



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

JEAN CARLO CORREIA FIRMINO

**ANÁLISE TÉRMICA DE UM COMPUTADOR PESSOAL UTILIZANDO DINÂMICA
DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL.**

FORTALEZA

2018

JEAN CARLO CORREIA FIRMINO

ANÁLISE TÉRMICA DE UM COMPUTADOR PESSOAL UTILIZANDO DINÂMICA
DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Maria Alexsandra de Sousa Rios

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F557a Firmino, Jean Carlo Correia.
Análise térmica de um computador pessoal utilizando dinâmica dos fluidos computacional / Jean Carlo Correia Firmino. – 2018.
60 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2018.
Orientação: Profa. Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios.

1. Eletrônicos. 2. Fluidos. 3. Refrigeração. I. Título.

CDD 620.1

JEAN CARLO CORREIA FIRMINO

ANÁLISE TÉRMICA DE UM COMPUTADOR PESSOAL UTILIZANDO DINÂMICA
DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.

Aprovada em: ___/___/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Maria Alexandra de Sousa Rios (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dr.^a Carla Freitas de Andrade
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Elicivaldo Lima
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Carlos, que tomo e sempre tomei como um modelo de humano a ser seguido.

À minha mãe, Jeane, que sem os conselhos e ombro amigo nos momentos difíceis nada disso seria possível.

Ao meu padrasto, Newton, por estar sempre ao meu lado nos momentos bons e ruins.

À minha Vó, Fátima, pelo carinho que tem por mim desde sempre.

À Prof.^a Dr.^a Maria Alexsandra, pela orientação dada na condução desse trabalho.

Aos colegas que fiz durante o curso, por estarem sempre lado a lado buscando o conhecimento.

À Isabella Evelyn, pelo carinho e atenção dado nos últimos meses.

Aos meus colegas da equipe BAJA, por todos os sábados de trabalho e companheirismo.

Aos amigos que a Universidade me deu, Daniel, Samyo, Leonardo, Mônica, Victor, Rodolfo, Tiago, Ronaldo, Jefferson, Cairo, Kevin, Mateus e tantos outros, pelos momentos de descontração e apoio nessa jornada.

Aos amigos que fiz durante o intercâmbio, Vinicius, João, Marina e Daniela, com quem dividi momentos maravilhosos.

Aos meus amigos Abreu, Pedro Vitor, Alison, Joanna, Laís, Luiz, Lygia, Marinho, Capra, Gabriel, Emmanuel, Yohan e Matheus Queiroz, pelas muitas risadas e conselhos.

Aos professores da banca examinadora, pelo tempo disposto.

RESUMO

Uma análise térmica a nível de sistema de um caso contendo um computador pessoal é conduzida usando dinâmica dos fluidos computacional. Os componentes eletrônicos são modelados como representações de produtos de alta qualidade no mercado, com intuito de simular uma configuração de alta qualidade. O software ANSYS® Fluent V15 foi utilizado para resolver as simulações e fazer o pós processamento dos resultados. Os objetivos do estudo são analisar os efeitos de dissipadores de calor e ventoinhas internas no resfriamento dos componentes, avaliar a relação entre a velocidade do escoamento e temperatura de componente e determinar a eficácia de um esquema de refrigeração por convecção forçada na refrigeração de computadores pessoais de nova geração. Dissipadores e ventoinhas internas melhoraram a refrigeração do sistema, sendo responsáveis quando combinados por uma redução de 50°C na temperatura da CPU.

Palavras-chave: Eletrônicos. Fluidos. Refrigeração.

ABSTRACT

A system level thermal analysis of a personal computer case is conducted using computational fluid dynamics. The electronic components are modeled as representations of high quality marketed products, in order to simulate a high quality configuration. ANSYS® Fluent V15 was used to solve the simulations and post process the results. The objectives of the study are to analyse the heat sink and internal fan effects on temperature cooling, evaluate the relation between the flow's velocity and component temperature and determine the effectiveness of forced convection cooling layouts when cooling new generation's computers. Heat sinks and internal fans improves greatly the system cooling, being combined responsible for a reduction of 50°C in the CPU temperature.

Keywords: Electronics. Fluids. cooling.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Design de refrigeração clássica com uma ventoinha montada no dissipador. Design de refrigeração moderno consistido de duas ventoinhas montadas no dissipador..... | 16 |
| Figura 2 - Desenho 2D da placa mãe ASUS Maximus VIII Ranger retirado do manual de usuário da placa..... | 22 |
| Figura 3 - Modelo 3D do gabinete. Componentes incluídos: CPU, GPU, Chipset, Fonte de alimentação, Memória RAM..... | 25 |
| Figura 4 - Dissipadores de calor do chipset e da CPU, respectivamente..... | 26 |
| Figura 5 - Representação da ventoinha da CPU no topo do dissipador..... | 27 |
| Figura 6 - Residuais x iterações..... | 32 |
| Figura 7 - Primeira malha gerada..... | 34 |
| Figura 8 - Caixa de opções da condição de contorno da ventoinha de entrada de ar..... | 35 |
| Figura 9 - Ventoinhas de entrada e saídas de ar do sistema destacadas em azul e vermelho respectivamente..... | 36 |
| Figura 10 - Contornos de temperatura estática no gabinete..... | 39 |
| Figura 11 - Contornos de temperatura estática na área da placa mãe..... | 40 |
| Figura 12 - Pathlines coloridas por magnitude de velocidade..... | 41 |
| Figura 13 - Visão seccionada da malha do segundo caso..... | 42 |
| Figura 14 - Temperatura estática dos componentes para o caso 2..... | 44 |
| Figura 15 - Temperatura estática do dissipador da CPU..... | 44 |
| Figura 16 - Vetores de velocidade coloridos por magnitude nas paredes do dissipador de calor da CPU..... | 45 |
| Figura 17 - Pathlines de velocidade lançadas da ventoinha da CPU..... | 47 |
| Figura 18 - Temperatura da CPU em diferentes esquemas de refrigeração.... | 48 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----------|---|----|
| Tabela 1 | - Certificação 80 PLUS® bronze..... | 24 |
| Tabela 2 | - Parâmetros geométricos dos dissipadores..... | 26 |
| Tabela 3 | - Propriedades do ar..... | 28 |
| Tabela 4 | - Geração de calor dos componentes eletrônicos..... | 36 |
| Tabela 5 | - Temperatura de superfície da CPU para três malhas diferentes... | 37 |
| Tabela 6 | - Temperatura média dos componentes no caso 1..... | 39 |
| Tabela 7 | - Temperatura média dos componentes e dissipadores no caso 2... | 43 |
| Tabela 8 | - Resultados de temperatura estática média (T) dos componentes e dissipadores para as simulações com alumínio e com materiais diversos..... | 46 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----|------------------------------|
| CPU | Central processing unit |
| GPU | Graphics processing unit |
| DDR | Double data rate |
| RAM | Random access memory |
| CFD | Computational fluid dynamics |
| HPC | High processing computer |
| TDP | Thermal Design power |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 8 |
| 1.2 Objetivo do projeto | 9 |
| 1.3 Objetivos específicos | 9 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 10 |
| 2.1 Refrigeração de eletrônicos..... | 10 |
| 2.2 Transferência de calor por convecção forçada..... | 10 |
| 2.3 Dinâmica dos fluidos computacional | 12 |
| 2.3.1 Pré-processamento | 12 |
| 2.3.2 Execução da simulação | 13 |
| 2.3.3 Pós-processamento | 13 |
| 2.4 Dinâmica dos fluidos computacional aplicada na análise de refrigeração de componentes eletrônicos | 13 |
| 2.5 O uso de convecção forçada para refrigerar eletrônicos | 14 |
| 2.6 Modelagem em CFD de componentes eletrônicos..... | 16 |
| 2.6.1 Modelagem de CPU | 16 |
| 2.6.2 Modelagem de placas PCI e AGP | 17 |
| 2.6.3 Modelagem de placa mãe e memória RAM | 17 |
| 2.6.4 Modelagem de dissipadores de calor | 17 |
| 2.6.5 Modelagem de ventoinhas | 18 |
| 2.7 Modelagem em CFD de sistemas eletrônicos | 19 |
| 3. METODOLOGIA..... | 21 |
| 3.1 Componentes eletrônicos..... | 21 |
| 3.1.1 Unidade central de processamento - CPU | 21 |
| 3.1.2 Placa mãe e Chipset | 22 |
| 3.1.3 Memória RAM | 23 |
| 3.1.4 Unidade de processamento gráfica - GPU..... | 23 |

| | |
|--|----|
| 3.1.1 Gabinete e fonte de alimentação..... | 23 |
| Fonte: Autor..... | 25 |
| 3.2 Dissipadores de calor e ventoinhas..... | 25 |
| 3.4 Materiais..... | 27 |
| 3.3 Condições do ar e propriedades do escoamento | 27 |
| 3.4 Análise em dinâmica dos fluidos computacional | 28 |
| 3.4.1 Equações de governo | 28 |
| 3.4.2 Modelagem de turbulência | 30 |
| 3.4.3 Configurações do solver..... | 31 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 33 |
| 5.1 Caso 1 – Sistema refrigerado por ar sem dissipadores de calor..... | 33 |
| 5.1.1 Malha | 33 |
| 5.1.2 Condições de contorno | 34 |
| 5.1.3 Condições de zona de células..... | 36 |
| 5.1.4 Estudo de independência de malha | 36 |
| 5.1.5 Resultados – Caso 1 | 37 |
| 5.1.6 Relação entre velocidade do escoamento e temperatura dos componentes..... | 40 |
| 5.2 Caso 2 – Sistema resfriado com ar contendo dissipadores de calor | 41 |
| 5.2.1 Caso 2 – Resultados | 42 |
| 5.2.2 Efeito dos dissipadores de calor na temperatura do sistema | 44 |
| 5.3. Caso 3 – Sistema refrigerado por ar com dissipadores e ventoinha interna | 45 |
| 5.3.2 Efeito da ventoinha da CPU na temperatura do sistema..... | 48 |
| 5.4 Precisão do modelo e limitações..... | 48 |
| 6. CONCLUSÃO..... | 50 |
| REFERÊNCIAS..... | 51 |

| | |
|--|----|
| ANEXO A – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS | 55 |
|--|----|

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, o mundo vivenciou um grande aumento na capacidade de processamento da CPU em computadores pessoais. Esse avanço combinado com a miniaturização dos componentes fez com que se aumentasse bastante o fluxo de calor por unidade de área dentro de gabinetes de computadores (1).

Anandkrishnan e Balaji (2009) (2) afirmam que enquanto a dissipação de calor aumenta, o espaço para a solução térmica continua o mesmo ou até diminui de tamanho, esse fato aumenta a importância da eficiência do sistema térmico, assim o engenheiro projetista tem que encontrar novas e criativas formas de trabalhar com o mesmo espaço.

A convecção forçada com ar é uma das soluções mais utilizadas para resfriar sistemas eletrônicos (3), essa solução funcionou bem nos últimos anos. Para componentes com maior poder de processamento, a eficácia da solução deve ser analisada constantemente no processo de design. É necessário certificar se o esquema de resfriamento ainda é capaz de resfriar o sistema, mantendo as temperaturas dos componentes abaixo das máximas especificadas pelos fabricantes quando estão trabalhando em máxima potência. Tatchell et al. (2013) (4) escreveram sobre a importância da ferramenta de CFD em refrigeração de eletrônicos e de seu uso em design térmico nas últimas décadas. Essa ferramenta é muito importante nessa área por permitir aos engenheiros térmicos testarem diferentes esquemas de refrigeração em um curto período de tempo com níveis de precisão aceitáveis.

O objetivo principal desse projeto foi testar a eficácia de esquemas clássicos de refrigeração por convecção forçada quando usados para resfriar computadores pessoais de nova geração. Uma abordagem utilizando dinâmica dos fluidos computacional foi utilizada na análise.

1.2 Objetivo do projeto

Analisar termicamente um computador pessoal de última geração utilizando dinâmica dos fluidos computacional e avaliar se sistemas de refrigeração por convecção forçadas ainda são funcionais em configurações atuais.

1.3 Objetivos específicos

- Analisar como um dissipador térmico conectado à CPU irá afetar a temperatura dos componentes;
- Analisar como um cooler conectado ao dissipador de calor da CPU irá afetar a temperatura dos componentes;
- Entender como a velocidade de escoamento se relaciona com as temperaturas dos componentes;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Refrigeração de eletrônicos

A refrigeração de eletrônicos tem sido um tópico de ampla discussão em design de computadores nas últimas décadas. Na medida em que componentes de computadores evoluem em capacidade de processamento, seus consumos de energia também aumentam, levando a mais calor sendo dissipado por eles (1). Esse aumento de densidade de calor dentro de gabinetes causa uma maior demanda por sistemas de refrigeração mais eficientes (5), fazendo do projeto térmico um procedimento vital para o desenvolvimento de novos computadores. Para assegurar um bom funcionamento e evitar falhas de sistema e danos físicos ao computador, a temperatura dos componentes deve estar abaixo das máximas especificadas pelos fabricantes (6), algo que está em torno de 70°C a 80°C.

Em estudos prévios, nos quais foram analisados computadores do fim dos anos 90, apenas a dissipação de calor e a temperatura da CPU eram focadas, Yu e Webb (2008) (7) apresentaram uma análise a nível de sistema na qual estavam incluídas as dissipações de calor de outros importantes componentes, como as placas PCI (placa de circuito impresso) e GPU (unidade de processamento gráfico), concluindo que esses componentes não devem ser negligenciados no processo de design de sistemas de refrigeração de eletrônicos, pois eles também dissipam uma quantidade considerável de calor, afetando a temperatura final do sistema inteiro. Entre os vários tipos de soluções de refrigeração eletrônica, pode-se destacar o uso da convecção forçada com ar e os sistemas de refrigeração com água.

2.2 Transferência de calor por convecção forçada

Em um escoamento sobre uma superfície, uma camada limite térmica irá se formar se as temperaturas do escoamento e da superfície forem diferentes, resultando em uma transferência de calor entre elas (8). Bergman et al. (8, p.382) definem a taxa total de transferência de calor na superfície como (Equação 1):

$$q = (T_s - T_\infty) \int_{A_s} h dA_s \quad (1)$$

Na qual:

q É o calor transferido (J)

| | |
|-----------------|--|
| T_s, T_∞ | São respectivamente as temperaturas da superfície e do escoamento livre (K) |
| A_s | É a área da superfície (m ²) |
| h | É o coeficiente de transferência de calor por convecção (J/m ² K) |

Para resolver o problema de convecção, além da geometria, variáveis como o coeficiente de transferência de calor por convecção, a densidade do fluido e a sua viscosidade devem ser conhecidas, todos esses parâmetros dependem das condições do escoamento (8). Como a convecção depende fortemente das propriedades do escoamento, é necessário saber se o escoamento é laminar ou turbulento, uma forma de se estimar isso é calculando o número de Reynolds (Re), Pritchard (9, p.39) define Re como (Equação 2):

$$Re = \rho \frac{VL}{\mu} \quad (2)$$

Onde:

| | |
|-------------|---|
| Re | É o número de Reynolds |
| ρ, μ | São respectivamente a densidade e viscosidade do fluido (kg/m ³) (cP) |
| V | É a velocidade característica do escoamento (m/s) |
| L | É o comprimento característico do escoamento (m) |

Desconsiderando as forças de corpo, assumindo geração de energia termina nula e desprezando a difusão de momento e energia térmica ao longo da superfície, sendo essas pequenas quando comparadas as da direção normal, a equação da energia é reduzida a, (8, p.395) (Equação 3):

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{v}{c_p} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad (3)$$

Onde:

| | |
|--|--|
| $\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}$ | São as mudanças de temperatura nas ao longo das direções x e y |
| u, v | São as velocidades do escoamento nas direções x e y |
| $\alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$ | Contabiliza os efeitos da condução na direção y |
| $\frac{v}{c_p} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2$ | É o termo remanescente da dissipação viscosa, desconsiderando o gradiente ao longo da superfície |

Da Equação 3, é possível perceber que o gradiente de temperatura depende da velocidade do escoamento, então a velocidade de entrada da ventoinha

do gabinete é um fator importante quando se usa convecção forçada para refrigerar eletrônicos. A dissipação viscosa é negligenciada no caso da refrigeração de eletrônicos pois é de pequeno valor quando comparada com os efeitos da advecção e condução.

