

DESENVOLVIMENTO DE TUBOS DE CALOR DE BAIXA PRESSÃO DE OPERAÇÃO PARA APLICAÇÕES ESPACIAIS

Jorge Bertoldo Junior, Gino Genaro, Pedro Cândido, Valeri V. Vlassov, José Antonio Batista Neto, Geraldo Orlando Mendes, Olga Kchoukina, Alice Ueda.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE,
São José dos Campos – SP, Brasil.
jorge.bertoldo@inpe.br

Resumo: *O trabalho tem por objetivo apresentar as etapas de desenvolvimento de tubos de calor (HP - do inglês "heat pipe") para aplicação em satélites no Brasil, como alternativa aos tubos de calor fornecidos pela Academia Chinesa de Ciência e Tecnologia (CAST) para o programa Satélite Sinobrasileiro de Recursos Terrestres (CBERS). O principal objetivo é o domínio da tecnologia de projeto e fabricação de tubos de calor, área estratégica no mercado aeroespacial mundial. Os tubos fornecidos atualmente pela CAST utilizam a amônia como fluido de trabalho, a qual apresenta algumas desvantagens, como alta toxicidade e alta pressão de operação, podendo causar sérios problemas caso ocorra o rompimento do tubo. Alternativamente, este projeto estuda a viabilidade de se fabricar tubos de calor que utilizem a acetona como fluido de trabalho, a qual além de apresentar baixa toxicidade, apresenta uma baixa pressão de operação (muitas das vezes abaixo da pressão ambiente). Resultados preliminares obtidos a partir de testes realizados em um protótipo projetado e fabricado pelo grupo de Controle Térmico (GTER/DMC), assim como as próximas etapas do trabalho, como a qualificação do dispositivo a bordo do satélite universitário ITASAT, em ambiente de microgravidade, são apresentados.*

Palavras - Chave: *controle térmico de satélites, tubos de calor, amônia, acetona, transferência de calor em meios bifásicos.*

1 Introdução

No programa CBERS, programa bilateral entre China e Brasil, a CAST é a responsável por fabricar e fornecer os tubos de calor que compõem o subsistema de controle térmico dos satélites do programa. Estes tubos de calor são fabricados a partir de barras de alumínio extrudadas, carregados com amônia sob alto vácuo e finalmente selados para utilização nas partes externas da estrutura do satélite, ou mesmo embutidos em seus painéis. O problema é que além de ser classificada como tóxica, a amônia apresenta alta pressão quando submetida às temperaturas operacionais do satélite, apresentando elevado risco para as pessoas envolvidas com este fluido (manuseio, carregamento, purificação, selagem e instalação nos painéis).

O principal objetivo deste projeto de pesquisa e desenvolvimento é avaliar a viabilidade técnica de se utilizar tubos de calor à base de acetona nas aplicações de controle térmico de equipamentos embarcados em satélites das futuras missões do INPE. O uso da acetona como fluido de trabalho traz vantagens comparativas importantes em relação ao uso da amônia, como baixa toxicidade e baixa pressão de operação, simplificando significativamente os cuidados no manuseio e fabricação destes dispositivos (Bertoldo et al., 2012), (Silva, 2011), (Vlassov, 2008). Ao término deste projeto, a expectativa é de que tubos de calor possam vir a ser fabricados integralmente no Brasil, dotando o país do completo domínio da tecnologia de projeto e fabricação de tubos de calor para uso espacial.

A primeira etapa do projeto resultou na fabricação de protótipos de tubos de calor carregados com acetona, cujo desempenho de operação mostrou-se semelhante ao dos tubos fabricados pela CAST à base de amônia. A figura 1 mostra a comparação geométrica entre os perfis fornecidos pela CAST e o perfil proposto neste projeto. O desenvolvimento destes primeiros protótipos contribuiu para o desenvolvimento do ferramental empregado na fabricação dos tubos, na certificação dos processos em que tais ferramentas são empregadas e na certificação dos testes de qualificação dos tubos produzidos.

