



Serviço Público Federal
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais - Mestrado



**ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UM DISSIPADOR DE
CALOR PARA USO EM FONTES LED RGB POR MEIO DE ANÁLISE
DE MATERIAIS, GEOMETRIAS E SIMULAÇÕES
COMPUTACIONAIS.**

Thiago Lopes Quevedo



Serviço Público Federal
Ministério da Educação

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais - Mestrado



**ESTUDO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE UM DISSIPADOR DE
CALOR PARA USO EM FONTES LED RGB POR MEIO DE ANÁLISE
DE MATERIAIS, GEOMETRIAS E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS**

Thiago Lopes Quevedo

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Ciência dos
Materiais – Nível de Mestrado – da
Universidade Federal de Mato Grosso
do Sul para exame de qualificação.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Leite de Oliveira

CAMPO GRANDE / MS – 2018

AGRADECIMENTOS

- A Deus e a minha família;
- À FUNDECT, CNPq, CAPES e UFMS pelo apoio a pesquisa acadêmica;
- Ao Prof. Dr. Samuel Leite de Oliveira pelo apoio e orientação;
- Ao Prof. Dr. Anderson Rodrigues Lima Caires pelo apoio e sugestões;
- Ao Prof. Dr. João Vítor Batista Ferreira pelo apoio e sugestões;
- Ao Prof. Dr. José Eduardo de Arruda e ao Técnico em Eletrônica Esmael Dias Prado pela elaboração do projeto do Emissor de Luz que foi utilizado como parâmetro no trabalho;
- Aos colegas de laboratório por toda ajuda;
- Aos professores do programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais da UFMS;
- A Dra. Vanessa Felipe de Souza e os Engenheiros Douglas Laertes de Freitas e Rafael Henrique de Oliveira por todo apoio.

RESUMO

O desenvolvimento de dispositivos eletrônicos, que desempenham funções cada vez mais complexas na busca de melhores desempenhos, trouxe como consequência aumento na geração de energia térmica nesses dispositivos, sendo, portanto, imprescindível a utilização de trocadores de calor. No entanto, equipamentos cujos dissipadores não apresentam desempenhos satisfatórios têm problemas com excesso de energia térmica não dissipada, a qual compromete a integridade e as funcionalidades destes. Assim, a construção de dispositivos para arrefecimento deve ser baseada em parâmetros de desempenho que tornem possível a refrigeração do equipamento com excesso de energia térmica. Atualmente, tem sido reportado o emprego de fontes de luz para uso em fototerapia dinâmica e no controle populacional de larvas *Aedes Aegypti*. Entretanto, o uso de equipamentos de iluminação na fototerapia e fotocontrole dinâmico revela a necessidade de adotar-se dissipadores térmicos mais eficientes. No presente trabalho, buscou-se investigar dissipadores de maior eficiência para tais fontes de iluminação, por meio de um estudo teórico-experimental, adotando-se *softwares* de modelagem e simulações aliados a medições experimentais. A validação dos resultados obtidos nos *softwares* e simulações foi verificada através dos dados coletados de um dissipador de calor/fonte de iluminação já utilizado para fins de fototerapia e fotocontrole. Seguindo a proposta de melhorar o desempenho da dissipação térmica, foram projetados dissipadores com geometrias e materiais diferentes. Posteriormente a elaboração dos projetos, os mesmos foram inseridos em simulações de desempenho. As simulações de energia térmica e de fluxo de calor foram produzidas na plataforma CFD (*Computational fluid dynamics*). As simulações possibilitaram a análise de condução térmica, fluxo de calor e variação de temperatura nas diferentes configurações propostas.

Palavras-Chave: Dissipação de calor, Simulação computacional, Modelagem, Análise de materiais.

ABSTRACT

With the development of electronic devices, which perform increasingly complex functions in the pursuit of better performance, high production of thermal energy has become unavoidable, requiring the use of heat exchangers. In many equipment where the performance of the heatsink is not satisfactory, the excess heat generated almost always irreversibly compromise the integrity of the equipment. Thus, the construction of cooling devices must be based on performance parameters that make it possible to refrigerate an equipment with excess thermal energy. Currently, the use of light sources for use in dynamic phototherapy and in the population control of *Aedes Aegypti* larvae has been reported. However, the use of lighting equipment in phototherapy and dynamic photocontrol reveals the need to adopt efficient heat sinks. In the present work we investigated more efficient dissipators for such lighting sources by means of a theoretical-experimental study adopting modeling software and simulations allied to experimental measurements. The validation of the results provided by the software was performed based on the data collection of a heat sink / light source already used for phototherapy and photocontrol purposes. Following the proposal to improve the performance of thermal dissipation, we designed a series of dissipators with different geometries and materials, after the elaboration of the projects they were inserted in performance simulations. The simulation of thermal energy and heat flow was performed with the CFD (Computational fluid dynamics) platform. The simulations enabled the analysis of thermal conduction, heat flux and temperature variation in the different proposed configurations.

Keywords: Heat dissipation, Computer simulation, Modeling, Materials analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - LED RGB SMD, dispositivo dimensionado para atuar em superfícies planas e emitir até quatro cores, vermelho, verde, azul e branca (junção das três cores anteriores).	19
Figura 2 - Junção P-N formada pelo semiconductor do tipo P e do tipo N, o lado P as lacunas são portadores majoritários, e os elétrons portadores minoritários, no lado N os elétrons são portadores majoritários, e as lacunas os portadores minoritários.	20
Figura 3 - Nomenclatura dos elementos que compõem um LED de alto desempenho.	20
Figura 4 - Dissipadores de calor com aletas retangulares e circulares respectivamente.	21
Figura 5 - O conjunto de nodos representa o volume que por sua vez representar a malha.	23
Figura 6 - Malha Ortogonal representada por geometrias uniformes.	25
Figura 7 - Refino da malha ortogonal aumentando a quantidade de cálculos executados.	26
Figura 8 - Malha não ortogonal com presença de refinamento nas extremidades da geometria.	26
Figura 9 - Representação da variação de K em cada nó do elemento de malha.	28
Figura 10 - Malhas de elementos finitos classificadas como primeira segunda e terceira ordem, representadas respectivamente pelas letras (A), (B e D) e (C).	29
Figura 11 - Demonstração da malha por análise de elementos finitos (Suporte do dissipador).	30
Figura 12 - Vista do corte no meio do módulo no sentido axial, observando os pontos de medição e nomenclatura dos componentes.	33
Figura 13 - Temperatura inicial do emissor de luz, da esquerda para a direita a temperatura inicial medida pela câmera térmica e a imagem de referência do equipamento para melhor compreensão da imagem térmica.	34
Figura 14 - Coleta da velocidade do ar de cada ventilador.	34
Figura 15 - Marcação dos pontos superiores dos módulos e ventiladores, vista superior dos módulos do emissor de luz.	36
Figura 16 - Marcação dos pontos laterais de cada módulo do emissor de luz.	37
Figura 17 - Fontes de energia do emissor de luz e módulos ajustados para a utilização.	38
Figura 18 - Nomenclatura dos componentes internos dos módulos, vista da extremidade do módulo.	40
Figura 19 - LEDs fixados no suporte do módulo com as bases 1 e 2 que apoiam o módulo no suporte.	40

Figura 20 - Imagens térmicas do emissor de luz em funcionamento, à esquerda a imagem térmica da câmera Infravermelho seguido pela imagem de referência.	42
Figura 21 - Pontos de coleta de temperatura da lateral do módulo 1, referência das medidas do sensor termopar e da imagem térmica.	43
Figura 22 - Imagem térmica dos pontos da lateral do módulo 1 do emissor de luz.	43
Figura 23 - Pontos de medição de temperatura no módulo 1 pela vista superior.	44
Figura 24 - Imagem térmica dos pontos superiores do módulo 1 demonstrando o crescente aumento de temperatura do ponto 1 ao ponto 12.	44
Figura 25 - Modelagem do ventilador com desenho em duas e três dimensões (mm).	45
Figura 26 - Vista explodida do módulo do emissor de luz, sendo composto por um total de 60 elementos.	46
Figura 27 - Vista frontal do módulo, representando as cotas e componentes ocultos em outras vistas.	46
Figura 28 - Vista inferior do módulo e vista lateral esquerda com a cota de altura do módulo e da base.	47
Figura 29 - Vista explodida do LED com nomenclatura de cada elemento.	47
Figura 30 - Modelagem da prancha e suportes do emissor de luz, vista frontal e superior à esquerda da imagem à vista isométrica com nomenclatura.	48
Figura 31 - Vista explodida à esquerda e dispositivo emissor de luz montado com a nomenclatura dos componentes.	48
Figura 32 - Imagem dos planos de visualização do emissor luz com a nomenclatura das vistas.	49
Figura 33 - Vista Isométrica da simulação térmica do emissor luz.	51
Figura 34 - Análise térmica da vista frontal do emissor de luz (lateral do módulo 4).	51
Figura 35 - Análise térmica da vista posterior do emissor de luz com o gradiente de temperatura do módulo 1.	51
Figura 36 - Temperatura nos pontos da lateral do módulo 1 do emissor de luz.	52
Figura 37 - Temperatura nos pontos da lateral do módulo 2 do emissor de luz.	52
Figura 38 - Temperatura nos pontos da lateral do módulo 3 do emissor de luz.	52
Figura 39 - Temperatura nos pontos da lateral do módulo 4 do emissor de luz.	53
Figura 40 - Temperaturas da superfície superior da aleta do módulo 1 do emissor de luz.	53
Figura 41 - Temperaturas da superfície superior da aleta do módulo 2 do emissor de luz.	54
Figura 42 - Temperaturas da superfície superior da aleta do módulo 3 do emissor de luz.	54
Figura 43 - Temperaturas da superfície superior da aleta do módulo 4 do emissor de luz.	54

Figura 44 - Fluxo de ar com o ventilador modelado, a velocidade do fluido em 6 m/s.	55
Figura 45 - Vista frontal das regiões do ventilador, com as divisões de região direita, central e esquerda.	56
Figura 46 - Vista frontal do módulo com a nomenclatura de elementos.	56
Figura 47 - Vista lateral esquerda demonstrando o alinhamento dos ventiladores e módulos.	57
Figura 48 - Vista isométrica e superior, análise do fluxo de ar na entrada dos módulos pelos ventiladores até a extremidade dos dissipadores.	57
Figura 49 - Vista frontal da análise do fluido, indicando a dispersão da passagem do ar pelos módulos de refrigeração.	58
Figura 50 - Vista Posterior da simulação do emissor de luz, análise da dispersão do fluido no módulo 1.	58
Figura 51 - Vista da lateral esquerda, representando o fluxo de ar direcionado para a esquerda do dispositivo.	58
Figura 52 - Comparativo das imagens da câmera infravermelho e simulação térmica.	59
Figura 53 - Comparativo de temperatura entre os pontos laterais do emissor de luz utilizando a câmera térmica, sensor termopar e os dados de simulação (Flow Simulation).	60
Figura 54 - Temperaturas dos pontos superiores entre os dados coletados do emissor de luz e com a câmera térmica e sensor termopar com a simulação.	61
Figura 55 - Região do plano de corte de cada módulo do emissor de luz representados pelas letras A, B, C e D.	62
Figura 56 - Numeração dos pontos de medição de temperatura representados por uma vista frontal do módulo 1.	62
Figura 57 - Corte no plano “A” (módulo 1) com os dados de temperatura do dissipador.	63
Figura 58 - Corte no plano “B” (módulo 2) com os dados de temperatura do dissipador.	63
Figura 59 - Corte no plano “C” (módulo 3) com os dados de temperatura do dissipador.	63
Figura 60 - Corte no plano “D” (módulo 4) com os dados de temperatura do dissipador.	64
Figura 61 - Temperaturas dos pontos internos referentes aos planos de corte (A, B, C e D) dos módulos 1 ao 4.	64
Figura 62 - Vista isométrica e lateral direita com a linha de corte e análise da temperatura do fluido.	65
Figura 63 - Plano de corte da vista superior representando a temperatura do fluido na prancha.	65
Figura 64 - Vista isométrica e lateral direita representando a linha de corte da temperatura do fluido rente aos LEDs.	66

Figura 65 - Vista Inferior com a temperatura do fluido na base dos dissipadores e rente aos LEDs, maior registro de temperatura foi de 45,5 °C.	66
Figura 66 – Plano de corte da temperatura do fluido entre os módulos e ventiladores, observados pela vista isométrica e frontal.	67
Figura 67 - Vista lateral esquerda - Temperatura do fluido com o plano de corte próximo aos ventiladores.	67
Figura 68 - Vista Isométrica e frontal com a posição do plano de corte no meio do dissipador.	68
Figura 69 - Vista lateral esquerda - Temperatura do fluido no meio dos módulos, maior temperatura registrada no módulo 1.	68
Figura 70 - Vista Isométrica e Vista frontal com linha de corte na extremidade dos módulos.	69
Figura 71 - Vista lateral esquerda, extremidade dos módulos, maior temperatura do fluido no módulo 1.	69
Figura 72 – Análise da temperatura do fluido pela vista isométrica e lateral direita, o plano de corte no feito no módulo 1.	70
Figura 73 - Vista frontal do corte vertical no módulo 1, análise da temperatura do fluido.	70
Figura 74 - Vista Isométrica da modelagem em 3 dimensões da canaleta de ar usada para otimizar a transferência de calor.	71
Figura 75 - Vista frontal e lateral esquerda da canaleta da canaleta com as cotas (mm) apresentadas.	71
Figura 76 - Vista lateral direita e lateral esquerda do emissor de luz com a adaptação 7 (canaletas com ventiladores centralizadas e afastados em 3 cm dos módulos).	71
Figura 77 - Vista Isométrica da simulação térmica do modelo otimizado com as canaletas em modo visível.	72
Figura 78 - Vista Isométrica da Análise térmica do equipamento emissor de luz e otimizado	73
Figura 79 - Comparativo de temperatura do emissor de luz e a adaptação 7.	73
Figura 80 - Região de corte - Módulo 1, Vista lateral direita com linha de corte no meio do módulo.	74
Figura 81 – Temperatura do fluido no equipamento emissor de luz com o corte no módulo 1.	74
Figura 82 - Análise da temperatura do fluido na adaptação 7, indicando unidades de temperaturas inferiores ao modelo utilizado pelo emissor de luz.	75

Figura 83 - Vista frontal do emissor de luz indicando a dissipação do fluxo de ar nos módulos.	75
Figura 84 - Vista frontal da adaptação 7, indicando o aproveitamento do fluxo de ar em todo o módulo.	75
Figura 85 - Análise da dissipação do fluido do emissor de luz e do adaptação 7.	76
Figura 86 - Vista superior do fluxo de ar do emissor de luz e adaptação 7.....	76
Figura 87 - Vista frontal e lateral esquerda do dissipador - dissipador em leque, representado por suas cotas.....	77
Figura 88 - Vista explodida e os componentes que integram cada módulo do dissipador em leque.....	77
Figura 89 - Representação das vistas do dissipador em leque.....	78
Figura 90 - Dissipador em leque montado para a simulação representado a nomenclatura de cada componente externo.	79
Figura 91 - Vista isométrica do dispositivo do dissipador em leque, representando a temperatura da canaleta e dos módulos com canaletas invisíveis.	79
Figura 92 - Vista frontal do módulo 1 demonstrando o acréscimo de temperatura da esquerda para a direita e a diminuição de baixo para cima.	80
Figura 93 - Vista superior do dispositivo do dissipador em leque com numeração dos módulos representadas de baixo para cima.	80
Figura 94 - Planos de corte dos módulos representados pelas linhas (A, B, C e D), vista lateral.	81
Figura 95 - Marcação dos pontos de medição no módulo 1, corte no meio do módulo representados pelo plano "A" – Vista frontal.....	81
Figura 96 - Corte no plano "A" (módulo 1) com as medições de temperatura em um acréscimo dos pontos da esquerda para a direita.	81
Figura 97 - Corte no plano "B" (módulo 2) com as medições de temperatura em um acréscimo dos pontos da esquerda para a direita.	82
Figura 98 - Corte no plano "C" (módulo 3) com as medições de temperatura em um acréscimo dos pontos da esquerda para a direita.	82
Figura 99 - Corte no plano "D" (módulo 4) com as medições de temperatura em um acréscimo dos pontos da esquerda para a direita.	82
Figura 100 - Temperatura em função aos pontos de medição no corte dos módulos do dissipador em leque.....	83

Figura 101 - Vista isométrica e lateral esquerda com o plano de medição da temperatura do fluido do dissipador em leque.....	83
Figura 102 - Vista superior - Temperatura do fluido na prancha com o plano de medição.	84
Figura 103 - Vista Isométrica e lateral esquerda com o plano de medição da temperatura do fluido rente à superfície dos LEDs do dissipador em leque.	84
Figura 104 - Vista Inferior da temperatura do fluido na base do dissipador do dissipador em leque, onde o maior registro de temperatura foi de 52,96 °C.....	85
Figura 105 - Vista Isométrica e Frontal com linha de corte do dissipador em leque.	85
Figura 106 - Vista lateral direita - Temperatura do fluido próximo aos ventiladores do dissipador em leque.....	86
Figura 107 - Vista Isométrica e Vista frontal com o plano de medição no meio do dissipador em leque.....	86
Figura 108 - Vista lateral direita - Temperatura do fluido no meio do módulo dissipador em leque.....	87
Figura 109 - Vista Isométrica e Vista frontal com o plano de medição na extremidade do dissipador em leque.	87
Figura 110 - Vista lateral direita - Temperatura do fluido na extremidade do módulo do dissipador em leque.	88
Figura 111 - Vista Isométrica e Lateral esquerda com o plano de medição do fluido do módulo 1 no sentido axial do dissipador em leque.....	88
Figura 112 - Vista frontal do corte axial do módulo 1, temperatura do fluido no módulo 4. ..	89
Figura 113 - Vista Isométrica do fluxo de ar com canaleta aparente e invisível, respectivamente da esquerda para a direita do dissipador em leque, representando a velocidade do fluido.	89
Figura 114 - Vista superior do fluxo de ar demonstrando a velocidade do entre os módulos.	90
Figura 115 - Vista frontal do fluxo de ar indicando a resistência que a placa de circuito causa na lateral no dissipador.	90
Figura 116 - Vista lateral direita do fluxo de ar na extremidade dos módulos do dissipador em leque.....	90
Figura 117 - Análise térmica do projeto de dissipador com aletas verticais (Canaletas invisíveis).....	91
Figura 118 - Temperatura dos dissipadores com aletas verticais e do equipamento emissor de luz, no dissipador com aletas verticais.	92
Figura 119 - Análise térmica do projeto de dissipador com aletas circulares.	92

Figura 120 - Comparativo de temperatura do dissipador com aletas circulares e do emissor de luz. O dissipador com aletas circulares representa picos de temperaturas mais elevadas.....	93
Figura 121 - Comparativo de temperatura entre os dissipadores em leque, aletas circulares e aletas verticais.....	94
Figura 122 - Comparativo do dissipador em leque com alumínio e cobre.....	95
Figura 123 - Malha nível 2 com menor número de elementos.....	96
Figura 124 - Malha nível 3 com número de elementos mais elevado que no nível 2.	96
Figura 125 - Malha nível 4, com números mais elevados de elementos em relação as anteriores.	96
Figura 126 - Controle de malha do módulo 1 com a malha de nível 2 apresentando maior gradiente de temperatura.	97
Figura 127 - Controle de malha no módulo 2 com a malha de nível 2 apresentando em maior parte as menores temperaturas.....	97
Figura 128 - Controle de malha do módulo 3 com o nível 3 apresentando menores temperaturas na extremidade do módulo.	98
Figura 129 - Controle de malha do módulo 4, temperatura registrada nos diferentes pontos de análise adotando diferentes níveis de malha.....	98
Figura 130 - Definição dos pontos de marcação do emissor de luz e o dispositivo do dissipador em leque.....	101
Figura 131 - Comparativo das temperaturas do dissipador em leque, adaptação 7 e emissor de luz.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Propriedades do Alumínio 6165 T5 e do Cobre, materiais utilizados no estudo de dissipadores de calor.....	22
Tabela 2 - Resultado da medição da velocidade do fluxo de ar em cada ventilador.....	41
Tabela 3 - Velocidade do fluxo na extremidade dos dissipadores do Emissor de Luz.	42
Tabela 4 - Temperatura dos LEDs pelo sensor termopar nos módulos 1 e 4.....	43
Tabela 5 - Pontos de numeração realizados nos cortes (virtuais) de cada um dos módulos. ...	62
Tabela 6 - Pontos de numeração para medição de temperatura em cada módulo.	81
Tabela 7 - Dados gerais do controle de malha, número de cálculos e tempo percorrido.	96
Tabela 8 - Comparativo entre os gradientes de temperatura de todos os dissipadores.	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Grau Celsius
°F	Grau Fahrenheit
°R	Grau Rankine
A	Ampère
ABS	Acrilonitrilo-butadieno-estireno
CA	Corrente Alternada
cal/cm °C	Caloria por centímetro grau Celsius
CC	Corrente Continua
cm	Centímetro
dA	Elemento de área
dV	Elemento de volume
g/cm ³	Gramma por centímetro cúbico
GB	Gigabyte
J	Joule
K	Kelvin
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
m	Metro
m/°C	Metro por grau Celsius
mm	Milímetro
mW	Miliwatt
nm	Nanômetro
PLA	Ácido Poliláctico
PVC	Poricloreto de Vinila
RAM	Memória de acesso aleatório
Sø	Termo fonte da propriedade genérica
TB	Terabyte
V	Volt
Vca	Voltagem em Corrente Alternada
Vcc	Voltagem em Corrente Contínua
W	Watt

Letras gregas

Γ	Coeficiente de transporte da propriedade
ρ	Massa específica da propriedade
ϕ	Solução numérica da propriedade de interesse

Operador

∇	Operador nabla
$\nabla\phi$	Gradiente da propriedade

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	16
2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Transferência de calor por condução, convecção e radiação	18
2.2 Fonte de luz	19
2.3 Dissipador térmico.....	21
2.4 Programa.....	22
2.4.1 Método de volumes finitos	23
2.4.2 Malhas de volumes finitos.....	25
2.4.3 Elementos finitos	26
2.4.4 Malhas de elementos finitos	28
3 - OBJETIVOS.....	31
3.1 Objetivo geral	31
3.2 Objetivos específicos.....	31
4 - METODOLOGIA TEÓRICA EXPERIMENTAL	32
4.1 Equipamento emissor de luz.....	33
4.1.1 Características do emissor de luz	38
5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1 Coleta de dados do equipamento emissor de luz.....	41
5.2 Modelagem e montagem do equipamento emissor de Luz	44
5.2.1 Modelagem do ventilador.....	45
5.2.2 Modelagem e montagem do módulo	45
5.2.3 Modelagem do LED	47
5.2.4 Modelagem da prancha e do suporte	47
5.2.5 Montagem do equipamento simulando o emissor de luz	48
5.2.6 Referência das vistas do projeto no primeiro diedro	49
5.3 Simulação computacional.....	50

5.3.1 Simulação térmica da modelagem do emissor de luz.....	50
5.3.2 Simulação e análise do fluxo de ar	55
5.4 Comparativo entre dados experimentais e teóricos do emissor de luz	59
5.5 Análise do emissor de luz envolvendo simulações térmicas no interior dos módulos e a temperatura do fluido	61
5.5.1 Análise térmica com corte nos módulos do emissor de luz.....	61
5.5.2 Análise da simulação de temperatura do fluido no emissor de luz	64
5.6 Adaptações no emissor de luz	70
5.6.1 Comparativo térmico do equipamento emissor de luz e o modelo otimizado	72
5.6.2 Comparativo térmico do fluido entre o equipamento emissor de luz e o modelo otimizado	74
5.6.3 Comparativo do fluxo de ar entre o equipamento emissor de luz e o modelo otimizado	75
5.7 Dissipador em leque	76
5.7.1 Análise térmica do dissipador em leque	79
5.7.2 Análise da temperatura do fluido do dissipador em leque	83
5.7.3 Análise do fluxo de ar do dissipador em leque.....	89
5.8 Análises de geometrias	91
5.8.1 Dissipador com aletas retangulares e verticais.....	91
5.8.2 Dissipador com aletas circulares	92
5.8.3 Comparativo de temperatura das geometrias modeladas	93
5.9 Estudo de material - Análise com dissipador em cobre	94
5.10 Estudo de malha	95
5.11 Comparativo geral de temperatura	99
6 - CONCLUSÃO	103
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
APÊNDICE	108

1 - INTRODUÇÃO

Com o crescente desenvolvimento de novas tecnologias, e a necessidade de desempenhos mais apurados, equipamentos e dispositivos trabalham com potências e rendimentos cada vez mais elevados. No caso de equipamentos eletrônicos e máquinas térmicas, os dissipadores de calor devem acompanhar o desenvolvimento desses dispositivos. Em diversos casos o sistema de troca de calor deve passar por uma remodelagem para atender as novas exigências como taxas de energia térmica que estão sendo geradas de forma cada vez mais intensas.

