

Subsistema de Controle Térmico

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**

2.8 – Subsistema de Controle Térmico: Conceitos básicos (*)

- A complexidade e a longa vida dos satélites atuais exigem uma análise detalhada, um projeto cuidadoso e testes extensivos que garantam que cada parte do mesmo permaneça dentro das suas faixas de temperatura em todos os modos de operação e ambientes.
- Os dados a serem considerados para esta análise são:
 - As temperaturas admissíveis para os equipamentos.
 - Os modos de operação ao longo da missão.
 - A energia absorvida do meio externo.
 - A energia gerada internamente.
 - A energia irradiada para o meio externo.
- Todo o calor contido no satélite deve ser, em última instância, emitido por radiação térmica para o espaço.
- As fontes de calor incluem:
 - Equipamentos eletrônicos
 - Sol
 - Terra
 - Motores de foguete
 - Reações químicas

2.8 – Subsistema de Controle Térmico: Modos de troca de calor

- A transferência de calor dentro do satélite ocorre por três modos distintos:
 - Radiação
 - Condução
 - Convecção
- **Radiação térmica:** *A energia emitida por uma superfície é proporcional à sua temperatura absoluta elevada à quarta potência.*

$$\text{Fluxo de Radiação} = A_a \sigma \varepsilon_a (T_a)^4 \text{ [W]}$$

- A_a = área da superfície “a” [m²]
- σ = constante de Stefan-Boltzman [5,67 x 10⁻⁸ W/m² K⁴]
- ε_a = emissividade da superfície “a” [-]
- T_a = temperatura absoluta da superfície “a” [K]

2.8 – Subsistema de Controle Térmico: Modos de troca de calor

- **Condução Térmica:** *A energia que flui entre duas regiões é proporcional à diferença da temperatura entre elas.*

$$\text{Fluxo de Condução} = \frac{KA_c (T_i - T_j)}{l} \quad [\text{W}]$$

- K = condutividade térmica do material [W/m K]
- A_c = seção transversal [m²]
- $(T_i - T_j)$ = diferença de temperatura entre os pontos i e j [K]
- l = distância entre os pontos i e j [m]

2.8 – Subsistema de Controle Térmico: Modos de troca de calor

- **Convecção Térmica:** *No vácuo espacial a convecção só ocorre em recipientes fechados onde exista um fluido (líquido ou gás) em movimento. Neste caso o fluxo térmico é proporcional à diferença de temperatura entre o fluido e a superfície que está cedendo ou absorvendo calor.*

$$\text{Fluxo de Convecção} = hA_{\omega} (T - T_f) \text{ [W]}$$

- h = coeficiente de transferência de calor [W/m² K]
- A_{ω} = área “molhada” [m²]
- $(T-T_f)$ = diferença de temperatura entre pontos de interesse e o fluido em circulação [K]