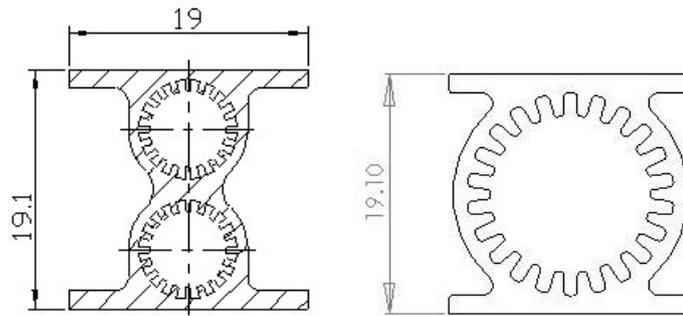


Figura 1. Perfil do tubo de calor fornecido pela CAST (esq.) e perfil fabricado no Brasil (dir.) (Bertoldo et al, 2012).

Alguns protótipos foram fabricados e submetidos a testes em ambiente gravitacional terrestre e os resultados são apresentados neste trabalho. A próxima etapa do trabalho consiste na qualificação do tubo de calor em ambiente de microgravidade, o que será feito através do Experimento Tubo de Calor (TUCA), que comporá uma das cargas úteis do satélite universitário ITASAT, a ser colocado em órbita em breve e que terá como objetivo o desenvolvimento, lançamento e operação de um microsatélite para uso em órbita baixa (LEO), capaz de testar cargas experimentais.

2 Metodologia Experimental

Um tubo de calor possui três regiões: um evaporador, um condensador e uma região adiabática. A entrada de calor na região do evaporador faz o fluido passar da fase líquida para a fase de vapor, o qual se desloca para a região do condensador, devido à diferença de pressão. A remoção de calor nesta região faz com que o vapor condense, liberando o calor latente de vaporização. O fluido retorna para a região de evaporação devido à ação de forças capilares, completando o ciclo (Chi, 1976) (Faghri, 1995). A figura 2 ilustra o princípio de funcionamento de um tubo de calor.

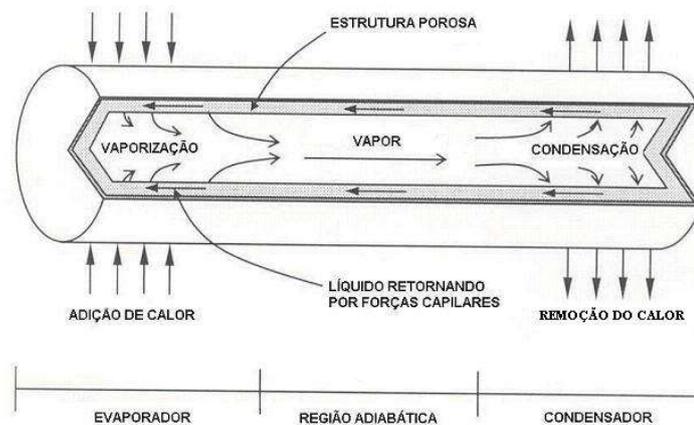


Figura 2. Esquema de funcionamento de um tubo de calor (Adaptado de Chi, 1976).

A metodologia experimental apresentada neste estudo foi desenvolvida de acordo com a necessidade de se verificar a eficiência de um tubo de calor em condições de voo (condições de micro gravidade). A proposta prevê o uso de blocos aquecedores, os quais têm uma resistência cerâmica inserida em uma cavidade de cobre eletrolítico, material de excelente condutividade térmica, isolado com Celeron, conforme pode ser visualizado na figura 3, a qual mostra o teste de desempenho do tubo de calor usando os blocos aquecedores fabricados para esta finalidade.

