

**12º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO**

**APLICAÇÃO DE NANOFLUIDOS EM TROCADORES DE CALOR DE
MICROCANAIS**

Erick Daniel Rincón Castrillo – daniel.rinconc@ufu.br

Luz Elena Peñaranda Chenche – ing.elenap@gmail.com

Abdul Orlando Cárdenas Gómez – orlandocardenas1589@gmail.com

Enio Pedone Bandarra Filho – bandarra@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, www.ufu.br

FUNDAMENTOS DE HVAC&R - F1 Princípios – Termodinâmica, Mecânica dos
Fluidos e Transferência de Calor

Resumo. A necessidade de resfriamento em dispositivos compactos tem permitido que nanofluidos e microcanais se tornem uma alternativa viável para melhorar a taxa de transferência de calor, razão pela qual essa tecnologia está recebendo mais atenção nas pesquisas. Com este argumento é necessário realizar uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de nanofluidos em microcanais e dissipadores de calor microcanais. Este artigo apresenta diversos trabalhos classificados de acordo com o tipo de estudo (experimental, numérico e analítico). Uma tabela resumo onde são destacadas características como tipo de estudo (experimental, numérico e analítico), as condições experimentais, condições de simulação e de modelagem de cada autor, assim como, os resultados de maior relevância das pesquisas consultadas é apresentada. Os resultados de um grande número de pesquisas consultadas mostram uma melhora na transferência de calor com o uso de nanofluidos, principalmente quando são produzidos com nanopartículas de Al_2O_3 e TiO_2 .

Palavras-chave: Microcanais, Nanofluidos, Transferência de calor, Concentração de nanopartículas.

1. INTRODUÇÃO

As propriedades térmicas dos fluidos têm recebido grande atenção dos pesquisadores nas últimas duas décadas, a fim de melhorar a transferência de calor (Colangelo et al., 2017). O argumento anterior promoveu a adição de nanopartículas (<100 nm) em diferentes fluidos de trabalho convencionais, para formar nanofluidos, nomeados assim por Choi & Eastman, (1995), possibilitando o incremento transferência de calor em função da concentração de nanopartículas, conforme validado por vários autores como Hung et al., (2012), Tokit et al., (2012), Hung & Yan (2012) e Anoop et al., (2012).

O uso de nanofluidos como fluidos de trabalho em trocadores de calor, tem gerado grande impacto na rea de transferencia de calor, evidenciado pela sua aplicabilidade em diferentes setores da indústria (aquecimento, energias renováveis, refrigeração, lubrificação, medicina e combustão) onde foram obtidos resultados favoráveis (Diglio et al., 2018; Zamzamian et al., 2011).

No campo das energias renováveis, autores como Wang et al., (2017) realizaram investigações experimentais com nanofluidos constituídos por nanopartículas de ouro (Au) aplicadas na geração de vapor solar a partir da energia solar. Sui et al., (2017) fizeram uma análise das vantagens do uso de nanofluidos para extrair calor de reservatórios geotérmicos e aumentar a eficiência na exploração desses recursos. A necessidade de resfriamento em sistemas eletrônicos tem motivado a abordagem de estudos como o de Ijam & Saidur (2012) onde é analisado um minicanal com nanofluidos de H_2O-SiC e H_2O-TiO_2 . Nam et al., (2011) fazem uma caracterização experimental de microperfurações utilizando nanofluidos como lubrificantes. Tripathi & Bég (2014) propuseram um estudo sobre o escoamento peristáltico de nanofluidos por meio de um canal bidimensional para administração de medicamentos. Gan et al., (2012) investigaram as características de combustão de nanofluidos com partículas de boro e ferro, estabeleceram os efeitos da adição das referidas partículas.

Os altos fluxos de calor em áreas reduzidas e a impossibilidade de utilização de dispositivos de troca térmica de grande tamanho em aplicações como microeletrônica, foram as principais razões que incentivaram o desenvolvimento de trocadores de calor de microcanais que foram introduzidos pela primeira vez por Tuckerman & Pease (1981). Adicionalmente num esforço por incrementar a eficiência na troca térmica destes dispositivos, nos últimos anos o uso dissipadores de calor de microcanais em conjunto com nanofluidos como fluidos de trabalho tem aumentado de maneira exponencial como mostrado no trabalho de Peñaranda Chenche (2020).

Consequentemente, no presente trabalho é apresentada uma revisão bibliográfica sobre trocadores de calor microcanais que utilizam nanofluidos como fluido de trabalho, onde os parâmetros como geometria do microcanal, regime de escoamento, fluido base, material de nanopartícula, tamanho de nanopartícula, concentração de nanopartículas (Φ) e resultados relevantes de cada trabalho são especificados.

2. ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Rimbault et al., (2014) realizam uma investigação experimental com foco nos campos hidráulico e térmico de um nanofluido composto por água e nanopartículas de CuO (diâmetro de 29 nm) em uma faixa de concentração de 0,24 - 4,5%, este fluido circula por um Dissipador de calor de microcanais retangulares, nos resultados uma pequena melhora na transferência de calor foi determinada em relação à água com as frações volumétricas de 0,24% e 1,03%.

