

1º Seminário da **Rede Gás & Energia**

21 e 22 de novembro de 2006 - EDISE - Rio de Janeiro.

Coordenação: RH/Universidade Petrobras

TECNOLOGIA DE TERMOSSIFÕES APLICADA A TROCADORES DE CALOR DE ALTA TEMPERATURA

Márcia Mantelli, PhD
marcia@emc.ufsc.br

Thomaz Borges, Dr.
tborges@emc.ufsc.br

Cláudia Kniess, Dra.
kniess@labtucal.ufsc.br

André F. V. Cunha, M. Eng.
andre@labtucal.ufsc.br

Gustavo Verdieri Nuernberg, Eng.
verdieri@labtucal.ufsc.br

**Laboratórios de Tubos de Calor (LABTUCAL/LEPTEN)
Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina**

RESUMO

Trocadores de calor baseados na tecnologia de tubos de calor e termossifões são cada vez mais utilizados em instalações industriais, especialmente na indústria do petróleo, como se observa em países como a China. O Laboratório de Tubos de Calor (LABTUCAL) vem recebendo recursos do CENPES/Petrobrás e da FINEP para o desenvolvimento, projeto e construção de trocadores de calor com a tecnologia de tubos termossifões, visando principalmente o aproveitamento da energia de fluxos quentes, normalmente liberados para a atmosfera ou em substituição de equipamentos já em operação, mas que apresentam problemas de manutenção (trocadores rotativos do tipo Ljüngstrom, por exemplo). Os equipamentos desenvolvidos com esta tecnologia e em fase de instalação operam em faixas de temperatura entre 100 e 250°C, o que torna possível o uso da água como fluido de trabalho. Porém, em muitas aplicações, os níveis de temperatura de operação dos equipamentos são maiores, necessitando o uso de outros fluidos de trabalho, como compostos orgânicos (naftaleno, tolueno, anilina, fenóis) ou metais líquidos (sódio, potássio, entre outros). A tecnologia empregada em tubos de alta temperatura é mais sofisticada. Além disto, novos modelos matemáticos devem ser desenvolvidos, uma vez que os fenômenos físicos são diferentes dos encontrados em tubos convencionais. Neste

trabalho serão apresentados os resultados teóricos e experimentais obtidos para protótipos construídos no laboratório, utilizando metais líquidos e compostos orgânicos como fluidos de trabalho. O domínio desta tecnologia é importante para o desenvolvimento e independência da indústria nacional na área de equipamentos de tubos de calor.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os Trocadores de calor assistidos por tubos de calor tornam mais eficientes os processos de recuperação de calor em plantas industriais.

Tal tecnologia era pouco dominada anteriormente às pesquisas espaciais, que permitiram o desenvolvimento de ferramentas numéricas, empíricas e analíticas para o dimensionamento destes equipamentos.

O tubo de calor ou "heat pipe" é um dispositivo capaz de transportar grandes quantidades de calor, quando submetido a pequenos gradientes de temperatura. São dispositivos de condutividade térmica muito elevada, apresentando uma eficiência na troca de calor de 500 a 1000 vezes superior quando comparados a tubos de cobre maciços da mesma geometria [1].

Um tubo de calor consiste tipicamente de um tubo metálico com as extremidades seladas e com uma estrutura capilar junto à parede interna. Este tubo é evacuado e preenchido com um volume de fluido de trabalho suficiente para saturar por completo a estrutura capilar. Os termossifões bifásicos do tipo fechado são tubos de calor que se

caracterizam pela ausência da estrutura capilar interna.

Através do uso de tubos de calor é possível criar trocadores do tipo "casco-casco". Não havendo passagem das correntes externas pelos tubos, existe uma diminuição da perda de carga em relação ao trocador casco-tubo convencional.