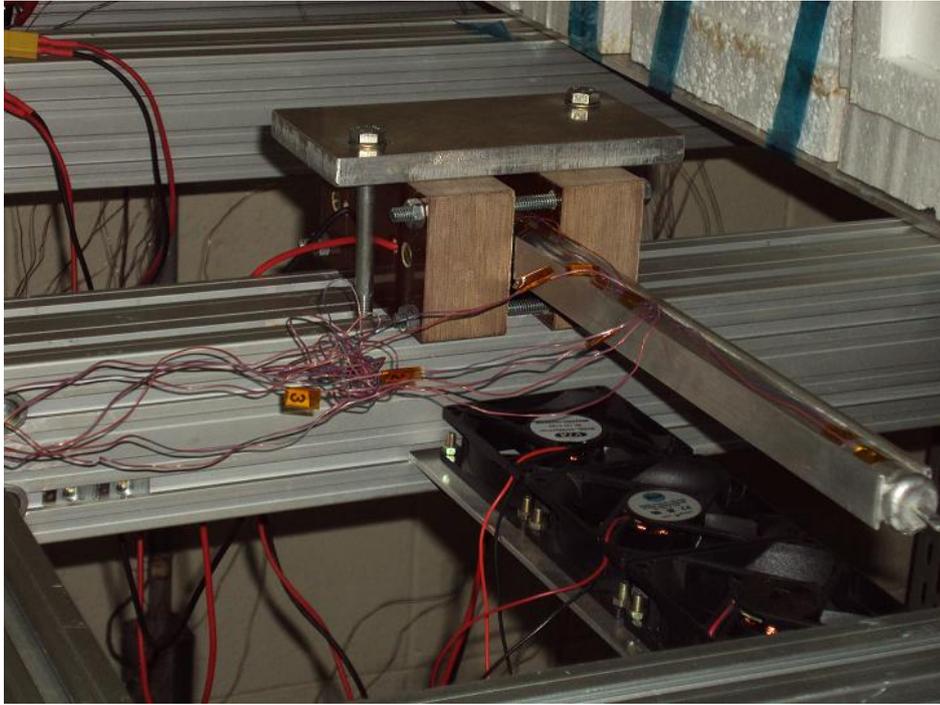


Figura 3 – Teste de desempenho de tubo de calor usando blocos aquecedores.

Esta metodologia experimental permite verificar o funcionamento ou não de um tubo de calor, além de possibilitar que sejam calculados os parâmetros de desempenho de transporte de calor do mesmo.

A figura 4 mostra o setup de teste desenvolvido para simular as condições de contorno do experimento TUCA, o qual será embarcado no satélite ITASAT. O tubo de calor é fixado por suportes (*saddles*) semelhantes aos que serão utilizados para que a montagem experimental seja integrada a estrutura do satélite ITASAT. O sistema de refrigeração que foi acoplado a um dos suportes, no interior do qual irá circular um fluido de trabalho que tem tanto a função de resfriamento quanto de aquecimento, o qual será responsável por colocar o tubo de calor em operação.

O objetivo deste teste é verificar como ocorrerão as trocas de calor entre as interfaces térmicas e o tubo, de modo que seja possível fazer – se estimativas em relação às trocas de calor relacionadas ao TUCA.

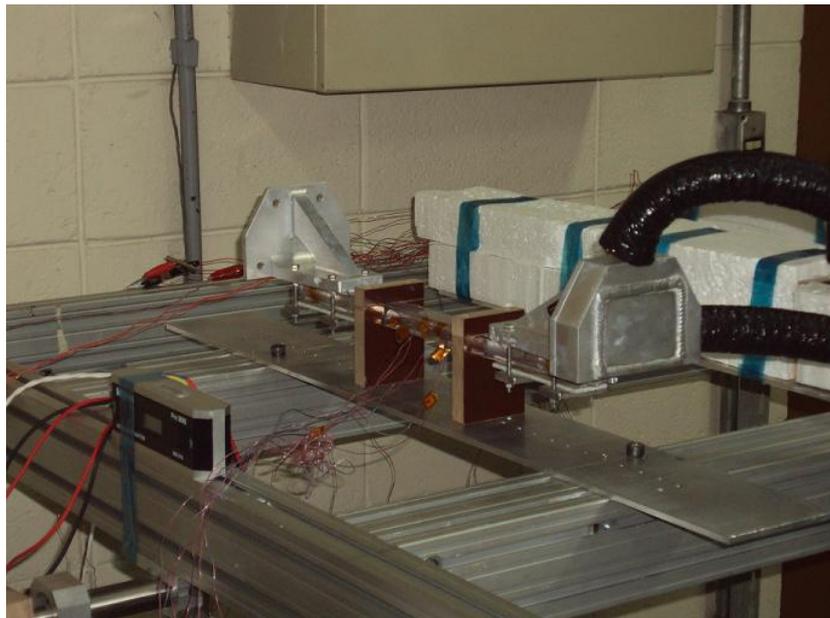


Figura 4. Montagem experimental do TUCA.

Estes suportes serão acoplados às superfícies internas dos painéis superior e inferior do satélite, conforme mostrado na figura 5.

