

ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ENTROPIA EM DISSIPADORES DE CALOR DE ALETAS DE PLACAS PLANAS PARALELAS

Kathrine Vogado Nepunuceno Paixão, kathrine.p9478@ufob.edu.br¹
Mauricio Fernandes de Oliveira Assis, mauricio.a3347@ufob.edu.br¹
André Issao Sato, andre.sato@ufob.edu.br¹

¹ Universidade Federal do Oeste da Bahia, Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa, Av. Manoel Novaes, n. 1064, Bairro Centro.

Resumo. Os dissipadores de calor compostos por aletas são empregados em dispositivos eletrônicos, prolongando sua vida útil ao reduzir a temperatura, sendo que, com o avanço tecnológico, dispositivos menores e mais potentes demandam um estudo detalhado no desenvolvimento dos dissipadores para controlar o calor em sistemas com alta densidade de potência dissipada. Este estudo abordou a análise de dissipadores de calor de aletas em placas planas paralelas, com foco nas características geométricas associadas a esses dispositivos e a geração de entropia resultante do processo de escoamento e troca de calor. Para tanto, foram realizadas simulações utilizando o software OpenFOAM para modelar o escoamento de fluido no canal entre aletas, calcular as distribuições de temperatura e velocidade do mesmo, e analisar a transferência de calor no sistema; além da geração de entropia na geometria estudada. Para o cálculo da geração de entropia, um código em linguagem python foi utilizado para extrair dados dos resultados das simulações e realizar o cálculo considerando o ar como gás ideal. A construção dos modelos e apresentação dos resultados das simulações também foram auxiliadas pela programação em python, visando futuros trabalhos de otimização e busca de independência de malha de forma automatizada. O resultado obtido de temperatura foi comparado com valor da literatura e o mesmo indicam uma variação de 0,023% do valor de validação.

Palavras-chave: Dissipador de Temperatura. Geração de Entropia. OpenFOAM. Simulação Computacional.

Abstract. Heat sinks composed of fins are employed in electronic devices, prolonging their lifespan by reducing temperature. With technological advancements, smaller and more powerful devices require detailed study in the development of heat sinks to control heat in systems with high power density without compromising safety and reliability. This study addressed the analysis of finned heat sinks on parallel flat plates, focusing on the geometric characteristics associated with these devices and the generation of entropy resulting from the flow process and heat exchange. To do so, simulations were conducted using the OpenFOAM software to model fluid flow in the channel between fins, calculate temperature and velocity distributions, and analyze heat transfer in the system, as well as the generation of entropy in the studied geometry. For the calculation of entropy generation, a Python code was used to extract data from the simulation results and perform the calculation considering air as an ideal gas. The construction of models and presentation of simulation results were also assisted by Python programming, aiming for future optimization work and the search for mesh independence in an automated manner. The obtained temperature result was compared with literature values, indicating a variation of 0.023% from the validation value.

Keywords. Computer Simulation. Entropy Generation. Temperature sink. OpenFOAM.

1. INTRODUÇÃO

Dissipadores de calor são dispositivos trocadores de calor constituídos por um conjunto de aletas, essenciais em inúmeros componentes eletroeletrônicos como forma de aumentar a vida útil e melhorar sua eficácia, reduzindo a temperatura do componente e trazendo-o para dentro da faixa ideal de operação. Com os avanços tecnológicos dos últimos anos, equipamentos eletroeletrônicos se tornaram mais rápidos, incorporaram maiores funcionalidades e seus tamanhos foram reduzidos drasticamente, acarretando no aumento da densidade de potência e no fluxo de calor em seus componentes. Para manter a temperatura de operação desses equipamentos em níveis aceitáveis, sem o comprometimento da segurança e confiabilidade, a utilização de dissipadores de calor aletados é essencial (Almeida e Simm, 2022). Dentre os fatores que afetam o desempenho de dissipadores de calor aletados estão a velocidade do ar, material utilizado e a configuração das aletas - geometria, área da seção transversal e proximidade das aletas - além do uso de materiais de interface térmica, importante para redução da resistência térmica de contato entre o dissipador de calor aletado e o componente eletroeletrônico (Alves e Altemani, 2012).

