

## ANÁLISE DA LITERATURA SOBRE DISSIPADORES DE CALOR BASEADOS EM MULTI-MICROCANAIS

**Francisco Júlio do Nascimento, fnascimento@sc.usp.br<sup>1</sup>**  
**Gherhardt Ribatski, ribatski@sc.usp.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense 400, 13566-590, São Carlos – SP, Brasil.

**Resumo:** O primeiro trabalho compreendendo um estudo de trocadores de calor baseados em microcanais foi conduzido por Tuckerman e Pease (1981), que projetaram e testaram um dissipador de calor para o controle térmico de circuitos integrados utilizando a água como fluido refrigerante. Desde então, este tema tem sido abordado por vários autores e diferentes configurações geométricas para a distribuição dos microcanais têm sido propostas. O presente artigo apresenta uma ampla revisão da literatura sobre este tema. Distintas configurações de multi-microcanais são apresentadas e criticamente comparadas. Tal análise é focada em parâmetros de eficiência do dissipador como o fluxo crítico de calor, a perda de pressão e o coeficiente de transferência de calor. Uma análise detalhada dos efeitos de instabilidades térmicas e de técnicas de redução de seus efeitos é também apresentada.

**Palavras-chave:** dissipadores de calor, microcanais, fluxo crítico de calor

### 1. INTRODUÇÃO

A utilização de trocadores de calor compactos baseados em microcanais (denominação genérica para canais com diâmetro hidráulico inferior a 3 mm) vem atraindo a atenção tanto da academia como da indústria com um número elevado de trabalhos tendo sido publicados, principalmente na última década. Ribatski *et al.* (2007) listam os porquês deste interesse e as vantagens da utilização da tecnologia de microcanais em trocadores de calor quando comparada com canais convencionais.

Ao reduzir o diâmetro do canal, eleva-se a relação entre a área de contato com o fluido de trabalho e o volume do dissipador, proporcionando o incremento da área efetiva de troca de calor. Este incremento é acompanhado pelo aumento do coeficiente de transferência de calor e, conseqüentemente, do fluxo de calor ( $W/m^2$ ) com a redução do diâmetro, favorecendo ainda mais a miniaturização do trocador. A possibilidade de remoção de fluxos de calor elevados torna a tecnologia de microcanais propícia ao resfriamento de componentes eletrônicos (microprocessadores, circuitos integrados de potência), *lasers* de alta potência, células combustíveis, micro-reatores químicos e sistemas micro-eletrônicos (MEMS).

O resfriamento de componentes eletrônicos favorece a utilização da ebulição convectiva no interior de microcanais e não do escoamento monofásico, pois a primeira solução proporciona, além da remoção de grandes quantidades de calor por unidade de área, gradientes de temperatura ao longo do dissipador de calor inferiores, proporcionando um desempenho superior do dispositivo eletrônico.

Operando em condições similares, conforme demonstrado por Pua e Rumbold (2003), a tecnologia de microcanais permite reduzir em até 80% o peso de um trocador de calor quando comparado ao uso de canais convencionais. Assim, reduções significativas do material utilizado na fabricação do trocador e do inventário do fluido refrigerante são alcançadas. Tais ganhos são relevantes em sistemas nos quais dimensões e peso do trocador são parâmetros críticos de projeto, como em de aplicações aeronáuticas, aeroespaciais e marítimas.

Para sistemas operando em pressão e temperatura elevados é recomendada a utilização de trocadores baseados em microcanais, pois devido à redução do diâmetro do canal, a parede que o constitui resiste a esforços superiores para uma mesma espessura.

Há uma grande discrepância entre os resultados proporcionados pelos métodos disponíveis na literatura para a previsão da perda de pressão e do coeficiente de transferência de calor durante a ebulição convectiva no interior de microcanais conforme ilustrado nos estudos de Felcar e Ribatski (2008) e Tibiriçá e Ribatski (2008). Isto permite concluir que apesar do grande número de estudos já realizados, a melhor compreensão do tema e o desenvolvimento de métodos de previsão que possam ser utilizados como ferramentas de projeto demandará vários anos adicionais de

estudos. Dentro deste contexto, o presente levantamento bibliográfico se dedica a um estudo crítico das configurações de dissipadores baseados em microcanais propostas recentemente.

