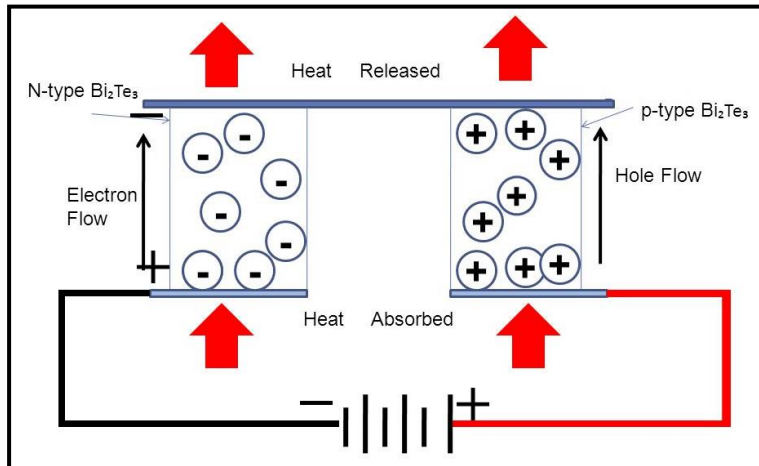
# Aquecedores Elétricos (*heaters*)

## Aquecedores usados em satélites:

- Planos e flexíveis
- Cobertos com *Kapton®*
- Várias formas e tamanhos



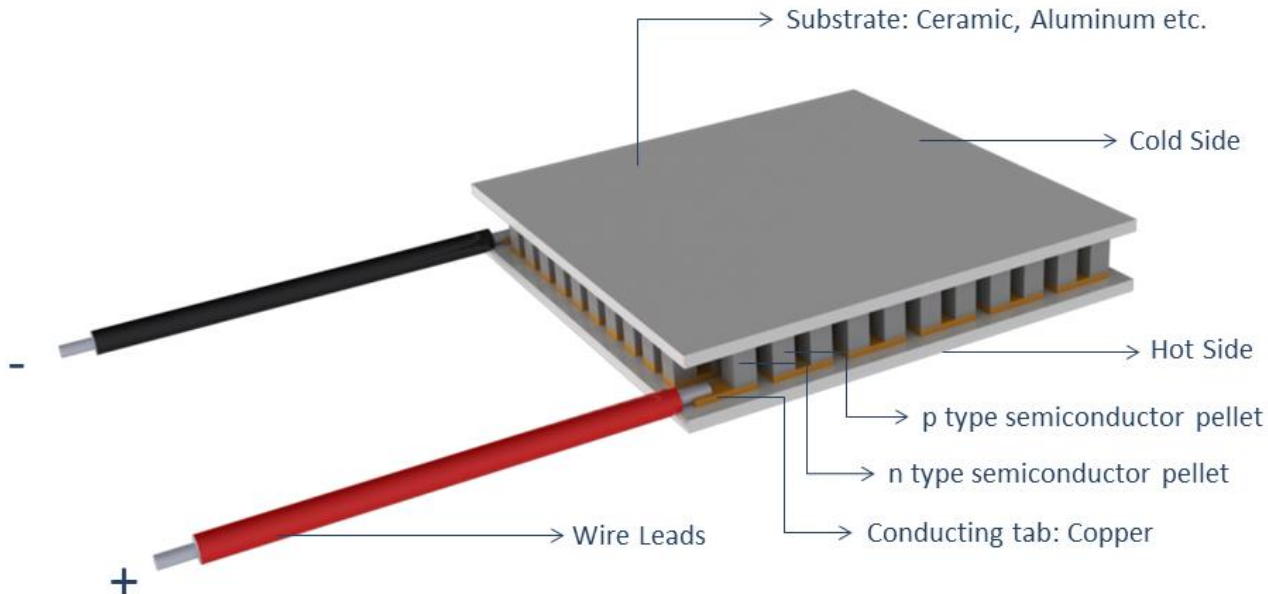
# Resfriadores Termoeelétricos (*TEC*)



- Utilizam o **Efeito Peltier** para transferir calor

## **Aplicações em satélites:**

- Resfriamento de equipamentos eletrônicos e sensores



# Sistemas Criogênicos

## Mais utilizados em aplicações espaciais:

- Radiador criogênico
- Resfriador termoelétrico (TEC-Peltier)
- *Cryocoolers* com ciclo *Stirling* (S)
- Sistema de evaporação aberta: ciclo J-T