Xu et al., (2020) apresentam uma análise do grau de influência da concentração (fração de massa) de partículas de óxido de grafeno (GOP) e a frequência de pulsação na transferência de calor e na queda de pressão de um microcanal (aletas tipo pino), a concentração das nanopartículas na produção do nanofluido variou entre 0,02% - 0,2%, a frequência de pulsação do experimento foi estabelecida entre 1 - 5 Hz e os números de Reynolds 272, 407 e 544, o aumento concentração e frequência na faixa de 2 a 5 Hz permitiram uma melhora no desempenho da transferência de calor.

Na literatura sobre a aplicação de nanofluidos em trocadores de calor microcanais, várias investigações realizam estudos experimentais - numéricos, por exemplo, Yu et al., (2016) estudaram o comportamento de nanofluidos (água deionizada - TiO₂) em um microcanal numericamente e Experimentalmente, desenvolveram um modelo numérico e este foi validado experimentalmente, observando uma melhora no fluxo de calor convectivo (aumento de 91,9%).

Para realizar uma análise correta dos nanofluidos em trocadores de calor de microcanais, vários parâmetros devem ser levados em consideração, como a geometria do microcanal, fluido de base, regime de fluxo, nanopartículas (material e concentração), temperatura e fluxo de entrada de fluido (Rajiv et al., 2020). A Tabela 1 resume os trabalhos experimentais consultados na literatura relativos à aplicação de nanofluidos em microcanais e dissipadores de calor de microcanais realizados nos últimos anos, dentro desta classificação, as condições de teste e os resultados obtidos são levados em consideração.

3 ESTUDOS NUMÉRICOS

Ho et al., (2019) analisam numericamente o material de mudança de fase microencapsulada (MEPCM) da parede superior de um microcanal, a pesquisa é realizada quando a transferência de calor atinge um comportamento transitório, utilizando como fluido de trabalho H₂O-Al₂O₃, a integração numérica das equações para a distribuição da temperatura no microcanal é feita pelo método dos volumes finitos, verificou-se que a camada MEPCM tem grande influência na temperatura da parede superior.

Karimipour et al., (2017) focaram sua pesquisa na convecção forçada do fluxo de nanofluido em um microcanal com o método de volume finito, eles analisam diferentes nanopartículas como Al₂O₃ e Ag em H₂O como fluido base, o número de Reynolds foi 10 e 100. Levando em consideração os resultados, recomenda-se a utilização de H₂O-Al₂O₃ como nanofluido de trabalho, pois há um aumento na velocidade de transferência de calor.

A atuação da transferência de calor de fluidos não newtonianos em trocadores de calor é um tema pouco abordado pelos pesquisadores, a análise deste tema pode ser realizada por meio de simulações numéricas (Li et al., 2017), conforme afirmado os seguintes autores. Por meio da Tabela 2, são analisados os trabalhos numéricos sobre a aplicação de nanofluidos em trocadores de calor microcanais, as condições de simulação e os resultados em cada caso mostram o propósito de cada autor.

4 ESTUDOS ANALÍTICOS

Hatami & Ganji, (2014) fizeram uma análise da transferência de calor de um dissipador de calor microcanal em forma de barbatana, para resfriar este dispositivo eles usam H₂O-Cu, por sua vez, eles usam uma abordagem de meio poroso e o método dos mínimos quadrados para determinar o comportamento da temperatura na aleta do dissipador de calor e na zona do nanofluido. Quando a concentração de nanopartículas (Cu) aumentou, o movimento de calor aumentou causando uma redução na diferença entre a temperatura do fluido de trabalho e a parede do dissipador de calor.

Como as equações de movimento de fluidos e transferência de calor são não lineares, ou seja, não apresentam uma solução exata e única, métodos analíticos e técnicas numéricas devem ser utilizados para sua solução (Hosseini et al., 2018). Os trabalhos a seguir aplicam os conceitos mencionados pela presença de nanofluidos em trocadores de calor microcanais. A Tabela 3 é uma compilação de investigações analíticas onde as condições dos modelos propostos são destacadas, por sua vez os resultados mais relevantes são mencionados em cada caso.

Tabela 1. Trabalho experimental de aplicação de nanofluidos em trocadores de calor microcanais.

