

Introdução a termossifões e suas aplicações

Prof^a. Márcia B. H. Mantelli

**LABTUCAL
Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC**

1. INTRODUÇÃO

Tubos de calor e termossifões são dispositivos para troca de calor, altamente eficientes. Operam em um ciclo bifásico fechado e utilizam calor latente de vaporização para transferir calor a partir de pequenas diferenças de temperatura.

Basicamente se consistem de um tubo metálico oco, evacuado, onde certa quantidade de fluido de trabalho é inserida. Em tubos de calor, o tubo metálico é revestido internamente por um meio poroso, encharcado com o fluido de trabalho. São compostos por três regiões distintas: evaporador, região adiabática, condensador.

1.1. Princípios de funcionamento

Na região do evaporador, calor é fornecido ao tubo, vaporizando o fluido contido nesta região. O vapor gerado se desloca, devido a diferenças de pressão, para regiões mais frias do tubo, o condensador, onde o calor transportado é rejeitado. No processo de rejeição de calor, o vapor se condensa e o condensado é transportado de volta ao evaporador, fechando o ciclo.

A região adiabática, que pode apresentar dimensão variável (sendo inexistente em alguns casos), está localizada entre o evaporador e o condensador, sendo isolada do meio externo.

No caso dos termossifões, o fluido condensado retorna para o evaporador por efeito da gravidade. Assim, para que não ocorra secagem (falta) de fluido de trabalho no evaporador, este deve estar sempre localizado abaixo do condensador, conforme mostra a Fig. 1.

No caso de tubos de calor, o retorno do fluido de trabalho do condensador ao evaporador se dá pelo efeito de bombeamento capilar, resultante do escoamento do fluido pelo meio poroso, conforme ilustrado na Fig. 2.

Os tubos de calor e termossifões podem ser projetados para operar na forma de circuitos, ou seja, o condensador e o evaporador são unidos entre si por dois tubos, lisos internamente, por onde circula apenas vapor ou líquido, evitando desta forma o arrasto entre o líquido e vapor. Este tipo de dispositivo está esquematizado na Fig. 1.3, para tubos termossifões ("loop thermosyphons") e na Fig. 1.4, para tubos de calor ("loop heat pipe").

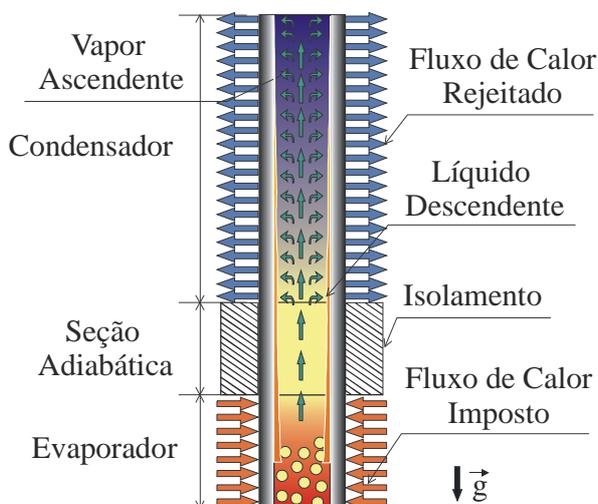


Figura 1.1. Princípios físicos de funcionamento de um termossifão.

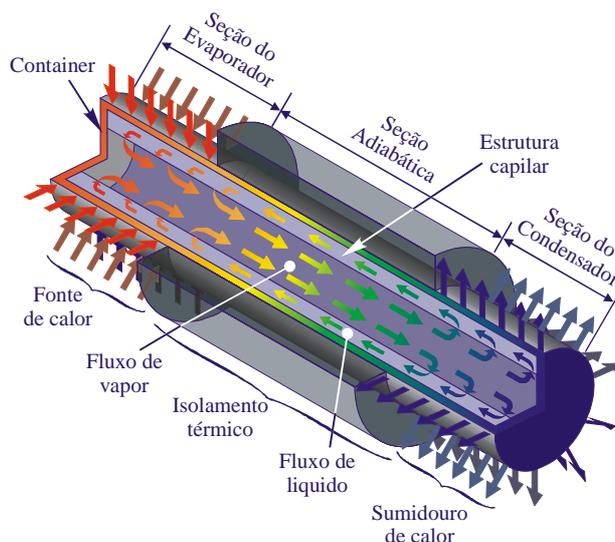


Figura 1.2. Princípios físicos de funcionamento de um tubo de calor.