A literatura apresenta tentativas de modelagem de campos de temperatura e de pressão em um termossifão utilizando para isto métodos numéricos [2]. Porém, a falta de flexibilidade na utilização destes modelos assim como a dificuldade em sua manipulação, faz dos modelos simplificados, tais como os que utilizam a analogia com circuitos elétricos, os preferidos em projetos de engenharia. A resistência térmica global R_t [K/W] de um termossifão pode ser determinado pela seguinte expressão:

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

onde \bar{T}_e e \bar{T}_c [K] representam as temperaturas médias do evaporador e condensador, respectivamente e Q [W] representa o calor transferido pelo termossifão

No modelo de analogia de circuito elétrico, a resistência total do termossifão é computada como a associação em série das resistências térmicas relativas aos processos de transferência de calor dentro do dispositivo. A Figura 1 mostra o circuito térmico equivalente de um termossifão

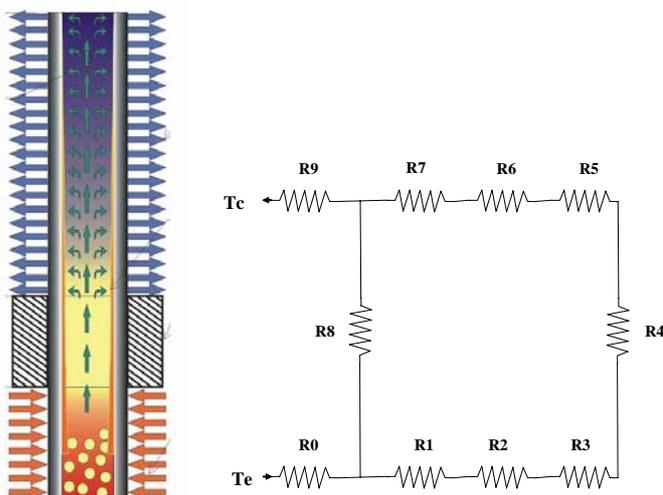


Figura 1- Circuito térmico equivalente de um termossifão.

Os seguintes processos (com suas resistências térmicas) ocorrem para o transporte do calor do fluido quente para o fluido frio: O fluido quente à temperatura T_c sofre convecção com a

parede externa do tubo (R_0). Uma parte desprezível deste calor caminha por condução pelas paredes do tubo (R_8), e a grande parte é conduzida para o interior do tubo através da parede do termossifão (R_1). A resistência interna R_2 está associada à evaporação do líquido. A resistências R_3 e R_5 ocorrem nos fenômenos de ebulição e condensação, enquanto que R_4 é associada com a queda no nível de temperatura do vapor devido à queda de pressão no fluxo de vapor entre o evaporador e o condensador. A resistência R_6 está associada a condensação do líquido. A condução de calor através da parede do condensador ocasiona a resistência R_7 . Finalmente temos a convecção externa do tubo com o fluido a ser aquecido, representada pela resistência R_9 .

Em um trocador, a resistência térmica interna dos termossifões costuma ser pequena quando comparada às resistências por convecção externa ao tubo. A Figura 2 mostra a parcela de resistências externas e internas para o caso de um recuperador de 700 kW projetado para uma unidade de Xisto da Petrobrás em S. Mateus do Sul (SIX), o cálculo preliminar do trocador de calor mostra que as principais resistências térmicas em um termossifão são as de convecção dos gases com as paredes externas do tubo.

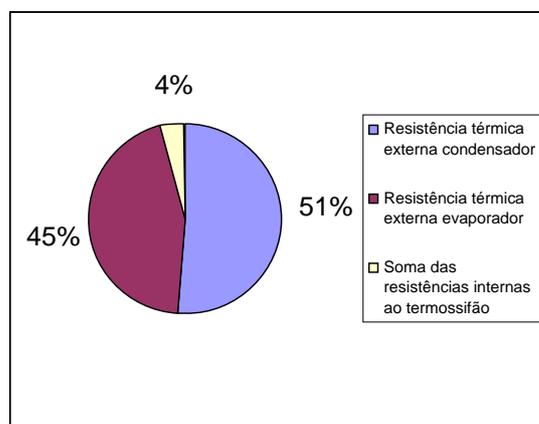


Figura 2 – Participações na resistência térmica global de um trocador de calor com termossifões

Em função da presença de mais de uma fase da mesma substância no interior do termossifão (líquido e vapor), quando este está em funcionamento, o meio bifásico encontra-se em estado de saturação. Portanto, existe uma correlação direta da temperatura de trabalho do termossifão com sua pressão de trabalho, que é característica do fluido de trabalho utilizado.