Autor	Geometria Microcanal	Reynolds	Fluido Base	Material de Nanopartículas	Tamanho da Nanopartícula (nm)	Φ (%)	Destques / Resultados
(Kumar & Sarkar, 2020)	Retangular	$100 \leq R_e \leq 500$	Água y MWCNT ¹	Al ₂ O ₃	45 e 20	0,01	Condições de teste: Vazão volumétrica entre 0,17 - 0,5 LPM ² , temperatura de entrada do fluido entre 20 - 40 °C e fluxo de calor 8,3 W / cm ² . O aumento máximo no coeficiente de transferência de calor (44,02%) foi obtido com o nanofluido híbrido MWCNT (10: 0).
(Ding et al., 2019)	Espiral	-	Água	TiO ₂	20 - 30	0,5; 0,7 y 1,0	Condições de teste: Duas formas cristalinas de TiO ₂ -H ₂ O (R ³ TiO ₂ -H ₂ O y A ⁴ TiO ₂ -H ₂ O) foram preparadas. Taxa de fluxo fixa de 70 ml / min. A condutividade térmica e a viscosidade do R TiO ₂ -H ₂ O aumentam ao máximo em 3,27% e 4,87%, para o caso do A TiO ₂ -H ₂ O os valores são 2,88% e 7,45%.
(Ho et al., 2019)	Retangular	$258 \leq R_e \leq 1549$	Água	Al ₂ O ₃	22,2 - 47,7	8	Condições de teste: A temperatura de entrada do fluido de trabalho é fixada em 40 ± 0,2 °C e a temperatura da placa superior é 25 °C. A eficiência de transferência de calor média máxima (1,4) na entrada do dissipador de calor de minicanal foi registrada a uma concentração de 8% em peso e $R_e^5=1549$.
(do Nascimento et al., 2019)	Redondo liso e nanoporoso	-	Água	Al ₂ O ₃ y SiO ₂	10-80 (Al ₂ O ₃) 80 (SiO ₂)	0,01 - 0,1	No caso da água deionizada encontrada no tubo antes de cobrir sua superfície com nanopartículas, a análise crítica do fluxo de calor foi comparada com os métodos de previsão para o fluxo crítico de calor de fontes confiáveis na revisão da literatura e um acordo razoável foi estabelecido.
(Sarafraz et al., 2019)	Retangular	250 y 1376	Água	GNP	123 e 424	-	O desempenho térmico do sistema aumentou em 76%, evidenciando o impacto favorável das aplicações de resfriamento e / ou aquecimento de nanofluidos constituídos de GNP ⁶ / água, ainda assim, há um aumento de 20% na potência de bombeamento em Número Reynolds > 1376.
(Naphon et al., 2018)	Cobre JIS H1340	-	Água	TiO ₂	21	0,001 e 0,015	A concentração de nanopartículas de 0,015% no fluido base aumenta muito a transferência de calor por convecção em 18,56%.
(Manay et al., 2018)	-	$50 \leq R_e \leq 750$	Água	TiO ₂	<25	0,25; 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0	Condições de teste: Faixa de fluxo de 0 - 6 L / h, temperatura do fluido de trabalho na entrada do microcanal de 20°C e alturas de canal de 200 µm, 300 µm, 400 µm e 500 µm. A maior taxa de geração de entropia térmica foi encontrada quando a altura dos canais foi aumentada, permitindo um aumento de 30% - 52%. Com a diminuição dos canais, a geração de entropia por fricção aumentou de 66% para 98%.
(Sarafraz et al., 2018)	Retangular	$0 \leq R_e \leq 1500$	Água	Ag	-	0,01; 0,05 e 0,1	Condições de teste: Estudo transiente de 1000 minutos de operação do sistema. Com a concentração de nanopartículas de 0,1%, foi determinado o maior valor de resistência térmica à incrustação (1,07).

(Vinoth & Senthil K, 2017)	Aletas oblíquas (quadrado, semicírculo e trapezoidal)	-	Água	Al ₂ O ₃	40 e 50	0,25	Os resultados mostram que o microcanal com aletas trapezoidais oblíquas teria um impacto maior nas aplicações de resfriamento eletrônico devido à sua transferência de calor.
(Sarafraz et al., 2017)	Retangular paralelo	-	Água	CNT	-	0,05 e 0,1	As diferentes concentrações de nanopartículas nos nanofluidos de CNT ⁷ possibilitaram observar uma melhora de aproximadamente 29% no coeficiente de transferência de calor na água.
(Duangthongsuk & Wongwises, 2017)	Ziguezague	-	Água	SiO ₂	15	0,3; 0,6 e 0,8	Condições de teste: Áreas de transferência de calor 1,176 mm ² e 1,238 mm ² . Fluxo contínuo e fluxo cruzado único. O dissipador de calor em zigue-zague de fluxo cruzado único tem melhor desempenho térmico em comparação ao fluxo contínuo, na faixa de 2 a 6%.
(Arshad & Ali, 2017)	Retangular	-	Água	TiO ₂	5 - 30	15	Condições de operação: Três aquecedores (200 W cada) localizados na parte inferior do dissipador de calor para uma distribuição igual do calor. Os resultados obtidos mostram que o desempenho térmico do nanofluido de TiO ₂ está diretamente relacionado ao poder calorífico.
(Anbumeenakshi & Thansekhar, 2017)	Retangular	$47,5 \leq R_e \leq 77,5$	Água	Al ₂ O ₃	43	0,1 e 0,25	Condições de teste: Os fluxos considerados foram de 9 kg / h, 12 kg / h e 15 kg / h. O fluido deve estar estável, é necessário circulá-lo por uma seção por 45 a 60 minutos e depois permitir que entre no microcanal. A concentração de nanopartículas de 0,25% no nanofluido permite uma temperatura de superfície máxima e uma temperatura de superfície média mais baixa em comparação com a concentração de 0,1%, para aquecimento uniforme e não uniforme.
(S. Zhang et al., 2017)	Retangular	-	Água	GO	500 e 1000	0 – 0,05	A morfologia do depósito de óxido de grafeno foi comparada com os resultados de outras investigações na literatura e características semelhantes do depósito foram confirmadas.
(Naphon & Nakharintr, 2013)	Retangular	$80 \leq R_e \leq 200$	Água	TiO ₂	21	0,4	Condições de operação: Dissipadores de calor com três alturas de canal diferentes (1,0 mm, 1,5 mm e 2,0 mm). Os resultados permitiram estabelecer que as taxas médias de transferência de calor do nanofluido TiO ₂ -H ₂ O são maiores que as do H ₂ O como refrigerante.

¹MWCNT: nanotubo de carbono de paredes múltiplas.

²LPM: litro por minuto.

³R: rutilo.

⁴A: anatasa.

⁵R_e: Reynolds.

⁶GNP: nanoplaqueta de grafeno aquoso.

⁷CNT: nanotubo de carbono.