## 2. ANÁLISE DA LITERATURA

O objetivo do estudo de distintas configurações de distribuição dos canais em um dissipador de calor é avaliar o quanto a configuração afeta os parâmetros necessários ao projeto destes trocadores, entre eles o coeficiente global e local de transferência de calor, a perda de pressão e o fluxo crítico de calor. Configurações ou mecanismos que evitem o aparecimento de fluxo reverso devido à ebulição explosiva e que favoreçam a estabilidade para um melhor controle térmico são também objetivos destes estudos. Para a análise das configurações de dissipadores propostas até então, elas foram agrupadas segundo a seguinte classificação: canais paralelos, com escoamento cruzado e com canais ramificados.

A Tab. 1 apresenta esquematicamente uma descrição de algumas das geometrias apresentadas na literatura e as condições para as quais elas foram avaliadas experimentalmente.

**Tabela1. Dados dos trocadores de calor baseados em microcanais levantados da literatura. O número de fases é indicado por 2Φ para bifásico e 1Φ para monofásico. A sigla NM refere-se a dados não mencionados nos trabalhos.**

Autores	Geometria de distribuição	Diâmetro hidráulico (mm)	Fluido/ N° de fases	N° de canais/ formato seção	Vazão mássica (kg/m <sup>2</sup> s)	Fluxo de calor (kW/m <sup>2</sup> )
Tuckerman e Pease (1981)	paralelo	0,086 – 0,095	água/1Φ	100/retangular	1000 - 5000	até 7900
Yan e Lin (1998)	paralelo	2	R134a/2Φ	28/circular	50 - 200	9 - 40
Qu e Mudawar (2003)	paralelo	0,35	água/1Φ	21/retangular	85 - 380	1050 - 2160
Lee e Mudawar (2004a,b)	paralelo	0,35	R134a/2Φ	53/retangular	127 - 654	159-938
Hetsroni <i>et al.</i> (2005)	paralelo	0,104	água/2Φ	21/triangular	95 - 290	80 - 330
Henning <i>et al.</i> (2006)	paralelo	0,13	água/2Φ	68/retangular	49	NM
Schneider <i>et al.</i> (2006)	paralelo	0,227	R123/1Φ e 2Φ	5/retangular	622 – 1368	2130
Kuo e Peles (2007)	paralelo	0,223	água/2Φ	5/retangular	83 – 303	até 6430
Bogojevic <i>et al.</i> (2008)	paralelo	0,171	água/1Φ e 2Φ	40/retangular	97 - 325	213 - 713
Park e Thome (2009)	paralelo	0,315 - 0,837	R134a, R245fa, R236fa/2Φ	20 – 29/retangular	100 - 4000	370 - 3420
Kuo e Peles (2009)	paralelo	0,22	água/2Φ	5/retangular	86 - 520	até 2400
Lu e Pan (2009)	paralelo	0,086 – 0,13	água/1Φ e 2Φ	10/retangular	99 - 297	até 500
Colgan <i>et al.</i> (2006)	cruzado	0,037 – 0,067	água/1Φ	NM/retangular	90 - 270	até 4000
Kosar <i>et al.</i> (2009)	cruzado	0,19 – 0,27	R123 e água/2Φ	6 e 12/retangular	329 - 1033	até 2800
Mauro <i>et al.</i> (2010)	ramificado	0,315	R134a, R245fa, R236fa/2Φ	29/retangular	250 - 1500	até 3300
Pence (2009)	ramificado	0,037 – 0,187	amônia/2Φ e 1Φ	12/retangular	43 - 328	100 - 10000

### 2.1. Geometria em paralelo

A primeira configuração geométrica de dissipador de calor apresentada na literatura visando o controle térmico de componentes eletrônicos foi proposta por Tuckerman e Pease (1981) e consistia em microcanais dispostos paralelamente. O desenvolvimento de dissipadores baseados nesta configuração de canais possui como vantagem a facilidade de fabricação. Segundo Thome (2004), canais convencionais (diâmetro hidráulico superior a 3mm) geralmente são utilizados segundo seções circulares, enquanto para aplicações envolvendo microcanais as seções são em sua maioria não-circulares e geralmente retangulares. Kim (2004) destaca o fato de dissipadores com canais paralelos são projetados considerando a região entre canais consecutivos como uma aleta submetida externamente a convecção forçada e assumindo condução unidimensional ao longo de seu comprimento. Neste trabalho o autor apresentou métodos para otimização de dissipadores de calor baseados em microcanais.