A água é um excelente fluido de trabalho, pois além de não ser tóxica e ter fácil manuseio, é um líquido com grande calor latente de vaporização. Com uma pequena massa de água evaporada, é possível a transferência de grande

quantidade de calor, em comparação com demais fluidos de trabalho, como mostra a Tabela 1

Tabela 1 – Comparação da água com fluido de trabalho orgânico (naftaleno) e metálico (mercúrio).

		Água	Naftaleno	Mercúrio
Fórmula	-----	H ₂ O	C ₁₀ H ₈	Hg
Massa Molecular	kg/kmol	18	128	200
Temp. crítica	°C	374	475	1476
Pressão crítica	MPa	21,94	3,99	151
Temp. de fusão	°C	0	80	-39
Temp. de ebulição (T _{eb})	°C	100	218	357
Densidade líquido (@ T _{eb})	kg/m ³	958	878 (200°C)	12737
Viscosidade líquido (@ T _{eb})	10 ⁻³ N.s/m ²	0,28	37,5 (200°C)	0,881
Calor latente de vaporização (@ T _{eb})	kJ/kg	2258	338	295
Calor na evaporação de 1/s de líquido	kW	2163	297	3756

Mesmo em temperaturas logo abaixo do ponto crítico, a grande pressão de operação pode ser uma limitação para a construção de alguns termossifões utilizando água. Isto porque haveria a necessidade de se utilizar tubos demasiado espessos para suportar a pressão de trabalho, o que aumenta a resistência térmica global do equipamento.

Na construção de recuperadores de calor para fornalhas, é freqüente a necessidade de recuperadores para a faixa acima de 250°C. Para faixas de temperaturas superiores à recomendada para a água, podem ser utilizados outros fluidos de trabalho como orgânicos e metais líquidos, conforme mostra a figura 3.

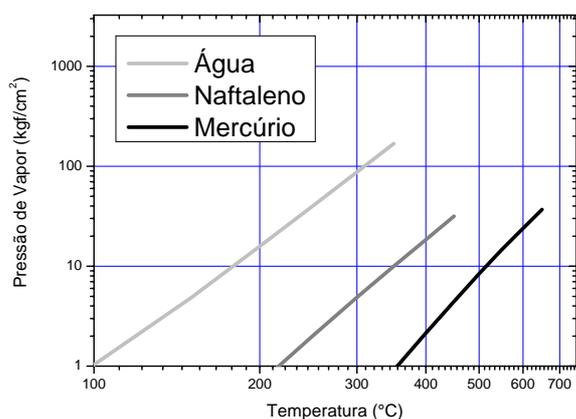


Figura 3 – Pressão de saturação de fluidos de trabalho em função da temperatura.

Uma das limitações no estudo de compostos orgânicos e metais líquidos como fluidos de trabalho em termossifões é a inexistência na literatura específica da divulgação de pesquisas que apresentem detalhes do comportamento desses fluidos, assim como correlações para cálculo de resistências internas dos termossifões.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é o estudo do comportamento de termossifões utilizando compostos orgânicos e metais líquidos como fluido de trabalho, visando o uso em aplicações industriais que requerem faixas de temperatura de trabalho que não podem ser atendidas pela água.

Em relação aos compostos orgânicos, o objetivo foi realizar testes experimentais qualitativos utilizando o naftaleno como estudo de caso, visando à observação de comportamentos que o diferem da água.

Quanto aos metais líquidos, buscou-se avaliar a uniformidade térmica de um termossifão em operação, utilizando o mercúrio como fluido de trabalho. A montagem experimental será posteriormente utilizada para validar correlações analíticas de um modelo térmico dos termossifões.