Tabela 2. Trabalhos numéricos de aplicação de nanofluidos em trocadores de calor microcanais.

Autor	Geometria Microcanal	Reynolds	Fluido Básico	Material de Nanopartículas	Tamanho da Nanopartícula (nm)	Φ (%)	Destques / Resultados
(B. Zhang et al., 2020)	-	1,4; 3,3; 11; 27 e 59	Água	Al ₂ O ₃	13, 30, 60, 100 e 130	1, 3, 5, 7 e 9	Condições de simulação: Diferença de pressão constante para projeto de dissipador de calor de microcanal resfriado. A otimização dos resultados foi afetada pelas propriedades do fluido de trabalho (Al ₂ O ₃ -H ₂ O) que dependem da temperatura.
(Yang & Du, 2020)	Retangular	$0 \leq R_e \leq 100$	Água	Al ₂ O ₃	-	0; 2 e 4	Condições de simulação: Três técnicas para melhorar a transferência de calor. 1ª técnica: injeção do fluido no microcanal; 2ª técnica: investigação do efeito da presença de nanofluido; 3ª técnica: injeção de fluido em um microcanal com presença de nanofluido. As três técnicas consideradas nesta pesquisa permitiram um aumento na transferência de calor, mas por sua vez ocorre um aumento na queda de pressão.
(Shi et al., 2020)	Retangular	$9,7 \leq R_e \leq 2000$	Água	Al ₂ O ₃	40	1	Condições de simulação: temperatura de entrada do nanofluido (303,15 K), pressão de saída (112 kPa) e fluxo de calor constante (200 kW / m ²). Os coeficientes de transferência de calor locais aumentaram devido ao aumento da razão de aspecto e da variável de projeto β^1 , as nanopartículas foram enriquecidas no limite da interface sólido-líquido, razão pela qual essa variação ocorre.
(Mukesh Kumar & Arun Kumar, 2020)	Circulares	$200 \leq R_e \leq 600$	Água	Al ₂ O ₃	20	0,25; 0,5 e 0,75	Condições de simulação: As dimensões do dissipador de calor são diâmetro - 6 mm, largura - 50 mm, comprimento 55 mm e área de transferência de calor - 0,0010362 mm ² . A presença de nanopartículas de Al ₂ O ₃ no H ₂ O reduziu a temperatura da superfície, o consumo de energia e a resistência térmica do chip eletrônico no qual o dissipador de calor é usado.
(Bakhti & Si-Ameur, 2019)	Aletas circulares perfuradas	$100 \leq R_e \leq 400$	Água	TiO ₂ , Al ₂ O ₃ e Cu	-	2; 4; 6; 8 e 10	O dissipador de calor aumenta sua transferência de calor devido à presença de nanopartículas na água, quando o número de Reynolds é aumentado e a concentração de nanopartículas no nanofluido é reduzida, a transferência de calor é intensificada.
(Pourfattah et al., 2019)	-	$25 \leq R_e \leq 100$	Água	CuO	-	2 e 4	Condições de simulação: método multifásico de Euler. No caso de H ₂ O, quando a razão entrada / saída foi aumentada de 0,25 para 4, nos números Re de 25, 50, 75 e 100, a transferência de calor também aumentou 1,36, 1,37, 1,56 e 1,51 vezes.
(Al-Rashed et al., 2019)	-	100, 300, 500 e 700	Água - CMC	CuO	-	0; 0,5;	Condições de simulação: Dissipador de calor de microcanais de aleta compensada. Dimensões do dissipador de calor: altura (0,5 mm), largura (12 mm) e comprimento (12 mm).

						1; 1,5 e 3	Quando as nanopartículas de CuO foram usadas no fluido de trabalho, em vez de apenas ² CMC no fluido de trabalho, a maior relação entre o aumento na transferência de calor e o aumento na queda de pressão foi determinada com 2,29.
(Martínez et al., 2019)	Retangular	$200 \leq R_e \leq 1200$	Água	TiO ₂	<6	1 e 3	O coeficiente de transferência de calor por convecção em relação à água destilada mostra uma melhoria de 19,66% para uma concentração de nanofluido de 3% em peso e um número de Reynolds relativamente baixo (200).
(Alfaryjat et al., 2018)	Hexagonal	$100 \leq R_e \leq 1000$	Água	Al ₂ O ₃ , CuO, SiO ₂ e ZnO	25, 40, 55 e 70	0; 1; 2; 3 e 4	Al ₂ O ₃ -H ₂ O com uma concentração de nanopartículas de 4% e um diâmetro de 25 nm é o nanofluido ideal para dissipadores de calor de microcanais, também pode ser implementado em dispositivos de refrigeração de última geração.
(Abdollahi et al., 2018)	Quadrados com aletas internas longitudinais	-	Água	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , CuO e ZnO	30 e 60	1-2	Quando os quatro nanofluidos foram comparados, a análise permitiu identificar que o SiO ₂ possui a maior taxa de transferência de calor em comparação com os outros nanofluidos.
(Behnampour et al., 2017)	Costelas retangulares, trapezoidais e triangulares	1; 10 e 100	Água	Ag	-	0; 0,02 e 0,04	A nervura retangular causou grande parte das mudanças nas linhas de fluxo e a forma triangular apresenta valores de desempenho térmico muito favoráveis. Costelas trapezoidais requerem altos números de Reynolds quando implementadas.
(Hadi N & Keshavarz M, 2017)	-	$226 < R_e < 1676$	Água	Al ₂ O ₃	-	1 e 2	Condições de simulação: Foi usado o método padrão de volumes finitos. Dimensões do microcanal: altura (800 µm), largura (283 µm) e comprimento (50 mm). O uso de nanopartículas de Al ₂ O ₃ no fluido de trabalho melhorou o desempenho da transferência de calor e diminuiu a eficiência hidrodinâmica do processo.
(Abdollahi et al., 2017)	Retangular	-	Água	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , ZnO e CuO	30, 40 e 60	1; 1,5 e 2	Condições de simulação: Dissipador de microcanal com entrada / saída tipo V. Dimensões do dissipador: altura (0,5 mm), largura (6,2 mm) e comprimento (18 mm). As nanopartículas de SiO ₂ do nanofluido apresentaram a maior taxa de transferência de calor em comparação com as outras nanopartículas.
(Alipour et al., 2017)	Trapezoidal	$10000 \leq R_e \leq 16000$	Água	Ag	-	0; 2 e 4	Condições de simulação: Temperatura de entrada (293 K) e fluxo de calor aplicado nas paredes do microcanal (20.000 W / m ²). O aumento do número de Reynolds e da concentração de nanopartículas de Ag em H ₂ O permitiu um aumento no coeficiente de transferência de calor por convecção do fluido de trabalho.