1.2. Aspectos históricos

As primeiras patentes relacionadas à termossifões foram registradas por A. M. Perkins e J. Perkins, em meados de 1800. O equipamento patenteado foi um aquecedor de água, que utilizava uma ou duas fases de um líquido contido internamente a um tubo, para transportar calor de uma fornalha ao tanque de armazenamento de água. A Fig. 1.5 ilustra este equipamento.

Ainda neste século, Perkins também registrou uma patente de um forno de cocção de pães com tecnologia de termossifões, conhecido como forno Perkins, conforme ilustra a Fig. 1.6. É interessante notar que, ainda hoje, vários destes fornos ainda estão em operação, apresentando grande performance térmica, como se pode observar especialmente no Brasil.

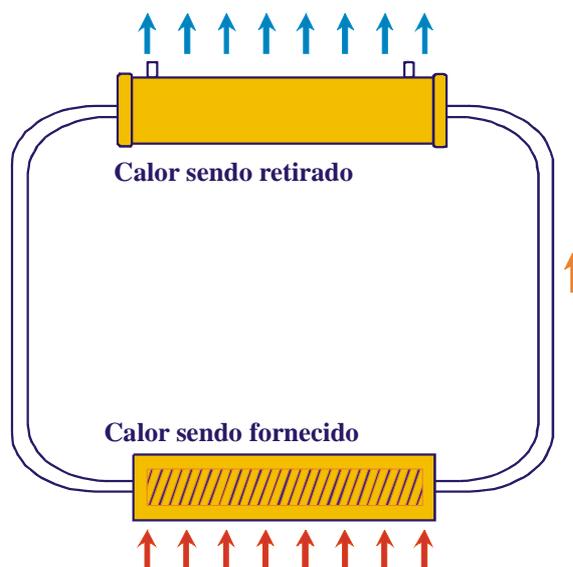


Figura 1.3. Esquema de funcionamento de um termossifão em circuito ("loop thermosyphon").

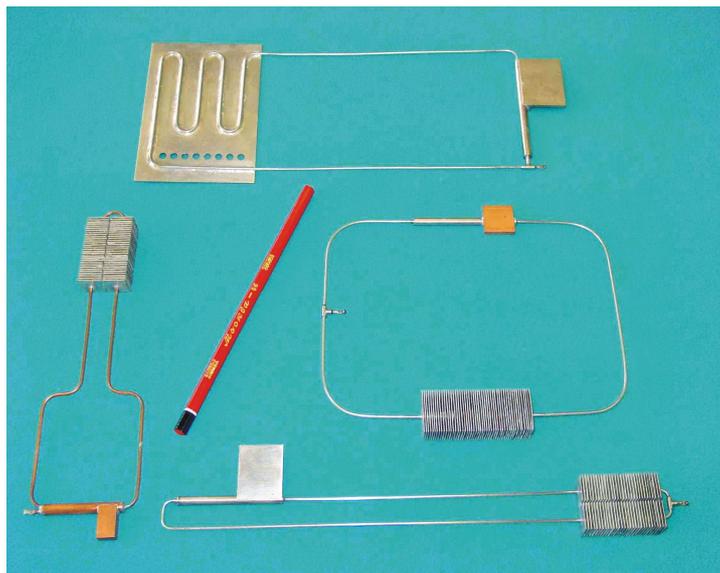


Figura 1.4. Tubos de calor em circuito (“loop heat pipe”).