2.3 Dinâmica dos fluidos computacional

Dinâmica dos fluidos computacional é o estudo do escoamento de fluidos por simulações numéricas (10), no qual são usados códigos e softwares para se obter soluções numéricas. CFD é uma poderosa ferramenta quando bem empregada, sendo nos dias de hoje fundamental em algumas áreas da indústria e de desenvolvimento, como nas áreas de engenharia automotiva e aeroespacial. Com CFD um engenheiro pode prever como um sistema irá se portar, e então fazer as mudanças necessárias ainda na fase de design.

Tu et al (2008) (10) declaram que o método computacional de se resolver escoamentos tem ganho importância com o avanço do poder de processamento dos computadores, sendo agora uma boa alternativa para estudar ou projetar sistemas, juntamente com métodos analíticos e experimentais. A análise em CFD é constituída basicamente em três fases: o pré-processamento, a simulação e o pós processamento (10). Para fazer uma boa análise em CFD, o usuário deve ter um bom entendimento da teoria por trás das ferramentas incluídas no pacote do software que está utilizando, e também ter consciência da física envolvida no problema, com esse entendimento será possível a preparação de um modelo confiável do sistema em consideração e a análise correta dos resultados obtidos.

2.3.1 Pré-processamento

No pré-processamento, o modelo geométrico do sistema é criado e o domínio é discretizado em uma malha. Nesse momento o analista deve ter decidido quais suposições vão ser adotadas, quais simplificações vão ser feitas em relação ao sistema real e como isso vai impactar na confiabilidade dos resultados do modelo em CFD.

Uma boa malha é fundamental para o sucesso da análise em CFD, um estudo de independência de malha deve ser conduzido, comparando-se os resultados da simulações para diferentes níveis de refinamento do domínio. Se os resultados não variarem significativamente entre duas malhas distintas, pode se dizer que esses

resultados são independentes de malha. É boa prática ter uma malha suave (sem grandes mudanças de tamanho de elemento) e ortogonal, sendo refinada nas áreas de interesse a serem estudadas e grosseira nas áreas que não significam muito para a análise (11). É necessário procurar equilíbrio entre precisão e custo nos resultados.

2.3.2 Execução da simulação

Após a geração da malha, o software deve ser preparado para realizar a simulação. Esquema de discretização, adição de modelos físicos e de turbulência, critério de convergência e métodos de solução são definidos nessa fase (10).

2.3.3 Pós-processamento

No pós-processamento os resultados das simulações são analisados, os seus significados são avaliados e podem ser apresentados de várias maneiras, tais como gráficos, contornos e animações.

Os softwares comerciais de CFD apresentam várias formas de apresentação dos dados gerados nas simulações, como contornos, vetores e gráficos X-Y, isso ajuda o usuário a analisar mais facilmente o que está acontecendo nas áreas de interesse da análise, e como parâmetros individuais tais como velocidade e posição de ventoinha estão afetando o campo de escoamento e as temperaturas dentro da cabine (10). É necessário usar pensamento crítico ao analisar os resultados, pois contornos “bonitos” e animações não são uma segurança de boa representação e fidelidade ao sistema real, por vezes isso leva o usuário a ter conclusões errôneas sobre a efetividade do sistema térmico. É sempre uma boa prática a validação dos resultados obtidos da análise em CFD utilizando dados experimentais, trabalhos publicados e temperaturas medidas no sistema real.

2.4 Dinâmica dos fluidos computacional aplicada na análise de refrigeração de componentes eletrônicos

O uso de CFD em problemas de refrigeração eletrônica evoluiu de uma maneira distinta quando comparado a outras aplicações práticas, as razões para isso incluem a complexidade das placas de circuito impresso (PCB), a dificuldade em modelar componentes de computadores e a necessidade de um software que pudesse representar os componentes como simplificações confiáveis (4).

O uso de CFD para analisar refrigeração eletrônica foi facilitado com a introdução de servidores de alta capacidade de processamento e computadores pessoais mais poderosos, reduzindo o custo de se realizar as simulações (12). Existem hoje pacotes comerciais de CFD como o ANSYS® Icepak e o FLOTHERM® que tem como foco a refrigeração eletrônica, a existência de ferramentas como essas auxilia o aumento de celeridade do processo de design de novos computadores pessoais por permitir que o analista responsável pelo design térmico modifique vários parâmetros do sistema de resfriamento em um curto período de tempo. Existem análises térmicas em CFD em nível de sistema que foram comparadas com dados experimentais e apresentaram boa precisão nos seus resultados (3), isso é uma indicação de que modelos em CFD podem ser usados para prever temperaturas de componentes no processo de design e para continuar melhorando sistemas de refrigeração. A importância do CFD na refrigeração eletrônica nos dias de hoje é bem representada por um benchmark feito pelo grupo Aberdeen (13), mostrando que o uso de CFD no design de sistemas de refrigeração diminui o tempo do processo de verificação do sistema em um terço do que seria necessário sem a ferramenta.

2.5 O uso de convecção forçada para refrigerar eletrônicos

O uso de convecção forçada, feito soprando ar por ventoinhas montadas no gabinete combinado com montagens de ventoinha mais dissipador de calor nos componentes que mais dissipam calor, ainda é um dos métodos de refrigeração eletrônica mais utilizados nos últimos anos (3). O baixo custo dessa solução, a simplicidade de sua implementação e a grande quantidade de calor que ela consegue dissipar se bem implementada são algumas das razões para sua popularidade no design térmico.

Xu et al. (2014) (6) analisaram usando CFD um gabinete de computador no qual estavam inclusos modelos de uma CPU, placa mãe e memória Ram, o efeito de apenas a convecção natural na refrigeração foi comparada com um esquema utilizando uma ventoinha jogando ar dentro do gabinete, os resultados mostraram que a convecção natural por si só não é suficiente para refrigerar CPU's com médio para alto poder de processamento abaixo das suas temperaturas máximas permitidas, e que o layout utilizando apenas uma ventoinha montada diretamente no dissipador de calor da CPU também não é suficiente.

Anandkrishnan e Balaji, (2009) (2) usaram o pacote CFD ANSYS® Fluent 6.2 para estudar um gabinete com todos os componentes vitais modelados dentro, analisando a convecção forçada para dois processadores reais, um Pentium D com 2.8Ghz de velocidade de processamento e um Pentium dual core com 3.0Ghz de velocidade de processamento, os dois fabricados pela Intel® Corp. Um estudo paramétrico é apresentado, indicando como a temperatura do processador é afetada pela velocidade da ventoinha, temperatura ambiente, área de entrada de ar e dissipação de calor do processador. Dois dissipadores de calor são analisados, e o efeito que eles tem na dissipação de calor do processador também é apresentado.

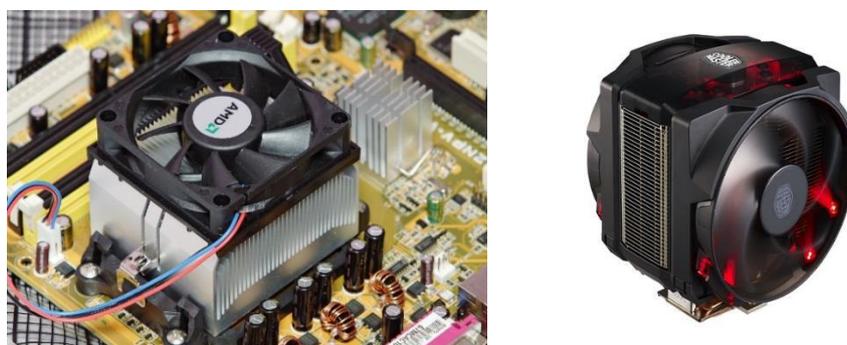
Yu e Webb (2001) (7) usaram a ferramenta de CFD Icepak para modelar um gabinete e identificar uma solução de refrigeração para ele. A análise incluía também placas de circuito impresso (PCI) e placas aceleradoras gráficas (AGP) como emissoras de calor e não só como impedâncias ao escoamento, a quantidade de calor dissipada pelas placas gráficas de nova geração (GPU) é muito grande para ser negligenciada. Um total de 313 Watts tinham que ser dissipados do sistema, onde 80 Watts são provenientes da CPU. É mostrado que o uso de materiais de mudança de fase na interface (pastas térmicas) melhoram a dissipação de calor, diminuindo a resistência térmica na superfície entre o chip da CPU e o dissipador de calor. Também é indicado que o resfriamento das placas PCI e AGP podem ser melhoradas colocando-se saídas de ar no gabinete. É concluído que o esquema utilizando convecção forçada é suficiente para resfriar os componentes até uma temperatura abaixo das máximas especificadas pelos fabricantes.

Ozturk e Tari (2008) (3) fizeram um estudo numérico sobre convecção forçada com ar em CPUs com dissipadores montados, Icepak foi usado para o pré-processamento e o ANSYS® Fluent para resolver as equações e fazer o pós-processamento dos resultados. O esquema de refrigeração consiste em uma ventoinha no gabinete e de montagens de ventoinha/dissipador na CPU e GPU. Três modelos comerciais de dissipadores foram comparados sob as mesmas condições, após o dissipador mais eficiente ser encontrado, um estudo paramétrico foi conduzido em busca de melhorar sua dissipação de calor. Os parâmetros estudados foram o número de aletas, material do dissipador e espessura de base. As simulações foram validadas com dados experimentais, a diferença de temperatura encontrada entre os resultados das simulações e os dados experimentais foram de menos de 10% em

todos os casos estudados, concluindo que a abordagem utilizando CFD era válida nesse caso.

A Figura 1 apresenta uma montagem clássica de dissipador de calor com ventoinha, comumente utilizada para resfriar processadores desde a década de 90. Também apresenta uma evolução de design que é utilizada em computadores de nova geração (14, 15).

Figura 1 - Design de refrigeração clássico com uma ventoinha montada no dissipador [14]. Design de refrigeração moderno consistido de duas ventoinhas montadas no dissipador [15]



Fonte: Wikipedia (A esquerda), website da Coolermaster (a direita).

2.6 Modelagem em CFD de componentes eletrônicos

2.6.1 Modelagem de CPU

Sendo o componente que mais dissipa calor no sistema, a CPU tem que ser modelada com fidelidade e as simplificações devem ser adotadas com muita atenção. Anandakrishnan e Balaji (2009) (2) modelaram a CPU como um bloco sólido atrelado à base do dissipador de calor e que gera uma quantidade constante de calor uniformemente dentro de seu volume, eles fizeram uma simplificação do sistema real ao não incluir o clipe de metal que liga a CPU ao dissipador.

Xu et al (2014) (6) determinaram o tamanho da CPU de gabinetes padrões contendo placa única e modelaram a emissão de calor de maneira similar a Anandakrishnan e Balaji (2009) (2), Ozturk e Tari (2008) (3) também seguiram um procedimento similar. Yu e Webb (2001) (7) modelaram a montagem CPU/dissipador diferentemente, os dois componentes foram modelados como uma única resistência volumétrica no domínio, gerando calor uniformemente em seu volume.

2.6.2 Modelagem de placas PCI e AGP

Alguns autores como Xu et al (2014) (6) e Anandakrishnan e Balaji (2009) (2) analisaram gabinetes sem uma unidade de processamento gráfica independente incluída. Os computadores pessoais modernos geralmente tem que lidar com aplicações envolvendo computação gráfica, nesse sentido a presença de placas AGP e PCI nas novas configurações vem aumentando, sendo indispensável em computadores pessoais de alta qualidade. Yu e Webb (2001) (7) modelaram uma placa AGP e quatro placas PCI em um sistema como planos retangulares sem largura gerando calor uniformemente em um lado do componente. Ozturk e Tari (2007) (16) modelaram o circuito integrado da placa AGP como uma área emitindo uma quantidade constante de calor, atrelado a placa AGP.

2.6.3 Modelagem de placa mãe e memória RAM

A placa mãe é a placa de circuito impresso principal onde todos os outros componentes serão anexados, em algumas análises é modelada apenas com suas características geométricas e sem emissão de calor (2). Em outros estudos como os conduzidos por Ozturk e Tari (2007, 2008) (3,16) e Yu e Webb (2001) (7) a emissão de calor do chipset é incluída, isso é importante pois a dissipação de calor do chipset pode alterar a temperatura de outros componentes quando levado pelo escoamento, incluindo essa dissipação as temperaturas dos componentes serão mais similares a do sistema real. A dissipação de calor das memórias RAM é incluída nos trabalhos de Ozturk e Tari (2007, 2008) (3,16), Yu e Webb (2001) (7) e Xu et al. (2014) (6), uma única placa de memória não emite grandes quantidades de calor, porém esses estudos apresentam montagens de 2 a 4 placas que podem produzir até 20 Watts de calor.

2.6.4 Modelagem de dissipadores de calor

Linton e Agofaner (1995) (17) fizeram uma análise em CFD de um dissipador de calor aletado, onde um modelo grosseiro e outro refinado são comparados com dados empíricos. As características geométricas do dissipador foram modeladas e a diferença do modelo grosseiro e refinado está no número de

células da malha, os resultados obtidos na simulação estão de bom acordo com os obtidos experimentalmente.

Arularasan e Velraj (2008) (1) usaram CFD para investigar o design ótimo de um dissipador de calor aletado de forma a dissipar a máxima quantidade de calor possível, parâmetros geométricos foram encontrados para altura e largura da aleta, passo de aleta e altura de base, a simulação foi validada por estudos experimentais, 81 modelos de dissipadores com parâmetros diferentes foram simulados, uma prova que a análise com CFD pode ser bastante útil no processo de design de eletrônicos. Análises em nível de sistema como as feitas por Xu et al (2014) (6) e Yu e Webb (2001) (7) tem os parâmetros do dissipador arbitrados e seu material especificado junto com as suas propriedades físicas. Ozturk e Tari (2007, 2008) (3, 16) analisaram um sistema comparando três dissipadores de calor aletados comerciais atrelados a CPU, modelando eles com as especificações dadas pelos fabricantes.

Anandkrishnan e Balaji (2009) (2) compararam um dissipador com aletas verticais com outro de aletas radiais, eles usaram o software de pré-processamento GAMBIT para modelar os dois dissipadores, inseriram nós dentro das aletas para considerar a convecção conjugada. Foi concluído que o dissipador de aletas radiais tem maior capacidade de dissipação que o de aletas verticais, baixando a temperatura do processador de 101 °C para 73 °C.

2.6.5 Modelagem de ventoinhas

Ao estudar um sistema refrigerado por convecção forçada, uma representação confiável das ventoinhas aerando o gabinete e das montadas nos componentes é crucial para a obtenção de bons resultados das simulações em CFD.

Yu e Webb (2001) (7) modelaram as ventoinhas do gabinete e da fonte alimentadora como pulos de pressão sem largura, áreas no domínio onde a pressão aumentava abruptamente. usaram as curvas da ventoinha fornecidas pelo fabricante e depois especificando as taxas de escoamento. Ozturk e Tari (2007, 2008) (3, 16) também simplificaram os elementos em seu estudo, não foi definida nenhuma geometria para a ventoinha, apenas a curva da ventoinha foi especificada para o encontro do ponto de operação. O elemento foi modelado como uma superfície circular que adiciona momento ao escoamento.