¹β: coeficiente de velocidad de deslizamiento adimensional.

²CMC: solución de carboximetilcelulosa.

Tabela 3. Trabalho analítico sobre a aplicação de nanofluidos em trocadores de calor microcanais.

Autor	Geometria Microcanal	Reynolds	Fluido Base	Material de Nanopartículas	Tamanho da Nanopartícula (nm)	Φ (%)	Destques / Resultados
(Li et al., 2019)	Cavidades interno / retangular	-	Água	Al ₂ O ₃	36	0,1 - 3	Nas duas configurações de microcanais, a melhora na transferência de calor dos nanofluidos pode ser atribuída ao aumento na concentração de nanopartículas. A sinergia de campo permite justificar a melhora na transferência de calor dos nanofluidos nos microcanais.
(Hosseini et al., 2019)	Horizontal poroso	6,5	Água	Al ₂ O ₃	-	-	Foi determinado que quando o número de Hartman é constante e o número de Reynolds é 6.5, a produção total de entropia atinge valores mínimos, diminuindo quando o campo magnetohidrodinâmico (MHD) é intensificado para o valor ótimo do número de Reynolds (6.5).
(Malvandi et al., 2016b)	Placas paralelas	-	Água	Al ₂ O ₃	20	2 - 10	Condições de modelagem: O modelo nanofluido é proposto por meio do modelo de Buongiorno modificado e heterogêneo. Os efeitos de flutuabilidade dependentes da temperatura não influenciam a transferência de calor; isso foi estabelecido na análise das equações.
(Malvandi et al., 2016a)	Placas paralelas	-	Água	Al ₂ O ₃	1 - 10	2 - 10	Condições de modelagem: O modelo de Buongiorno modificado e heterogêneo é usado. O comportamento de transferência de calor não foi afetado por negligenciar a dependência das propriedades termofísicas com a temperatura.
(Zhao et al., 2016)	Placas paralelas	-	Água	Al ₂ O ₃	-	0 - 8	Condições de modelagem: A linearização de Debye-Huckel é usada para a solução de fluxo analítico. Há uma melhora no desempenho da transferência de calor quando a concentração de nanopartículas é aumentada.
(Ting et al., 2014b)	Retangular	$0 \leq Re \leq 200$	Água	Al ₂ O ₃	40	0 - 4	Condições de modelagem: Temperatura da parede de entrada do canal de 300 K e fluxo de calor uniforme de $1 \times 10^4 \text{ W / m}^2$. Quando o tamanho das nanopartículas é reduzido, o desempenho térmico é melhorado em até 70%.
(Ting et al., 2014a)	Circular	$0 \leq Re \leq 2000$	Água	Al ₂ O ₃	60	0 - 8	Condições de modelagem: Fluxo de calor uniforme de $1 \times 10^5 \text{ W / m}^2$. Nos resultados, foi observada uma intensificação do grau de sinergia entre a velocidade e a temperatura do nanofluido, permitindo uma melhora na transferência de calor por convecção; isso se deve à redução do tamanho da nanopartícula e ao aumento do tamanho do microcanal.
(Mital, 2013)	Retangular	-	Água	Al ₂ O ₃	10	0 - 10	Condições de modelagem: Velocidade de fluxo limitada na faixa de 0.1-10 m/s. O principal benefício desta pesquisa foi o aumento da potência de bombeamento produzida pelas nanopartículas de Al ₂ O ₃ , quando há potência de bombeamento disponível esse benefício torna-se menos importante.
(Ghazvini & Shokouhmand, 2009)	Retangular	-	Água	CuO	-	-	Condições de modelagem: O modelo de aleta e a abordagem de meios porosos são usados. Com as duas abordagens analíticas comuns, há uma proporção de aspecto ideal para minimizar o fator de atrito no número Re.

5 CONCLUSÕES

Foi realizada uma revisão da literatura sobre a aplicação de nanofluidos em trocadores de calor de microcanais levando em consideração os estudos experimentais, numéricos e analíticos. Os trabalhos analíticos são os mais escassos, ou seja, são limitados, o contrário ocorre com os estudos experimentais e numéricos, nessas análises encontra-se um maior número de resultados que permitem estabelecer o impacto desta revisão.

