

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE UM DISSIPADOR DE CALOR PARA COMPONENTES ELETRÔNICOS DE  
ALTA POTÊNCIA UTILIZANDO O SOFTWARE OPENFOAM

por

Carla Verônica Zanatta

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenharia Mecânica.

Porto Alegre, novembro de 2018.

ANÁLISE DE UM DISSIPADOR DE CALOR PARA COMPONENTES ELETRÔNICOS DE  
ALTA POTÊNCIA UTILIZANDO O SOFTWARE OPENFOAM

por

Carla Verônica Zanatta

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRA MECÂNICA**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof.<sup>a</sup> Dra. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Comissão de Avaliação:

Prof.<sup>a</sup> Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Prof. Leonardo Brito Kothe

Porto Alegre, 16 de novembro de 2018

ZANATTA, C. V.; **Análise de um Dissipador de Calor para Componentes Eletrônicos de Alta Potência Utilizando o Software OpenFOAM**. 2018. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## RESUMO

Para que o funcionamento de circuitos integrados que compõem componentes eletrônicos de alto poder de processamento seja confiável e seguro, altas taxas de transferência de calor são exigidas para resfriá-los. Diversas linhas de pesquisa buscam soluções para esse problema, sendo uma que merece especial destaque a que é objeto de estudo do presente trabalho: dissipadores de calor em forma de microcanais. Aqui é efetuada uma análise da dissipação de calor em um arranjo de microcanais através de uma simulação numérica usando o método de volumes finitos com o software de código aberto OpenFOAM. Os resultados obtidos são comparados com o experimento pioneiro no estudo de microcanais desenvolvido por Tuckerman e Pease (1981) e uma análise numérica obtida com outro software, o ANSYS Fluent. As análises apresentadas qualificam o OpenFOAM como uma ferramenta adequada para resolver problemas de transferência de calor em componentes eletrônicos: a resistência térmica máxima do modelo obtida é de 0,104 K/W a uma queda de pressão de 288 kPa, resultado que condiz com o valor de 0,090 K/W obtido no experimento de Tuckerman e Pease. Ainda, o comportamento das variáveis ao longo do domínio corresponde ao da simulação equivalente conduzida no ANSYS Fluent.

**PALAVRAS-CHAVE:** Dissipador de calor; Microcanais; chtMultiRegionSimpleFoam; OpenFOAM.

ZANATTA, C. V.; **Analysis of a Heat Sink for High Power Electronic Components using OpenFOAM software**. 2018. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

## **ABSTRACT**

In order for the operation of integrated circuits that make up electronic components of high processing power to be reliable and safe, high rates of heat transfer are required to cool them. Several lines of research look for solutions to this problem, being one that deserves special emphasis the one that is the object of study of the present work: heat sinks in the form of microchannels. Here, an analysis of the heat dissipation in an array of microchannels is carried out through a numerical simulation using the finite volume method with OpenFOAM open source software. The results obtained are compared with the pioneer experiment in the microchannel study developed by Tuckerman and Pease (1981) and a numerical analysis obtained with other software, ANSYS Fluent. The analysis showed that OpenFOAM is a suitable tool to solve problems of heat transfer in electronic components: the maximum thermal resistance of the obtained system is 0,104 K/W at a pressure drop of 288 kpa, a result that is consistent with the value of 0.090 K/W obtained in the experiment from Tuckerman and Pease. Also, the behavior of the variables along the domain corresponds to the equivalent simulation conducted in the ANSYS Fluent.

**KEYWORDS:** Heat sink; Microchannels; chtMultiRegionSimpleFoam; OpenFOAM.

## INDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
3. FORMULAÇÃO FÍSICO-MATEMÁTICA DO PROBLEMA.....	2
3.1. Transferência de calor em chips.....	3
3.2. Transferência de calor em microcanais .....	3
3.3. Método dos Volumes Finitos .....	4
3.3.1. Equações governantes .....	4
3.3.2. Domínio computacional.....	4
3.3.3. Solução via OpenFOAM .....	6
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	7
4.1. Análise de qualidade de malha.....	7
4.2. Verificação do regime de escoamento.....	9
4.3. Avaliação do campo de temperaturas.....	9
4.4. Comparação com o experimento de Tuckerman e Pease .....	10
4.5. Análise do comportamento das variáveis ao longo do domínio.....	12
5. CONCLUSÕES.....	14
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15

## 1. INTRODUÇÃO

Os avanços nas tecnologias de fabricação de circuitos integrados (CIs) possibilitam o aumento da capacidade de processamento desses dispositivos através de uma maior densidade de componentes por chip. Também é uma tendência a miniaturização dos CIs com o objetivo de aumentar a sua gama de atuação. Isso implica um aumento de potência dissipada no chip e uma redução em sua área, ou seja, um aumento na taxa de calor gerado por unidade de volume. Caso um dispositivo eletrônico funcione em uma temperatura acima da estabelecida pelo fabricante, sua segurança de operação estará comprometida e seu tempo de vida será reduzido. Ao longo dos anos, a dissipação de calor vem se tornando um desafio cada vez maior no projeto de equipamentos eletrônicos - em especial, devido à necessidade de dissipadores cada vez mais compactos.

Nesse contexto, os trocadores de calor que utilizam microcanais surgem como uma alternativa para a dissipação de calor em dispositivos eletrônicos. Por apresentarem alta eficiência e serem compactos e confiáveis, eles se tornaram objeto de estudo de diversos pesquisadores desde os anos 1980. Inicialmente, os microcanais foram analisados para aplicação em circuitos com integração em escala muito grande (do inglês, *Very large Scale of Integration* - VLSI), ou seja, densidade de componentes por chip na ordem de  $10^5$ . Atualmente, o desenvolvimento de chips está na giga escala de integração (do inglês, *Giga Scale of Integration* - GSI), o que equivale a uma densidade de componentes de  $10^{10}$ .

Com o aumento significativo do nível de integração e a subsequente maior taxa de calor gerado nos circuitos integrados, novas tecnologias vêm sendo estudadas para melhorar a eficiência térmica em trocadores com microcanais. Métodos computacionais são usualmente adotados para testar sua viabilidade em função da agilidade e flexibilidade que oferecem para a solução de problemas complexos de engenharia. Em geral, eles permitem a avaliação de diversas configurações de dissipadores mais rápido do que o tempo que seria necessário para efetuar as mesmas análises de forma experimental.

Nesse trabalho foi realizada a solução para um problema de transferência de calor em microcanais utilizando o programa em código aberto OpenFOAM através do método de volumes finitos. O objetivo é verificar a capacidade dessa ferramenta para analisar esse tipo de problema, o que se comprova pela proximidade dos resultados da simulação em comparação com uma simulação equivalente utilizando o *software* comercial ANSYS Fluent e em comparação com resultados experimentais extraídos da literatura.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Entre as tecnologias de remoção de calor de dispositivos eletrônicos em desenvolvimento, destaca-se o emprego de mecanismos de convecção forçada através de microcanais, inicialmente introduzido por Tuckerman e Pease (1981). Em seu trabalho pioneiro, eles apresentaram uma dedução analítica da transferência de calor em um dissipador de calor composto por vários canais paralelos de largura microscópica por onde escoam o fluido refrigerante para remover calor de um circuito integrado, sendo esses canais partes integrantes do próprio CI. O artigo por eles desenvolvido apresenta também uma verificação experimental da resistência térmica máxima obtida com essa configuração de canais. A partir dessa análise, algumas considerações foram apontadas como diretrizes para a fabricação e teste de dispositivos com diferentes geometrias:

- O coeficiente de transferência de calor convectivo  $h$  entre o substrato e o refrigerante é o principal obstáculo para atingir baixa resistência térmica (a maior parcela da resistência total do sistema é em função da convecção entre o dissipador e o refrigerante);
- Para escoamento laminar em canais confinados, o coeficiente convectivo é inversamente proporcional à largura do canal (a largura mínima do canal é limitada pela viscosidade do fluido);
- O uso de canais com alta razão de aspecto aumenta a área superficial de contato do sólido com o líquido, reduzindo a resistência térmica condutiva.

