



Ciclo de Palestras Sobre Controle Térmico de Satélites

Tubos de Calor

Dr. Valeri Vlassov

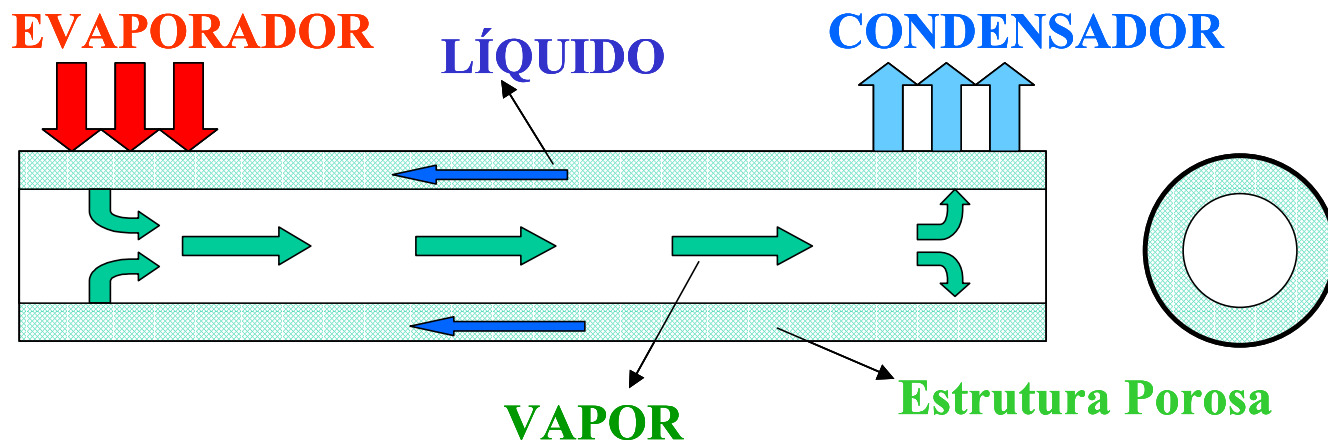
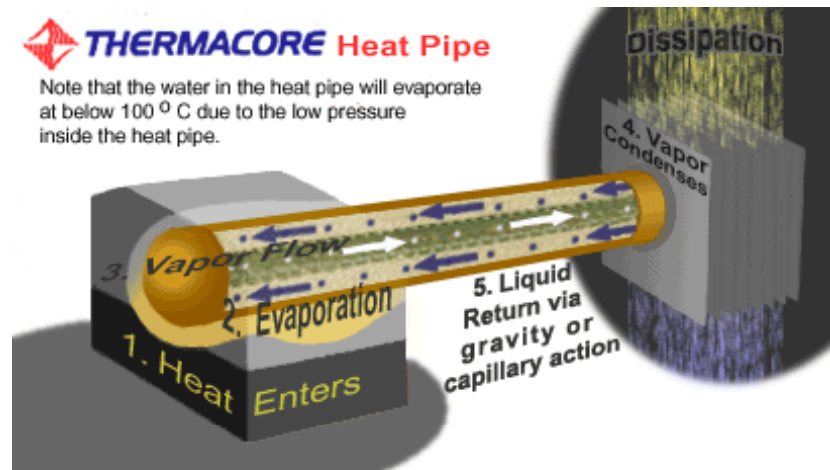
Divisão de Mecânica Espacial e Controle - DMC

INPE-2003

Tubo de Calor, O que é isso ?

THERMACORE Heat Pipe

Note that the water in the heat pipe will evaporate at below 100 °C due to the low pressure inside the heat pipe.



Isso é
“supercondutor de calor” !

Fonte: SMAP Workshop, T.Kaya, 2003

Um Pouco de história

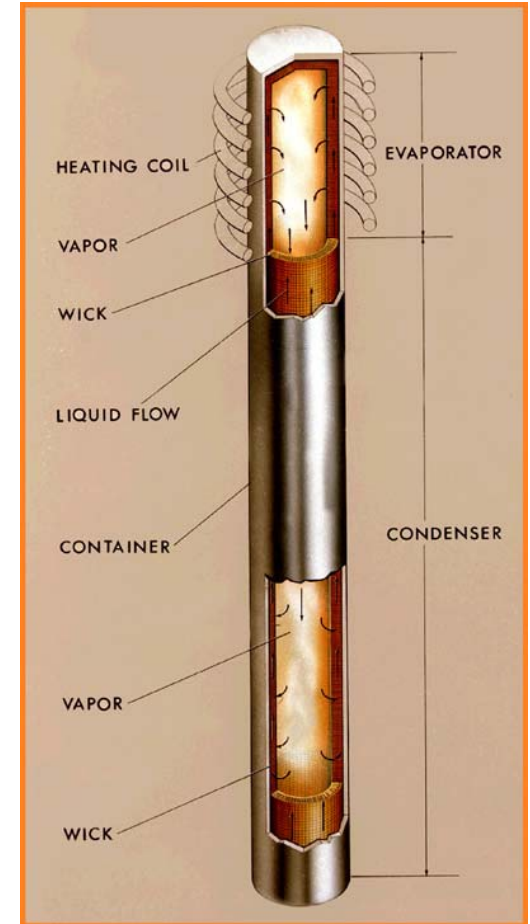


A Idéia:

21/12 de 1942,
 R.S. Gaugler,
 General Motors,
 US Patent N 2350348
 de 06/06 de 1944

Teoria, Experimento e Nome:

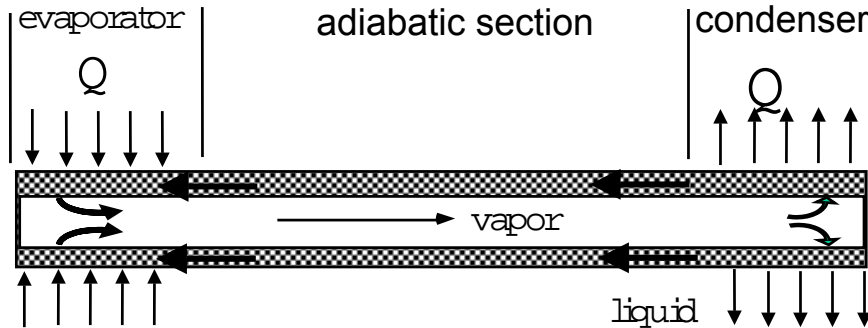
24 de Julho de 1963,
 Los Alamos National
 Laboratory,
 George Grover



"Heat Pipe" - HP

Fonte: web-página do LANL

Como funciona? Parâmetros importantes



Do fluido:

- $\sigma(T)$ - Tensão superficial, N/m
- $\lambda(T)$ - Calor latente, J/kg
- $\mu(T)$ - Viscosidade, Pa·s
- $\rho_v(P)$ - Densidade de vapor, kg/m³

Do tubo & estrutura porosa:

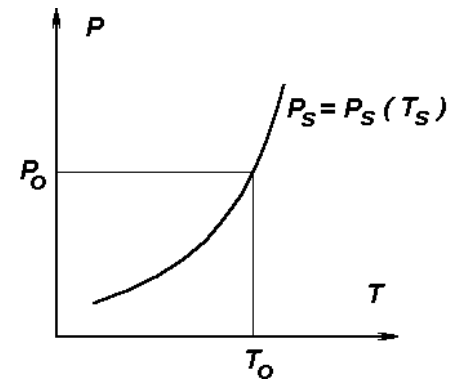
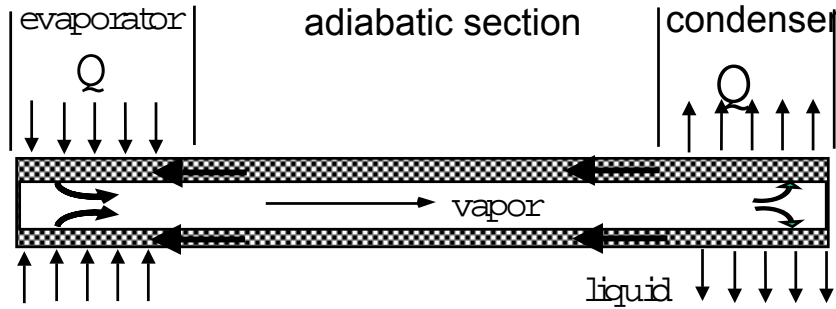
- r - Raio efetivo do poro, m
- ε - Porosidade
- K - Permeabilidade, m²
- D - Diâmetro do tubo, m

De ambos:

- θ - ângulo de molhalidade

Fonte: B.Yendler, Lockheed

Como funciona? Processos básicos



$$\frac{dP_s}{dT_s} = \frac{\rho_v \lambda}{T_s} \quad \text{Clausius-Clapeyron}$$

$$Q = \lambda \dot{m} \quad \text{Balanço de energia}$$

$$\Delta P = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r} \quad \text{Lei de Young-Laplace}$$

$$\dot{m} = \frac{\alpha A}{1 - 0.5\alpha} \sqrt{\frac{M}{2\pi R}} \left(\frac{P_v}{\sqrt{T_v}} - \frac{P_{s,l}}{\sqrt{T_l}} \right)$$

Evaporação; Condensação

$$P = \rho_v RT \quad \text{Lei do gás ideal}$$

$$\frac{dP}{dz} = - \frac{\mu \dot{m}}{A \rho \varepsilon K} \quad \text{Lei de Darcy}$$

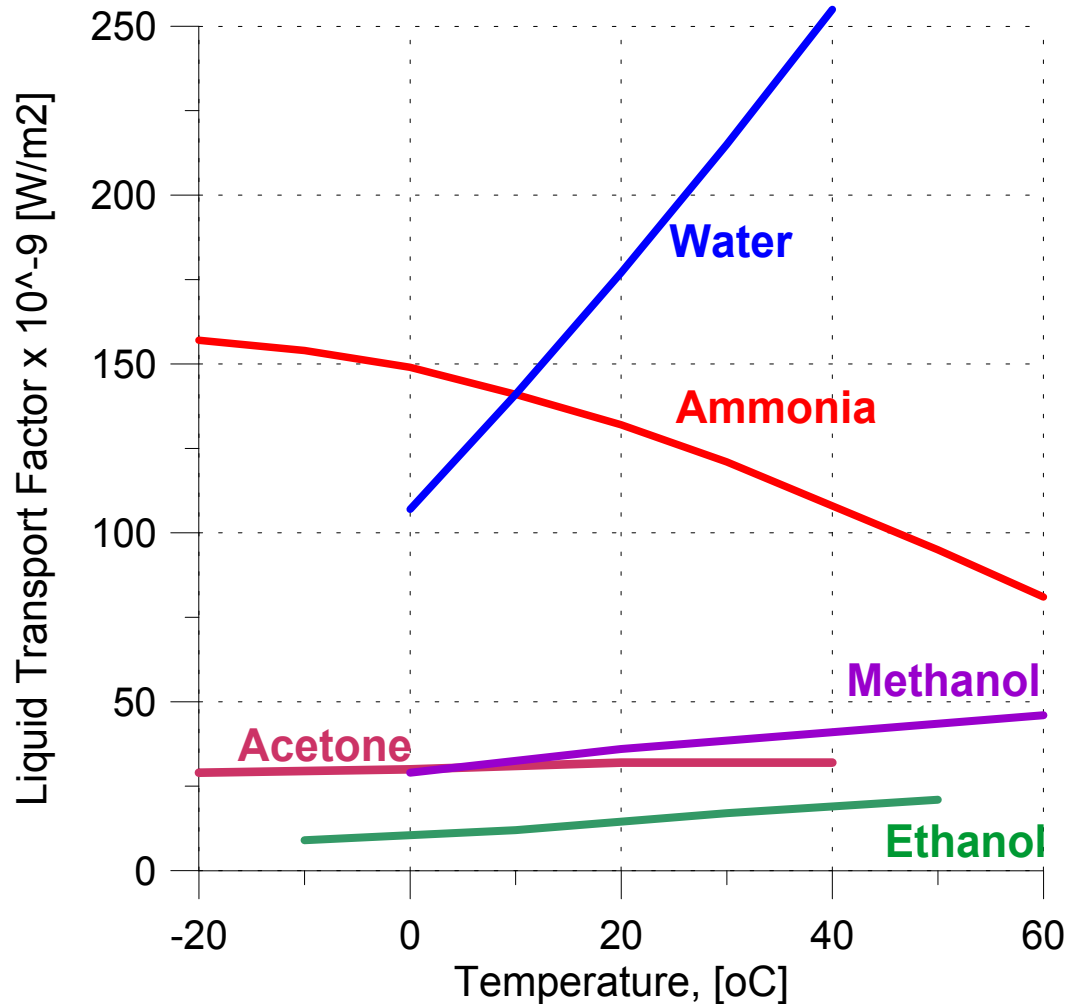
$$K = \frac{D^2}{2(f \text{Re})}; \quad (f \text{Re}) = \varphi(r, \varepsilon)$$