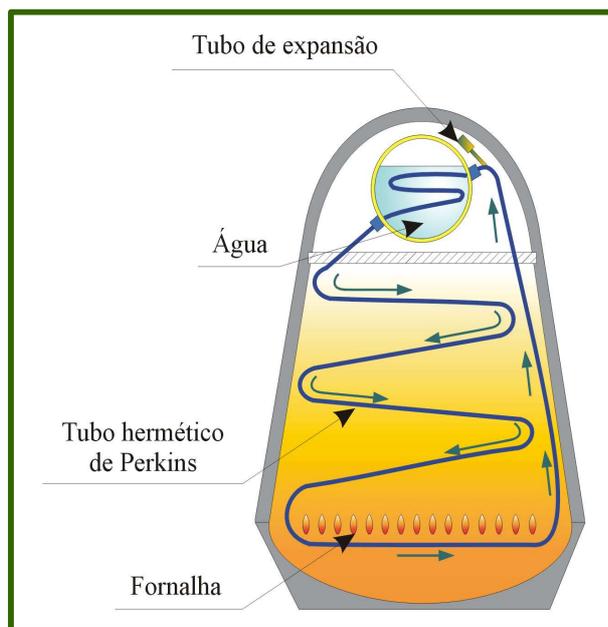


Figura 1.5. Desenho esquemático de aquecedor do tipo Perkins.

Apesar de existirem controvérsias, atribui-se a Gaugler, em 1944, a primeira proposta de um dispositivo para o transporte de calor, formado por um tubo selado, onde um meio poroso interno promovia a circulação do fluido de trabalho, do condensador ao evaporador. Porém, foi apenas com o desenvolvimento da indústria espacial na década de 1960, que o desenvolvimento de tubos de calor, visando o controle térmico de veículos espaciais ganhou impulso (Trefethen, 1962). Grover et al. (1964) foram os primeiros a empregar o termo “tubos de calor” ou “heat pipes”.

1.3. Componentes de tubos de calor e termossifões

Como já observado, a grande diferença entre um tubo de calor e um termossifão está no mecanismo pelo qual o líquido retorna do condensador para o evaporador. Em termossifões, a gravidade é a responsável pelo retorno do condensado, enquanto que, no caso de tubos de calor, o retorno do condensado se dá pelo bombeamento capilar, resultante do escoamento do fluido em um meio poroso, que normalmente reveste a sua parede interna.

Apesar de exigirem processos de fabricação mais complexos e, portanto, apresentarem preços mais elevados, os tubos de calor apresentam maior flexibilidade, podendo operar em circunstâncias adversas, onde, por exemplo, o condensador se situe abaixo do evaporador, ou em ambientes de micro ou de ausência de gravidade (aplicações espaciais). Por outro lado, a facilidade de construção e o custo reduzido fazem dos termossifões os equipamentos preferidos para aplicações industriais, sempre que for possível utilizar a gravidade.

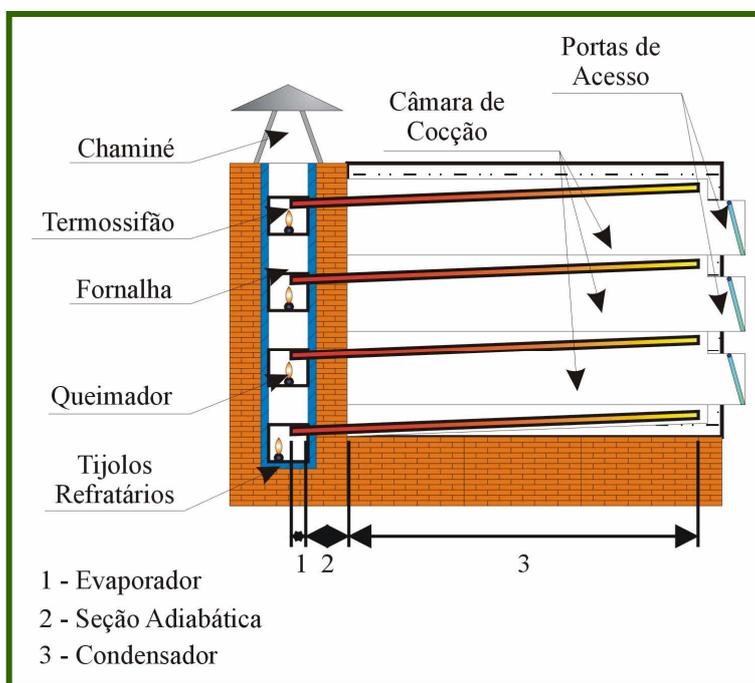


Figura 1.6. Forno Perkins, do tipo "lastro", patenteado no século XIX, onde a tecnologia de termossifões é empregada.

