

ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM CPL PARA APLICAÇÃO INDUSTRIAL E AEROESPACIAL

Paulo Henrique Dias dos Santos, paulosantos@labcet.ufsc.br

Renan Manozzo Galante, renan@labcet.ufsc.br

Pablo Rodrigo Pelizza, pablo@labcet.ufsc.br

Lucas Freitas Berti, berti@labcet.ufsc.br

Edson Bazzo, ebazzo@emc.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Mecânica

LabCET - Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos

Campus Universitário, 88.040-900, Florianópolis, SC, Brazil

Resumo: Os sistemas de bombeamento capilar vêm sendo cada vez mais empregados como trocadores de calor em várias aplicações industriais e aeroespaciais devido a sua eficiência térmica. Neste trabalho são expostos resultados experimentais e teóricos de um CPL (Capillary Pumped Loop) que utiliza um elemento poroso cerâmico (80% de mullita e 20% de alumina) como estrutura capilar. Este material cerâmico apresenta melhor usinabilidade sendo de mais fácil montagem em relação a elementos porosos metálicos. O elemento poroso possui raio de poro de 1 a 3 μm , permeabilidade de $35\text{E-}15 \text{ m}^2$ e apresenta 10 mm de diâmetro e 30 mm de comprimento. O fluido de trabalho é água deionizada. Foram realizados testes experimentais para avaliação do comportamento térmico do CPL para potências de 5 a 30 W. Através dos resultados, é apresentada uma análise da temperatura de operação do CPL com relação à temperatura do reservatório (40, 50 e 60°C). Os melhores resultados foram obtidos para a configuração na qual a temperatura do reservatório foi controlada a 60°C. O condensador foi refrigerado através de convecção forçada tendo o ar como fluido de trabalho.

Palavras-chave: CPL, Água, Elemento Poroso Cerâmico

1. INTRODUÇÃO

CPL (Capillary Pumped Loop) são sistemas bifásicos de troca de calor que utilizam-se do bombeamento capilar de estruturas porosas ou ranhuradas e do calor absorvido da fonte quente para movimentar o fluido de trabalho. A estrutura de CPLs é formada por um evaporador com elemento poroso, linhas de vapor e de líquido, condensador e um reservatório, como mostrado na Fig. (1). O calor é aplicado no evaporador, onde o fluido evapora e se encaminha para a linha de vapor. No condensador o CPL perde o calor absorvido, fazendo o fluido retornar a fase líquida. A linha de líquido fornece fluido refrigerado para o evaporador para então recomeçar o ciclo. Estes sistemas permitem a realização do controle térmico da fonte quente, pois seu reservatório pode ter a temperatura controlada para variar a quantidade de vapor e de líquido em seu interior, assim modificando a pressão interna de todo o circuito. Essa mudança de pressão modifica a temperatura de evaporação no evaporador, controlando a quantidade de calor trocada.

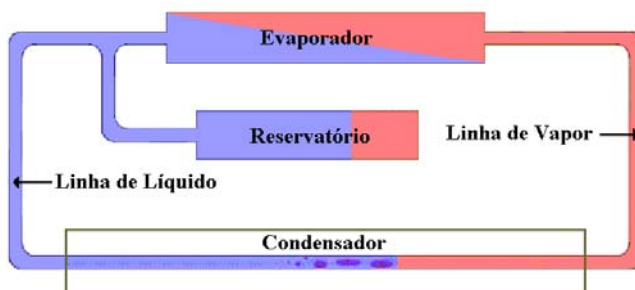


Figura 1 – Representação de CPL

Chen e Lin (2001) apresentaram um trabalho sobre aplicação de CPL no resfriamento de componentes eletrônicos (chips eletrônicos de computador pessoal ou notebook). O elemento poroso utilizado foi o polietileno, com raio de poro igual a $1,05\text{E-}5 \text{ m}$ e permeabilidade $6\text{E-}13 \text{ m}^2$. O fluido de trabalho foi o FC-72 (flúor inerte). Variações de potência, fatores de preenchimento e alturas relativas entre condensador e evaporador foram aplicadas, conseguindo-se dissipar um valor máximo de 40 W com a temperatura do evaporador abaixo dos 100°C.