Dissipadores de calor podem apresentar configurações como *Side Inlet Side Exit* (SISE), na qual o fluxo entra e sai pelas laterais e a configuração *top-inlet-side-exit* (TISE), que apresenta uma entrada do fluxo na região superior e a saída nas laterais. (Issa e Ortega, 2002). O modelo estudado neste trabalho foi o TISE, por apresentar uma configuração mais compacta permitindo maiores velocidades de ar nas aletas e dificulta desviar o fluxo, com isso permitindo um melhor resfriamento (Jonsson e Moshfegh, 2001)

A geração de entropia está intrinsecamente ligada às irreversibilidades termodinâmicas, sendo a análise da magnitude da mesma essencial em estudos de processos e sistemas reais. Sendo a minimização um dos objetivos usuais de processos de otimização de equipamentos e componentes na engenharia. (Bejan, 1996).

Este estudo propõe a modelagem computacional de um canal de aletas planas paralelas, com escoamento forçado de ar, para o cálculo de transferência de calor, distribuição de temperatura e geração de entropia. A edição de arquivos e o cálculo da geração de entropia serão realizados por meio de códigos em linguagem python para que trabalhos futuros possam utilizar métodos de otimização na geração de malha e minimização de entropia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram utilizados os seguintes *softwares*:

- OpenFOAM® v2312.
- Paraview® v5.11.0.
- Gnuplot®.

A linguagem de programação python também foi utilizada para a construção de um *script* responsável por alterar os valores geométricos do canal e coletar dados de temperatura, pressão e vazão ao final das simulações.

O computador utilizado para as simulações trata-se de um computador com capacidade de armazenamento de 1216 GB SSD, placa de vídeo integrada Intel Iris Xe e processador Intel i5, 11ª Geração e 24 GB de memória RAM.

Internamente ao *script*, a geração de entropia foi calculada conforme Eq.1, considerando o ar como gás ideal.

$$S_g = \dot{m}(c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(p_2/p_1)) \quad (1)$$

Sendo S_g a geração de entropia em kJ/kgK, \dot{m} a vazão mássica em kg/s, R a constante dos gases para o ar atmosférico em kJ/kgK, C_p sendo o calor específico a pressão constante em J/KgK, T_1 e T_2 tratam-se da temperatura de entrada e saída respectivamente, assim como P_1 e P_2 tratam-se da pressão de entrada e da pressão de saída. As etapas realizadas podem ser observadas na Fig. 1.

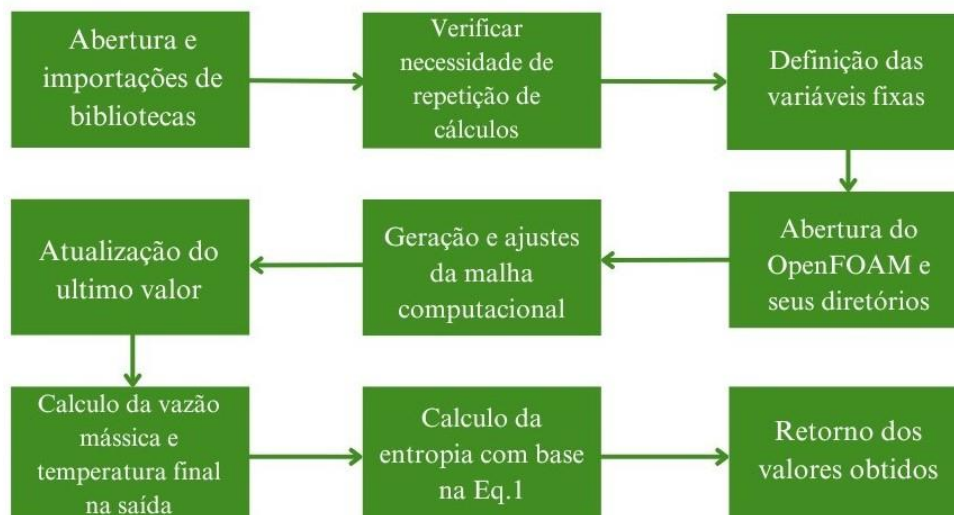


Figura 1. Etapas realizadas durante o pós-processamento (Autores, 2024)

2.1. Modelo computacional

Para o modelo computacional, foi utilizada a geometria proposta em Souza (2005) e abordada por Sato *et al.*, (2020), na qual consiste em um dissipador com aletas de 25 mm de altura, 50 mm de comprimento e 2,5 mm de espaçamento, com uma configuração TISE. Como redução do custo computacional, foi utilizado $\frac{1}{4}$ do canal formando entre duas aletas, assim reduzindo o custo computacional da máquina (Sato *et al.*, 2020). A geometria pode ser observada nas Fig.2ª e 2b.

