

**Desenvolvimento de Tubos de Calor para Estabilização Térmica de Satélites
XV INIC / XI EPG - UNIVAP 2011**

Jorge Bertoldo Junior¹, Pedro Antonio Candido², José Antonio Batista Neto³, Olga Kochukina⁴, Valeri Vlassov⁵, Gino Genaro⁶

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE/Departamento de Mecânica Espacial e Controle, Avenida dos Astronautas, 1758, jorge.bertoldo@dem.inpe.br.

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/Departamento de Mecânica Espacial e Controle, Avenida dos Astronautas, 1758, pedro@dem.inpe.br.

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/ Departamento de Mecânica Espacial e Controle, Avenida dos Astronautas, 1758, jobaneto@dem.inpe.br.

⁴Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/Departamento de Mecânica Espacial e Controle, Avenida dos Astronautas, 1758, olga.kchoukina@dem.inpe.br.

⁵Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE/Departamento de Mecânica Espacial e Controle, Avenida dos Astronautas, 1758, vlassov@dem.inpe.br.

⁶Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE/Departamento de Mecânica Espacial e Controle, Avenida dos Astronautas, 1758, ggenaro@dem.inpe.br.

Resumo - A proposta deste trabalho é apresentar a tecnologia de tubos de calor que está sendo desenvolvida no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais com o propósito de nacionalizar a mesma. Os tubos de calor transportam o calor de uma extremidade para a outra de um tubo hermético, através da circulação de um fluido existente no interior do tubo. Equipamentos dissipativos são conectados com a extremidade quente do tubo, e o irradiador é instalado na extremidade oposta. O fluido evapora, na extremidade quente, retirando o calor dissipado pelo equipamento e flui pelo interior do tubo para a extremidade fria devido a diferença de pressão produzida pela evaporação. Na extremidade fria o vapor condensa-se na parede do tubo rejeitando o calor, que é eliminado para o espaço pelo irradiador. O líquido condensado retorna para a extremidade quente através de uma camada de material poroso colocado junto a parede quente do tubo, por efeito de capilaridade, completando o ciclo.

Palavras-chave: tubos de calor, estabilização térmica de satélites, controle térmico.

Engenharia:

Introdução

O grupo de controle térmico de satélites do INPE tem como missão projetar e analisar projetos relativos ao controle térmico de equipamentos e veículos espaciais além de projetos de pesquisa relacionados ao desenvolvimento de componentes para subsistemas de controle térmico, como o propósito de atender a necessidades atuais e futuras do programa espacial brasileiro, entre elas: tubos de calor, venezianas térmicas, capacitores térmicos, isoladores multicamadas (MLI) e sistemas com bombeamento capilar.

É usual a definição de dois tipos de controle térmico: passivo, quando os elementos de controle térmico não possuem sistemas móveis ou sistemas que consomem energia; ativo, quando os elementos de controle térmico usam sistemas mecânicos ativados termicamente, necessitando de consumo de energia. Este segundo tipo de controle térmico pode proporcionar modificações nos acoplamentos térmicos de maneira a

umentar ou diminuir a temperatura conforme for desejado (Leite e Muraoka, 1993) (Gilmore, 1994).

O tubo de calor é o sistema de transporte de calor mais utilizado em aplicações espaciais, devido a sua simplicidade de operação, robustez e alta relação calor transportado/peso proveniente da potência dissipada pelos equipamentos que compõe o satélite na forma de calor. (Leite e Muraoka, 2001) (Brennan e Krolczek, 1979).

Os tubos de calor transportam o calor de uma extremidade para a outra de um tubo hermético, através da circulação de um fluido existente no interior do tubo, conforme o esquema mostrado na figura 1. Os equipamentos dissipativos são conectados com a extremidade quente do tubo, e o irradiador é instalado na extremidade oposta. O fluido evapora, na extremidade quente, retirando o calor dissipado pelo equipamento e flui pelo interior do tubo para a extremidade fria devido a diferença de pressão produzida pela evaporação. Na extremidade fria o vapor condensa-se na parede do tubo rejeitando o calor, que é eliminado

para o espaço pelo irradiador. O líquido condensado retorna para a extremidade quente através de uma camada de material poroso colocado junto a parede quente do tubo, por efeito de capilaridade, completando o ciclo. (Leite e Muraoka, 2001) (Brennan e Kroliczek, 1979).