As elaborações de projetos de dissipadores são baseadas em otimizações de desempenho de transferência de calor e massa, o que torna possível o arrefecimento de um equipamento com excesso de energia térmica.¹ O dimensionamento correto de um dissipador pode estabelecer taxas ou fluxos de calor do meio interno para o meio externo do equipamento, propiciando uma apropriada dissipação de energia térmica em um sistema integrado.²

Um exemplo de evolução de desempenho e dissipação de calor é o Diodo Emissor de Luz ou *Light Emitting Diode* (LED), em que o elevado índice de calor, tanto pela radiação quanto pela condução, interfere diretamente no desempenho da fonte emissora de luz. Por exemplo, um LED de uso comum em relação a um de alto desempenho difere justamente pela utilização ou não de dissipadores térmicos.³

Este trabalho tem como proposta a análise térmica de um dispositivo que utiliza LED como uma fonte de luz. Este dispositivo é uma alternativa para uso em fototerapia dinâmica visando o controle populacional de larvas *Aedes Aegypti* e de bactérias que apresentam mecanismos de defesa em relação à família de antibióticos considerados de “último recurso”, como, por exemplo, a colistina. Recentes estudos demonstraram sucesso em sua utilização, tanto em larvas quanto em bactérias, pois a interação da luz e do fotossensibilizador fazem com que o oxigênio molecular seja retirado das células. A vantagem em relação processo físico é que pelo meio biológico larvas e bactérias não desenvolvam resistência com o passar do tempo.^{4,5} No entanto, a utilização de equipamentos na fototerapia dinâmica demonstrou a necessidade de usar dissipadores de calor que apresentem desempenho satisfatório.

O transporte de calor torna-se um aliado para emprego em equipamentos baseados na fotodinâmica, em que a temperatura elevada muitas vezes está relacionada a sistemas de emissão de radiação. O uso de LEDs em sistemas de emissão de radiação para fototerapia dinâmica é devido a sua elevada eficiência, que em certos casos aproxima-se de 100%, ao

contrário de outras fontes de luz. Entretanto, ainda há liberação de potência dissipada em forma de calor, o que pode danificar o próprio LED ou o seu rendimento, como: a elevação de temperatura na junção de dopagem (p-n) também considerada uma região impura, em que o tipo N (a impureza doa elétrons à rede), tipo P (impureza produz buracos eletrônicos, falta de elétrons, na rede). A temperatura limite pode degradar sua vida útil; e a composição, a qual pode resultar em interferência quando submetido a elevadas temperaturas.

Os materiais mais utilizados na fabricação dos LEDs são as ligas ternárias, que podem apresentar junções com *gap* direto ou indireto, sendo de *gap* indireto a recombinação de buracos e elétrons que gera, além dos fótons e fônons, o calor como consequência, reduzindo, portanto, a eficiência da emissão de luz. Em alta temperatura o *gap* de energia fica menor ou igual em relação à energia de condução dos elétrons, o que reduz a tensão direta do LED.^{6,7}

Estudos de geometrias em dissipadores têm sido realizados visando uma melhor eficiência de dispositivos eletrônicos.⁸ Em análises de geometrias usuais com aletas retangulares, fatores como espessura, distância e o comprimento das aletas, influenciam diretamente no desempenho do dissipador, assim como o emprego da convecção forçada ou natural.^{9,10}

Projetos de dissipadores com geometrias irregulares é uma opção para a troca de calor mais eficaz, no entanto eram impraticáveis até meados dos anos 2000 devido a precisão dos cálculos.⁸ Tal situação propiciava apenas estimativas a partir dos modelos teóricos disponíveis. De forma alternativa, conclusões podiam ser obtidas por meio de aferições em protótipos produzidos. Todavia, a implementação do estudo de geometrias irregulares ou não usuais começaram a tornar-se viáveis após a implementação de recursos computacionais.^{2,9,10}

O uso de *softwares* em simulações de propagação de calor tem crescido, contribuindo para o estudo e desenvolvimento de novos produtos.⁸ Nesse sentido, programas que possuem as plataformas de Engenharia Auxiliada por Computador (CAE, do inglês *Computer-Aided Engineering*) e de Desenho auxiliado por computador (CAD, do inglês *Computer-Aided Design*), aliadas ao conhecimento técnico-científico em Ciência e Engenharia de Materiais, acabam tornando-se indispensáveis no delineamento de dissipadores.^{8,9,11}

Em vista do exposto, esse projeto propõe um estudo teórico-experimental da dissipação de calor em sistemas de radiação baseados em LED's para utilização em fototerapia dinâmica.

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Transferência de calor por condução, convecção e radiação

O calor é uma energia térmica (J), associado à transferência de um meio ao outro. Sua medição é dada pela temperatura e sua determinação numérica pode ser utilizada na escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$), Rankine ($^{\circ}\text{R}$) e Kelvin (K), sendo a última a escala absoluta.^{12,13}

A transferência de calor ocorre por três formas: Condução, Convecção e Radiação. Pode ser observado que, na maioria dos casos, a transmissão de calor ocorre de forma simultânea envolvendo a condução, convecção e a radiação. Quando ocorre esse fenômeno é dito que a penetração de calor é igual à transferência de calor de um meio para o outro através de uma parede.^{12,14} Detalhando os três meios de transmissão de calor temos que:

- **Condução:** há uma propagação do calor no interior do corpo. Nessa transferência de energia o calor passa de uma partícula para a de maior proximidade. Como exemplo, nos corpos sólidos há uma condução de calor sem que as partículas tenham que mudar de posição, em síntese a condução estabelece um fluxo de calor que é proporcional a temperatura, onde pode ser notado a lei da condução térmica ou lei de Fourier;^{12,16}
- **Convecção:** ocorre um efeito em que a transmissão de energia térmica sai de uma posição mais quente para uma posição mais fria pelas partículas da substância que se movimentam entre si. A convecção é característica em fluidos; O efeito ainda pode ser natural ou forçado, sendo natural quando não há agente externo contribuindo para o processo, o movimento é provocado unicamente pelo impulso recebido pelas partículas quentes frente às partículas frias. Já no caso da convecção forçada, o movimento das partículas de um corpo é provocado prevalentemente por forças externas, como por exemplo, por um ventilador;^{12,16}
- **Radiação:** nesse caso o calor se propaga por meio de ondas eletromagnéticas irradiadas a partir de uma fonte. As ondas eletromagnéticas capazes de transferir energia térmica são chamadas de radiação térmica, o meio de propagação pode ser o vácuo, e os raios de calor têm comprimentos de onda que variam entre 0,7 e 400 μm .^{12,16}

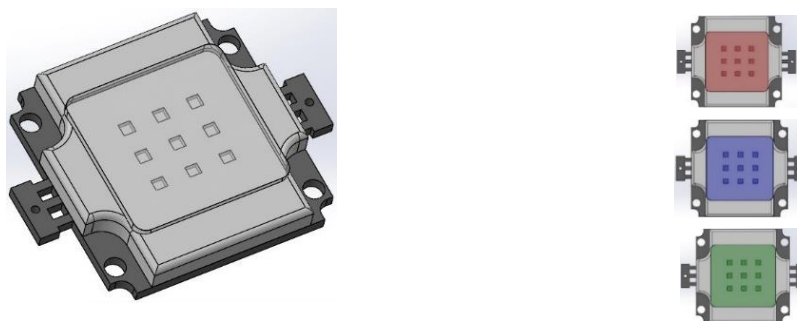
2.2 Fonte de Luz

Os LEDs utilizados como fonte de luz são semicondutores em estado sólido que convertem energia elétrica em luz. O desenvolvimento da tecnologia tornou os LEDs cada vez mais populares devido sua vida útil mais longa que, dependendo do modelo, pode durar quatro vezes mais que uma lâmpada fluorescente, e vinte e cinco vezes mais que uma lâmpada incandescente. Outro ponto significativo é o impacto ambiental menor, pois os LEDs não contêm mercúrio como as lâmpadas fluorescentes, podendo assim ser descartados em lixo comum. Ao final, deve ser citado o baixo consumo de energia devido à sua alta eficiência, pois um LED, mesmo com uma potência menor, consegue o mesmo resultado que uma lâmpada incandescente de maior potência.^{17,18}

Com o aprimoramento dos LEDs foi ampliada a sua aplicação. LEDs RGB, possuem em um mesmo dispositivo os comprimentos de onda em três cores e a combinação das três cores simultâneas gerando o branco, o modelo RGB é um dispositivo em que três LEDs são envolvidos por um apenas um, cada um emite uma cor distinta (Azul, Verde e Vermelho) e são controlados individualmente.

Entre os inúmeros modelos há também os LEDs SMD.¹⁸ Na figura 1 pode ser observado o LED RGB SMD, à esquerda da figura o LED representa cada uma das cores que pode emitir. Por suas características físicas e funcional esse modelo apresenta bom desempenho para equipamentos emissores de luz no controle e fototerapia dinâmica.

Figura 1 - LED RGB SMD, dispositivo dimensionado para atuar em superfícies planas e emitir até quatro cores, vermelho, verde, azul e branca (junção das três cores anteriores).

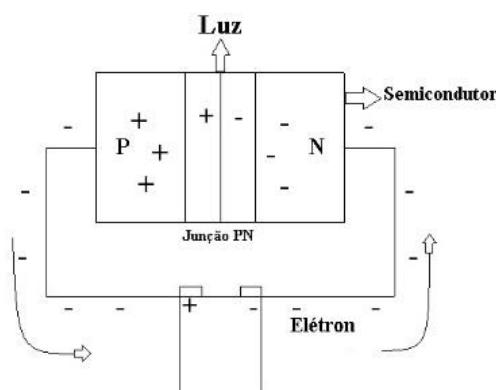


Fonte: Próprio Autor.

O funcionamento dos LEDs é baseado em bandas de energia, ou seja, quando é aplicada uma corrente elétrica os elétrons são elevados (nível de energia) e após a perda de energia o elétron retorna ao seu estado original emitindo luz. Vale ressaltar que os LEDs são diretamente

polarizados, tornando possível a passagem da corrente elétrica, visto que os elétrons se movem por meio da junção P-N do semicondutor e se recombina com as lacunas (cargas positivas). Assim, a luz é emitida quando as cargas são recombinadas.^{17,18} Na figura 2 é possível observar a ligação direta e a junção P-N do semicondutor.

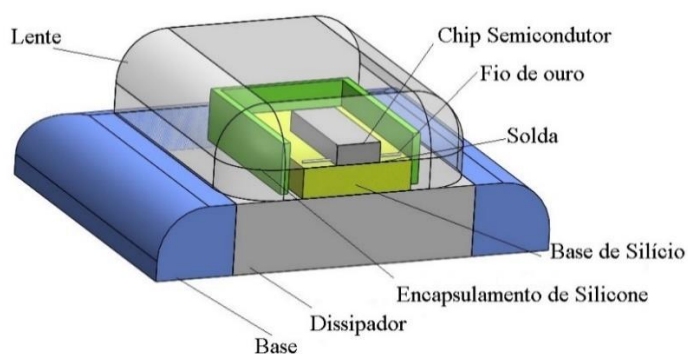
Figura 2 - Junção P-N formada pelo semicondutor do tipo P e do tipo N, o lado P as lacunas são portadores majoritários, e os elétrons portadores minoritários, no lado N os elétrons são portadores majoritários, e as lacunas os portadores minoritários.



Fonte: Próprio Autor.

A figura 3 apresenta a nomenclatura dos componentes do LED em um dispositivo de alto desempenho, este pode ser considerado de alto desempenho uma vez que apresente aleta para dissipação de calor. Os LEDs são componentes emissores de baixa energia térmica em relação às lâmpadas incandescentes, mas se houver elevada temperatura resultante do aquecimento em volta deste componente, esse aquecimento provocará a separação da junção P-N inutilizando o dispositivo.^{6,7,16}

Figura 3 - Nomenclatura dos elementos que compõem um LED de alto desempenho.



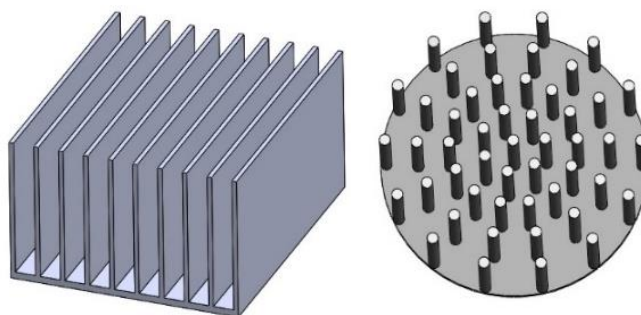
Fonte: Próprio Autor.

2.3 Dissipador térmico

Também conhecido como dissipador de calor, o dissipador térmico é um componente de arrefecimento de energia térmica de importância vital para componentes mecânicos e eletrônicos. O dimensionamento de dispositivos capazes de transferir a energia térmica deve ser baseado em otimizações para o melhor desempenho, tornando possível a diminuição da energia térmica do componente.¹ Um dissipador projetado para tal fonte de energia térmica deve estabelecer relação de transferência de energia do meio interno para o meio externo do sistema de forma satisfatória, visto que um erro no seu dimensionamento pode gerar excesso de energia e prejudicar de forma irreversível todo o sistema.²

Os componentes de dissipação de energia térmica podem possuir diversas geometrias, a sua modelagem deve obedecer a fatores como a exaustão de fluidos, por convecção forçada ou natural, energia térmica recebida pela fonte de calor e espaço disponível para acoplar o dissipador no equipamento. As geometrias utilizadas nos dissipadores possuem diversos formatos, há estudos em processadores computacionais em que dissipadores com aletas circulares apresentam melhores rendimentos, já outros equipamentos os dissipadores mais utilizados ainda são com aletas retangulares.^{19,20} Na figura 4 são demonstrados dois dissipadores de maior destaque no mercado, o primeiro à esquerda com aletas retangulares e o segundo com aletas circulares, representando diferentes geometrias e desempenho específico na troca de calor.

Figura 4 - Dissipadores de calor com aletas retangulares e circulares respectivamente.



Fonte: Próprio Autor.

Os dispositivos de dissipação térmica são confeccionados geralmente em Alumínio 6165 T5 e Cobre, esses materiais possuem boas características de condutibilidade térmica e

elétrica em relação a outros metais.²¹ A tabela 1 traz algumas das propriedades do alumínio 6165 T5 e do cobre.

Tabela 1- Propriedades do Alumínio 6165 T5 e do Cobre, materiais utilizados no estudo de dissipadores de calor.

Propriedades Físicas	Alumínio 6165 T5	Cobre
Peso específico (g/cm ³)	2,71	8,96
Temperatura de fusão (°C)	657	1083
Coeficiente de expansão linear (m/°C)	23x10 ⁶	16,5x10 ⁶
Condutibilidade térmica 25°C (Cal./cm °C)	0,56	0,94

Fonte: Vicente Chiaverini.

2.4 Programa

O *SolidWorks* é um programa que possui vários complementos de *softwares* adicionais em uma mesma interface; como a plataforma CAD, responsável pelo desenho em duas e três dimensões; e a plataforma CAE, responsável pelas simulações que envolvem sistemas de cálculos pelo método de elementos finitos e o método de volumes finitos. Essa última plataforma possui ainda um programa denominado *flow simulation*, um complemento específico para equações envolvendo dinâmica de fluido computacional e transferências de calor e massa.^{22,25}

O *software* foi desenvolvido em 1993, pela *SolidWorks* Corporation. Em 1997, a empresa francesa *Dassault Systèmes S.A.* adquiriu os direitos comerciais deste, para 2017 a estimativa é de que mais de 2 milhões de projetistas utilizem o programa, representando assim mais de 182 mil empresas. Atualmente, trata-se da principal ferramenta utilizada por estudantes de engenharia, e cerca de 75% das universidades de engenharia do mundo utilizam o programa nas disciplinas de modelagem e simulações.²⁶

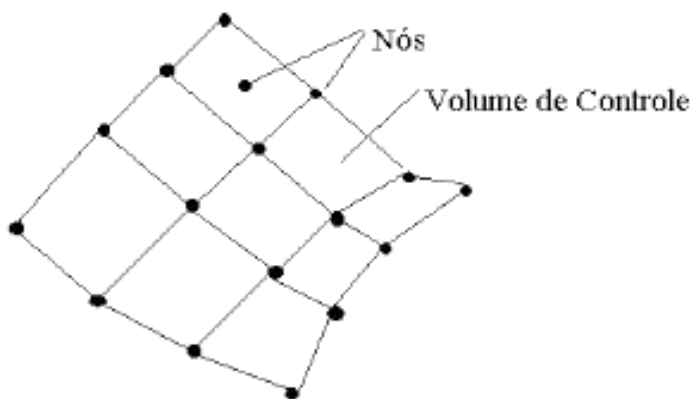
O emprego do programa em projetos de engenharia, tanto na modelagem como nas simulações, tem se tornado viável devido as validações do seu código computacional, projetos como estrutura metálica, elementos de máquinas, dissipadores e trocadores de calor e análises de fluido dinâmica, são elementos de validação constantemente do *software*.^{10-11-22,25}

2.4.1 Método de volumes finitos

O método de volumes finitos (FVM- do inglês *Finite Volume Method*) foi concebido na década de 1970, por Paullay, MacCormack e McDonald. Sua metodologia de cálculos é baseada na resolução de problemas complexos, sendo isso possível apenas com os avanços tecnológicos de computadores capazes de realizar milhares de equações. Para geometrias complexas e fluidos reais foi necessário o desenvolvimento de um novo método. Assim, o FVM tornou-se um grande avanço para engenheiros e pesquisadores no campo da mecânica dos fluidos.²⁷⁻³¹

O parâmetro matemático do FVM inicia com a resolução de equações diferenciais, onde é feita a substituição de um termo já pertencente nas equações por equações algébricas com uma variável de interesse (ϕ). O método caracteriza-se pela obtenção de equações aproximadas por meio da resolução de balanço de conservação (massa, momento e energia). Para que o cálculo seja realizado, o componente analisado é subdividido em uma série de partes menores, sendo que a cada elemento da divisão é dado o nome de volume de controle (VC). O domínio da equação é inserido em todos os VCs onde cada um apresenta um nó (ponto virtual), localizado no centro e nos vértices. Nesses pontos (nós) são calculados os resultados das variáveis e a solução é aplicada na superfície do material analisado. Com base nos resultados obtidos é efetivada uma interpolação em função dos valores nodais. Como efeito é obtida uma equação algébrica em cada VC, sendo os valores as variáveis de cada nó e seus adjacentes, e o conjunto de VCs formam a chamada malha.²⁸⁻³²

A figura 5 demonstra o posicionamento dos nós, ou nodos, no centro e no vértice dos volumes de controle (VCs).



Fonte: Próprio Autor.