2.0 – TERMOSSIFÕES UTILIZANDO FLUIDOS ORGÂNICOS

Os compostos orgânicos são indicados como fluidos de trabalho em termossifões para aplicações industriais que requerem uma faixa de temperatura entre 250 e 450 °C, como por exemplo, refinarias, termoelétricas e fornos de tratamentos térmicos. Nesses casos, existe a necessidade da utilização de termossifões que funcionem em temperaturas mais elevadas sem que o aumento da pressão interna ocasione o rompimento dos tubos, ou que ocorra perda de eficiência em função do uso de uma parede muito espessa. Para aplicações a esses níveis de temperatura, a literatura [3] lista uma série de potenciais candidatos a fluido de trabalho: naftaleno (C₁₀H₈), fenol (C₆H₆O), tolueno (C₆H₅CH₃), anilina (C₆H₇N) e hidrazina (N₂H₄). Segundo Vasiliev et al., [4] o naftaleno é um dos agentes de transferência de calor mais promissores para a utilização em termossifões para temperaturas classificadas como faixa intermediária (250-450°C). O naftaleno é um produto da produção do petróleo, e apresenta-se sob a forma de cristais brancos, e quando líquido, possui uma viscosidade muito baixa, no qual decresce consideravelmente com o aumento da temperatura [4]. A tabela 2 apresenta algumas propriedades termo-físicas do naftaleno [5-7]. Dentro desse contexto, este trabalho tem como objetivo investigar a viabilidade do uso de compostos orgânicos como fluidos de trabalho em termossifões de temperatura intermediária para aplicações industriais. Para tal escolheu-se o naftaleno como fluido de trabalho. O estudo foi realizado utilizando um termossifão constituído de material vítreo, para a melhor visualização dos fenômenos decorrentes do processo.

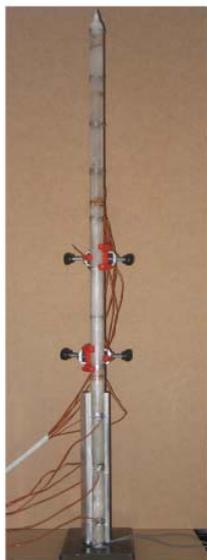
Tabela 2- Propriedades termo-físicas do naftaleno.

Peso Molecular (mol)	128,17		
Ponto de fusão (°C)	80,35		
Ponto de evaporação (°C)	217,95		
Temperatura crítica (°C)	475,25		
Pressão crítica (Mpa)	4,05		
Volume Crítico (m ³ /mol)	413 x 10 ⁻⁶		
Ponto Triplo (°C)	80,28		
Densidade do Sólido a 20 °C (kg/m ³)	1175		
Densidade (kg/m ³) (a 100, 150 e 200 °C)	963	922	878
Capacidade de calor específico (kJ/Kg.K) (a 100, 150 e 200 °C)	1,805	1,993	2,139
Condutividade térmica (W/m ²)/(K/m) (a 100, 150 e 200 °C)	0,137	0,130	0,123
Viscosidade dinâmica (10 ⁻⁵ N.s/m ²) (a 100, 150 e 200 °C)	77,4	52,0	37,5

2.1 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA O NAFTALENO

Na construção do termossifão para testes, foi utilizado um tubo do material vítreo do tipo borossilicato, para a melhor visualização dos fenômenos decorrentes do processo. Este tubo possui a seguinte geometria: 900 mm de comprimento, 24 mm de diâmetro externo e 3 mm de espessura. O sistema foi instrumentado com 16 termopares instalados na parede externa do tubo. A Figura 4 (a) apresenta o aparato usado no estudo e a Figura 4 (b) a forma esquemática com a disposição dos 16 termopares. O carregamento do fluido de trabalho foi realizado com o naftaleno na forma líquida, por meio de fusão do composto orgânico sólido, na temperatura de 81,0 °C. O fator de enchimento utilizado foi de 40% da altura da região do evaporador, equivalente a 40g de naftaleno. O naftaleno utilizado tem um grau de pureza de 98,5%.