Fluidos de trabalho

<i>FLUIDO</i>	<i>PONTO TRIPLO (° C)</i>	Ponto de Ebulição (° C)	<i>FAIXA DE APLIC. (° C)</i>
Helium	- 271	- 261	-271 to -269
Nitrogen	- 210	- 196	-203 to -160
Ammonia	- 78	- 33	-60 to 100
Acetone	- 95	57	0 to 120
Methanol	- 98	64	10 to 130
Flutec PP2	- 50	76	10 to 160
Ethanol	- 112	78	0 to 130
Water	0	100	30 to 200
Toluene	- 95	110	50 to 200
Mercury	- 39	361	250 to 650
Sodium	98	892	600 to 1200
Lithium	179	1340	1000 to 1800
Silver	960	2212	1800 to 2300

Fonte: web-página do Thermacore

Fluidos de trabalho: “Liquid Transport Factor”



$$N = \frac{\sigma \lambda \rho}{\mu}$$

Outros critérios:

- Baixa toxicidade
- Baixa pressão
- Purificação mais simples

Estruturas porosas

Crítérios:

Tubo ranhurado

Pó sinterizado

Tela de mexa

Micro-fibra sintetizado

Poros pequenos

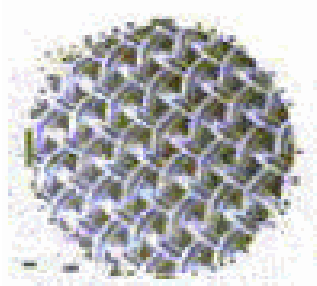
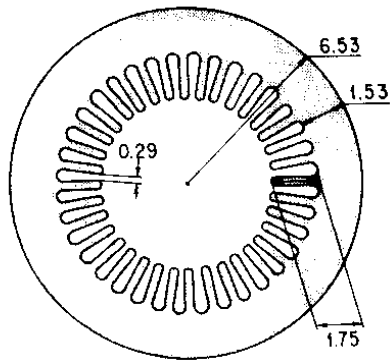
Alta permeabilidade

Alta porosidade

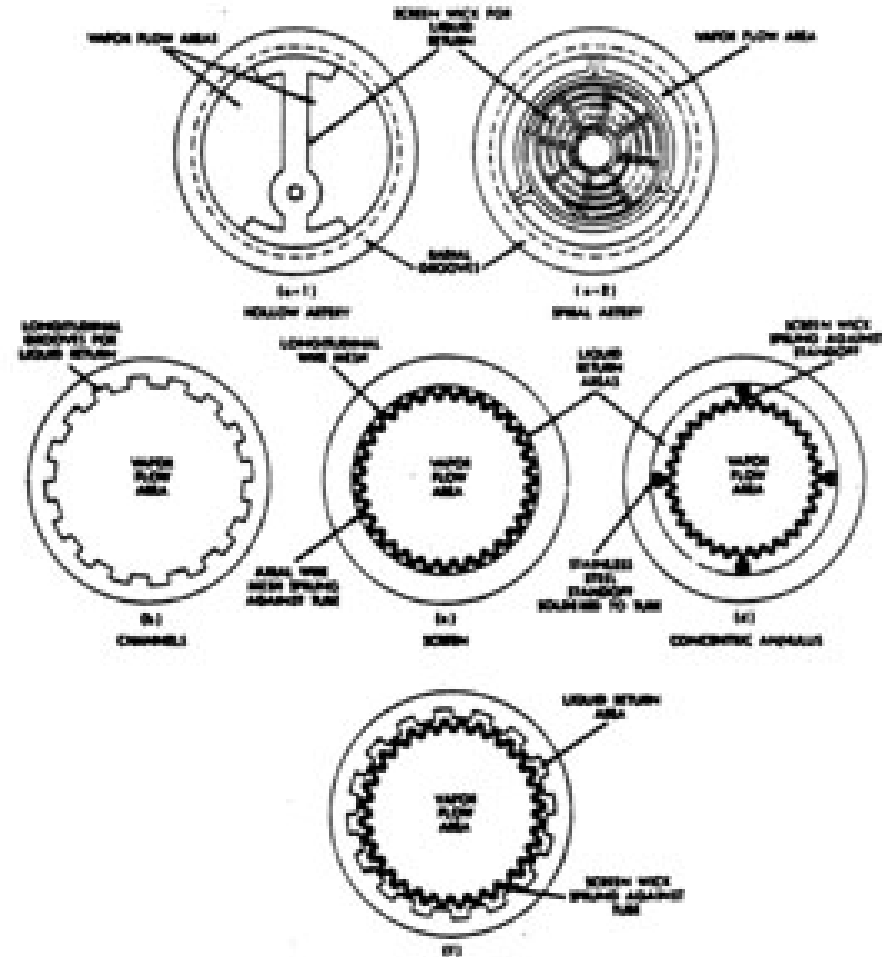
Alta condutividade

Fonte: web-página do Thermacore

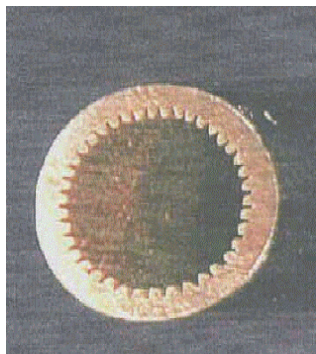
Estruturas porosas



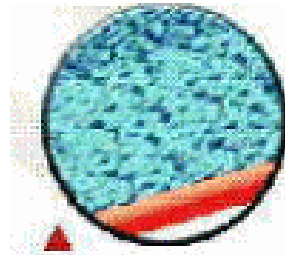
De tela



Compósitos e com artéria



Ranhurados



Sintetizados

Fonte: vários

Compatibilidade

C = COMPATIBLE
I = INCOMPATIBLE
* = SENSITIVITY TO CLEANING

	ALUMINIUM	STAINLESS STEEL	COPPER	NICKEL	TITANIUM
WATER	I	C*	C	C	
AMMONIA	C	C		C	
METHANOL	I	C	C	C	
ACETONE	C	C	C		
SODIUM		C		C	I
POTASSIUM				C	I

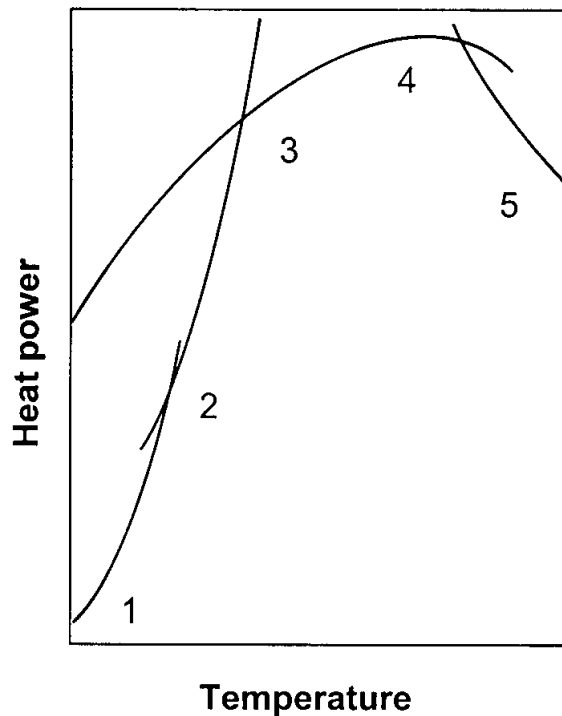
Pureza da amônia: > 99.999%

Os processos de preparação:

- Destilação múltipla do fluido
- Degasificação do fluido
- “bake-out” do tubo com estrutura porosa em vácuo
- “flush-out” do tubo

Fonte: 1. Relat. NASA CR134264, 1972
2. Part., A.Orlov, 2002

Limites operacionais



- 1-2: Limite de som
- 2-3: Limite de “entrainment”
- 3-4: Limite capilar
- 4-5: Limite de ebulição

$$T_{cong} < T < T_{cr}$$

Fonte: 1. Relat. NASA CR134264, 1972

Tubos de calor: prós e contras

Prós:

- Altíssima condutividade: ~100 vezes maior do que um tubo sólido de mesmo tamanho
- Possibilidade de implementação com condutividade variável (“self-control”)

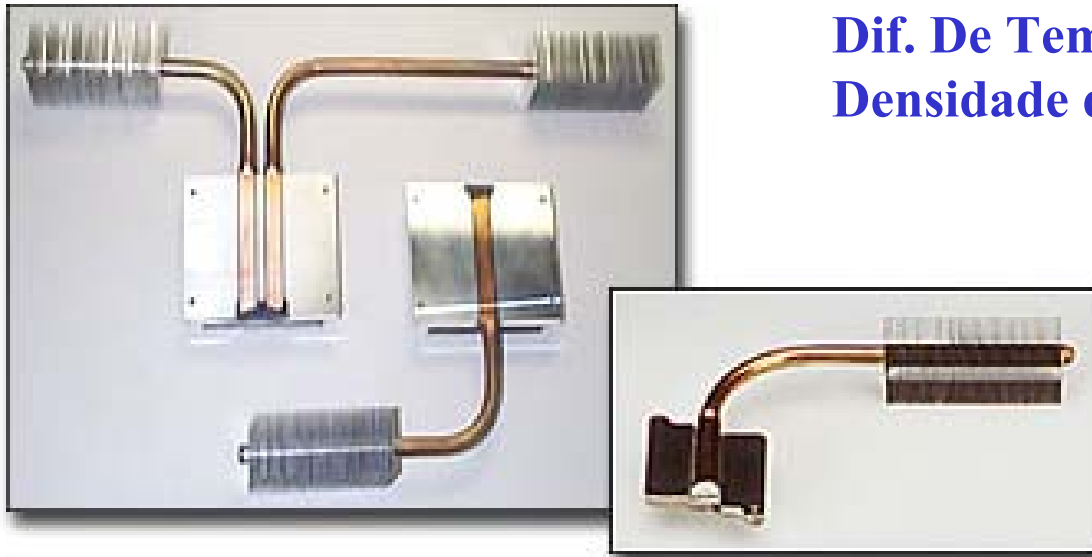
Contras

- Limites operacionais
- Sensitividade à gravidade
- Precisa de tecnologia especial para fabricação