Em cada nó é descrita a equação geral de transporte, representada na equação 1. Nesse caso, o teorema da divergência de Gauss é usado para que possa ser feita a conversão da integral de volume sobre operadores de divergência, e gradientes para as integrais de superfície.³⁰

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \phi) = \vec{\nabla} \cdot (\Gamma \vec{\nabla} \phi) + S \phi, \quad (1)$$

sendo a parte à esquerda da igualdade à advecção (transmissão do calor pelo deslocamento de massa atmosférica no sentido horizontal) da propriedade ϕ ; o primeiro termo do membro à direita após a igualdade denota à difusão (fenômeno de transporte da matéria) da propriedade ϕ e o segundo termo torna-se o termo fonte. O termo ρ indica a massa específica (kg/m^3) e o Γ o coeficiente de transporte. O elemento \vec{V} representa a velocidade (m/s) e o operador $\vec{\nabla}$ indica o gradiente da propriedade ϕ quando assume a operação $\vec{\nabla} \phi$ e o divergente da velocidade \vec{V} assumindo o produto $\vec{\nabla} \cdot \vec{V}$

Para transformar em um sistema algébrico de equação é feita a integração das equações diferenciais que compõem o modelo matemático da equação (1) sobre cada VC. O resultado é a equação (2) que possui os termos da equação (1), logo foi integrado cada termo no volume de controle.²⁹⁻³⁶

$$\int_{VC} \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \phi) dV = \int_{VC} \vec{\nabla} \cdot (\Gamma \vec{\nabla} \phi) dV + \int_{VC} S \phi dV \quad (2)$$

O FVM por ser um método de aproximação é necessário utilizar o teorema da divergência de Gauss, a equação (2) resulta em integrais de superfície envolvendo variáveis de interesse, como mostra a equação (3), onde dA representa o elemento de área da superfície do elemento de volume dV e \hat{n} representa o vetor unitário normal à superfície de dA .²⁹⁻³⁶

$$\int_A (\rho \vec{V} \phi) \cdot \hat{n} dA = \int_A (\Gamma \vec{\nabla} \phi) \cdot \hat{n} dA + \int_{VC} S \phi dV \quad (3)$$

Com a integração realizada é necessário interpolar a função para descrever o balanço das propriedades da variável ϕ nas faces em função das propriedades nos no centro dos VC. Para cada propriedade ϕ armazenada e para cada um dos VC, há uma equação representada (4).²⁹⁻³⁶

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_e \phi_e + b_p \quad (4)$$

O primeiro termo é referente ao coeficiente da propriedade ϕ no VC, os dois primeiros termos do segundo membro referem-se aos coeficientes vizinhos da propriedade ϕ nos volumes à esquerda (W - Oeste) e direita (E – Leste), o ultimo termo é referente ao termo fonte.²⁹⁻³⁶

Para a obtenção da solução numérica por meio da equação (4) é utilizado um *solver* (solução do problema) por meio de um programa onde é feito um ciclo de cálculos em que o VC vai de 1 à N (representando a quantidade de VC).²⁹⁻³⁶

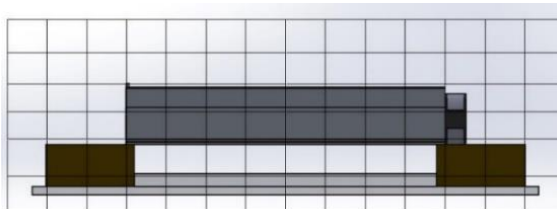
Em síntese o método executa quatro etapas para resolver as equações:³⁵

- Definição do problema: São definidas as condições de contorno (carregamentos e restrições), propriedades dos materiais e da geometria do domínio de cálculo;
- Discretização da geometria do domínio de cálculo: Etapa de geração de malha;
- Discretização matemática das equações: Integração das equações diferenciais e aplicação do teorema da divergência de Gauss
- Resolução numérica.

2.4.2 Malhas de volumes finitos

O conjunto de nós e de VCs formam a malha. No entanto, as características de construção da malha são definidas de acordo com a complexidade do problema, e podem ser classificadas como ortogonal e não ortogonal.³⁰⁻³⁴ A malha ortogonal, presente na figura 6, também chamada de malha cartesiana, apresenta vantagens na resolução dos cálculos, uma vez que a região de cálculos é definida por geometrias regulares.³⁰⁻³⁴

Figura 6 - Malha Ortogonal representada por geometrias uniformes.

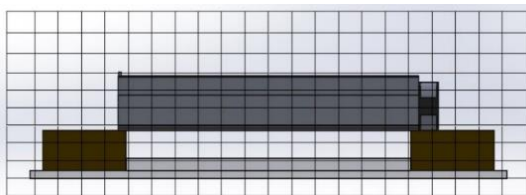


Fonte: Próprio Autor.

Na figura 7 é apresentado um refino de malha do mesmo componente. O refino é feito com a finalidade de elevar a quantidade de nós, proporcionando uma maior interação de soluções, o refino é utilizado em componentes com fissuras e aumento ou diminuição de

espessura ao longo do corpo. O refinamento é necessário em casos específicos uma vez que o aumento dos recursos computacionais é consideravelmente superior.²⁹⁻³⁴

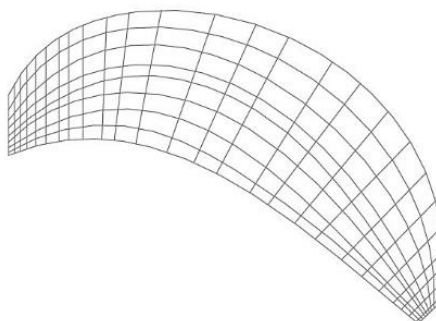
Figura 7 - Refino da malha ortogonal aumentando a quantidade de cálculos executados.



Fonte: Próprio Autor.

A outra malha utilizada é a não ortogonal, o uso dela é indicado para geometrias irregulares devido ao seu refinamento, visto nas extremidades da malha da figura 8, no entanto o refino representa uma demanda recursos computacionais e maior tempo de solução das equações.³⁹⁻⁴²

Figura 8 - Malha não ortogonal com presença de refinamento nas extremidades da geometria.



Fonte: Próprio Autor.

As malhas não ortogonais devem ter uma adaptação de uma região para a outra, um dos motivos de maior complexidade nos cálculos e sobrecarga de equações. Métodos como h-adaptativo e o método de Multigrid estão sendo implementados aos sistemas de resoluções matemáticas com o intuito de diminuir o tempo das simulações.³⁷⁻⁴² Devido a geometria utilizada e a ferramenta computacional, o presente trabalho utilizou o sistema de malha ortogonal com comparativo de refinamento.

2.4.3 Elementos finitos

O método de elementos finitos apresenta semelhança com o método volumes finitos.

Como observado, o método de volumes finitos é utilizado para análise de problemas que necessitam de maior precisão, no qual é realizada uma série de cálculos em diversos pontos de um mesmo objeto analisado. A diferença entre os dois se dá no objetivo, enquanto o FVM analisa a troca de fluidos, transferência de calor e massa, o método de elementos finitos observa a interação mecânica e térmica de um sólido.^{22,23}

O método de elementos finitos (FEM, do inglês, *Finite Element Method*) difere das formulações clássica para resolução de problemas de engenharia, nas resoluções acadêmicas os desafios envolvem geometrias e cargas com tensões regulares, logo os cálculos são com situações controladas sem variáveis reais. O FEM é baseado em cálculos que podem ser resolvidos em geometrias irregulares e com variáveis de situações reais, porém a elevada interação de cálculos torna o método inviável sem o auxílio computacional.^{25,28}

A ideia principal do método foi trazida do início do século XVIII com a proposta de Gauss para soluções de geometria analítica complexa e cálculos por aproximação. Na época, os estudiosos estavam impossibilitados de realizar milhares de equações de formas quase simultâneas. Porém, já na década de 1950, com o advento de computadores foi possível a realização de interações e soluções matemáticas complexas, inicialmente o objetivo do método era resolver desafios com cálculo estrutural.^{25,28}

A elaboração dos cálculos é semelhante ao FVM, em que é feita uma discretização de um meio contínuo em pequenos elementos. Quanto menor o tamanho do elemento, maior será a quantidade de elementos e avaliações. O conjunto dos elementos é chamado de malha, cada elemento possui em seus vértices os nós onde são feitos os cálculos individuais e depois o resultado é transposto para uma matriz global onde é novamente calculado. Um dos primeiros conceitos do método é sobre a mecânica do contínuo, onde um corpo sem vazios pode responder sobre ações externas de tensões, deslocamentos e deformações.^{40,44}

Como exemplo para o cálculo é demonstrada a força e a interação de uma mola. Com base na lei de Hooke, onde é possível calcular a deformação de um corpo causada pela força exercida no mesmo, sendo a força o produto do coeficiente de rigidez com o deslocamento da massa. Na equação (5), onde F é a força, K o coeficiente de rigidez e U o deslocamento.

$$F = KU \quad (5)$$

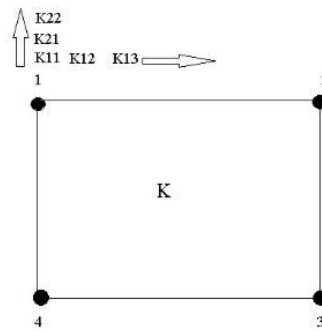
No entanto, para elementos finitos o modelo de cálculo é por multiplicação de matrizes (equação 6), as variáveis utilizadas correspondem ao deslocamento ou energia utilizada para interferir em cada nó correspondente ao elemento da malha.^{22,23,25} Na figura 9 é demonstrado

o possível deslocamento de cada nó (representado pelo círculo e números de 1 a 4) de um elemento da malha em relação a K.

$$\begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{pmatrix} \quad (6)$$

A representação de dois índices na figura 9 representa a posição de cada nó, tanto na vertical quanto na horizontal.

Figura 9 - Representação da variação de K em cada nó do elemento de malha.



Fonte: Próprio Autor.

Há vários critérios matemáticos para elementos finitos, já que, para o modelo relacionando tensões, o critério de Von Mises apresenta melhores resultados, e também é conhecido como critério de máxima energia, sendo utilizado principalmente para estudos de resistência mecânica como a máxima energia para distorção de um componente submetido à tração ou compressão, e a equação é obtida pela igualdade da energia de distorção real e de ensaio (teórico).^{22,23,25}

Como pode ser visto na equação (7), o elemento σ_V representa a tensão de Von Mises e as outras tensões como σ_{11} representa a tensão nas coordenadas da matriz.

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + (\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + (\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}+\sigma_{23}+\sigma_{31})\}} \quad (7)$$

2.4.4 Malhas de elementos finitos

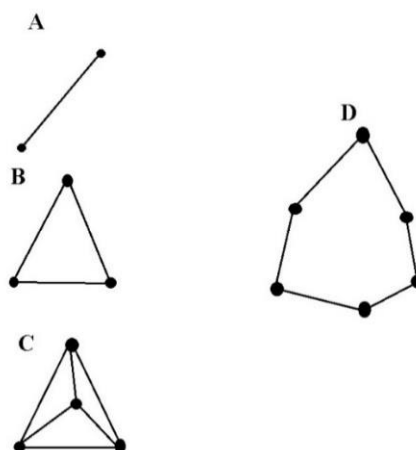
As malhas utilizadas no FEM apresentam uma diversidade maior que no FVM. Logo, o erro de seleção da mesma quase sempre implica em falhas no projeto. Alguns programas

apresentam uma nomenclatura própria para a seleção de malhas, no *SolidWorks* as malhas podem ser divididas em: Malhas de rascunho e Malhas de qualidade, sendo que a última pode ainda ser dividida em Malha de casta (dimensionada para chapas), vigas (utilizada para componente estrutural com a aplicação de tensões com tração e compressão) e sólida (aplicação para maioria dos casos).²²

A relação de posicionamento dos nós em cada malha representa os graus de liberdade que são definidos pela rotação e translação que o nó pode vir a assumir, visto que quanto maior o número de nós e do grau de liberdade, maior será a quantidade de cálculos e tempo aplicado na simulação. A maior quantidade de nós e elementos não implica necessariamente em maior exatidão, apenas que foi gerado maior número de interações.

Na figura 10 pode ser observado o tipo de malha e suas aplicações, para malhar de primeira ordem, tipo (A), sendo um elemento unidimensional, apresenta dois nós (círculo localizado na extremidade de cada reta) e dois graus de liberdade, pode ser utilizada em estruturas sem grandes tensões combinadas, para a malha tipo (B), classificada como elemento de segunda ordem, apresentando assim duas dimensões, possui três nós com seis graus de liberdade, indicada para modelagem envolvendo chapas, para a malha do tipo (C) ela é classificada como um elemento de terceira ordem, malha tridimensional, possui quatro nós e doze graus de liberdade, indicada para análise estrutural de elementos sólidos e de solicitações de tensões combinadas, a malha tipo (D) também como a malha do tipo (B) é classificada como de segunda ordem, no entanto possui seis nós e doze graus de liberdade, podendo assim ter mais precisão nos cálculos para componentes no qual é utilizada perfis de chapa.²²

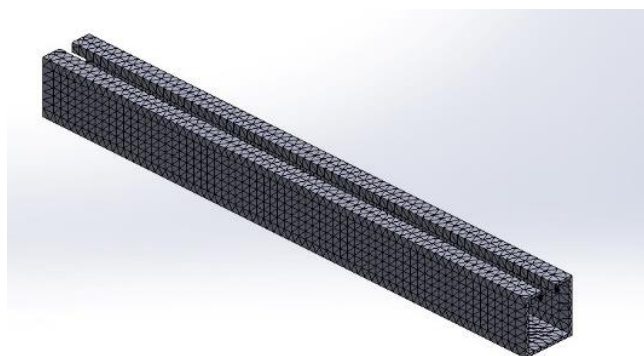
Figura 10 - Malhas de elementos finitos classificadas como primeira segunda e terceira ordem, representadas respectivamente pelas letras (A), (B e D) e (C).



Fonte: Próprio Autor.

Neste trabalho foi utilizado a malha tipo (D) por atender melhor às exigências solicitadas, a malha pode ser observada em um dos elementos do projeto na figura 11.

Figura 11 - Demonstração da malha por análise de elementos finitos (Suporte do dissipador).



Fonte: Próprio Autor.

Os métodos de volumes e elementos finitos, juntamente com seus *solvers*, representam os algoritmos que são utilizados pelo programa para realizar as simulações utilizadas no trabalho, no modelo computacional empregado o código não é aberto, não sendo possível sua modificação.

3 - OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Desenvolver um estudo teórico-experimental de um dissipador de calor acoplado a um emissor de luz empregado como fonte de radiação utilizada em fototerapia dinâmica.

3.2 Objetivos específicos

- Coletar os dados de dissipação térmica de uma fonte de radiação composta por LEDs utilizado em fototerapia dinâmica;
- Propor modelos de adaptação visando a melhoria do dispositivo utilizado;
- Comparar o modelo projetado para dissipação de calor com o dispositivo atualmente utilizado para fototerapia dinâmica;
- Modelar e simular dissipadores de calor com diferentes geometrias, materiais (alumínio e cobre) por convecção forçada.

4 - METODOLOGIA TEÓRICA EXPERIMENTAL

A metodologia de pesquisa em um trabalho teórico experimental consiste de etapas indispensáveis para o desenvolvimento do mesmo, e devem seguir uma sequência capaz de permitir o alcance do objetivo proposto. A metodologia de um desenvolvimento tecnológico se dá pelo conhecimento teórico que corresponda à sistematização de conhecimentos aplicados em ensaios práticos e reais.⁴⁵

A definição da metodologia do trabalho dividiu-se em três etapas, o primeiro momento foi o estudo do referencial teórico na área térmica e de aplicação do *software*, com ênfase em conceitos como a condução, convecção e radiação, bem como a utilização do modelo computacional envolvendo modelagens e simulações.

A segunda etapa contemplou a coleta de dados do emissor de luz, com a análise da sua geometria possibilitou realizar a modelagem computacional e implementação do *software*, a utilização do mesmo foi por possuir maior confiabilidade técnica, interação entre as plataformas CAD e CAE em um mesmo sistema e autorização de utilização. Os componentes do computador para a modelagem são: Processador Core I7 com núcleo duplo de 7ª geração, 8 GB de RAM, sistema de armazenamento em disco de estado sólido (500 GB), sistema de refrigeração por ventilador e placa de vídeo dedicada de 2 GB de RAM. Para as simulações os componentes do computador utilizado são: Processador Core I7 com núcleo duplo de 7ª geração, 64 GB de RAM, sistema de armazenamento em disco de estado sólido (1 TB) e placa de vídeo dedicada de 4 GB de RAM e sistema de refrigeração com bomba d'água.

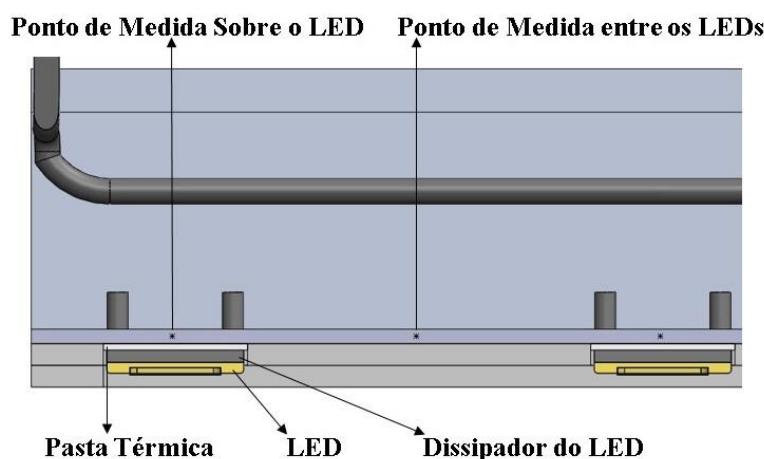
Após o desenho da geometria e aferição dos dados térmicos, gerou-se uma simulação na qual reproduziu o ambiente de operação do equipamento. A partir dos dados práticos e teóricos foi gerado uma validação do modelo computacional que respalda os projetos que serão modelados.

A terceira etapa consistiu na criação e desenvolvimento de projetos, iniciado pelas adaptações do sistema já utilizado. Para os novos módulos de dissipação de energia térmica, realizou-se um estudo de geometrias, a partir do qual se propôs um projeto inédito e desenhado de forma específica para o trabalho com os LEDs. As análises também foram feitas com geometrias de dissipadores usuais disponíveis no mercado. Dentre as geometrias selecionadas, o estudo baseou-se em aletas verticais retangulares e aletas circulares verticais, visando um melhor desempenho na troca de calor com o meio em relação ao modelo utilizado. A forma da obtenção dos dados deu-se pela simulação com análises térmicas demonstradas por diversas

vistas e cortes virtuais. As análises também representam a temperatura e a velocidade do fluido no equipamento.

Para a conclusão do projeto, foi desenvolvido um método comparativo de avaliação térmica, com um corte no meio dos módulos e marcação dos pontos de coleta na área de contato próxima dos LEDs e entre estes. As medidas foram realizadas à uma distância de 1,5 mm do dissipador ao LED (sobre os LEDs), sendo 0,5 mm de pasta térmica e 1 mm para o interior do dissipador (módulo). O ponto de medição pode ser visto na figura 12, corte frontal do emissor de luz no meio do módulo de dissipação de calor.

Figura 12 - Vista do corte no meio do módulo no sentido axial, observando os pontos de medição e nomenclatura dos componentes.



Fonte: Próprio Autor.

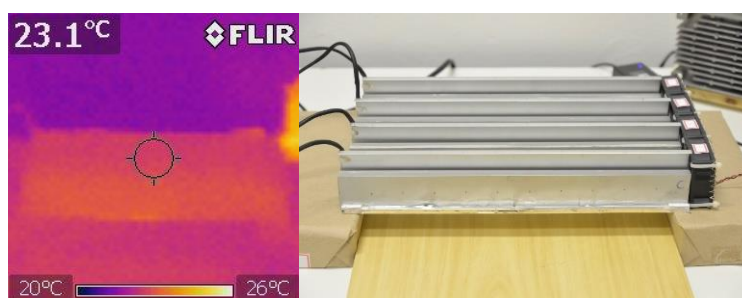
Para manter um parâmetro de comparação, definiu-se que os novos projetos de dissipadores e adaptações adotassem os mesmos ventiladores, placas de circuito, bases 1 e 2, LEDs, pranchas, apoios, diâmetro dos cabos de energia e a mesma espessura da pasta térmica. Para os novos projetos as dimensões de altura, largura e comprimento foram as mais próximas possíveis do modelo de dissipador utilizado.

4.1 Equipamento emissor de luz

Para a coleta de dados, montou-se o equipamento de acordo com seu uso, sendo os ventiladores dispostos na direita e numerados de cima para baixo. Os módulos foram separados entre si por uma distância de 18 mm, enquanto os dissipadores das extremidades ficaram com a lateral rente à lateral dos ventiladores. Na figura 13 pode ser observado o equipamento

montado para utilização. Os dados foram obtidos com o instrumento multifunção Anemômetro-Termo-Higrômetro-Luxímetro modelo THAL-300 e a câmera infravermelho *Flir Systems* Modelo Flir I3.

Figura 13 - Temperatura inicial do emissor de luz, da esquerda para a direita a temperatura inicial medida pela câmera térmica e a imagem de referência do equipamento para melhor compreensão da imagem térmica.



Fonte: Próprio Autor.

O emissor de luz possui características na sua fonte de energia que diferem das especificações de alguns de seus componentes. Aqui, destacam-se os ventiladores que apresentam uma corrente indicada de 0,2 A e está ligado a uma fonte de 5 A, logo o desempenho, como os dados de vazão e velocidade do fluxo sofre diferenças com base nas especificações técnicas do fabricante dos equipamentos. Portanto, foi necessário colher os dados de cada ventilador por meio da colocação de uma barra tubular vazada de 6 cm de diâmetro, de acordo com o diâmetro da saída do ventilador. Foram adotados comprimentos de tubos de 5 cm e 10 cm (com parede interna lisa) não havendo diferença de valores. Tal procedimento pode ser visto na figura 14.