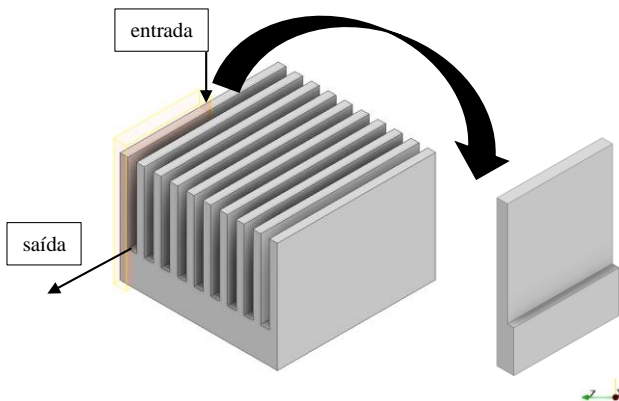


Figura 2a. Geometria e modelo do dissipador utilizada (Autores, 2024)

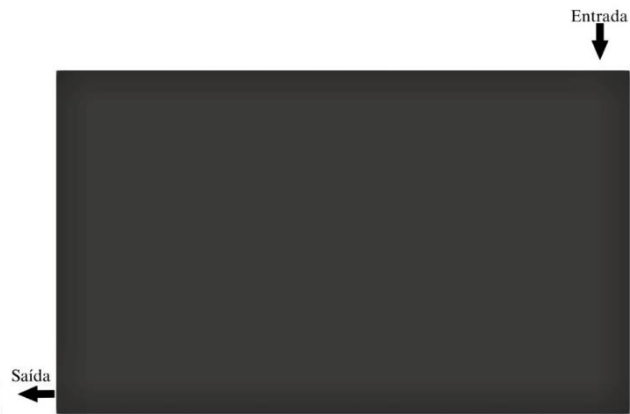


Figura 2b. Geometria utilizada (Autores, 2024)

A malha computacional foi construída com as seguintes características: elementos hexaédricos fazendo o refinamento aumentando o número de elementos na espessura, comprimento e altura, análogo ao realizado por Sato *et al.*, (2020).

As aletas foram modeladas como placas isotérmicas, assumindo uma temperatura superficial uniforme tanto nas superfícies da aleta quanto na base do canal. Adotou-se o fluido de trabalho como ar de gás ideal (Sato *et al.*, 2020). As condições de contorno podem ser observadas na Tab. 1.

Tabela 1. Condições de contorno (Autores, 2024)

Superfície	Pressão (Pa)	Temperatura (K)	Velocidade (m/s)
Entrada	100050	298,15	0,3
Saída	100000	298,15	0,3
Paredes	Gradiente Zero	316,25	Sem Deslizamento

Utilizou-se o solucionador implementado no OpenFOAM®, chamado buoyantSimpleFoam, que permite o cálculo de efeitos de convecção natural e uma abordagem do acoplamento Pressão-Velocidade pelo método SIMPLE. A simulação foi em regime permanente e com um limite máximo de 10000 iterações.

O modelo de turbulência de Sparlart e Allmaras (1994) foi escolhido para a simulação e os parâmetros adotados para o modelo foram os valores padronizados no OpenFOAM®. Além disso, foi definido como critério de convergência dos resíduos de 10^{-6} para pressão absoluta e entalpia, e 10^{-5} para a viscosidade turbulenta. Por fim, construiu-se um gráfico de resíduos em relação ao número de elementos para acompanhar a estabilidade e convergência da simulação por meio do software Gnuplot®.