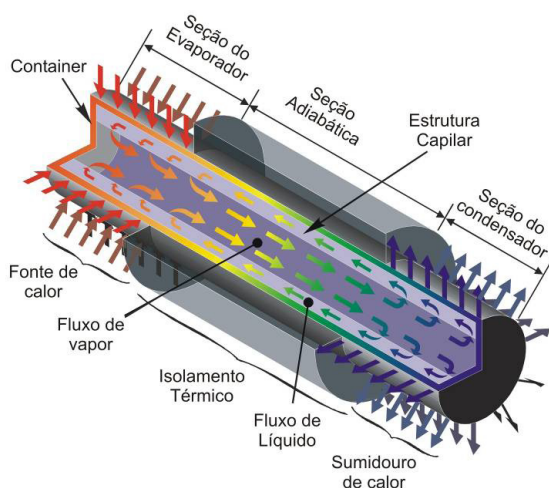


Figura 1 – Esquema do Funcionamento de um Tubo de Calor

A patente de A. M. Perkins e J. Perkins de 1831 é o primeiro registro oficial de tubos termossifões monofásicos. Esta patente descreve o funcionamento do dispositivo até então intitulado tubo de Perkins, que era composto basicamente por um tubo hermético carregado com um fluido de trabalho, que acoplava termicamente uma fornalha a um tanque de água, proporcionando o aquecimento indireto da água no tanque através da circulação da água sem mudança de fase no interior do tubo. Este dispositivo, agora conhecido como termossifão, estabeleceu as bases para que mais tarde se pudesse desenvolver o dispositivo conhecido como tubo de calor (Paiva, 2008).

A importância do fluido de trabalho

O fluido de trabalho é escolhido com base na temperatura de trabalho e nas propriedades de troca de calor (Murcia, 1982).

As propriedades de troca de calor do fluido de trabalho podem ser relacionadas com a sua máxima capacidade de transporte de calor através do chamado número de mérito, sendo expresso por (Dunn e Reay, 1994) (Paiva, 2008):

$$N_m = \left(\frac{\rho_l \sigma h_{lv}}{\mu_l} \right) \quad (1)$$

Onde ρ_l é a densidade do líquido, σ é a tensão superficial e μ_l é a viscosidade do líquido.

As características de um bom fluido de trabalho, segundo a relação estabelecida acima são: fluido com alto calor latente de vaporização, alta tensão superficial, alta densidade de líquido e uma baixa viscosidade de líquido. A figura 2 apresenta o número de mérito para alguns fluidos. A água destilada apresenta um valor elevado de Número de Mérito. O metanol neste quesito é levemente superior a acetona, que por sua vez é superior ao etanol até a temperatura de 80°C (Paiva, 2008) (Murcia, 1982).

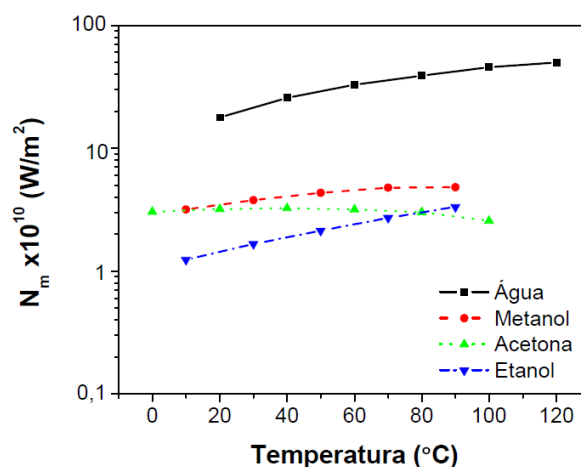


Figura 2 – Número de Mérito para os principais fluidos de trabalho empregados no carregamento de tubos de calor.

Fabricação e Carregamento de Tubos de Calor

Os tubos de calor em questão são estruturas ranhuradas com canais que funcionam como capilares, os quais podem ser visualizados na figura 3.

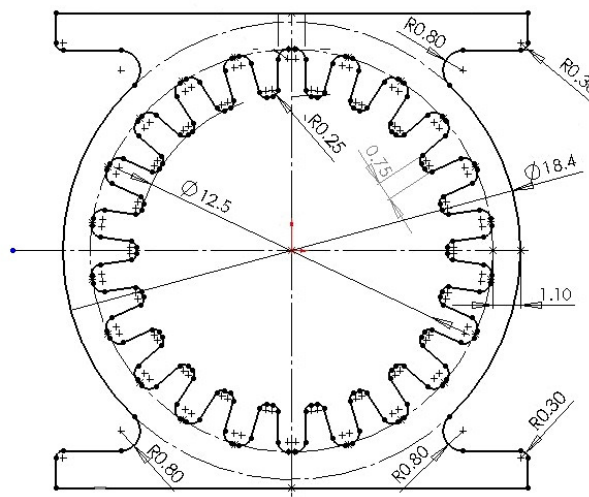


Figura 3 – Perfil de um Tubo de Calor Ranhurado

O perfil é dimensionado com base em uma metodologia de cálculos apresentada na literatura que toma como referência a quantidade de calor que se pretende transportar assim como as propriedades do fluido de trabalho.