Baseado nesses conceitos, diversos autores estudaram o efeito de alterações na geometria dos canais, como o emprego de canais transversais [Soleimanikutanaei, et al, 2018].

Nesse tipo de configuração, os microcanais dividem o escoamento em múltiplas zonas que causam o rompimento da camada limite térmica em desenvolvimento, aumentando o coeficiente convectivo. Outra linha de pesquisa envolve o estudo de substratos porosos entre o meio sólido e líquido [Ghahremannezhad e Vafai, 2018]. Nesse caso, o meio poroso causa mudanças nos parâmetros de recirculação e no campo de temperaturas que também aumentam o coeficiente convectivo médio.

Outros parâmetros também podem ser alterados para aumentar o coeficiente convectivo, como a mudança do meio refrigerante. Nessa área, vale destacar os estudos de transferência de calor em microcanais com nanopartículas sólidas de alta condutividade térmica imersas no fluido de trabalho, o que melhora as propriedades térmicas do fluido como um todo. Nesse ínterim, Gan Jia Gui, et al (2018) propuseram o emprego de materiais ferrofluidicos sob a influência de um campo magnético externo para melhorar a transferência de calor. Ainda sobre o meio refrigerante, destaca-se o estudo de microcanais com fluidos bifásicos. Drummond, et al. (2018) testaram diversos arranjos de canais de entrada e de saída do fluido em um sistema bifásico e obtiveram altas taxas de transferência de calor (da ordem de centenas de  $W/cm^2$ ) com relativamente baixa queda de pressão ao longo dos microcanais.

### 3. FORMULAÇÃO FÍSICO-MATEMÁTICA DO PROBLEMA

O problema resolvido foi modelado a partir do trabalho de Tuckerman e Pease (1981). Em seu experimento, microcanais foram gravados em uma pastilha de silício (substrato) conforme o diagrama da Figura 3.1. Uma tampa de vidro Pyrex® foi anodicamente ligada na face superior do substrato e também sobre um par de coletores gravado nas extremidades dos canais. A face inferior fica em contato com um filme resistor de siliceto de tungstênio ( $WSi_2$ ) que fornece um fluxo de calor que representa o de um circuito integrado. O coletor de entrada admite água deionizada através de um orifício a uma pressão pré-definida. A água passa pelos microcanais atuando como refrigerante e é drenada por outro orifício no coletor de saída. Termopares medem as temperaturas de entrada e saída do fluido e a temperatura do resistor para determinar a resistência térmica do dissipador.

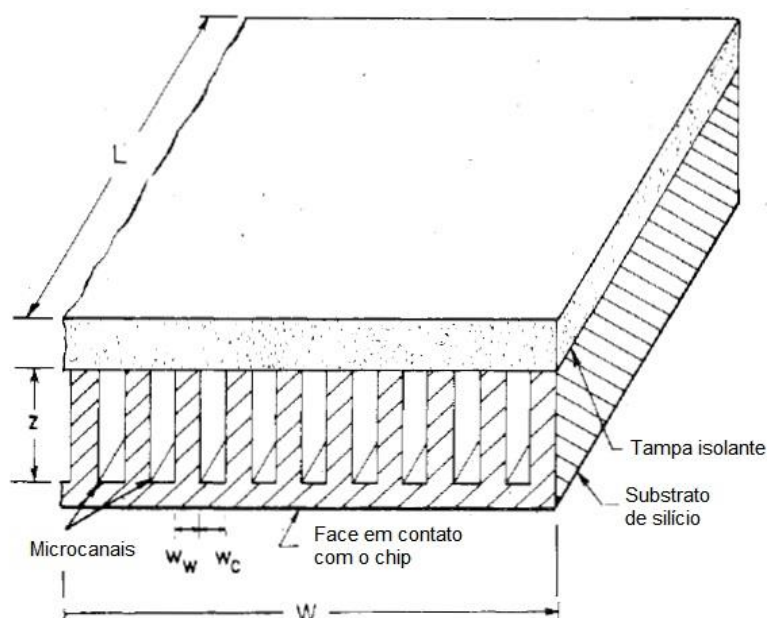


Figura 3.1 – Esquemático de um dissipador de calor com microcanais incorporado em um circuito integrado. [Adaptado de Tuckerman e Pease, 1981]

Para os parâmetros da Tabela 3.1, foi encontrada uma resistência térmica máxima de  $0,090 K/W$  para uma taxa de potência de  $790 W/cm^2$ .  $T_e$ ,  $P$  e  $f$  são, respectivamente, a temperatura e a pressão de entrada da água, e a vazão volumétrica do sistema. O dissipador possui 100 canais, o que permite concluir pela vazão volumétrica total que a velocidade média

no microcanal é de 2,86 m/s. A espessura do filme resistor é 1  $\mu\text{m}$  e sua área é igual a área da face de contato com o dissipador, de 1  $\text{cm}^2$ .

Tabela 3.1 – Parâmetros utilizados no experimento de Tuckerman e Pease

$w_c$ [ $\mu\text{m}$ ]	$w_w$ [ $\mu\text{m}$ ]	$z$ [ $\mu\text{m}$ ]	$L$ [cm]	$W$ [cm]	$T_e$ [K]	$P$ [MPa]	$f$ [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]
50	50	302	1	1	296	0,214	8,6

### 3.1. Transferência de calor em chips

A potência consumida por um chip eletrônico qualquer pode ser definida pela Equação 3.1, em que  $P_e$  é a potência de entrada,  $V$  a tensão e  $I$  a corrente que passam pelo circuito.

$$P_e = VI \quad (3.1)$$

A corrente que passa por um semicondutor invariavelmente gera calor através do efeito joule. Considerando que a única forma de energia saindo de um dispositivo eletrônico é o calor gerado através da passagem de corrente por elementos resistivos no sistema, pode-se afirmar, pela primeira lei da termodinâmica, que o calor gerado é igual à potência consumida nesse sistema. Quando em funcionamento, a temperatura do chip irá aumentar até atingir a estabilidade, ou seja, até a taxa de remoção de calor se igualar a taxa de calor gerado [Cengel, 2007].

A análise de transferência de calor em um dispositivo eletrônico pode ser simplificada considerando uma resistência térmica  $R$  entre a junção e o encapsulamento do chip, em geral determinada pelo fabricante do dispositivo. A diferença de temperatura entre a junção e a superfície externa do encapsulamento é determinada pela Equação 3.2 a partir da resistência térmica e da potência consumida pelo equipamento.

$$P_e = \dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} \quad (3.2)$$

### 3.2. Transferência de calor em microcanais

A adoção de microcanais como dissipadores de calor implica na substituição do encapsulamento tradicional dos chips por uma alternativa em que os canais são gravados diretamente no chip (ou em um dissipador ligado ao chip). O objetivo dessa alteração é reduzir a resistência térmica e, conseqüentemente, aumentar a taxa de calor removido do chip.

Em um dissipador de calor, a resistência térmica é composta por uma componente condutiva, uma componente convectiva e outra componente devido ao aquecimento do fluido ao percorrer o dissipador. A resistência condutiva pode ser diminuída utilizando materiais de alta condutividade térmica, como o silício, e posicionando o dissipador próximo à fonte de calor. A resistência devido ao aquecimento pode ser reduzida com a definição de um fluido com alta capacidade calorífica e através do controle da vazão volumétrica. Sendo assim, a resistência convectiva é dominante em um dissipador de calor de um dispositivo eletrônico.

A transferência de calor por convecção é regida pela Equação 3.3, em que o calor equivale ao produto do coeficiente de transferência de calor por convecção,  $h$ , e a diferença entre as temperaturas – considerando uma distribuição uniforme – do fluido,  $T_f$ , e da parede,  $T_s$ , e a área de troca,  $A$ .