2.8 – Subsistema de Controle Térmico: Balanço energético de um satélite

Radiação Solar direta: $1.367 \pm 5 \text{ W/m}^2$

Infra-vermelho terrestre: $237 \pm 21 \text{ W/m}^2$

**Albedo: $30\% \pm 5\%$
da Radiação Solar
incidente na Terra**



Rejeição de calor para o espaço

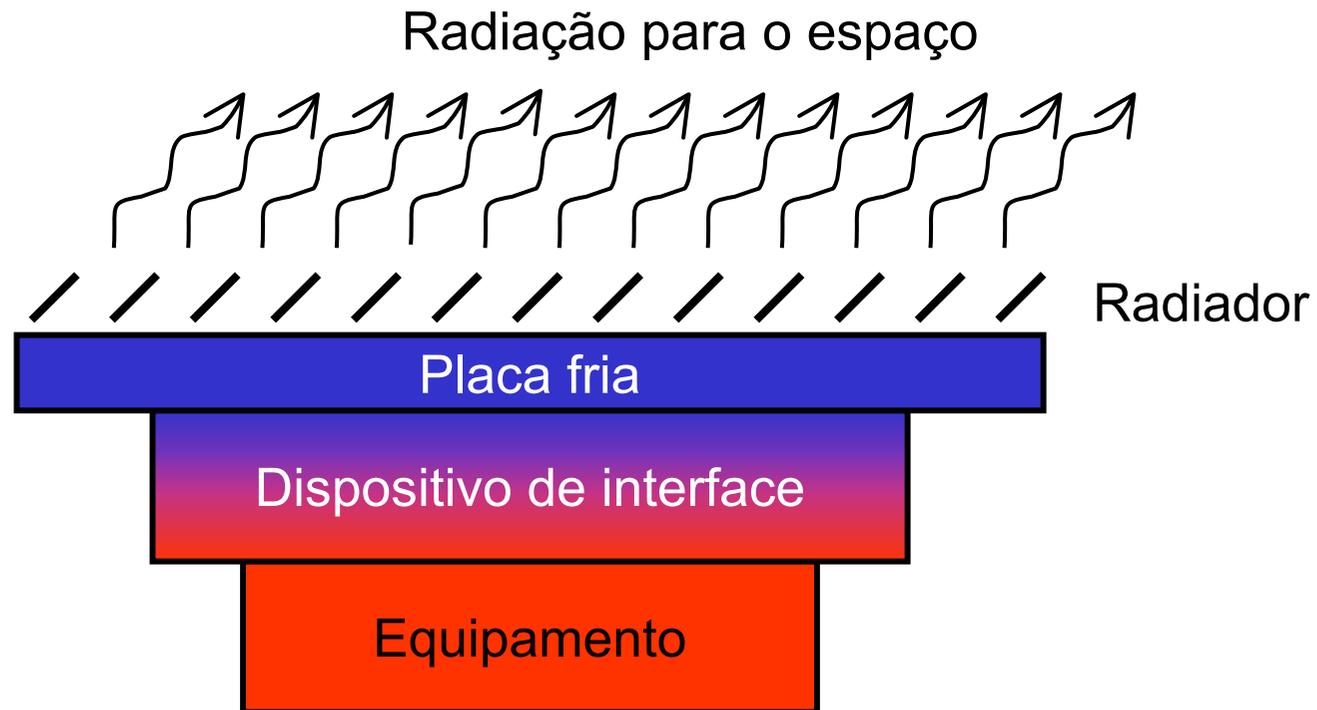
2.8 – Subsistema de Controle Térmico: Temperaturas típicas

- **O ambiente espacial (Kelvin = Celsius + 273,15)**
 - Fonte quente: Sol a 5700 K
 - Sumidouro: Espaço a 4 K
- **Temperaturas de uma esfera no espaço [°C]:**
 - Tinta Branca: -58
 - Tinta Negra: 6
 - Alumínio Polido: 94
 - Ouro Polido: 223
- **Requisitos típicos de temperaturas de operação [°C]:**
 - Eletrônica digital: 0 a 50
 - Eletrônica analógica: 0 a 40
 - Baterias: 10 a 20
 - Rodas de reação, motores elétricos: 0 a 50
 - Detectores infravermelhos: -269 a -173
 - Painéis solares: -100 a 125
 - Detectores de partículas: -35 a 0

● Passiva

- Utiliza radiadores, placas condutoras (“doublers”), recobrimentos superficiais, isoladores, absorvedores, persianas, tubos de calor, uma configuração favorável do satélite, o lay-out dos equipamentos e as propriedades térmicas da estrutura.