Após o carregamento o sistema foi aquecido até a ebulição do fluido de trabalho e submetido ao processo de degaseificação, por meio de duas purgas sucessivas.



(a)



(b)

Figura 4 - (a) Fotografia do aparato, (b) Diagrama esquemático e disposição dos termopares instalados no termossifão.

Para a avaliação do comportamento do termossifão, adotou-se uma metodologia de testes em que a potência fornecida na região do evaporador foi o parâmetro variável. As potências selecionadas para os testes foram de 50, 100, 200, 300, 400 e 500 Watts. O sistema foi aquecido por meio de uma fonte externa. Os dados de temperatura foram adquiridos em intervalos de tempo regular de 10 s, através de um equipamento de aquisição de dados HP Benchlink Data Logger 34970. Em todos os testes o sistema foi refrigerado por convecção natural na região do condensador.

2.2 - COMPORTAMENTO DO NAFTALENO COMO FLUIDO DE TRABALHO

Uma das principais dificuldades encontradas nos testes experimentais foi o início de operação do termossifão ("startup"). Quando o termossifão resfria, o naftaleno se aglutina em cristais diminuindo o contato com a parede do tubo. Isto faz com que o calor recebido pelo tubo não seja transferido para o naftaleno cristalizado e dificulte sua fusão. Com o auxílio de uma pistola térmica aquece-se toda a montagem fazendo com que os cristais na parte superior da parede do tubo fundam e escorram até a parte inferior do tubo. Isso faz com que haja o molhamento do naftaleno sólido e estabelece contato físico entre o mesmo e a parede, melhorando assim a transferência térmica para que o termossifão comece a funcionar.

Observa-se no início da operação do tubo o efeito "slug flow". Trata-se do transporte de porções de naftaleno líquido para a região do condensador, em virtude da formação de grandes bolhas, que emperram porções cilíndricas ou "plugs" do líquido para cima. Quando esse efeito acontece, causa uma diminuição da quantidade de líquido na piscina da região do evaporador. Outro fator observado, é que no "slug flow" parte do naftaleno líquido encontra uma região mais fria no termossifão, parte superior, onde recristaliza e fica retido.

No entanto, à medida que a potência fornecida ao sistema é aumentada, isto é, mais calor é fornecido ao termossifão, observa-se que ocorre uma diminuição do efeito de "slug flow". O teste utilizando uma potência de 500 W apresentou maior homogeneidade térmica no condensador. Isso deixa claro que para a operação do termossifão, esta foi a melhor potência de trabalho utilizada.

Para comparação entre os testes realizados, foi calculada a média das temperaturas de todos os termopares instalados no termossifão,

101 ao 111, e construído um gráfico comparando estes valores, conforme ilustra a Figura 5. Com isto percebe-se que a temperatura média do condensador aumenta com o aumento da potência térmica, já que a frente de aquecimento consegue atingir os pontos superiores do termossifão e tornar as curvas de temperatura homogêneas.

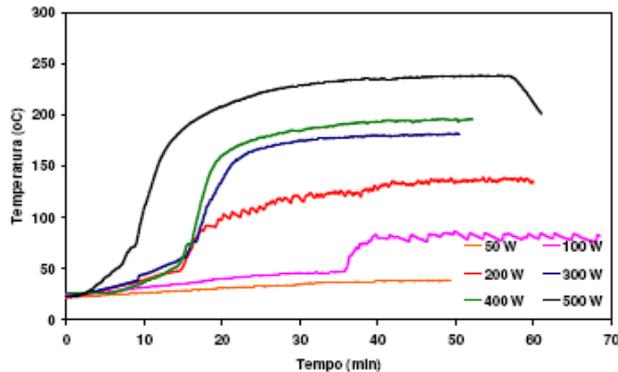


Figura 5 - Comparação entre as temperaturas médias do condensador para os diversos ensaios realizados.

2.3 – POSSIBILIDADES PARA O NAFTALENO

Além do trabalho já realizado, pretende-se dar continuidade através da realização de estudos para determinar o melhor fator de enchimento referente ao naftaleno e relacioná-lo com o comportamento térmico, características de "startup" e efeito de "slug flow" do termossifão.