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_f) \quad (3.3)$$

Desse modo, a transferência de calor por convecção pode ser aumentada alterando a geometria do dissipador ou alterando o coeficiente convectivo, que é influenciado por dois parâmetros adimensionais: o número de Prandtl (Equação 3.4), função das propriedades do



fluido, e o número de Reynolds (Equação 3.5), definido pelas características do escoamento. Para definir esses parâmetros são utilizadas as seguintes propriedades do fluido: a viscosidade dinâmica ( $\mu$ ), a massa específica ( $\rho$ ), o calor específico a pressão constante ( $C_p$ ) e a condutividade térmica do fluido ( $k_f$ ).

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k_f} \quad (3.4)$$

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (3.5)$$

O diâmetro característico  $D$  do canal (Equação 3.6) é uma razão entre a área transversal do canal,  $A_t$ , e seu perímetro,  $p$ . O número de Reynolds é utilizado para definir o regime que caracteriza o escoamento – tipicamente, é considerado laminar se  $Re \leq 2100$ . Para esse trabalho foi assumido regime laminar, hipótese que foi verificada e está apresentada nos resultados da simulação.

$$D = \frac{4A_t}{p} \quad (3.6)$$

### 3.3. Método dos Volumes Finitos

O método de volumes finitos (MVF) é um método numérico para resolver problemas de transferência de calor e mecânica dos fluidos. A etapa chave que caracteriza o MVF é a integração das equações de conservação de cada volume de controle tridimensional que compõe a malha discretizada [Versteeg, 2007]. A solução resultante implica a conservação de quantidades como massa, momentum e energia para qualquer grupo isolado de volumes de controle e, conseqüentemente, para o domínio inteiro. O MVF é capaz de resolver não só malhas com volumes de controle em coordenadas ortogonais, como também pode resolver malhas não estruturadas, o que permite seu uso para resolução de problemas com geometrias complexas.

#### 3.3.1. Equações governantes

As equações que governam o problema de transferência de calor são as equações de Navier-Stokes. A análise do escoamento no microcanal é feita sob a hipótese de regime permanente, propriedades constantes, escoamento incompressível e laminar, considerando a água deionizada como um fluido Newtoniano. Para essas condições, as equações de conservação de massa, *momentum* e energia são, respectivamente, as equações 3.7, 3.8 e 3.9.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.7)$$

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (3.8)$$

$$\rho C_p(\vec{V} \cdot \nabla T_f) = k_f \nabla^2 T_f \quad (3.9)$$

Nessa formulação,  $P$  é a pressão,  $V$  é a velocidade do fluido e as demais variáveis foram definidas na Seção 3.2. Para a resolução do acoplamento sólido-líquido é utilizada a equação da difusão do calor, em que  $k_s$  é a condutividade térmica do meio sólido, na forma:

$$k_s(\nabla^2 T_s) = 0 \quad (3.10)$$

#### 3.3.2. Domínio computacional

O dissipador de calor de microcanais de Tuckerman e Pease possuía 100 canais, o que o torna difícil de ser modelado por completo para uma solução computacional. Assim, um domínio

simplificado foi utilizado para reduzir o custo de processamento. Os planos de simetria presentes no problema físico são as fronteiras do domínio escolhido, conforme a simplificação de Hajmohammadi, 2018. A Figura 3.2 apresenta a célula unitária que compõe o domínio computacional. Os planos de simetria são as fronteiras laterais da célula, posicionados equidistantes entre dois microcanais.

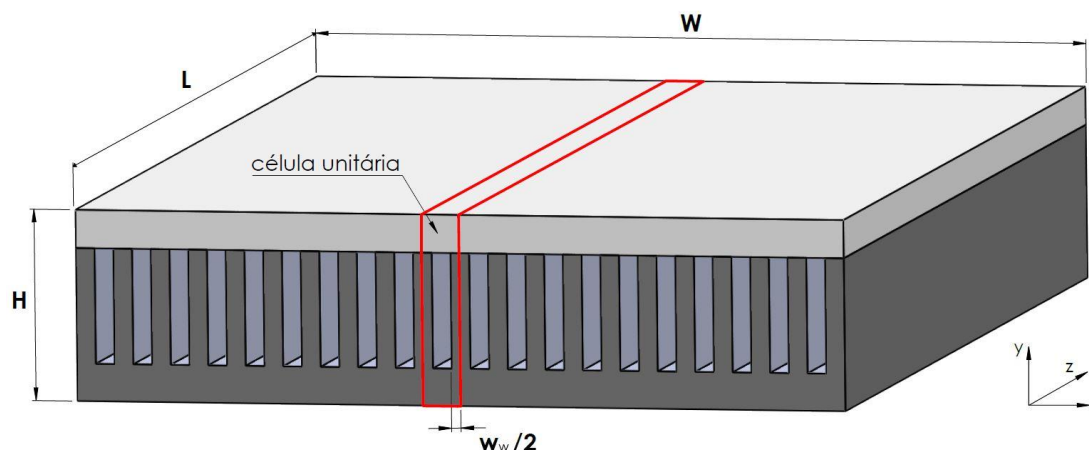


Figura 3.2 - Delimitação da célula unitária em um modelo de arranjo de microcanais. A fronteira do domínio está a uma distância  $Ww/2$  da parede do canal.

O microcanal que compõe a célula unitária está apresentado na Figura 3.3. A transferência de calor em cada célula unitária ocorre através da condução nos meios sólidos (substrato de silício e tampa de vidro) e da convecção no fluido, além da transferência de calor por condução na interface entre a região sólida e a região do fluido. As condições de contorno do problema são o fluxo de calor que representa o CI em funcionamento na face inferior do canal (delimitado em vermelho na Figura 3.3) e a superfície externa do vidro, que é assumida como adiabática (delimitada em azul na mesma figura). As paredes do canal são consideradas planos de simetria, enquanto que a temperatura inicial em todo o domínio (regiões com meios sólidos e fluido) é de 296 K.

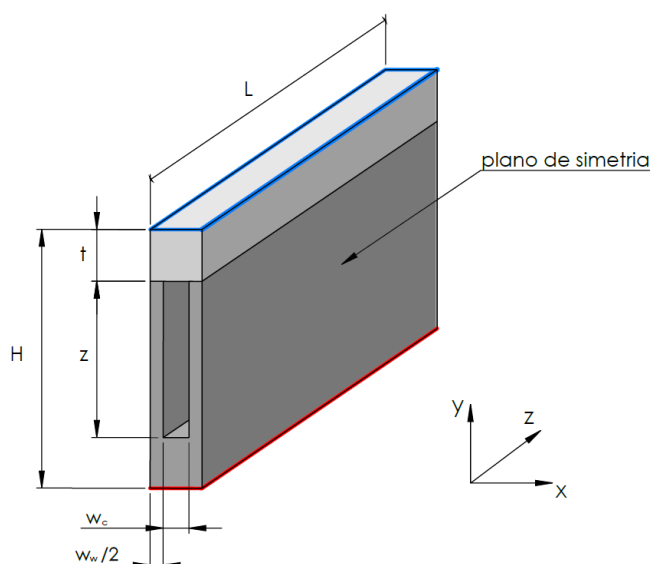


Figura 3.3 – Microcanal com a indicação das dimensões principais e a representação das condições de contorno.

O domínio computacional escolhido também contempla as regiões de entrada e saída do fluido refrigerante. Como elas não são claramente apresentadas no artigo original de Tucerman e Pease, seu comprimento ( $l_e$  para a entrada e  $l_s$  para a saída) foi definido baseado no

trabalho de Reis (2018). O modelo definido está apresentado na Figura 3.4, em que as regiões de entrada e saída estão em verde. A entrada possui velocidade uniforme definida enquanto que a condição de contorno na saída é a pressão atmosférica. As paredes das regiões de entrada e saída são adiabáticas.