Fonte: B.Yendler, Lockheed

Tubos dobrados, montados

Tubos de cobre+água:
Carga de calor = 25 W
Dif. De Temp. ~ 0.6 C
Densidade de fluxo = 50 W/cm²



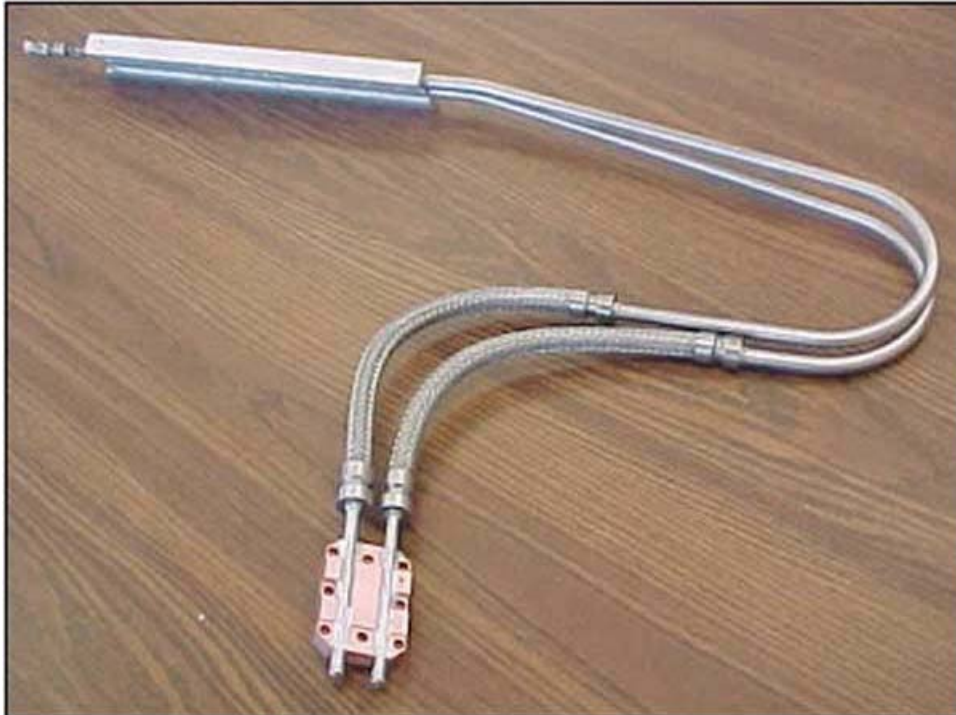
Fonte: web-página do Thermacore

Tubos flexíveis



Fonte: web-página do Thermacore

Tubos flexíveis



Um conjunto de 2 tubos

Fonte: web-página do Swales

Tubo-anel



Fonte: web-página do Un. de Colorado

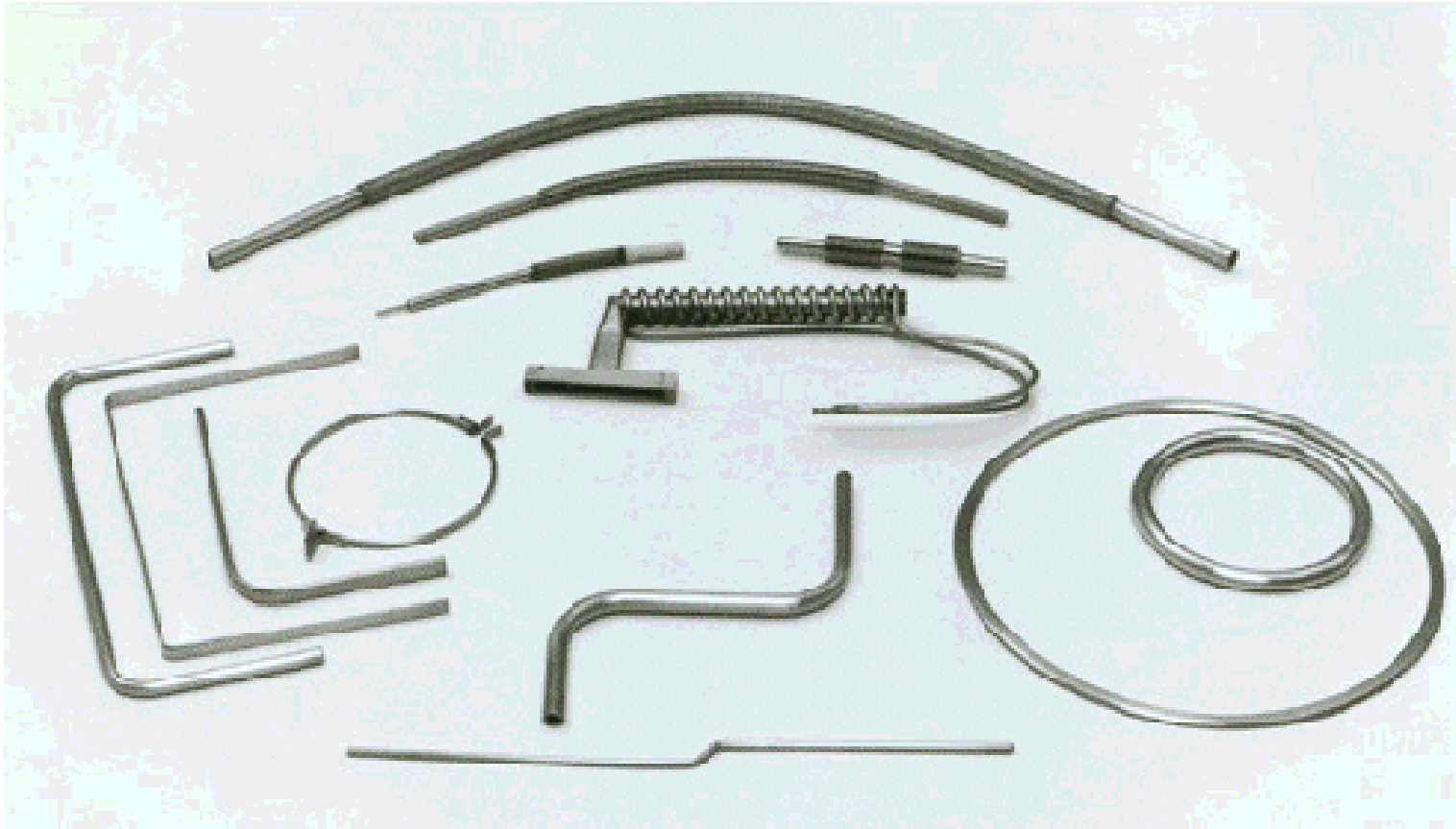
Tubos rígidos dobrados



Um conjunto de 2 tubos

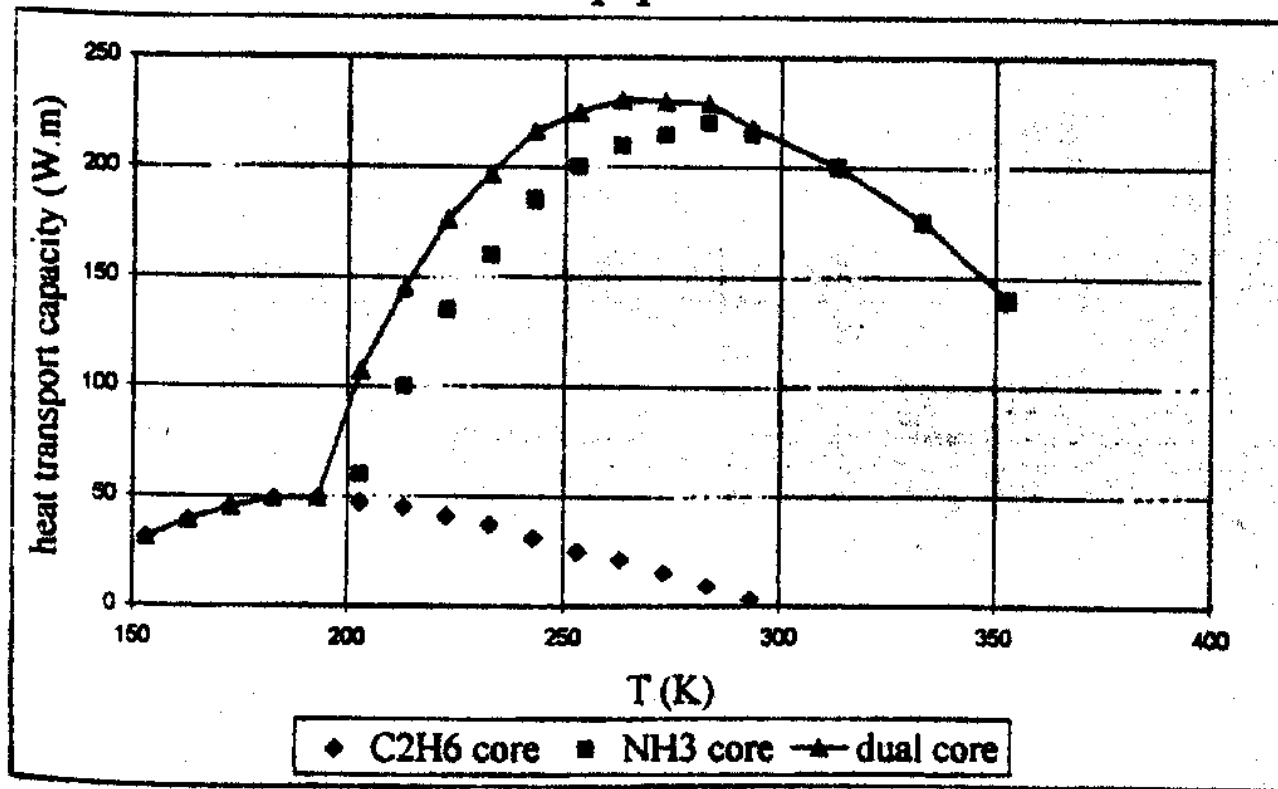
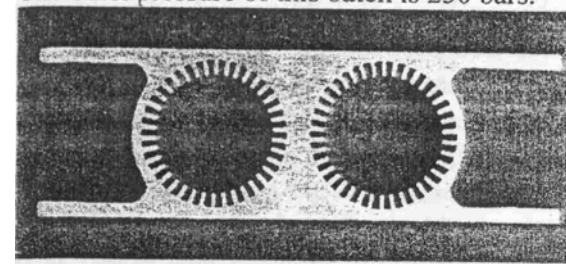
Fonte: web-página do Un. de Colorado

