

MINI TUBOS DE CALOR COMO ALTERNATIVA DE ARREFECIMENTO PARA CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DO TIPO PEM

Ana Paula Silva, ana@labcet.ufsc.br
Pablo Rodrigo Pelizza, pablo@labcet.ufsc.br
Renan Manozzo Galante, renan@labcet.ufsc.br
Edson Bazzo, ebazzo@emc.ufsc.br

UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), Departamento de Engenharia Mecânica,
LabCET (Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos) - Campus Universitário –
CEP 88040-970 – Florianópolis – SC

***Resumo:** O trabalho refere-se a um estudo experimental de um sistema de refrigeração de células a combustível tipo PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell). Altas temperaturas podem secar a membrana polimérica, interrompendo a geração de energia e causar explosões devido à mistura indevida dos gases da reação. Por outro lado, temperaturas mais altas facilitam a reação química, aumentando a eficiência da célula a combustível. O patamar ideal de operação da célula é entre 70 e 90°C. O sistema de refrigeração proposto é composto por quatro mini tubos de calor associados a um sistema de convecção forçada de ar. Tubos de calor são alternativas viáveis para a aplicação supracitada por serem sistemas eficientes, compactos e facilmente adaptáveis às geometrias das células usualmente encontradas. Para testar o sistema de refrigeração foi montada uma bancada que simule o funcionamento de uma célula a combustível com o sistema de refrigeração integrado. Os mini tubos de calor são feitos de aço inoxidável com 3,175 mm de diâmetro externo, a estrutura capilar consiste em uma volta de tela de aço inoxidável Mesh 100 e o fluido de trabalho é água deionizada. O condensador é composto por uma região aletada acoplada a dois coolers. Resultados são apresentados para potência constante de 5 W, para os quatro mini tubos de calor testados separadamente. Resultados são também apresentados para o sistema integrado com potência constante de 40 W, bem como para potências escalonadas entre 20 e 50 W.*

***Palavras chaves:** Célula a combustível PEM, Mini tubos de calor, Sistema de refrigeração.*

1. INTRODUÇÃO

Novas tecnologias são pesquisadas para acrescentar alternativas no atual cenário de fornecimento energético. Uma dessas tecnologias de grande potencial são as células a combustível, com o propósito de converter a energia química do combustível em energia elétrica, calor e água. Atualmente esses sistemas são viáveis comercialmente apenas em nichos restritos como para sistemas de *back-up* de energia e também em missões espaciais. Outras aplicações comerciais são propostas, mas em sua maioria ainda em caráter experimental. As PEMFC são compostas por placas estruturais, placas bipolares e MEA (*Membrane Electrode Assembly*). Seu combustível é hidrogênio e comburente, oxigênio ou ar. O MEA é composto por um “sanduíche” de GDL (*Gas Diffusion Layer*), que controla a passagem dos gases, catalisadores e uma membrana polimérica de Nafion®. Com o funcionamento basicamente similar ao de uma pilha, células PEM têm como estrutura básica dois eletrodos (ânodo e cátodo) e um eletrólito (membrana polimérica), sendo utilizado hidrogênio como combustível e ar ou oxigênio puro como oxidantes. Ao entrar em contato com o ânodo, o hidrogênio dissocia-se formando íons H⁺ e um par de elétrons. A membrana polimérica impede a passagem direta dos elétrons entre os dois eletrodos, induzindo uma corrente elétrica através de um circuito externo (Figura 1). O oxigênio puro ou ar é introduzido no cátodo, onde reage com os íons H⁺ provenientes do ânodo e elétrons, formando água como resultado final da operação (Miyake, 2006).

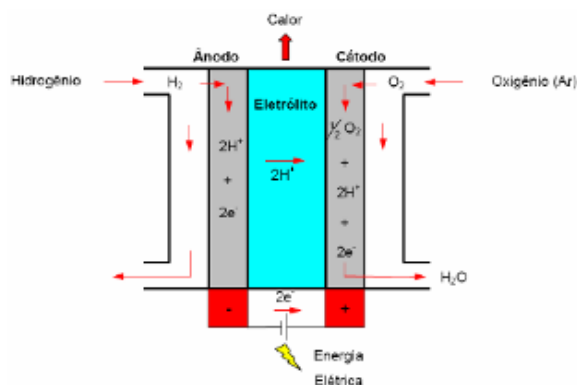


Figura 1 – Esquema de funcionamento de uma célula a combustível do tipo PEM

O objetivo deste trabalho é contribuir para a viabilização das células a combustível do tipo PEM melhorando sua refrigeração, que atualmente é baseada em sistemas monofásicos de eficiência limitada com alto consumo de energia. A refrigeração tem um papel importante na vida útil e eficiência da célula a combustível. Temperaturas elevadas melhoram a reação química entre o hidrogênio e o oxigênio, porém podem degradar a membrana polimérica. Isso pode interromper a geração de potência, tornando o sistema susceptível a explosões. A faixa de 70 - 90°C é uma faixa ótima de temperatura que considera esses efeitos contraditórios para uma máxima eficiência. A membrana polimérica gera o ponto sensível a altas temperaturas sendo a sua temperatura que se deve controlar.