Stafford e Fortune (2014) (5) modelaram as ventoinhas de duas formas diferentes, como um quadro de referência múltipla (MRF) e como um parâmetro

discreto (lumped parameter). O modelo de parâmetro discreto é o utilizado pelos outros autores nas suas análises de nível sistemático, consistindo nas simplificações de geometria já mencionadas. Na modelagem com MRF o usuário deve especificar todos os detalhes do rotor, por conta disso campos de escoamento mais realistas são obtidos. Isso pode ser confirmado ao comparar os resultados das simulações usando esses dois tipos de modelo, os resultados foram esquematizados junto com dados obtidos experimentalmente, foi mostrado que o modelo MRF gera resultados muito mais próximos aos experimentais quando comparado ao modelo de parâmetro discreto (5).

2.7 Modelagem em CFD de sistemas eletrônicos

Para avaliar a efetividade de um sistema de refrigeração, os componentes devem estar funcionando em capacidade de trabalho máxima e supostamente dissipando o máximo de calor que podem, dessa forma a temperatura do sistema será a mais alta possível. Os fabricantes geralmente disponibilizam aos usuários uma potência de design térmico (TDP) para os componentes, a Intel® define a potência de design térmico (TDP) como "potência máxima que um processador consegue extrair por um período significativo de tempo enquanto um software comercial está sendo utilizado" (18). Essa definição se estende para outros componentes do computador.

Em uma análise sistemática o domínio computacional das simulações será o gabinete do computador ou um volume maior envolvendo ele. O gabinete pode ser modelado de uma maneira em que suas paredes externas estão transferindo calor para o exterior por convecção natural, nesse caso os coeficientes de transferência de calor devem ser encontrados usando correlações disponíveis na literatura (3,16). De forma a avaliar o pior cenário possível, as paredes do gabinete devem ser descritas como adiabáticas nas condições de contorno, significando que nada do calor dissipado pelos componentes irá deixar o sistema pelas paredes (2). Outro ponto importante é modelar corretamente a geometria do gabinete, pois isso será importante para validar os resultados das simulações com dados experimentais.

Após modelar todos os componentes dentro do domínio computacional, uma malha deve ser criada. Malhas não uniformes são usadas para reduzir o tempo das simulações e diminuir seu custo. Mais elementos são usados em áreas de maior interesse para a análise, como em fontes de dissipação de calor e regiões de altas velocidades de escoamento (6). É importante usar pelo menos de 4 a 5 elementos

nos contornos do escoamento como ventoinhas e saídas de ar, e pelo menos 3 elementos entre aletas do dissipador de calor (16). Um estudo de independência de malha deve ser feito para determinar se a qualidade da malha está influenciando nos resultados da simulação, a malha é refinada até não se ter mais diferença notável nos resultados de duas malhas consecutivas, essa é uma parte importante do processo de validação do modelo computacional.

Geralmente a análise em nível de sistema é feita com considerações de escoamento turbulento, incompressível e em regime permanente, assim as equações a serem resolvidas são as de Navier – Stokes de momento para as direções x , y e z , a equação de continuidade e a de energia. Equações de transporte envolvendo parâmetros de turbulência serão incluídas na solução, essas equações dependem do modelo de turbulência escolhido pelo usuário. Tyacke et al (2008) (19) apresentam uma comparação entre os modelos de turbulência RANS-LES, RAN-ILES e LES não linear em um problema com escoamento de baixo número de Reynolds, concluindo que as previsões feitas pelos modelos são similares. Ozturk e Tari (2007, 2008) (3, 16) usaram primeiramente o modelo de turbulência algébrico, o qual não resolve nenhuma equação adicional as de momento, continuidade e energia, sendo menos custoso computacionalmente quando comparado com métodos de ordem mais alta. Para validar o uso do método algébrico, os resultados obtidos foram comparados com outros provenientes de simulações usando o modelo de turbulência RNG k - ϵ , que resolve duas equações adicionais, os resultados foram similares, logo a utilização do modelo RNG k - ϵ não era vital naquele caso, já que iria dobrar o tempo das simulações para apenas uma pequena diferença nos resultados. Anandakrishnan e Balaji (2009) (2) e Xu et al. (2014) (6) usaram o modelo k - ϵ padrão com uma função de parede de não equilíbrio para lidar com a turbulência na região de paredes.

Para se obter uma boa estimativa

inicial para as simulações, condições de contorno corretas devem ser especificadas no software de CFD, algumas condições comuns usadas em análises de eletrônicos são a de não escorregamento nas paredes internas do gabinete, geração de calor uniforme no volume dos componentes e a modelagem das paredes do gabinete como adiabáticas. A taxa volumétrica de entrada de ar deve ser corretamente especificada e é boa prática modelar os componentes que não dissipam muito calor como simples barreiras geométricas ao escoamento, aumentando a confiabilidade do modelo.

3. METODOLOGIA

A modelagem do sistema teve início com a escolha de componentes eletrônicos reais para representar os modelos 3D, após a reunião dos dados geométricos dos componentes um modelo 3D foi criado usando o ANSYS® Workbench.

Por conta do alto número de elementos nas malhas geradas para o modelo, o computador de alto processamento (HPC) disponibilizado pela Universidade de Leeds no Reino Unido foi usado para realizar as simulações.

3.1 Componentes eletrônicos

Para representar de maneira correta um computador pessoal de alta qualidade comercializado no ano de 2015 em um modelo CFD, todos os componentes foram modelados com base nos componentes de maior capacidade de processamento disponíveis no mercado, seguindo as dimensões e a dissipação de calor dadas pelos fabricantes.

3.1.1 Unidade central de processamento - CPU

Sendo o componente mais importante a ser resfriado dentro do gabinete do computador, o processador foi o primeiro componente selecionado na análise. Um processador de nova geração, com alta capacidade de processamento e alta dissipação de calor foi procurado para testar os esquemas de convecção forçada.

O Intel® Core™ i7-6700K, fabricado pela Intel® foi escolhido para ser representado. O processador tem compatibilidade com uma grande gama de placas mãe, facilitando o próximo passo do processo de seleção, tem também um alto TDP (91W), satisfazendo os requerimentos do projeto.

As especificações utilizadas para modelar a geometria da CPU e proceder com a análise em CFD foram coletadas do website da Intel® (20). O tamanho do pacote é de 37,5mm x 37,5mm. A valor do TDP é de 91 Watts e a temperatura T_{CASE} é de 337K.

A temperatura de caixa T_{CASE} é a temperatura máxima permitida no dissipador de calor integrado a CPU (20). A T_{CASE} é importante pois não pode ser excedida, sendo o que irá determinar se o sistema de refrigeração em análise pode ser usado para refrigerar a CPU especificada.

O soquete da CPU é a parte que conecta a CPU à placa mãe, para o Core™ i7-6700K, o modelo de soquete suportado é o FCLGA1151 (20), essa informação é requerida para a escolha de uma placa mãe compatível.

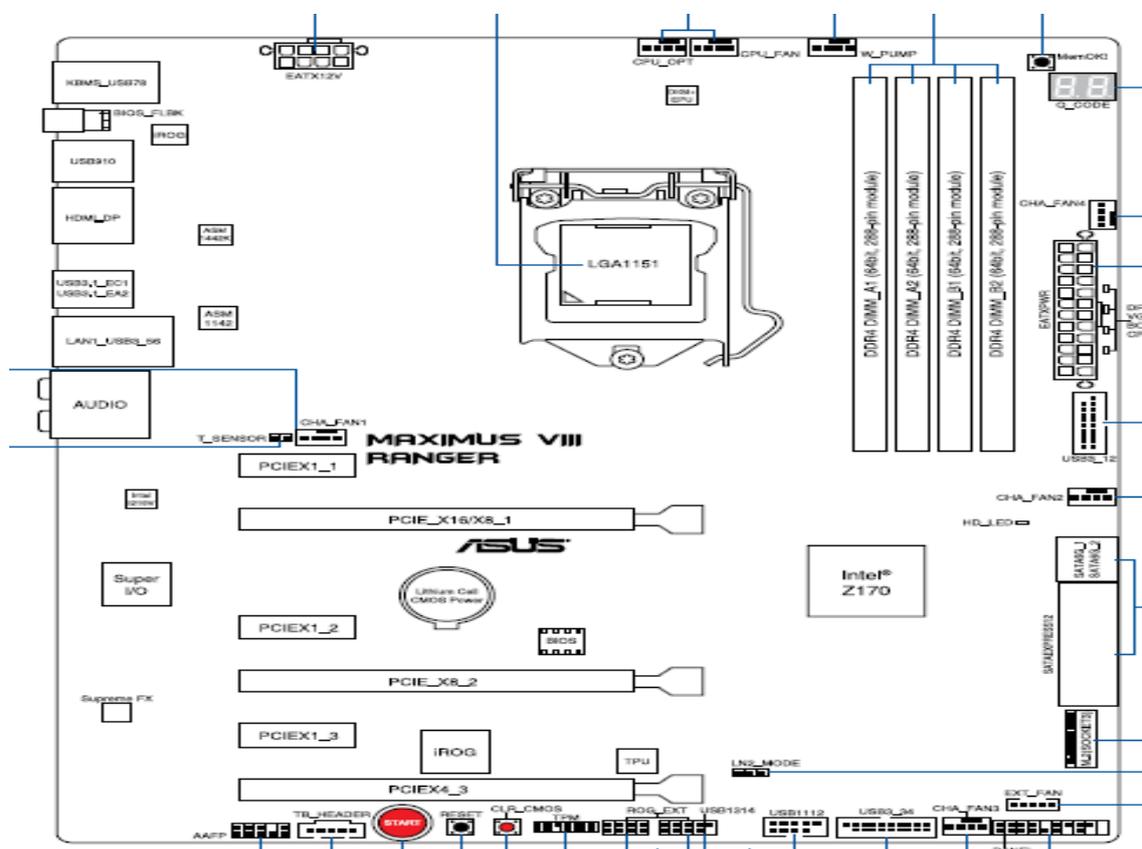
3.1.2 Placa mãe e Chipset

Com o soquete da CPU definido, foi possível a seleção de uma placa mãe. Um modelo com suporte para placas gráficas do tipo PCIe x16, vários slots para memória RAM e um fator de forma ATX era requerido para modelar o resto do sistema.

A ASUS Maximus VIII Ranger foi selecionada por preencher todos os requisitos. O chipset da placa mãe é o Intel® Z170, o chipset tem um consumo de energia de 6 W (21).

Para fazer o modelo 3D da placa e para consultar onde os outros componentes eletrônicos estariam posicionados, o manual de usuário fornecido pela ASUS foi consultado (22). A Figura 2 apresenta o desenho 2D da placa mãe usado para criar o modelo 3D do componente (22).

Figura 2 - Desenho 2D da placa mãe ASUS Maximus VIII Ranger retirado do manual de usuário da placa.



Fonte: Website do fabricante (22).

3.1.3 Memória RAM

Memória RAM do tipo DDR4 SDRAM é compatível com a placa mãe. As dimensões das placas de memória são padronizadas para cada tipo de modelo (23). Uma placa DDR4 SDRAM tem 133,35mm de comprimento, 31,25mm de altura e 1,2mm de espessura (23). Um trabalho experimental foi encontrando contendo o consumo de energia de um pacote consistido de 4 módulos de 8GB cada, resultando em um total de 11,85W (24).

3.1.4 Unidade de processamento gráfica - GPU

A placa mãe suporta placas gráficas PCIe x16 (21). Uma GPU com novas tecnologias, grande capacidade de processamento e alta dissipação de calor foi procurada.

O Modelo selecionado foi a NVIDIA GTX TITAN X. O Modelo é considerado um dos melhores disponíveis no Mercado em 2015 (25) e todas as especificações puderam ser encontradas no website da NVIDIA (26). A placa tem 111mm de altura, 267mm de comprimento e 17,2mm de espessura. Tem uma TDP de 250 Watts e uma T_{CASE} de 364K.

3.1.1 Gabinete e fonte de alimentação

A geometria do gabinete foi baseada no modelo “mid tower” H440 fabricado pela NZXT (27). As dimensões são as mesmas e as saídas de ar, slot da fonte de alimentação e slot das ventoinhas de gabinete são representadas com tamanhos e posições similares aos do gabinete real.

O gabinete foi selecionado por ter compatibilidade com o fator de forma ATX, que é a configuração usada da placa mãe selecionada.

A fonte de alimentação deveria suprir o requerimento de energia da GPU, tendo que ser hábil de prover um mínimo de 600W de energia ao sistema. A Corsair CX750W foi selecionada para ser representada, é indicada como sendo apta a prover 750 W de energia e tem certificação de qualidade 80 PLUS® bronze (28).

Para calcular a dissipação de calor da fonte de alimentação, os valores dados pela certificação 80 PLUS® bronze para eficiência foram utilizados. Eficiência da fonte de alimentação como uma função de carga extraída da fonte é apresentada na Tabela 1 (29).

Tabela 1 - Certificação 80 PLUS® bronze.

| 80 PLUS bronze | 115 V | | | | 230 V | | |
|-------------------------|-------|-----|-----|------|-------|-----|-----|
| % da capacidade nominal | 10% | 20% | 50% | 100% | 10% | 20% | 50% |
| Eficiência da fonte | x | 82% | 85% | 82% | X | 81% | 85% |

Fonte: Artigo do Wikipedia sobre certificação 80 PLUS®bronze (29)

O consumo total de energia do sistema é necessário para se fazer o cálculo da dissipação de calor da fonte. O consumo total de energia é dado por (Equação 4):

$$\text{Consumo total} = P_{CPU} + P_{GPU} + P_{CHIPSET} + P_{DDR4} \quad (4)$$

Os termos do lado direito da equação indicam o consumo de energia de cada componente eletrônico individualmente, para o sistema em consideração o consumo total de energia foi:

$$\begin{aligned} \text{Consumo total} &= 91 W + 250 W + 6 W + 11.85 W \\ \text{Consumo total} &= 358,85 W \end{aligned}$$

Esse consumo dá uma porcentagem de capacidade nominal de (Equação 5):

$$P\% = \frac{\text{Consumo total}}{\text{Potência nominal}} \quad (5)$$

$$P\% = \frac{\text{Consumo total}}{\text{Potência nominal}}$$

$$P\% = \frac{358,85W}{750W}$$

$$P\% = 0,4784 = 47,84\%$$

Pelos valores da Tabela 4, para uma porcentagem de capacidade normal de aproximadamente 50%, a eficiência da fonte de alimentação é de 85%.

A potência de entrada da fonte de alimentação é dada por (Equação 6):

$$\text{Potência de entrada} = \frac{\text{Consumo total}}{\varepsilon} \quad (6)$$

Na qual:

$\text{Potência de entrada}$ é a energia elétrica requerida pela fonte. (W)
 ε é a eficiência da fonte de alimentação.