Basicamente, um tubo de calor é composto por três componentes principais: o **invólucro**, que em muitos casos é um tubo oco, feito de metal, vidro ou cerâmica; uma **estrutura porosa**, construída a partir de fibra de vidro corrugada, pós metálicos sinterizados, telas (metálicas ou de fibra de vidro) ou ranhuras (sulcos longitudinais de pequena abertura) presentes na superfície interna dos tubos (ver Fig. 1.7); e **fluido de trabalho**.

O fluido de trabalho pode variar de hélio ou nitrogênio líquido, para operar em baixas temperaturas, até metais líquidos (mercúrio, sódio, potássio, lítio) para operar em altas temperaturas, passando por água, para temperaturas intermediárias. Estes três elementos são muito importantes e devem ser mecânica e quimicamente compatíveis entre si.

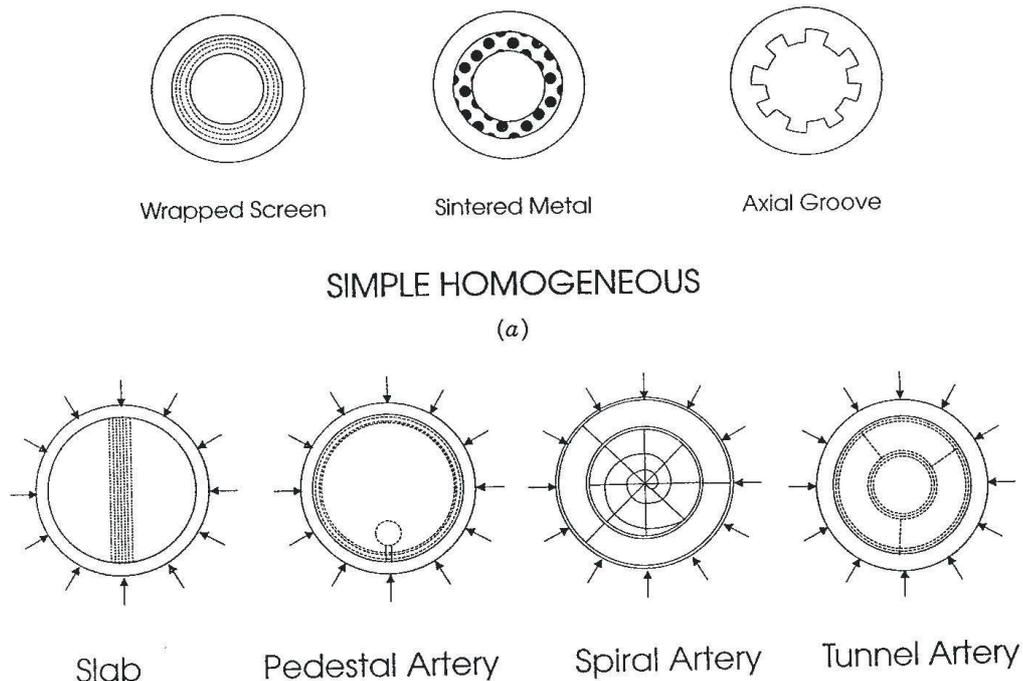


Figura 1.7. Meios porosos convencionais em tubos de calor.