Um projeto comum entre três laboratórios franceses (CETHIL, LET e LAPLACE) desenvolveu um sistema para retirar o calor de células a combustível. Este sistema, TPHS (Two-Phase Heat Spreader) tem o princípio de funcionamento semelhante a um tubo de calor plano, com um único canal de vapor, onde o fluido desloca-se do condensador ao evaporador por capilaridade. Foram testadas diferentes configurações em vários materiais e fluidos de trabalho. A configuração mais eficiente foi obtida com metanol como fluido e ranhuras longitudinais em cobre como estrutura porosa. O sistema apresentou grande eficiência na orientação vertical, dissipando 0,5 W/cm² e atingindo uma diferença máxima de temperatura entre evaporador e condensador de 2,8°C. No entanto, não foram realizados testes simulando um acoplamento em uma célula a combustível. Os resultados foram apresentados no 14º IHPC (Rullière et al., 2007).

Faghri et al. (2005a e 2005b) apresentaram duas patentes propondo diferentes sistemas bifásicos para refrigeração de células a combustível. No entanto, testes não foram apresentados visando validar os mecanismos propostos. Os sistemas de refrigeração apresentados eram tubos de calor em duas configurações, a primeira proposta é de micro tubos de calor aplicados à placa bipolar da célula a combustível e a outra proposta é de tubos de calor planos integrados à placa bipolar.

Neste trabalho, propõe-se a aplicação de mini tubos de calor inseridos na estrutura da célula a combustível para realizar a sua refrigeração. Tubos de calor são sistemas bifásicos de transporte de calor que não necessitam de energia adicional para circulação do fluido de trabalho. Os tubos de calor têm essencialmente duas regiões: evaporação e condensação, podendo haver uma região adiabática.

O calor é aplicado no evaporador. O vapor formado se desloca por diferença de pressão até o condensador. Nesta região o vapor perde calor e volta à fase líquida. A circulação do líquido do condensador ao evaporador ocorre por capilaridade através da estrutura porosa. Ao chegar no evaporador o líquido recebe calor reiniciando o ciclo. Este processo é representado na Figura 2.

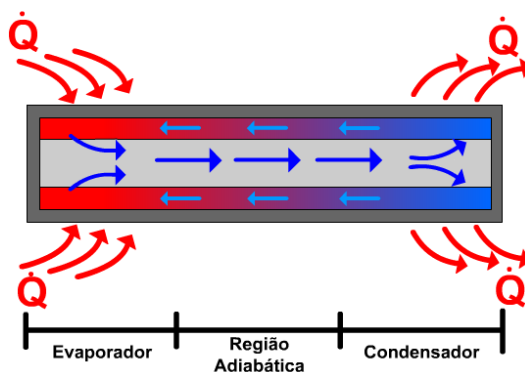


Figura 2 – Esquema de funcionamento de um tubo de calor.

Resultados experimentais são apresentados para quatro mini tubos de calor testados separadamente com aplicação de potência constante de 5 W, como também para um módulo de simulação de célula a combustível com potência constante de 40 W e potências escalonadas de 20 – 30 – 40 – 50 W.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para estudar a refrigeração da célula a combustível, foi montado um sistema que simula seu comportamento térmico. A geometria desse sistema foi baseado em uma célula a combustível da marca Electrocell® de potência nominal de 200 W existente no LabCET, mostrada na Figura 3. Esta célula é composta por dez células montadas eletricamente em série, sendo que a média de geração de potência e de calor por célula unitária é de aproximadamente 20 W.



Figura 3 – Foto da célula a combustível existente no LabCET.

Este módulo é composto por duas placas de aço cuja função é estrutural, uma placa de Teflon® usada para direcionar o fluxo de calor, por duas placas de grafite bipartidas, onde serão inseridos os quatro mini tubos de calor e por uma resistência elétrica do tipo skin heater, que simulará o calor proveniente das reações eletroquímicas na célula.