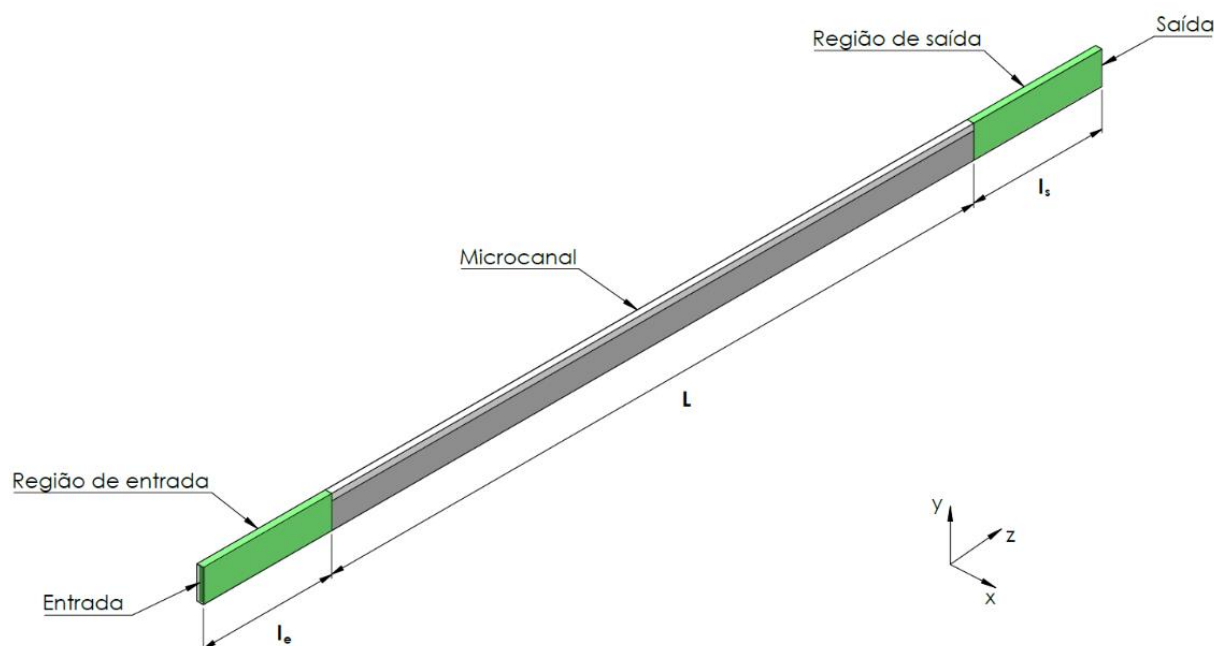


Figura 3.4 - Domínio computacional adotado para a solução do problema.

As propriedades termodinâmicas dos materiais utilizados estão apresentadas na Tabela 3.2. Os valores das regiões sólidas foram retirados de Reis (2018).

Tabela 3.2 – Propriedades termofísicas dos materiais presentes nas regiões do microcanal.

Material	Condutividade térmica [W/m.K]	Calor específico [J/kg.K]	Massa específica [kg/m <sup>3</sup> ]
Água	0,6	4182	998
Silício	150	710	2328
Pyrex	1,14	750	2230

### 3.3.3. Solução via OpenFOAM

Conforme o manual do usuário [OpenFOAM User Guide, 2018], o OpenFOAM (do inglês, *Open-source Field Operation and Manipulation*) é um programa que consiste em um conjunto de bibliotecas em linguagem C++. As aplicações do programa estão divididas em duas categorias: os *solvers*, cada um orientado para a resolução de problema específico de mecânica dos fluidos e transferência de calor; e os utilitários, que executam as tarefas de pré e pós-processamento.

Para resolver um problema no OpenFOAM o usuário escolhe o *solver* apropriado para o tipo de problema que ele quer avaliar e monta um caso com a estrutura representada na Figura 3.5. O diretório “0” recebe as condições de contorno e iniciais do problema, enquanto que o diretório “constant” contém as características do meio, como as propriedades termodinâmicas e do escoamento. Por fim, no diretório “system” são inseridos os textos que irão gerar a malha e resolver o problema. Esse diretório também contém as informações sobre a simulação, como o número de iterações e os critérios de convergência de malha.

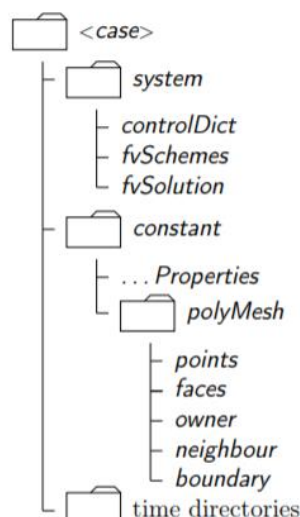


Figura 3.5 – Estrutura de pastas e subpastas que compõe um caso padrão do OpenFOAM.  
Fonte: OpenFOAM User Guide.

Para compor a malha, foram utilizados os utilitários *blockMesh* e *topoSet*. Como todas as regiões do domínio podem ser subdivididas em paralelepípedos (blocos), esses recursos permitem a geração de malha de forma rápida e precisa. Cada região é formada por um conjunto de blocos definido em um sistema de coordenadas ortogonal XYZ. As coordenadas do domínio são definidas no *blockMeshDict* enquanto que as coordenadas de cada região são definidas no *topoSetDict*. O prefixo *-Dict* (do inglês, *Dictionary*) identifica os arquivos de texto executados pelos utilitários. As subdivisões dos elementos da malha são definidas pelo *blockMesh* e podem ser uniformes ou escalonadas, conforme a necessidade de refinamento. Essa parametrização impõe uma malha formada apenas por elementos com faces retangulares, o que faz com que a convergência do resultado seja, em geral, mais rápida do que ela seria em uma malha tetraédrica, por exemplo. Uma vez que a malha estiver pronta, um terceiro utilitário, o *splitMesh*, divide o domínio e separa cada região de acordo com o tipo de material que a compõe.

O *solver* escolhido para resolver o problema proposto é o *chtMultiRegionSimpleFoam*, desenvolvido para executar problemas de transferência de calor conjugados em regime permanente usando o algoritmo SIMPLE. Ele resolve separadamente a transferência de calor em cada uma das regiões sólidas ou fluidas presentes no sistema e realiza o acoplamento entre os meios sólido e fluido através de uma condição de contorno apropriada na fronteira entre eles.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Análise de qualidade de malha

Conforme descrito na seção anterior, a malha foi gerada através da parametrização dos blocos que compõem as regiões do domínio, não sendo necessário importar a geometria de um software CAD. Os problemas de dissipação de calor em componentes eletrônicos podem usualmente ser resolvidos dessa forma, o que é vantajoso do ponto de vista do custo computacional. Três configurações diferentes de malha foram geradas para a realização da análise de convergência, contendo 175.000 elementos a mais grosseira e 700.000 elementos a mais refinada. Um corte da seção transversal da malha mais refinada está apresentado na Figura 4.1, em que a face rosa corresponde à região do silício, a face amarela corresponde à região do *Pyrex* e a face azul corresponde à região do fluido. A simulação com essa malha será o objeto de análise das seções seguintes.

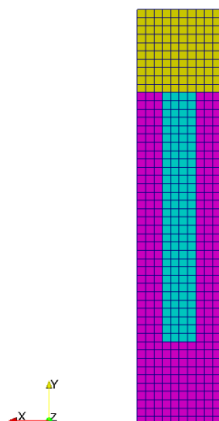


Figura 4.1 – Seção transversal da região sólida e da região fluida da malha de 700.000 elementos.

Verifica-se a independência da malha com relação aos resultados através da simulação das três configurações de malha e da comparação entre os valores de resistência térmica máxima - calculada pela equação 3.2. Os valores obtidos em cada simulação indicam a convergência dos resultados, conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Análise de independência da malha

Malha	Número de elementos	Maior temperatura no canal [°C]	Resistência térmica máxima [K/W]	Erro relativo
1	175.000	379,4	0,1056	
2	350.000	378,9	0,1049	0,66%
3	700.000	378,6	0,1046	0,28%

Ainda, o OpenFOAM possui um utilitário para avaliar a topologia da malha, o *checkMesh*, que avalia parâmetros como a razão de aspecto, as definições das fronteiras, a esbeltez dos elementos e as não ortogonalidades. Ao executar esse arquivo, ele não indicou nenhum erro na geração da malha. No caso avaliado, as não ortogonalidades são iguais a zero, o que é decorrente da malha gerada possuir apenas elementos com faces retangulares.