1.3.1. Estrutura porosa

A estrutura porosa presente em tubos de calor, apresenta duas funções primordiais: retorno do fluido condensado ao evaporador e garantia de que o fluido de trabalho se distribua ao longo de todo o tubo de calor. O retorno do condensado se dá pelo bombeamento capilar que a estrutura porosa proporciona ao líquido. Portanto, para aumentar a pressão de bombeamento capilar, é desejável que os poros sejam bastante reduzidos. Por outro lado, poros reduzidos aumentam a resistência de escoamento do fluido de trabalho pelo meio poroso, aumentando a resistência térmica global do dispositivo.

Devido a esta dicotomia, meios porosos não homogêneos têm sido desenvolvidos, utilizando materiais diferentes e/ou estruturas compostas. A Fig. 1.8 apresenta diferentes configurações do meio poroso. Em alguns casos, os tubos de calor apresentam duas permeabilidades diferentes na direção axial paralela ao escoamento do fluido condensado. Estruturas compostas prevêm um tamanho de poro maior no centro para reduzir a queda de pressão devida a forças viscosas e poros menores perto da parede do tubo, para garantir o necessário bombeamento de fluido. Em adição a estas soluções, novas configurações, que separam o fluxo de líquido e de vapor, visando reduzir as forças cisalhantes resultante da contra-corrente entre condensado e vapor, são também empregadas.

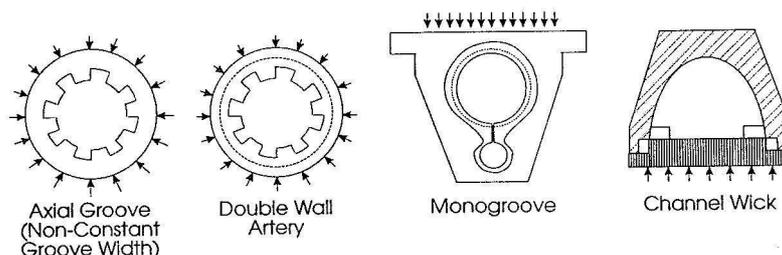


Figura 1.8. Estruturas e configurações porosas de tubos de calor.

1.3.2. Fluido de trabalho

Como a operação de um tubo de calor se baseia principalmente na vaporização e condensação do fluido de trabalho, este deve ser criteriosamente selecionado. O principal critério empregado na seleção do fluido de trabalho é a sua temperatura de operação. A temperatura de ebulição deve ser compatível com o nível de temperatura de operação, que pode variar de temperaturas criogênicas (5 a 100 K) até níveis bastante altos (acima de 1000 K). A Fig. 1.9 mostra alguns fluidos de trabalho típicos, agrupados de acordo com a temperatura de operação. Além das propriedades termofísicas, propriedades como molhabilidade do fluido e tensão superficial são importantes e devem ser avaliadas.