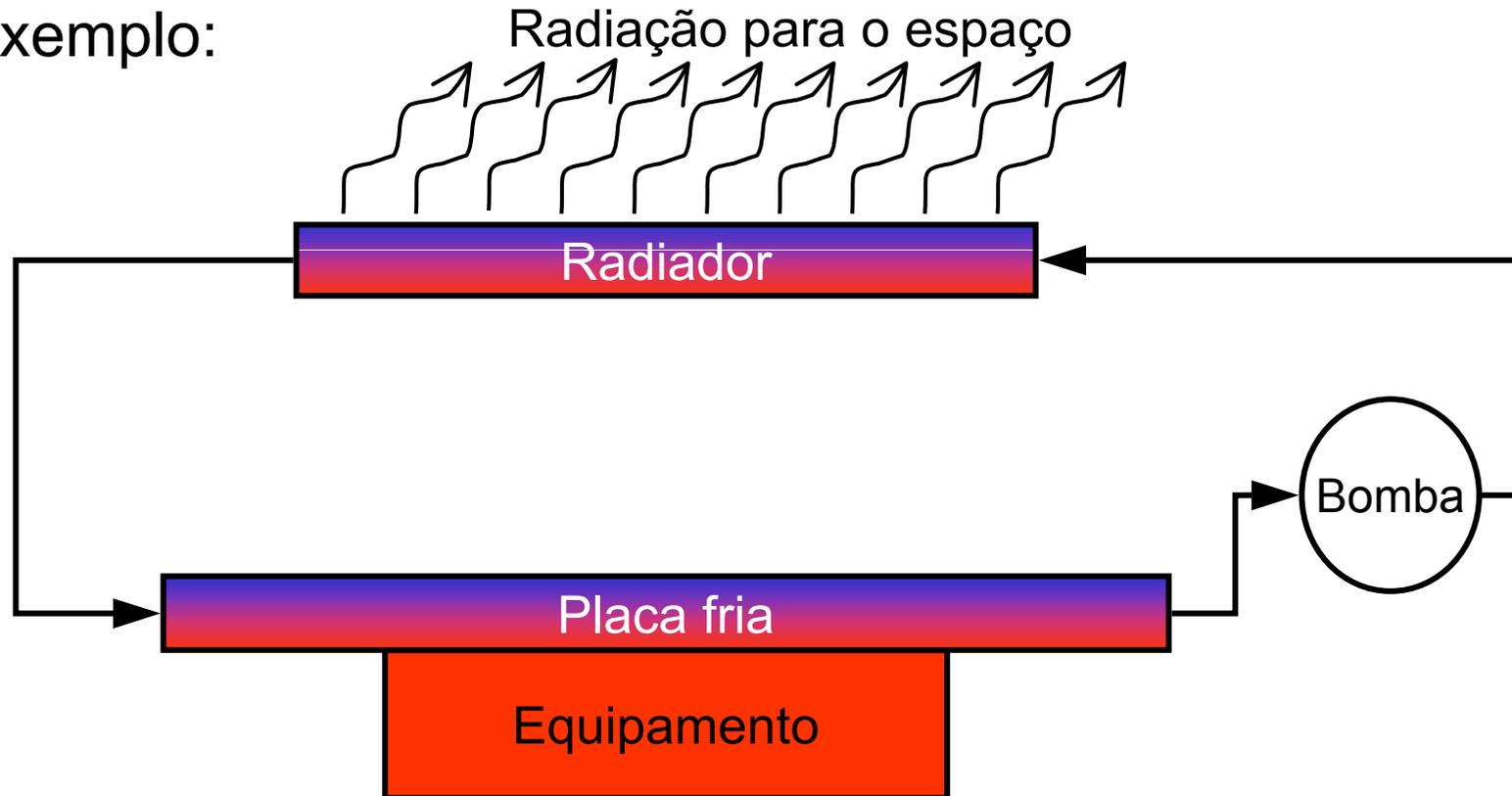
Exemplo:



● Ativa

- Utiliza aquecedores comandáveis, tubos de calor de condutância variável e sistemas de bombeamento mecânico com circuitos dotados de irradiadores e trocadores de calor.

Exemplo:



2.8 – Subsistema de Controle Térmico: Exemplo, [10]



Satélite recoberto por manta de MLI (“Multi Layer Insulation”)

2.8 – Subsistema de Controle Térmico: Absortividade e Emissividade, [3]