Um CPL para aquecimento de água utilizando energia solar é apresentado por Bazzo e Nogoseke (2003). O evaporador é constituído de um tubo de alumínio ranhurado de 19 mm de diâmetro externo e 500 mm de comprimento. Placas de cobre de 276 mm foram acopladas ao evaporador e este conjunto inserido em um tubo de vidro. A densidade de potência trocada pelo CPL e o reservatório de água que servia de condensador era de aproximadamente 507 W/m². A temperatura do fluido na linha de vapor era de 60°C. Não foi explicitada a temperatura para o condensador.

Pouzet et. al. (2004), apresenta testes em regime dinâmico para aplicação de potência em CPL. Seu evaporador possui elemento poroso de polipropileno envolto por um tubo ranhurado de alumínio com 36 mm de diâmetro externo e 240 mm de comprimento. O fluido de trabalho utilizado é HFC-134a. Neste trabalho é realizada uma comparação entre resultados teóricos e experimentais do CPL. A temperatura do condensador permanece constante a 9°C com a ajuda de um banho termostático. Com a potência inicial de 200 W o evaporador atingiu a temperatura de 29,8°C. Em seguida foram aplicados 400 W e a temperatura do evaporador estabilizou ao redor de 32,5°C. Por último a potência foi reduzida novamente para 200 W e a temperatura se encaminhou para 30°C. Para 200 W a resistência térmica do sistema é de 0,10 C°/W e para 400 W a resistência térmica é de 0,06 C°/W.

Um micro CPL é apresentado por Wang et. al. (2008). Este micro CPL feito de Pyrex possui ranhuras no evaporador. Este último mede 3,42 mm por 1,5 mm. O fluido de trabalho utilizado é água pura. A área de aplicação de potência é de 1 cm² e as resistências térmicas alcançadas são de aproximadamente 11,75 C°/W, 12 C°/W e 13,1 C°/W para potências de 8 W, 8,5 W e 9 W, respectivamente.

Este trabalho apresenta testes para um CPL com elemento poroso cerâmico e água como fluido de trabalho. Foi avaliada a interferência da temperatura do reservatório e do volume de carregamento no desempenho do sistema.

2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Neste trabalho um CPL, que utiliza um elemento poroso cerâmico no evaporador capilar, foi produzido e testado a fim de avaliar a aplicação destes elementos porosos cerâmicos em sistemas de bombeamento capilar. O CPL foi produzido com aço inoxidável, inclusive o invólucro do evaporador capilar. O elemento poroso cerâmico é composto por 80% de Mulita e 20% de Alumina e possui distribuição de raio de poro de 1 a 3 µm, permeabilidade de 35E-15 m² e apresenta 10 mm de diâmetro externo e 30 mm de comprimento, conforme mostra a Fig. (2). Figura (3) mostra o evaporador capilar e o elemento poroso cerâmico com ranhuras circunferências e axiais. O evaporador capilar tem comprimento de 50 mm e 10 mm de diâmetro interno.

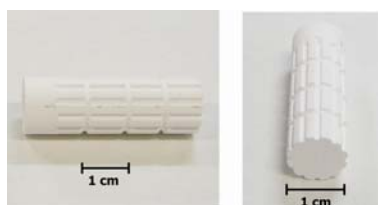


Figura 2. Meio poroso cerâmico com as ranhuras (canais de vapor) usado no evaporador capilar do CPL.



Figura 3. Vista do evaporador capilar e o meio poroso cerâmico.

As Figuras (4) e (5) mostram o CPL com o sistema de condensação a ar. A potência aplicada ao evaporador capilar foi variada de 5 a 30 W. Para cada potência aplicada, foram medidas as temperaturas na superfície das principais partes do CPL, isto é, na entrada e saída do evaporador e também na entrada e saída do condensador, nas linhas de vapor e de líquido e no reservatório. O CPL usou água deionizada como fluido de trabalho e o condensador foi resfriado a ar utilizando convecção forçada.