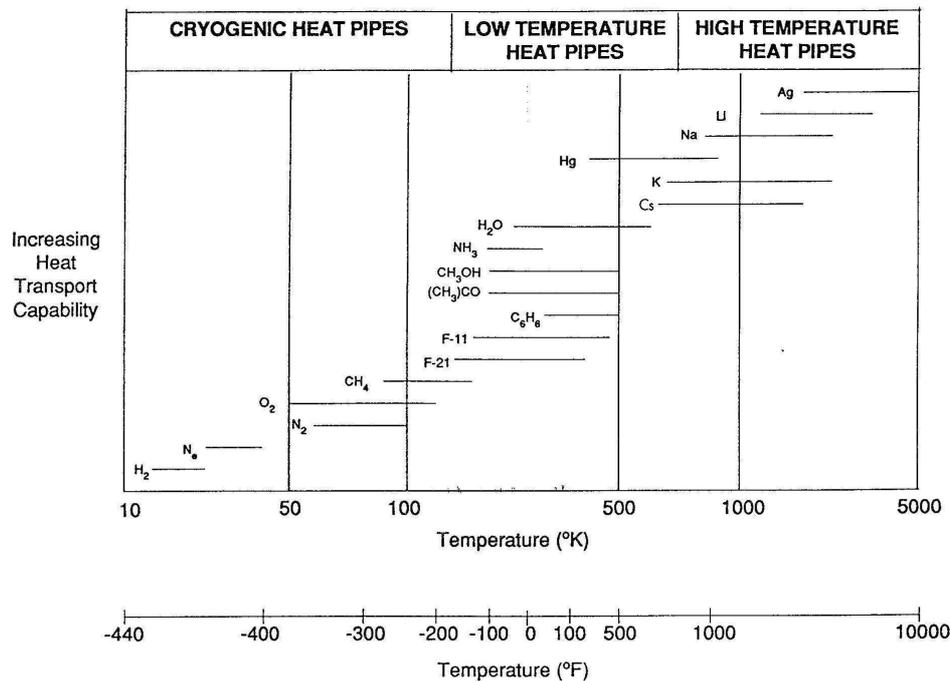


Figure 1.5 Possible working temperature ranges for some of the various heat pipe fluids.

Figura 1.9. Alguns fluidos de trabalho típicos para a faixa de temperatura de operação.

1.4. Limites de operação

Os tubos de calor e termossifões apresentam limitações na capacidade de transporte de calor.

Para tubos de calor, o maior limitante se encontra na capacidade do meio poroso em prover pressão suficiente para promover a circulação do fluido de trabalho. Quando esta pressão capilar não é suficiente, o tubo de calor atinge o seu limite capilar, ocorrendo secagem do meio poroso.

Vários outros mecanismos podem limitar a máxima quantidade de calor que o tubo de calor pode transportar em regime permanente, incluindo o limite viscoso, o limite sônico, o limite de arrasto e o limite de ebulição. Os limites capilares e viscosos estão relacionados com as quedas de pressão que ocorrem nas fases: líquida e vapor, respectivamente. O limite sônico resulta da ocorrência da onda de choque na passagem do vapor, enquanto que o limite de arrasto é devido às altas forças de

cisalhamento desenvolvidas pelo vapor quando este se desloca na direção contrária sobre o meio poroso saturado com líquido. Todos estes limites são relativos à capacidade do tubo de transportar calor axialmente. Já o limite de ebulição é um limite radial, o qual é atingido quando o fluxo de calor aplicado no evaporador é tão alto que ebulição nucleada ocorre no meio poroso do evaporador. Isto cria bolhas que bloqueiam o retorno do líquido do condensador ao evaporador e pode levar a uma secagem prematura do evaporador.

Para níveis moderados de temperatura, o limite mais significativo é o limite capilar. Porém, a importância deste limite decresce para aplicações em ambiente de gravidade reduzida. Em baixos níveis de temperatura, como as criogênicas, os limites viscoso ou capilar irão ocorrer primeiro, enquanto que, em alta temperatura (metal líquido como fluido de trabalho), o limite sônico e o limite de arrasto são os mais importantes. Devido à importância deste tema, todos estes limites serão discutidos em detalhes mais adiante neste nivelamento.

Os limites de operação dos tubos termossifões são diferentes dos encontrados em tubos de calor. Como não possuem meio poroso, o limite capilar não se aplica. Os outros limites, porém são aplicáveis.

1.5. Características de tubos de calor e termossifões

Tubos de calor e termossifões apresentam uma série de características que os tornam muito úteis em diversas aplicações. Sua capacidade de transferência de calor é de várias ordens de magnitude superior a de um tubo metálico maciço de mesma geometria, mesmo feito de material de grande condutividade térmica. Em outras palavras, a resistência térmica ao fluxo de calor entre evaporador e condensador é muito pequena, fazendo com que a diferença de temperaturas entre estas regiões possa ser mínima.

Desta forma, estes dispositivos podem ser utilizados como homogeneizadores de temperatura. Outra grande vantagem é que o aumento da potência no evaporador não representa necessariamente um aumento significativo no nível de temperatura do dispositivo, desde que o condensador possa ser capaz de dissipar o calor entregue ao evaporador. Além disto, como o evaporador e condensador operam de forma independente, pode haver uma grande flexibilidade na geometria, na distância entre evaporador e condensador e nas suas áreas de troca de calor. Outra grande vantagem está na rápida resposta aos aumentos de potência, que ocorre quando o dispositivo já está em operação. Como já observado, os tubos de calor e termossifões podem operar em diversos níveis de temperatura, tornando-os ainda mais flexíveis. Quando comparados com condutores sólidos, estes dispositivos são bastante leves e podem ser facilmente utilizados sem alterar significativamente a geometria dos equipamentos onde são aplicados.