O processo de fabricação selecionado para obtenção dos perfis foi a extrusão e o material selecionado foi o Alumínio 6063 – T6, em função das suas propriedades mecânicas e propriedades térmicas, entre elas alta condutividade térmica.

Os perfis já obtidos são apresentados na figura 4.

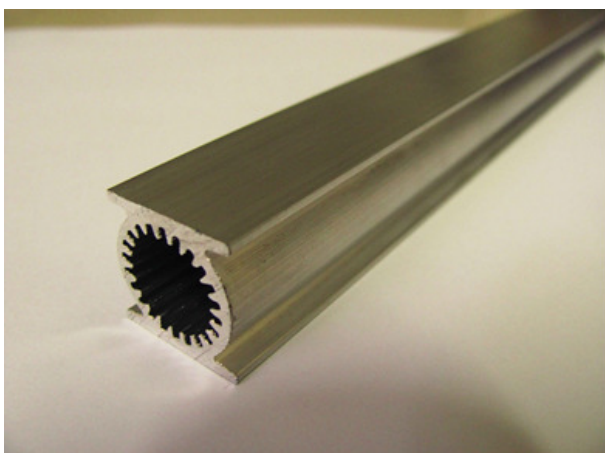


Figura 4 – Perfil extrudado de um tubo de calor.

A próxima etapa é o procedimento de carregamento do tubo, para o qual é necessário o projeto e a construção de uma estação de carga. Um dispositivo como esse já existe nas instalações do INPE em São José dos Campos e pode ser visualizado na figura 5.

Antes de ocorrer o carregamento dos tubos de calor, para que assim seja concluído o processo de fabricação, é adotada a seguinte metodologia de trabalho. Primeiro, os tubos passam pelo processo de limpeza, utilizando para isso a acetona, que também pode ser utilizada como fluido de trabalho. Após passarem pelo processo de limpeza os tubos são submetidos a um teste de vazamento. Logo em seguida os tubos os tubos são carregados com a quantidade de fluido de trabalho calculada em função do comprimento do mesmo de forma que um excesso de 10% seja adicionado ao valor nominal de carga como medida de segurança para garantir o eficiente funcionamento do tubo de calor.

O procedimento de carga de um tubo funciona baseado no conceito de diferença de pressão, ou seja, o fluido se desloca da estação de carga para

dentro do tubo, pois a pressão interna do mesmo é menor em relação a pressão de armazenamento.

O processo de carga consiste em criar um ambiente de vácuo no interior do tubo para que o fluido se desloque para o interior do tubo. Após isso ocorrer o tubo é lacrado para que o fluido fique pressurizado no seu interior.



Figura 5 – Estação de Carga para o Carregamento dos Tubos

Para que a repetibilidade da performance térmica dos tubos seja garantida é necessário que o procedimento descrito anteriormente seja seguido de forma rigorosa.

Discussão

Historicamente, na década de 1960 quando se começou o desenvolvimento dos tubos de calor como promissores dispositivos para controle térmico em aplicações aeroespaciais, inúmeras combinações de fluido de trabalho com o alumínio começaram a ser desenvolvidas e testadas. Os mais importantes foram o freon, amônia, metanol e propileno.

O resultado destas experiências mostrou que a amônia apresentava excelente capacidade de transporte de calor. No entanto a amônia é um fluido

muito tóxico e até mesmo fatal quando inalada por seres vivos.

Hoje em dia dentro da tendência geral de desenvolvimento de tecnologias ecológicas a acetona aparece como uma alternativa promissora, pois apresenta baixos riscos a saúde além de ser biodegradável.

Vlassov, Sousa e Takahashi, 2006 apresentaram em uma publicação sobre a otimização global de um radiador de um tubo calor carregado com acetona ou com amônia que dependendo das combinações de projeto do tubo de calor, um tubo carregado com acetona pode ser mais eficiente no transporte de calor em relação a um tubo de mesmo comprimento carregado com amônia, apesar de o número de mérito da amônia mostrar-se superior quando comparado ao número de mérito da acetona.