O trabalho pioneiro de Tuckerman e Pease (1981) demonstrou que a utilização no resfriamento de circuitos integrados da convecção forçada no interior de microcanais, permite remover fluxos de calor de até 7,9 MW/m<sup>2</sup> com relação à base aquecida (footprint). Seus ensaios experimentais foram realizados para um dissipador fabricado em silício utilizando a água como fluido de trabalho. Este fluxo de calor foi levantado considerando aplicações em circuitos

integrados, componentes eletrônicos que devem operar a temperaturas inferiores a 80 °C, isto significa limitar a diferença de temperaturas entre a superfície do dissipador e o fluido refrigerante a 50°C. Para diferenças de temperaturas superiores e reduzindo as dimensões dos canais, Tuckerman e Pease (1981) estimaram a possibilidade de dissipação de fluxos de calor superiores a 13 MW/m<sup>2</sup>.

Yan e Lin (1998) avaliaram a transferência de calor e a perda de carga em um dissipador de calor baseado na ebulição convectiva no interior de microcanais paralelos com seção circular, utilizando o R134a como fluido de trabalho e variando o fluxo de calor, com base na área aquecida, entre 9 e 40 kW/m<sup>2</sup>. Baseados nos seus dados experimentais, novas correlações foram propostas pelos autores para o coeficiente de transferência de calor e o fator de atrito.

Utilizando dados experimentais para R134a levantados em um dissipador de calor baseado em microcanais paralelos, Lee e Mudavar (2004a) e Lee e Mudavar (2004b) propuseram novas correlações para perda de pressão e coeficiente de transferência de calor durante a ebulição convectiva, para uma condição de entrada de fluido saturado. Os autores identificam distintos mecanismos para a transferência de calor segundo faixas de títulos de vapor. Para baixos títulos de vapor (menores que 0,05) foi identificado como principal mecanismo de transferência de calor a ebulição nucleada (padrão de escoamento: bolhas dispersas), já para títulos de vapor intermediários (entre 0,05 e 0,55) e altos (maiores que 0,55) o mecanismo de transferência de calor é dado pela evaporação de um filme líquido (padrão de escoamento: bolhas alongadas e anular). Os autores realizaram experimentos para vazões mássicas entre 159 e 938 kW/m<sup>2</sup> e pressões de entrada de 144 a 660 kPa.

Qu e Mudawar (2003) discutem dois tipos de instabilidades que podem ocorrer em trocadores de calor baseados em microcanais. O primeiro tipo de instabilidade é causado pela compressibilidade da mistura bifásica a montante do trocador, causando oscilações de pressão. Os autores apresentam como solução a presença de uma válvula para restringindo a passagem de fluido à montante do trocador de calor. O segundo tipo de instabilidade é verificada quando a dissipação de calor é da mesma ordem do fluxo crítico de calor. Esta instabilidade ocorre devido ao fluxo reverso de vapor, originado em um dos microcanais, ocasionando uma entrada de vapor nos outros canais e assim, aumentando o título de vapor de entrada. Kandlikar (2005) discute os mecanismos físicos envolvidos que causam o fluxo reverso e indica que este fenômeno está diretamente relacionado com o padrão de escoamento. Segundo ele, o crescimento de bolhas com dimensões similares às do microcanal favorecem o fluxo reverso. Em um estudo recente, Bogojevic *et al.* (2008) fazem uma análise das instabilidades e levantam resultados para as frequências e amplitude de oscilação com que as instabilidades ocorrem.

Bogojevic *et al.* (2009) avaliaram o efeito na distribuição de refrigerante ao longo do dissipador de calor da posição do canal de alimentação de fluido em relação a estrutura de microcanais paralelos. Também foi avaliada por eles a influência de bolhas bloqueando a passagem de fluido por um microcanal. Os autores concluíram que canais bloqueados influenciam negativamente a transferência de calor e incrementam a perda de pressão. Hetsroni *et al.* (2005) indicam que a oscilação da pressão têm sua intensidade elevada com o incremento do títulos de vapor.