Com relação à convergência dos resultados, as equações da energia e de momentum apresentaram resíduos inferiores a  $10^{-6}$ , enquanto o resíduo da equação da continuidade é igual a  $10^{-4}$ , como na Figura 4.2.

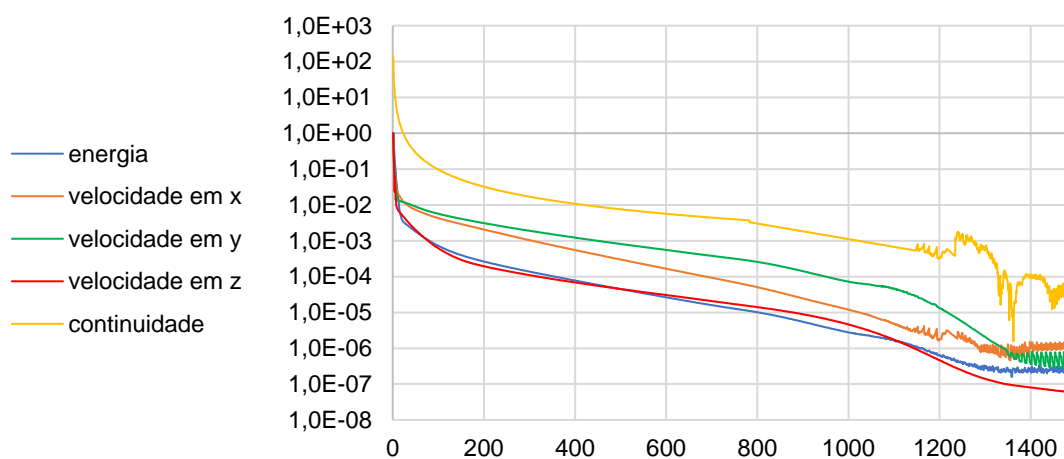


Figura 4.2 – Gráfico de resíduos de continuidade, energia e *momentum* pelo número de iterações.

#### 4.2. Verificação do regime de escoamento

Para a resolução desse problema através do OpenFOAM, a condição de contorno imposta na entrada foi a velocidade do escoamento. O valor da velocidade foi definido para que a pressão fosse próxima à determinada no experimento de Tuckerman e Pease, de  $0,214 \text{ N/mm}^2$ , e é igual a  $0,75 \text{ m/s}$ . O valor máximo de pressão na região de entrada é de  $0,230 \text{ N/mm}^2$  e a queda de pressão no sistema é de  $0,288 \text{ N/mm}^2$ .

O campo de pressão resultante dessa configuração está apresentado na Figura 4.3. Ocorre uma queda de pressão uniforme ao longo do canal devido ao atrito do fluido com as paredes do sólido. Todas as imagens que representam os resultados foram obtidas a partir do aplicativo de pós-processamento do OpenFOAM, o *paraView*.

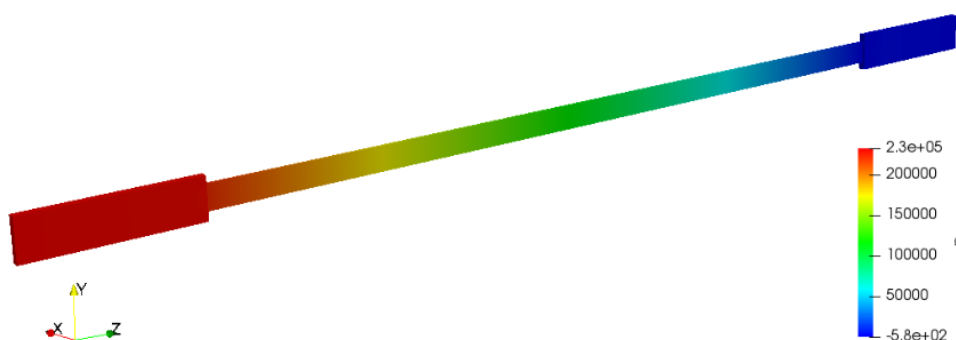


Figura 4.3 – Variação de pressão (em Pa) ao longo do microcanal, considerando as regiões de entrada e saída.

O campo de velocidade resultante está apresentado na Figura 4.4. Com essas condições, a velocidade máxima no interior do canal é de  $4,5 \text{ m/s}$ . Assim, o número de Reynolds obtido a partir das Equações 3.5 e 3.6 é igual a 702. Portanto, a hipótese de escoamento em regime laminar proposta na formulação do problema é confirmada e a aplicação do *solver chtMultiRegionSimpleFoam* se justifica.

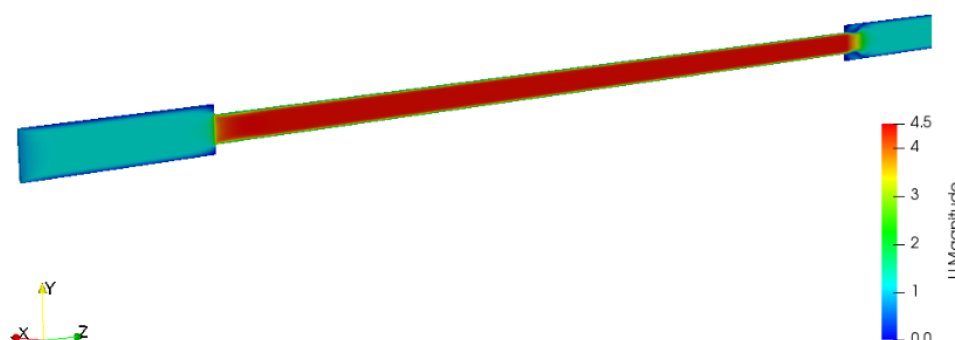


Figura 4.4 – Campo de velocidade (em m/s) nas regiões de entrada e saída e no interior do microcanal.

#### 4.3. Avaliação do campo de temperaturas

O campo de temperaturas da região sólida está na Figura 4.5. O comportamento apresentado é conforme o esperado: a temperatura na entrada é mais baixa devido a entrada do fluido, enquanto que ao longo do canal ela aumenta conforme o fluido troca calor com a região sólida que possui um fluxo de calor entrando na base do canal.

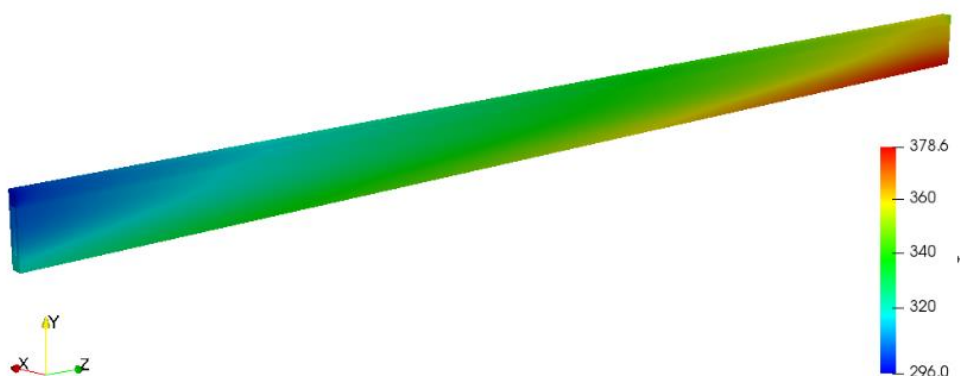


Figura 4.5 – Campo de temperatura (em K) no domínio sólido.

De mesmo modo, o campo de temperatura na região do fluido está apresentado na Figura 4.6. As temperaturas nas fronteiras são iguais às temperaturas nas respectivas fronteiras no domínio sólido, o que indica que a condição de contorno para a interface entre os dois meios foi aplicada corretamente. A variação da temperatura ao longo do eixo Y indica que a camada limite de temperatura ainda está em desenvolvimento.