A potência de entrada da fonte de alimentação é:

$$\begin{aligned} \text{Potência de entrada} &= \frac{358,85W}{0,85} \\ \text{Potência de entrada} &= 422,17W \end{aligned}$$

O calor dissipado pela fonte de alimentação é (Equação 7):

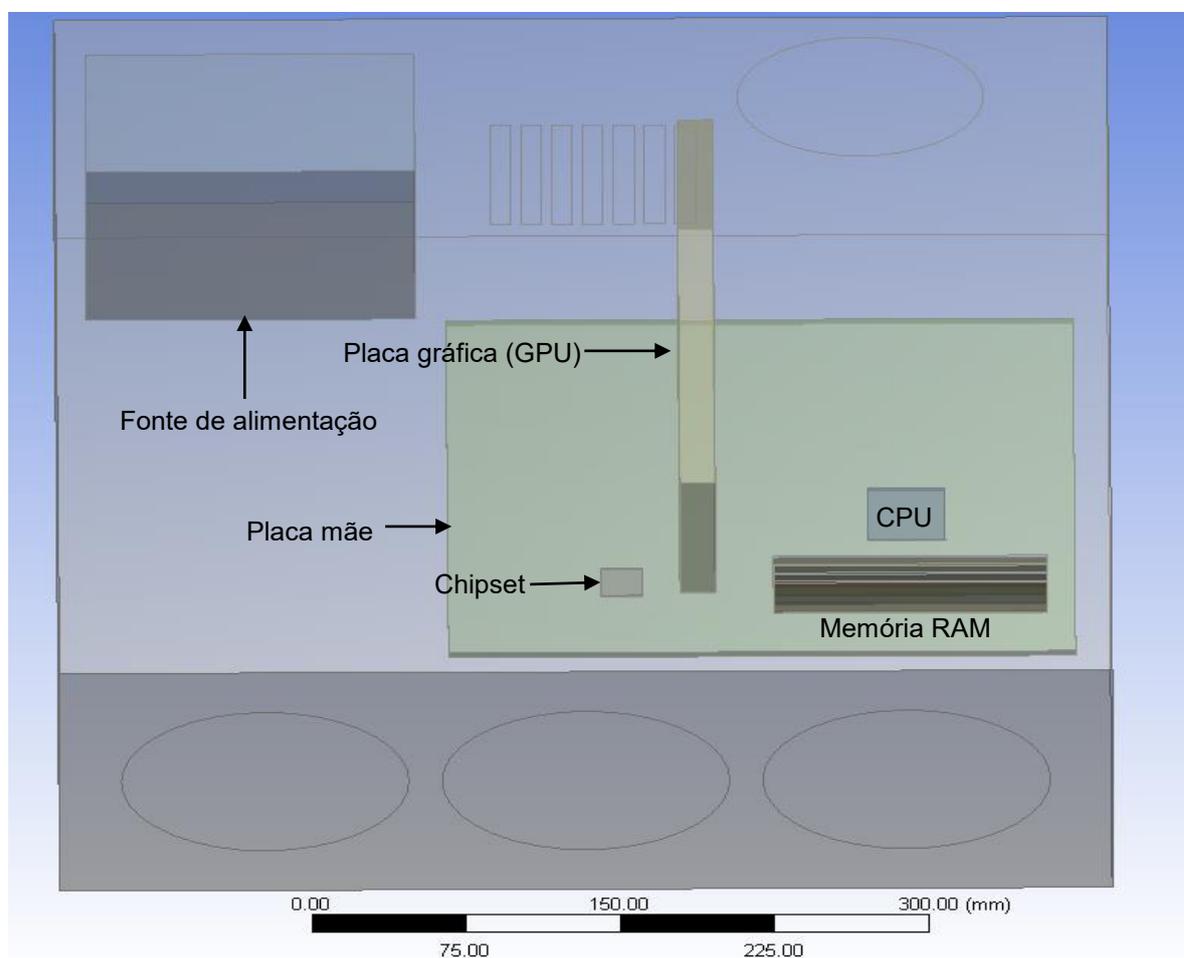
$$E_{Fonte} = \text{Potência de entrada} - \text{Potência de saída} \quad (7)$$

$$E_{Fonte} = 422,17W - 358,85W$$

$$E_{Fonte} = 63,32W$$

A Figura 3 apresenta o modelo 3D do gabinete do computador com todos os componentes dentro.

Figura 3 - Modelo 3D do gabinete. Componentes incluídos: CPU, GPU, Chipset, Fonte de alimentação, memória RAM.



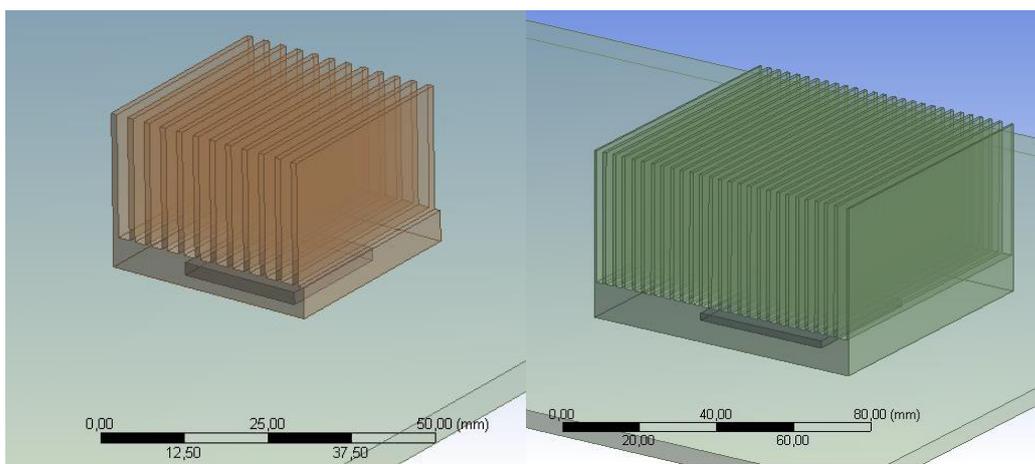
Fonte: Autor

3.2 Dissipadores de calor e ventoinhas

Dois dissipadores de calor foram adicionados em momento posterior da análise, um a CPU e outro ao chipset da placa mãe, o objetivo era o de melhorar a

dissipação de calor dos chips. Dissipadores de calor com aletas retas foram modelados, pois geometrias mais complexas iriam demandar malhas muito mais refinadas, impossibilitando a análise. As bases dos dissipadores de calor estão em contato com a superfície superior dos chips. Os modelos 3D dos dissipadores de calor estão apresentados na Figura 4 e a informação sobre suas geometrias está apresentada na Tabela 2.

Figura 4 - Dissipadores de calor do chipset e da CPU, respectivamente.



Fonte: Autor.

Tabela 2 - Parâmetros geométricos dos dissipadores.

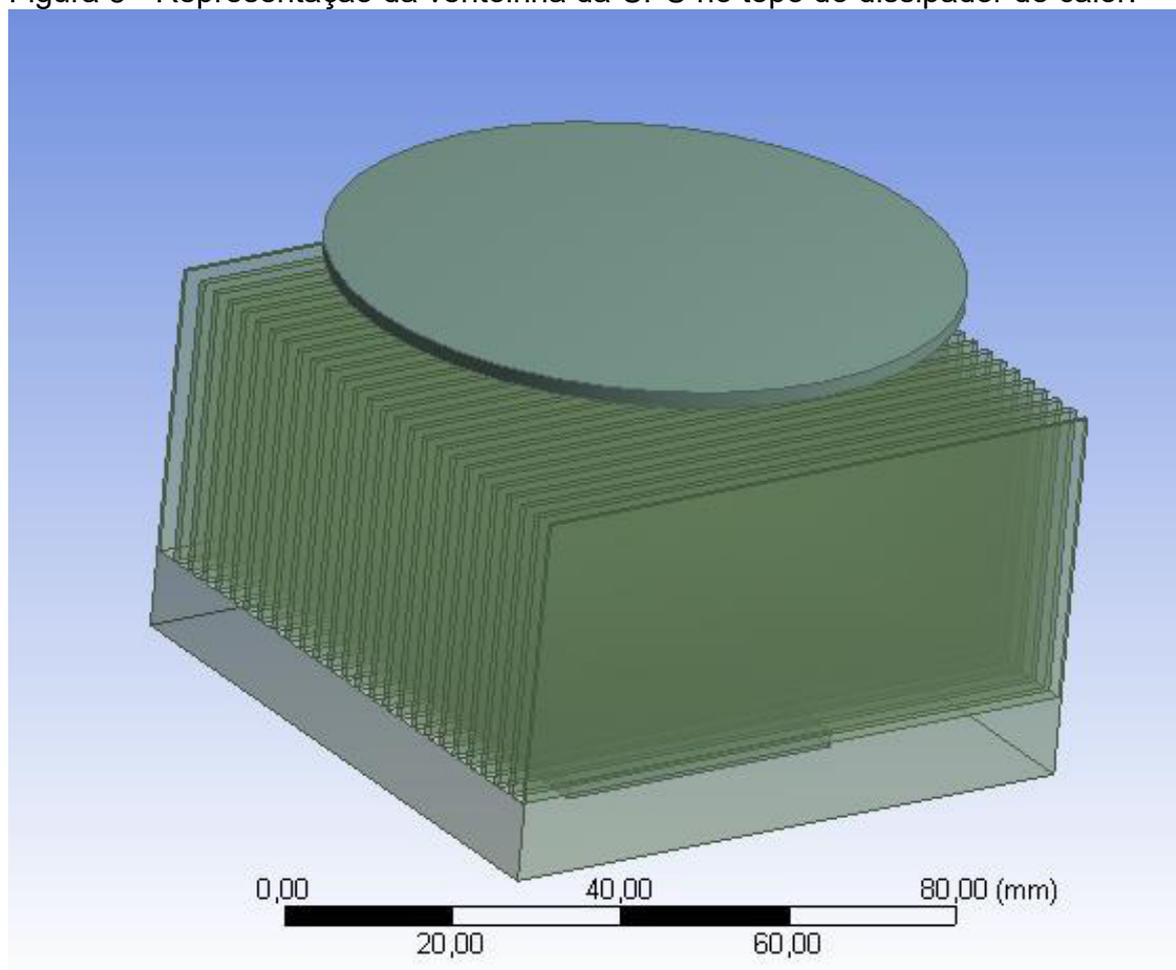
| | Número de aletas | Área de superfície das aletas | Área de superfície total | Volume Total |
|----------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------|------------------------|
| Dissipador - CPU | 27 | 5,84E-3 m ² | 0,165 m ² | 1,37E-3 m ³ |
| Dissipador - Chipset | 12 | 1,45E-4 m ² | 1,74E-3 m ² | 1,45E-5 m ³ |

Fonte: Autor.

As ventoinhas do gabinete foram modeladas como superfícies circulares nas paredes do gabinete. As especificações do modelo Corsair AF140 foram utilizadas para representar uma ventoinha real (30). A ventoinha tem uma taxa de escoamento de 66,4 CFM e uma pressão estática de 0,8mmH₂O. O diâmetro da ventoinha é de 0,12m e a velocidade de entrada do ar é de 2,77m/s.

A ventoinha da CPU foi modelada como um volume cilíndrico no topo do dissipador de calor da CPU, mudando o momento do escoamento. Uma ventoinha com alta pressão estática foi escolhida para ser representada, a ventoinha da CPU tem uma taxa de escoamento de 28 CFM e uma pressão estática de 1,45mmH₂O. A Figura 5 mostra a representação da ventoinha da CPU.

Figura 5 - Representação da ventoinha da CPU no topo do dissipador de calor.



Fonte: Autor

3.4 Materiais

Três materiais foram usados para modelar os sólidos nas simulações, Alumínio, FR4 (compósito reforçado com vidro) e silicone. O gabinete, a fonte de alimentação e os dissipadores de calor são de alumínio, o chipset e a CPU são em maior parte de silicone e as placas de circuito impresso são feitas de FR4. As propriedades dos materiais implementados nas simulações são apresentadas no Anexo I

3.3 Condições do ar e propriedades do escoamento

As propriedades do ar são tomadas na temperatura em que ele entra no gabinete (22°C), a pressão é assumida como 1 atm. Na análise o ambiente está a uma temperatura de 22°C, as propriedades do ar usadas nas simulações estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades do ar.

| Densidade | Viscosidade | Calor específico | Condutividade térmica |
|--------------------------|----------------|------------------|-----------------------|
| 1,1965 kg/m ³ | 1,83E-5 kg/m.s | 1006 J/kg.K | 0,025745 W/m.K |

Fonte: Banco de dados do Fluent.

3.4 Análise em dinâmica dos fluidos computacional

Essa sessão trata do procedimento tomado para fazer a análise em CFD do gabinete. Todas as simulações foram feitas considerando um escoamento turbulento em regime permanente. Para avaliar efeitos de compressibilidade, o número de Mach M foi calculado usando a velocidade de entrada do escoamento. O número de Mach é definido como (Equação 8) [31]:

$$M = \frac{u}{c} \quad (8)$$

Onde:

u É a velocidade do escoamento (m/s)
 c É a velocidade do som (m/s)

Usando a velocidade de entrada:

$$M = \frac{2,77 \frac{m}{s}}{340,29 \frac{m}{s}}$$

$$M = 8,14 \times 10^{-3}$$

Como $M < 0,3$, o escoamento pode ser modelado como incompressível (9).

3.4.1 Equações de governo

Equações de conservação para massa (continuidade) e momento foram resolvidas pelo ANSYS® FLUENT para todos os tipos de escoamento (32). Para um escoamento incompressível, tridimensional e em regime permanente, a equação de continuidade se resume a (Equação 9) [9, p.175]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

Onde:

u, v e w são as componentes de velocidade do escoamento

Para escoamentos em regime permanente, incompressíveis, com viscosidade constante, e desconsiderando os efeitos da gravidade, as equações do momento tem forma (Equações 10, 11 e 12) (9, p.200-201).

Na direção X:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

Na direção Y:

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (11)$$

Na direção Z:

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (12)$$

Onde:

| | |
|--------------|---|
| ρ | é a massa específica do fluido (kg/m ³) |
| p | é a pressão termodinâmica (Pa) |
| u, v e w | são as componentes de velocidade do fluido (m/s) |

Como existe transferência de calor envolvida na análise, uma equação de energia será resolvida junto com as equações previamente apresentadas. Para escoamento em regime permanente, o ANSYS[®] Fluent resolve a equação da energia na forma (Equações 13 e 14) (32):

$$\nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (13)$$

Onde:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (14)$$

Na equação 13:

| | |
|-------------|--|
| k_{eff} | é a condutividade efetiva (W/m.K) |
| \vec{J}_j | é o fluxo difusivo de espécie (kg/m ² .s) |

| | |
|------------------------------------|---|
| $k_{eff}\nabla T$ | é a transferência de energia por condução (J) |
| $\sum_j h_j \vec{J}_j$ | é a transferência de energia por difusão de espécie (J) |
| $(\bar{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})$ | é a transferência de energia por dissipação viscosa (J) |
| S_h | da conta de fontes de calor volumétricas adicionadas ao sistema (J) |

Nos casos analisados, o aquecimento viscoso foi desconsiderado e não existe difusão de espécies. A equação de conservação de energia é reduzida a (Equação 15):

$$\nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff}\nabla T) + S_h \quad (15)$$

3.4.2 Modelagem de turbulência

O bem conhecido modelo de turbulência $k - \epsilon$ padrão foi utilizado para resolver a turbulência no sistema. Esse foi o modelo utilizado por Xu et al (6) e Anandakrishnan e Balaji (2) nas suas análises. ANSYS® Fluent resolve as seguintes equações para determinar a energia cinética turbulenta k e sua taxa de dissipação ϵ (Equações 16 e 17) (32).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \end{aligned} \quad (17)$$

Na qual:

- G_k Da conta da geração de energia cinética turbulenta causada por gradientes de velocidade
- G_b Representa a energia cinética turbulenta gerada por flutuabilidade, desconsiderada nessa análise já que a convecção natural não é modelada
- Y_M É o efeito da turbulência compressível na taxa de dissipação, também desconsiderada na análise, já que o escoamento é incompressível

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ São constantes. Pelo padrão do ANSYS® Fluent: $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_{2\varepsilon} = 1,92$

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ São os números de Prandtl turbulentos para k e ε . Pelo padrão do ANSYS® Fluent: $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$

A viscosidade turbulenta μ_t é então calculada combinando k e ε . A expressão para encontrar μ_t tem a forma (Equação 18):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (18)$$

Onde:

C_μ É uma constante. Pelo padrão do ANSYS® Fluent $C_\mu = 0,09$

O modelo $k - \varepsilon$ usa uma função de parede para tratar a turbulência nas regiões de parede, uma abordagem usando função de parede foi utilizada pois resolver a turbulência em cada célula na região de parede iria necessitar uma malha bem mais refinada, aumentando bastante o custo computacional para realizar as simulações.

3.4.3 Configurações do solver

3.4.3.1 Modelos

O tipo de solver “pressure-based” foi selecionado, pois o escoamento não tem mudanças de densidade na análise em questão. O sistema foi considerado de estado permanente em todas as simulações. Os modelos de energia e turbulência foram ligados e configurados no software.