Soluções são apresentadas na literatura visando minimizar efeitos de instabilidade. Henning *et al.* (2006) indicam que uma estrutura ramificada proporciona uma melhora na distribuição do fluido nos microcanais em relação a geometria em paralelo, eliminando as oscilações de pressão de baixa frequência, elevando, entretanto, a perda de pressão. Park e Thome (2009) estudaram experimentalmente um dissipador de calor baseado em microcanais com orifícios a montante de cada microcanal, cuja instalação teve como objetivo evitar o fluxo reverso através da imposição de uma perda de pressão local. A geração de vapor causada pela passagem do fluido no orifício resultou na formação de bolhas reduzindo o superaquecimento necessário ao início da ebulição convectiva. Schneider *et al.* (2006) também analisaram o efeito na transferência de calor da imposição de uma perda de pressão na entrada de cada microcanal através de um orifício. Através da comparação de resultados experimentais para o mesmo dissipador para configurações com e sem orifícios, eles concluíram que o coeficiente de transferência de calor, geralmente, eleva-se tanto para o escoamento monofásico como para uma condição de escoamento bifásico na saída do orifício. Eles também verificaram uma redução no superaquecimento necessário para início da ebulição.

Com o intuito de intensificar a nucleação de bolhas no interior dos microcanais, Kuo e Peles (2007) baseados em Schneider *et al.* (2006), além da utilização do orifício, estruturaram a parede interna do microcanal de forma a facilitar a formação de núcleos de vapor ativos. Com isso, observou-se o início da ebulição para superaquecimentos inferiores aos de Schneider *et al.* (2006). Eles verificaram também um incremento no fluxo crítico de calor. Em um estudo recente, Kuo e Peles (2009) verificaram que estas estruturas também minimizam efeitos de instabilidades por permitirem o início da ebulição em condições de superaquecimentos reduzidos. A Fig. (1) ilustra os orifícios a montante dos microcanais utilizados por Kuo e Peles (2007) e Kuo e Peles (2009) e as paredes estruturadas destes microcanais.

Visando um incremento no coeficiente de transferência de calor Lu e Pan (2009) propuseram dissipadores com geometria em paralelo, porém utilizando microcanais divergentes, cuja largura eleva-se na direção do escoamento. Conforme indicado pelos autores, canais divergentes tendem a amortizar efeitos de instabilidades e o escoamento (ou fluxo) reverso. Os dissipadores ensaiados se diferenciavam pela densidade de cavidades artificiais de reduzidas dimensões usinadas na superfície dos canais com o intuito de favorecer a nucleação de vapor. Os autores verificaram o incremento do coeficiente de transferência de calor e da perda de pressão com o incremento da densidade de cavidades.