As dimensões das placas de aço são de 130 x 195 x 6 mm e da placa de Teflon® 125 x 165 x 10 mm. As placas de grafite são bipartidas para possibilitar a inserção dos mini tubos de calor no módulo e as dimensões de cada uma são 125 x 165 x 3 mm. A resistência terá 100 x 100 mm e espessura inferior a 1 mm. Todas as placas passaram por processos de usinagem, procurando sempre preservar suas dimensões definidas em projeto, as quais, são proporcionais à célula existente no LabCET.

Cada célula unitária gera nominalmente 20 W em uma membrana de 144 cm², tendo portanto uma densidade de calor de 0,14 W/cm². Este módulo foi construído com uma área de dissipação de 100 cm². Então, para manter a mesma densidade de potência, há necessidade de dissipar aproximadamente 14 W no módulo que simula uma única célula. A Figura 4 mostra o desenho do módulo que simula uma célula unitária, destacando seus componentes.

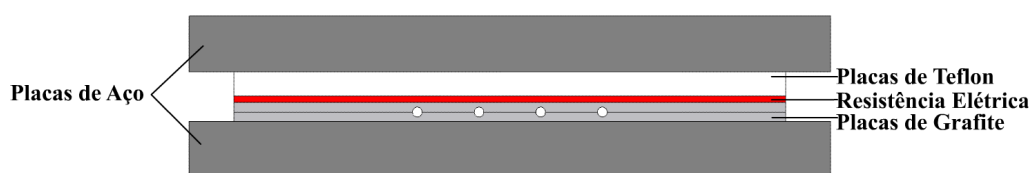


Figura 4 – Módulo de simulação da célula a combustível

Neste trabalho os mini tubos de calor são feitos de aço inoxidável AISI 304, com diâmetro externo de 1/8" (3,175 mm) e espessura de parede de 0,25 mm, tendo assim 2,675 mm de diâmetro interno. A estrutura porosa utilizada é uma volta de tela de aço inoxidável Mesh 100 envolvendo toda a parede interna do tubo. De acordo com as dimensões da célula, foi determinado um comprimento de 115 mm para o evaporador do mini tubo de calor. A região de condensação tem 60 mm de comprimento, correspondendo à região aletada dos condensadores, restando 20 mm de região adiabática. A Figura 5.a mostra o desenho do mini tubo de calor ressaltando as regiões que o compõe e a Figura 5.b mostra o tubo em corte transversal onde é possível ver o posicionamento da estrutura porosa por onde circula o fluido líquido e o canal de escoamento do vapor.

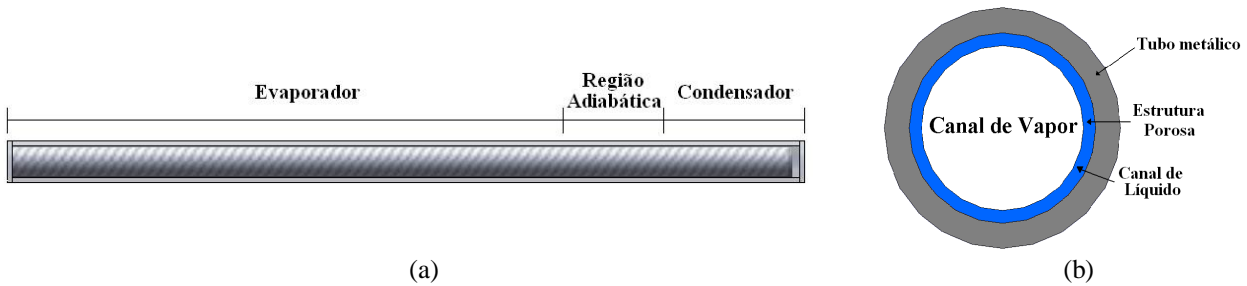


Figura 5 – Representação esquemática do mini tubo de calor (a) e corte transversal indicando os canais de líquido e de vapor (b).

Todo material utilizado na confecção dos tubos de calor é submetido a um processo de limpeza utilizando um banho ultra-sônico do tipo Ultrasonic Cleaner modelo 2840D. A tela é enrolada de modo a adquirir a geometria interna do tubo. Após a tela ser devidamente posicionada no interior do tubo, faz-se vácuo no sistema utilizando uma bomba BOC Edwards modelo E2M2. Em seguida, carrega-se o tubo de calor com o fluido de trabalho. Os tubos de calor são sensíveis à presença de gases não condensáveis, deste modo, este procedimento deve ser realizado com extremo cuidado. Após carregado, os mini tubos são testados para conferência da qualidade do carregamento efetuado. Após serem validados, os mini tubos deverão ser definitivamente selados. O processo de selagem ainda não foi totalmente dominado e há perda considerável de desempenho térmico dos tubos antes e depois da selagem. A selagem dos tubos consiste em prensar a extremidade do tubo em uma prensa hidráulica. Em seguida, solda-se o tubo na região prensada, cortando-o.