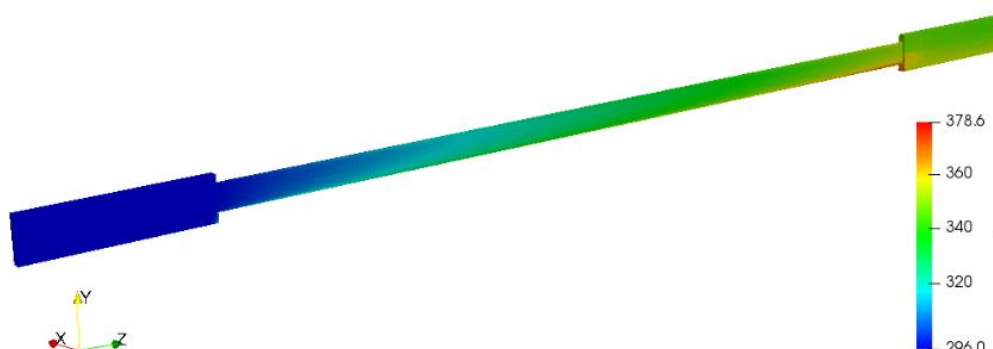


Figura 4.6 – Campo de temperatura (em K) nas regiões de entrada e saída e no interior do domínio do fluido.

#### 4.4. Comparação com o experimento de Tuckerman e Pease

Para validar a resolução desenvolvida numericamente foi utilizada a comparação entre a resistência térmica máxima obtida com àquela obtida experimentalmente por Tuckerman e Pease, conforme a Tabela 4.2. A proximidade entre os valores mostra que a ferramenta escolhida é adequada para resolver esse problema e o resultado da simulação condiz com o resultado experimental.

Tabela 4.2 – Comparação entre o resultado numérico do *chtMultiRegionSimpleFoam* e o experimento de Tuckerman e Pease.

	Resultado numérico [K/W]	Resultado experimental [K/W]
Resistência térmica	0,104	0,090

Contudo, essa avaliação considera apenas um ponto (aquele em que ocorre a maior resistência térmica), o que não permite afirmar que a resolução pelo OpenFOAM traduz a realidade física do problema baseado apenas nessa análise. Sendo assim, uma segunda análise

numérica foi realizada com o objetivo de avaliar globalmente os resultados da simulação e está apresentada na Seção 4.5. Um campo de temperaturas com a resistência térmica máxima ainda mais próxima desse resultado experimental, de 0,089 K/W, é alcançado aumentando a velocidade de entrada do fluido refrigerante para 1 m/s, o que gera um maior gradiente de pressão ao longo do canal. Os resultados de temperatura do domínio sólido e velocidade e pressão do domínio fluido podem ser observados nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9. Essa simulação foi adotada para a comparação com o ANSYS Fluent.

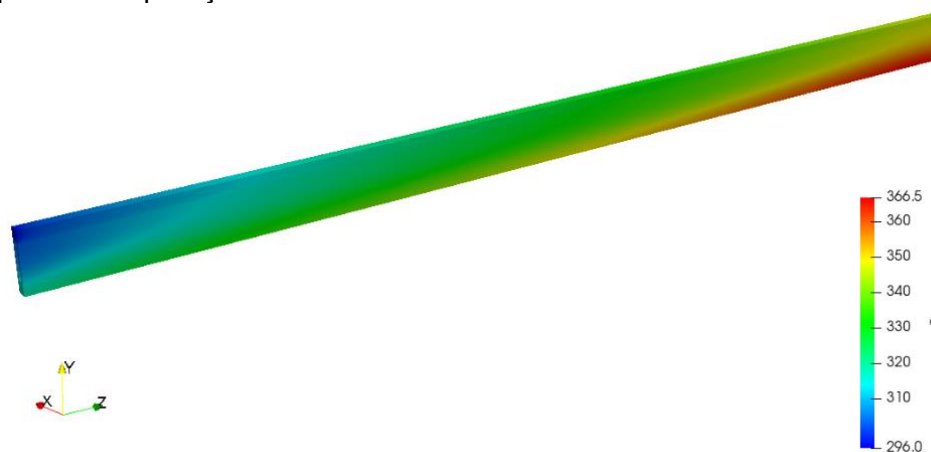


Figura 4.7 – Campo de temperatura (em K) no domínio sólido.

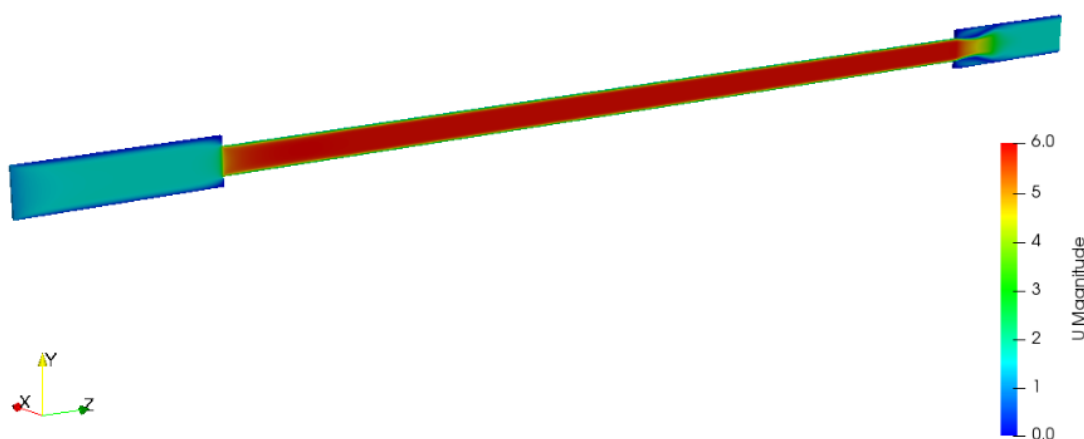


Figura 4.8 – Campo de velocidade (em m/s) nas regiões de entrada e saída e no interior do microcanal.

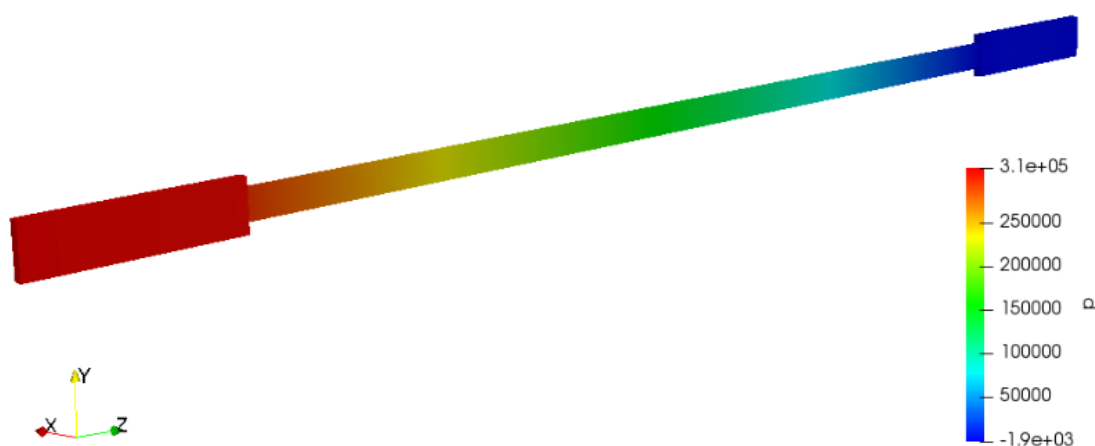


Figura 4.9 – Variação de pressão (em Pa) ao longo do microcanal, considerando as regiões de entrada e saída.