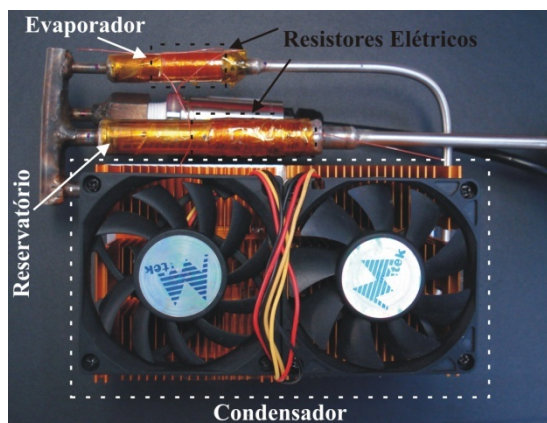


Figura 4. Vista superior do CPL, do sistema de aquecimento e do condensador.

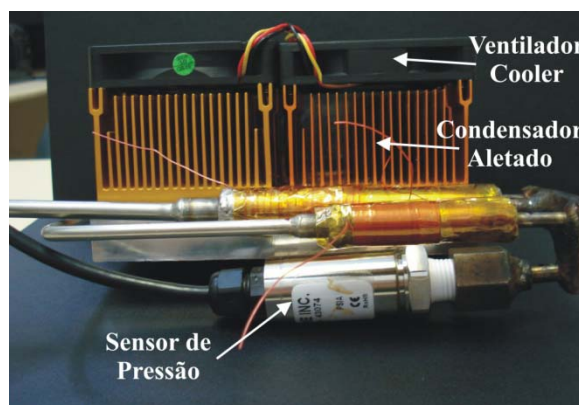


Figura 5. Vista lateral do CPL, do ventilador (coolers) e das aletas do condensador.

As dimensões do CPL estão apresentadas na Tab. (1), enquanto que as propriedades termofísicas do elemento poroso cerâmico e do fluido de trabalho estão na Tab. (2).

Tabela 1. Principais dimensões do CPL.

Diâmetro interno do Evaporador	10,0 mm
Comprimento do evaporador	40,0 mm
Diâmetro interno da linha de transporte de vapor	2,8 mm
Comprimento da linha de transporte de vapor	205,0 mm
Diâmetro interno da linha de transporte de líquido	2,8 mm
Comprimento da linha de transporte de líquido	140,0 mm
Diâmetro interno do condensador	2,8 mm
Comprimento do condensador	385,0 mm
Comprimento do reservatório	90,0 mm
Diâmetro do reservatório	15,0 mm

Tabela 2. Propriedades termofísicas do meio poroso e do fluido de trabalho.

	ε	K (m ²)	λ_{eff} (W/m-K)	r_p (μm)	Composição
Meio poroso cerâmico	0,5	35×10^{-15}	6,0	1,0 – 3,0	20% Alumina / 80% Mulita
	σ (N/m)	h_{lv} (kJ/kg)	c_p (kJ/kg-K)	ρ (kg/m ³)	μ (kg/ms)
Água deionizada	0,07119	2382,0	4,18	995,60	0,0007977

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1. Procedimento Experimental

Um CPL, utilizando um elemento poroso cerâmico como estrutura capilar no evaporador, foi testado na posição horizontal. A temperatura do ambiente foi medida e ficou em torno de $23 \pm 1^\circ\text{C}$. A temperatura do reservatório foi ajustada (através do aquecimento elétrico do mesmo) para a temperatura de interesse em cada teste. Após as temperaturas do sistema atingirem um regime aproximadamente estacionário ($\Delta T_{\text{máx}} = 1^\circ\text{C}$), a primeira potência de 5 W foi aplicada ao evaporador capilar. Uma vez que todas as temperaturas do sistema atingiram o regime permanente (ou valores quase estacionários) a potência foi elevada em passos de 5 W. A potência elétrica aplicada ao evaporador capilar foi calculada através da medição da tensão e da corrente através da Fonte Agilent N6702A. Assumindo que as perdas de calor através do isolamento do evaporador capilar sejam desprezíveis, a potência calculada foi considerada como sendo a potência real fornecida ao evaporador capilar.

As incertezas das medições foram avaliadas para a temperatura e a potência. Levando consideração a incerteza dos sensores de temperatura (termopares tipo T) e as incertezas do sistema de aquisição de dados (Agilent 34970A, com 20 canais), a incerteza da temperatura medida foi avaliada em $\pm 1^\circ\text{C}$. A incerteza na potência foi de $\pm 0,06$ W, incluindo a incerteza da fonte de alimentação.