Os materiais nanoparticulados mais utilizados para a produção de nanofluidos nas pesquisas consultadas são o Al_2O_3 e o TiO_2 , pois permitem melhorar a transferência de calor a partir das concentrações estabelecidas nos trocadores de calor microcanais.

6 REFERÊNCIAS

- Abdollahi, A., Mohammed, H. A., Vanaki, S. M., Osia, A., & Golbahar Haghighi, M. R. (2017). Fluid flow and heat transfer of nanofluids in microchannel heat sink with V-type inlet/outlet arrangement. *Alexandria Engineering Journal*, 56(1), 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.09.019>
- Abdollahi, A., Mohammed, H. A., Vanaki, S. M., & Sharma, R. N. (2018). Numerical investigation of fluid flow and heat transfer of nanofluids in microchannel with longitudinal fins. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 3411–3418. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.05.011>
- Al-Rashed, A. A. A., Shahsavari, A., Entezari, S., Moghimi, M. A., Adio, S. A., & Nguyen, T. K. (2019). Numerical investigation of non-Newtonian water-CMC/CuO nanofluid flow in an offset strip-fin microchannel heat sink: Thermal performance and thermodynamic considerations. *Applied Thermal Engineering*, 155, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.009>
- Alfaryjat, A. A., Mohammed, H. A., Adam, N. M., Stanciu, D., & Dobrovicescu, A. (2018). Numerical investigation of heat transfer enhancement using various nanofluids in hexagonal microchannel heat sink. *Thermal Science and Engineering Progress*, 5, 252–262. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.12.003>
- Alipour, H., Karimipour, A., Safaei, M. R., Semiromi, D. T., & Akbari, O. A. (2017). Influence of T-semi attached rib on turbulent flow and heat transfer parameters of a silver-water nanofluid with different volume fractions in a three-dimensional trapezoidal microchannel. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 88, 60–76. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2016.11.021>
- Anbumeenakshi, C., & Thansekhar, M. R. (2017). On the effectiveness of a nanofluid cooled microchannel heat sink under non-uniform heating condition. *Applied Thermal Engineering*, 113, 1437–1443. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.11.144>
- Anoop, K., Sadr, R., Yu, J., Kang, S., Jeon, S., & Banerjee, D. (2012). Experimental study of forced convective heat transfer of nanofluids in a microchannel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(9), 1325–1330. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.07.023>
- Arshad, W., & Ali, H. M. (2017). Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in a straight minichannel heat sink using TiO_2 nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 110, 248–256. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.032>
- Bakhti, F. Z., & Si-Ameur, M. (2019). A comparison of mixed convective heat transfer performance of nanofluids cooled heat sink with circular perforated pin fin. *Applied Thermal Engineering*, 159(April), 113819. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113819>
- Behnampour, A., Akbari, O. A., Safaei, M. R., Ghavami, M., Marzban, A., Sheikh S, G. A., Zarringhalam, M., & Mashayekhi, R. (2017). Analysis of heat transfer and nanofluid fluid flow in microchannels with trapezoidal, rectangular and triangular shaped ribs. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 91, 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2017.04.006>
- Chamkha, A. J., Molana, M., Rahnama, A., & Ghadami, F. (2018). On the nanofluids applications in microchannels: A comprehensive review. *Powder Technology*, 332(2017), 287–322. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.044>
- Colangelo, G., Favale, E., Milanese, M., de Risi, A., & Laforgia, D. (2017). Cooling of electronic devices: Nanofluids contribution. *Applied Thermal Engineering*, 127, 421–435. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.042>
- Diglio, G., Roselli, C., Sasso, M., & Jawali Channabasappa, U. (2018). Borehole heat exchanger with nanofluids as heat carrier. *Geothermics*, 72, 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.11.005>
- Ding, M., Liu, C., & Rao, Z. (2019). Experimental investigation on heat transfer characteristic of TiO_2 -H₂O nanofluid in microchannel for thermal energy storage. *Applied Thermal Engineering*, 160(May), 114024. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114024>
- do Nascimento, F. J., Moreira, T. A., & Ribatski, G. (2019). Flow boiling critical heat flux of DI-water and nanofluids inside smooth and nanoporous round microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 139, 240–253. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.021>
- Duangthongsuk, W., & Wongwises, S. (2017). An experimental investigation on the heat transfer and pressure drop characteristics of nanofluid flowing in microchannel heat sink with multiple zigzag flow channel structures. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 87, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.04.013>
- Gan, Y., Lim, Y. S., & Qiao, L. (2012). Combustion of nanofluid fuels with the addition of boron and iron particles at dilute and dense concentrations. *Combustion and Flame*, 159(4), 1732–1740. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.12.008>