Tubos adaptados à aplicação



Fonte: web-página Cheresources

Tubos bi-fluidos



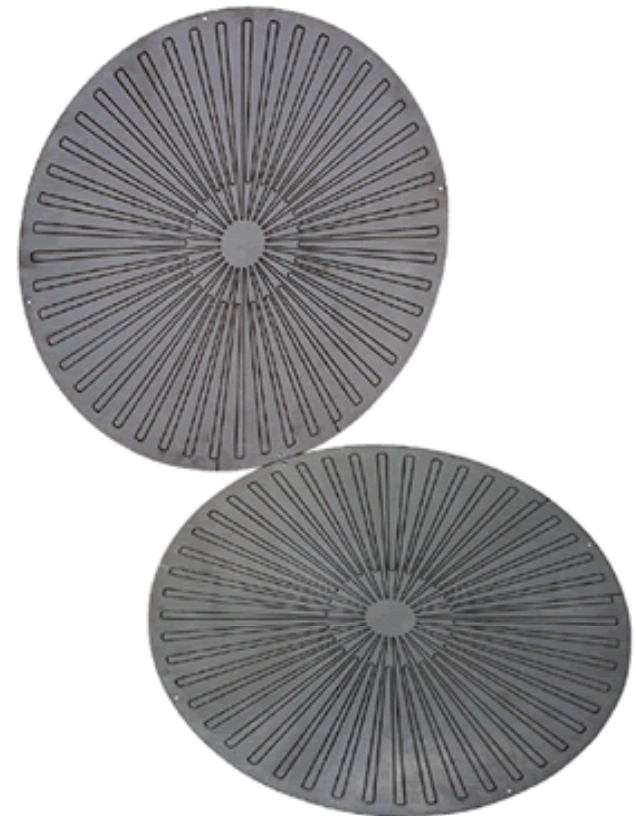
Fluidos:
 amônia + etano
 Faixa de T:
 - 120 ... +70 °C
 Fluxo de calor:
 até 35 W

Fonte: 12th IHPC, B.Demolder, ALCATEL, 2002

Tubos planos



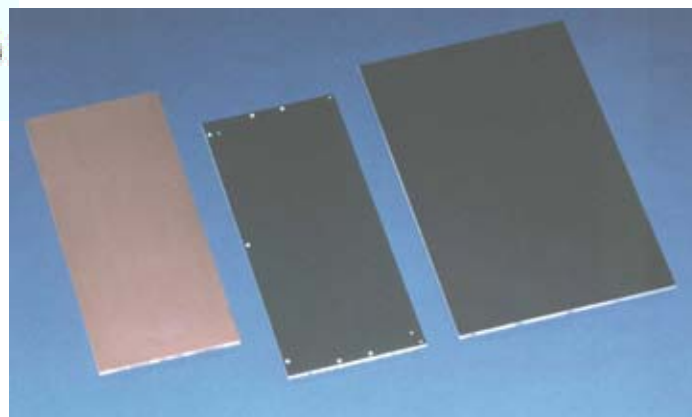
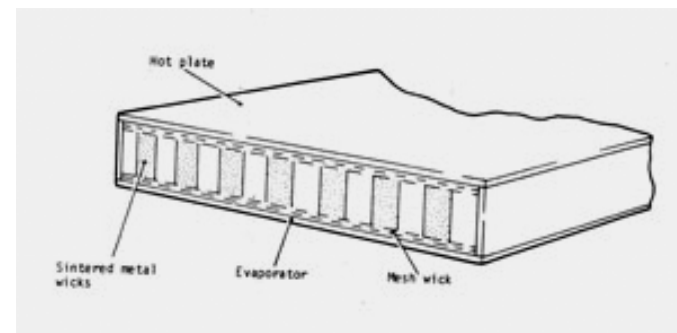
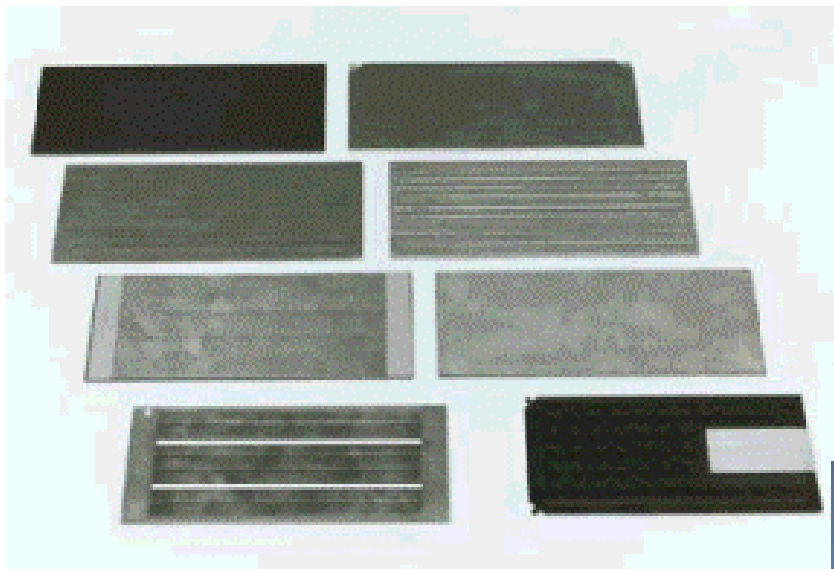
Mini-Tubo para eletrônica,
de Al com Acetona,
 $Q=1..3$ W



Fluxo de calor 220W
Massa 2.7 kg

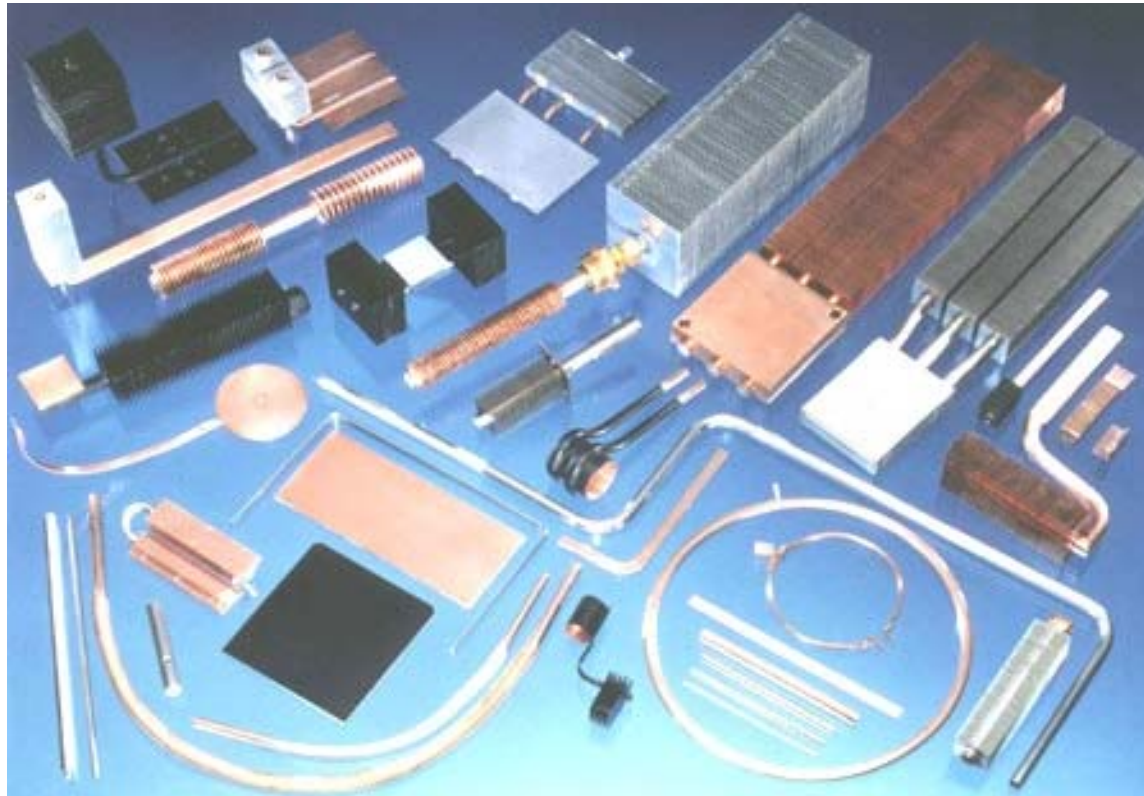
Fonte: web-página do Thermo_tec

Tubos planos: “Spreaders” ou “Doublers” bifásicos



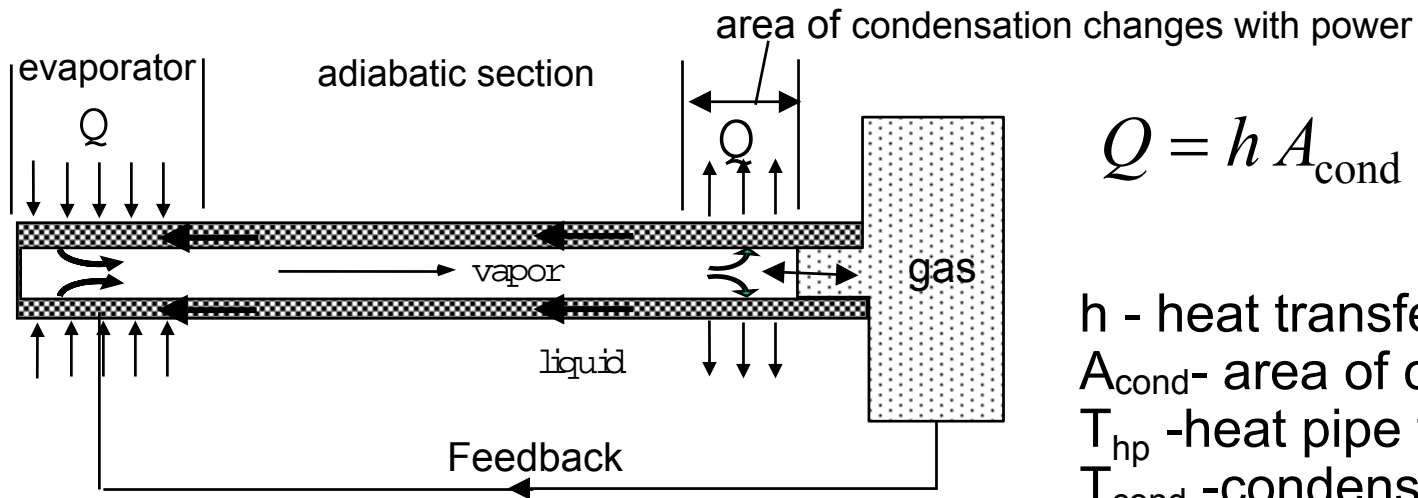
Fonte: web-páginas do Cheresources e Noren

Soluções bifásicas para eletrônica: Mini-tubos e tubos planos



Fonte: web-páginas do Cheresources e Noren

Tubos de condutância variável (VCHP)



$$Q = h A_{\text{cond}} (T_{\text{hp}} - T_{\text{cond}})$$

h - heat transfer coefficient
 A_{cond} - area of condensation
 T_{hp} - heat pipe temperature
 T_{cond} - condenser temperature

Advantages of Variable Conductance HP

- Reducing/Elimination temperature fluctuations with power fluctuations
- Precise temperature control

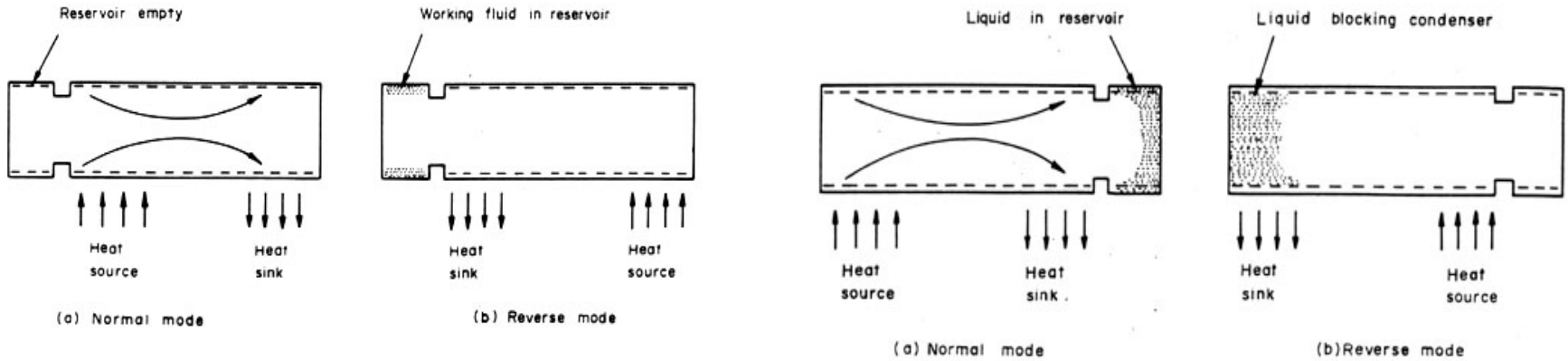
Fonte: B.Yendler, Lockheed



Tubos de condutância variável (VCHP)