Os testes de desempenho térmico do CPL foram realizados para potências variando de 5 a 30 W, levando em consideração a condição de regime permanente. Todos os testes foram realizados no Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos (LABCET) da Universidade Federal de Santa Catarina.

3.2. Temperaturas do CPL em Função da Variação da Potência

A temperatura do reservatório controla a temperatura de operação do CPL, independentemente das mudanças na potência aplicada ou na temperatura do condensador, desde que o reservatório esteja na condição bifásica. Para isso, a quantidade de fluido de trabalho no circuito deve ser suficiente de maneira que sob uma potência mínima e uma temperatura baixa do condensador, a área de condensação seja mínima. Se o sistema não contém líquido suficiente, o reservatório ficará vazio antes que a área de condensação seja completamente utilizada. Por outro lado, se o sistema contém muito líquido e o reservatório não pode acomodar a quantidade de fluido em excesso no circuito, o CPL vai funcionar no modo de condutância fixa e, por consequência, a temperatura de operação não poderá ser controlada (Ku, 1994). Como resultado, a quantidade de fluido de trabalho no ciclo é muito importante para o bom funcionamento dos CPLs, entretanto não é trivial alcançar a quantidade ideal de fluido de trabalho. Além processo de preenchimento ser dispendioso, nos CPLs existe uma variável a mais que precisa ser levada em consideração que a temperatura do reservatório.

O CPL testado apresentou um comportamento térmico satisfatório do ponto de vista da aplicação de um novo material poroso cerâmico. Ele operou numa faixa de 5 a 30 W. As figuras a seguir mostram as temperaturas medidas

nas superfícies do evaporador (T_{evap}), na saída do evaporador (T_{evap_sai}), na linha de vapor (T_{vapor_linha}), na entrada do condensador (T_{cond_ent}), na entrada do evaporador (T_{evap_ent}) e no reservatório ($T_{reservatório}$).

Ao se aplicar a potência no evaporador capilar, primeiramente a temperatura do evaporador começa a subir e em seguida a temperatura de saída do evaporador também começa a subir. A partida do CPL se dá quando ocorre um aumento repentino nas temperaturas medidas nos outros pontos, em especial, na linha de vapor e na entrada do condensador. Isto significa que o vapor gerado no evaporador atingiu a linha de vapor ou a entrada do condensador. Se as temperaturas do sistema atingirem um patamar aproximadamente estável, pode-se dizer que o sistema está operando em regime permanente.

A Figura (6) mostra a partida do CPL posicionado horizontalmente para um conjunto de três temperaturas de reservatório (40, 50 e 60 °C), uma razão de preenchimento de 120% e uma potência de 10 W. O CPL partiu para todas as temperaturas de reservatório, entretanto não atingiu o regime permanente para as temperaturas de reservatório de 40 e 50 °C, como pode ser observado nas Figs. (6a) e (6b). O regime permanente foi apenas observado para a temperatura de reservatório de 60 °C, conforme Fig. (6c).

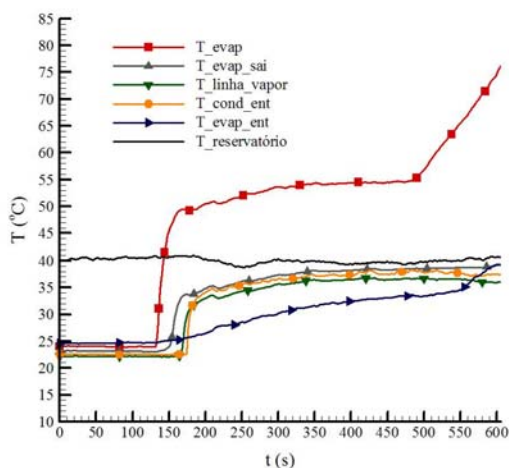


Figura 6a. Partida do CPL a uma potência de 10 W, razão de preenchimento de 120% e temperatura de reservatório de 40 °C.