Figura 14 - Coleta da velocidade do ar de cada ventilador.

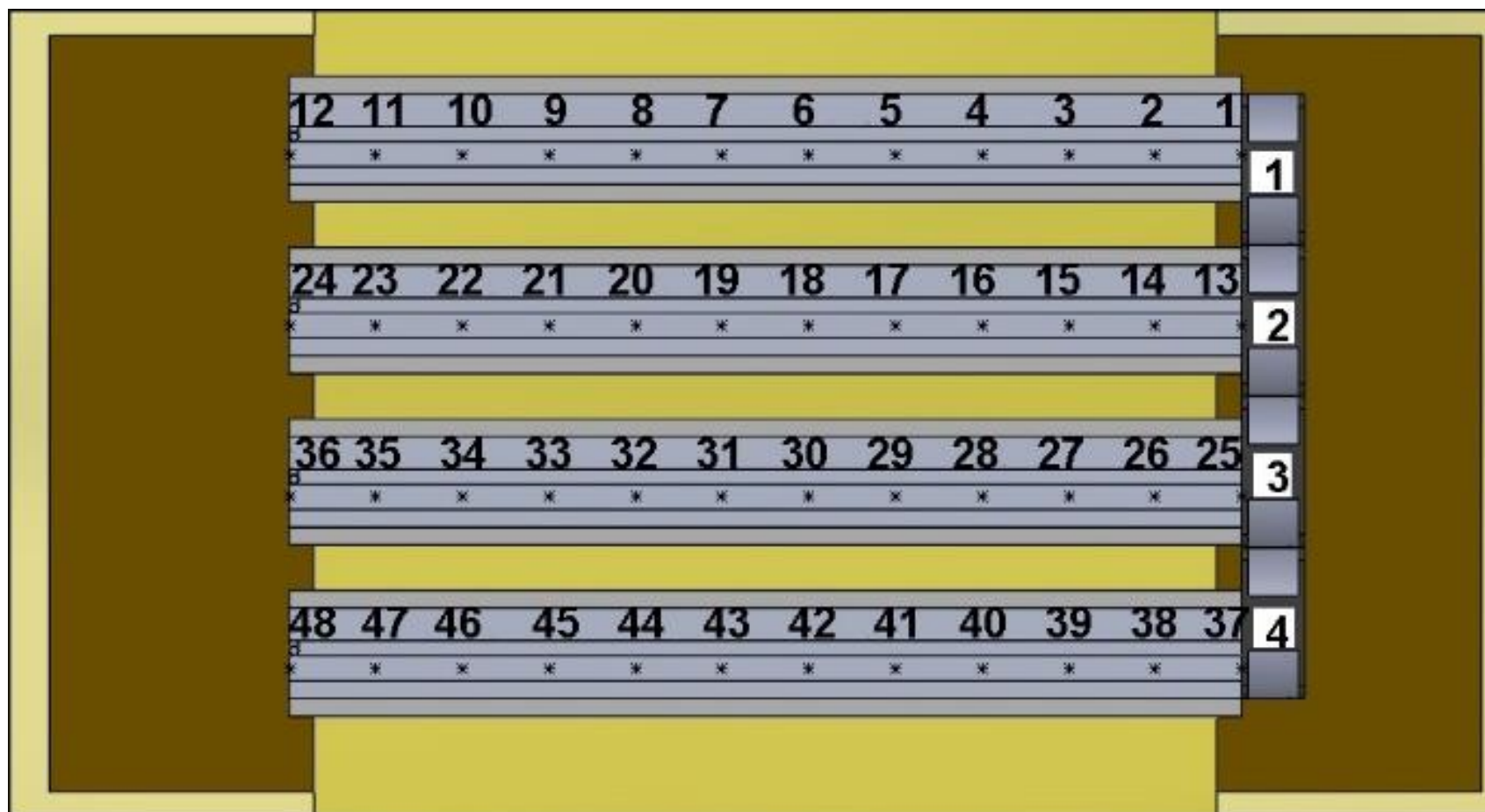


Fonte: Próprio Autor.

Para a aferição da energia térmica no emissor de luz foram definidos pontos de referência na parte superior (superfície da aleta) e na lateral dos módulos. Cada dissipador recebeu 12 pontos na superfície e na lateral, sendo estes equidistantes entre si a cada 34,34 mm. Ao todo o sistema possui 96 pontos de medição, cada ventilador foi numerado de acordo com seu módulo. Na figura 15, os módulos e ventiladores foram numerados de cima para baixo, mantendo a numeração fornecida pelo fabricante.

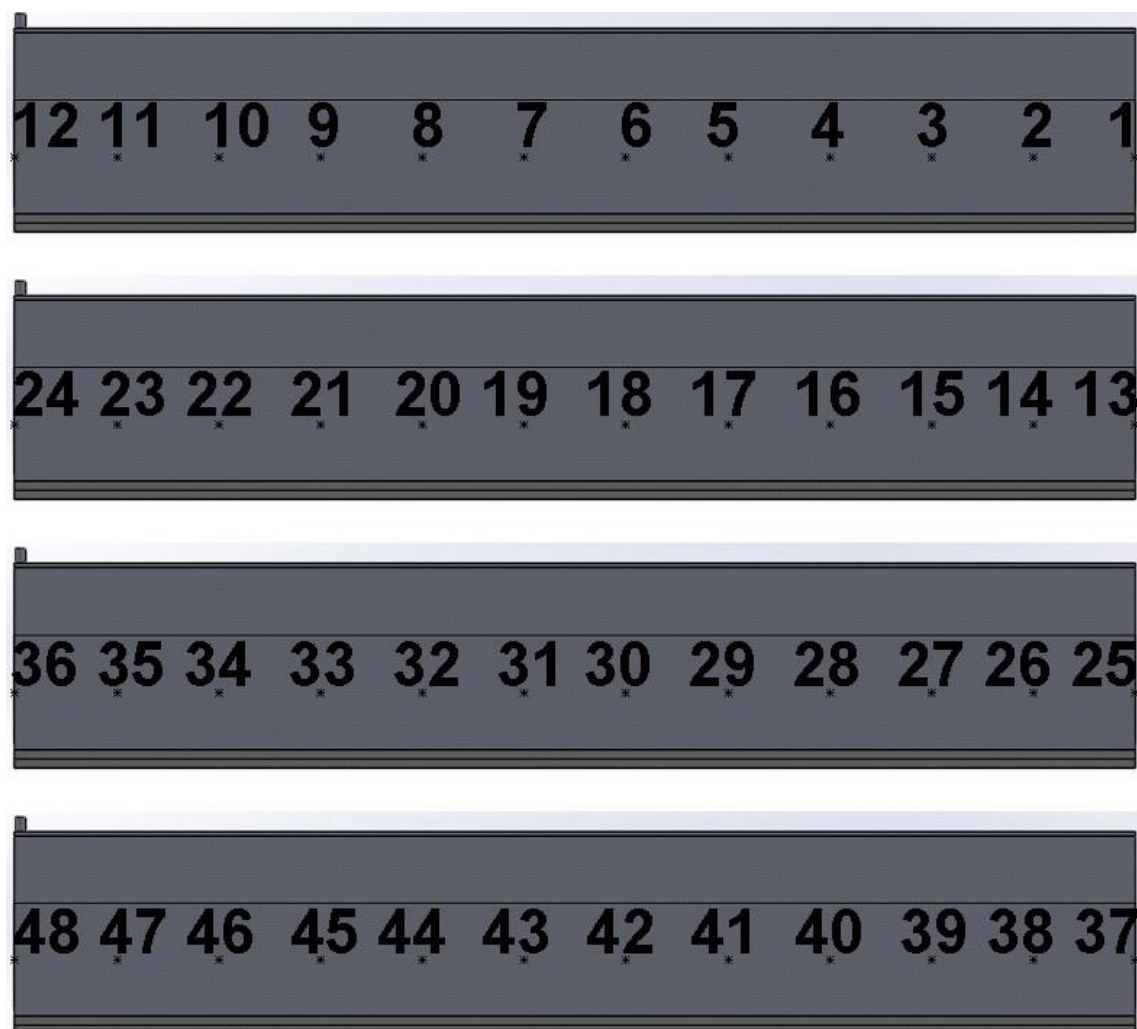
Conforme pode ser observado na figura 15, os pontos superiores estão mais afastados dos LEDs, já os pontos laterais, conforme figura 16, estão próximos aos LEDs, os pontos laterais estão a uma altura de 19 mm em relação ao dissipador de calor dos LEDs.

Figura 15 - Marcação dos pontos superiores dos módulos e ventiladores, vista superior dos módulos do emissor de luz.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 16 - Marcação dos pontos laterais de cada módulo do emissor de luz.



Fonte: Próprio Autor.

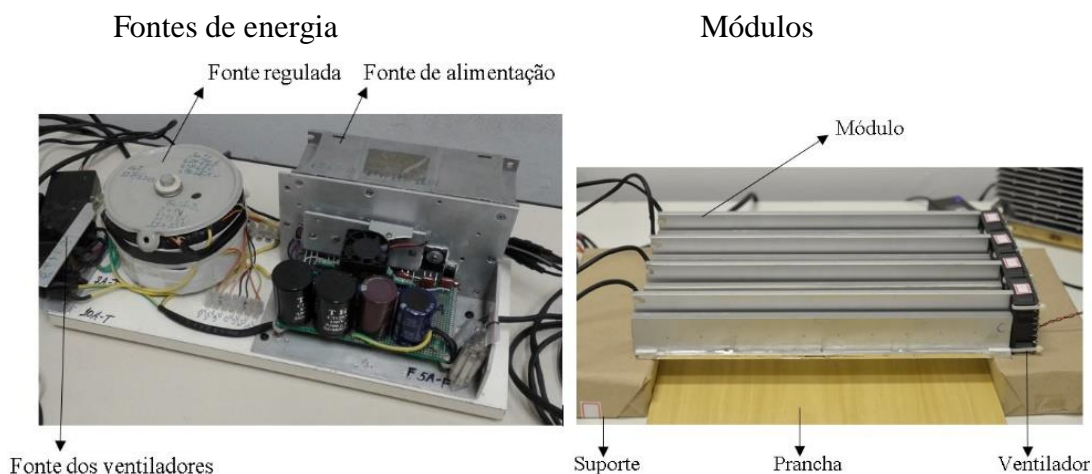
4.1.1 Características do emissor de luz

O equipamento emissor de luz é um dispositivo desenvolvido por pesquisadores do Grupo de Óptica Aplicada (GOA) da Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD, o dispositivo pode irradiar luz em três comprimentos de onda: nas regiões azul (450 nm), verde (530 nm), e vermelho (625 nm), a emissão de luz é feita por LEDs do tipo vermelho, verde e azul (RGB do inglês *Red, Green, Blue*) além das cores mencionadas ainda é produzida a luz branca (com emissão simultânea das três cores citadas). A irradiação pode ser feita individualmente em cada módulo ou simultaneamente, com todos os módulos.

O equipamento estabiliza a temperatura após 10 minutos de funcionamento. A estabilização foi baseada com o acionamento na luz branca, com as cores e comprimentos de onda mencionadas no parágrafo anterior, com potências (mW) respectivamente de 11,44; 12,20; e 11,10.

A figura 17, mostra, à esquerda, as fontes de energia do dispositivo emissor de luz e à direita, os módulos (dissipadores térmicos) contendo os LEDs; os ventiladores são alinhados nas extremidades dos módulos. Semelhantemente aos módulos, os ventiladores são contados de cima para baixo.

Figura 17 - Fontes de energia do emissor de luz e módulos ajustados para a utilização.



Fonte: Próprio Autor.

O dispositivo é composto por diversos componentes, sendo:

- LEDs RGB do modelo SMD (do inglês *surface mounted diode*): O LED SMD é um dispositivo montado em superfície, cada módulo contém 6 LEDs, totalizando

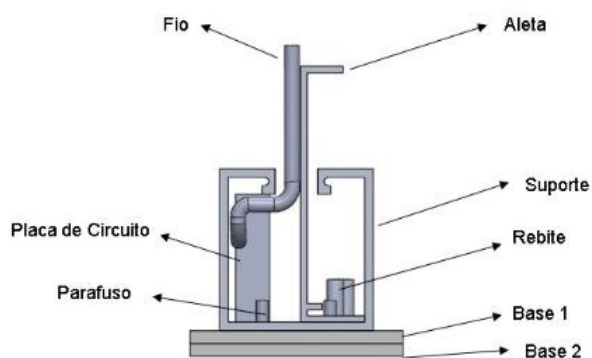
24 LEDs no equipamento. O componente é responsável pela irradiação e apresenta potência de 10 W;

- Pasta térmica de silicone: Aplicada entre o dissipador do LED e o módulo de dissipação de calor, o composto apresenta condutividade térmica de 0,4 W, calor específico de 750 J, densidade de 1246 kg/m³ e temperatura máxima de operação de 300 °C. A pasta é responsável pela condutividade térmica dos LEDs para o módulo de dissipação de calor;
- Ventiladores: Com a função de uma melhor refrigeração por convecção forçada, os quatro ventiladores ficam posicionados rente ao módulo de dissipação de calor, e apresentam dimensões de comprimento, altura e largura de 60x60x25 (mm), tensão de 12 V e corrente de 0,2 A;
- Módulo de dissipação de calor: O componente é feito em liga de alumínio 6063 T5 com densidade de 2700 kg/m³, calor específico de 900 J e condutividade térmica de 209 W. É dividido em suporte do módulo e aleta unidos por parafusos e rebites. Os LEDs também fazem parte dos módulos;
- Base: Composto feito em PVC (Policloreto de vinila), e isola o módulo de dissipação de calor do contato direto com o suporte da mesa. Está dividido em bases 1 e 2;
- Suporte: Componente em laminado melamínico, e sua função é de elevar os módulos da amostra;
- Prancha: Acessório feito em laminado melamínico para colocar as amostras;
- Módulo de controle dos LEDs: O equipamento pode fazer o controle manual do comprimento de onda dos LEDs, e o tempo e o funcionamento dos módulos em separado ou simultaneamente. Possui uma saída USB (Do inglês *Universal Serial Bus*), que pode ser ligada diretamente em um computador;
- Fonte de alimentação: Fonte responsável pelo funcionamento dos ventiladores, e sua ligação é feita da rede elétrica aos ventiladores. Sua descrição é de CA/CC (corrente alternada para corrente contínua), recebe tensão 127 Vca / 220 Vca e converte para 12 Vcc com corrente de 5 A;
- Fonte regulada CA/CC 127 Vca / 220 Vca, convertendo para 64,5 Vcc e corrente de 7 A-10 A. A fonte é ligada na rede elétrica e no módulo de controle dos LEDs para o funcionamento do sistema;

- Fonte dos ventiladores CA/CC 127 Vca / 220 Vca, convertendo para 12 Vcc e corrente de 5 A. A fonte é ligada na rede elétrica e nos ventiladores;
- Placa de circuito: Responsável pelo acionamento dos LEDs;

Para visualizar os componentes presentes nos módulos, a figura 18 apresenta uma vista da extremidade do módulo oposta aos ventiladores, nela é inserido a nomenclatura dos elementos.

Figura 18 - Nomenclatura dos componentes internos dos módulos, vista da extremidade do módulo.



Fonte: Próprio Autor.

Os LEDs estão posicionados na parte inferior de cada módulo. Na figura 19 pode ser observado o LED RGB SMD e os recortes das bases 1 e 2.

Figura 19 - LEDs fixados no suporte do módulo com as bases 1 e 2 que apoiam o módulo no suporte.



Fonte: Próprio Autor

5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Coleta de dados do equipamento emissor de luz

A primeira aferição da temperatura no emissor de luz foi realizada antes do acionamento dos LEDs e dos ventiladores. Esse procedimento foi repetido 5 vezes com intervalos de 5 minutos entre si, não sendo observada variação de temperatura. O THAL-300 com o sensor termopar registrou temperatura de 23,5 °C, o instrumento tem precisão de $\pm 1\%$ da leitura + 1 °C entre a temperatura na faixa de -100 °C a 1300 °C. A câmera térmica, por sua vez, registrou temperatura inicial de 23,1 °C com as seguintes especificações: ajuste para cor fosca, distância focal de 0,6 metros e precisão de ± 2 °C.

Após o acionamento dos ventiladores, foram registradas as velocidades do fluxo de cada equipamento, sendo obtida a velocidade média de 5,97 m/s, considerando que o anemômetro apresenta margem de erro de precisão com velocidade do ar $\leq 20\text{m/s}$: $\pm 3\%$.

Os dados obtidos da velocidade do fluxo de ar de cada ventilador foram organizados na tabela 2 que representa o número do ventilador e a velocidade correspondente.

Tabela 2 - Resultado da medição da velocidade do fluxo de ar em cada ventilador.

Ventilador	Velocidade (m/s)
1	5,9
2	6,0
3	6,0
4	6,0
<i>Velocidade média: 5,97</i>	

Fonte: Próprio Autor.

Quando o emissor de luz é montado, cada ventilador é posicionado em uma região diferente do módulo, como efeito, a velocidade na extremidade do módulo difere entre os dissipadores. O módulo 1 está rente à lateral do primeiro ventilador, fazendo com que o meio do ventilador fique no centro do módulo, enquanto a região central não sofre troca de calor, nesse dissipador, o ponto de maior fluxo de ar encontra-se na placa de circuito logo na entrada do módulo, com isso o ar sai do ventilador e se dispersa, pois não consegue passar com eficiência pela região de dissipação de calor. Tal observação pode ser vista na tabela 3. No dissipador do módulo 4, o encaixe do ventilador em relação a placa de circuito é ao contrário.

O entendimento do fluxo do fluido é importante para compreensão dos próximos resultados envolvendo o comportamento térmico.

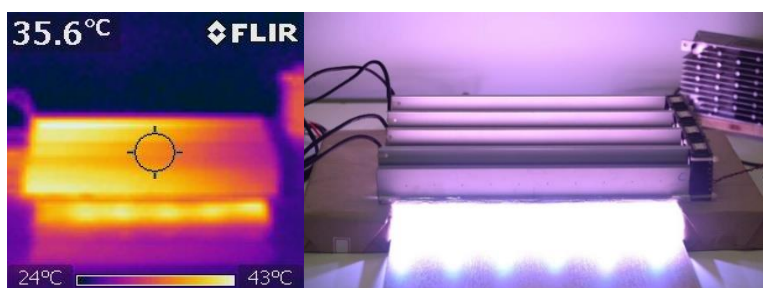
Tabela 3 - Velocidade do fluxo na extremidade dos dissipadores do emissor de luz.

Módulo	Velocidade (m/s)
1	0,4 m/s
2	0,5 m/s
3	0,9 m/s
4	1,1 m/s

Fonte: Próprio Autor.

A figura 20 indica a temperatura geral do equipamento pela câmera infravermelho após o tempo de estabilização.

Figura 20 - Imagens térmicas do emissor de luz em funcionamento, à esquerda a imagem térmica da câmera Infravermelho seguido pela imagem de referência.



Fonte: Próprio Autor.

Para medição da temperatura dos LEDs pela câmera térmica, o módulo quatro foi escolhido por estar mais acessível, foi necessário rotacionar o mesmo, saindo da região de utilização, a medição foi apenas como referência da temperatura, o registro foi de 80,2 °C no primeiro LED do módulo, posteriormente os módulos permaneceram na região de trabalho e o sensor termopar foi posicionado para coletar a temperatura. As medições podem ser observadas na tabela 4, onde a média foi considerada como parâmetro de entrada para a simulação.

As medições não puderam ser realizadas nos módulos 2 e 3 devido a posição destes, pois colocar o sensor termopar seria necessário alterar a posição dos módulos e sua região de trabalho. Foi realizado uma média de temperatura como dado de entrada para a simulação.

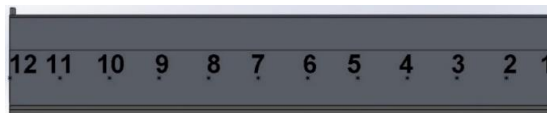
Tabela 4 - Temperatura dos LEDs pelo sensor termopar nos módulos 1 e 4.

Módulo 1	Temperatura (°C)	Módulo 4	Temperatura (°C)
1	80,5	1	80,6
2	80,7	2	80,7
3	80,6	3	80,7
4	80,9	4	80,8
5	80,8	5	80,7
6	80,8	6	80,6
<i>Temperatura média: 80,7</i>			

Fonte: Próprio Autor

Os módulos receberam pequenos pontos em grafite como indicativos do local da coleta de temperatura. Conforme apontados nas figuras 15 e 16 em um conjunto global dos módulos, na figura 21 os pontos são demonstrados apenas no módulo 1. As marcações foram as referências para a fotografia das imagens térmicas e medição do sensor termopar.

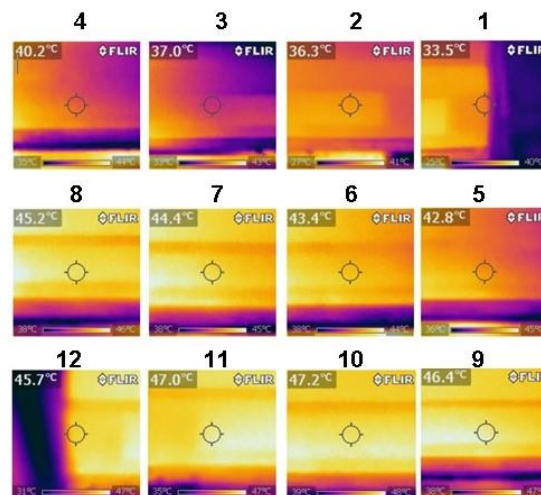
Figura 21 - Pontos de coleta de temperatura da lateral do módulo 1, referência das medidas do sensor termopar e da imagem térmica.



Fonte: Próprio Autor.