### *Cryocoolers* com ciclo *Stirling*

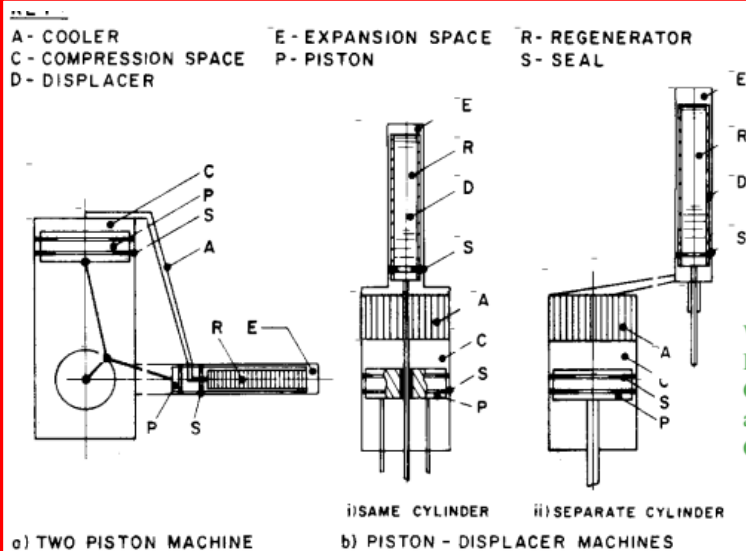
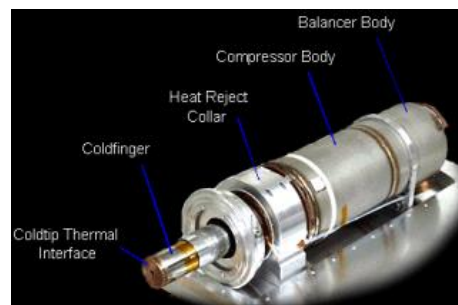
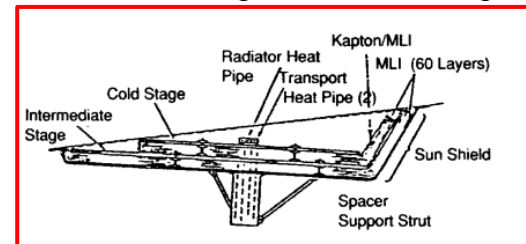


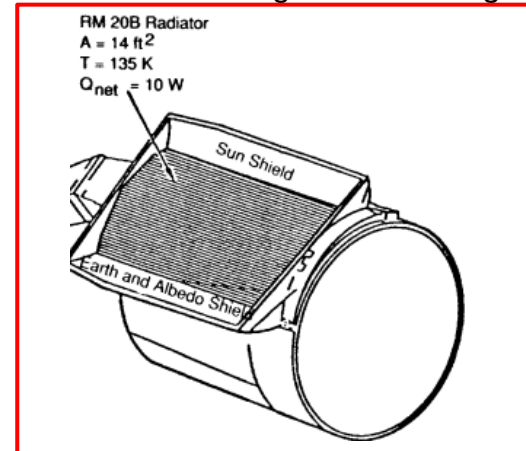
FIG. 3.11. Three basic arrangements for single-acting Stirling cryocoolers.