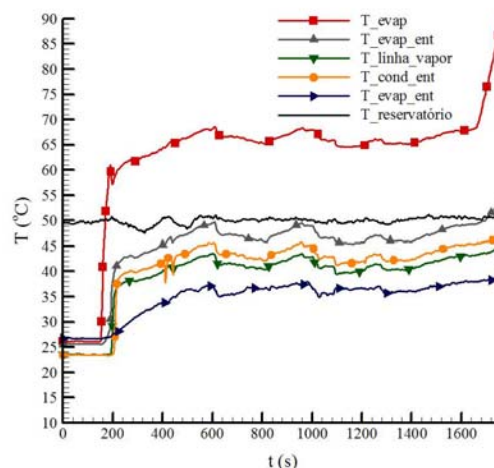


Figura 6b. Partida do CPL a uma potência de 10 W, razão de preenchimento de 120% e temperatura de reservatório de 50 °C.

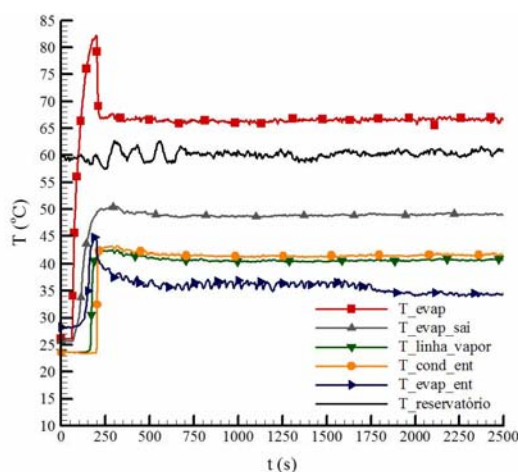


Figura 6c. Partida do CPL a uma potência de 10 W, razão de preenchimento de 120% e temperatura de reservatório de 60 °C.

A Figura (7) mostra a partida do CPL para as mesmas condições apresentadas na Fig. (6), mas para uma razão de preenchimento de 130%. O CPL não atingiu o regime permanente apenas para a temperatura de reservatório de 40 °C. Por outro lado, para temperatura de reservatório de 50 °C, o CPL atingiu o regime permanente exclusivamente para a potência de 10 W.

A Figura (8) apresenta os resultados das temperaturas do CPL operando também na posição horizontal, à uma temperatura de reservatório de 60 °C e a uma razão de preenchimento de 130% em função da variação potência. A potência foi variada a passos de 5 W. Percebe-se que o regime permanente foi atingido em aproximadamente 30 min para cada potência. A temperatura do evaporador atingiu 130 °C para a potência máxima de 30 W e atingiu valores abaixo de 60 °C para a potência mínima de 5 W. O CPL operou de forma satisfatória para todas as potências aplicadas, entretanto, considerando, por razões de segurança, 100 °C como sendo um limite de temperatura de operação, o CPL operaria de forma satisfatória até a potência de 20 W. Percebe-se ainda que a temperatura de entrada do condensador

permaneceu aproximadamente constante, ou seja, não existe vapor chegando ao condensador. Isto se deve ao fato de o condensador estar superdimensionado, fazendo com que o vapor seja condensado antes de chegar ao condensador.

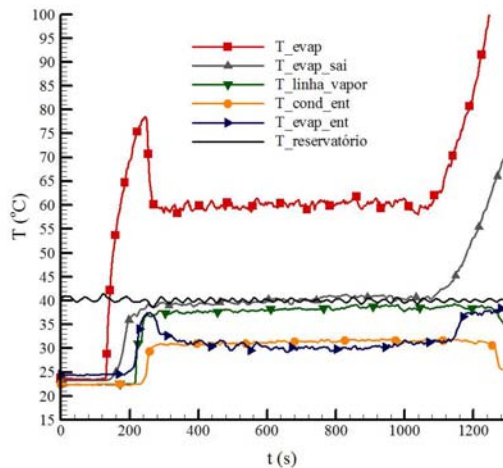


Figura 7a. Partida do CPL a uma potência de 10 W, razão de preenchimento de 130% e temperatura de reservatório de 40 °C.