A Figura 6 mostra uma foto do módulo de simulação de célula a combustível acoplado ao sistema de refrigeração. A região de evaporação dos mini tubos de calor estão inseridos no meio das placas de grafite bipartidas e a região de condensação dos mini tubos de calor estão inseridos entre a placa de alumínio e a base da região aletada dos coolers.

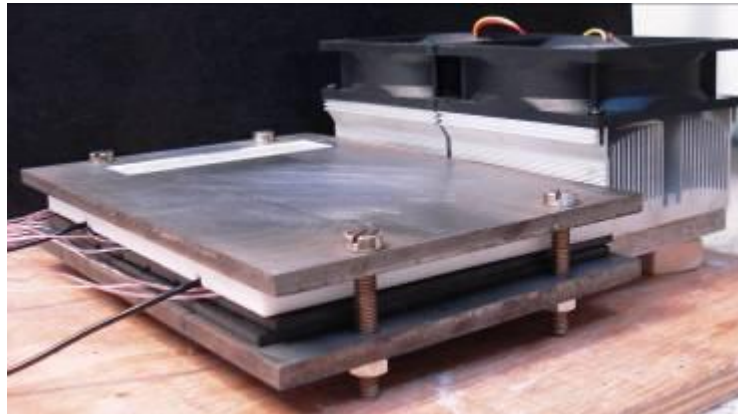
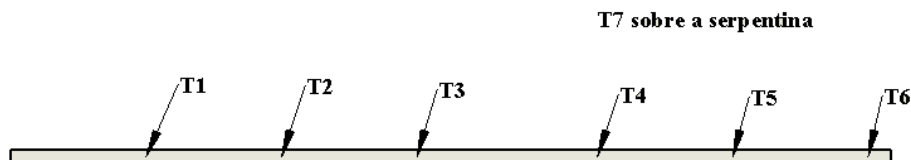


Figura 6 – Sistema de refrigeração integrado ao módulo que simula uma PEMFC.

Para análise térmica são instalados termopares tipo T marca Omega® sobre os mini tubos para os testes individuais e nos mini tubos e resistência elétrica posicionados no módulo que simula a PEMFC. Para os testes individuais dos quatro mini tubos de calor, um sistema de aquisição de dados Agilent, modelo 34970A com 20 canais foi utilizado. Um banho termostático da marca Lauda, modelo E200 foi utilizado nos testes para remover calor do condensador com o auxílio de uma serpentina.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para comparar o comportamento dos mini tubos de calor individualmente e montados em paralelo no sistema integrado serão apresentados os resultados dos testes realizados em ambas as situações. Em cada teste foi aplicada uma potência de 5 W durante uma hora, utilizando uma resistência de fio de constantan enrolada nos 115 mm de evaporador. As temperaturas mostradas correspondem aos termopares 2, 4 e 6, que tem sua posição ilustrada na Figura 7.



T7 sobre a serpentina

Figura 7 – Posição dos termopares no mini tubo de calor.

O comportamento das temperaturas nas três regiões dos quatro mini tubos de calor em função do tempo é mostrado na Figura 8. Sendo o gráfico da Figura 8.a referente ao mini tubo de calor 1, da Figura 8.b ao mini tubo de calor 2, da Figura 8.c do mini tubo 3 e da Figura 8.d do mini tubo 4. A posição dos mini tubos de calor no módulo é indicado na Figura 10.