2.3. Independência de malha e geração de entropia

Na etapa de pós-processamento, foram utilizadas funções específicas do OpenFOAM® para obter o valor da temperatura média e a vazão mássica na região da saída. Esses valores foram utilizados na análise de independência de malha, realizada através da criação de malhas com diferentes números de elementos, conforme metodologias descritas por Dixon *et al.* (2013) e Curi *et al.* (2017).

Com relação ao cálculo da geração de entropia, definiu-se o calor específico a pressão constante (c_p) com valor de 1,005 kJ/kgK, a temperatura na entrada do canal (t_e) de 298,15 K, a pressão na saída (p_s) e entrada (p_e) de 100000 Pa e 100050 Pa, respectivamente, e a constante dos gases (r) de 8,314 kJ/kgK.

Posteriormente, foram determinados os valores de vazão mássica (\dot{m}) e temperatura na saída (t_s) a partir das funções de pós-processamento *volAvgHeaterTemperature* e *surfaceFieldValue*. Estes valores foram, então, utilizados para a estimativa da geração de entropia (sg); para tanto, utilizou-se um script, descrito na Fig. 3, que permitiu a leitura do arquivo de pós-processamento e posterior armazenamento dos valores de interesse nas variáveis anteriores. A geração de entropia foi calculada na penúltima linha de comando do código.

```
# Cálculo da entropia com base nos resultados da simulação
pos = open('log.dat', 'r') # Arquivo de log da simulação
for line in pos2:
    if 'volAverage(region0) of T =' in line:
        line_components1 = line.split(" = ")
        ts = float(line_components1[1]) # Temperatura de saída
    elif 'sum(saida) of phi' in line:
        line_components2 = line.split(" = ")
        mdot = float(line_components2[1]) # Taxa mássica de fluxo
pos.close()

teste = open('TeV.dat', 'w')
teste.write('ts\t' + str(ts) + '\nmdot\t' + str(mdot) +
'\nMultiplicacao\t' + str(ts * mdot))
teste.close()

ts = float(ts)
mdot = float(mdot)
type(ts)
type(mdot)
print(ts)
sg = float(mdot * (cp * log(ts/te) - r * log(ps/pe))) # Cálculo da
entropia

print(sg) # Exibição do resultado da entropia
```

Figura 3. Parte do código Python utilizado (Autores, 2024).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na independência de malha foi avaliado os valores de temperatura média na saída em relação ao número de elementos. Nesse contexto, foram realizadas seis simulações com 129375, 187500, 290625, 453375, 710775 e 1098000 elementos; sendo que o refinamento das malhas ocorreu com uma razão de aumento do número de elementos de 1,2 entre uma malha e outra. Os valores de temperatura média na saída foram calculados e comparados entre as diferentes malhas, conforme expresso na Fig. 4.

Os valores do número de elementos das malhas ao longo de cada eixo, podem ser observados na Tab.2. Os valores apresentados em cada eixo referem-se ao número de células ao longo daquele eixo, assim, subdividindo a geometria de acordo com o valor correspondente.

Tabela 2. Relação de elemento entre malhas e eixos (Autores, 2024)

Nº de elementos	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
129375	15	46	69
187500	20	50	75
290625	25	62	93
453375	31	78	117
710775	39	97	146
1098000	48	122	183