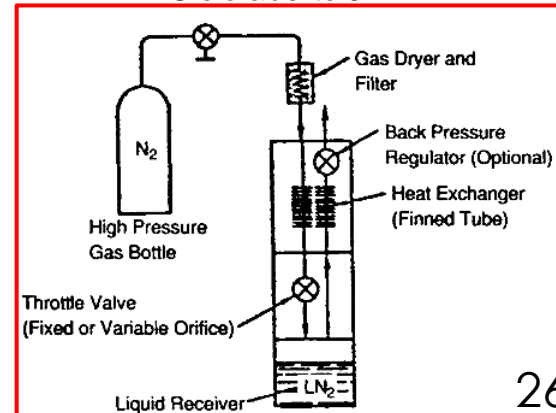
### Radiador criogênico multi-estágios



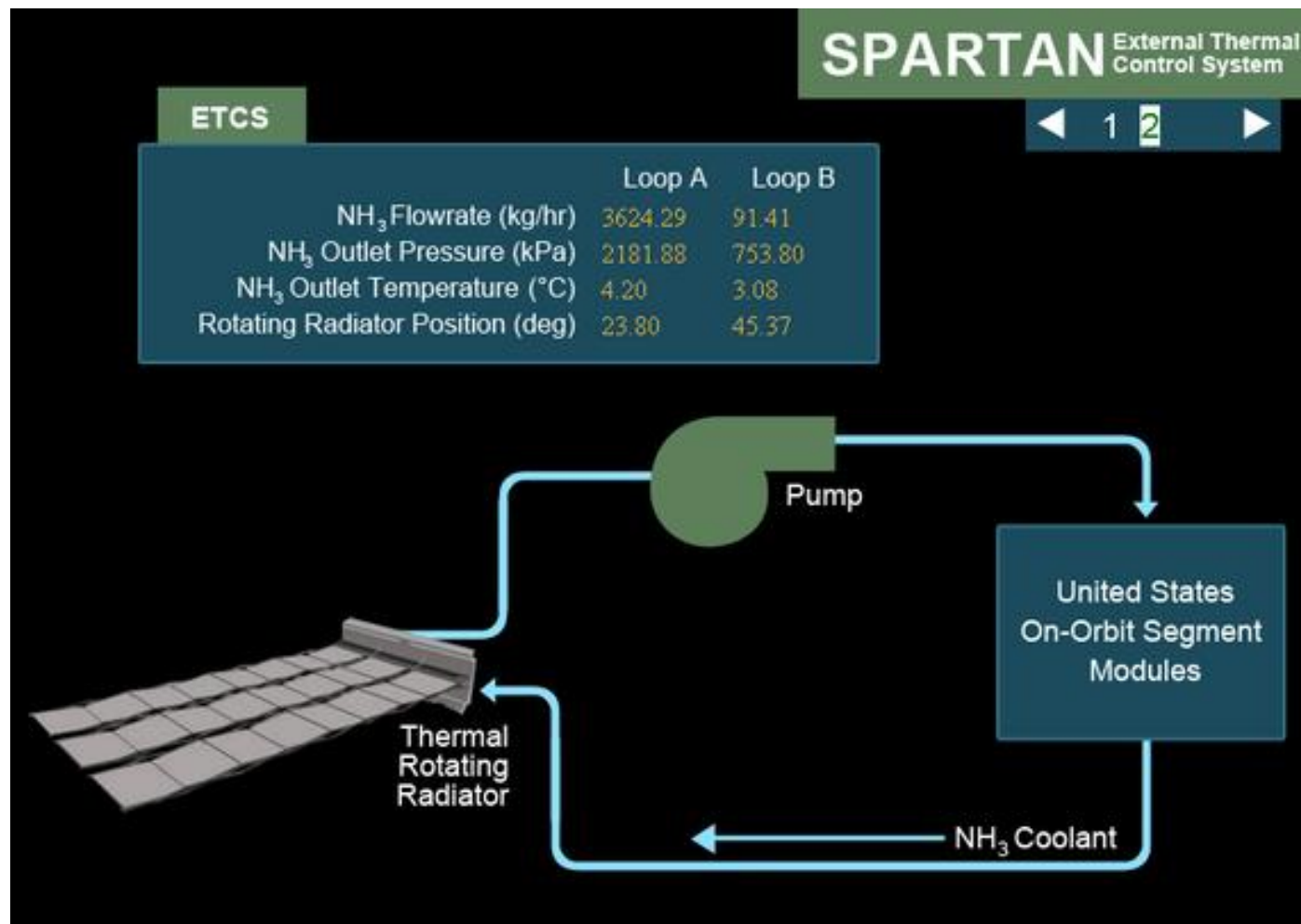
### Radiador criogênico *shielding*



### Ciclo aberto J-T






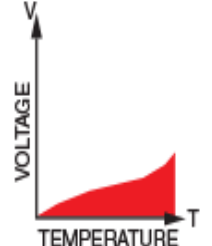
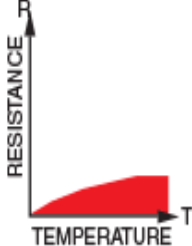
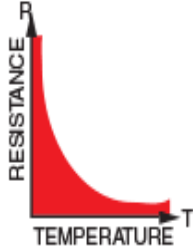
# Circuitos com Bombeamento Mecânico