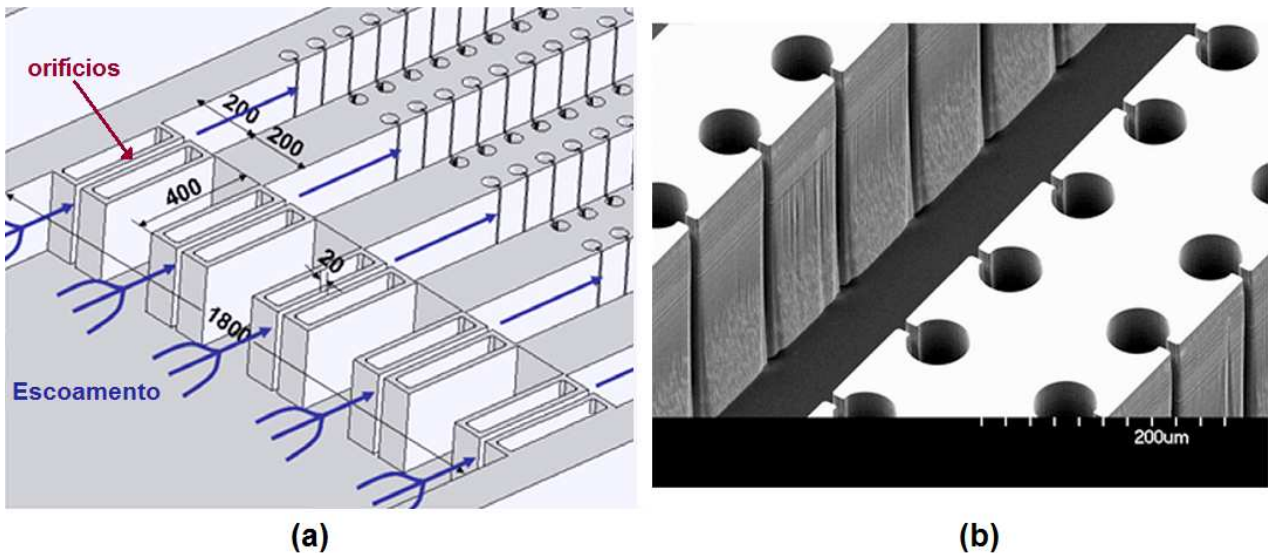


Figura 1. (a) Ilustração dos orifícios a montante dos microcanais e (b) paredes estruturadas utilizadas. Kuo e Peles (2007)

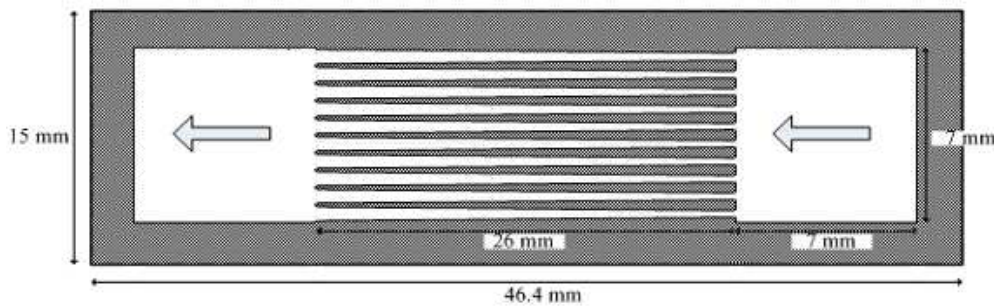


Figura 2. Trocador de calor com microcanais divergentes. Lu e Pan (2009)

### 2.2. Geometria com fluido cruzado

Outra geometria de distribuição de microcanais encontrada na literatura é a geometria com cruzamento de fluido. Nestas geometrias os fluxos de fluido através dos microcanais se cruzam, possibilitando que haja uma melhor distribuição do fluido pelos canais ao longo do dissipador. Por facilitar a distribuição uniforme do fluido pelo trocador de calor, esta geometria minimiza a ocorrência de fluxo reverso pois propaga ebulições explosivas de microcanais adjacentes, propiciando o re-molhamento da superfície antes secas e contendo este tipo de instabilidade.

Colgan *et al.* (2006) testaram diversos trocadores de calor variando as dimensões dos microcanais e as distâncias que estes se cruzam. Como resultado eles concluíram que canais menores e com menores distancias de cruzamento favorecem a transferência de calor, entretam elevam a perda de pressão. A seguir, a Fig. (3) ilustra um dos trocadores de calor testado pelos autores.

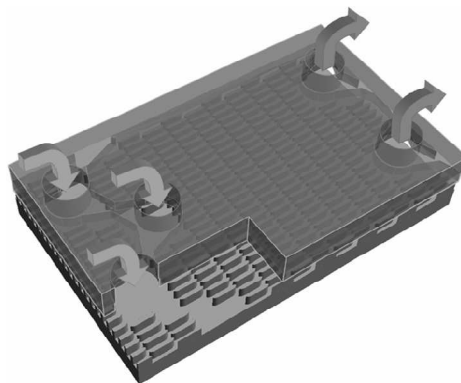


Figura 3. Ilustração de um trocador de calor testado por Colgan *et al.* (2006).

Kosar *et al.* (2009) estudaram o comportamento de microcanais com geometria com cruzamento de fluido em um dissipador de calor de dimensões semelhantes ao proposto por Kuo e Peles (2007) e Kuo e Peles (2009), os quais embasaram seu trabalho de (2009). Estes autores concluíram que para uma condição próxima do fluxo crítico de vapor, a geometria com cruzamento de fluido apresentou amplitude de oscilação de pressão inferior a de canais em paralelo.