- Ghazvini, M., & Shokouhmand, H. (2009). Investigation of a nanofluid-cooled microchannel heat sink using Fin and porous media approaches. *Energy Conversion and Management*, 50(9), 2373–2380. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2009.05.021>
- Hadi N, H., & Keshavarz M, M. (2017). CFD investigation of local properties of Al₂O₃/water nanofluid in a converging microchannel under imposed pressure difference. *Advanced Powder Technology*, 28(3), 763–774. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.11.024>
- Hatami, M., & Ganji, D. D. (2014). Thermal and flow analysis of microchannel heat sink (MCHS) cooled by Cu-water nanofluid using porous media approach and least square method. *Energy Conversion and Management*, 78, 347–358. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.063>
- Ho, C. J., Chiou, Y. H., Yan, W. M., & Ghalambaz, M. (2019). Transient cooling characteristics of Al₂O₃-water nanofluid flow in a microchannel subject to a sudden-pulsed heat flux. *International Journal of Mechanical Sciences*, 151, 95–105. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.11.017>
- Ho, C. J., Liao, J. C., Li, C. H., Yan, W. M., & Amani, M. (2019). Experimental study of cooling performance of water-based alumina nanofluid in a minichannel heat sink with MEPCM layer embedded in its ceiling. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 103, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.02.001>
- Hosseini, S. R., Ghasemian, M., Sheikholeslami, M., Shafee, A., & Li, Z. (2019). Entropy analysis of nanofluid convection in a heated porous microchannel under MHD field considering solid heat generation. *Powder Technology*, 344, 914–925. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.078>
- Hosseini, S. R., Sheikholeslami, M., Ghasemian, M., & Ganji, D. D. (2018). Nanofluid heat transfer analysis in a microchannel heat sink (MCHS) under the effect of magnetic field by means of KKL model. *Powder Technology*, 324, 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.10.043>
- Hung, T. C., & Yan, W. M. (2012). Enhancement of thermal performance in double-layered microchannel heat sink with nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(11–12), 3225–3238. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.02.057>
- Hung, T. C., Yan, W. M., Wang, X. D., & Chang, C. Y. (2012). Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 2559–2570. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.01.004>
- Ijam, A., & Saidur, R. (2012). Nanofluid as a coolant for electronic devices (cooling of electronic devices). *Applied Thermal Engineering*, 32(1), 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.08.032>
- Karimipour, A., D’Orazio, A., & Shadloo, M. S. (2017). The effects of different nano particles of Al₂O₃ and Ag on the MHD nano fluid flow and heat transfer in a microchannel including slip velocity and temperature jump. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 86, 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2016.10.015>
- Kumar, V., & Sarkar, J. (2020). Experimental hydrothermal behavior of hybrid nanofluid for various particle ratios and comparison with other fluids in minichannel heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 110, 104397. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104397>
- Li, F., Zhu, W., & He, H. (2019). Field synergy analysis on flow and heat transfer characteristics of nanofluid in microchannel with non-uniform cavities configuration. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118617>
- Li, S. N., Zhang, H. N., Li, X. B., Li, Q., Li, F. C., Qian, S., & Joo, S. W. (2017). Numerical study on the heat transfer performance of non-Newtonian fluid flow in a manifold microchannel heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 1213–1225. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.047>
- Malvandi, A., Moshizi, S. A., & Ganji, D. D. (2016a). Effects of temperature-dependent thermophysical properties on nanoparticle migration at mixed convection of nanofluids in vertical microchannels. *Powder Technology*, 303, 7–19. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.08.063>
- Malvandi, A., Moshizi, S. A., & Ganji, D. D. (2016b). Two-component heterogeneous mixed convection of alumina/water nanofluid in microchannels with heat source/sink. *Advanced Powder Technology*, 27(1), 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2015.12.009>
- Manay, E., Akyürek, E. F., & Sahin, B. (2018). Entropy generation of nanofluid flow in a microchannel heat sink. *Results in Physics*, 9(March), 615–624. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.03.013>
- Martínez, V. A., Vasco, D. A., García-Herrera, C. M., & Ortega-Aguilera, R. (2019). Numerical study of TiO₂-based nanofluids flow in microchannel heat sinks: Effect of the Reynolds number and the microchannel height. *Applied Thermal Engineering*, 161(July), 114130. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114130>
- Mital, M. (2013). Semi-analytical investigation of electronics cooling using developing nanofluid flow in rectangular microchannels. *Applied Thermal Engineering*, 52(2), 321–327. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.12.020>
- Mukesh Kumar, P. C., & Arun Kumar, C. M. (2020). Numerical study on heat transfer performance using Al₂O₃/water nanofluids in six circular channel heat sink for electronic chip. *Materials Today: Proceedings*, 21, 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.220>
- Nam, J. S., Lee, P. H., & Lee, S. W. (2011). Experimental characterization of micro-drilling process using nanofluid minimum quantity lubrication. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51, 649–652. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.04.005>
- Naphon, P., & Nakharinr, L. (2013). Heat transfer of nanofluids in the mini-rectangular fin heat sinks. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 40(1), 25–31.