A figura 22 representa a imagem térmica de cada um dos pontos indicados na figura anterior, as imagens foram feitas em todos os módulos, pode ser observado um aumento de temperatura do ponto 1 com 33,5 °C ao ponto 12 com 45,7 °C.

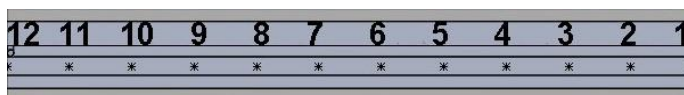
Figura 22 - Imagem térmica dos pontos da lateral do módulo 1 do emissor de luz.



Fonte: Próprio Autor.

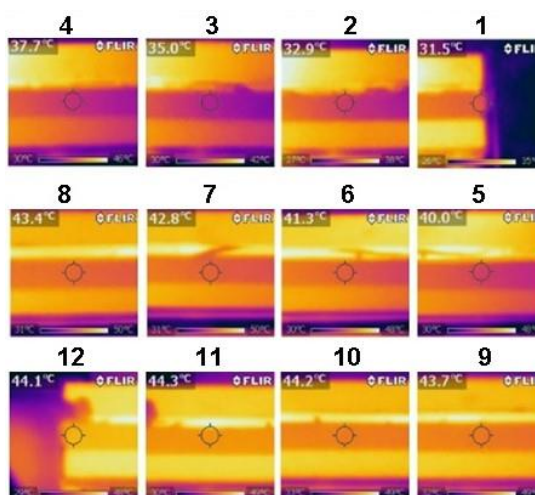
Com a figura 23 observa-se os pontos de marcação da vista superior do módulo 1. A distância obedece aos 34,34 milímetros como nos pontos laterais. A figura 24 traz a imagem térmica de cada um dos pontos selecionados, notando que houve um aumento de temperatura do ponto 1 com 31,5 °C ao ponto 12 com 44,1 °C.

Figura 23 - Pontos de medição de temperatura no módulo 1 pela vista superior.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 24 - Imagem térmica dos pontos superiores do módulo 1 demonstrando o crescente aumento de temperatura do ponto 1 ao ponto 12.



Fonte: Próprio Autor.

5.2 Modelagem e montagem do equipamento emissor de luz

Para realizar as simulações e o comparativo de dados, foi necessário o desenho de cada elemento do emissor de luz. A modelagem iniciou-se pelo desenho em duas dimensões, sendo necessário seguir uma exatidão de dimensões do equipamento real, visto que uma simples mudança de geometria poderia influenciar na montagem do equipamento e no resultado das simulações.

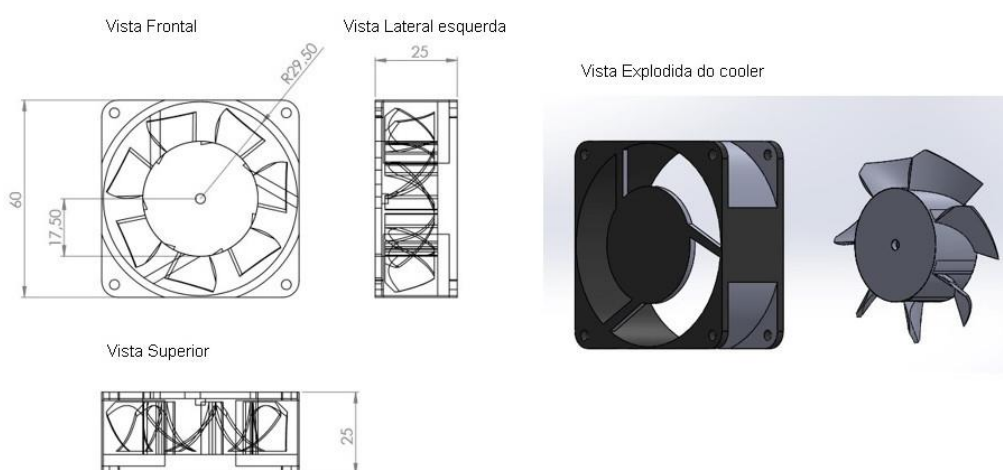
Após o desenho técnico de cada elemento, gerou-se a modelagem em duas dimensões e posteriormente extrudado (comando necessário para o desenho ser convertido em três dimensões e ser definido como elemento/peça). Com cada peça no formato desejado, iniciou-se a montagem do dispositivo, passando pelos ventiladores, módulos, LEDs e equipamento

numa visão completa com os suportes e prancha. Todas as cotas que seguem nas próximas imagens estão em mm.

5.2.1 Modelagem do ventilador

Na figura 25 é demonstrado o desenho bidimensional (vista frontal, lateral esquerda e superior) e tridimensional (vista explodida) considerada uma vista com componente desmontado para a montagem.

Figura 25 – Modelagem do ventilador com desenho em duas e três dimensões (mm).



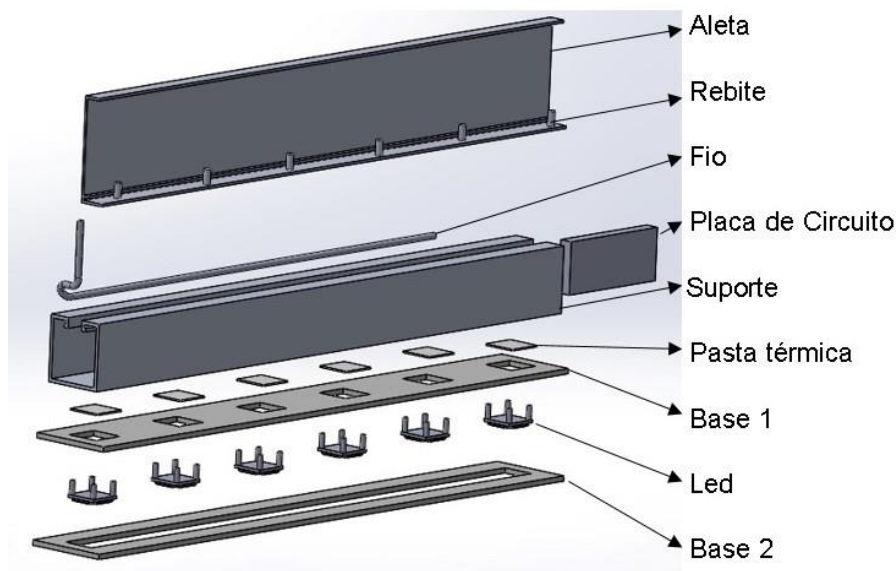
Fonte: Próprio Autor.

5.2.2 Modelagem e montagem do módulo

A modelagem do módulo foi composta por diversos componentes, entre eles: o suporte, aleta, rebites, parafusos, pasta térmica, LED, suporte 1 e 2. Todos os elementos foram desenhados em separados, como pode ser observado na vista explodida da figura 26. Dos nove componentes, um deles (LED) ainda é dividido em quatro peças (detalhado no item 5.2.3). Para a montagem deve-se obedecer a posição correta de um componente em relação ao outro, pois um erro de sobreposição de peças impossibilita a simulação, enquanto o erro de ajuste altera os resultados.

O único componente em que não possibilitou a mensuração das dimensões, em relação ao modelo utilizado, foi a pasta térmica, uma vez que é inviável desmontar o equipamento. No entanto, seguiu-se a norma de aplicação (espessura) indicada pelo fabricante de 0.5 mm.

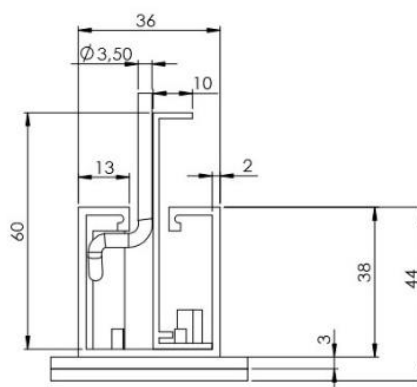
Figura 26 - Vista explodida do módulo do emissor de luz, sendo composto por um total de 60 elementos.



Fonte: Próprio Autor.

Para uma melhor compreensão do perfil do módulo, a figura 27 representa a imagem frontal do módulo com suas cotas.

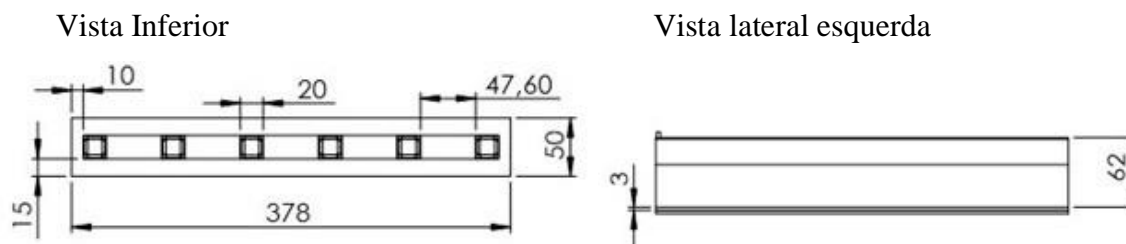
Figura 27 - Vista frontal do módulo, representando as cotas e componentes ocultos em outras vistas.



Fonte: Próprio Autor.

Com a figura 28 pode ser observada a vista inferior do módulo e a vista da lateral esquerda, em ambas é possível identificar as dimensões e detalhes do projeto. O referencial das vistas e a posição de observação serão indicados com o componente completo na imagem 32.

Figura 28 - Vista inferior do módulo e vista lateral esquerda com a cota de altura do módulo e da base.

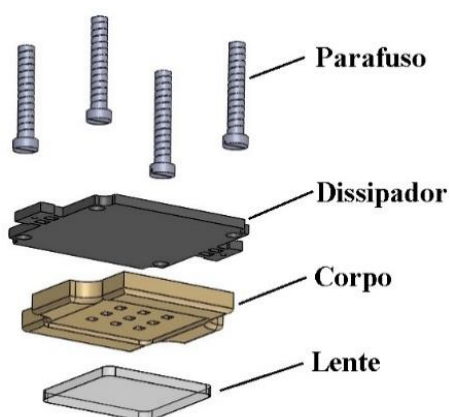


Fonte: Próprio Autor.

5.2.3 Modelagem do LED

Cada LED recebeu quatro componentes totalizando sete elementos na sua montagem, sendo: quatro parafusos de fixação no suporte do módulo, um dissipador de energia térmica, uma base e uma lente. A figura 29 mostra o LED do modelo SMD com a nomenclatura dos seus componentes (vista explodida).

Figura 29 - Vista explodida do LED com nomenclatura de cada elemento.

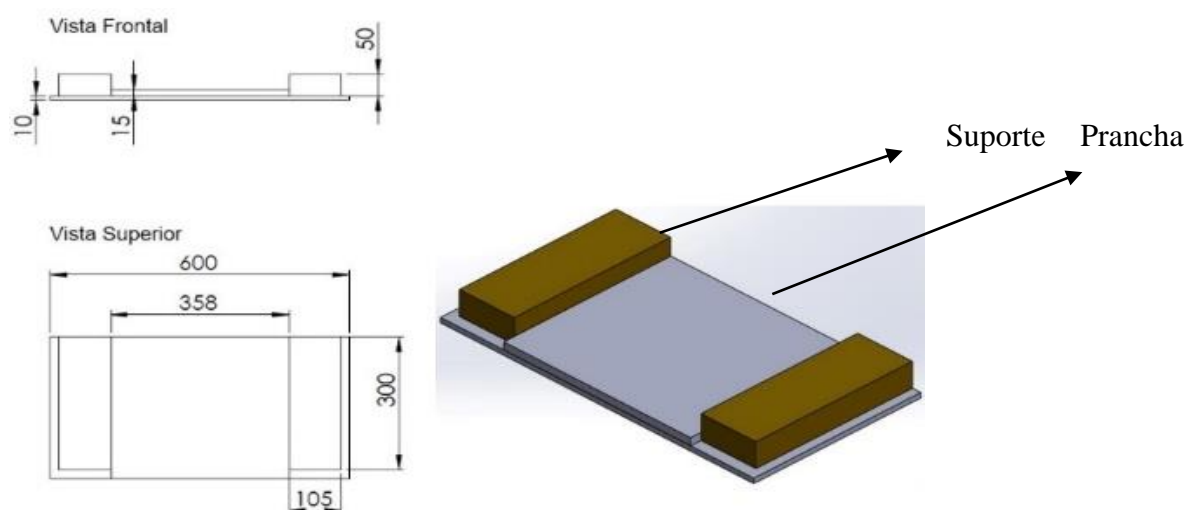


Fonte: Próprio Autor.

5.2.4 Modelagem da prancha e do suporte

Com a finalidade de apoiar os módulos e os ventiladores, o suporte e a prancha também devem seguir o mesmo grau de precisão dos outros componentes modelados, bem como a exata posição de encaixe com o restante do dispositivo, conforme figura 30.

Figura 30 - Modelagem da prancha e suportes do emissor de luz, vista frontal e superior à esquerda da imagem à vista isométrica com nomenclatura.

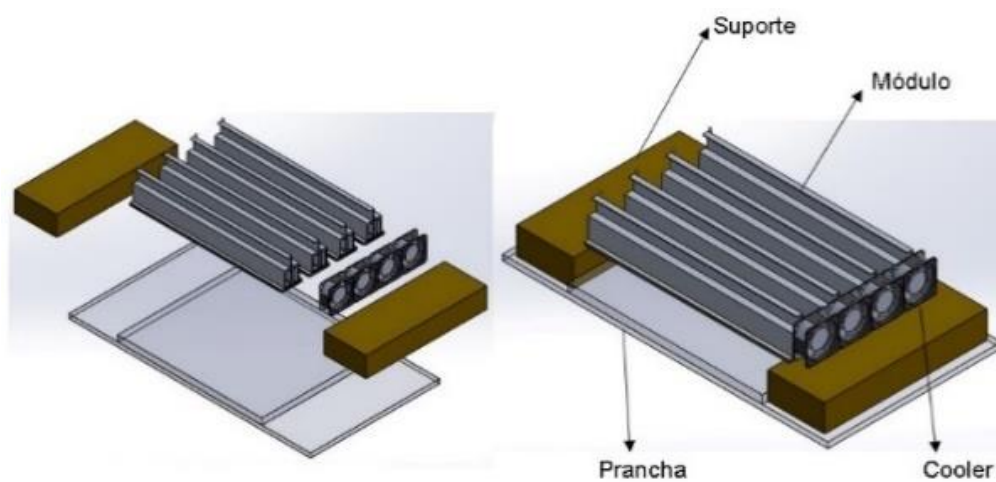


Próprio Autor.

5.2.5 Montagem do equipamento simulando o emissor de luz

Na figura 31, com a imagem da esquerda para a direita, é possível observar a vista explodida da montagem do dispositivo e o modelo já montado.

Figura 31 - Vista explodida à esquerda e dispositivo emissor de luz montado com a nomenclatura dos componentes.

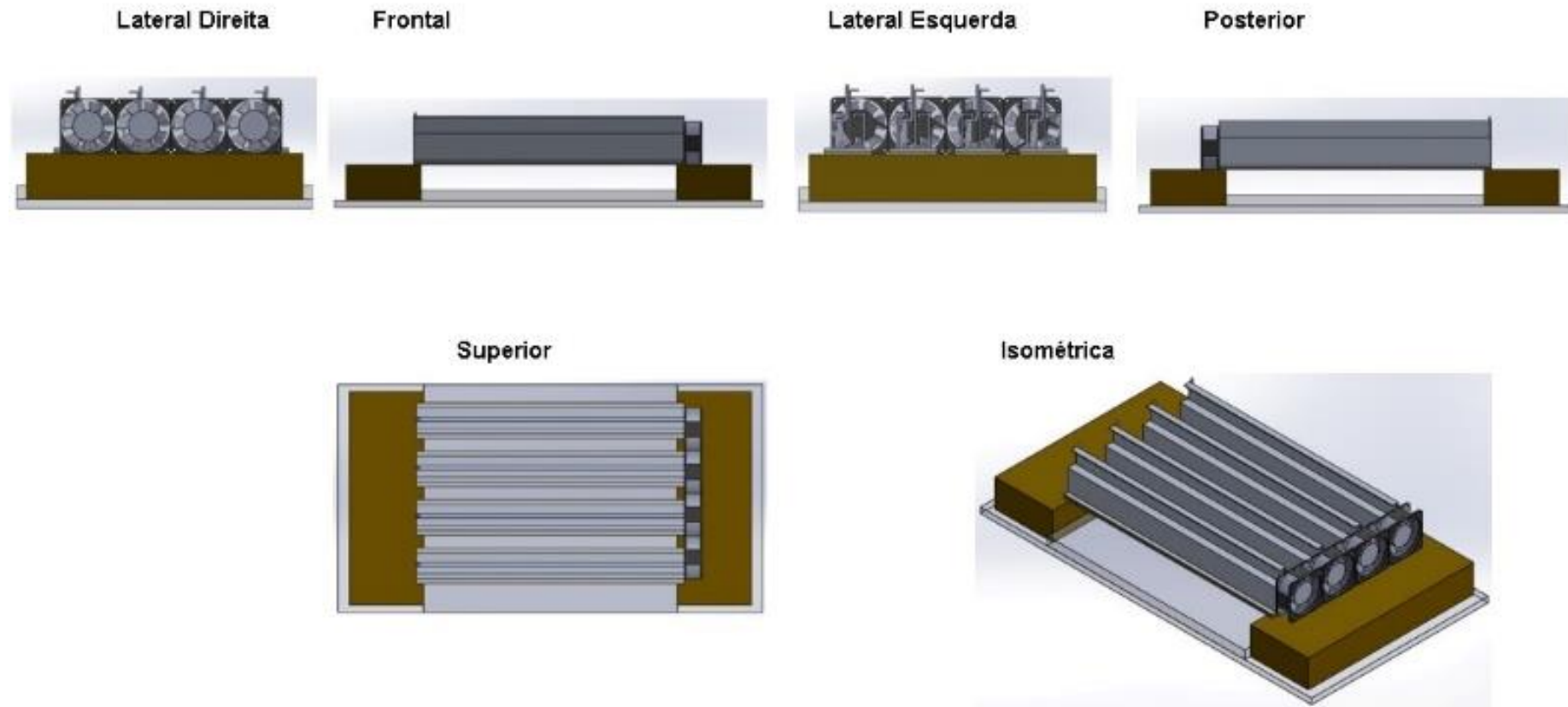


Fonte: Próprio Autor.

5.2.6 Referência das vistas do projeto no primeiro diedro

A imagem 32 indica os pontos de visão do observador em relação ao componente, cada plano de visão corresponde a uma vista

Figura 32 – Imagem dos planos de visualização do emissor luz com a nomenclatura das vistas.



Fonte: Próprio Autor.

5.3 Simulação computacional

A possibilidade de desenvolver simulações para um projeto representa uma economia de custo operacional e tempo. Além disso, é possível visualizar erros e comportamentos inesperado do protótipo, pois a interação com o meio e a harmonia do mecanismo através de seus componentes pode ser visualizada em uma simulação, e, se necessário, erros poderão ser corrigidos antes de entrar produção.^{22,45-49}

O *software* empregado possui as ferramentas de modelagem e simulação integradas, o que diminui potenciais erros de leituras de geometrias em regiões de acabamento. Em modelos computacionais em que há necessidade de importar e exportar arquivos, a conversão na leitura da modelagem na plataforma de cálculo pode gerar erros que são difíceis de serem percebidos, mas impactam significativamente os resultados finais.^{22,45-49}

Para demonstrar a validação do programa e até mesmo visualizar possíveis anormalidades no emissor de luz, o mesmo foi modelado (demonstrado nos itens anteriores do trabalho) e elaborado um estudo térmico envolvendo os métodos de elementos e volumes finitos. Em cada componente, definiu-se o material idêntico ao do produto analisado, gerados as mesmas características como condução, absorção de energia térmica, e até mesmo o grau de atrito que a superfície de um componente possui.

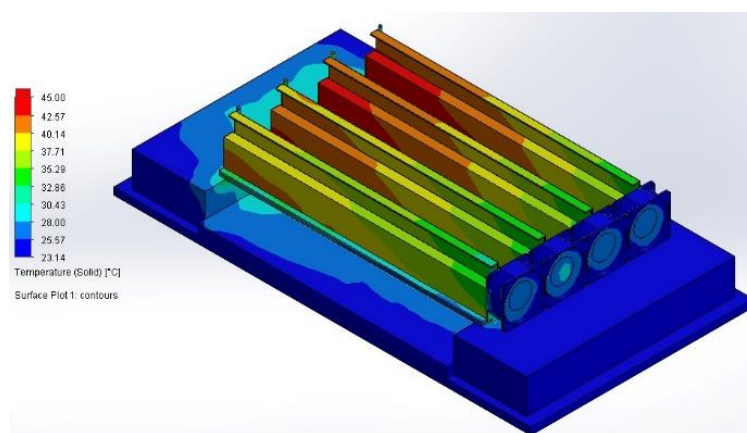
Os dados de entrada para a simulação foram inseridos de acordo com a coleta de dados do emissor de luz. Além das características dos materiais de cada componente, foram ainda definidas a temperatura ambiente de 23,5 °C, a temperatura na lente dos LEDs de 80,7 °C, e a velocidade do fluxo de ar na saída dos ventiladores em 6 m/s.

5.3.1 Simulação térmica da modelagem do emissor de luz

Na simulação térmica observada na figura 33 pela vista isométrica, pode ser notado analiticamente que há uma elevação de temperatura na extremidade do módulo 1 em relação aos outros. A diferença pode ser vista em detalhe nas figuras 34 a 35 que são representados respectivamente os módulos 4 (vista frontal) e o módulo 1 em uma vista posterior.