3.4.3.2 Métodos e discretização

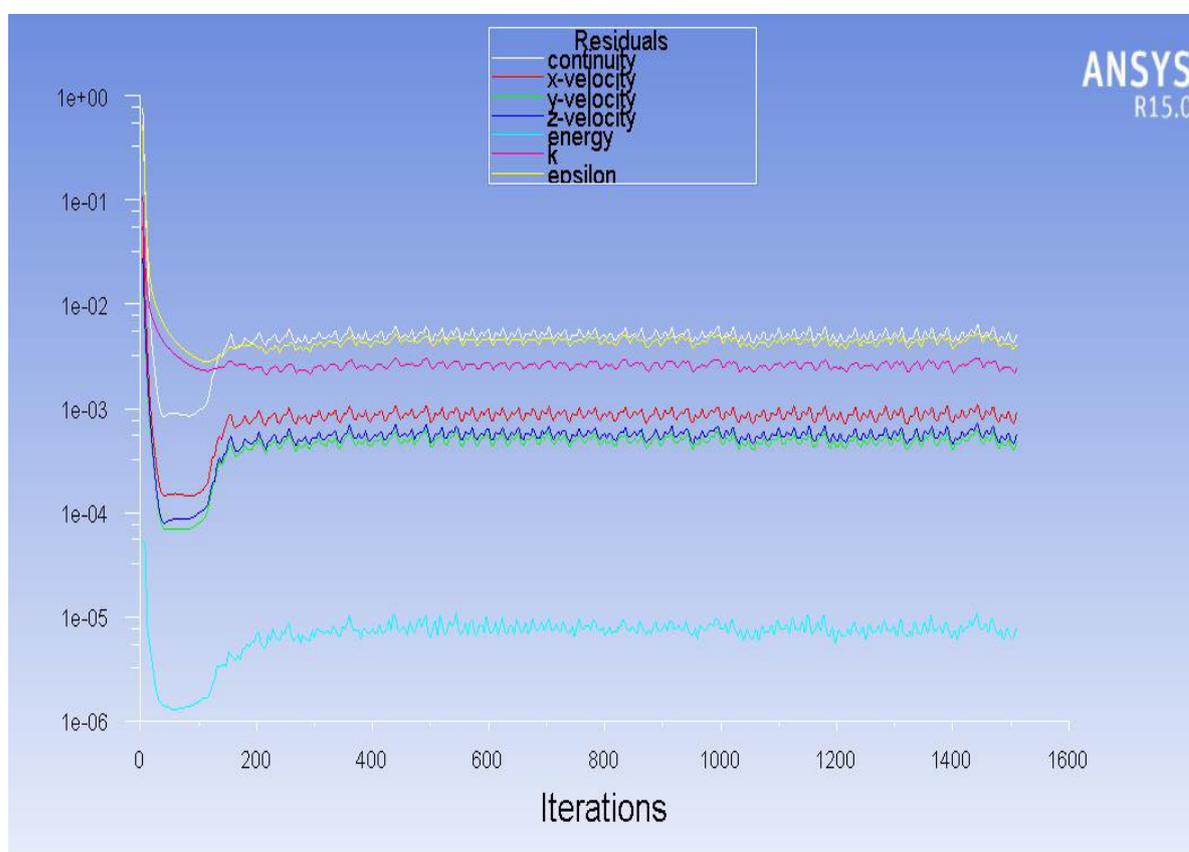
Em todas as simulações, o esquema coupled foi utilizado para o acoplamento pressão velocidade. O método *Green-Gauss node based* foi usado para computar o gradiente e discretização de segunda ordem foi usada para as equações de pressão, momento, turbulência e energia.

3.4.3.3 Convergência

Para avaliar a convergência das simulações, os residuais de todas as equações foram analisados conjuntamente com um monitor de temperatura de um componente, geralmente sendo a temperatura da CPU. Uma vez que os residuais se

encontravam abaixo de um nível aceitável, em cerca de 10^{-3} para continuidade e momento e 10^{-6} para energia, e a temperatura monitorada parava de mudar entre iterações, era assumido que a simulação teria atingido a convergência. A Figura 6 apresenta um gráfico típico de residuais por iterações tirados das simulações. A curva branca representa o residual de continuidade, as curvas vermelha, verde e azul os residuais das componentes de velocidade nas três direções, a curva azul clara o residual de energia e as curvas roxa e amarela os residuais das equações de turbulência.

Figura 6 - Residuais x Iterações.



Fonte: Autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Três casos foram estudados na análise, o primeiro consistindo no gabinete do computador com os componentes dentro, sendo refrigerado por duas ventoinhas de gabinete. Em seguida os dissipadores da CPU e do chipset foram adicionados no sistema, o objetivo era ver como os dissipadores melhoravam a dissipação de calor dos chips. O terceiro caso foi o que melhor representava o sistema real, tendo os materiais corretamente implementados e a ventoinha da CPU modelada dentro do gabinete.

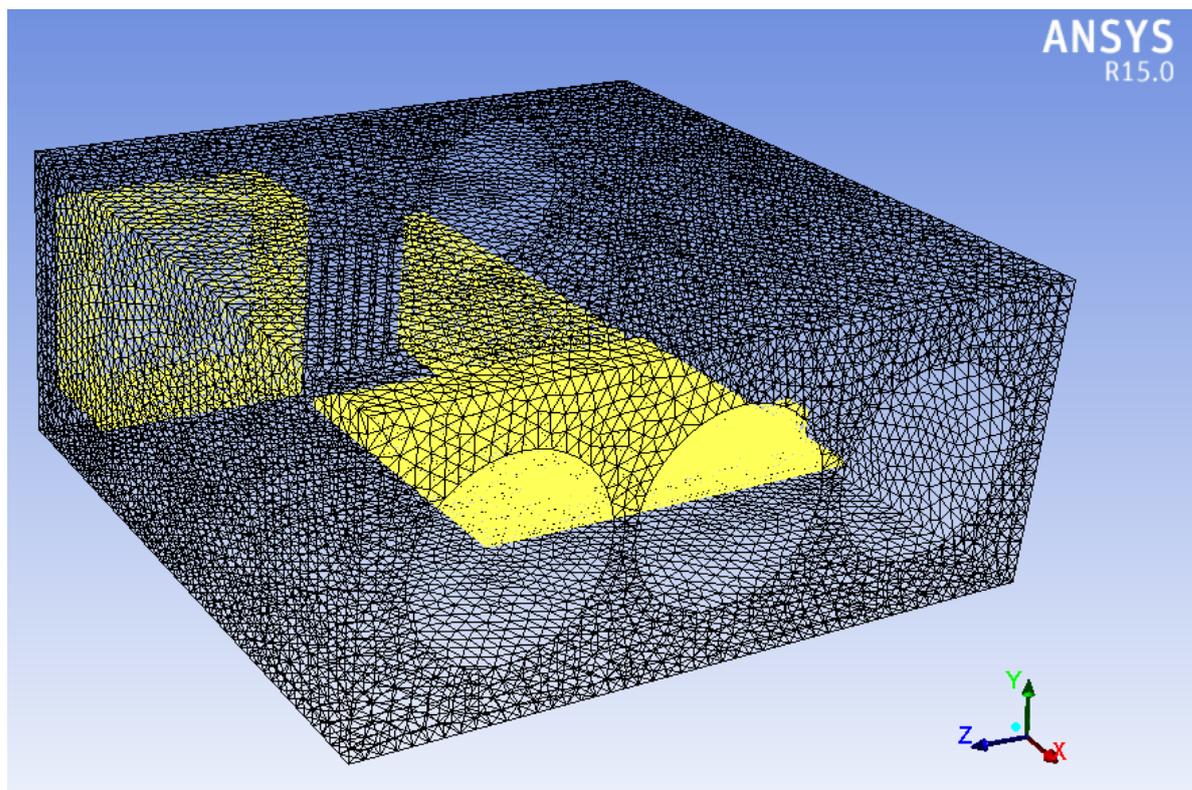
5.1 Caso 1 – Sistema refrigerado por ar sem dissipadores de calor

Os objetivos do primeiro caso eram testar a malha inicial, conduzir o estudo de independência de malha, configurar um primeiro caso no ANSYS® Fluent para servir de base para as simulações seguintes e avaliar a mudança na temperatura da CPU ao se adicionar os dissipadores de calor no sistema. Todas as regiões sólidas, incluindo os componentes eletrônicos, foram modelados como sendo feitos de alumínio, isso diminuiu a confiança do modelo quando comparado com o caso real mas foi feito como uma maneira de simplificar a análise.

5.1.1 Malha

O domínio foi discretizado usando uma malha de elementos tetraédricos não estruturados, a malha inicial gerada possuía 369.683 elementos. A densidade de elementos na malha gerada é mais alta em regiões perto de componentes eletrônicos, e em regiões de entrada e saída de ar, a malha foi feita mais grosseira em áreas de baixa transferência de calor e baixa velocidade de escoamento, para tornar as simulações mais rápidas. Assimetria foi o parâmetro utilizado para avaliar a qualidade da malha, para a primeira malha a assimetria média era de 0,24. A Figura 7 apresenta a primeira malha gerada no módulo ANSYS® Mesh.

Figura 7 - Primeira malha gerada.



Fonte: Autor.

5.1.2 Condições de contorno

Uma condição de não escorregamento foi aplicada nas paredes internas do gabinete e nas paredes dos componentes. As paredes do gabinete são assumidas como adiabáticas e tem uma temperatura de 295 K.

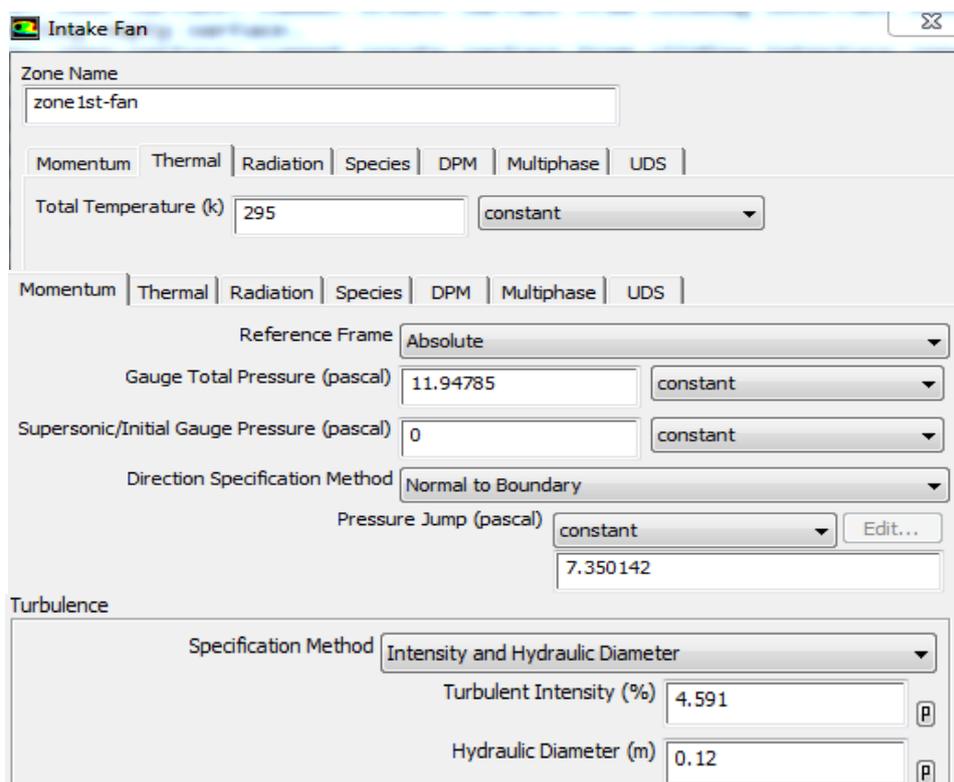
Uma condição de contorno de “intake – fan” foi aplicada na região das ventoinhas do gabinete, duas ventoinhas são consideradas como ligadas e o terceiro espaço de ventoinha foi modelado como uma parede fechada. Valores de pressão total, pulo de pressão pela ventoinha e temperatura de entrada do escoamento foram especificadas para o solver.

A intensidade turbulenta I e o diâmetro hidráulico D_h foram especificados como os parâmetros de turbulência para a ventoinha. D_h foi definido como o diâmetro da ventoinha. Para achar I a seguinte expressão foi utilizada (equação 18) (33):

$$I = 0,16Re_{D_H}^{\left(-\frac{1}{8}\right)} \quad (18)$$

Para os valores especificados de diâmetro e fluxo de ar da ventoinha AF140, I toma um valor de 4,591%. A Figura 8 mostra a caixa de opções da condição de contorno da ventoinha no ANSYS® Fluent preenchida com os parâmetros do caso.

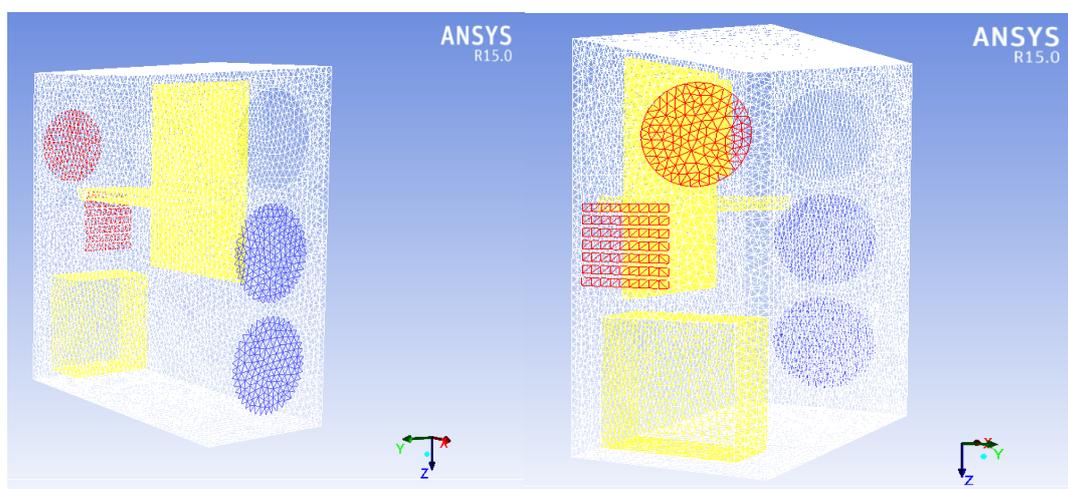
Figura 8 – Caixa de opções da condição de contorno da ventoinha de entrada de ar.



Fonte: Autor

Uma condição de contorno de pressão de saída especificando uma pressão de 1 atm foi atribuída as saídas de ar do gabinete e ao compartimento de ventoinha localizado na parte traseira do gabinete. A Figura 9 mostra a localização das ventoinhas de trabalho e das saídas de ar do sistema.

Figura 9 - Ventoinhas de entrada e saídas de ar do sistema destacadas em azul e vermelho respectivamente.



Fonte: Autor

5.1.3 Condições de zona de células

Condições de zona de células foram aplicadas às regiões sólidas dentro do gabinete para especificar a geração de calor por unidade de volume de cada componente. A geração de calor foi calculada pegando o valor de TDP de cada componente e dividindo esse valor pelo volume do componente, como todos os elementos foram modelados como paralelepípedos, os seus volumes puderam ser facilmente determinados. Para as placas de memória DDR4, o valor conhecido da TDP do pacote foi dividido por 4 para determinar a dissipação de calor de um único módulo de memória, a dissipação de calor da placa mãe foi concentrada no chipset, seu núcleo central de processamento. A Tabela 4 apresenta a geração de calor em W/m^3 de todos os componentes do sistema.