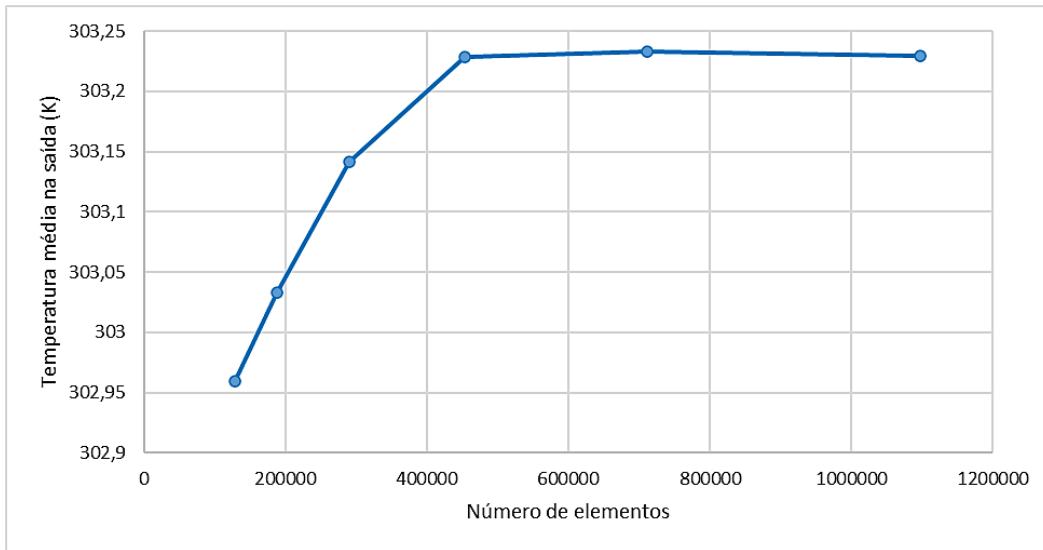


Figura 4. Independência de malha com temperatura média na saída (Autores, 2024)

A malha selecionada foi de 453375 elementos hexaédricos regulares, em que a temperatura média na saída correspondente foi de 303,22 K, apresentando um desvio inferior a 0,5% em relação a malha mais refinada. Além disso, o estudo de Sato *et al.*, (2020) indicou uma temperatura de 303,15 K, apontando um erro relativo de 0,023% em relação ao presente estudo.

Na Fig. 5, a convergência da variável temperatura média na saída ao longo das iterações, observando a tendência de estabilização do seu valor em 303,2 K e a evolução da temperatura média final na região de saída ao longo das iterações. Destaca-se uma oscilação nas primeiras 5000 iterações, seguida por uma fase de transição onde a estabilidade é alcançada. A partir da interação 8000, os valores se tornam praticamente constantes, indicando uma estabilidade na região. A temperatura média final na região de saída obtida foi de 303,2 K.

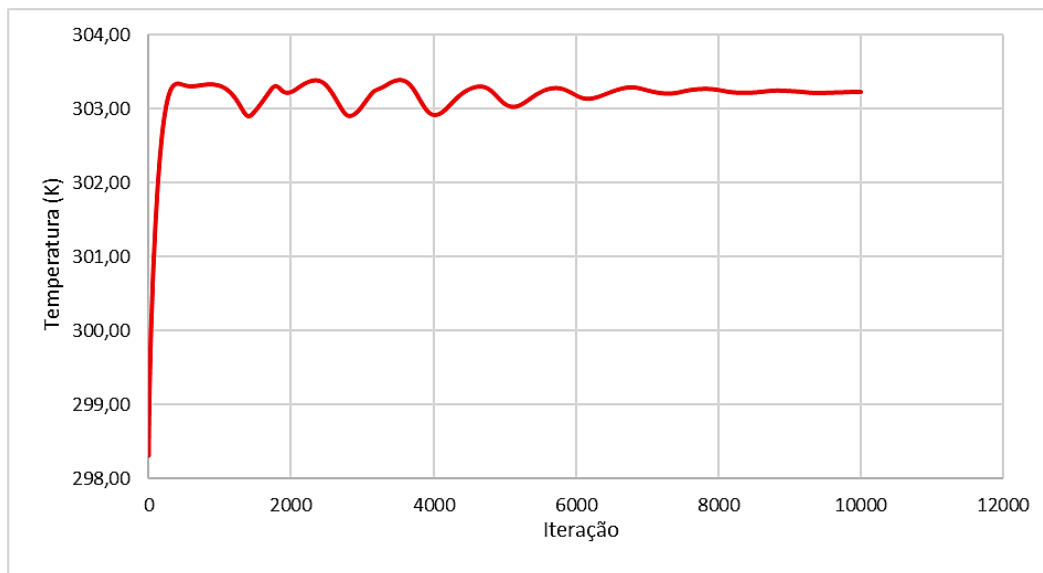


Figura 5. Variação da temperatura na saída (Autores, 2024)

Para a convergência da simulação, foram monitorados os resíduos acumulados a cada iteração do solucionador. Nesse contexto, optou-se por analisar as variáveis ν_{Tilda} (viscosidade turbulenta no modelo de Sparlat e Allmaras), $prgh$ (diferença entre a pressão absoluta e a pressão estática) e h (entalpia do ar). Observa-se na Fig.6 que os valores dos resíduos não atingiram magnitudes inferiores aos estabelecidos como limites para o modelo, contudo os mesmos apresentaram valores inferiores a 2×10^{-5} e com comportamento de estabilização nesta ordem de grandeza.