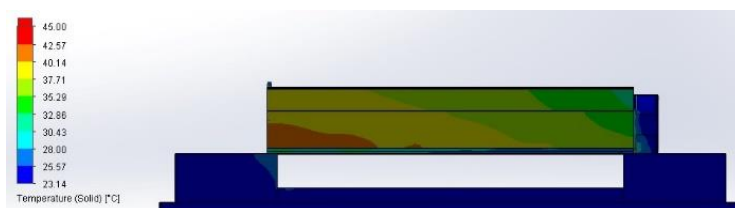
Os dados de temperatura podem ser visualizados no gradiente de cor das figuras e na tabela A (pontos laterais) e tabela B (pontos superiores) do apêndice do trabalho.

Figura 33 - Vista Isométrica da simulação térmica do emissor luz.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 34 - Análise térmica da vista frontal do emissor de luz (lateral do módulo 4).



Fonte: Próprio Autor.

Figura 35 - Análise térmica da vista posterior do emissor de luz com o gradiente de temperatura do módulo 1.



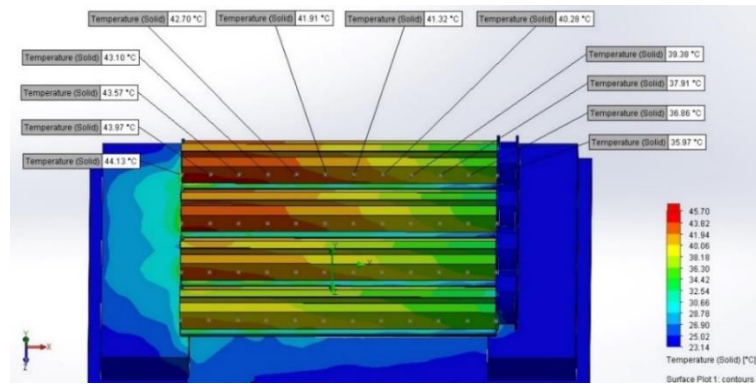
Fonte: Próprio Autor.

Para a obtenção do gradiente de energia térmica foram colhidos os dados de temperatura nos pontos selecionados na lateral de todos os módulos. Os pontos de medição são demonstrados na figura 16, sendo os mesmos selecionados no equipamento real.

O programa gera as imagens térmicas de cada dissipador em um gradiente de cores. Para manter a fidelidade dos dados, as imagens foram ampliadas 10 vezes visando selecionar o ponto correto de medição. As imagens térmicas envolvendo diferenças de temperaturas nos componentes sólidos são apresentadas nas figuras 36 a 39, respectivamente do módulo 1 ao 4, todas as imagens correspondem aos pontos laterais do equipamento. As informações dos pontos

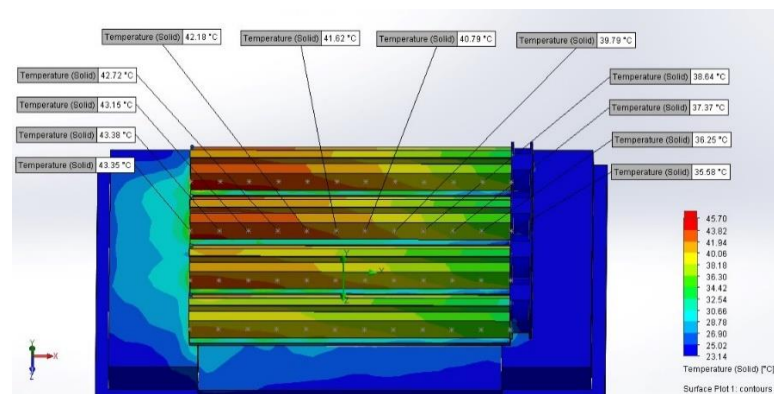
laterais e superiores foram agrupadas em uma tabela de dados que será apresentada no decorrer do trabalho; entretanto, pode ser observado pelas imagens que há um valor decrescente de temperatura do módulo 1 ao 4, onde o primeiro corresponde as temperaturas mais elevadas.

Figura 36 - Temperatura nos pontos da lateral do módulo 1 do emissor de luz.



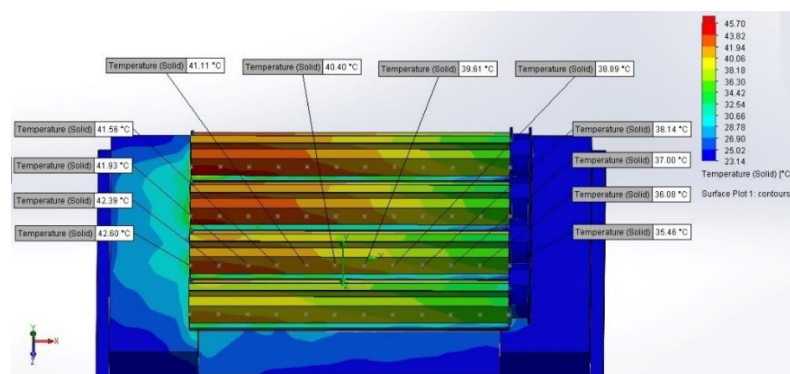
Fonte: Próprio Autor.

Figura 37 - Temperatura nos pontos da lateral do módulo 2 do emissor de luz.



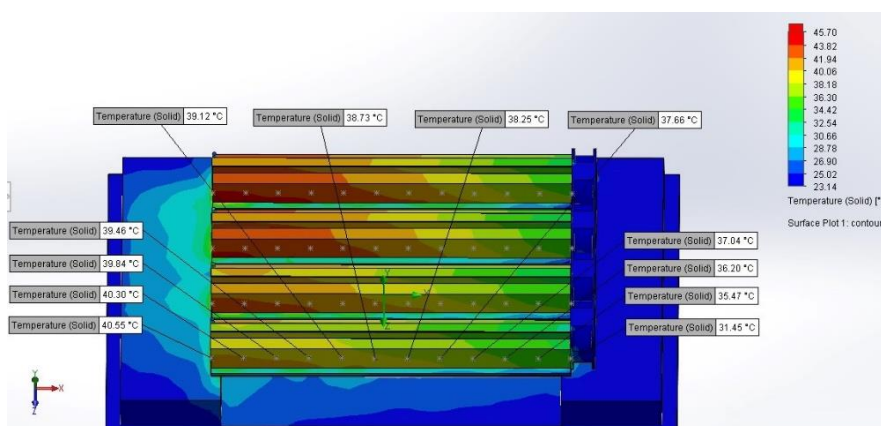
Fonte: Próprio Autor.

Figura 38 - Temperatura nos pontos da lateral do módulo 3 do emissor de luz.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 39 - Temperatura nos pontos da lateral do módulo 4 do emissor de luz.

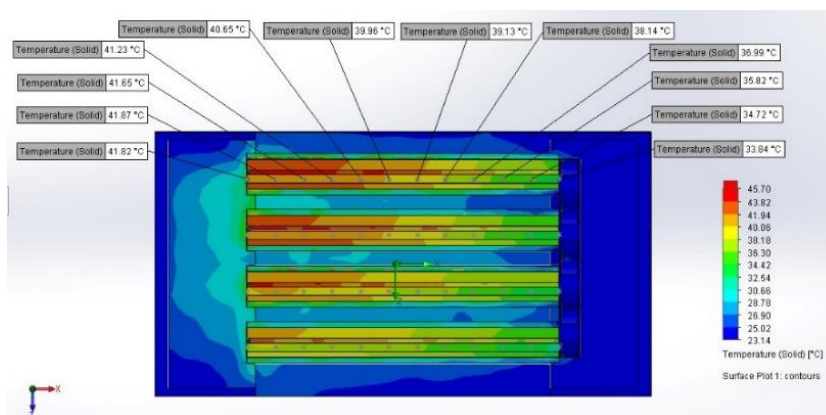


Fonte: Próprio Autor.

As medições de temperatura também foram realizadas nos pontos superiores, apresentados na figura 15, a medição de temperatura foi tomada na superfície das aletas, posição de maior distância da fonte de calor (LED).

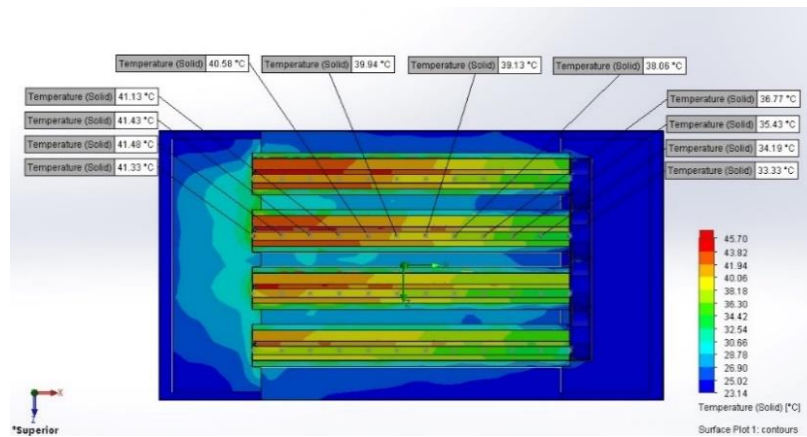
As imagens térmicas, representadas pelas figuras de 40 a 43, indicam a temperatura de cada ponto na região superior das aletas e módulos, as figuras são respectivamente do módulo 1 ao 4. Do módulo 1 ao 4 houve um decréscimo do valor da temperatura, sendo o módulo 1 o maior registro de temperatura. Os resultados das temperaturas dos pontos laterais podem ser observados na tabela B do apêndice.

Figura 40 - Temperaturas da superfície superior da aleta do módulo 1 do emissor de luz.



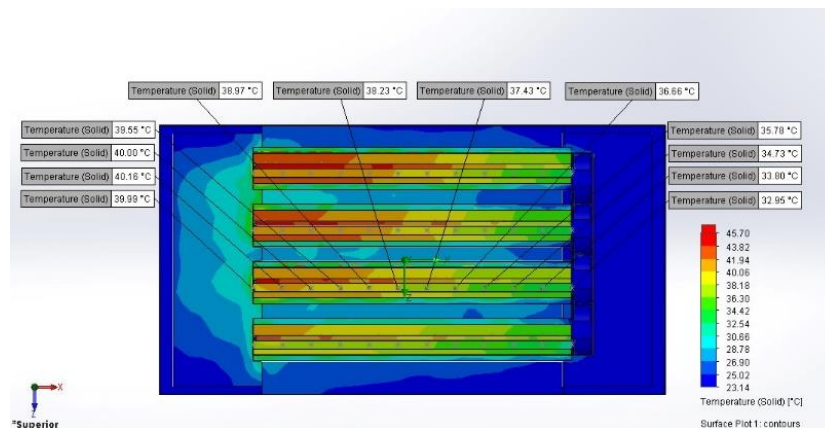
Fonte: Próprio Autor.

Figura 41 - Temperaturas da superfície superior da aleta do módulo 2 do emissor de luz.



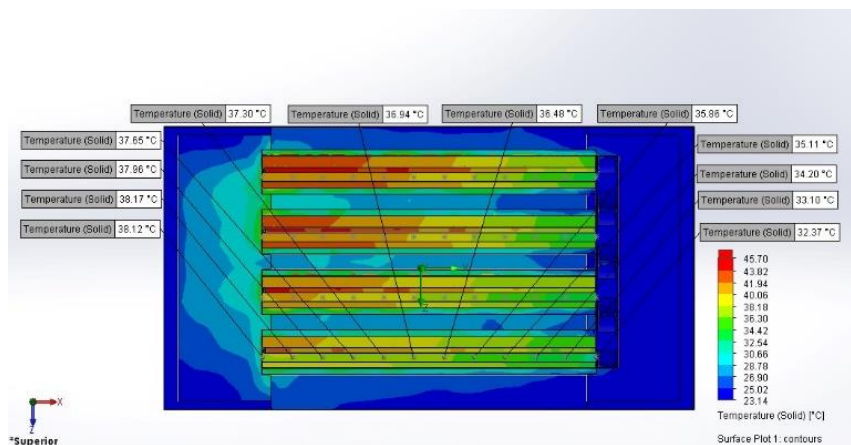
Fonte: Próprio Autor.

Figura 42 - Temperaturas da superfície superior da aleta do módulo 3 do emissor de luz.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 43 - Temperaturas da superfície superior da aleta do módulo 4 do emissor de luz.



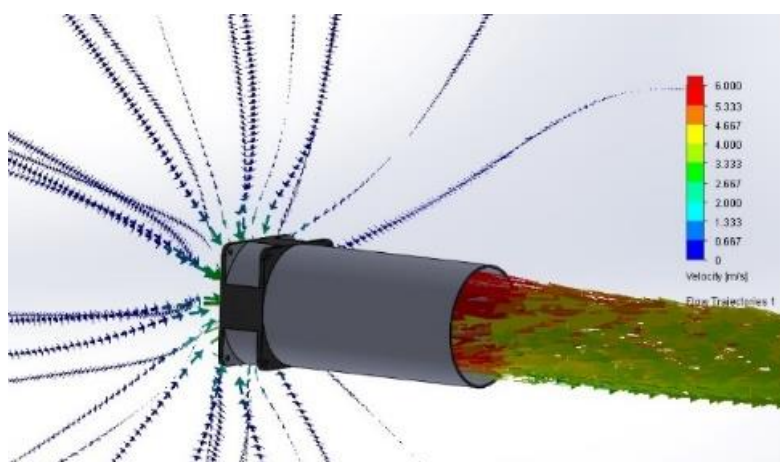
Fonte: Próprio Autor.

5.3.2 Simulação e análise do fluxo de ar

Como demonstrado no item 5.1, por meio da tabela 2, os ventiladores apresentaram velocidade no fluxo do fluido de aproximadamente 6 m/s. O experimento contou com uma barra tubular vazada, o mesmo ensaio foi desenhado e simulado, indicando que logo após a saída do fluido pela barra o mesmo começa a perder velocidade devido à interferência do meio. A simulação do ventilador pode ser vista na figura 44, o ar possui uma velocidade inicial de 0 m/s e chega em 6 m/s.

Vale ressaltar que a simulação descrita no item 5.3.1 foi realizada já com o ventilador acionado. No entanto, o mesmo é apresentado de forma separada junto com o estudo de dinâmica do fluido.

Figura 44 - Fluxo de ar com o ventilador modelado, a velocidade do fluido em 6 m/s.

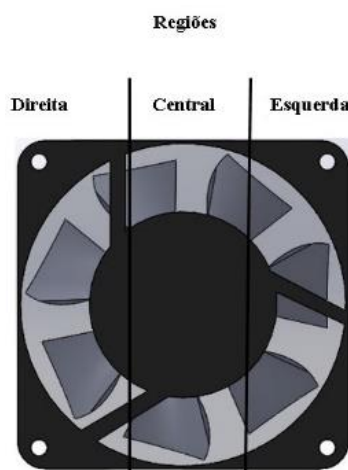


Fonte: Próprio Autor.

A montagem dos ventiladores no sistema é rente aos módulos, sendo a lateral externa do módulo 1 e 4 coincidentes à lateral dos ventiladores de mesmo número. Pelo estudo, é possível notar que a passagem de maior volume e maior velocidade do fluxo de ar ocorre no módulo 4. Isso é justificado pela posição do ventilador, pois no módulo 1, o meio do ventilador está no centro do módulo (não havendo passagem de fluido), já a parte esquerda do ventilador direciona o ar para a lateral do módulo e a parte direita do ventilador faz o fluido esbarrar na placa de circuito. Esse efeito não ocorre com o módulo 4, nele o centro do ventilador, onde não há passagem do fluxo de ar, está próximo à placa de circuito, a região esquerda direciona o fluxo de ar para o meio do módulo e a região direita para a lateral do mesmo.

Na figura 45 é indicada, em uma vista frontal, as regiões: direita, central e esquerda do ventilador, as mesmas estão comentadas no parágrafo anterior.

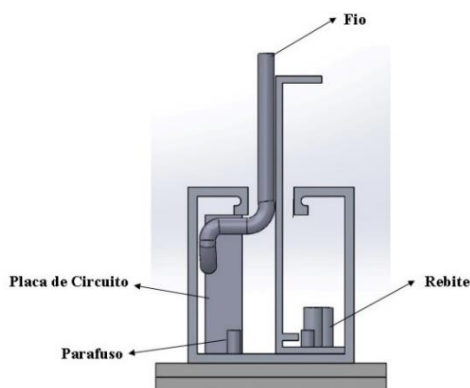
Figura 45 - Vista frontal das regiões do ventilador, com as divisões de região direita, central e esquerda.



Fonte: Próprio Autor.

A placa de circuito responsável em grande parte do impedimento do fluxo de ar, pode ser observada na figura 46, a figura frontal do módulo mostra o tamanho da placa bem como os rebites e parafusos que também implicam na resistência do fluxo.

Figura 46 - Vista frontal do módulo com a nomenclatura de elementos.

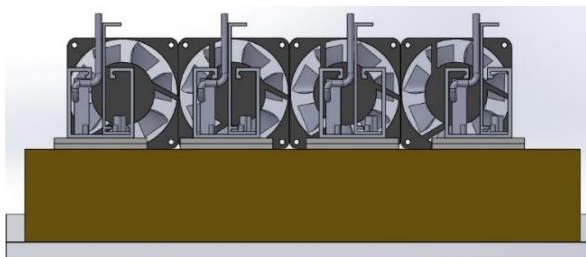


Fonte: Próprio Autor.

Os alinhamentos dos ventiladores com os módulos podem ser observados na vista da lateral esquerda do emissor de luz, representada pela figura 47. Os módulos seguem a sequência do primeiro ao quarto, da esquerda para a direita, como descrito no parágrafo anterior, é possível

notar o alinhamento das laterais dos ventiladores com os módulos e assim visualizando a barreira que a placa de circuito cria para fluxo.

Figura 47 - Vista lateral esquerda demonstrando o alinhamento dos ventiladores e módulos.

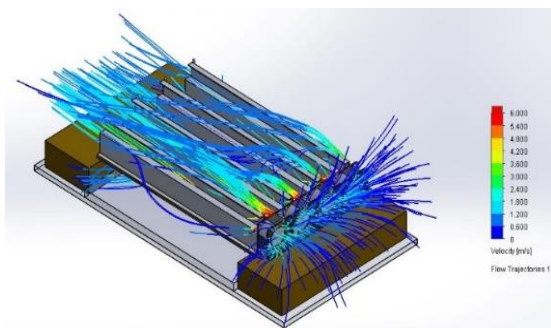


Fonte: Próprio Autor.

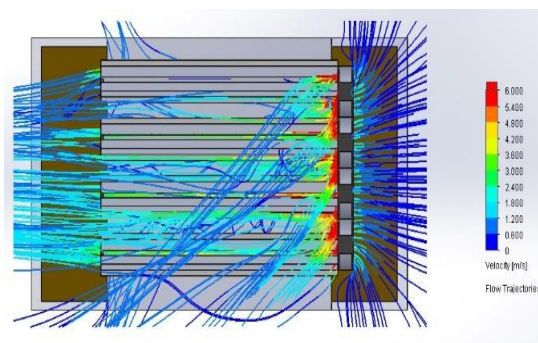
Com a combinação da resistência do ar imposta pela placa de circuito e com a posição do ventilador no módulo 1, o fluido é dissipado e chega com menor intensidade de volume e velocidade na extremidade do módulo. Já no módulo 4, há um aproveitamento melhor porque as condições são opostas em relação à posição do ventilador e do módulo. Na figura 48 no lado esquerdo (vista isométrica) é notado que a extremidade do módulo 1 o fluxo de ar é menor que no módulo 4, na imagem à direita (vista superior) o fluido é redirecionado do módulo 1 ao módulo 4.

Figura 48 - Vista isométrica e superior, análise do fluxo de ar na entrada dos módulos pelos ventiladores até a extremidade dos dissipadores.

Vista Isométrica



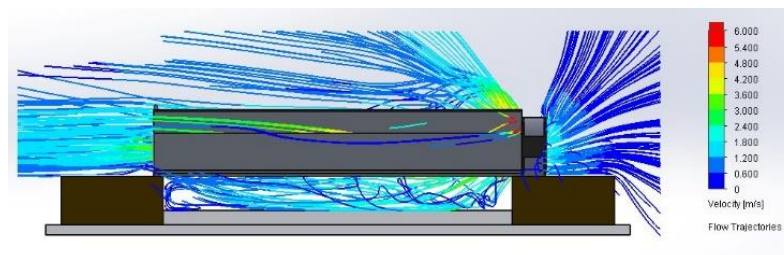
Vista Superior



Fonte: Próprio Autor.

A vista frontal do emissor de luz, indicada na figura 49, traz por outra perspectiva quanto o fluxo de ar é dissipado até a extremidade do módulo, sendo grande parte do fluido dissipado para cima e para baixo atingindo a prancha.

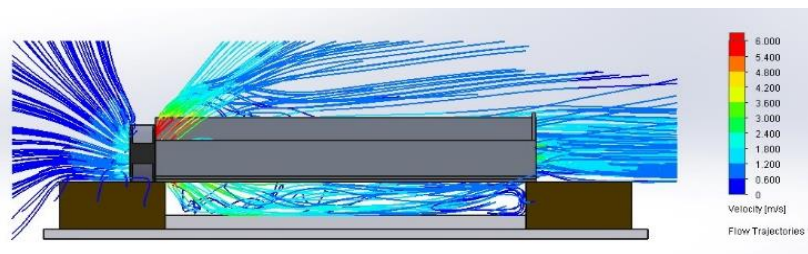
Figura 49 - Vista frontal da análise do fluido, indicando a dispersão da passagem do ar pelos módulos de refrigeração.



Fonte: Próprio Autor.

Com a vista posterior (figura 50) é observado que não há passagem do ar pela lateral do módulo 1, a lateral do ventilador está rente a do módulo, o fluido que poderia passar pelo meio do dissipador é retido pela placa de circuito e remetido para cima.