### 2.3. Geometria com ramificação de microcanais

Esta geometria de canais apresenta uma complexidade de projeto e fabricação superior às demais, pois neste caso a hipótese de aleta unidimensional não se aplica. As ramificações do escoamento têm como objetivo maximizar a transferência de calor minimizando a perda de pressão ao longo do dissipador. Em alguns destes estudos inspirações na natureza (sistemas vasculares de vegetais, ramificações pulmonares, bacias hidrográficas) são buscadas para que proporcionem uma minimização da perda de pressão e muitas vezes com a finalidade de controle térmico. Bejan (1997) apresenta uma análise do caminho ótimo de ramificações para uma melhor troca térmica. A ramificação dos microcanais pode também buscar objetivos adicionais como fornecer uma mistura bifásica com título de vapor inferior (ou eventualmente fluido monofásico) em determinadas regiões do dissipador de calor com o intuito de elevar o fluxo crítico de calor. Mauro *et al.* (2010) compararam o desempenho de um dissipador com geometria paralela tendo a entrada e a saída do fluido em suas extremidades opostas com um dissipador sendo alimentado em sua seção central com o escoamento sendo ramificado em direções opostas e o fluido refrigerante evaporado eliminado em suas extremidades opostas. Eles verificaram um incremento do fluxo crítico de calor para a geometria ramificada de 24%. Os autores verificaram também um decréscimo acentuado da perda de pressão devido a redução do comprimento do escoamento.

Pence (2009) analisou o desempenho de um dissipador cuja geometria das ramificações era baseada na teoria dos fractais. A autora implementou algoritmos para a otimização das dimensões e das geometrias envolvidas e concluiu para o dissipador ensaiado que, para uma comparação utilizando modelos teóricos entre uma geometria em fractal e uma geometria em paralelo, a geometria em fractal apresenta melhores resultados para perda de pressão. Conclui-se também que ângulos de bifurcação menores dos microcanais resultam em menos perda de pressão quando comparados com ângulos maiores. Uma das geometrias em fractal testadas pela autora é apresentada na Fig. (4).

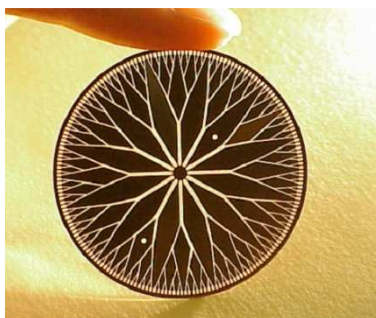


Figura 4. Trocador de calor com distribuição de canais em fractal. Pence (2010).

## 3. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

O número crescente de trabalhos publicados tratando de dissipadores de calor baseados em multi-microcanais vem permitindo ampliar a compreensão dos fenômenos de troca de calor, instabilidade e perda de pressão envolvidos nestes dispositivos. A utilização de trocadores de calor baseados em microcanais permite a remoção de grandes quantidades de calor através de dispositivos de volumes reduzidos. Modelos para a previsão de perda de pressão, transferência de calor, fluxo crítico e instabilidades são encontrados na literatura, porém apresentam resultados discrepantes e não podem, ainda, serem indicados como ferramentas de projeto. Resultados experimentais e tendências distintas são verificadas quando bancos de dados levantados por laboratórios independentes são comparados conforme indicado por Ribatski *et al.* (2006).

Mecanismos de intensificação de troca de calor começam a ter sua aplicação especulado também para microcanais. Ranhuras e estruturação dos microcanais facilitam a formação de núcleos de vapor ativos, que por sua vez permitem a formação de bolhas em condições de superaquecimento reduzido. Tal antecipação do início do processo de ebulição parece prevenir do crescimento “explosivo” de bolhas, pois evitam que a nucleação ocorra de forma abrupta e em condições de superaquecimento elevado. Por outro lado, tais soluções embora positivas segundo aspectos de instabilidade e transferência de calor causam em geral um incremento da perda de pressão, resultando em uma demanda maior de energia de bombeamento.