Fonte: web-página do Swales

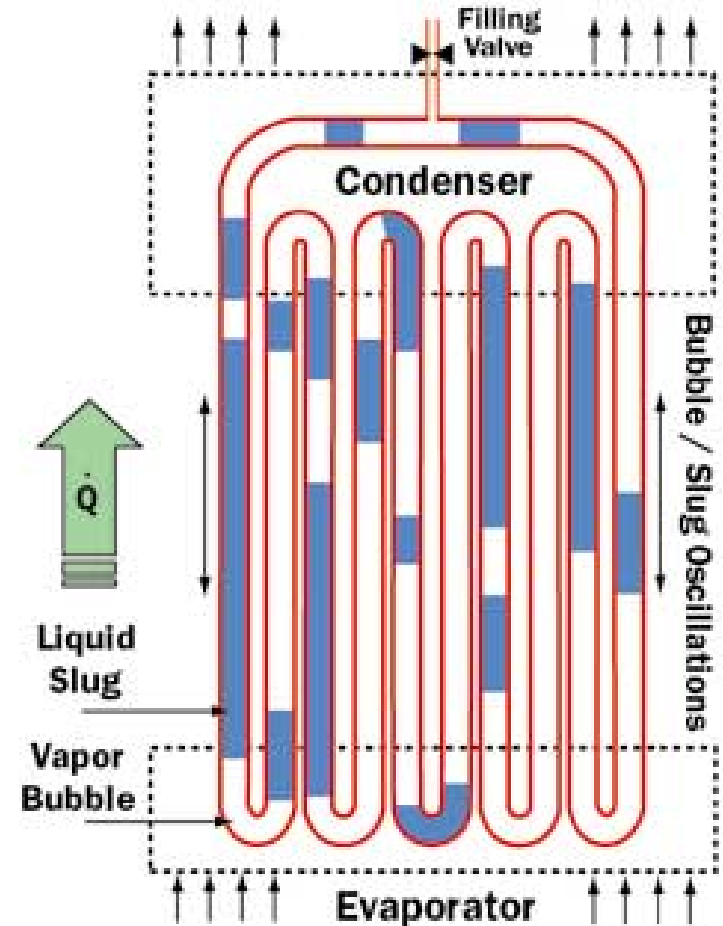
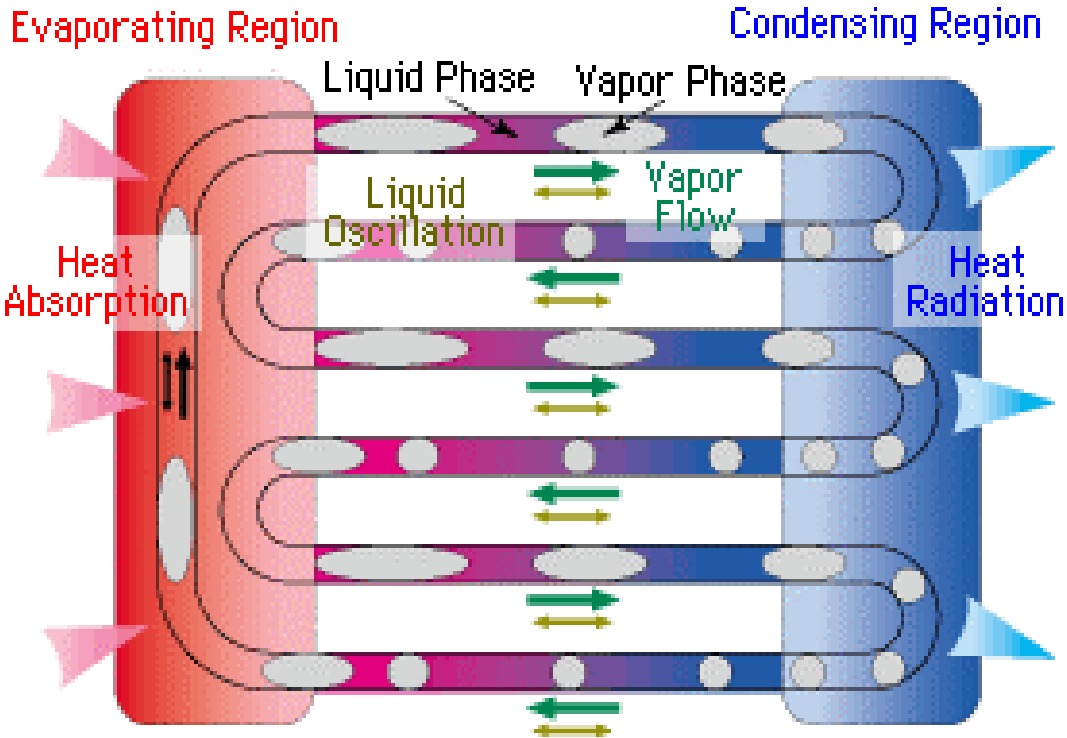
HP-diodo