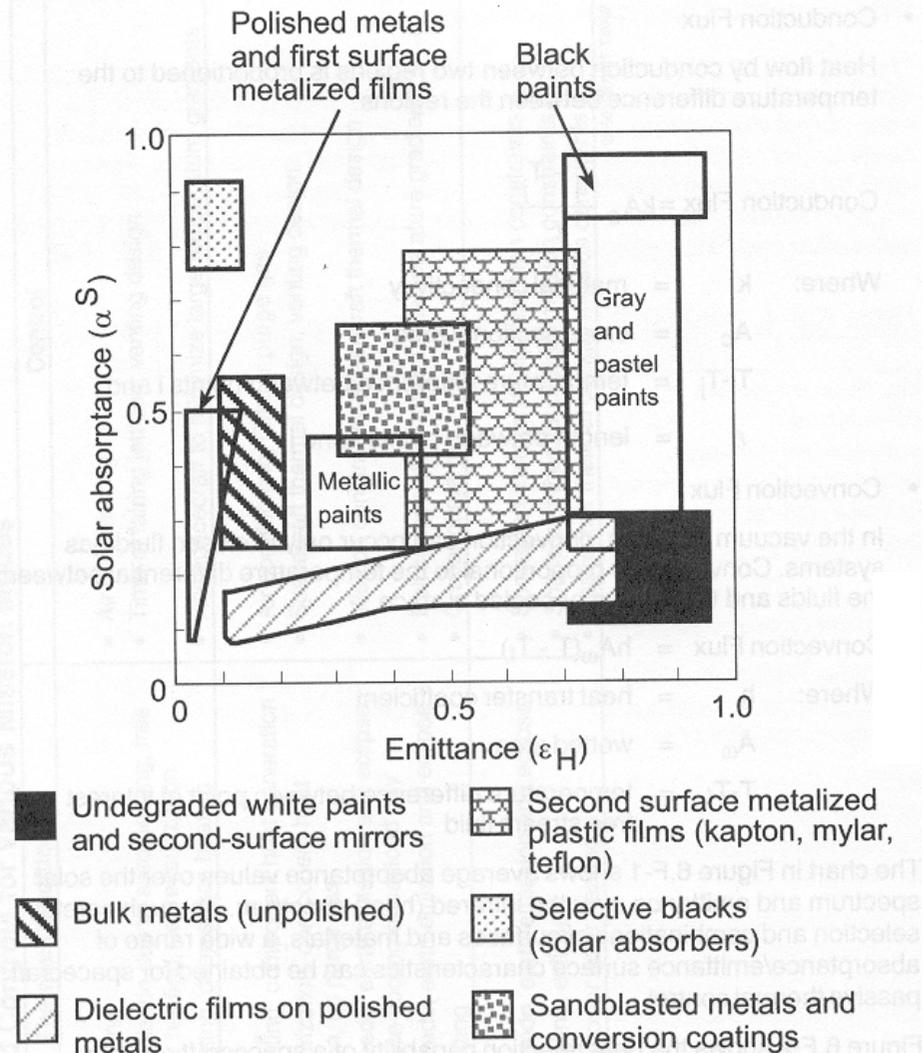
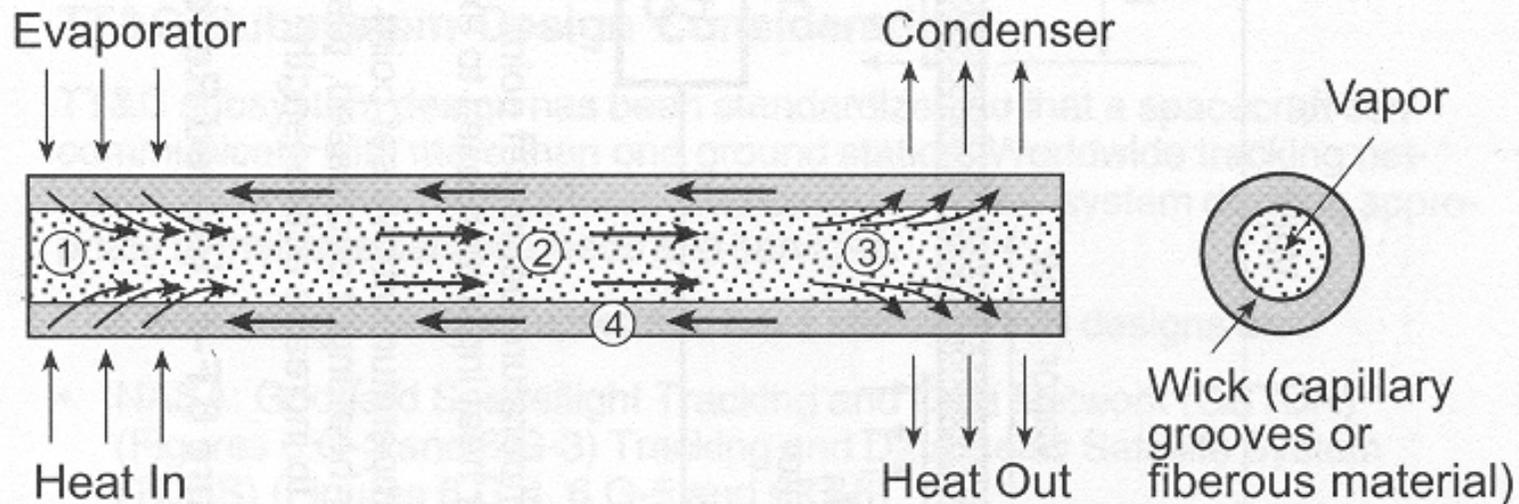


Figure Solar Absorptance and Infrared Emittance of Common Spacecraft Materials

- **Absortividade:** É a fração da energia incidente que uma substância absorve.
- **Emissividade:** É a razão entre a energia emitida por uma substância e a emitida por um “corpo negro” a uma dada temperatura.