#### 4.5. Análise do comportamento das variáveis ao longo do domínio

Com o objetivo de analisar a capacidade do OpenFOAM para resolver problemas de transferência de calor conjugada em regime permanente e escoamento laminar, convém comparar os resultados obtidos com os resultados de outro software já consolidado no mercado de simulação pelo Método de Volumes Finitos: o ANSYS Fluent. Essa comparação é complementar àquela apresentada na seção anterior. Assim sendo, uma solução com os mesmos parâmetros e em uma malha de 486.678 elementos foi realizada utilizando o Fluent para a análise qualitativa e comparação com os resultados obtidos pelo *chtMultiRegionSimpleFoam*. Os campos de temperatura, velocidade e pressão resultantes estão apresentados nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12, respectivamente.

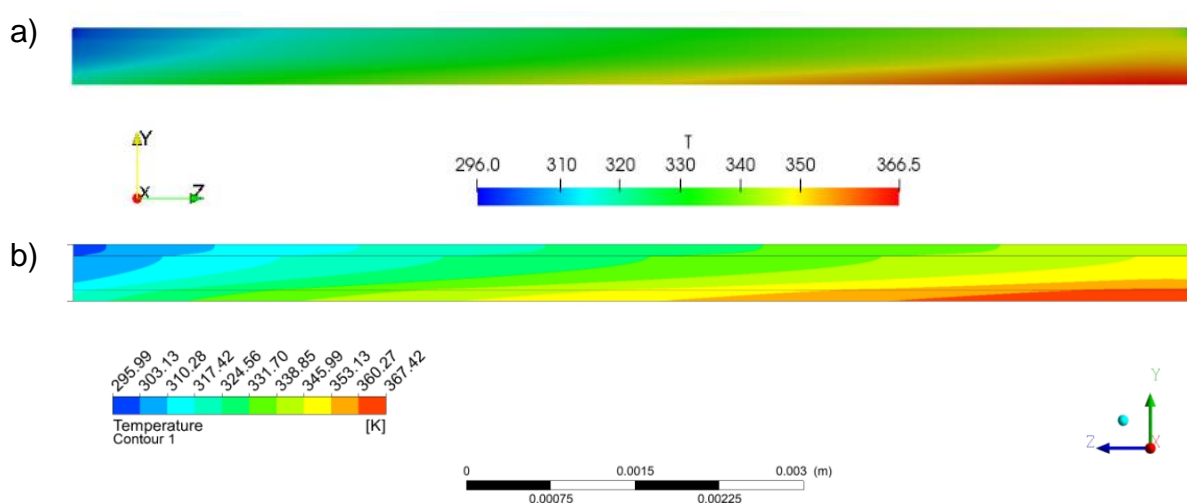


Figura 4.10 – Campo de temperatura (em K) no domínio sólido obtido com a) *chtMultiRegionSimpleFoam* e com b) Fluent.

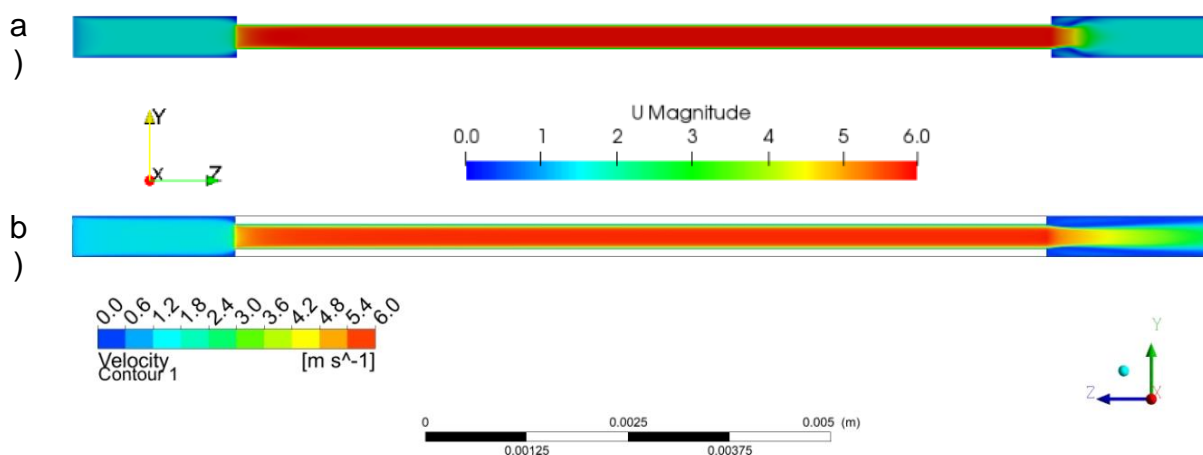


Figura 4.11 – Campo de velocidade (em m/s) obtido com a) *chtMultiRegionSimpleFoam* e com b) Fluent.

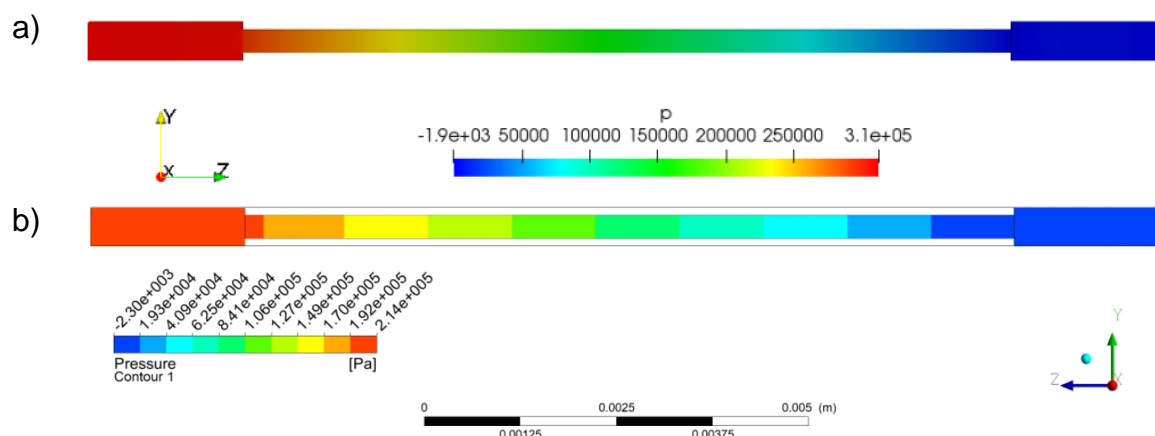


Figura 4.12 – Campo de pressão (em Pa) obtido com a)chtMultiRegionSimpleFoam e com b)Fluent.

A temperatura máxima obtida pela resolução utilizando o Fluent foi de 367,4 K, o que equivale a uma resistência térmica de 0,090 K/W. A convergência nesse caso também foi de  $10^{-6}$  para as equações de energia e momentum e de  $10^{-4}$  para a equação de continuidade. Esse resultado foi atingido com 700 iterações, conforme a Figura 4.13.

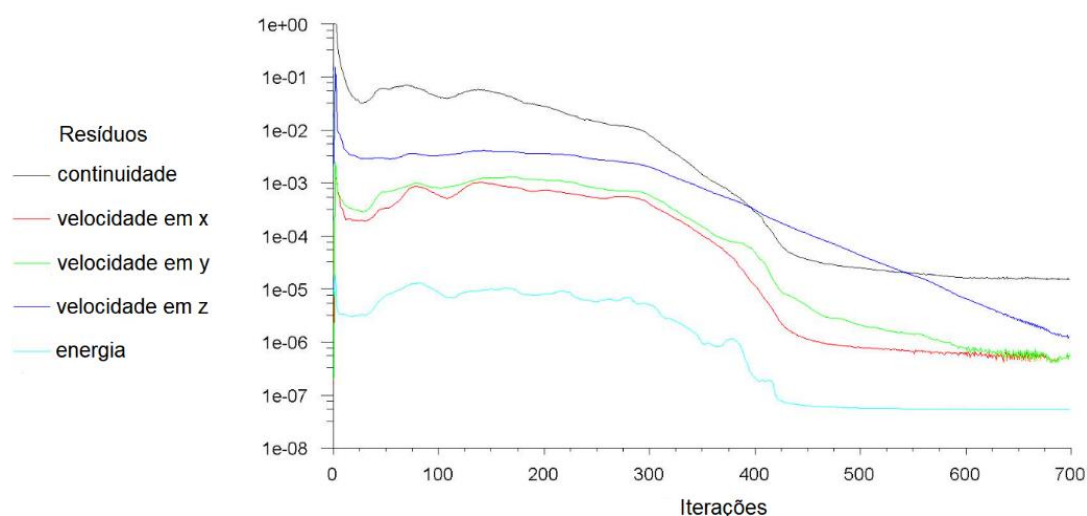


Figura 4.13 - Resíduos obtidos pela simulação no ANSYS Fluent.