Fonte: web-página do Swales

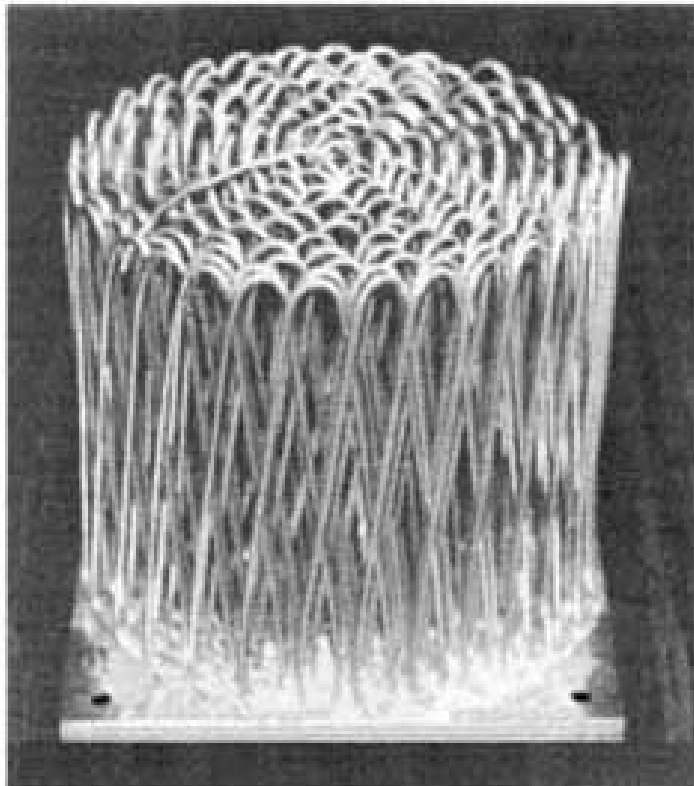
Tubos de calor de pulsação ou oscilação

{Basic principle}



Fonte: web-página do Tsheatronocs e Un. Stuttgart

Tubos de calor de pulsação ou oscilação: aplicação terrestre



Base plate = 80mm x 80mm x 2mm

Heat throughput capacity = 450W

At a temperature difference = 40 °C

Air velocity = 3 m/s

Thermal resistance = 0.089 °C/W

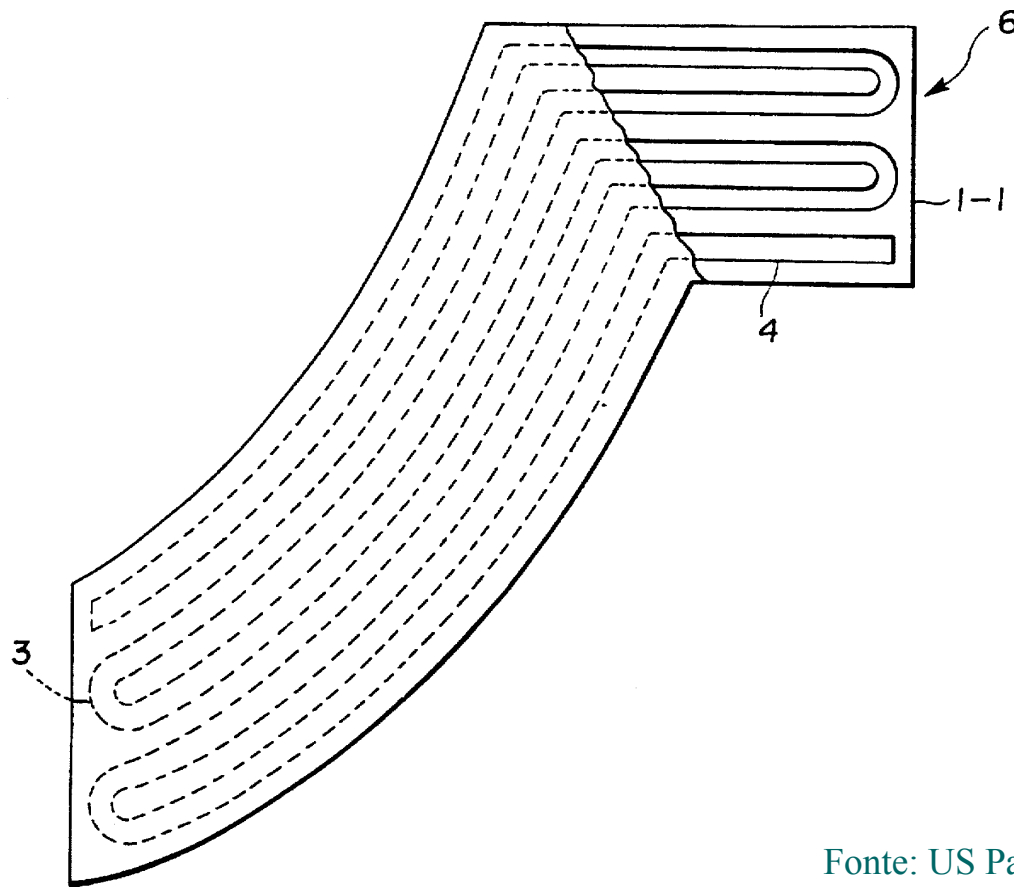
Tube outside diameter = 1.6 mm

Tube internal diameter = 1.2 mm

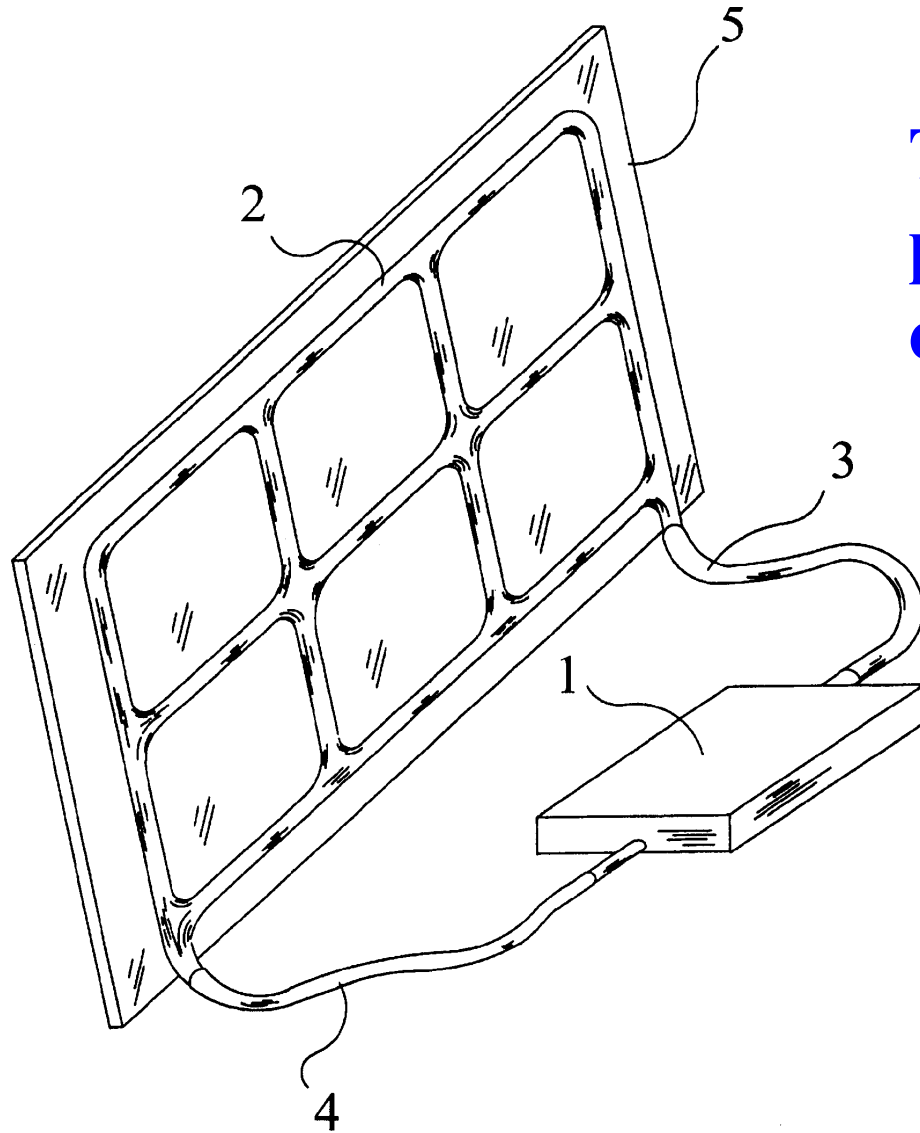
Number of capillary turns = 500

Fonte: web-página do Un. Stuttgart, M.Groll, 2003

Tubos de calor de pulsação ou oscilação: configuração sem circuito



Fonte: US Patent 5.697.428 (Japan), 1997



Tubos de calor de pulsação ou oscilação: configuração tipo grade

Fonte: US Patent 6.269.865 (Taiwan), 2001

Tubos de oscilação para aplicações espaciais: prós e contras

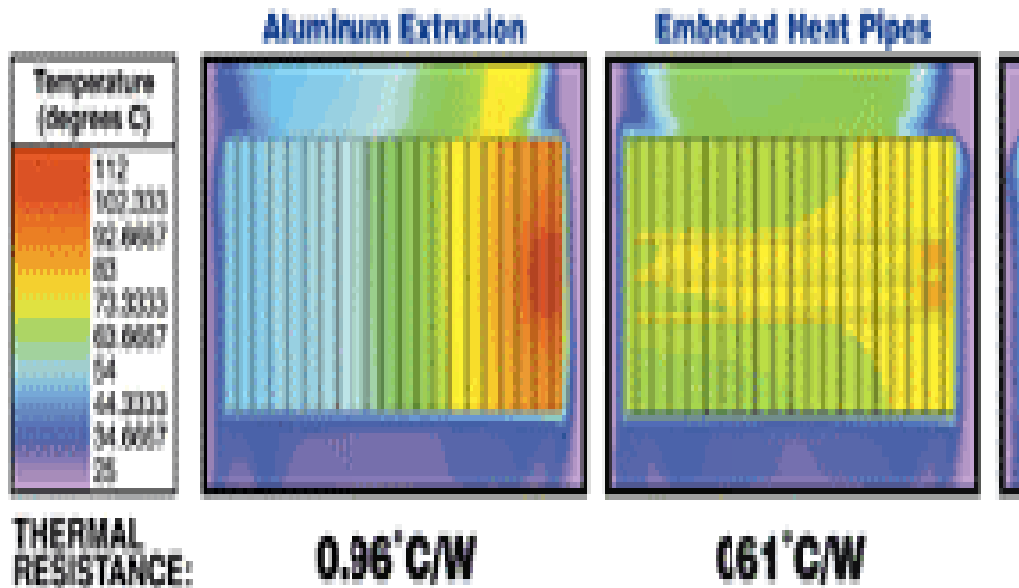
Prós:

- Fabricação mais barata – não tem estrutura capilar
- Em funcionamento, não sensível à gravidade
- Relativa tolerância à geração de gás não condensável (NCG)

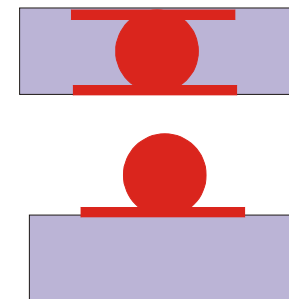
Contras

- A Massa é bem maior do que um HP
- Eficiência é menor
- Possível Sensibilidade à gravidade na partida: é necessário pré-aquecimento do condensador
- Micro-vibração

Painel de “honeycomb” com tubos de calor embutidos



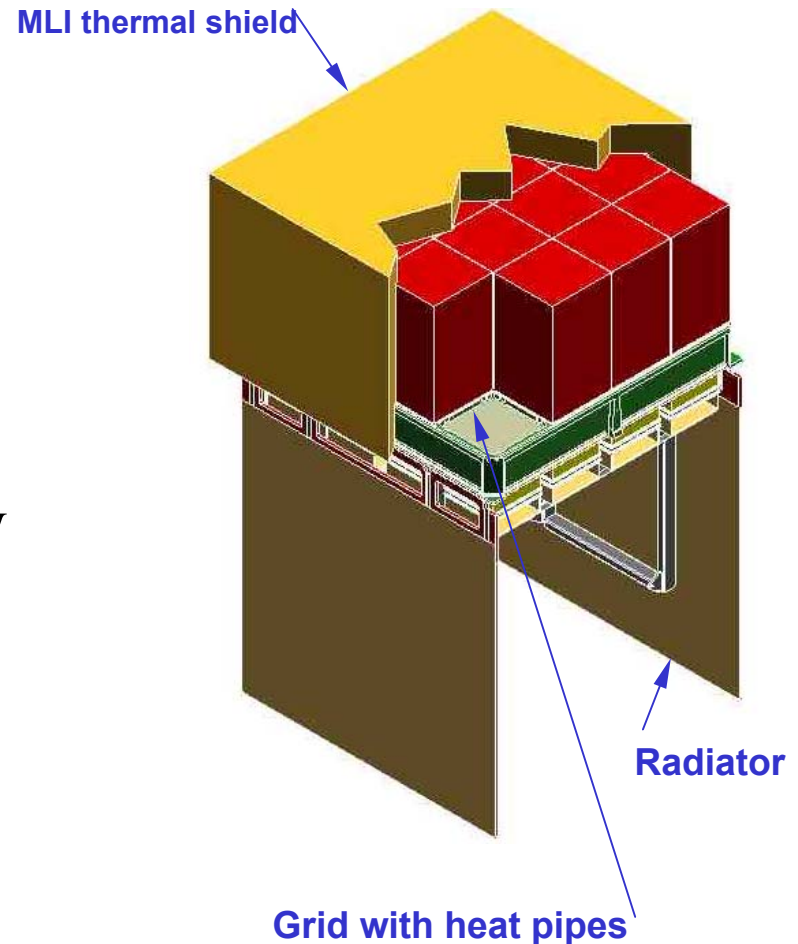
Duas configurações:



Fonte: web-página do Thermacore

Aplicações: projeto do GLAST LAT

- Key thermal components
 - Grid with heat pipes (HP's)
 - Radiators with variable-conductance heat pipes (VCHP's)
 - Average power to dissipate: 650 W



Fonte: LAT thermal components; web-página do Stanford

Aplicações: TCS do ARTEMIS

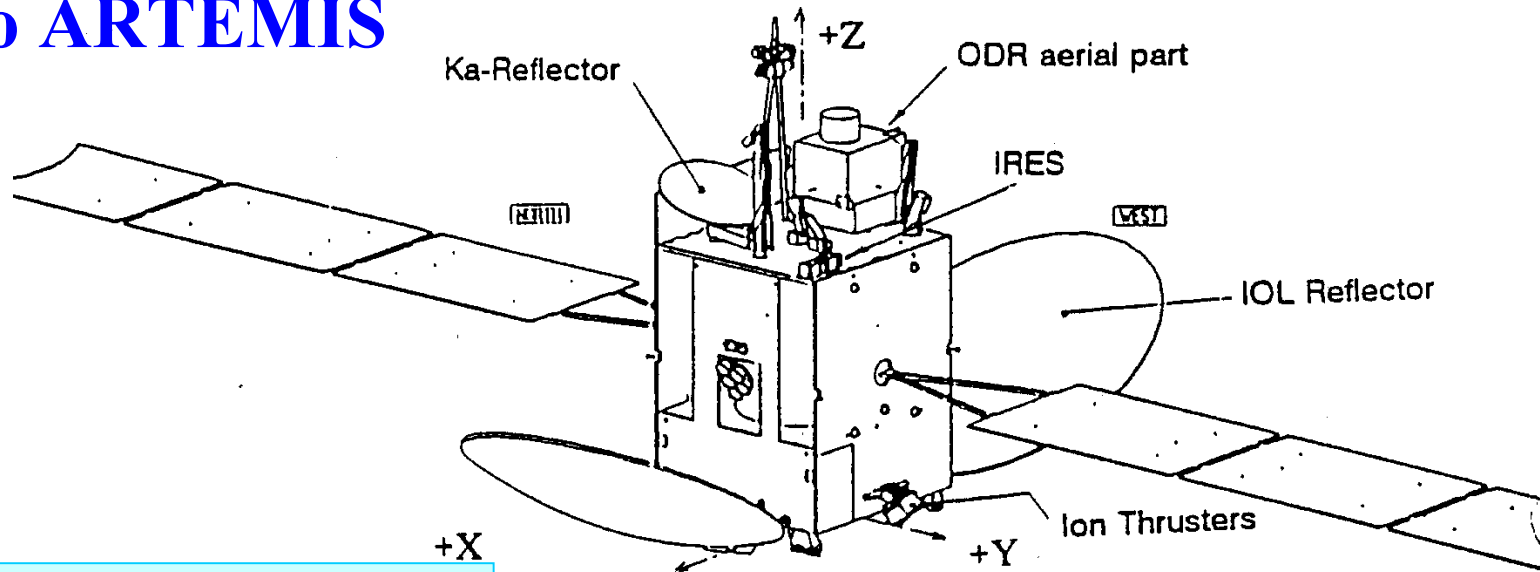
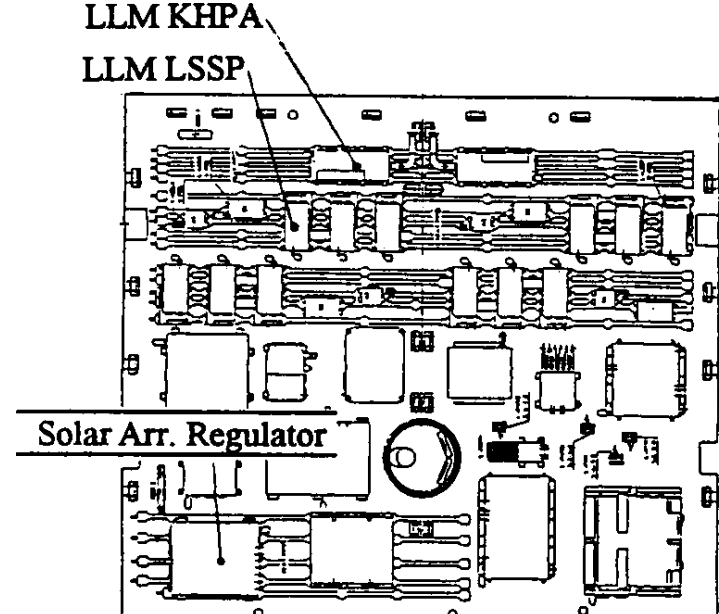