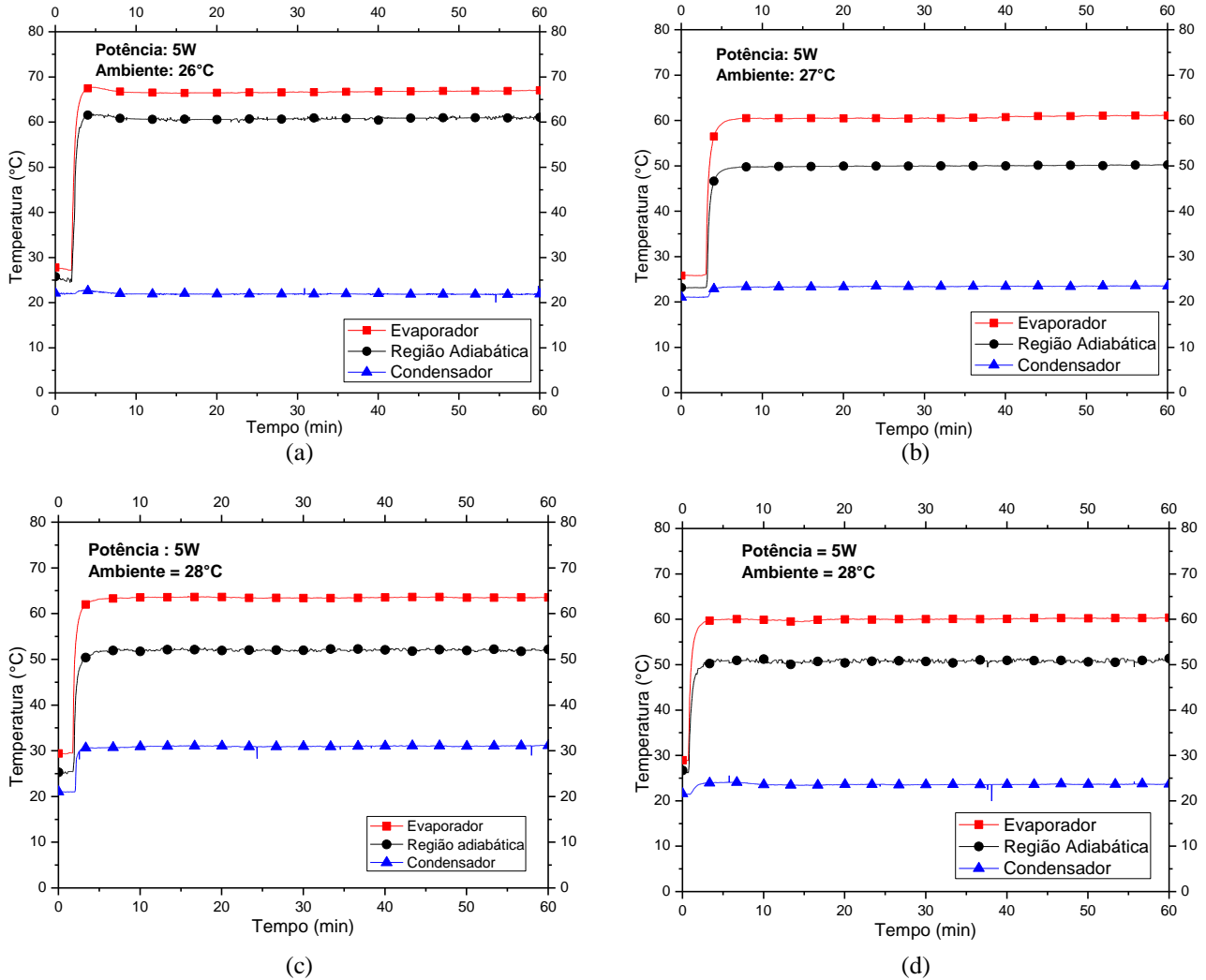


Figura 8 – Resultados correspondentes à potência aplicada de 5 W: (a) tubo 1; (b) tubo 2; (c) tubo 3; (d) tubo 4.

A Figura 9 apresenta a temperatura média dos últimos 30 minutos de teste para cada mini tubo de calor, em todos os pontos de medição. Os termopares 1, 2 e 3 estão localizados na região de evaporação dos mini tubos de calor conforme Figura 7. O termopar 4 está na região adiabática e os termopares 5 e 6 na região de condensação.

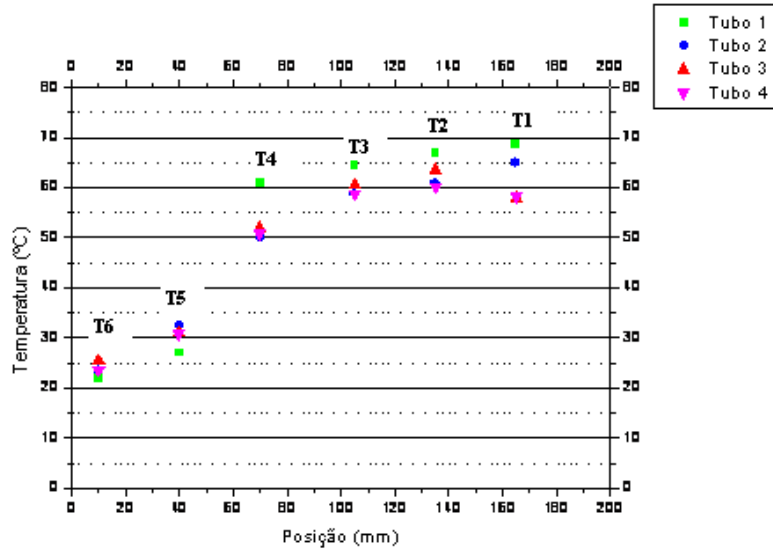


Figura 9 – Distribuição de temperatura ao longo dos mini tubos de calor testados individualmente.