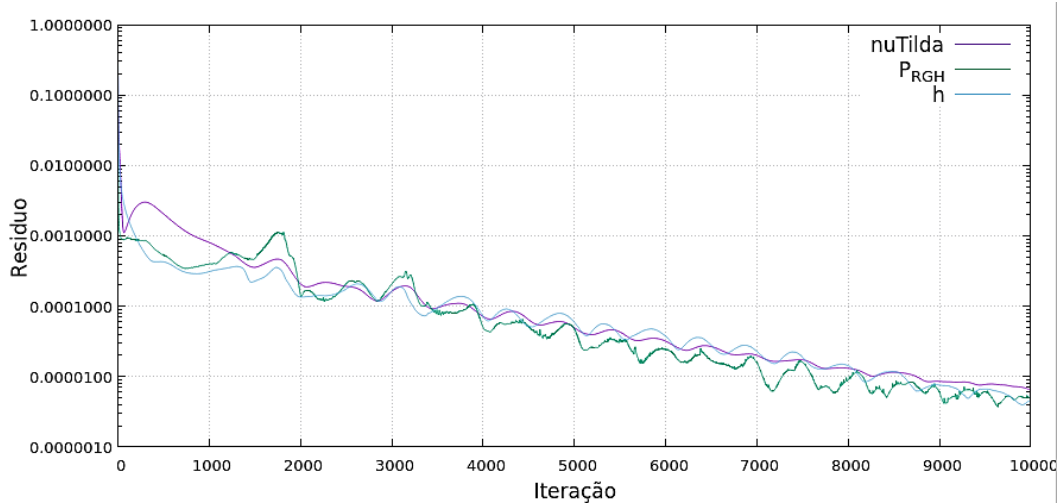


Figura 6. Gráfico dos resíduos acumulados (Autores, 2024)

Em seguida, foi realizada a determinação da geração de entropia conforme descrito na Equação 1 e utilizando o código visto anteriormente na Fig.3. Com isso, observou-se que o resultado obtido foi de $2,524 \times 10^6$ kJ/kgK.

Por fim, para a observação do escoamento e troca de calor, a Fig. 7 apresenta o desenvolvimento do escoamento do ar ao longo do canal isotérmico, e a Fig.8 apresenta o campo de temperatura, ambas no plano ZY centralizado em relação ao eixo Z da geometria, com uma distância de 0.5 mm da parede para o plano observado.

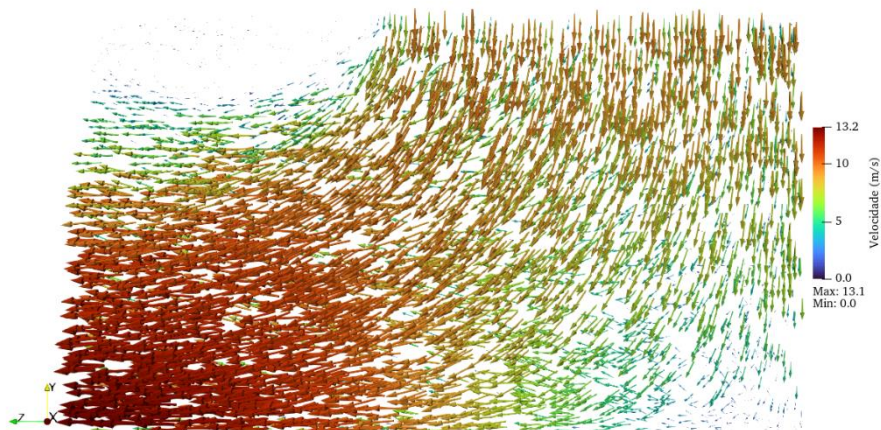


Figura 7. Escoamento no canal (Autores, 2024)