Fig.1 ARTEMIS on station configuration

Massa: 3100 kg
Dimensões: 3.1x1.86x1.9m
Órbita: Geo-estacionaria
Potencia dissipada EOL: 1576W
Quantidade de HP: 48

Fonte: 6th European Symposium on SECS,
 E.Sacchi, Alenia, 1997

Aplicações: TCS do ARTEMIS



Heat Pipe area	H.P. Quantity	Max. Length [m]	Max. Heat Load [Wm]	H.P. Temp. Oper. Range [°C]	Max. impressed Power [W]
SKDR TWT	11	1.674	25.	-24 / +70	171.8
SKDR FSPA/TKPA	6	1.727	22.	-16 / +46	147.8
LLM KHPA	4	1.68	16.	-35 / +60	90.
LLM LSSP	10	1.68	6.	-29 / +60	283.8
Solar Arr. Regulator	5	1.037	14.	-12 / +58	111.3
IPP Electronics (North)	6	1.248	<30.	-16 / +51	113.
IPP Electronics (South)	6	1.248	<30.	-16 / +49	113..

Fonte: 6th European Symposium on SECS,
E.Sacchi, Alenia, 1997

Aplicações: TCS do ARABSAT 2

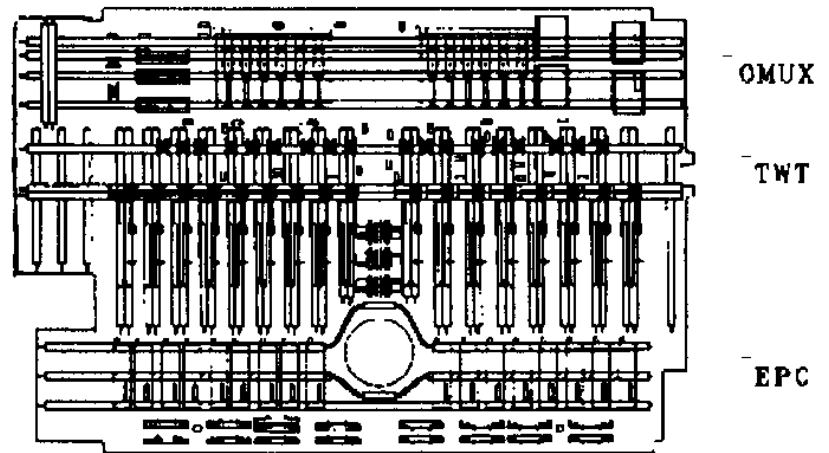
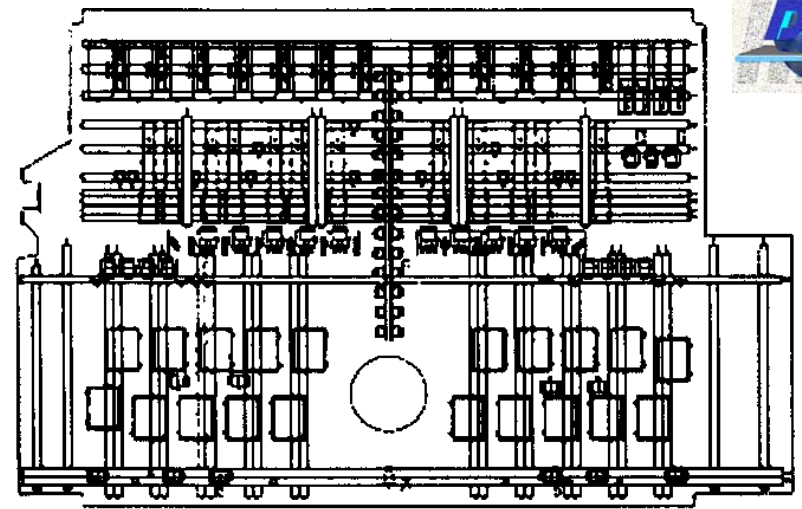
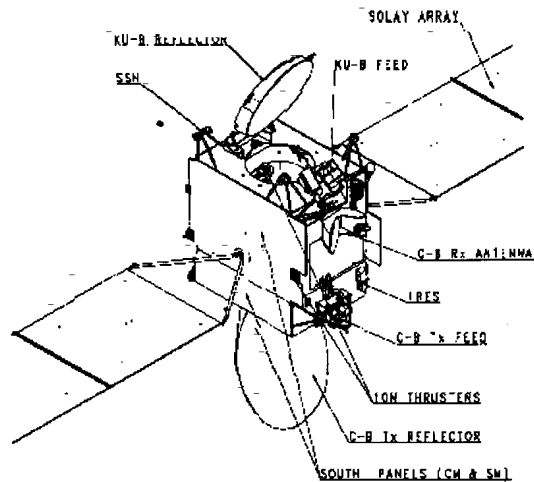


FIGURE 4-2- N/S CM PANELS - HEAT-PIPE NETWORKS

Fonte: 6th European Symposium on SECS,
M.Koedinger, Aerospatiale, 1997

Massa seca: 1106 kg
Dimensões: 1.8x2.3x2.6m
Órbita: Geo-estacionaria
Potencia EOL (12 anos): 5074 W
Quantidade de HP: 102 (Al-amm.)

Aplicações: Carga útil do ABRIXAS: CCD Câmara

Órbita: LEO (x-ray observatório)
 Potencia de CCD câmara: 40 W
 T de CCD: $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$
 Quantidade de HP: 2+2