- <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.10.012>
- Naphon, P., Nakharintr, L., & Wiriyaart, S. (2018). Continuous nanofluids jet impingement heat transfer and flow in a micro-channel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *126*, 924–932. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.101>
- PEÑARANDA CHENCHE, L. E. (2020). *LUZ ELENA PEÑARANDA CHENCHE ESTUDO EXPERIMENTAL DOS MÉTODOS ATIVO E PASSIVO PARA ARREFECIMENTO DE PAINÉIS 2020*. UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA.
- Pourfattah, F., Abbasian Arani, A. A., Babaie, M. R., Nguyen, H. M., & Asadi, A. (2019). On the thermal characteristics of a manifold microchannel heat sink subjected to nanofluid using two-phase flow simulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *143*. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118518>
- Rajiv, Kumar, H., & Singh Sokhal, G. (2020). Effect of geometries and nanofluids on heat transfer and pressure drop in microchannels: A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.288>
- Rimbault, B., Nguyen, C. T., & Galanis, N. (2014). Experimental investigation of CuO-water nanofluid flow and heat transfer inside a microchannel heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*, *84*, 275–292. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.05.025>
- Sarafraz, M. M., Nikkhah, V., Nakhjavani, M., & Arya, A. (2017). Fouling formation and thermal performance of aqueous carbon nanotube nanofluid in a heat sink with rectangular parallel microchannel. *Applied Thermal Engineering*, *123*, 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.056>
- Sarafraz, M. M., Nikkhah, V., Nakhjavani, M., & Arya, A. (2018). Thermal performance of a heat sink microchannel working with biologically produced silver-water nanofluid: Experimental assessment. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *91*(April 2017), 509–519. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.11.007>
- Sarafraz, M. M., Yang, B., Pourmehran, O., Arjomandi, M., & Ghomashchi, R. (2019). Fluid and heat transfer characteristics of aqueous graphene nanoplatelet (GNP) nanofluid in a microchannel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *107*(June), 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.05.004>
- Shi, X. J., Li, S., Agnew, B., & Zheng, Z. H. (2020). Effects of geometrical parameters and Reynolds number on the heat transfer and flow characteristics of rectangular micro-channel using nano-fluid as working fluid. *Thermal Science and Engineering Progress*, *15*. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100456>
- Sui, D., Langåker, V. H., & Yu, Z. (2017). Investigation of Thermophysical Properties of Nanofluids for Application in Geothermal Energy. *Energy Procedia*, *105*(1876), 5055–5060. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1021>
- Ting, T. W., Hung, Y. M., & Guo, N. (2014a). Field-synergy analysis of viscous dissipative nanofluid flow in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *73*, 483–491. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.041>
- Ting, T. W., Hung, Y. M., & Guo, N. (2014b). Viscous dissipative forced convection in thermal non-equilibrium nanofluid-saturated porous media embedded in microchannels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *57*, 309–318. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.08.018>
- Tokit, E. M., Mohammed, H. A., & Yusoff, M. Z. (2012). Thermal performance of optimized interrupted microchannel heat sink (IMCHS) using nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *39*(10), 1595–1604. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.10.013>
- Tripathi, D., & Béq, O. A. (2014). A study on peristaltic flow of nanofluids: Application in drug delivery systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *70*, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.10.044>
- Tuckerman, D. B., & Pease, R. F. W. (1981). High-Performance Heat Sinking for VLSI. *IEEE Electron Device Letters*, *EDL-2*(5), 126–129. <https://doi.org/10.1109/EDL.1981.25367>
- Vinoth, R., & Senthil K, D. (2017). Channel cross section effect on heat transfer performance of oblique finned microchannel heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *87*(August), 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.03.016>
- Wang, X., He, Y., Liu, X., Shi, L., & Zhu, J. (2017). Investigation of photothermal heating enabled by plasmonic nanofluids for direct solar steam generation. *Solar Energy*, *157*, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.015>
- Xu, C., Xu, S., Wei, S., & Chen, P. (2020). Experimental investigation of heat transfer for pulsating flow of GOPs-water nanofluid in a microchannel. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *110*. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104403>
- Yang, L., & Du, K. (2020). Numerical simulation of nanofluid flow and heat transfer in a microchannel: The effect of changing the injection layout arrangement. *International Journal of Mechanical Sciences*, *172*. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105415>
- Yu, J., Kang, S. W., Jeong, R. G., & Banerjee, D. (2016). Experimental validation of numerical predictions for forced convective heat transfer of nanofluids in a microchannel. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *62*, 203–212. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2016.11.001>
- Zamzamin, A., Oskouie, S. N., Doosthoseini, A., Joneidi, A., & Pazouki, M. (2011). Experimental investigation of forced convective heat transfer coefficient in nanofluids of Al₂O₃/EG and CuO/EG in a double pipe and plate heat exchangers under turbulent flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, *35*(3), 495–502. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2010.11.013>

- Zhang, B., Zhu, J., & Gao, L. (2020). Topology optimization design of nanofluid-cooled microchannel heat sink with temperature-dependent fluid properties. *Applied Thermal Engineering*.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115354>
- Zhang, S., Lin, Z., & Cheng, Y. (2017). Optimizing the set generating temperature to improve the designed performance of an ejector cooling system with thermal pumping effect (ECSTPE). *Solar Energy*, 157(June), 309–320.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.027>
- Zhao, G., Jian, Y., & Li, F. (2016). Streaming potential and heat transfer of nanofluids in parallel plate microchannels. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 498, 239–247.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.03.053>

APPLICATION OF NANOFLUIDS IN MICROCHANNEL HEAT EXCHANGERS

Abstract. *The need for cooling in compact devices has allowed nanofluids and microchannels to become a viable alternative to improve the rate of heat transfer, which is why this technology is currently receiving more attention in research. With this argument it is necessary to carry out a bibliographic review of the application of nanofluids in microchannels and microchannel heat sinks. This article presents various works classified according to the type of study (experimental, numerical and analytical). A table is shown in each section where the parameters (microchannel geometry, flow regime, base fluid, nanoparticle material, nanoparticle size, concentration and relevant results) of each work are specified. The results of a large number of researches consulted show an improvement in heat transfer with the use of nanofluids, especially when they are produced with Al₂O₃ and TiO₂ nanoparticles.*

Keywords: Microchannels, Nanofluids, Heat transfer rate, Nanoparticle concentration.