Canais paralelos parecem favorecerem efeitos de instabilidade, os quais entretanto podem ser minimizados através da imposição de perdas de pressão a jusante do dissipador resultando numa maior estabilidade do sistema, reduzindo flutuações na pressão e evitando a ocorrência da ebulição “explosiva” e do escoamento reverso.

Dissipadores com cruzamento de microcanais apresentam desempenho em termos de transferência de calor superior ao de canais paralelos e permitem conter efeitos de instabilidade. Porém tais resultados são acompanhados de um aumento da perda de pressão.

Finalmente, conclui-se que a geometria com ramificação dos microcanais parece proporcionar o incremento da transferência de calor e o fluxo crítico de calor sem impactar significativamente a perda de pressão. Necessita, entretanto processos mais elaborados de fabricação.

#### 4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio a esta pesquisa através de uma bolsa de mestrado e ao auxílio Projeto de Pesquisa modalidade Jovem Pesquisador em Nanotecnologia (Processo nº 576982/2008-3) e a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio através de uma bolsa de estudos modalidades Jovem Pesquisador (Processo nº 2006/52089-1).

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- Bejan, A., 1997, "Advanced Engineering Thermodynamics", Wiley, New York, 2nd edition.
- Bogojevic, D., Sefiane, K., Walton, A.J., Lin, H. and Cummins, G., 2008, "Two-Phase Flow Instabilities in Microchannels", In Proceedings of the ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale, Whistler.
- Bogojevic, D., Sefiane, K., Walton, A.J., Christy, J.R.E., Cummins, G. and Lin, H., 2009, "Investigation of Flow Distribution in Microchannels Heat Sinks", Heat Transfer Engineering, Vol. 30, No. 13, pp. 1049-1057.
- Colgan, E.G., Furman, B., Gaynes, M., LaBianca, N., Magerlein, J., Polastre, R., Bezama, R.J., Choudhary, R., Marston, K., Toy, H., Wakil, J.A. and Schmidt, R., 2006, "Silicon Microchannel Cooling for High Power Chips", International Journal of Heating Ventilation Air Conditioning and Refrigeration Research, Vol. 12, No. 4, pp. 1031-1045.
- Felcar, H.O.M. and Ribatski, G., 2008, "Avaliação de Métodos Preditivos para Perda de Carga Durante o Escoamento Bifásico e a Ebulição Convectiva em Micro-Canais", In Proceedings of the 1st Brazilian Meeting on Boiling, Condensation, and Multiphase Flow, Florianópolis – SC, Brazil.
- Henning, T., Brandner, J.J., Schubert, K., Lorenzini, M. and Morini, G.L., 2006, "Evaluation of Different Microchannel Array Evaporator Designs", In Proceedings of the ECI International Conference on Boiling Heat Transfer, Spoleto.
- Hetsroni, G., Mosyak, A., Pogrebnayak, E. and Segal, Z., 2005, "Explosive Boiling of Water in Parallel Micro-Channels", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 31, pp. 371-392.
- Kandlikar, S.G., 2005, "Effect of Liquid-Vapor Phase Distribution on the Heat Transfer Mechanisms During Flow Boiling in Minichannels and Microchannels", In Proceedings of the 5th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion, Xi'an, China.
- Kim, S.J., 2004, "Methods for Thermal Optimization of Microchannel Heat Sinks", Heat Transfer Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 37-49.
- Kosar, A., Ozdemir, M.R. and Keskinöz, M., 2009, "Pressure Drop Across Micro-Pin Heat Sinks Under Boiling Conditions", In Proceedings of the ECI International Conference on Boiling Heat Transfer, Florianópolis – SC, Brazil.
- Kuo, C.J. and Peles, Y., 2007, "Local Measurement, of Flow Boiling in Structured Surface Microchannels", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, pp. 4513-4526.
- Kuo, C.J. and Peles, Y., 2009, "Pressure Effects on Flow Boiling Instabilities in Parallel Microchannels", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 271-280.
- Lee, J. and Mudawar, I., 2005, "Two-Phase Flow in High-Heat-Flux Micro-Channel Heat Sink for Refrigeration Cooling Applications: Part I – Pressure Drop Characteristics", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 928-940.
- Lee, J. and Mudawar, I., 2005, "Two-Phase Flow in High-Heat-Flux Micro-Channel Heat Sink for Refrigeration Cooling Applications: Part II – Heat Transfer Characteristics", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 941-955.
- Lu, C.T. and Pan, C., 2009, "Convective Boiling in a Parallel Microchannel Heat Sink with a Diverging Cross-Section Design and Artificial Nucleation Sites", In Proceedings of the ECI International Conference on Boiling Heat Transfer, Florianópolis – SC, Brazil.
- Mauro, A.W., Thome, J.R., Toto, D. and Vanoli, G.P., 2010, "Saturated Critical Heat Flux in a Multi-Microchannel Heat Sink Fed by a Split Flow System", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 34, No. 1, pp. 81-92.
- Park, J.E. and Thome, J.R., 2008, "Critical Heat Flux in Multi-Microchannel Copper Elements with Low Pressure Refrigerants", Ph.D. thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland.
- Pence, D., 20, "The Simplicity of Fractal-Like Flow Networks For Effective Heat and Mass Transport", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 34, No. 4, pp. 474-486.