Posteriormente serão realizados testes quantitativos, utilizando tubos metálicos de aço carbono. Isso permite que o termossifão opere com maior segurança e que possa ser submetido a potências mais altas para o estudo do comportamento do fluido de trabalho naftaleno, como por exemplo, as particularidades de "startup".

Para esse estudo pretende-se utilizar termopares calibrados para aferição mais precisa dos dados térmicos, além de fazer uso de sistema de refrigeração do condensador por convecção forçada.

Por meio deste aparato pode-se também avaliar a presença de gases não condensáveis. Para tanto será necessário um tempo de ensaio superior a 2000 horas, no sentido de estudar a formação desses gases e a degradação do naftaleno e de seus contaminantes.

3.0 - TERMOSSIFÕES UTILIZANDO METAIS LÍQUIDOS

O Laboratório de Tubos de calor (LABTUCAL) iniciou suas atividades de pesquisa com termossifões com metal líquido em 2004, desenvolvendo estudos teóricos e experimentais.

As pesquisas nessa área de termossifões podem ser divididas basicamente em três linhas. A primeira se concentra no estudo do desempenho dos tubos considerando-se diversos fluidos de trabalho, como sódio, potássio, mercúrio e o lítio. A segunda linha se concentra no estudo da compatibilidade destes fluidos com o material do tubo e sua relação com os limites de operação; a terceira tem foco nos estudos das aplicações destes dispositivos na indústria.

Os metais líquidos como fluido de trabalho, Tabela 3, são selecionados não só pelo adequado comportamento da pressão de vapor com a temperatura, mas também por causa das propriedades como alta tensão superficial, alto calor latente de vaporização e baixa viscosidade. O sódio e o lítio, pertencentes ao grupo dos metais alcalinos (grupo 1A da tabela periódica), são exemplos usuais destes metais e abrangem uma faixa de temperatura em tubos de calor entre 600°C a 1800°C.

Tabela 3 - Metais líquidos com o ponto de fusão e ebulição à pressão atmosférica (1 atm).

<i>Fluidos</i>	<i>Ponto de fusão</i>	<i>Ponto de ebulição</i>	<i>Faixa usual</i>
<i>Sódio</i>	98 °C	892 °C	600 a 1200
<i>Lítio</i>	179 °C	1340 °C	1000 a 1800
<i>Potássio</i>	62 °C	774 °C	500 a 1000
<i>Mercúrio</i>	-39 °C	357 °C	250 a 650

Dentre os metais líquidos, o primeiro estudo de caso realizado no LABTUCAL foi o mercúrio, por ser de fácil manuseio e pelo fato do Laboratório possuir local adequado, assim como equipamentos de segurança para a realização de testes experimentais. O Laboratório já está se aperfeiçoando para uma nova etapa: trabalhar com termossifões com sódio como fluido de trabalho.

Uma importante consideração na fabricação do termossifão com metais líquidos é a compatibilidade do material do tubo com o fluido de trabalho. Isto devido a continua degradação do termossifão como o resultado de reação química ou decomposição do fluido de trabalho e corrosão ou erosão da parede do tubo. A Tabela 4 mostra a vida útil em testes, encontrados na literatura [8], com tubos de calor/termossifões, dado a temperatura do vapor e a duração de exposição dos tubos até atingir um grau significativo de corrosão.

Tabela 4 - Dados de compatibilidade (testes de vida útil para tubo de calor/termossifão).