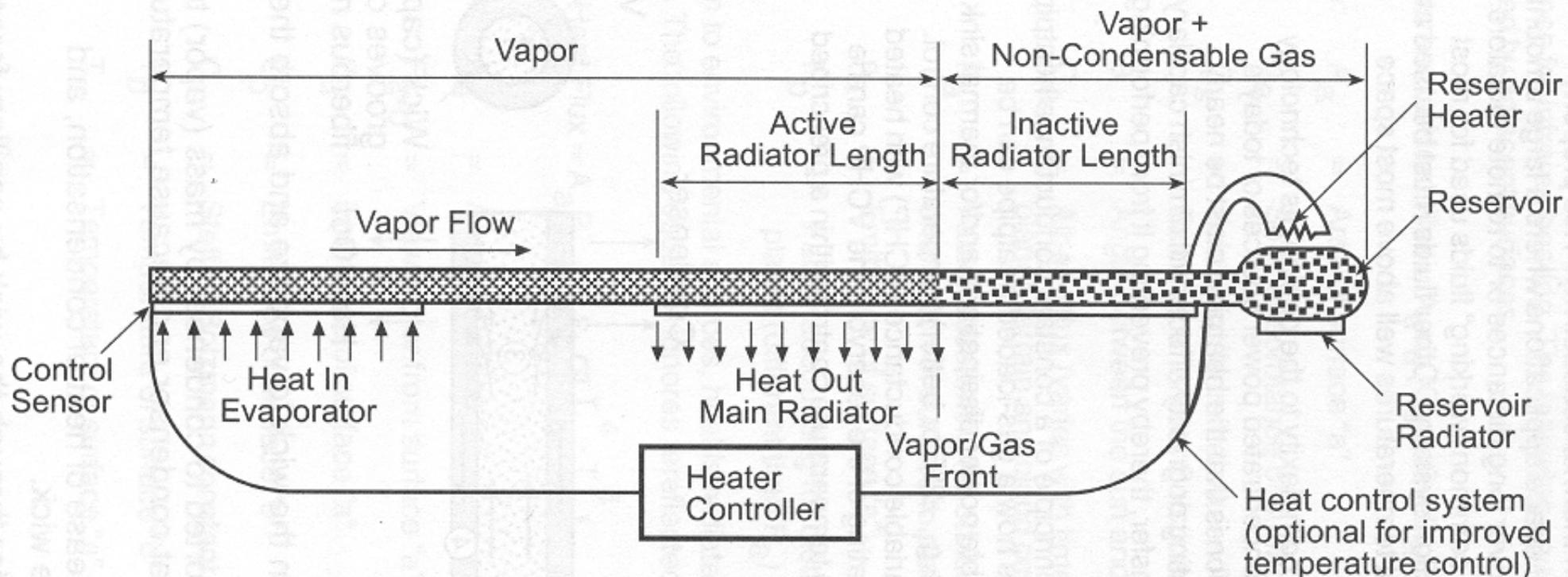
2.8 – Subsistema de Controle Térmico: Tubo de calor simples, [3]



- ① Heat input causes liquid in the wick to vaporize and absorb the heat of vaporization.
- ② Thermal energy is transported to condenser by mass (vapor) transport. (Vapor pressure is lower at condenser end because temperature is slightly lower.)
- ③ Vapor condenses with release of heat of condensation, and condensate collects in the wick.
- ④ Liquid returns to evaporator through the wick by capillary force.