# Sensores de Temperatura

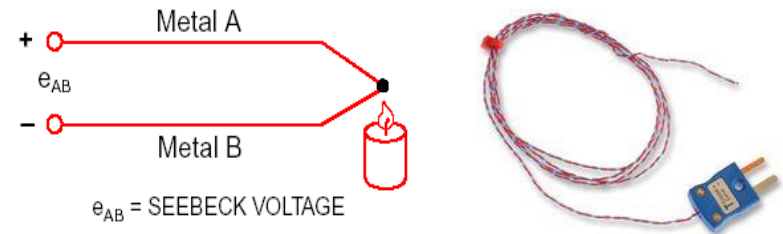
## Aplicações em satélites:

- **Monitoramento** de temperaturas
- **Controle** de circuitos de aquecedores

	Thermocouple 	RTD 	Thermistor 
			
<b>Advantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Self-powered</li> <li>Simple</li> <li>Rugged</li> <li>Inexpensive</li> <li>Wide variety</li> <li>Wide temperature range</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Most stable</li> <li>Most accurate</li> <li>More linear than thermocouple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>High output</li> <li>Fast</li> <li>Two-wire ohms measurement</li> </ul>
<b>Disadvantages</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Non-linear</li> <li>Low voltage</li> <li>Reference required</li> <li>Least stable</li> <li>Least sensitive</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Expensive</li> <li>Current source required</li> <li>Small <math>\Delta R</math></li> <li>Low absolute resistance</li> <li>Self-heating</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Non-linear</li> <li>Limited temperature range</li> <li>Fragile</li> <li>Current source required</li> <li>Self-heating</li> </ul>

## TIPOS DE SENSORES

### ☐ Termopares (Efeito Seebeck)



### ☐ RTD (resistência elétrica)



### ☐ Termistores (resistência elétrica)



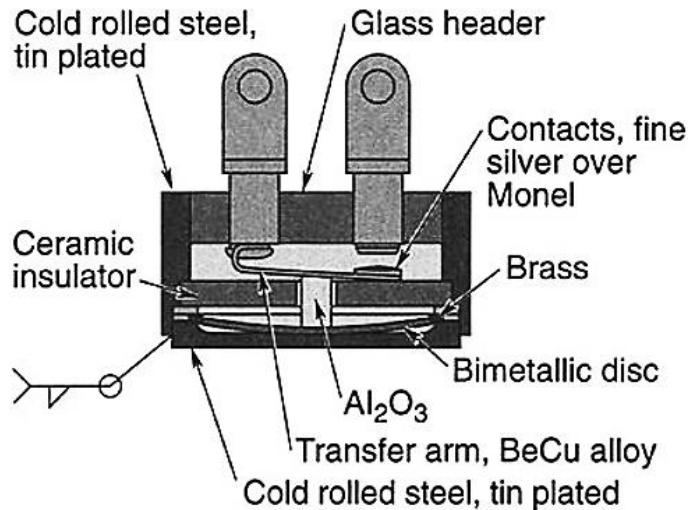
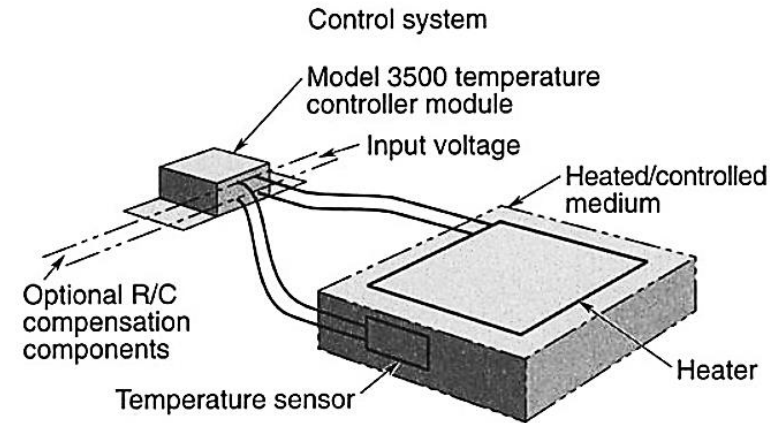