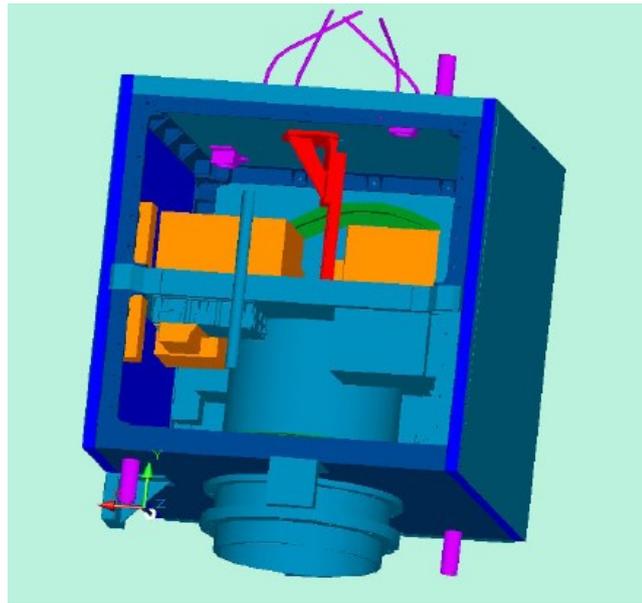


Figura 5. TUCA inserido no satélite universitário ITASAT (Silva et al, 2011).

Através de um dos painéis estruturais com o qual o tubo de calor encontra-se em contato térmico, o fluxo térmico oriundo do aquecimento solar será propagado em direção à extremidade oposta do tubo de calor.

Termistores distribuídos ao longo do tubo permitirão confirmar o funcionamento do tubo de calor, bem como fornecer a magnitude da resistência térmica do mesmo quando este estiver operando em condições de microgravidade.

3 Resultados

Os resultados são apresentados através do perfil de temperatura (subtraída a temperatura ambiente) ao longo do comprimento do tubo de calor o qual opera em regime permanente de transferência de calor. Estes perfis de temperatura permitem verificar a eficiência do HP no transporte de calor. Na primeira etapa do estudo experimental foram testados quatro tubos. Os resultados referentes a estes testes são apresentados nas figuras 6 - 9.

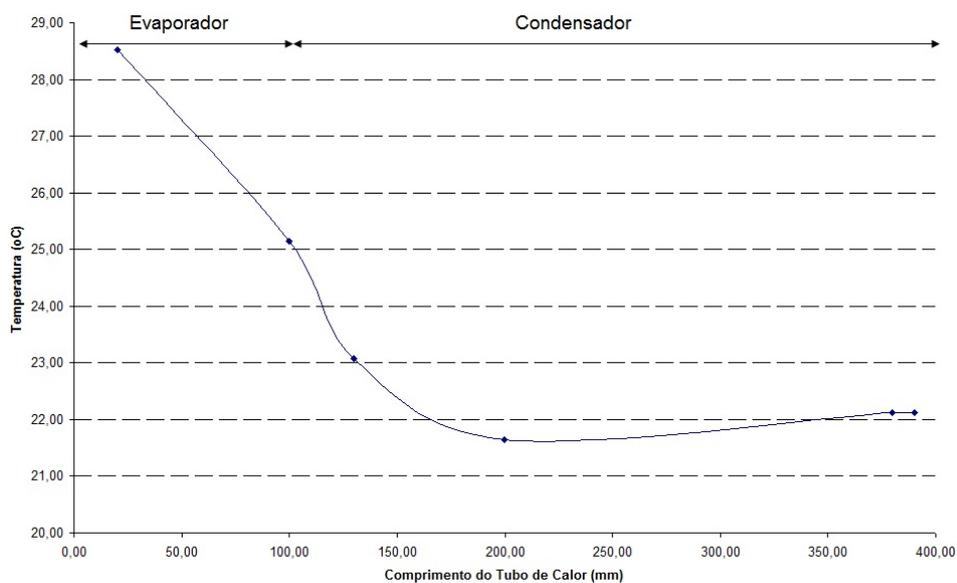


Figura 6. HP 009 0400 A1 00: Perfil de temperatura ao longo do comprimento.