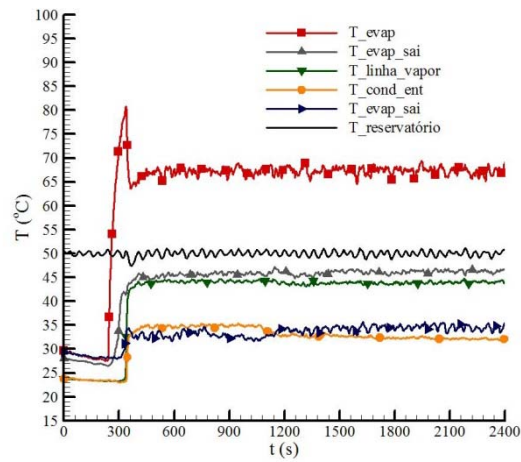


Figura 7b. Partida do CPL a uma potência de 10 W, razão de preenchimento de 130% e temperatura de reservatório de 50 °C.

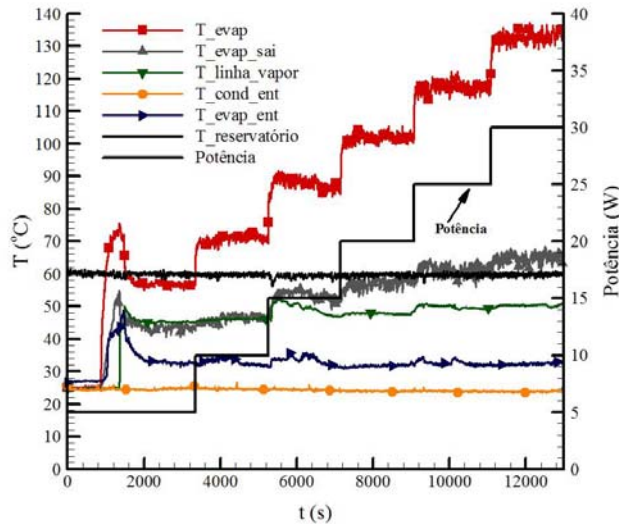


Figura 8. Temperaturas do CPL na posição horizontal em função da variação da potência.

3.3. Análise da Resistência Térmica do CPL

Pequenas diferenças de temperatura entre as temperaturas do evaporador e a temperatura média do condensador são requeridas para o sucesso da aplicação de um CPL. Entretanto, grandes diferenças entre essas temperaturas pedem mudanças no projeto do CPL em geral e em específico nas propriedades termofísicas do meio poroso cerâmico tais como porosidade, tamanho de poros e condutividade térmica). Pode-se avaliar o CPL através do cálculo da resistência térmica total, Eq. (1), que é definida como a razão entre a diferença de temperaturas entre o evaporador e a temperatura

média do condensador ($\bar{T}_{cond} = \frac{T_{cond_ent} + T_{cond_sai}}{2}$) e a potência (Q_{evap}).

$$R_{total} = \frac{T_{evap} - \bar{T}_{cond}}{Q_{evap}} \quad (1)$$

A Fig. (9) apresenta os resultados da resistência térmica total do presente trabalho, comparando-o com os trabalhos de Chen e Lin (2001), que utilizaram FC-72 (*Fluorinert*) como fluido de trabalho num CPL e Wang et. al. (2008) que utilizou água como fluido de trabalho num micro-CPL. Percebe-se que a resistência térmica total do presente trabalho é bem melhor do que a resistência térmica total apresentada por Wang et. al. (2008), que utilizou a água como fluido de trabalho. Por outro lado os resultados apresentados no presente trabalho se aproximaram dos resultados obtidos por

Chan e Lin (2001), que utilizaram o FC-72 (*Fluorinert*) como fluido de trabalho, que por sua vez possui propriedades termofísicas mais favoráveis do que a água.

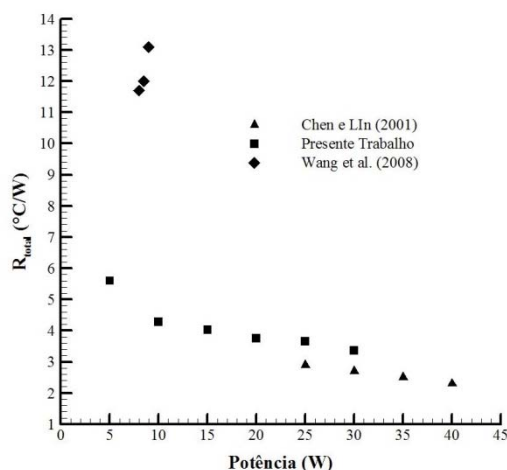


Figura 9. Comparação entre as resistências térmicas total do presente trabalho e trabalhos da literatura.