# Termostatos e Controladores de Estado Sólido

## Aplicações em satélites:

Controle automático de circuitos de aquecimento com *heaters*

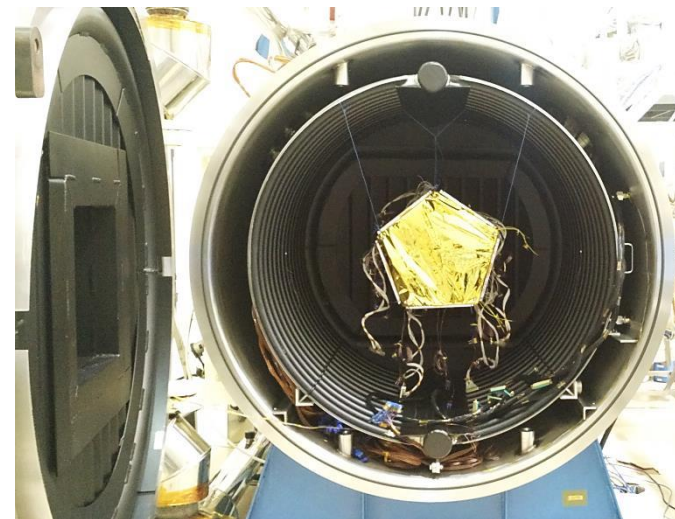
- Termostatos (ON/OFF)
- Controladores de estado sólido
- Controle por computador



**Honeywell**

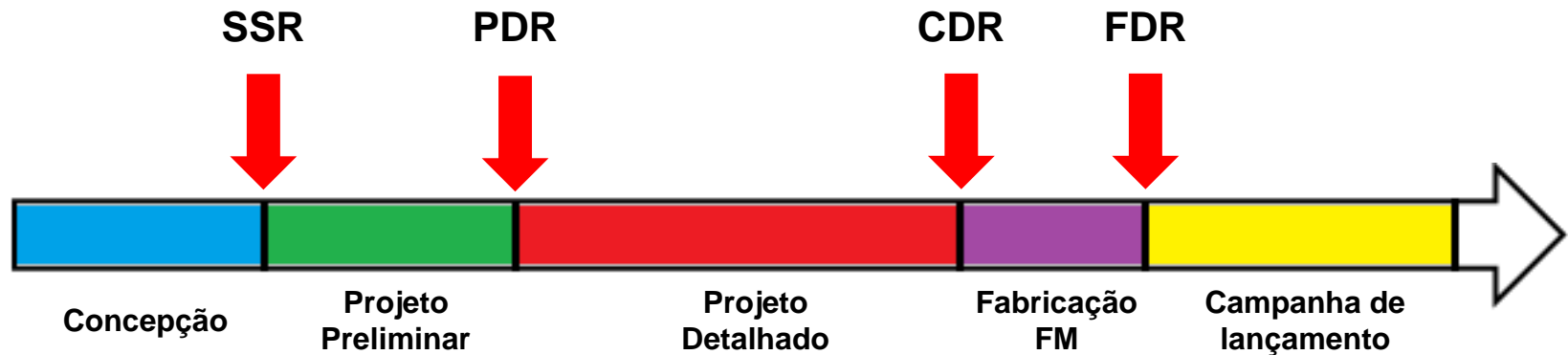
# Testes Térmicos

- ❑ **Ciclagem Térmica (TCT)**
  - equipamentos
- ❑ **Choque Térmico**
  - antenas, SAG, etc.
- ❑ **Burn-in**
  - equipamentos
- ❑ **Ciclagem Termica em Vácuo (TVT)**
  - equipamentos, satélite
- ❑ **Balanço Térmico (TBT)**
  - equipamentos, satélite