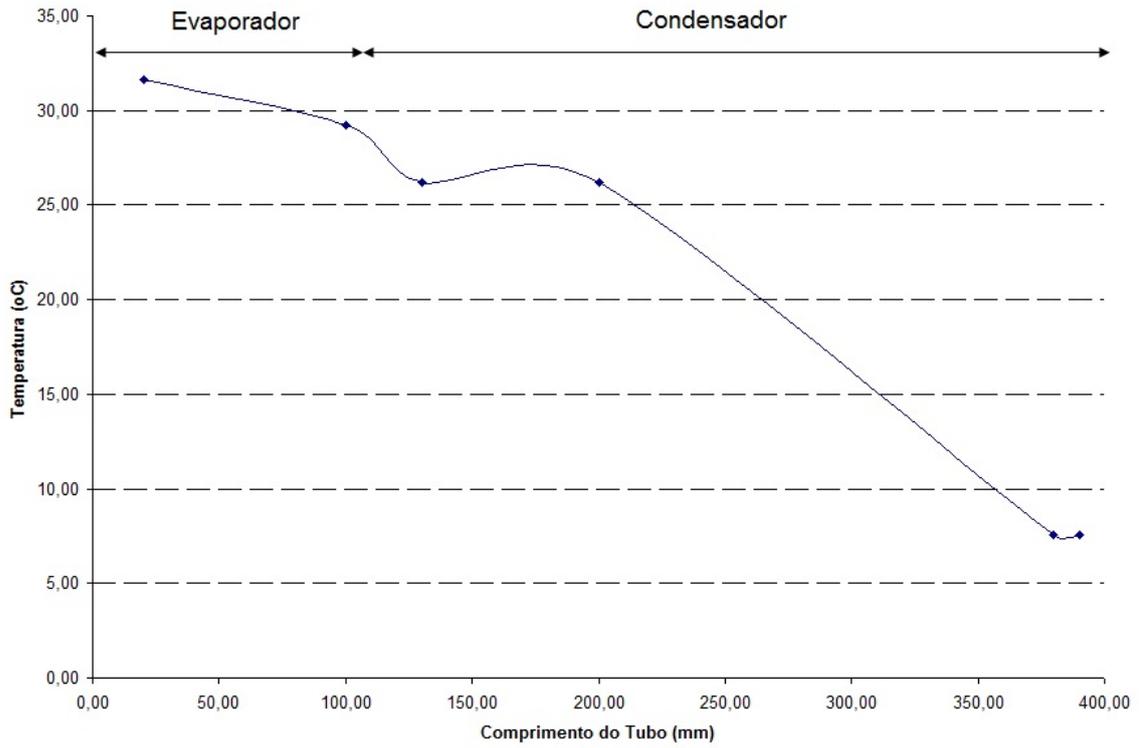


Figura 7. HP Reg. 013 0400 A1 00: Perfil de temperatura ao longo do comprimento.