Tabela 4 - Geração de calor dos componentes eletrônicos.

| Módulo DDR4 | CPU | GPU | Chipset | Fonte de Alimentação |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| $5,92 \times 10^6 \frac{W}{m^3}$ | $3,23 \times 10^7 \frac{W}{m^3}$ | $4,90 \times 10^5 \frac{W}{m^3}$ | $7,5 \times 10^6 \frac{W}{m^3}$ | $3,06 \times 10^4 \frac{W}{m^3}$ |

Fonte: Autor

5.1.4 Estudo de independência de malha

Um estudo de independência de malha foi conduzido para garantir que os resultados não estavam mudando consideravelmente quando aumentando o número

de elementos na malha, um equilíbrio entre precisão nos resultados e tempo de computação era procurado. Três malhas diferentes foram comparadas, a mais grosseira contendo 369.683 elementos, a intermediária contendo 426.392 elementos e a mais refinada contendo 498.213 elementos. A temperatura na superfície da CPU foi o resultado selecionado para comparar as três malhas, os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Temperatura de superfície da CPU para três malhas diferentes.

| 1ª malha | 2ª malha | 3ª malha |
|----------|----------|----------|
| 404,09 K | 403,10 K | 399,56 K |

Fonte: Resultados das simulações feitas no trabalho.

Dos resultados da Tabela 5, existe uma diferença de 0,24% entre os resultados das primeiras duas malhas e 0,87% entre os resultados da malha intermediária e da mais refinada. Ao se chegar em malhas de aproximadamente 500.000 elementos, as simulações começaram a tomar longos períodos de tempo para serem finalizadas, como as diferenças entre duas malhas consecutivas eram de menos de 1% e um equilíbrio entre precisão de resultados e tempo de computação era procurado, independência de malha foi assumida para malhas contendo 500,000 elementos ou mais.

Para os outros dois casos estudados, o número de elementos foi aumentado nas malhas para tratar das novas características geométricas dos modelos.

Para reduzir outras fontes comuns de erro, uma alta ordem de discretização foi usada para resolver as equações, reduzindo o erro numérico. Convergência foi analisada cuidadosamente para evitar erros de convergência.

5.1.5 Resultados – Caso 1

Os resultados apresentados nessa sessão foram os obtidos das simulações utilizando a malha de 498.213 elementos.

Temperatura estática média:

A Tabela 6 apresenta a temperatura média dos componentes eletrônicos, avaliados no volume das regiões sólidas. A memória DDR4 – 1 é a posicionada mais longe do chip da CPU e a DDR4 – 4 a posicionada mais próxima ao chip.

Tabela 6 - Temperatura média dos componentes no caso 1

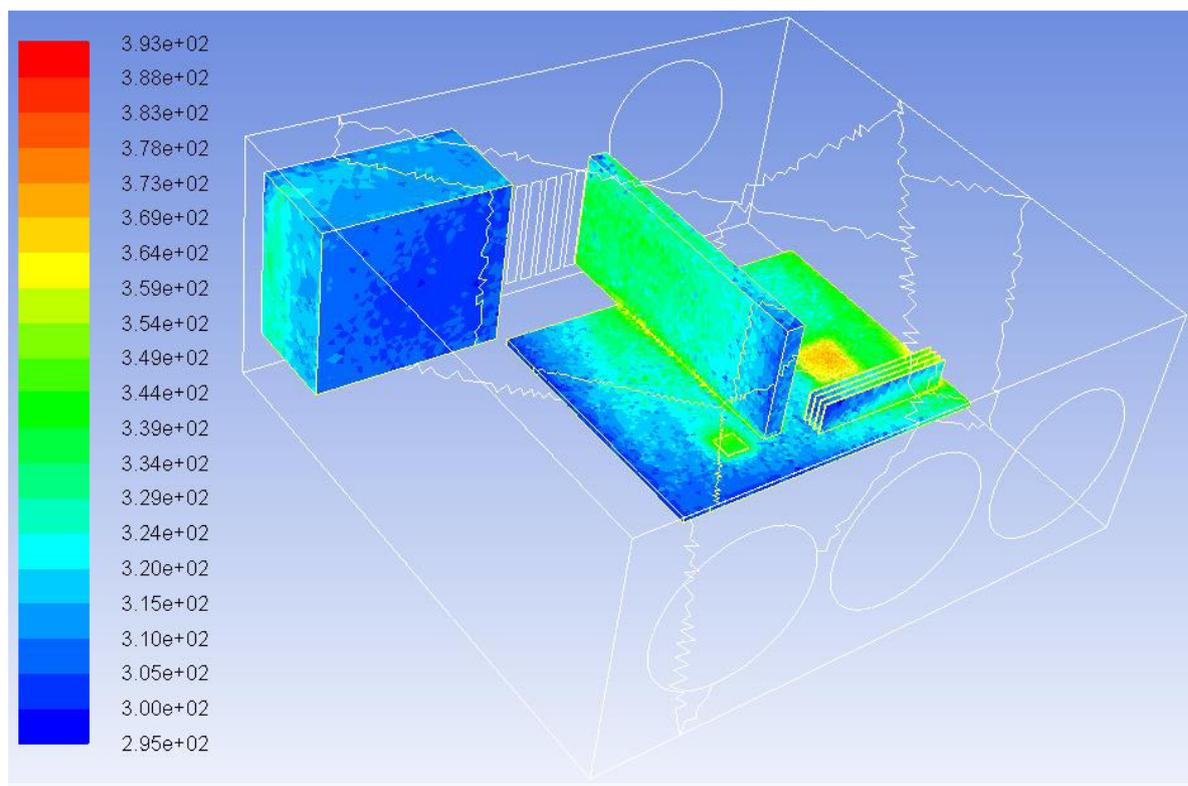
| | Temperatura Média (K) | Temperatura Média (°C) |
|-----------|-----------------------|------------------------|
| GPU | 387,73 | 114,73 |
| CPU | 391,38 | 118,38 |
| Fonte | 342,09 | 69,09 |
| DDR4 - 1 | 368,45 | 95,45 |
| DDR4 - 2 | 369,35 | 96,35 |
| DDR4 - 3 | 369,96 | 96,96 |
| DDR4 - 4 | 371,11 | 98,11 |
| Chipset | 366,95 | 93,95 |
| Placa mãe | 371,86 | 98,86 |

Fonte: Autor

Contornos de temperatura:

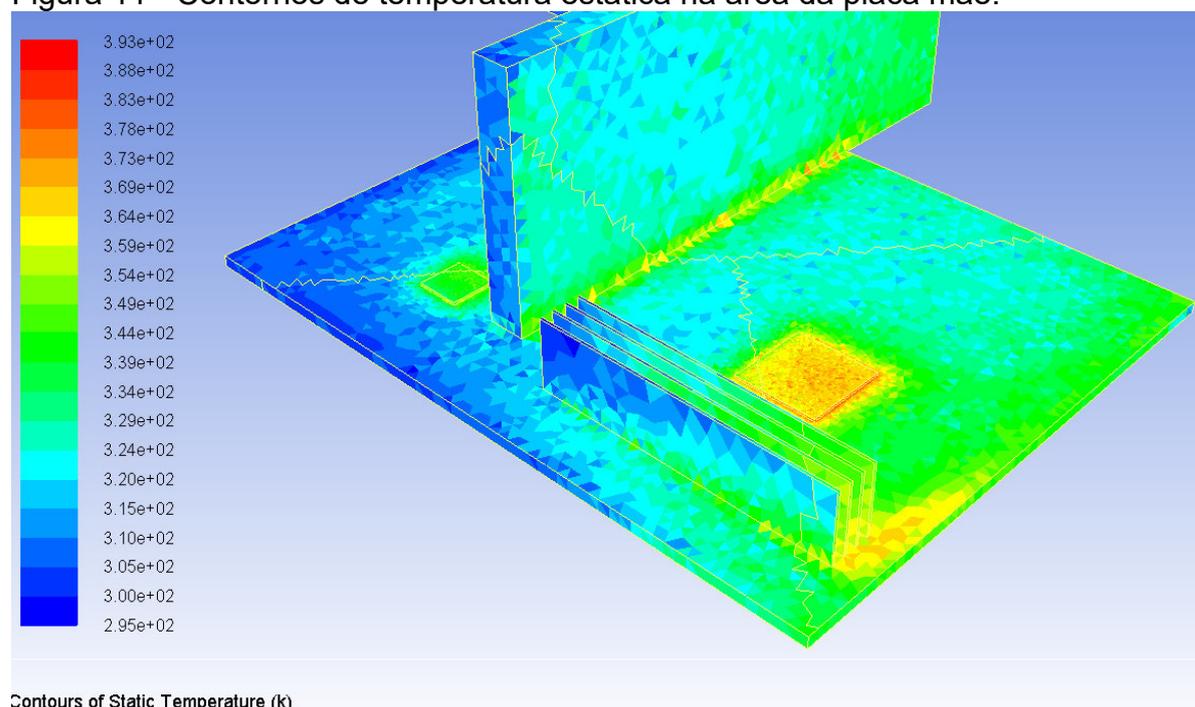
A Figura 10 apresenta contornos de temperatura estática nas paredes dos componentes eletrônicos, a Figura 11 apresenta uma visão ampliada na área da placa mãe para melhor mostrar as temperaturas dos componentes. As temperaturas nos contornos estão numa faixa de 295 K a 392 K, sendo a temperatura mais baixa a temperatura de entrada do ar e a mais alta a maior temperatura média encontrada no sistema.

Figura 10 - Contornos de temperatura estática no gabinete



Fonte: Autor.

Figura 11 - Contornos de temperatura estática na área da placa mãe.



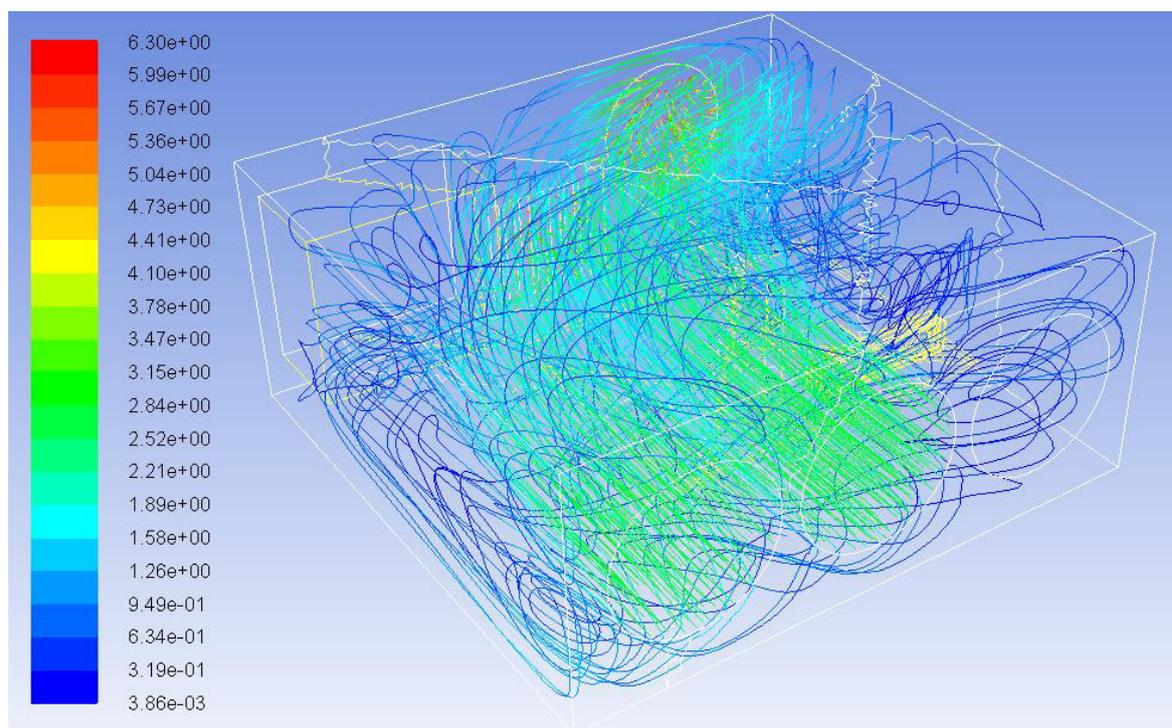
Fonte: Autor

Temperaturas mais altas podem ser vistas em regiões de alta dissipação de calor, como nos chips da CPU e chipset.

Pathlines de velocidade:

A Figura 12 apresenta Pathlines coloridas por magnitude de velocidade, sendo lançadas das ventoinhas do gabinete.

Figura 12 - Pathlines coloridas por magnitude de velocidade



Fonte: Autor

Pode ser visto na figura 12 que o escoamento tem uma alta velocidade nas regiões de entrada e saída de ar, é também notável a turbulência próxima as paredes do gabinete.

5.1.6 Relação entre velocidade do escoamento e temperatura dos componentes

Ao analisar a temperatura estática e as Pathlines de velocidade nas Figuras 11 e 12, nota-se que paredes que estão sendo diretamente ventiladas pelo escoamento, como a parede da fonte de alimentação em frente a ventoinha do gabinete e algumas regiões da GPU e placa mãe, estão a uma temperatura consideravelmente mais baixa quando comparadas com outras regiões do sistema. Esse fato mostra que aumentar a velocidade do escoamento próximo as paredes aumenta a taxa de transferência de calor entre o componente e o fluido. Outros resultados suportando essa observação são as temperaturas das memórias RAM. A placa de memória mais próxima das ventoinhas do gabinete tem a menor temperatura das quatro placas nos três casos, as placas servem de impedância ao escoamento e a temperatura dos módulos sobem gradualmente ao se distanciar da ventoinha do gabinete, é também importante mencionar que a temperatura da parede entre dois

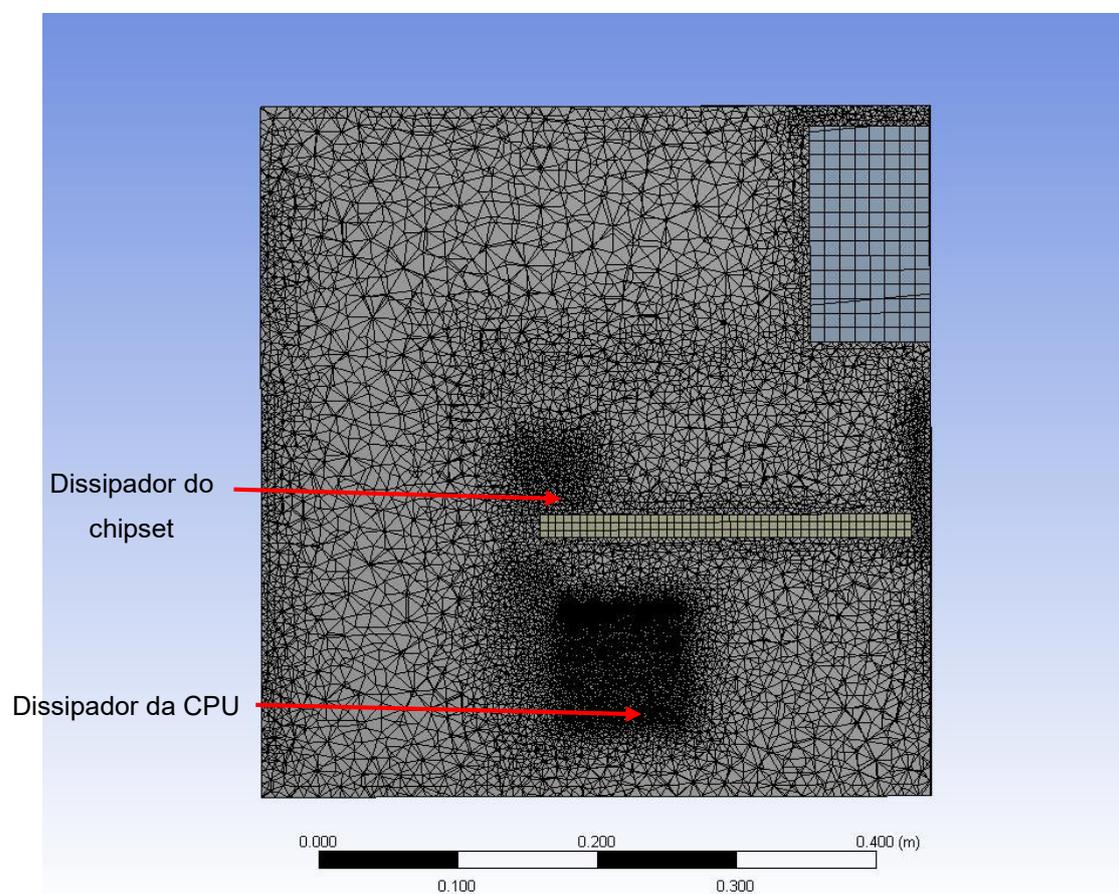
módulos de memória é consideravelmente mais alta que as encontradas nas paredes externas, isso ocorre porque o fluido não está escoando bem entre as placas.