O mesmo método iterativo (Gauss-Seidel com discretização de segunda ordem *upwind*) foi usado em ambos os casos. Os parâmetros de sobre-relaxação também foram os mesmos, conforme a Tabela 4.3. Ainda assim, percebe-se diferença nos resultados numéricos apresentados e no comportamento dos resíduos em função das iterações que determinam a convergência da solução. Parte dessa divergência pode ser atribuída aos esquemas de solução para os campos de temperatura, pressão e velocidade definidos no OpenFOAM (no Fluent esses parâmetros não foram definidos pois o software permite que isso seja feito de forma automática). Para melhor entender as diferenças de solução entre os dois *softwares* é necessária uma análise aprofundada sobre as diferenças entre cada um desses esquemas e como o algoritmo do Fluent escolhe qual esquema utilizar a partir das condições de contorno estabelecidas pelo usuário, o que foge do escopo deste trabalho.

Tabela 4.3 – Parâmetros de sobre-relaxação utilizados nas simulações.

Parâmetro	Meio de referência	Valor
Coefficiente convectivo - h	sólido	1,0
Coefficiente convectivo - h	fluido	1,0
Pressão - p	fluido	0,7
Velocidade - U	fluido	0,3

É possível utilizar as semelhanças apresentadas entre os comportamentos das soluções para afirmar que o *chtMultiRegionFoam* é um *solver* adequado para analisar problemas de dissipação de calor em componentes eletrônicos em regime laminar de acordo com os resultados apresentados na comparação da Figura 4.14. A temperatura varia ao longo do eixo Y de 367,4 K na base para 338,8 K no topo na simulação pelo Fluent e de 366,5 K na base para 340 K no topo na simulação pelo OpenFOAM. A diferença entre os valores das simulações é inferior a 2 K no mesmo ponto de análise.

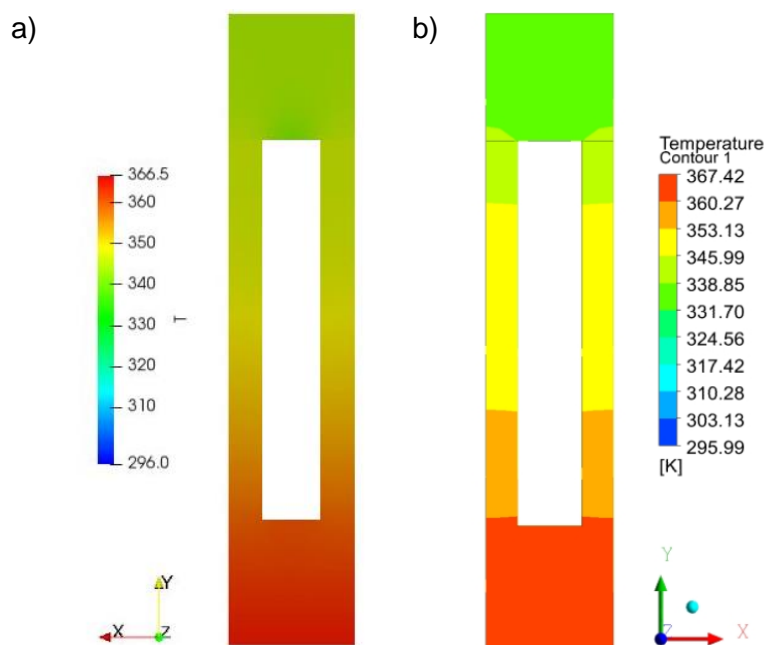


Figura 4.14 – Campo de temperatura (em K) no domínio sólido em uma seção transversal afastada 0,001 m da face traseira do canal obtido com a) *chtMultiRegionSimpleFoam* e com b) *Fluent*.

## 5. CONCLUSÕES

A análise da dissipação de calor para componentes eletrônicos utilizando o OpenFOAM apresentada nesse trabalho permite inferir que essa ferramenta é capaz de resolver esse tipo de problema e pode ser utilizada para o projeto de dissipadores de calor. Um microcanal gravado em uma pastilha de silício que compõe um circuito integrado teve sua geometria modelada para a simulação numérica da transferência de calor entre o canal e um fluido pressurizado passando por ele em regime permanente. Considerando a condução de calor nos meios sólido e líquido e a convecção de calor entre eles, foi adotada uma resolução utilizando o Método dos Volumes Finitos desenvolvida em um software de código aberto cuja programação foi adaptada para atender a esse problema.

Foi obtida uma resistência térmica máxima de 0,104 K/W, o que condiz com o resultado de 0,090 K/W do experimento de Tuckerman e Pease. Esse critério de aceitação dos resultados da simulação leva em conta apenas o ponto no domínio com maior resistência térmica, ou seja, apenas o local com a maior temperatura. Desse modo, não fica claro nessa avaliação se o

resultado global do campo de temperaturas ao longo do canal condiz com o problema real estudado. Para avaliar essa questão foi adotada uma segunda abordagem: a comparação com os resultados de uma simulação similar utilizando o ANSYS Fluent, indicando que também o comportamento das variáveis em todo o domínio está adequado.

Para trabalhos futuros recomenda-se a resolução de outros problemas de transferência de calor através do OpenFOAM, incluindo progressivamente novos fatores para a análise, como a transferência de calor por radiação, desprezada no caso estudado. É indicado também que sejam analisados os esquemas de solução utilizados e os modelos físicos em que eles estão baseados, principalmente no estudo de casos mais complexos, como o escoamento em regime turbulento. Por fim, a comparação com resultados experimentais pode validar a ferramenta e consolidar seu uso no meio industrial.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cengel, Y. A.; "**Heat and Mass Transfer: A Practical Approach**", 3. ed.; University of Nevada, Estados Unidos, 2007.

Drummond, K.P., et al., "A hierarchical manifold microchannel heat sink array for high-heat-flux two-phase cooling of electronics", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 117, p. 319-330, 2018.

Gan Jia Gui , N., Stanley, C., Nguyen, N.-T., Rosengarten, G., "Ferrofluids for heat transfer enhancement under an external magnetic Field", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 123, p. 110-121, 2018.

Ghahremanezhad, A., Vafai, K., "Thermal and hydraulic performance enhancement of microchannel heat sinks utilizing porous substrates", **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 122, p. 1313-1326.

Hajmohammadi, M.R., Alipour, P., Parsa, H., "Microfluidic effects on the heat transfer enhancement and optimal design of microchannels heat sinks" **International Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 126, p. 808-815, 2018.

OpenFOAM User Guide (version 6), The OpenFOAM Foundation, 2018.

Reis, F.G., **Análise numérica de resfriamento de componentes eletrônicos por trocadores de calor com microcanais**, 2018, 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

Soleimanikutanaei, S., Ghasemisahebi, E., Lin C., "Numerical study of heat transfer enhancement using transverse microchannels in a heat sink", **International Journal of Thermal Sciences**, vol. 125, p. 89-100, 2018.

Tuckerman, D. B., and Pease, R. F. W., "High performance Heat Sinking for VLSI", **IEEE Electron Dev. Let.**, **EDL-2**, no. 5, p. 126–129, 1981.

Versteeg, H. K., Malalasekera, W.; "**An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method.**" Harlow, England: 2007.