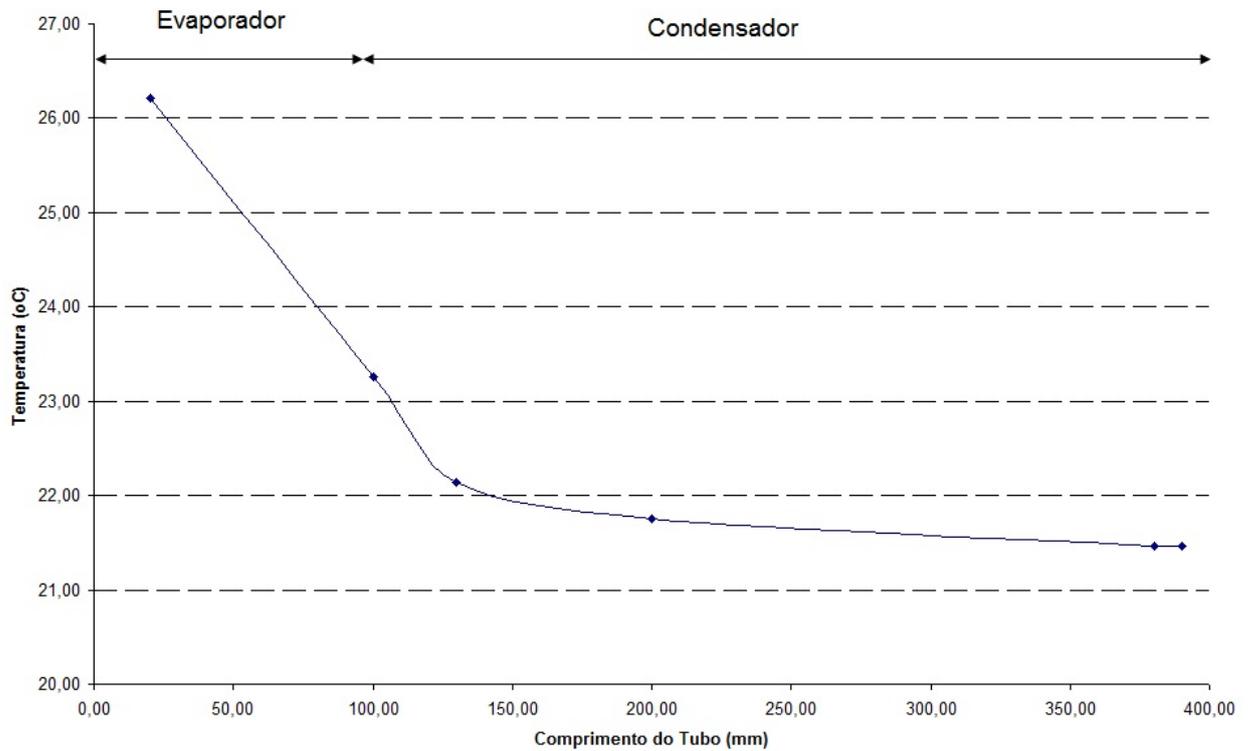


Figura 8. HP Reg. 014 0400 A1 00: Perfil de temperatura ao longo do comprimento.

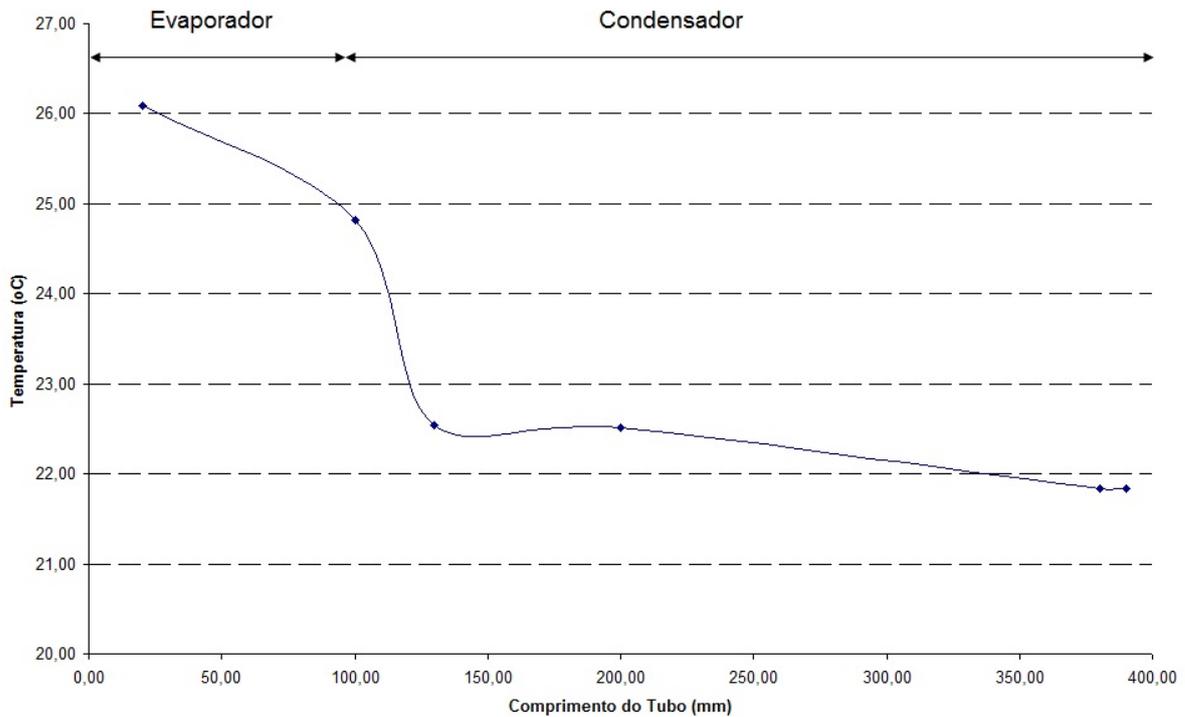


Figura 9. HP Reg. 015 0400 A1 00: Perfil de temperatura ao longo do comprimento.