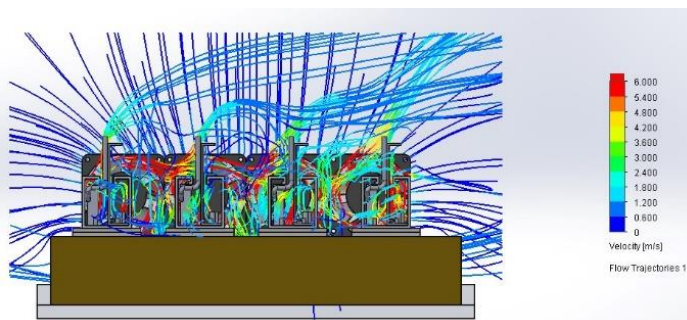
Figura 50 - Vista Posterior da simulação do emissor de luz, análise da dispersão do fluido no módulo 1.



Fonte: Próprio Autor.

Com a vista da lateral esquerda (figura 51) é possível notar que a placa de circuito impede o fluxo de ar e direciona o fluxo de ar do módulo 1 para a direção do módulo 4.

Figura 51 - Vista da lateral esquerda, representando o fluxo de ar direcionado para a esquerda do dispositivo.



Fonte: Próprio Autor.

5.4 Comparativo entre dados experimentais e teóricos do emissor de luz

Através dos resultados da simulação relacionados à velocidade do ar (figura 48), e as medidas registradas na tabela 3, fica evidente a semelhança entre os dados colhidos pelo sensor termopar, anemômetro, câmera térmica e a simulação. Logo, a validação da passagem de fluido do ventilador à extremidade dos módulos é verificada. O resultado também pode explicar as temperaturas mais elevadas do módulo 1 ao 4 (uma vez que não há fluxo de ar para a transferência de calor e massa). A validação térmica pode ser observada na figura 52, com as respectivas imagens térmicas da câmera infravermelho e a simulação térmica do modelo computacional, demonstrando, assim, a semelhança entre a coleta dos dados com o equipamento real e o modelo computacional.

Figura 52 - Comparativo das imagens da câmera infravermelho e simulação térmica.

Imagem térmica da câmera infravermelho

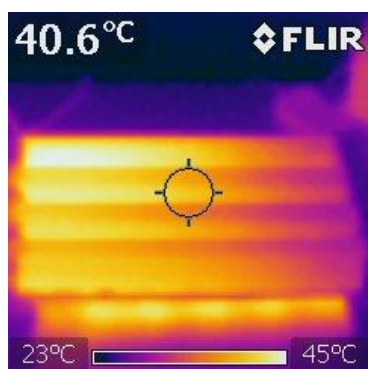
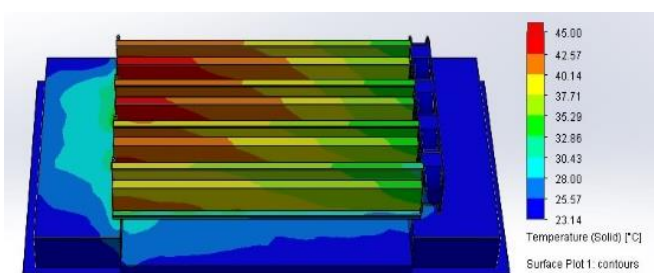


Imagem térmica da simulação



Fonte: Próprio Autor.

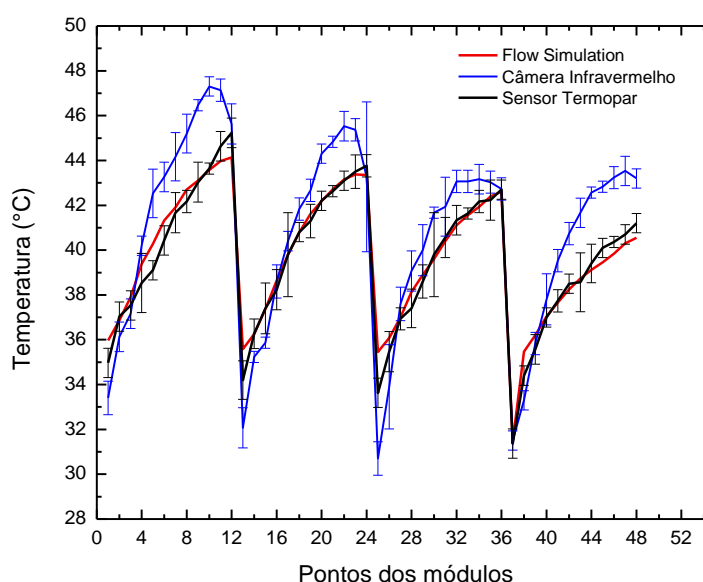
Os dados de cada ponto de medição lateral da temperatura contendo todos os módulos e instrumentos utilizados, podem ser notados no gráfico da figura 53 e na tabela A, presente no apêndice. A medição da câmera térmica e termopar foram feitas em triplicata, e o valor representado é a média entre as medidas de temperatura.

Em um contexto geral, a câmera térmica representa um valor próximo ao sensor termopar e ao modelo computacional. No entanto, em pontos específicos a câmera não permite um ajuste na configuração de leitura que não seja ou o brilho ou o fosco, assim as interferências provocadas pelo reflexo da luz incidente nas laterais dos módulos acabam confundindo o sensor

e gerando uma leitura errada, logo o termopar é utilizado como outra ferramenta de registro de dados.

Conforme análises anteriores, o módulo 1 apresenta maiores temperaturas do que os outros módulos, havendo, assim, uma diminuição gradativa até o módulo 4, isso ocorre tanto para as análises laterais do gráfico da figura 53 quanto para a superfície das aletas do gráfico da figura 54.

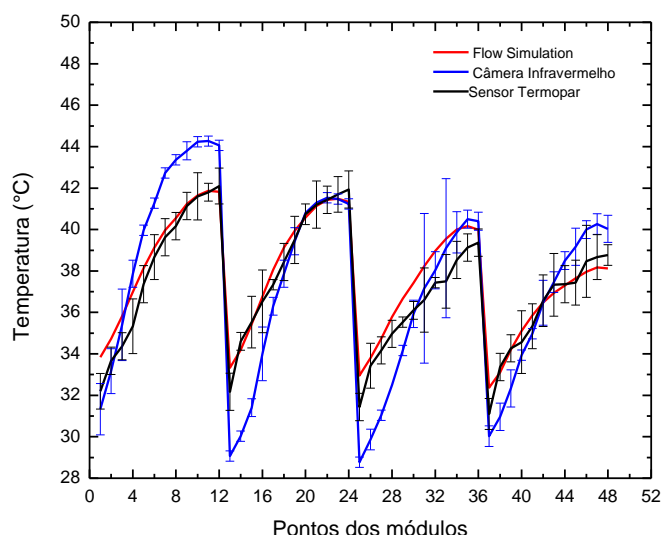
Figura 53 - Comparativo de temperatura entre os pontos laterais do emissor de luz utilizando a câmera térmica, sensor termopar e os dados de simulação (Flow Simulation).



Fonte: Próprio Autor.

Para os dados dos pontos superiores localizado nas aletas, a notação está representada no gráfico da figura 54 e na tabela B (presente no apêndice). Os dados apresentados na figura 54 são valores médios obtidos a partir das medições em triplicata realizadas com a câmera térmica e o sensor termopar.

Figura 54 - Temperaturas dos pontos superiores entre os dados coletados do emissor de luz e com a câmera térmica e sensor termopar com a simulação.



Fonte: Próprio Autor.

5.5 Análise do emissor de luz envolvendo simulações térmicas no interior dos módulos e a temperatura do fluido

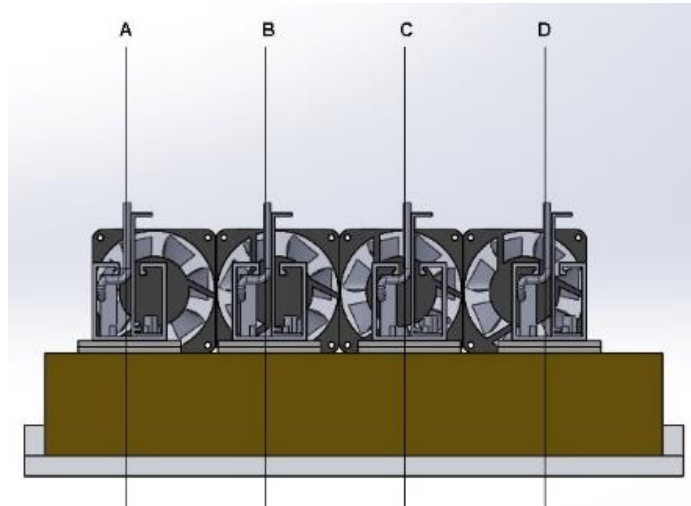
Seguindo a metodologia e padronização das simulações, iniciou-se uma nova coleta de dados no emissor de luz. Os dados correspondem a um corte no meio dos módulos com pontos de aferição sobre os LEDs em 1,5 mm.

A demonstração dos dados da simulação é seguida pelas medidas da temperatura do fluido em pontos específicos de análise, como a superfície dos LEDs e extremidade dos dissipadores.

5.5.1 Análise térmica com corte nos módulos do emissor de luz

Entre o primeiro e quarto módulo foram realizados cortes, seguindo respectivamente as letras: A, B, C e D. Conforme indicado na figura 55, os cortes foram feitos para colher a temperatura do ponto com maior proximidade dos LEDs uma vez que é uma das regiões de maior elevação térmica.

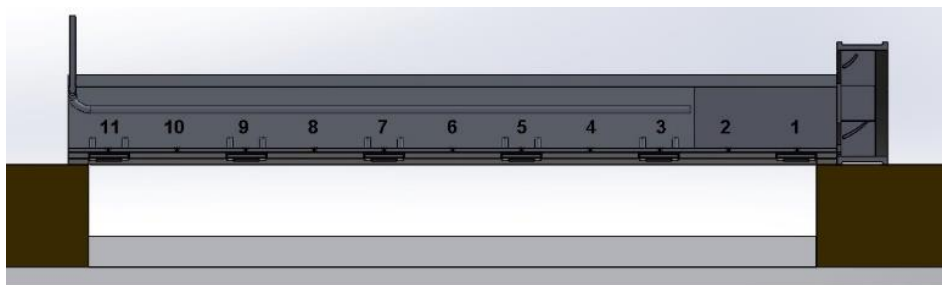
Figura 55 - Região do plano de corte de cada módulo do emissor de luz representados pelas letras A, B, C e D.



Fonte: Próprio Autor.

A figura 56 representa o corte A (módulo 1), em que foram definidos pontos de marcação em cada módulo com uma marcação de pontos da direita para a esquerda. A tabela 5 demonstra a ordem dos pontos em cada um dos módulos.

Figura 56 - Numeração dos pontos de medição de temperatura representados por uma vista frontal do módulo 1.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 5 - Pontos de numeração realizados nos cortes (virtuais) de cada um dos módulos.

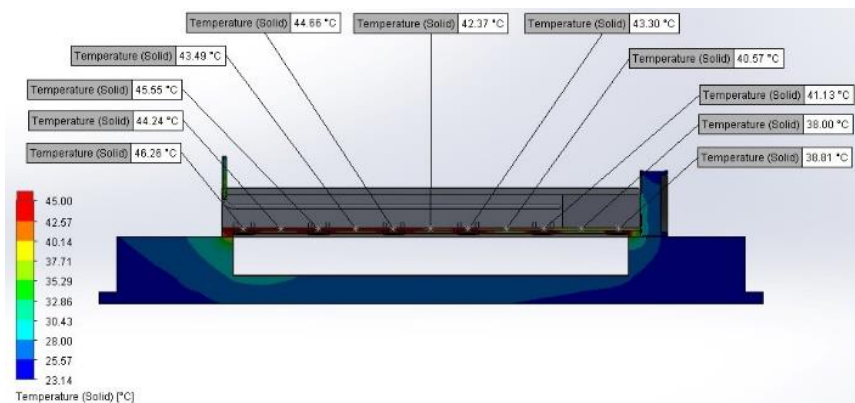
Módulo	Pontos de medição
1	01 ao 11
2	12 ao 22
3	23 ao 33
4	34 ao 45

Fonte: Próprio Autor.

As temperaturas colhidas sobre e entre os LEDs podem ser observadas nas imagens das figuras 57 a 60.

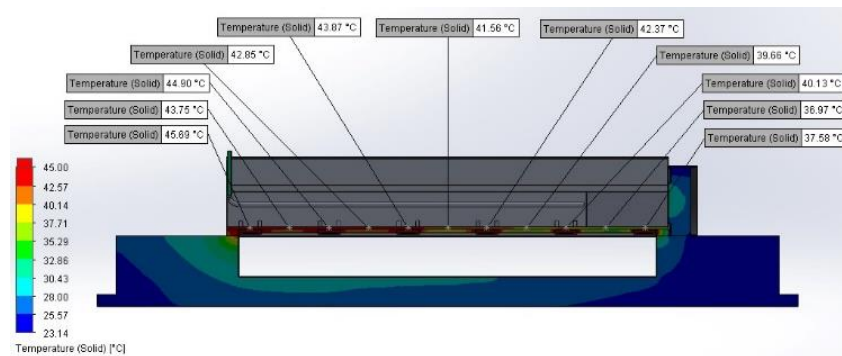
Como na superfície da lateral e das aletas, as maiores temperaturas são registradas no módulo 1 e gradativamente são reduzidas até o módulo 4.

Figura 57 - Corte no plano “A” (módulo 1) com os dados de temperatura do dissipador.



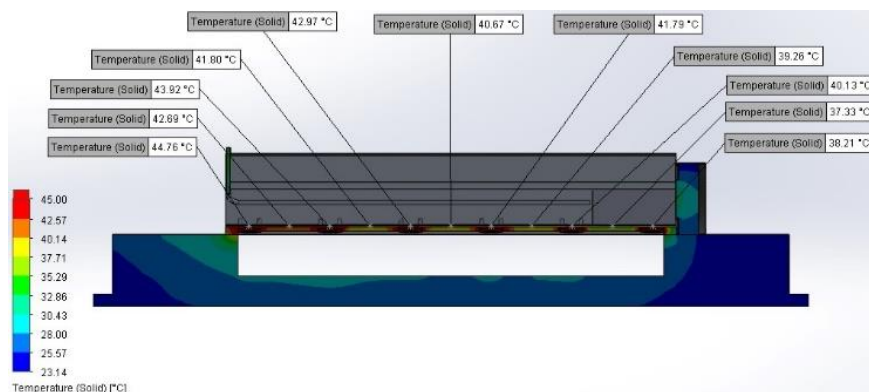
Fonte: Próprio Autor.

Figura 58 - Corte no plano “B” (módulo 2) com os dados de temperatura do dissipador.



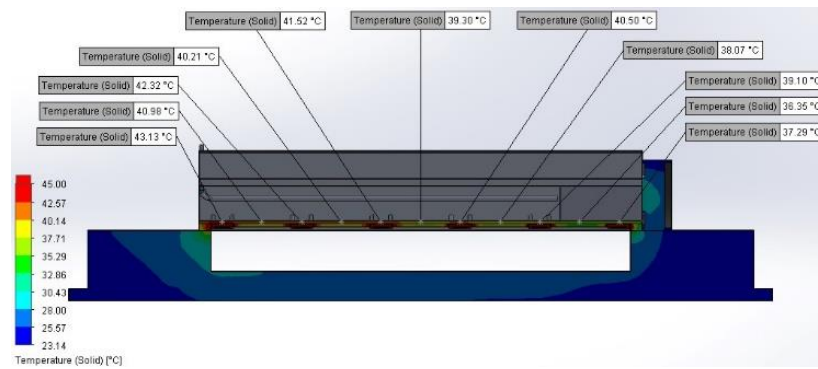
Fonte: Próprio Autor.

Figura 59 - Corte no plano “C” (módulo 3) com os dados de temperatura do dissipador.



Fonte: Próprio Autor.

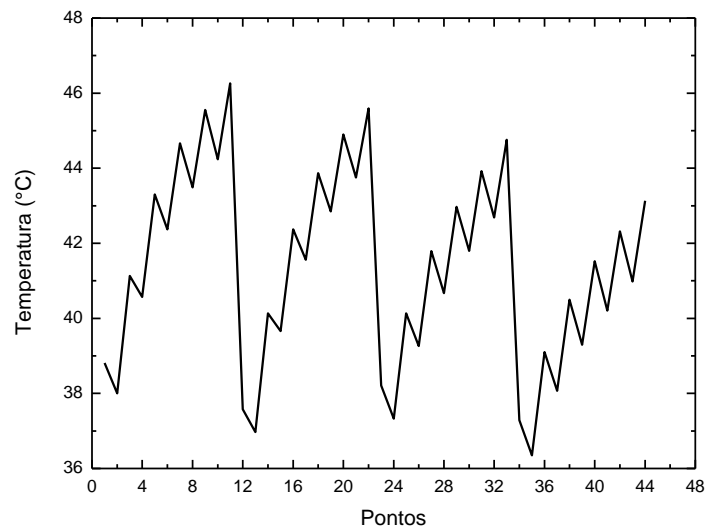
Figura 60 - Corte no plano “D” (módulo 4) com os dados de temperatura do dissipador.



Fonte: Próprio Autor.

A figura 61 representa a temperatura nos pontos dos cortes de cada módulo. Deve ser observado que conforme a análise externa da figura 52, os pontos internos também representam valores mais elevados no módulo 1. Os dados também podem ser analisados na tabela 8.

Figura 61 – Temperaturas dos pontos internos referentes aos planos de corte (A, B, C e D) dos módulos 1 ao 4.



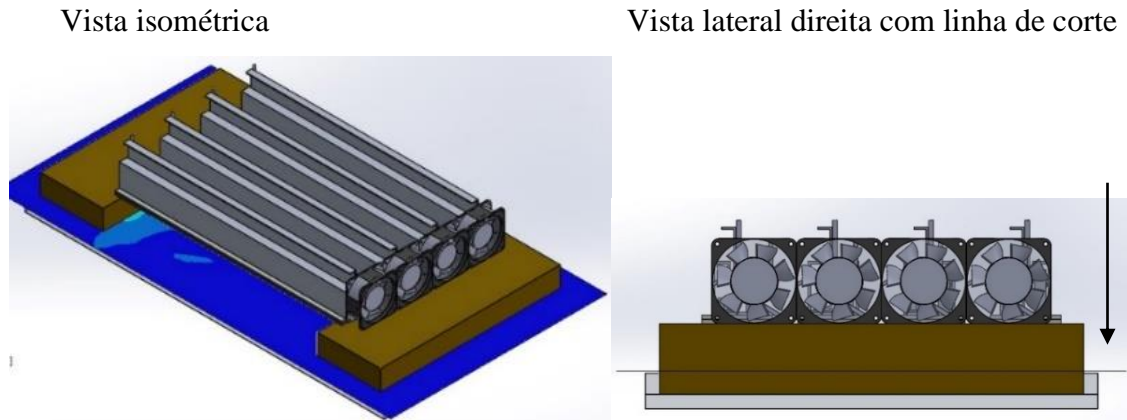
Fonte: Próprio Autor.

5.5.2 Análise da simulação de temperatura do fluido no emissor de luz

A temperatura do fluido é um fator importante para as análises devido a interação que possa haver com um possível corpo de prova. Na primeira análise, representada pela figura 62, foi selecionada uma linha do fluido rente à superfície da prancha, na imagem da esquerda é

demonstrada a vista isométrica seguindo pela vista da lateral direita, em ambas imagens é observada a altura da linha de corte, na vista lateral direita a linha é indicada por uma seta.

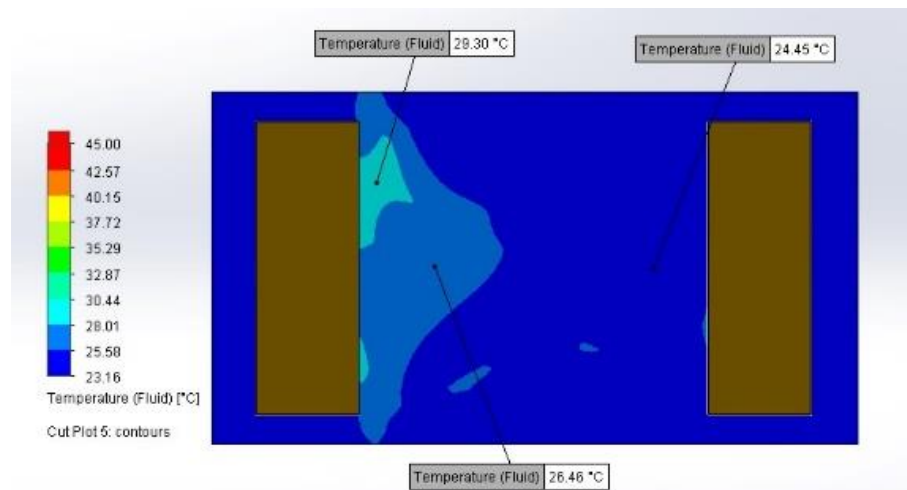
Figura 62 - Vista isométrica e lateral direita com a linha de corte e análise da temperatura do fluido.



Fonte: Próprio Autor.

De acordo com a figura 63, observa-se o gradiente de temperatura em toda a prancha, o ponto de maior aquecimento do fluido da prancha foi de 29,3 °C e o menor 23,5 °C.

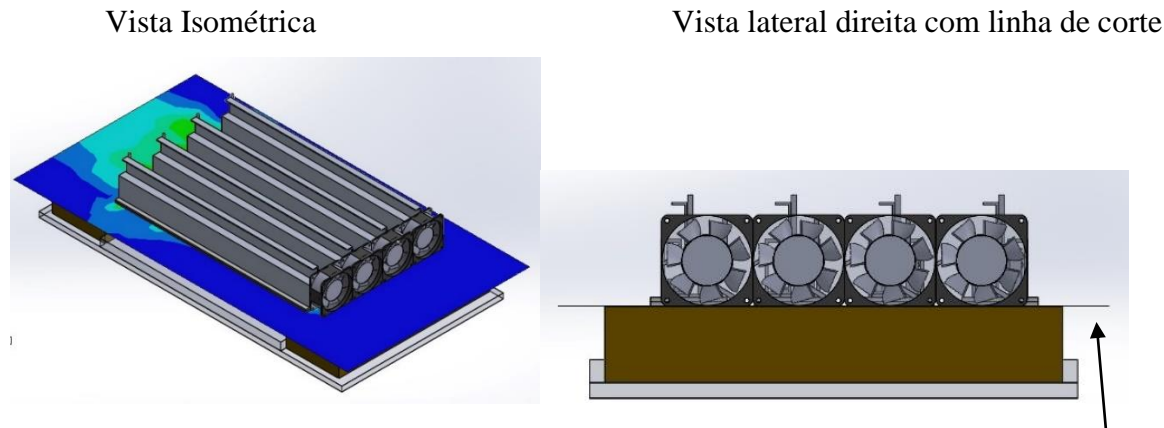
Figura 63 - Plano de corte da vista superior representando a temperatura do fluido na prancha.