5.2 Caso 2 – Sistema resfriado com ar contendo dissipadores de calor

No segundo caso, as únicas diferenças para o primeiro modelo estudado estão no modelo 3D e na malha. As condições de contorno, condições de zonas de células e configurações do solver foram mantidas as mesmas.

Os dois dissipadores de calor apresentados na sessão 3.4 foram adicionados, pelo aumento na complexidade geométrica do modelo, uma malha bem mais refinada foi necessária nesse caso. Uma malha contendo 1.453.097 elementos foi gerada, métodos de mapeamento de face foram aplicados as aletas dos dissipadores de calor para melhorar a qualidade da malha, deixando-o mais ortogonal. A malha tem uma assimetria máxima de 0,94 e uma assimetria média de 0,22. A Figura 13 apresenta uma visão seccionada da malha usada na simulação.

Figura 13 - Visão seccionada da malha do segundo caso, áreas de alta densidade de elementos podem ser vistas na região dos dissipadores.



Fonte: Autor.

5.2.1 Caso 2 – Resultados

Temperatura estática média:

A Tabela 6 apresenta a temperatura média dos componentes eletrônicos e dos dissipadores de calor, avaliadas no volume das regiões sólidas.

Tabela 7 - Temperatura média dos componentes e dissipadores no caso 2

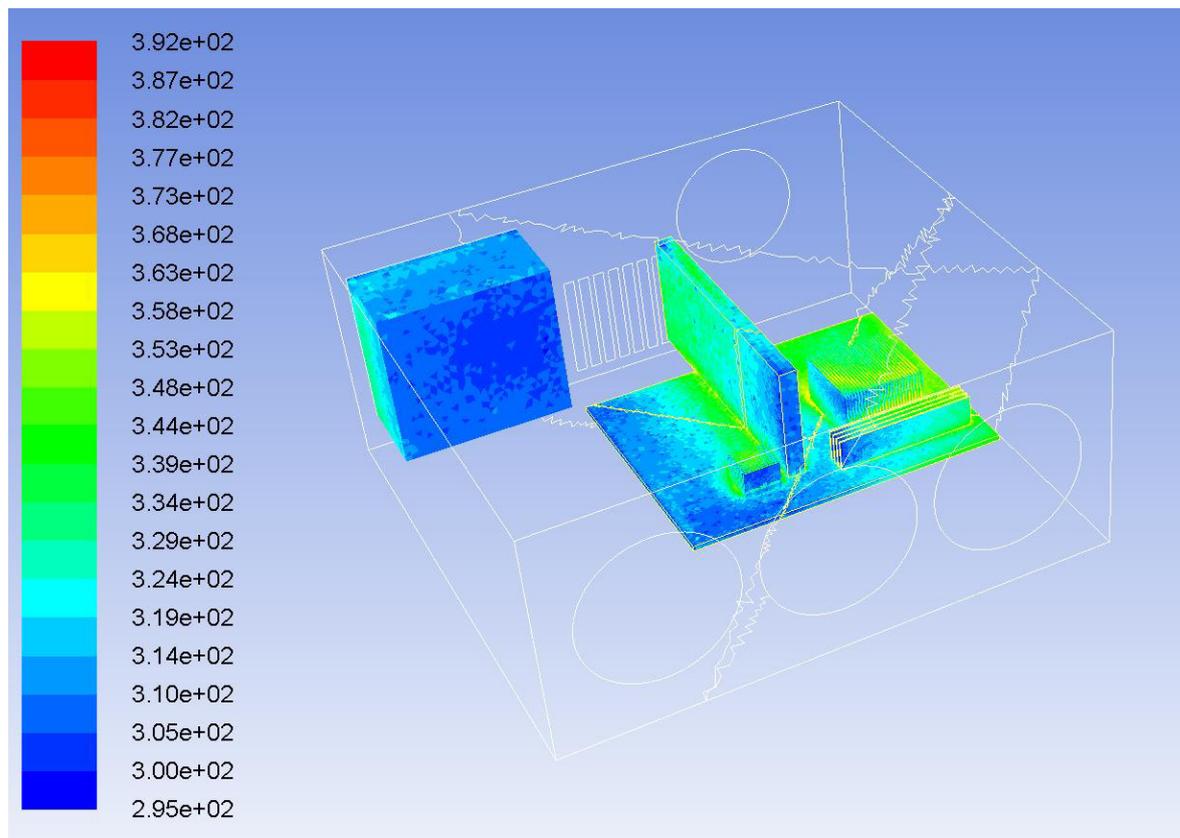
| | Temperatura Média (K) | Temperatura Média (°C) |
|----------------------|-----------------------|------------------------|
| GPU | 380,05 | 107,05 |
| CPU | 367,61 | 94,61 |
| Fonte | 343,59 | 70,59 |
| DDR4 - 1 | 350,63 | 77,63 |
| DDR4 - 2 | 351,88 | 78,88 |
| DDR4 - 3 | 352,58 | 79,58 |
| DDR4 - 4 | 353,73 | 80,73 |
| Chipset | 354,04 | 81,04 |
| Placa mãe | 359,35 | 86,35 |
| Dissipador - Chipset | 352,85 | 79,85 |
| Dissipador - CPU | 364,43 | 91,43 |

Fonte: Resultados das simulações feitas no trabalho.

Contornos de temperatura estática e vetores de velocidade:

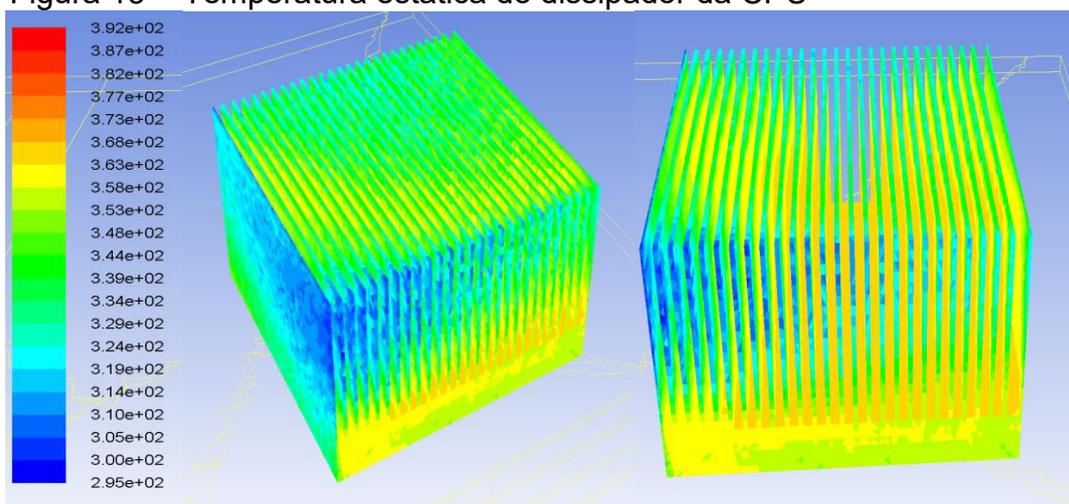
A Figura 14 apresenta contornos de temperatura estática mostrando os componentes eletrônicos e os dissipadores, uma vista aproximada do dissipador da CPU mostrando a temperatura estática é apresentada na Figura 15. As temperaturas dos contornos estão em uma faixa de 295 K – 392 K, a mesma faixa da sessão 5.1. A Figura 16 apresenta vetores de velocidade nas paredes do dissipador da CPU coloridos por magnitude de velocidade.

Figura 14 - Temperatura estática dos componentes para o caso 2



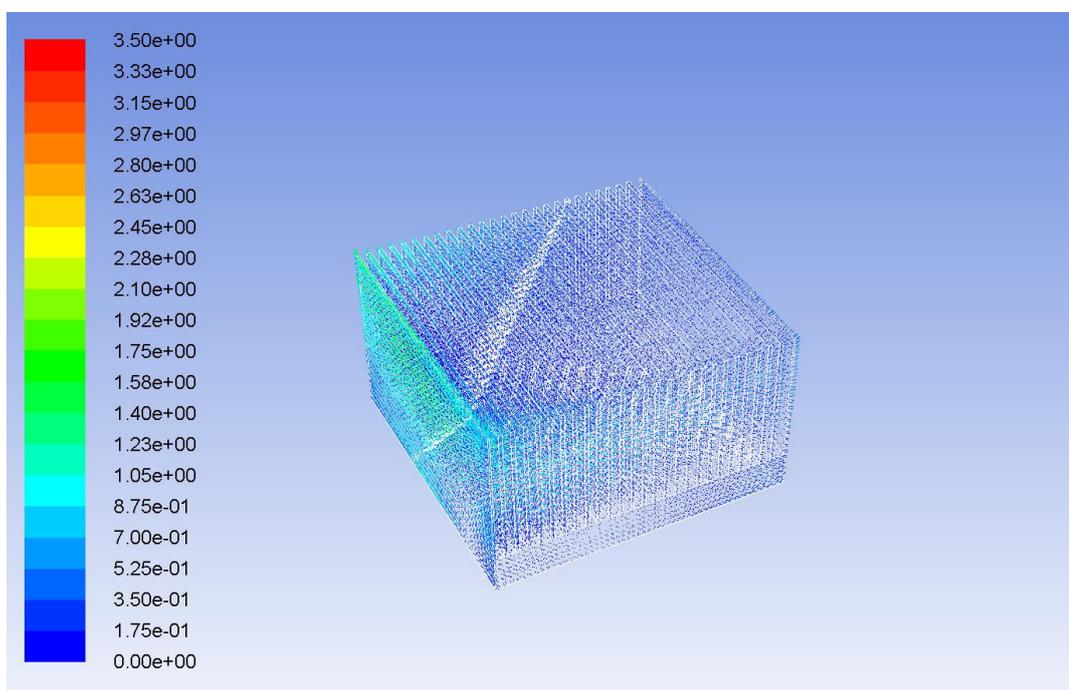
Fonte: Autor.

Figura 15 - Temperatura estática do dissipador da CPU



Fonte: Autor

Figura 16 - Vetores de velocidade coloridos por magnitude nas paredes do dissipador de calor da CPU.



Fonte: Autor.

5.2.2 Efeito dos dissipadores de calor na temperatura do sistema

A relação entre velocidade do escoamento e temperatura mostrada na sessão 5.1.6 destaca a importância de um dissipador de calor montado na CPU, no caso 1, sem um dissipador, a CPU não tinha nenhuma superfície em contato direto com o escoamento, o seu resfriamento foi comprometido e uma área de alta concentração de calor foi formada na CPU. O dissipador de calor aumenta a área de transferência de calor e está em contato direto com o fluido refrigerante, então dois novos fatores auxiliam a dissipação de energia. A adição do dissipador de calor resultou em uma queda de temperatura de 23,77°C na temperatura da CPU.

Parte do calor conduzido da CPU e do chipset para outros componentes eletrônicos é agora dissipado pelo escoamento, isso causa uma diminuição geral da temperatura do sistema.

Das Figuras 14 e 15 é possível observar que as regiões de parede próximas a áreas de alta velocidade de escoamento estão a uma temperatura mais baixa no dissipador da CPU. Também é notável que a temperatura sobe ao se distanciar das paredes externas do dissipador, chegando ao seu valor mais alto no meio da estrutura. Isso indica que o ângulo das aletas em relação ao escoamento

não é ideal, dessa forma o escoamento não passa de maneira própria pelas aletas e as faces não são resfriadas de maneira ótima nas suas extensões.

5.3. Caso 3 – Sistema refrigerado por ar com dissipadores e ventoinha interna

No terceiro caso, a ventoinha da CPU foi adicionada no sistema, a malha foi atualizada para a nova geometria, a nova malha gerada tem um total de 1,686,709 elementos. Uma nova definição de condição de contorno foi adicionado no solver para representar a mudança no momento do escoamento causada pela nova ventoinha, duas simulações foram realizadas, uma mantendo todos os componentes modelados como de alumínio e outra mudando o material da CPU e chipset para silicone e o material da placa mãe e memórias Ram para FR4, isso foi feito para melhorar a precisão dos resultados quando comparando o modelo ao sistema real.

5.3.1 Caso 3 – Resultados

Temperatura estática média:

A Tabela 8 apresenta resultados para temperatura estática média, avaliada nos volumes dos componentes e dos dissipadores.

Tabela 8 - Resultados de temperatura estática média (T) dos componentes e dissipadores para as simulações com alumínio e com materiais diversos.

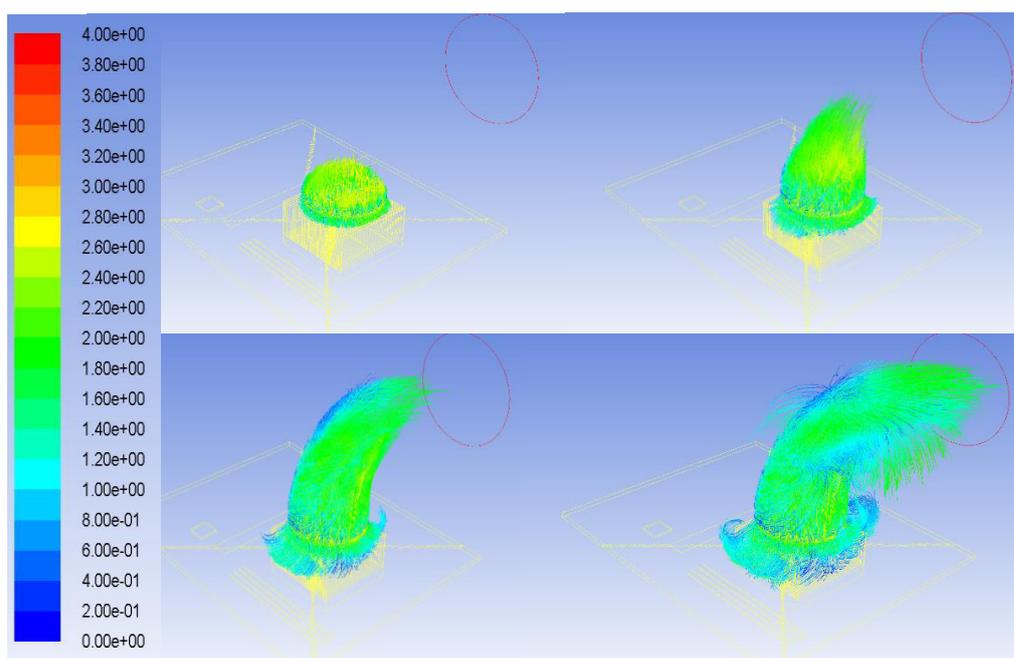
| | Alumínio | | Materiais diversos | |
|----------------------|----------|--------|--------------------|--------|
| | T (K) | T (°C) | T (K) | T (°C) |
| GPU | 367,30 | 94,30 | 446,44 | 173,44 |
| CPU | 336,23 | 63,23 | 357,94 | 84,94 |
| Fonte | 344,37 | 71,37 | 347,76 | 74,76 |
| DDR4 - 1 | 334,72 | 61,72 | 316,84 | 43,84 |
| DDR4 - 2 | 335,73 | 62,43 | 320,53 | 47,53 |
| DDR4 - 3 | 335,66 | 62,66 | 321,70 | 48,70 |
| DDR4 - 4 | 335,76 | 62,76 | 323,59 | 50,70 |
| Chipset | 340,99 | 67,99 | 301,85 | 28,85 |
| Motherboard | 343,33 | 70,33 | 318,53 | 45,53 |
| Dissipador - Chipset | 340,00 | 56,76 | 301,82 | 28,82 |
| Dissipador - CPU | 329,76 | 56,76 | 322,84 | 49,84 |

Fonte: Autor.