Pua, L.M. and Rumbold, S.O., 2003, "Industrial Microchannel Devices: Where Are We Today?", In Proceedings of the 1st International Conference on Microchannels and Minichannels, Rochester, New York, USA

Qu, W. and Mudawar, I., 2003, "Measurement and Prediction of Pressure Drop in Two-Phase Micro-Channel Heat Sinks", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp. 2737-2753.

Ribatski, G., Wojtan, L. and Thome, J.R., 2006, "An analysis of experimental data and prediction methods for flow boiling heat transfer and two-phase frictional pressure drop in micro-scale channels", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 31, No. 1, pp. 1-19.

Ribatski, G., Cabezas-Gómez, L., Navarro, H.A. and Saíz-Jabardo, J.M., 2007, "The Advantages of Evaporation in Micro-Scale Channels to Cool Microelectronics Devices", Thermal Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 34-39.

Schneider, B., Kosar, A. and Peles, Y., 2007, "Hydrodynamic Cavitation and Boiling in Refrigerant (R-123) Flow Inside Microchannels", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, pp. 2838-2854.

Thome, J.R., 2004, "Boiling in Microchannels: a Review of Experiment and Theory", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 25, pp. 128-139.

Tibiriçá, C.B. and Ribatski, G., 2008, "Análise de Dados Experimentais e Métodos para Previsão do Coeficiente de Transferência de Calor em Micro-Canais", In Proceedings of the 1st Brazilian Meeting on Boiling, Condensation, and Multiphase Flow, Florianópolis – SC, Brazil.

Tuckerman, D.B. and Pease, R.F.W., 1981, "High-Performance Heat Sinking for VLSI", Vol. EDL-2, No. 5, pp. 126-129.

Yan, Y.Y. and Lin, T.F., 1998, "Evaporation Heat Transfer and Pressure Drop of Refrigerant R-134a in a Small Pipe", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41, pp. 4183-4194.



**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*

## **STATE-OF-THE-ART REVIEW ON HEAT SPREADERS BASED ON SINGLE-PHASE AND FLOW BOILING IN MULTI-MICROCHANNELS**

**Francisco Júlio do Nascimento, fnascimento@sc.usp.br<sup>1</sup>**  
**Gherhardt Ribatski, ribatski@sc.usp.br<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, Av. Trabalhador São Carlense, 400, 13566-590, São Carlos – SP, Brasil.

**Abstract:** *Tuckerman and Pease (1981) were the pioneers to propose a heat spreader for thermal control of integrated circuits based on water flowing inside parallel microchannels. Since then, several researchers have worked on this subject and different heat spreader geometries and channels configurations have been proposed. In this study a broad literature review on this topic is presented. Different configurations of heat spreaders based on multi-microchannels are presented and critically compared. In this analysis, it is taken into account the heat transfer and CHF experimental results provided by the authors. Aspects as pressure drop and fin efficiency are also considered. Finally, a detailed analysis on thermal instabilities and the techniques applied to dump their effects is also presented.*

**Keywords:** *heat spreaders, microchannels, critical heat flux*