O desempenho dos tubos de calor pode ser aferido através das Figs. 6-9 comparando-se a diferença temperatura entre as duas extremidades do tubo (zonas de evaporação e condensação). Neste caso, quanto menor for a diferença de temperatura entre as duas extremidades, menor será a resistência térmica do dispositivo, e, por consequência, melhor o desempenho do HP na transferência de calor de uma região de maior temperatura para uma região de menor temperatura.

A análise dos perfis de temperatura mostra que os tubos 014 e 015 (diferença de temperatura entre as extremidades, ΔT , de aproximadamente $4,9^{\circ}\text{C}$ e $4,2^{\circ}\text{C}$, respectivamente) apresentaram os melhores desempenhos entre os resultados avaliados. O tubo 009 também apresentou um desempenho satisfatório ($\Delta T \sim 6,3^{\circ}\text{C}$), ao passo que o tubo 013 apresentou o pior desempenho entre os tubos testados ($\Delta T \sim 24,5^{\circ}\text{C}$). Em função da grande diferença de temperatura apresentada pelo tubo 013, quando comparado aos demais tubos, acredita-se que pode ter havido falha em seu processo de fabricação, provavelmente com entrada de ar no sistema, que por ser um gás não condensável, acaba bloqueando a região de condensação, impedindo o funcionamento adequado do dispositivo.

A partir destes dados experimentais é possível obter - se as principais características de um tubo de calor: sua condutância térmica, G_{HP} ($\text{W}/^{\circ}\text{C}$), e sua condutividade efetiva k_{HP_EF} ($\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$), através das seguintes relações (Chi, 1976) (Faghri, 1995):

$$G_{HP} = \frac{Q}{(\bar{T}_e - \bar{T}_c)} \quad (1)$$

Onde $T_e - T_c$ correspondem às temperaturas médias das zonas de evaporação e condensação.

$$k_{HP,eff} = \frac{G_{HP} L_{eff}}{A_{HP}} \quad (2)$$

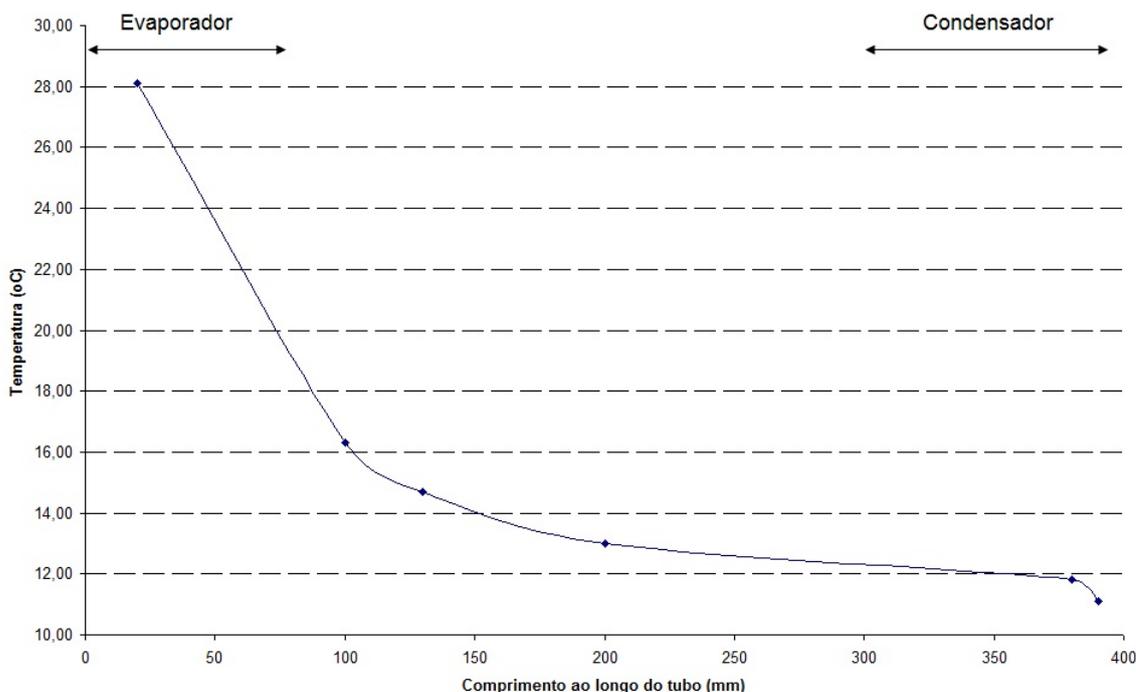
$$L_{eff} = \frac{1}{2} L_e + \frac{1}{2} L_c \quad (3)$$

Onde L_{eff} é o comprimento efetivo do tubo de calor que pode ser calculado pela equação (3), uma vez que neste experimento o tubo de calor não possui zona adiabática; A_{HP} é a área total da seção transversal do canal de vapor. A Tab. 1 apresenta as principais características dos quatro tubos testados.