Pathlines de velocidade:

A Figura 17 apresenta Pathlines de velocidade lançados da ventoinha da CPU. O número de passos foi aumentado entre capturas para melhor visualização do comportamento do escoamento. Da esquerda para a direita, o número de passos é 20-40-60-80, o tamanho do passo é 0,01m

Figura 17 - Pathlines de velocidade lançadas da ventoinha da CPU.

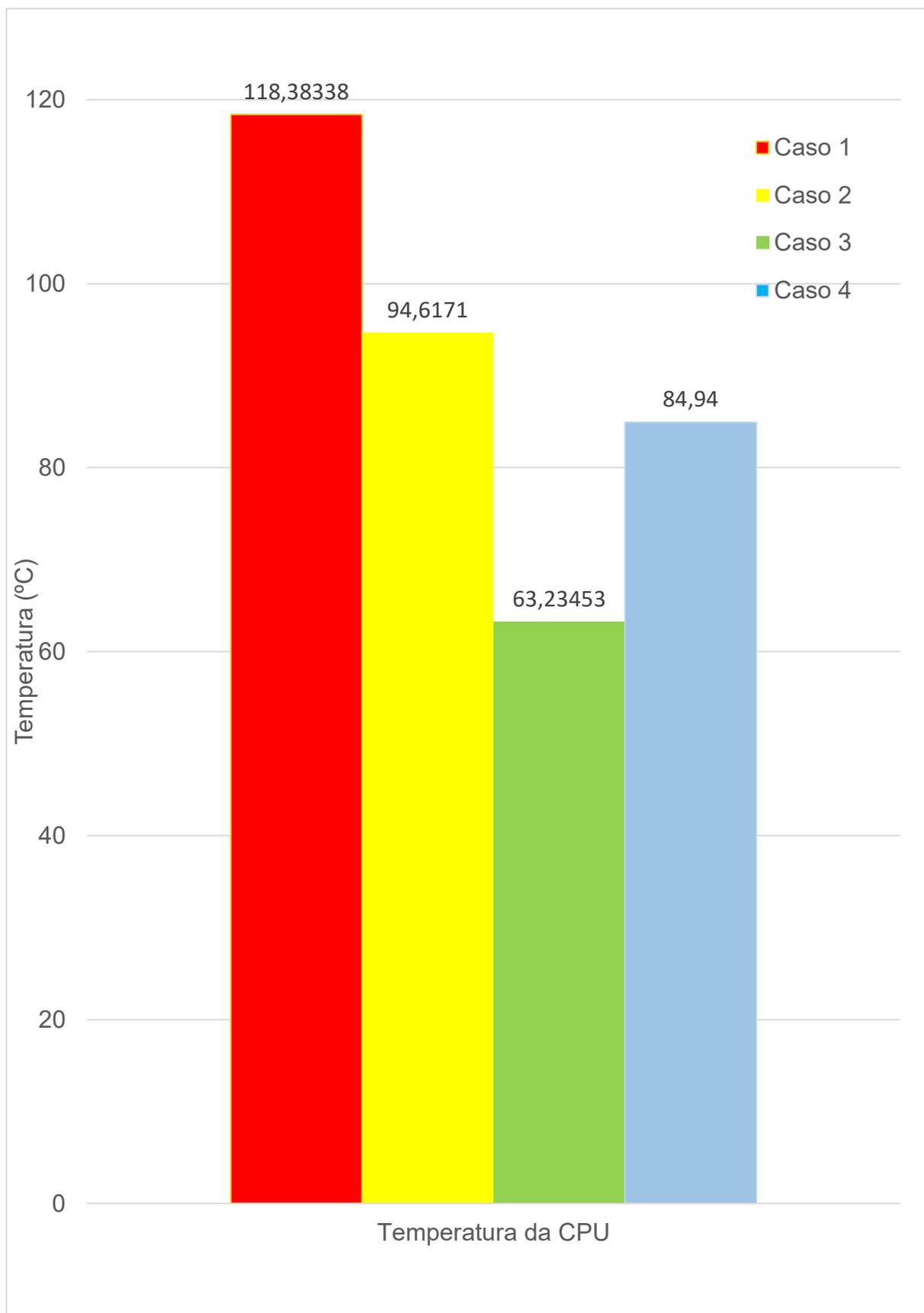


Fonte: Autor

Comparativo da temperatura da CPU entre simulações:

As mudanças na temperatura da CPU para os três sistemas de refrigeração são mostradas na Figura 18. Em vermelho temos o sistema apenas com a ventoinha do gabinete e os componentes, em amarelo a adição dos dissipadores de calor, em verde a adição da ventoinha interna do processador e em azul a última simulação com os materiais corretos definidos aos componentes.

Figura 18 - Temperatura da CPU em diferentes esquemas de refrigeração.



Fonte: Autor.

5.3.2 Efeito da ventoinha da CPU na temperatura do sistema

A ventoinha modelada no caso 3 não foi uma representação precisa de uma ventoinha real de CPU pois estava apenas ventilando ar para o topo da cabine e não sugando ar quente da superfície do dissipador como uma ventoinha exaustora faz, mesmo assim, todas as temperaturas dos componentes diminuíram ao se adicionar a ventoinha ao modelo, a CPU teve a maior melhoria, com uma queda de temperatura de 31,38°C quando comparada a simulação contendo apenas o dissipador de calor. A região de parede da placa mãe agora estava sendo ventilada de maneira própria. Na Figura 16 é possível notar as características turbulentas do escoamento da ventoinha.

5.4 Precisão do modelo e limitações

Pelo gabinete ter características bem particulares, os resultados da análise não puderam ser validados quantitativamente com a literatura existente, a melhor maneira de validar os resultados das simulações seria fazer testes experimentais em um computador real com configurações similares, medindo a temperatura dos componentes.

O efeito refrigerante causado pelos dissipadores estão também apresentados no trabalho de Xu et al (2014), resultados que qualitativamente concordam com o cenário real. Os resultados dos três primeiros casos não podem ser comparados quantitativamente com um gabinete real pois alumínio foi escolhido como o material de todos os componentes nas simulações.

Mesmo não validando diretamente os resultados, o procedimento tomado para fazer o estudo foi baseado em análises prévias presentes na literatura para refrigeração eletrônica, em livros texto sobre CFD e em tutoriais presentes no guia do usuário do ANSYS®.

Para comparar o modelo com um gabinete real os resultados da última simulação deveriam ser usados, já que nessa simulação os materiais corretos foram aplicados aos componentes. Das temperaturas presentes na Tabela 7, ambas as temperaturas da CPU e da GPU estão acima da T_{CASE} especificada pelos fabricantes, então o esquema de refrigeração usado no modelo é considerado ineficaz. Não se pode afirmar com certeza se um esquema similar iria ser capaz de refrigerar o sistema real, já que existem várias simplificações e suposições no modelo.

O modelo em CFD poderia ser melhorado adicionando mais componentes dentro do gabinete para sua melhor representação, também detalhando mais a estrutura dos componentes, incluindo características geométricas que podem fazer diferença na maneira em que o calor é dissipado. Os modelos das ventoinhas também poderiam ser melhorados incluindo as características geométricas das pás, tendo um escoamento mais realista. Entretanto, essas melhorias na complexidade do modelo iriam ter um alto custo computacional, uma malha bem mais refinada seria necessária e a duração das simulações iriam aumentar consideravelmente. Por falta de recursos computacionais e informações detalhas sobre a geometria dos componentes e seus materiais, sistemas mais complexos não puderam ser modelados nesse projeto.

6. CONCLUSÃO

A implementação de um modelo em CFD para representar um caso de refrigeração eletrônica foi bem sucedido, a relação entre temperatura de componente e velocidade de escoamento foi discutida usando os resultados das simulações para suportar os argumentos. Foi mostrado que a temperatura é mais baixa em áreas de alta velocidade de escoamento.

Foi confirmado que montar dissipadores de calor no topo da CPU e do chipset tem um efeito refrigerante, resultados quantitativos e qualitativos foram apresentados para suportar a afirmação, o efeito refrigerante foi mostrando comparando-se o resultado de diferentes simulações.

Ao adicionar uma ventoinha interna, a temperatura do sistema diminuiu. A temperatura da CPU teve a maior queda, baixando um total de 31,38°C.

O esquema de refrigeração foi considerado ineficaz para refrigerar o gabinete no modelo em CFD. Todos os objetivos da análise foram alcançados.

REFERÊNCIAS

1. Arularasan, R.; Velraj, R. CFD Analysis in a Heat Sink for Cooling of Electronic Devices. **International Journal of the Computer, the Internet and Management**, v. 16, n. 3, p. 1-11, 2008
2. Anandakrishnan, M.; Balaji, C. CFD Simulations of Thermal and Flow Fields Inside a Desktop Personal Computer Cabin with Multi-core Processors. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 3, n. 2, p. 277-288, 2009.
3. Ozturk, E.; Tari, I. Forced Air Cooling of CPUs With Heat Sinks: A Numerical Study. **Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on**, v. 31, n. 3, p. 650 – 660, 2008.
4. Tatchell, D.; Parry, J.; Clark, I. Advances in Cooling With CFD. In: NAFEMS WORLD CONGRESS, Salzburg, 2013.
5. Stafford, J.; Fortune, F. Investigation of Multiple Miniature Axial Fan Cooling Solutions and Thermal Modeling Approaches. **Journal of Electronic Package**, v. 136, n. 1, p. 1013 – 1025, 2014.
6. Xu, S.; Guo, Z.; Hu, G.; Chen, W.; Lewis, R.; Wong, C.N. Thermal and Flow Fields in Single Board Computer Cabin Systems Using CFD Analysis. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v.8, n. 4, p. 574 – 585, 2014.
7. Yu, C.W.; Webb, R.L. 2001. Thermal design of a desktop computer system using CFD analysis. In: SEMICONDUCTOR THERMAL MEASUREMENT AND MANAGEMENT SYMPOSIUM, San Jose: IEEE, 2008. p. 18 – 26.
8. Bergman, T. L.; Lavine, A.S.; Incropera F.P.; Dewitt, D.P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. Wiley, 2011.

9. Pritchard, P.J. **Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics**. Wiley, 2011.
10. Tu, J.; Yeoh, G.H.; Liu, C. **Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach**. Butterworth Heinemann, 2008.
11. Shires, A. Aula 3: Mesh Generation. [PowerPoint slides acessados pelo VLE]. **MECH5770M Computational Fluid Dynamics Analysis**. University of Leeds, 2015.
12. Behnia, M.; Nakayama, W.; Wang, J. CFD simulations of heat transfer from a heated module in an air stream: Comparison with experiments and a parametric study. *PROC. IEEE INTER SOC. CONF. THERMAL PHENOMENA*, p. 143–151, 1998
13. Aberdeen Group. Electronics – Correct by Design, **Benchmark Report**. 2007
14. Wikipedia. **AMD Heatsink and fan**. 2006. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_sink>. Acesso em: 01 Mai. 2016.
15. Cooler Master Technology Inc. **MasterAir Maker 8 imagem**. 2016. Disponível em: <<http://www.coolermaster.com/>>. Acesso em: 01 Mai. 2016.
16. Ozturk, E.; Tari, I. CFD Modeling of Forced Cooling of Computer Chassis. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 1, n. 4, p. 304 – 313, 2007
17. Linton, R.L.; Agonafer, D. Coarse and detail CFD modelling of a finned heat sink. **Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part A, IEEE Transactions on**, v. 18, n. 3, p. 517- 520, 1995.
18. Intel®. **Measuring Processor Power**. 2011. Disponível em: <www.intel.co.uk/content/dam/doc/white-paper/resources-xeon-measuring-processor-power-paper.pdf>. Acesso em: 20 out. 2015.

19. Tyacke, J.; Tucker, P.; Nithiarasu, P. 2008. Strategies for Modeling Turbulent Flows in Electronics. In: SEMICONDUCTOR THERMAL MEASUREMENT AND MANAGEMENT SYMPOSIUM, San Jose: IEEE, 2008 p. 39 – 45.
20. Intel®. **Intel® Core™ i7-6700K specifications**. 2015. Disponível em: <http://ark.intel.com/products/88195/Intel-Core-i7-6700K-Processor-8M-Cache-up-to-4_20-GHz>. Acesso em: 23 dez. 2015.
21. Wikipedia. **LGA 1151**. 2015. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/LGA_1151>. Acesso em: 23 dez. 2015.
22. ©ASUSTeK Computer Inc. **ASUS Maximus VIII Ranger User guide**. 2015. Disponível em: <<https://www.asus.com/uk/Motherboards/>>. Acesso em: 23 dez. 2015.
23. Wikipedia. **DDR4 SDRAM**. 2015. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/DDR4_SDRAM#Module_packaging>. Acesso em: 23 dez. 2015.
24. Tom's Hardware. **Intel® Core i7-5960X, -5930K, and -5820K CPU Review: Haswell-E Rises**. 2014. Disponível em: <<http://www.tomshardware.co.uk/intel-core-i7-5960x-haswell-e-cpu,review-33029-13.html>>. Acesso em: 23 dez. 2015.
25. Tech Radar. **10 best graphics cards in the world**. 2015. Disponível em: <<http://www.techradar.com/news/computing-components/graphics-cards/best-graphics-cards-1291458>>. Acesso em: 24 dez. 2015.
26. NVIDIA. **GeForce® GTX TITAN X specifications**. 2015. Disponível em: <<http://www.geforce.co.uk/hardware/desktop-gpus/geforce-gtx-titan-x>>. Acesso em: 24 dez. 2015.

27. NZXT. **NZXT H440 specifications**. 2015. Disponível em: <<https://www.nzxt.com/products/h440-white>>. Acesso em: 24 dez. 2015.
28. Corsair. **CX Series™ CX750M – 750 Watt 80 PLUS® Bronze certified modular ATX PSU (2015 edition)**. 2015. Disponível em: <<http://www.corsair.com/en-gb/cx-series-cx750m-750-watt-80-plus-bronze-certified-modular-atx-psu-na>>. Acesso em: 24 dez. 2015.
29. Wikipedia. **80 plus**. 2015. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/80_Plus>. Acesso em: 24 dez. 2015.
30. Corsair. **Air series AF120 LED Blue Quiet edition high airflow 120mm fan – Twin pack**. 2015. Disponível em: <<http://www.corsair.com/en-us/air-series-af120-led-blue-quiet-edition-high-airflow-120mm-fan-twin-pack>>. Acesso em: 24 dez. 2015.
31. Wikipedia. **Mach number**. 2015. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Mach_number>. Acesso em: 06 jan. 2015.
32. ANSYS®. **ANSYS® Fluent User's Guide V15**. 2013.
33. Gilkeson, C. Aula 4: Boundary Conditions. [Arquivo .pdf acessado pelo VLE] **MECH5770M Computational Fluid Dynamics Analysis**. University of Leeds, 2015.

ANEXO A – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Tabela 12 - Propriedades dos materiais usados nas simulações.

| | Calor específico | Massa específica | Condutividade térmica |
|------------------|------------------|------------------------|-----------------------|
| Alumínio | 871 k/kg.K | 2719 kg/m ³ | 202,4 w/m.k |
| FR4 – EL190T | 950 k/kg.K | 1850 kg/m ³ | 0,45 w/m.k |
| Silicone (25°C) | 702,24 k/kg.K | 2330 kg/m ³ | 1,56 w/m.k |

Fonte: Banco de dados do Fluent.