A resistência térmica calculada para o tubo 1 é de $9^{\circ}\text{C}/\text{W}$, sendo o tubo com o pior desempenho, provavelmente causado por alguma falha no processo de selagem. Os tubos 2, 3 e 4 apresentam resistências térmicas de $7,5^{\circ}\text{C}/\text{W}$, $7,6^{\circ}\text{C}/\text{W}$ e $7,3^{\circ}\text{C}/\text{W}$, respectivamente. Todos os mini tubos apresentam alta resistência térmica, comparados com mini tubos de calor convencionais, pois a sua região de evaporação é muito grande se comparada com a região de condensação. A densidade de potência aplicada nesses testes foi de $0,43 \text{ W}/\text{cm}^2$, o que é três vezes maior do que o exigido pela célula a combustível estudada. Todos os tubos mantiveram a temperatura do evaporador bem abaixo da temperatura crítica máxima de 90°C admitida pela membrana polimérica, o que viabiliza a utilização de todos no sistema integrado de refrigeração.

A Figura 10 ilustra a distribuição dos termopares ao longo dos mini tubos de calor no módulo de refrigeração. Um termopar adicional foi colocado na região central da resistência para controle de sua temperatura.

Placa de Grafite			Placa de Alumínio
16	15	14	4 Tubo 4
13	12	11	3 Tubo 3
10	9	8	2 Tubo 2
7	6	5	1 Tubo 1

Figura 10 - Posicionamento dos termopares nos mini tubos de calor que compõe o sistema integrado de refrigeração.

A Figura 11 mostra o resultado do teste feito com aplicação de potência constante de 40 W por uma hora no módulo completo de refrigeração. As temperaturas plotadas correspondem às temperaturas medidas pelos termopares na região central dos evaporadores dos mini tubos (Figura 7), de um dos condensadores e um sobre a resistência.

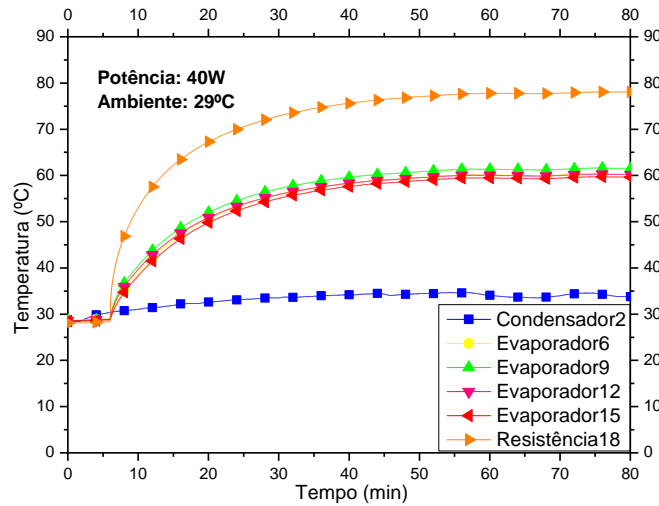


Figura 11 – Evolução das temperaturas para aplicação de potência de 40 W no módulo de refrigeração.

O teste apresentado na Figura 11 mostra que mesmo aplicando o dobro da potência gerada pela célula, em uma área de aplicação menor, a temperatura da resistência ainda se mantém dentro do limite máximo aceitável para a membrana polimérica. Também é possível notar que os tubos trabalharam em uniformidade. O teste de aplicação de potência em patamares é mostrado na Figura 12. As potências aplicadas são de 20, 30, 40 e 50 W, considerando o intervalo de uma hora cada.