1.6. Aplicações de tubos de calor e termossifões

São diversas as aplicações onde tubos de calor podem ser empregados. Na área espacial, tubos de calor são aplicados no controle térmico de componentes eletrônicos e no manejo de calor dentro do veículo espacial, por poderem operar sem a presença de gravidade.

Tubos de calor e tubos de calor em circuitos (“loop heat pipes”) são empregados no resfriamento de processadores em computadores como ilustra a Figura 1.10. Também são empregados no resfriamento de matrizes para moldes de alumínio, conforme apresentado na Fig. 1.11. Tubos de calor também têm sido considerados para o resfriamento de células combustíveis, como ilustra a Fig. 1.12.

Em aplicações na construção civil, pode-se citar a utilização de tubos termossifões em estradas em locais onde neve é presente no inverno. Os tubos são enterrados até

atingir camadas de terra, que se encontram em temperaturas mais elevadas que as superficiais, aquecendo o leito das estradas e evitando o acúmulo de neve sobre elas. A Fig. 1.13 ilustra esta aplicação em uma estrada na China. Uma aplicação bastante conhecida nesta área é instalação de tubos ao longo de dutos para o transporte de petróleo no Alaska. Neste caso, a função dos termossifões é prevenir que o calor utilizado no aquecimento dos dutos seja transportado pelos suportes até a camada de terra (permafrost) onde a estrutura está apoiada, descongelando-a e, conseqüentemente, desestabilizando toda a estrutura. Foram usados no total cerca de 100.000 termossifões. A Fig. 1.14 ilustra esta aplicação.

Ainda na China, a tecnologia de tubos termossifões é largamente empregada na indústria para a solução de problemas térmicos e de conservação de energia. Dentre os equipamentos utilizados pela indústria, pode-se destacar os trocadores de calor com termossifões (conforme mostra a Fig. 1.15) e os termossifões em circuito ("loop thermosyphons") lustrados na Figura 1.16.

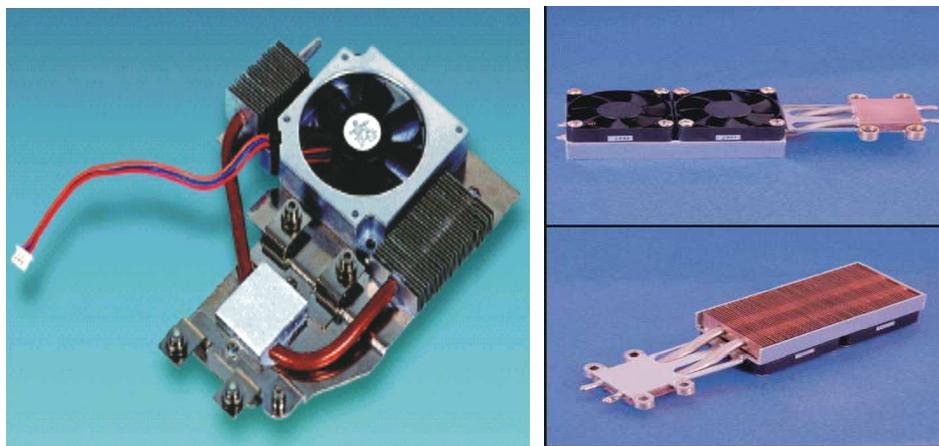


Figura 1.10. Resfriadores de componentes eletrônicos em computadores.