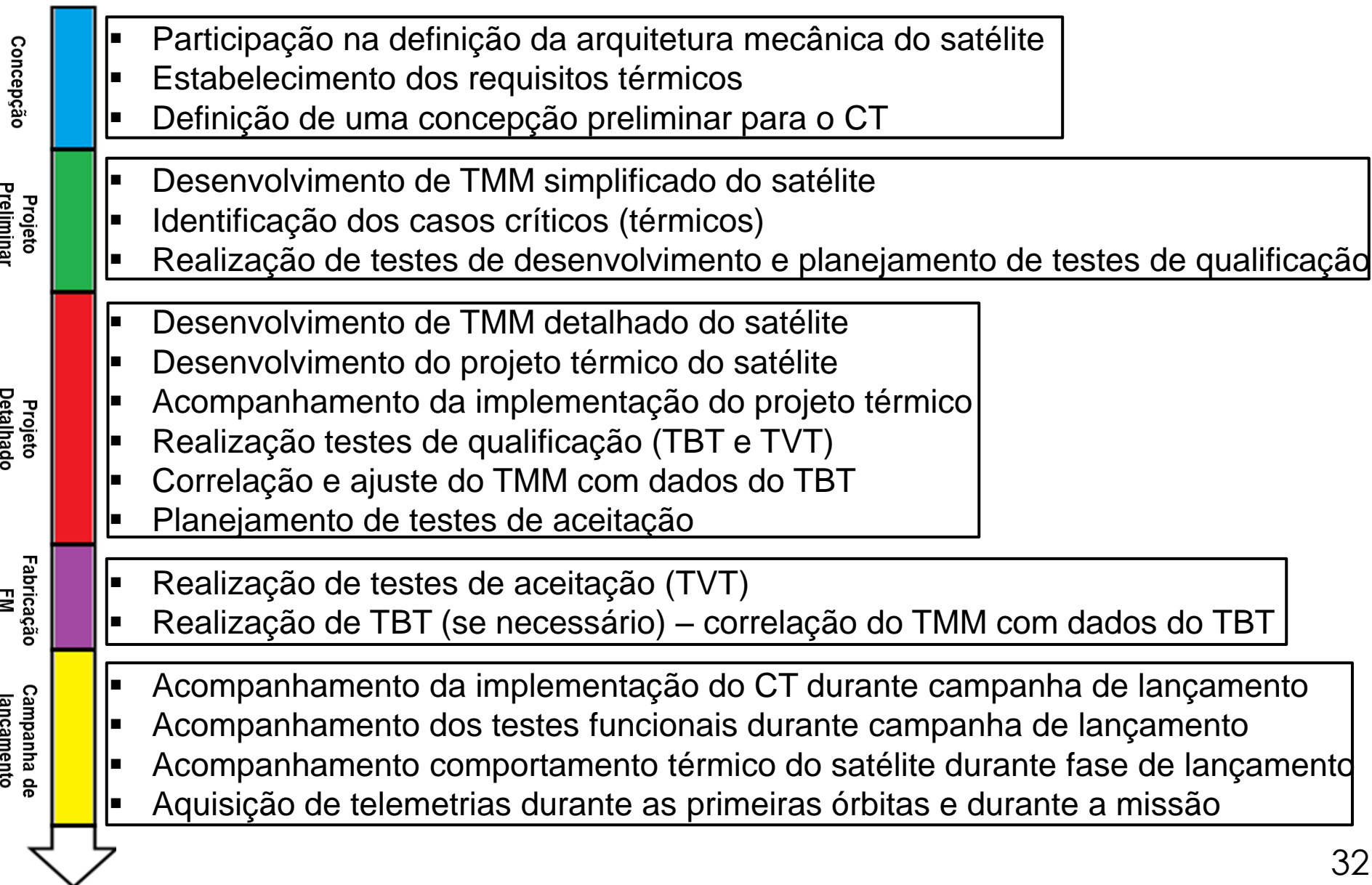


# Fases do projeto de um satélite

- ❑ O projetista de Controle Térmico deve participar de todas as fases e revisões do projeto do satélite



# Atividades do Projetista do Controle Térmico





MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

# ***Controle Térmico de Satélites***

**Rafael Lopes Costa**

[rafael.costa@inpe.br](mailto:rafael.costa@inpe.br)

(12)3208-6204 / (12)98813-7846

**Curso de Inverno 2018**

INTRODUÇÃO ÀS TECNOLOGIAS ESPACIAIS

São José dos Campos – SP, 17 de julho de 2018