Figure Principles of Simple Heatpipes

2.8 – Subsistema de Controle Térmico: Tubo de calor de condutância variável, [3]



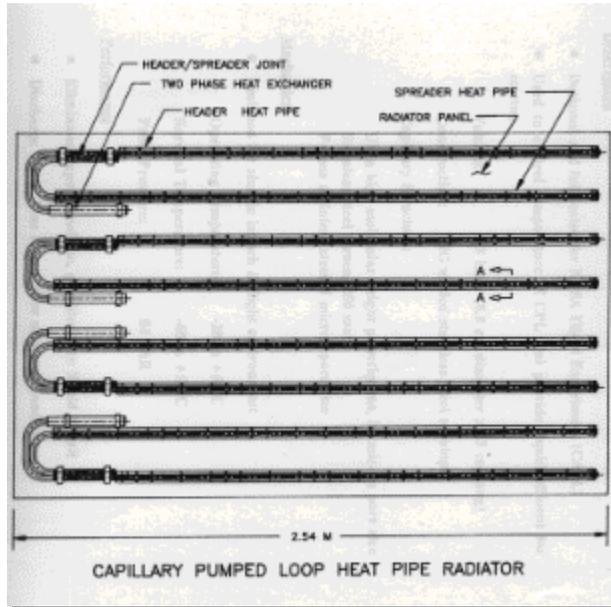
- Sensor temperature below set point
Reservoir heat input increased to expand gas into the heat pipe and reduce active radiator length
- Sensor temperature above set point
Reservoir heat input decreased, reservoir cools by radiation and gas moves towards the reservoir to increase active length

Figure **Heated Reservoir Variable Conductance Heatpipe**

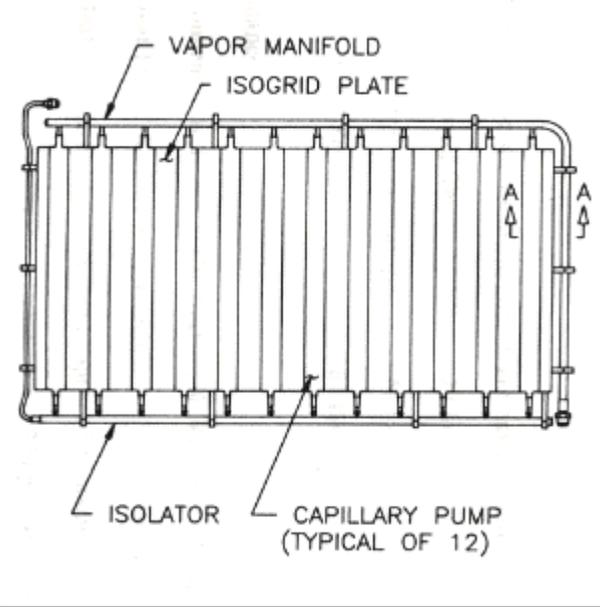
2.8 – Subsistema de Controle Térmico: Exemplos de Tubos de Calor, [12]