	Material	Temp. Vapor [°C]	Duração[h]
Sódio	Hastelloy X	715	>33.000
	Aço inoxidável 316	771	>4.000
	Nióbio+1% Zircônio	850	>10.000
	Nióbio+1% Zircônio	1100	1.000
	Aço inoxidável 304 e 347	650-800	7.100
Potássio	Níquel	600	24.500
	Aço inoxidável 304 e 347	510-650	6.100
Lítio	Nióbio+1% Zircônio	1100	4.300
	Nióbio+1% Zircônio	1500	>1.000
	Nióbio+1% Zircônio	1600	132
	Tântalo	1600	17
	Tungstênio	1600	1.000
	Tungstênio+26%Rênio	830-1000	7.700

Considerando que os metais líquidos trabalham em altas temperaturas, a fabricação de trocadores de calor torna-se um obstáculo devido a limitação dos materiais usados nas superfícies. Trocadores de calor fabricados a partir de aço inoxidável, por exemplo, tem a limitação em 760°C a 840°C, enquanto as ligas fundidas são usuais até somente 982°C [9]. Em altas temperaturas de operação, todas as ligas metálicas têm a rigidez reduzida e, portanto limitadas a aplicações com baixas diferenças de pressões. Dessa forma, trocadores de alta eficiência projetados para operar acima de 871°C são preferencialmente fabricados de materiais cerâmicos. Os limites de temperatura de operação dos materiais utilizados em trocadores de calor são mostrados na Figura 6.

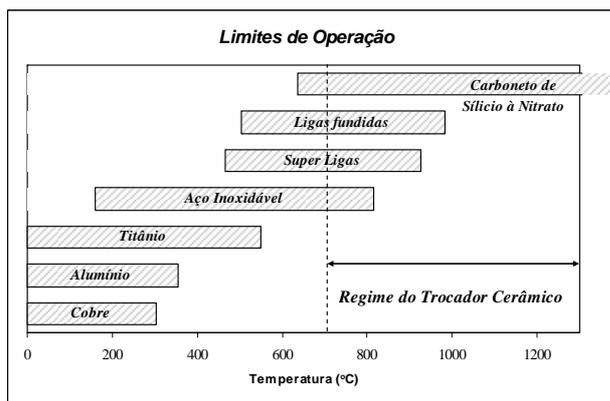


Figura 6 - Limite de operação dos materiais utilizados em trocadores de calor

Como exemplo da aplicação dos termossifões com metais líquidos, encontra-se, na China, um gerador de vapor que utiliza o calor de gases a alta temperatura proveniente de plantas de

fertilizantes. Este projeto foi desenvolvido pela Universidade de Tecnologia Química de Nanjing, em 1990, onde o calor é recuperado a partir de trocadores que utilizam a tecnologia de termossifões com metal líquido.

No LABTUCAL, existe uma bancada experimental para o estudo de termossifões com mercúrio. A bancada, ilustrada esquematicamente na Figura 7, é formada por um forno elétrico onde há um controlador de tensão de tal forma que se possa prescrever a taxa de transferência de calor desejada. O tubo é então aquecido na região do evaporador, e o calor dissipado pelo condensador através convecção natural. Uma fotografia da bancada pode ser observada na Figura 8.

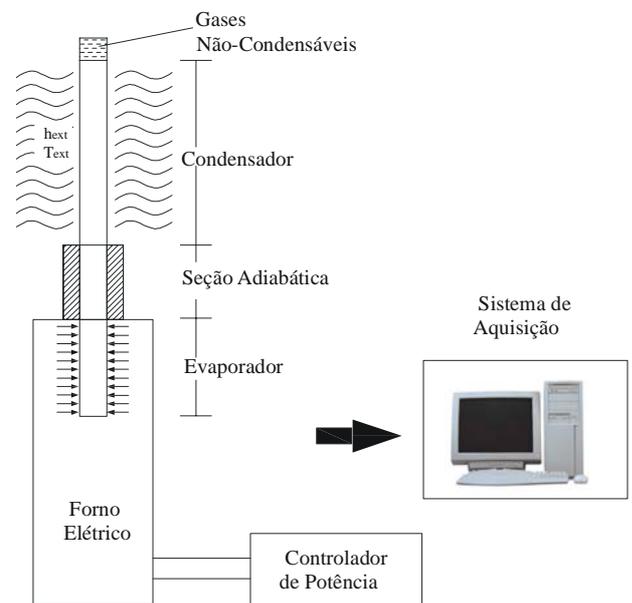


Figura 7 – Desenho esquemático da bancada experimental.