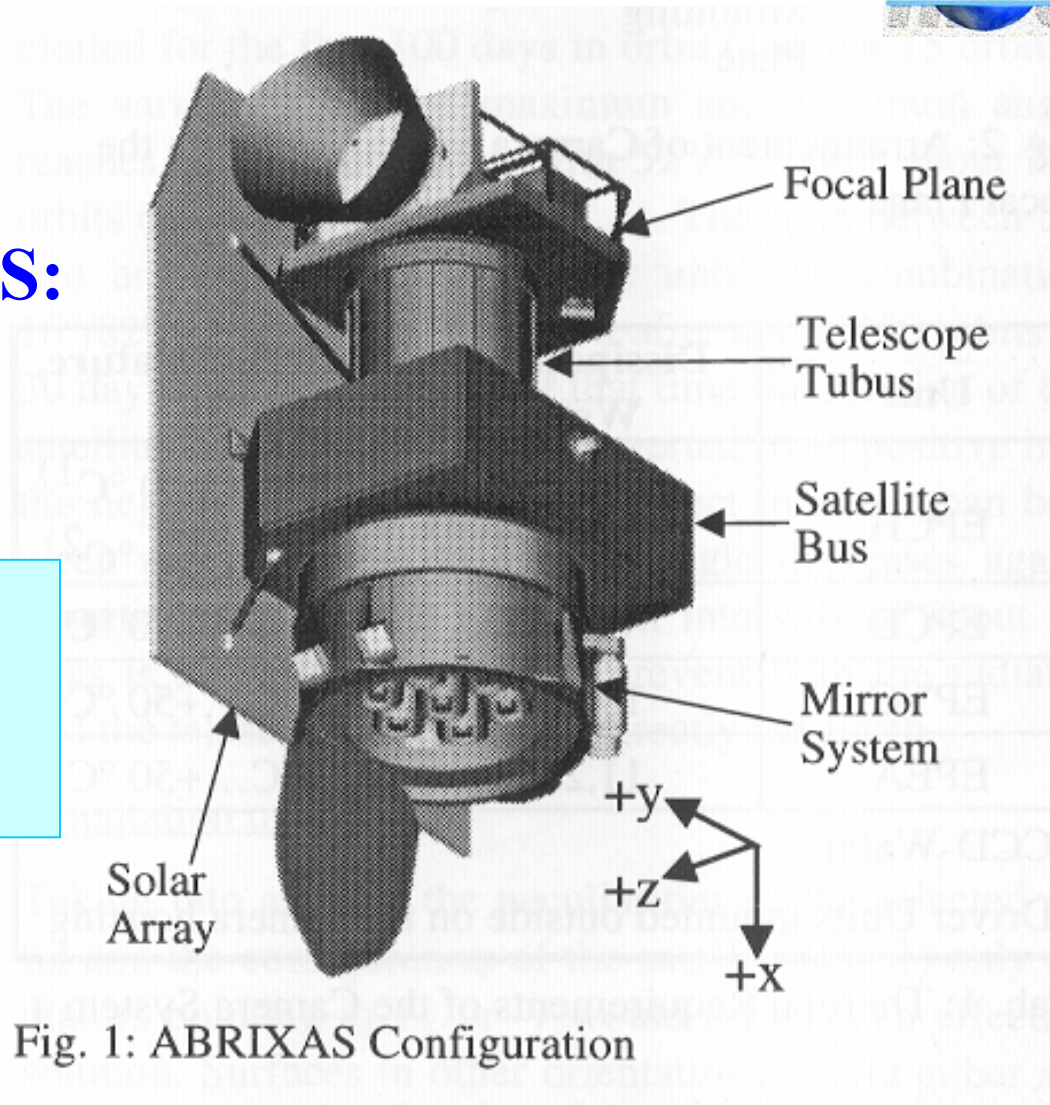


Fig. 1: ABRIXAS Configuration

Fonte: 6th European Symposium on SECS,
 R.Schlitt, OHB, 1997

Aplicações: Carga útil do ABRIXAS: CCD Câmara

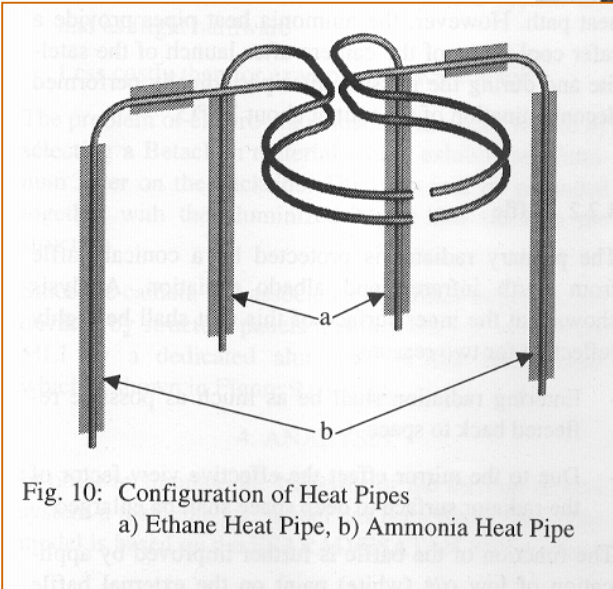
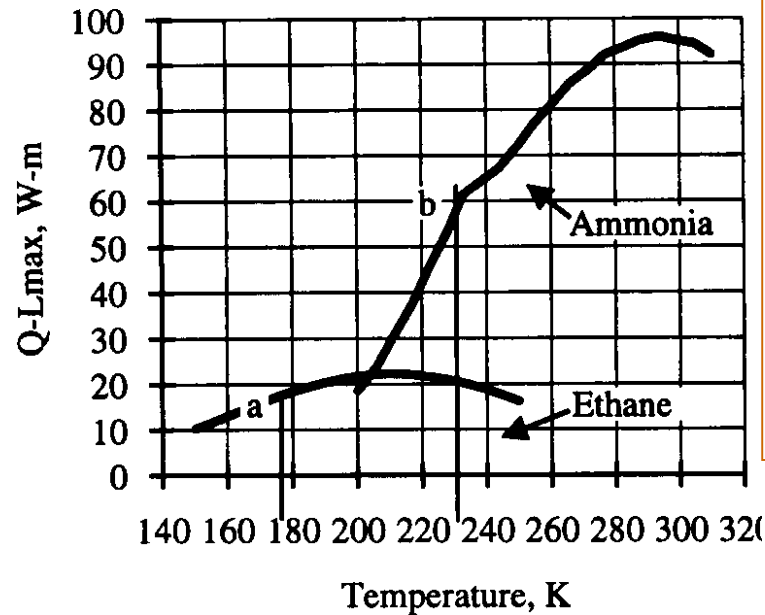


Fig. 10: Configuration of Heat Pipes
a) Ethane Heat Pipe, b) Ammonia Heat Pipe

- Modos operacionais:
- Observação
 - De-contaminação
 - “Cool-down”

2 HP de Al-etano
2 HP de Al-amônia

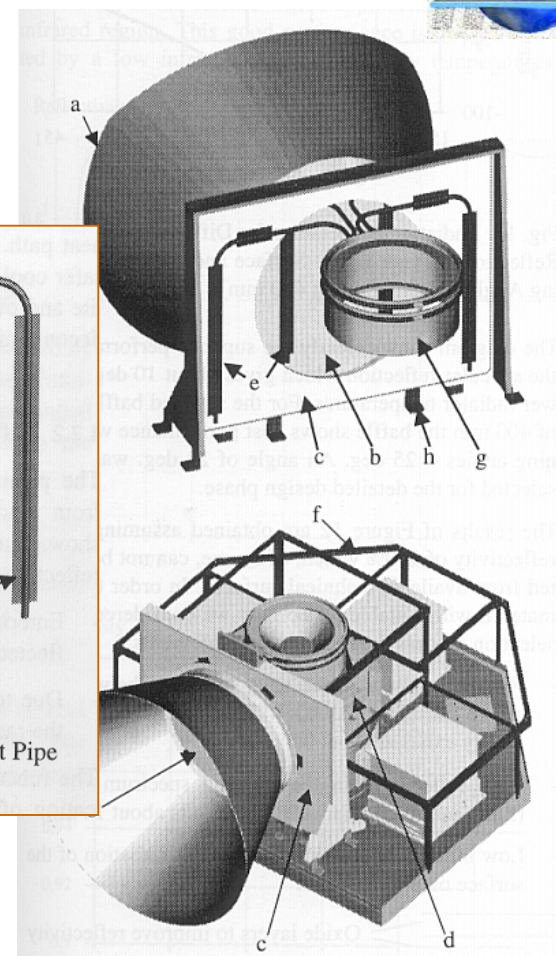
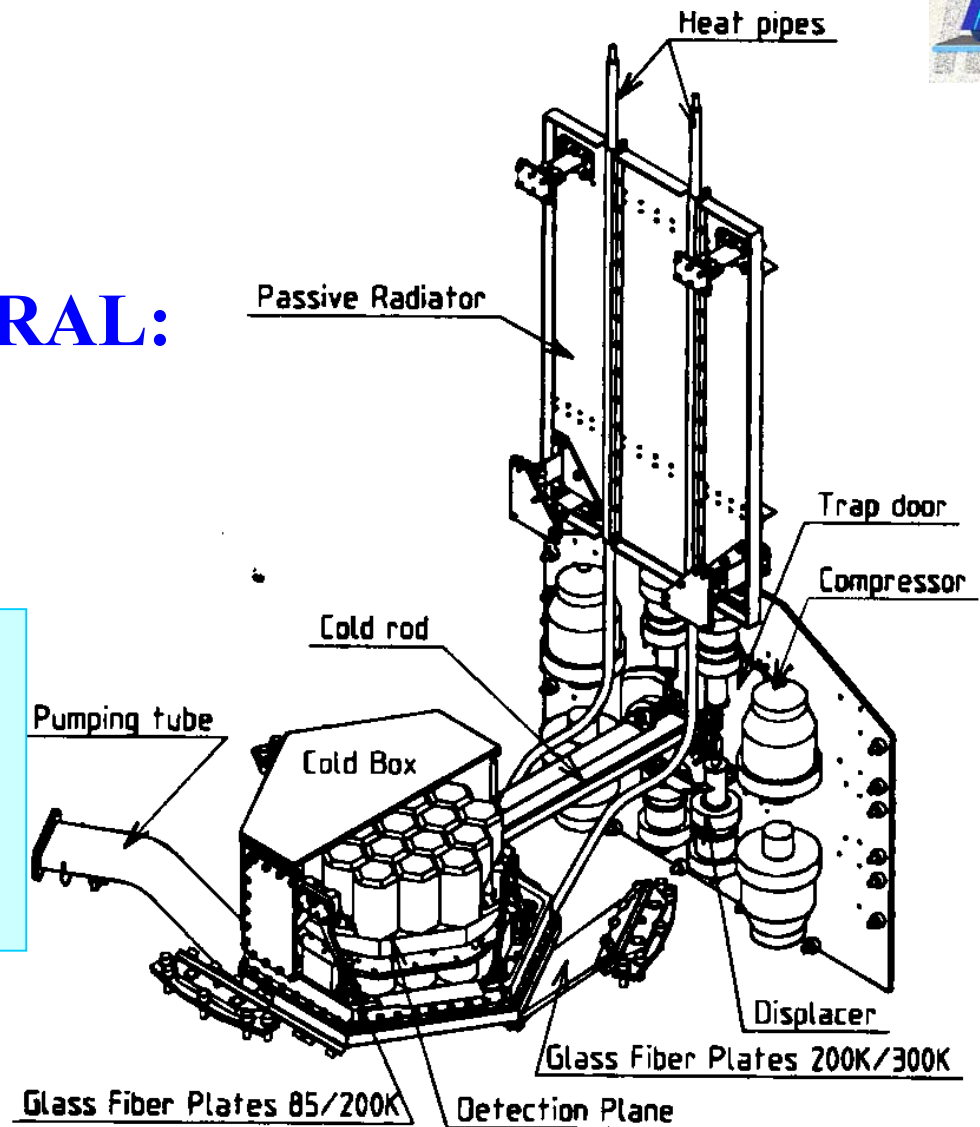


Fig. 9: Arrangement of Main Hardware Items (MLI not shown)
a) Baffle, b) Primary Radiator, c) Secondary Radiator, d) Camera, e) Heat Pipes, f) MLI Support Structure, g) Heat Pipe Saddle, h) Low Conductive Bracket

Fonte: 6th European Symposium on SECS,
R.Schlitt, OHB, 1997

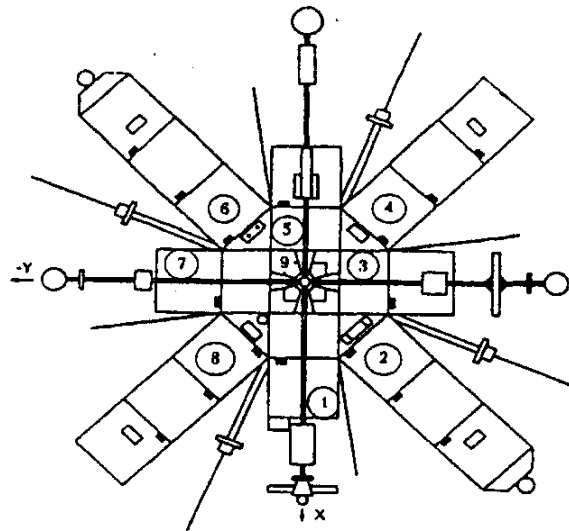
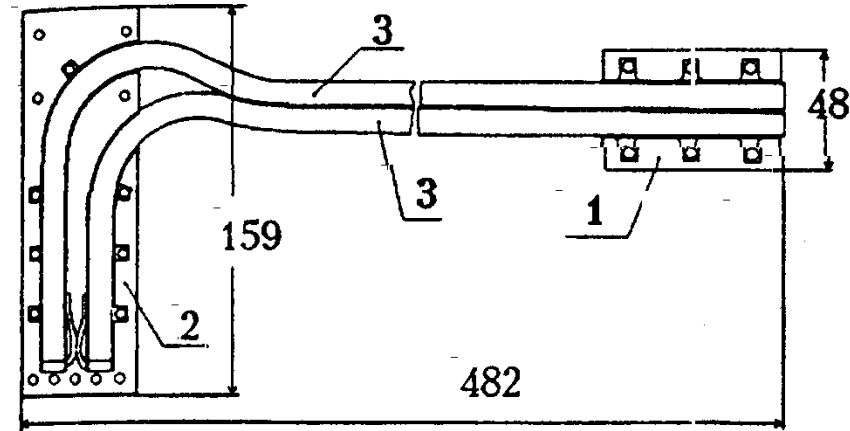
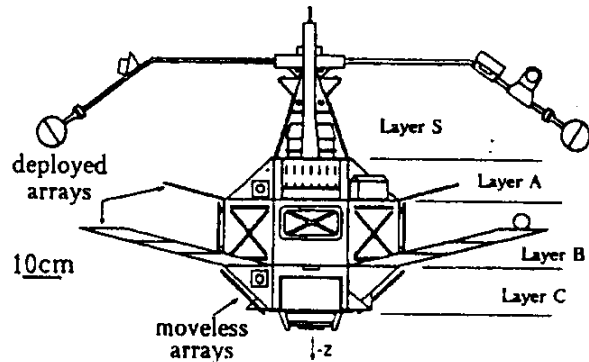
Aplicações: Carga útil do INTEGRAL: Espectrômetro SPI

Órbita: elíptica, até 117 000 km
 T de detectores: -190°C
 Criostato de 3 estágios
 Potência dissipada: 140W
 Quantidade de HP: 2 (ammonia)



Fonte: 6th European Symposium on SECS,
 F.Lucantonio, CNES, 1997

Aplicações: TCS de microsat Magion 4 e 5



Massa de sat: 57.8 (M-4) e 68 kg (M-5)
 Órbita: elíptica, apogeu 200.000 e 20.000 km
 T operacional: $-40 \dots +60 \text{ }^{\circ}\text{C}$
 Potência dissipada: 30W
 Quantidade de HP: 2+2 e 2+2
 Materiais: cobre; fibra sinterizada de cobre
 Fluido: acetona

Fonte: 12th IHPC, V.Baturkin, 2002