Tabela 1. Principais características dos tubos de calor testados

Tubo de Calor	G_{HP} (W/°C)	k_{eff} (W/m.°C)
009 0400 A1 00	8,38	13666,8
013 0400 A1 00	2,93	4784,3
014 0400 A1 00	13,57	22131,1
015 0400 A1 00	12,25	19969,2

Entre os resultados avaliados, o tubo 009 foi selecionado para ser submetido a testes aplicando - se a metodologia experimental proposta para o experimento TUCA. A figura 10 apresenta o perfil de temperatura obtido no teste realizado com a finalidade de se verificar a viabilidade da metodologia desenvolvida.

**Figura 10. Perfil de temperatura para o HP 009 0400 A1 00 através do setup da Fig. 4.**

A partir da análise da figura 10 constatou-se que o perfil de temperatura é semelhante aos perfis obtidos nos testes de desempenho anteriores, podendo-se observar uma diferença significativa entre as temperaturas do condensador e ambiente ao final da curva (~11°C), o que confirma o funcionamento do HP.

Estes resultados são preliminares, uma vez que características quantitativas serão obtidas apenas nos testes em que as interfaces do tubo de calor estejam devidamente isoladas de forma a diminuir as perdas de calor para o ambiente.

4 Conclusões

Este trabalho apresentou alguns resultados preliminares do desempenho de funcionamento de tubos de calor projetados e fabricados com tecnologia inteiramente nacional. O projeto da seção transversal dos tubos de calor usados neste estudo foi otimizado, sendo que para isto foi desenvolvida uma ferramenta que possibilitou a extrusão desta seção transversal observando - se rígidas tolerâncias dimensionais, além do desenvolvimento de todos os processos tecnológicos ligados ao carregamento do tubo com fluido de trabalho (soldagem do tubo, carregamento da acetona e posterior selagem do dispositivo).

Os resultados apresentados mostraram que os tubos de calor carregados com acetona estão operando de maneira satisfatória, uma vez que apresentaram baixa resistência térmica (diferença entre a zona de evaporação e condensação menor que 7°C) e alta condutividade efetiva, conforme a tabela 1. Estes resultados demonstraram que existe a viabilidade do uso destes tubos de calor em futuros satélites desenvolvidos no INPE.

Por fim, a partir do desenvolvimento desta montagem experimental (exclusiva para verificação do desempenho de tubos de calor) e a fabricação de um protótipo de tubo de calor axialmente ranhurado o qual pode ser embarcado no satélite universitário ITASAT, existe a expectativa de que em breve será possível qualificar o tubo de calor desenvolvido em voo, em ambiente espacial (em condições de micro gravidade).

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pelo suporte financeiro através do projeto de pesquisa 560092/2010-5, Edital MCT/CNPq/AEB 33/2010.

Referências

Bertoldo Junior, J.; Vlassov, V. V.; Cândido, P. A.; Genaro, G. Kiseev, V. M. Experimental performance comparison of axially grooved heat pipes charged with acetone and ammonia. 16th International Heat Pipes Conference, in Lyon, França, May 20-24, 2012

Chi, S. W. (1976) Heat pipe theory and practice, McGraw-Hill Book Company, London.

Faghri, A. (1995) Heat pipe science and technology. Taylor & Francis, London

Silva, D. F.; Garcia, E. C.; Vlassov, V. V. Analysis of the thermal influence of an experimental heat pipe on the ITASAT satellite. 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, October 24-28, 2011, Natal, RN, Brazil.

Vlassov, V. V. (2008) Analysis of Heat Spreading Performance of Acetone-Filled Heat Pipe at Low Temperatures for using in Satellite Honeycomb Panels. Journal of Aerospace Engineering, Sciences and Applications, 1, p. 1 – 17.