Figura 8 – Fotografia da bancada experimental.

Dados de temperatura ao longo do tubo e de potência dissipada pela resistência do tubo são adquiridos por um sistema de aquisição e

armazenados em um microcomputador. A Figura 9 mostra o perfil de temperatura de um teste parcial com termossifão com mercúrio através da leitura na parede externa do tubo. Este termossifão possui as dimensões de 200 mm, 150mm e 650mm de comprimento do evaporador, seção adiabática e condensador, respectivamente. Estima-se uma taxa de transferência de calor de 1500W para este teste.

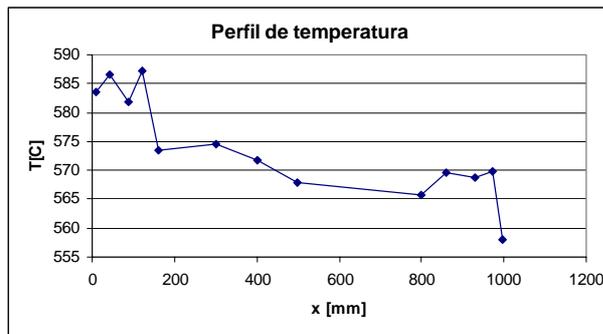


Figura 9 - Perfil de temperatura do termossifão com mercúrio

O LABTUCAL também desenvolve, junto a um trabalho de tese de doutorado, um modelo analítico resolvido através de métodos iterativos. Este modelo se baseia em teorias de filme de líquido e correlações encontradas na literatura. Este modelo analítico será validado através dos testes dos termossifões com mercúrio.

4.0 - CONCLUSÕES

O estudo qualitativo realizado em termossifões com naftaleno, permitiu observar as relevâncias na operação de termossifões que utilizam compostos orgânicos como fluido de trabalho. Comportamentos como o "slug flow" em baixas potências e a solidificação do fluido, puderam ser observados e relacionados às potências utilizadas. Um fator limitante para testes em potência superiores as estudadas foi o tipo de material no qual o tubo é constituído. O material vítreo utilizado não resiste a pressões de vapor muito elevadas, comparado aos materiais metálicos comumente utilizados na construção de termossifões (aço inox, aço carbono). O trabalho experimental com o naftaleno possibilitou a visualização do seu comportamento, e foi de considerável importância para a compreensão dos fenômenos envolvidos no processo.

O estudo em andamento com metais líquidos utilizando o mercúrio como estudo de caso é um precursor desta linha de pesquisa no LABTUCAL, contribuindo para o desenvolvimento de equipamentos que operam em temperaturas

mais elevadas de trabalho. A montagem experimental permitirá a validação de correlações analíticas que serão utilizadas no projeto de trocadores de calor de alta temperatura.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Kosoy, "Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology", John Wiley & Sons, 2004.
- [2] FAGHRI, A. "Heat pipe science and technology". Taylor & Francis, Washington, 1995.
- [3] A. Devarakonda, W. G. Anderson, "Thermo-physical Properties of Intermediate Temperature Heat Pipe Fluids", *Space Technology and Applications International Forum - STAIF*, Albuquerque, NM, 2005.
- [4] L.L. Vasiliev, G.M. Volokhov, A. S. Gigevich, M. I. Rabetskii, "Heat pipes based on Naphthalene", *Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal*, Vol. 54, No.6, pp.934-938, 1988.
- [5] Rohsenow, Hartnett, Cho, "Handbook of Heat Transfer", 3 ed., 1998.
- [6] H. R. Perry, D. W. Green, "Perry's Chemical Engineers' Handbook", McGrawHill, 7ed, 1997.
- [7] R. J. Goldstein, H. H. Cho, "A Review of mass transfer measurements Using naphthalene sublimation", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416-434, 1995.
- [8] P. D. Dunn, D. A., "Heat Pipes", 3 ed, Pergamon Press, 1982.
- [9] M. J. Strumpf, "Ceramic heat pipes for high-temperature heat recovery", *Heat Recovery System*, Vol. 2, No.2, pp.189-199, 1982.