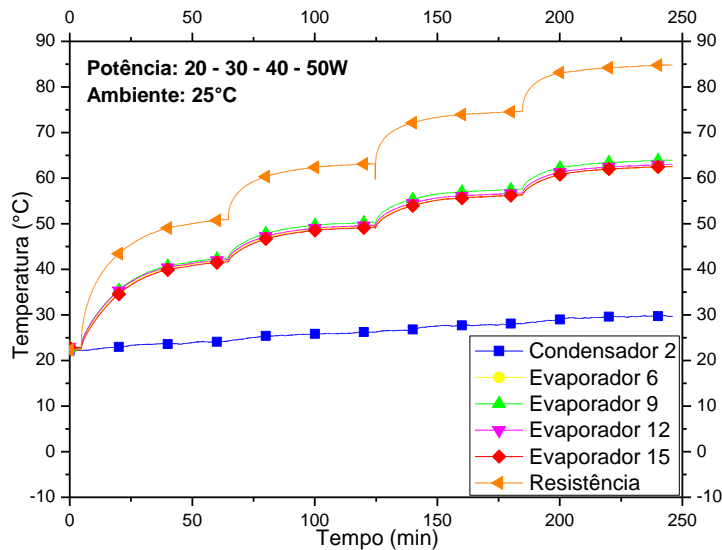


Figura 12 – Evolução das temperaturas para aplicação de potência em patamares de 20, 30, 40 e 50 W no módulo de refrigeração.

Neste último teste a máxima densidade de potência aplicada foi de 0,5 W/cm². Este valor é três vezes superior a densidade de potência encontrada para a célula a combustível em operação normal. E mesmo assim, a temperatura na resistência manteve-se na faixa ótima de funcionamento da célula a combustível. É interessante fazer uma comparação do funcionamento do módulo com aplicação de potência constante e em patamares, sendo que as temperaturas de estabilização para aplicação direta de 40 W e mantendo-a constante por uma hora (Figura 11) é em torno de 5°C superior às temperaturas de estabilização quando a mesma potência é aplicada em patamares (Figura 12).

A Figura 13 mostra a média das temperaturas de cada termopar colado ao longo dos quatro mini tubos de calor. A média foi feita sobre os últimos 30 minutos de teste. O teste em questão é do módulo de refrigeração integrado sob a aplicação constante de 40 W por uma hora. O primeiro ponto (à esquerda) refere-se aos termopares colados nas regiões de condensação dos quatro mini tubos e os três últimos, nas regiões de evaporação dos mesmos.

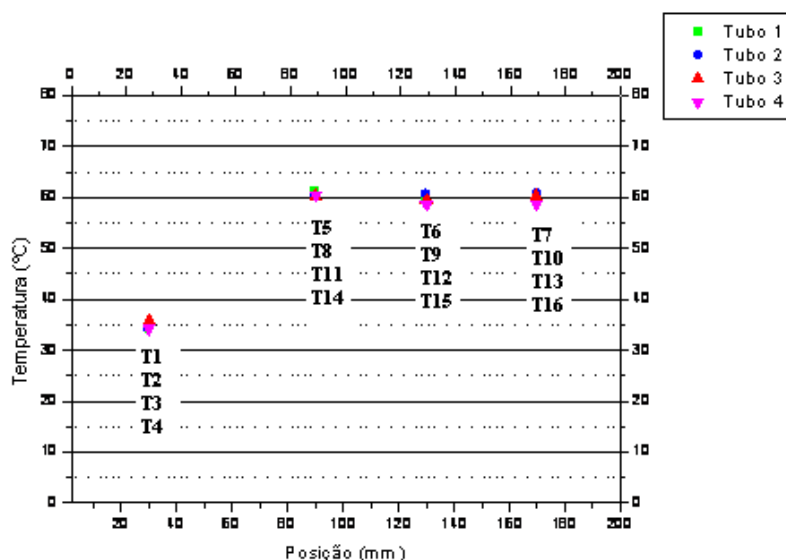


Figura 13 – Distribuição de temperatura ao longo dos mini tubos de calor testados no módulo integrado de refrigeração.

A Figura 13 apresenta a homogeneidade de distribuição de temperatura encontrada ao longo das placas de grafite onde estão inseridas as regiões de evaporação dos mini tubos de calor. Observa-se praticamente a mesma temperatura de estabilização nos três termopares distribuídos ao longo da região de evaporação de um mesmo mini tubo de calor e as mesmas temperaturas para todos os mini tubos de calor, o que significa temperaturas próximas ao longo de toda a placa de grafite.

4. CONCLUSÃO

Testes foram realizados para análise do comportamento de mini tubos de calor em aplicação na refrigeração de células a combustível do tipo PEM. Os testes realizados com os mini tubos de calor individualmente mostram que o melhor deles dissipa $0,43 \text{ W/cm}^2$, mantendo a temperatura do evaporador estabilizada em torno de 60°C .

As resistências térmicas dos mini tubos são elevadas para aplicações usuais, no entanto, faz-se necessário que a geometria dos mini tubos aplicados para refrigeração de PEMFC sejam adversas do ponto de vista da área da região de evaporação que é bem superior a área da região de condensação, o que pode justificar as resistências térmicas maiores.