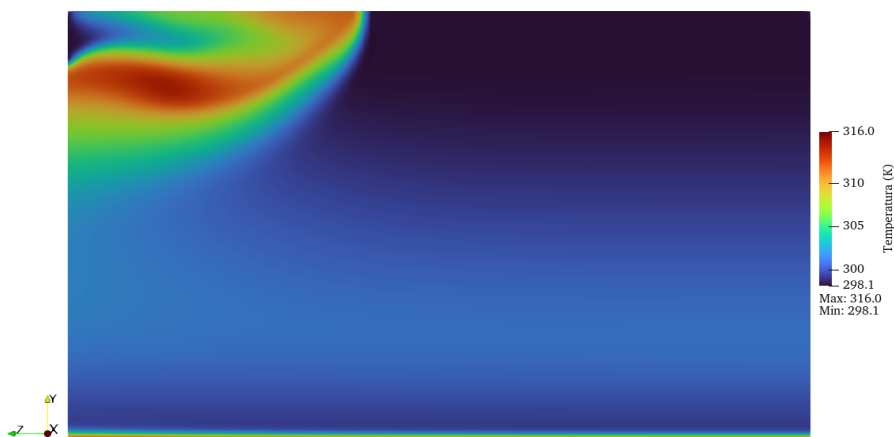


Figura 8. Campo de temperatura (Autores, 2024)

4. CONCLUSÃO

Neste estudo, a análise concentrou-se na simulação de um quarto do canal formado entre aletas numa configuração de entrada vertical e saída horizontal. A geração de entropia por meio de um código em Python obtida foi de $2,524 \times 10^6$ kJ/kgK, considerando uma taxa de transferência de calor de 6.022×10^{-1} W e uma vazão mássica de 1.194×10^{-4} kg/s. Resultados comparativos indicam que o *script* construído apresentou desvio de 0,023% em relação a sua validação, para a temperatura média na saída, e o mesmo, então, permitiria que um método de otimização pudesse ser aplicado juntamente ao OpenFOAM para a minimização da geração de entropia calculada.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Universidade Federal do Oeste da Bahia.

6. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. C. M. de; SIMM, V. S. “Método de otimização de dissipadores de calor aletados utilizando inteligência computacional.” 2022. *Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.*
- ALVES, T A; ALTEMANI, C. A. C. “Um descritor invariante para previsão de temperatura de aquecedores em resfriamento conjugado”. 2012. *Revista Internacional de Ciências Térmicas*, v. 92-101.
- BEJAN, A. “Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes.” 1996. *Journal of Applied Physics*, v. 79, n. 3, p. 1191-1218.
- CURI, T.M.R.C.; Moura, D.J., Massari, J.M., Mesquita, M., Pereira., D.F. “Computational Fluid Dynamics (CFD) application for ventilation studies in broiler houses.” 2017. *Engenharia Agrícola*, 37 (1), 1- 12.
- SOUZA, V. C. “Dissipadores térmicos de placas paralelas com influxo de topo.” 2005. *Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP*
- DIXON, A. G.; NIJEMEISLAND, M.; STITT, E. H. “Systematic mesh development for 3d cfd simulation of fixed beds: Contact points study.” 2013. *Computers & Chemical Engineering*, v. 48(0), p.135-153.
- ISSA, J. S.; ORTEGA, A. “Experimental measurements of the flow and heat transfer of a square jet impinging on an array of square pin fins.” 2006. *ASME*, pp. 179-193.
- JONSSON, H; MOSHFEGH, B. “Modeling of the thermal and hydraulic performance of plate fin, strip fin, and pin fin heat sinks-influence of flow by-pass.” 2001. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* v. 2, pág. 142-149.
- SATO, A. I.; ALTEMANI, C. A. C.; SCALON, V. L “Mean Nusselt number correlation for tise heatsink thermal design.” 2020. *Revista de Engenharia Térmica*, v. 19, n. 1, p. 24-3.
- SPALART, P. R.; ALLMARAS, S. R., "A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows," 1994. *Recherche Aerospaciale*, No. 1, pp. 5-21.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.