A capacidade de transporte de calor reduzida de tubo de calor carregado com acetona em relação ao tubo de calor carregado com amônia pode ser facilmente compensada aumentando-se do diâmetro do perfil do tubo de calor, como pode ser visualizado quando feita a comparação entre as figuras 6 e 7 (cerca de 20 - 30 mm tipicamente) mantendo – se os parâmetros de projeto.

Em muitas aplicações, (por exemplo, a incorporação em painéis de satélites), tubos com maior diâmetro são bastante desejáveis, porque podem proporcionar maior área de contato térmico. Uma comparação entre a amônia e a acetona como fluido de trabalho é apresentada a seguir (Tab. 1).

Tabela 1 – Comparação entre a amônia e acetona.

Fluído de Trabalho	Risco para a Saúde	Risco a Natureza
Amônia	Alto	Alto
Acetona	Baixo	Biodegradável

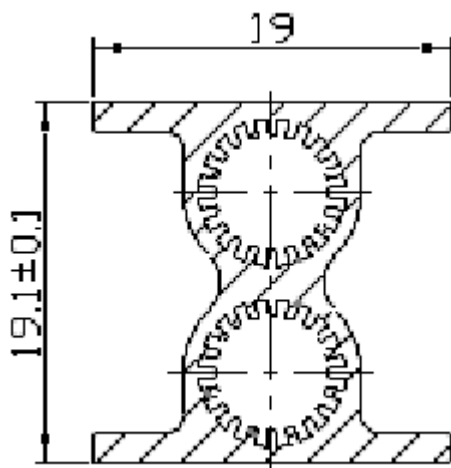


Figura 6 – Perfil de um tubo de calor carregado com amônia.

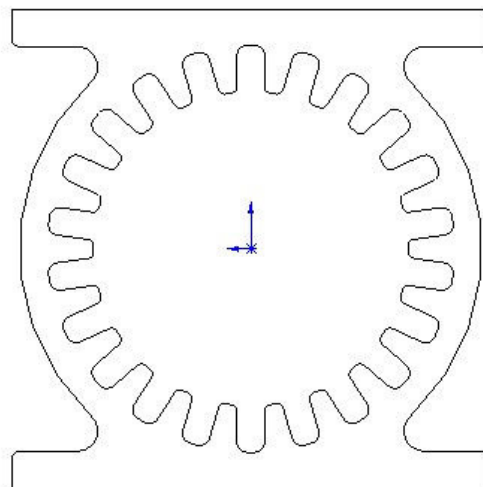


Figura 7 – Perfil de um tubo de calor carregado com acetona.

Baseados nestas constatações de projeto e possibilidades de inovação o grupo de controle térmico de satélite do INPE, propõe um no conceto em tubos de calor: tubos de calor carregados com acetona, os quais mantêm a mesma eficiência dos tradicionais tubos carregados com amônia, porém mais baratos e causando menos riscos ao meio ambiente.

Conclusão

A proposta apresentada tem fundamentação teórica e prática. Esta afirmação se fundamenta nas referências apresentadas e na inovação, pois não existem estudos consolidados sobre o carregamento de tubos de calor com acetona e aplicação dos mesmos em missões espaciais.

Também existem fundamentações práticas em relação a implementação deste projeto, tomando por base as etapas que já foram vencidas e o conhecimento dos próximos caminhos a serem percorridos. A conexão entre todos estes caminhos resultará em um produto inédito e de grande contribuição a ciência aeroespacial brasileira e mundial.

Referências

- Leite, R. M. G.; Muraoka, I. **Controle Térmico de Satélites**. Curso Propesa, CTA, São José dos Campos, set. 1993.
- Gilmore, D. G. **Satellite Thermal Control Handbook**, California, 1994.
- Leite, R. M. G.; Muraoka, I. **Fundamentos de Tecnologia Espacial – Controle Térmico**.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2001.

Brennan, P. J.; Kroliczek, E. J. **Heat pipe design handbook**. Nasa. 1979.

Dunn, P. D.; Reay, D. A., **Heat Pipes**, Pergamon, 4. ed., 1994.

Paiva, K. **Comportamento Térmico em Gravidade e Micro gravidade de Mini Tubos de Calor do Tipo Fios – Placas**. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, 2008.

Murcia, N. **Estudo Teórico e Experimental em Tubos de Calor**. Tese apresentada a Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas para Obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Vlassov, V.; de Sousa, F. L. e Takahashi, W. K. **Comprehensive optimization of a heat pipe radiator assembly filled with ammonia or acetone**, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49 (2006), p. 4584 – 4595.