Tubo de Calor



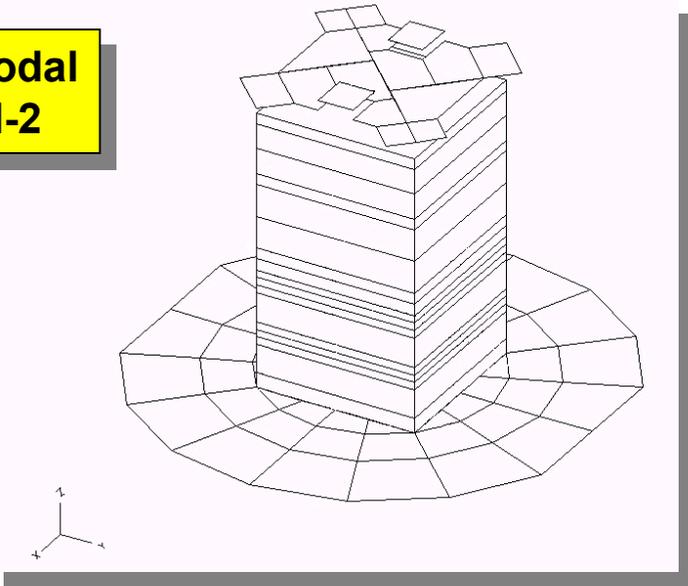
Radiador



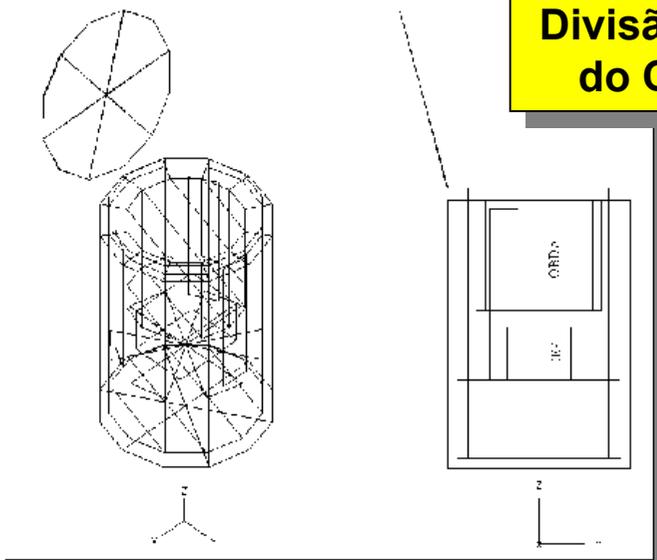
“Cold Plate”

2.8 – Subsistema de Controle Térmico: Exemplos de análise

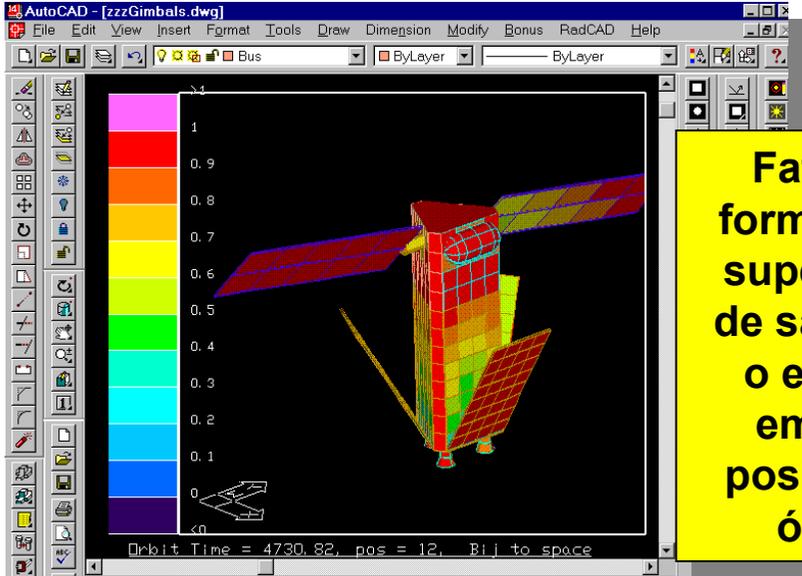
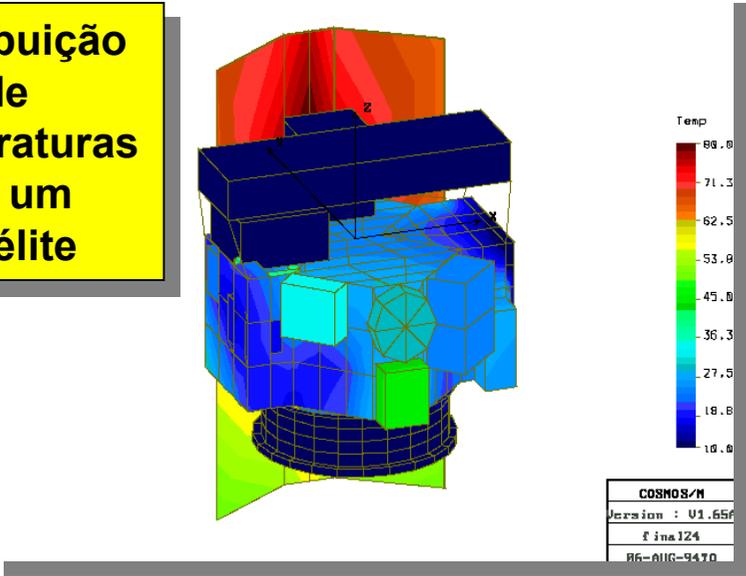
Divisão nodal do SACI-2



Divisão nodal do CIMEX



Distribuição de temperaturas em um satélite



Fator de forma entre superfícies de satélite e o espaço em uma posição da órbita