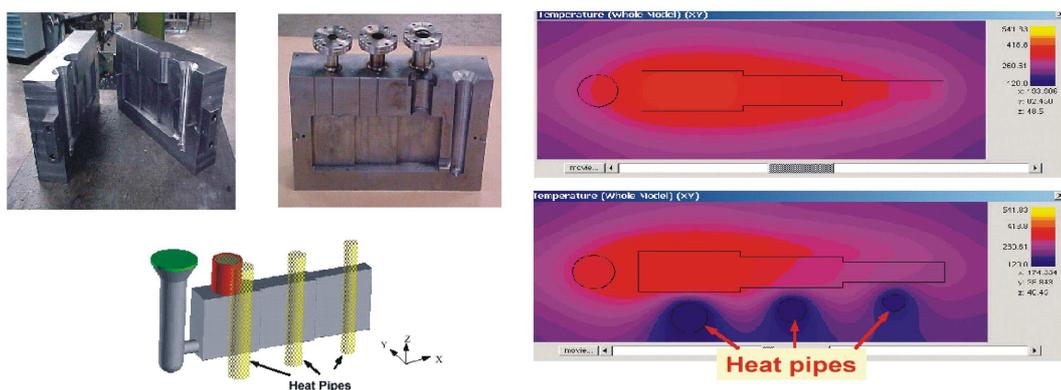


Figura 1.11. Resfriamento de matrizes para moldes de alumínio em fundições (a foto a direita acima mostra a distribuição de temperatura do molde sem tubos de calor e a debaixo com tubos de calor).

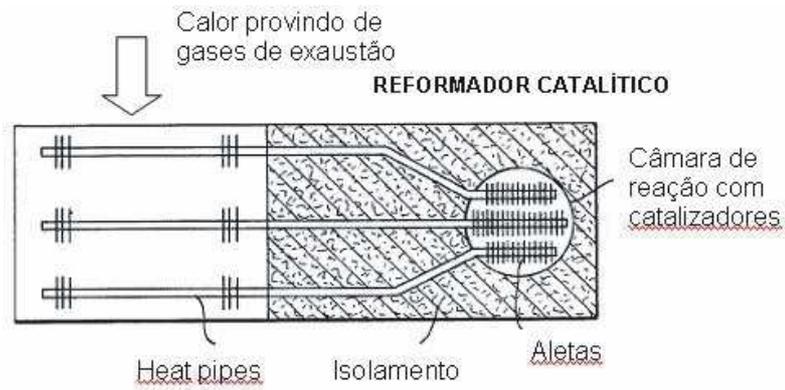


Figura 1.12. Resfriamento de células combustíveis.



Figura 1.13. Tubos termossifões são aplicados nos leitos das rodovias para evitar que a neve se acumule sobre estas nas regiões mais frias.

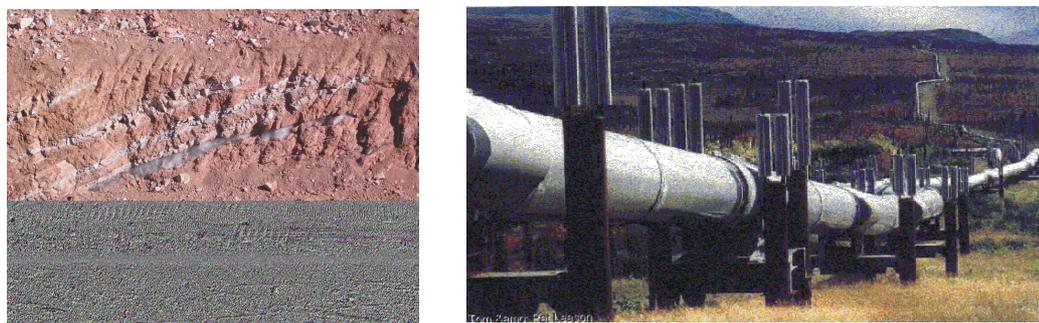


Figura 1.14. Tubos termossifões aplicados ao longo de Trans-Alaska, para evitar que o calor provindo do aquecimento dos dutos descongelsse o permafrost.



Figura 1.15. Trocadores de calor com termossifões empregados na indústria na China.



Figura 1.16. Trocadores de calor em circuitos (loop thermosyphons) empregados na indústria na China.