Os mini tubos apresentaram comportamento semelhante, exceto pelo mini tubo 1, que apresentou temperaturas da ordem de 10°C acima dos outros três no evaporador. Mesmo assim ele mostra-se satisfatório para aplicação no sistema de refrigeração de células PEM.

O comportamento dos mini tubos de calor funcionando em paralelo difere do comportamento deles testados individualmente, principalmente quanto ao tempo de partida e de estabilização das temperaturas, relativamente lento neste caso. No entanto, o sistema tem bom comportamento dinâmico quanto às variações crescentes de aplicação de potência. Conclui-se ainda que o sistema de refrigeração desenvolvido pode ser aplicado para situações mais severas de geração de calor em uma célula real, não sendo mais este sistema um ponto limitante para atingir melhores eficiências em células PEM. Mantendo-se a temperatura da resistência, que simula a membrana polimérica de uma célula real, abaixo de 85°C , pode-se dissipar com o sistema de refrigeração proposto uma densidade de calor de $0,5 \text{ W/cm}^2$, o que na célula a combustível real na qual esse projeto foi baseado equivaleria a uma potência de 72 W .

Outro ponto relevante é a homogeneidade de temperaturas obtida ao longo das placas de grafite e a uniformidade de comportamento dos mini tubos de calor quando funcionando em paralelo no sistema de refrigeração integrado.

O sistema proposto mostra-se viável para utilização de refrigeração de células a combustível do tipo PEM.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela concessão das bolsas e auxílio financeiro, e ao Eng. Edevaldo B. Reinaldo do LABTERMO/UFSC (Laboratório de Ciências Térmicas), pelo auxílio no desenvolvimento da pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Faghri, A., 2005a, “Integrated Bipolar Plate Heat Pipe for Fuel Cell Stacks”, U.S. Patent Pub. No. 2005/0037253.
- Faghri, A., 2005b, “Micro Heat Pipe Embedded Bipolar Plate for Fuel Cell Stacks”, U.S. Patent Pub. No. 2005/0026015
- Miyake, R.G., Bazzo, E., “Análise Experimental de uma Célula a Combustível PEM 15W”, ENCIT 2006 – 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Vol.1, Paraná, Brazil, pp. 41-44, 2006.
- Rullière, R., Lefèvre, F., Lallemand, M., Ayl, V., Burban, G. Romestant, C., Alexandre, A., Fourcade, H., Dutour, S., Joly, J., 2007, “Experimental Study of Two-Phase Heat Spreaders for PEMFC Cooling Applications”, 14th International Heat Pipe Conference, Santa Catarina, Brazil.

7. DIREITOS AUTORAIS

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



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

MINI HEAT PIPES AS AN ALTERNATIVE FOR COOLING A FUEL CELL TYPE PEM

Ana Paula Silva, ana@labcet.ufsc.br
Pablo Rodrigo Pelizza, pablo@labcet.ufsc.br
Renan Manozzo Galante, renan@labcet.ufsc.br
Edson Bazzo, ebazzo@emc.ufsc.br

UFSC (Federal University of Santa Catarina), Department of Mechanical Engineering,
LabCET (Laboratory of Combustion and Thermal Systems Engineering) - University Campus-
CEP 88040-970 – Florianópolis – SC

***Abstract:** High temperatures can dry the polymer membrane, disrupting power generation and cause explosions due to improper mixing of the gases of the reaction. High temperatures can dry the polymer membrane, disrupting power generation and cause explosions due to improper mixing of the gases of the reaction. Moreover, higher temperatures facilitate the chemical reaction, increasing the efficiency of the fuel cell. The ideal level of operation of the cell is between 70 and 90 ° C. The proposed cooling system is comprised of four mini heat pipes attached to a system of forced air convection. Heat pipes are viable alternatives for implementing the above systems because they are efficient, compact and easily adaptable to the geometry of the cells usually found. To test the cooling system was mounted a bench that simulates the operation of a fuel cell with integrated cooling system. The mini heat pipes are made of stainless steel with 3.175 mm outer diameter, the capillary structure consists of a round stainless steel screen mesh 100 and the working fluid is deionized water. The condenser consists of a finned region coupled to two coolers. Results are presented for constant power of 5 W for the four mini heat pipes tested separately. Results are also presented for the integrated system with constant power of 40 W as well as for power bracket between 20 and 50 W.*

Keywords: PEM fuel cell, mini heat pipes, cooling system.