4. CONCLUSÕES

O CPL deste trabalho estabilizou corretamente à aplicação de potência. Teve ainda bom funcionamento à aplicação crescente de potência sem interrupção. A resistência térmica deste sistema pode ser considerada adequada se comparada a outros trabalhos encontrados na literatura. Este é um fator que depende das características do elemento poroso, fluido de trabalho e bom funcionamento geral do sistema.

Os testes mostraram que para a razão de carregamento de 120% foi necessário aumentar a temperatura no reservatório até $60^{\circ}C$ para o bom funcionamento do sistema. Para a razão de carregamento de 130%, ocorreu a estabilização para a temperatura do reservatório de $50^{\circ}C$. Isso indica que volume de carregamento pode não ter sido suficiente, e que com mais fluido o sistema poderia estabilizar com temperaturas mais baixas no reservatório. Entretanto, testes adicionais precisam ser realizados levando em consideração razões de preenchimento maiores.

Para trabalhos futuros, testes com mais fluido de trabalho podem ser realizados. Também pode ser analisado o comportamento do CPL em posições variadas para conferir se a gravidade interfere no seu funcionamento, principalmente no fluido do reservatório.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte a esta pesquisa, à Agência Espacial Brasileira (AEB) e à Universidade Federal de Santa Catarina.

6. REFERÊNCIAS

Bazzo, E., Nogoseke, M., 2003, “Capillary pumping systems for solar heating application”, *Applied Thermal Engineering*, Vol.23, pp. 1153–1165.

Chen, P.-C., Lin, W.-K., 2001, “The application of capillary pumped loop for cooling of electronic components”, *Applied Thermal Engineering*, Vol.21, pp. 1739-1754.

Pouzet, E., Joly, J.-L., Platel, V., Grandpeix, J.-Y., Butto, C., 2004, “Dynamic response of a capillary pumped loop subjected to various heat load transients”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.47, pp. 2293–2316.

Wang, C.-T., Leu, T.-S., Lai, T.-M., 2008, “Micro capillary pumped loop system for a cooling high power device”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.32, pp. 1090–1095.

Ku, J., 1994, “Thermodynamic Aspects of Capillary Pumped Loop Operation”, *Proceedings of the 6th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*, AIAA-94-2059, Colorado Springs, USA, pp.1-11.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EXPERIMENTAL STUDY OF A CPL FOR AEROSPACE AND INDUSTRIAL APPLICATION

Paulo Henrique Dias dos Santos, paulosantos@labcet.ufsc.br

Renan Manozzo Galante, renan@labcet.ufsc.br

Pablo Rodrigo Pelizza, pablo@labcet.ufsc.br

Lucas Freitas Berti, berti@labcet.ufsc.br

Edson Bazzo, ebazzo@emc.ufsc.br

UFSC - Federal University of Santa Catarina - Mechanical Engineering Department

LabCET - Laboratory of Combustion and Thermal Systems Engineering

Campus Universitário, 88.040-900, Florianópolis, SC, Brazil

Abstract: *Capillary pumping systems have been increasingly used as heat exchangers in aerospace and industrial applications due to its thermal efficiency. This work shows experimental and theoretical results of a CPL (Capillary Pumped Loop) which uses a porous ceramic wick (80% mullite and 20% alumina) as capillary structure. This ceramic material has better machinability and is easier to assemble than porous metallic wicks. This porous structure has a pore radius of 1-3 micrometres, permeability $35E-15 \text{ m}^2$, diameter 10 mm and 30 mm length. The working fluid is deionized water. Experimental tests were conducted to evaluate the thermal behavior of the CPL for 5-30 W power. By the results are presented an operating temperature analysis for the CPL and its reservoir temperature (40, 50 and 60 °C). The best results were obtained with the reservoir temperature controlled at 60°C. The condenser was cooled by forced convection with air as working fluid.*

Keywords: *CPL, Water, Porous Ceramic Wick*