Fonte: Próprio Autor.

A indicação da temperatura do fluido rente à superfície dos LEDs é um indicativo de temperatura da fonte emissora de calor. A linha de corte das medições pode ser observada na figura 64.

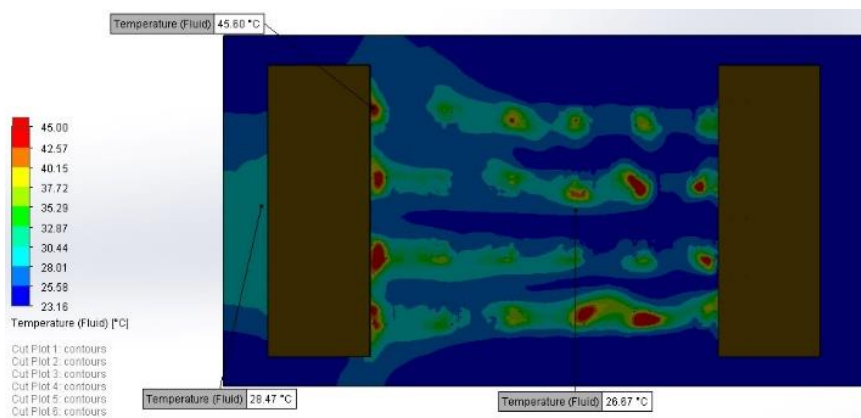
Figura 64 - Vista isométrica e lateral direita representando a linha de corte da temperatura do fluido rente aos LEDs.



Fonte: Próprio Autor.

Em uma vista superior não seria possível analisar a temperatura do fluido rente aos LEDs, possibilitando apenas na extremidade dos módulos. Logo, colocou-se uma vista inferior (de baixo para cima). A vista é analisada na figura 65, o ponto de maior temperatura foi de 45,5 °C e o menor de 23,5 °C.

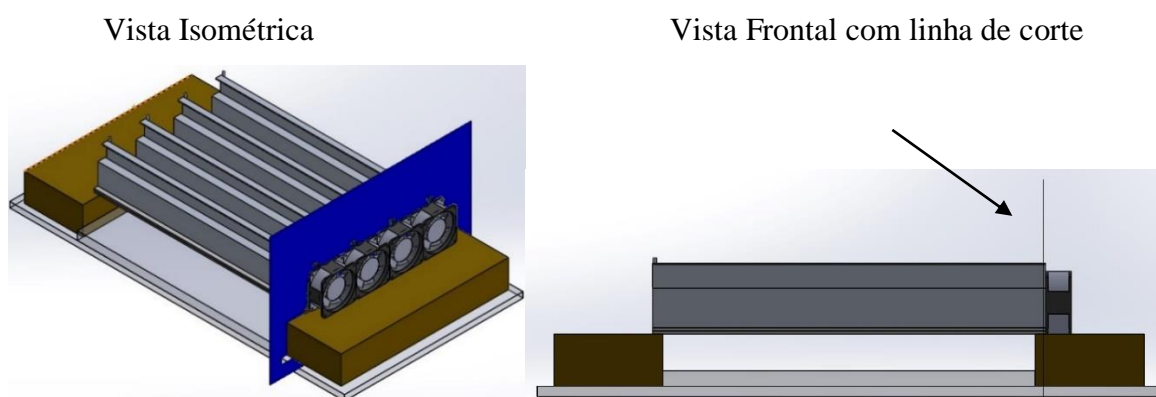
Figura 65 - Vista Inferior com a temperatura do fluido na base dos dissipadores e rente aos LEDs, maior registro de temperatura foi de 45,5 °C.



Fonte: Próprio Autor.

O fluido uma vez que passa pelos ventiladores tende a percorrer o módulo, a temperatura de entrada e saída do fluido deve ser tomada com a finalidade de observar a energia térmica interna do fluido nos dissipadores. A figura 66 traz a região de medição.

Figura 66 - Plano de corte da temperatura do fluido entre os módulos e ventiladores, observados pela vista isométrica e frontal.



Fonte: Próprio Autor.

A temperatura de 23,5 °C localizada na parte superior da figura 67 é uma unidade de entrada, definida no início da simulação. A maior temperatura foi de 32,87 °C e a menor, de 23,5 °C.

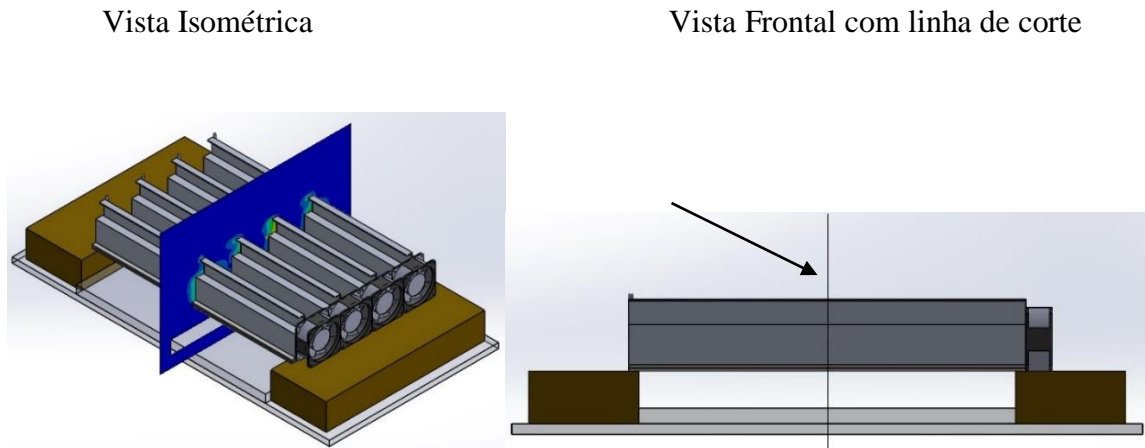
Figura 67 - Vista lateral esquerda - Temperatura do fluido com o plano de corte próximo aos ventiladores.



Fonte: Próprio Autor.

O indicativo da energia térmica do meio do emissor de luz pode ser observado na figura 68. Sua medição serve para acompanhar a evolução da temperatura até a extremidade do fluido.

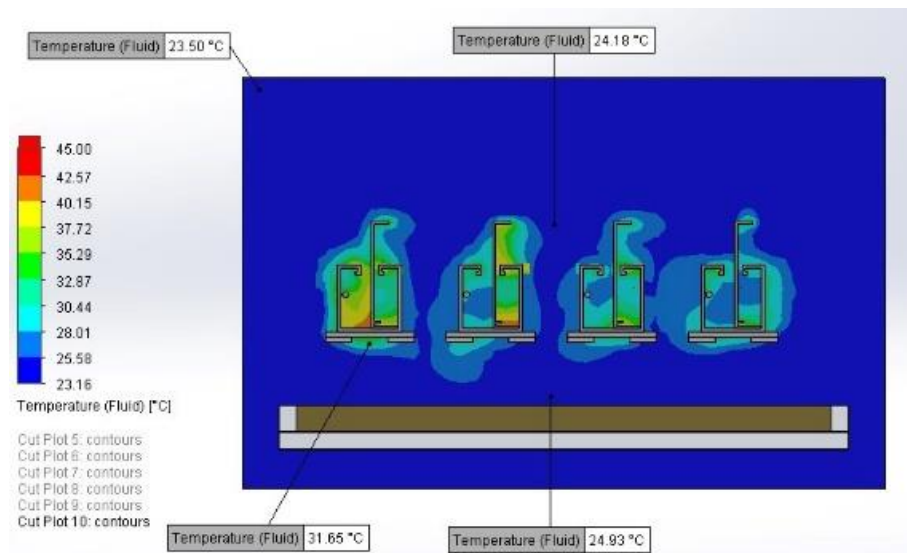
Figura 68 - Vista Isométrica e frontal com a posição do plano de corte no meio do dissipador.



Fonte: Próprio Autor.

O indicador de maior temperatura nessa região foi de 40,7 °C no módulo 1 como pode ser visto na figura 69.

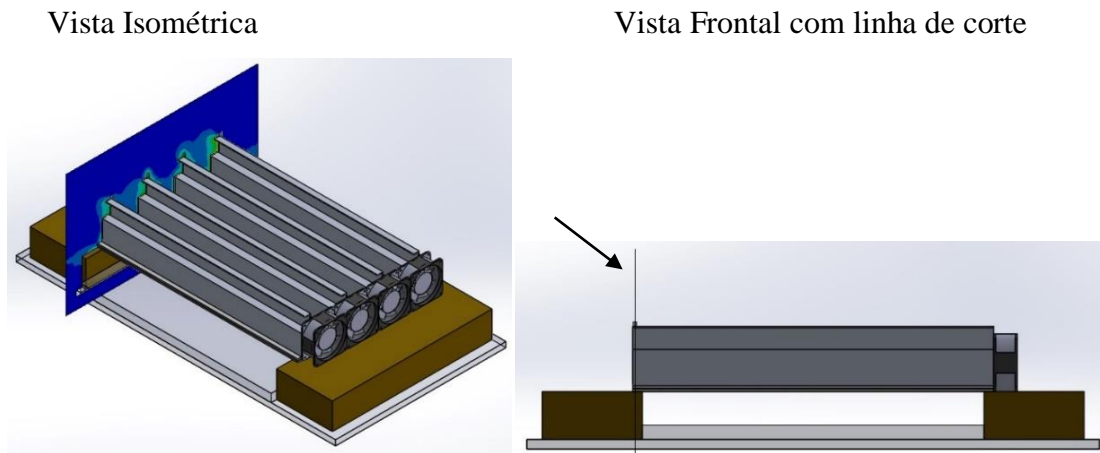
Figura 69 - Vista lateral esquerda - Temperatura do fluido no meio dos módulos, maior temperatura registrada no módulo 1.



Fonte: Próprio Autor.

A extremidade dos módulos (figura 70) é um parâmetro importante de análise, uma vez que representa o fluido saindo dos módulos, onde é caracterizado pela maior energia térmica absorvida pela fonte de calor.

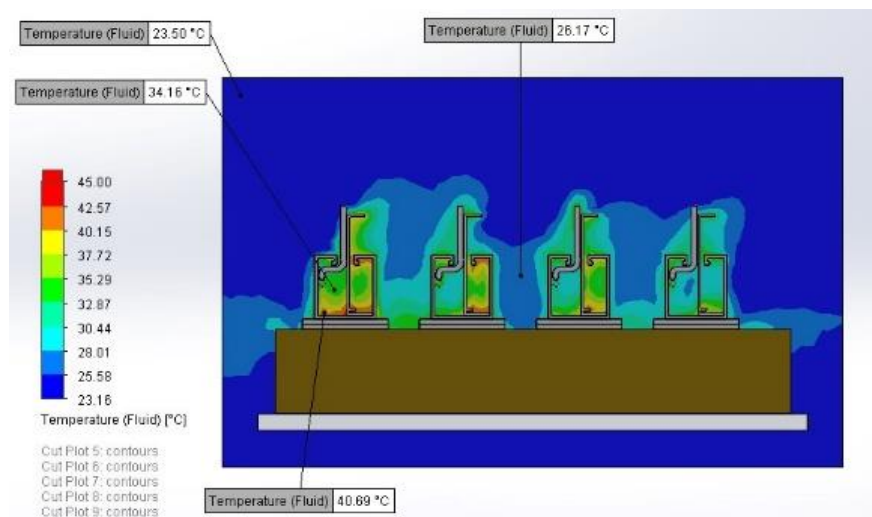
Figura 70 - Vista Isométrica e Vista frontal com linha de corte na extremidade dos módulos.



Fonte: Próprio Autor.

Na região de maior aquecimento na superfície o fluido chega em uma temperatura de 42,57 °C, registrando as maiores temperaturas no módulo 1 conforme figura 71.

Figura 71 - Vista lateral esquerda, extremidade dos módulos, maior temperatura do fluido no módulo 1.

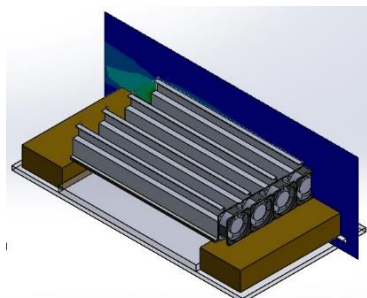


Fonte: Próprio Autor.

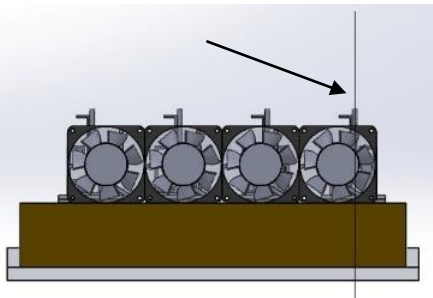
No sentido axial no módulo 1 foi feito um corte para observar o aquecimento de forma contínua do fluido no decorrer do módulo. Esse módulo foi escolhido devido às maiores temperaturas do fluido registradas (corte demonstrado na figura 72).

Figura 72 - Análise da temperatura do fluido pela vista isométrica e lateral direita, o plano de corte no feito no módulo 1.

Vista Isométrica



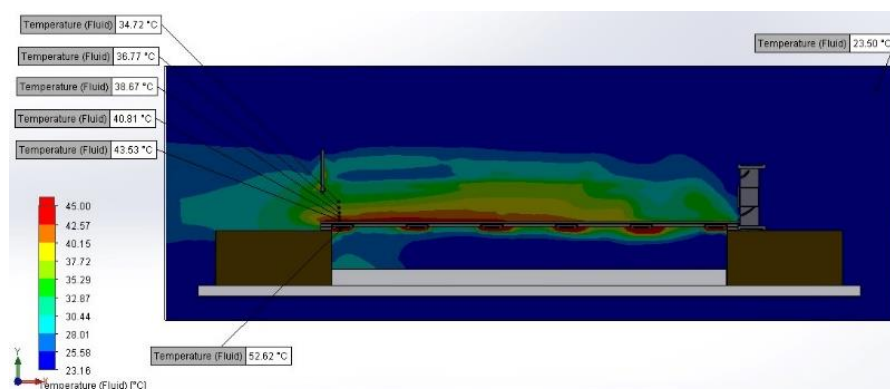
Vista lateral direita com linha de corte



Fonte: Próprio Autor.

O maior registro da temperatura do fluido foi de 43,53 °C. Além disso, é possível visualizar, de uma forma contínua, o aquecimento da entrada do fluido no módulo até o registro de maior energia térmica até a extremidade (Figura 73).

Figura 73 - Vista frontal do corte vertical no módulo 1, análise da temperatura do fluido.



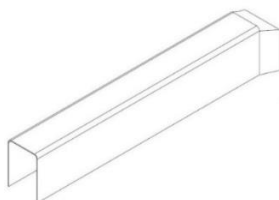
Fonte: Próprio Autor.

5.6 Adaptações no emissor de luz

O fluxo de ar relaciona diretamente o aquecimento dos módulos. Pelas simulações foi notado que, de acordo com a posição dos ventiladores, o resfriamento do dissipador pode ser alterado, uma vez que o fluxo nas análises sofre grande dissipação e deixa de ser aproveitado. Foram realizados 7 projetos de adaptação (configurações) para otimizar o fluxo de ar, a intenção é que o fluido possa passar apenas pelo módulo selecionado, de forma regular, e não apenas em uma das laterais dos módulos. Nas figuras 74 e 75 é observado a modelagem da canaleta da

adaptação número 7, que apresentou melhores resultados, os módulos mantiveram as mesmas distâncias de 18 mm entre eles.

Figura 74 - Vista Isométrica da modelagem em 3 dimensões da canaleta de ar usada para otimizar a transferência de calor.

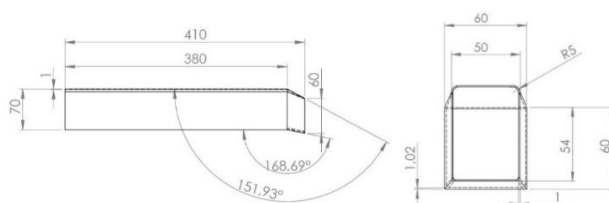


Fonte: Próprio Autor.

Figura 75 - Vista frontal e lateral esquerda da canaleta da canaleta com as cotas (mm) apresentadas.

Vista Frontal

Vista lateral esquerda



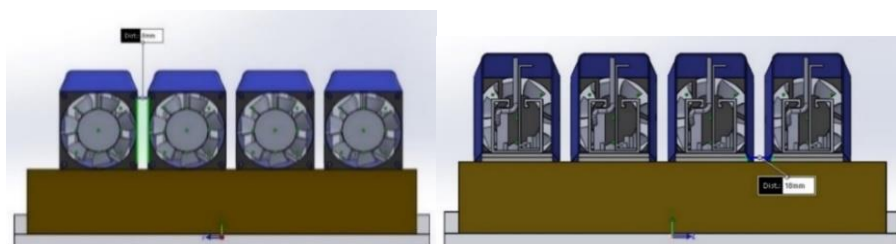
Fonte: Próprio Autor.

A figura 76 apresenta as imagens da vista lateral direita e lateral esquerda do emissor de luz. A distância dos módulos permaneceu a mesma de 18 mm, e a distância entre canaletas de 16 mm. Os ventiladores estão posicionados com 3 cm de distância do dissipador.

Figura 76 - Vista lateral direita e lateral esquerda do emissor de luz com a adaptação 7 (canaletas com ventiladores centralizadas e afastados em 3 cm dos módulos).

Vista lateral direita

Vista lateral esquerda



Fonte: Próprio Autor.

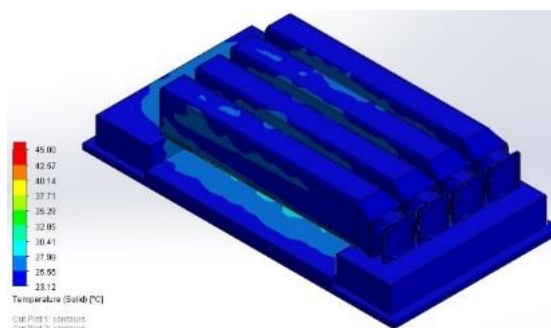
Os 7 modelos de adaptação podem ser observados no apêndice (figuras A, B e C), os melhores resultados são respectivamente das adaptações 7, 4, 5, 2, 3, 6 e 1.

5.6.1 Comparativo térmico do equipamento emissor de luz e o modelo otimizado

As canaletas foram dimensionadas para serem produzidas em polímeros PLA ou ABS e fabricadas em impressora 3 D (três dimensões). A figura 77 mostra a simulação do modelo otimizado com a utilização das canaletas. O modelo pode ser comparado com a figura 78 que trata da simulação térmica do emissor de luz e o modelo do projeto da adaptação 7.

O material utilizado na simulação das canaletas foi o polímero PLA, extraído por fontes renováveis, portanto, um biopolímero. Este polímero é produzido em larga escala e um dos mais usados em impressoras 3 D.

Figura 77 - Vista Isométrica da simulação térmica do modelo otimizado com as canaletas em modo visível.

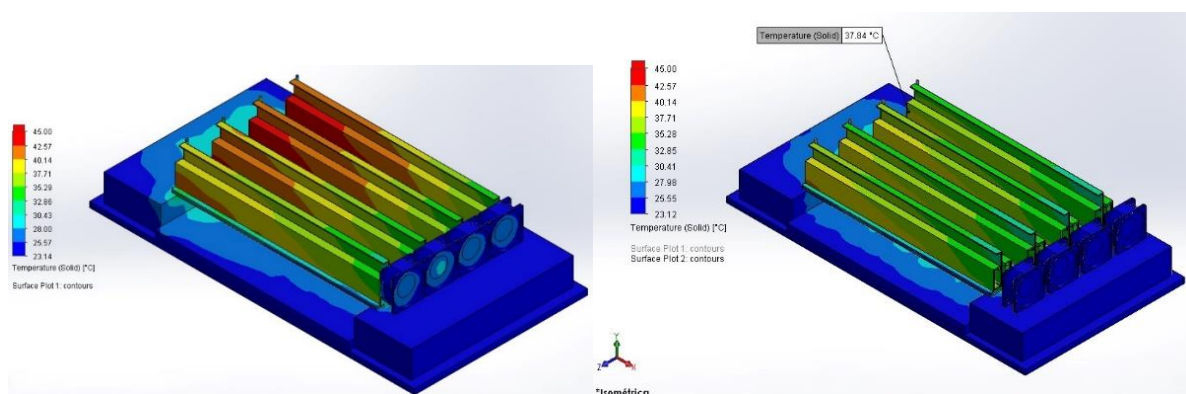


Fonte: Próprio Autor.

Observando a figura 78, onde à direita a imagem do emissor de luz e à esquerda a adaptação 7, foi possível ver que no modelo adaptado o uso das canaletas diminuiu consideravelmente a temperatura dos dissipadores, onde a menor temperatura foi de 37,98 C (vista externa). Não há diferenças de temperatura de um módulo para o outro, contribuindo assim para a diminuição da degradação dos LEDs por aquecimento.

Para melhor entendimento das temperaturas dos módulos, as canaletas foram colocadas como “invisíveis” apenas para a visualização, não deixando de participar do resultado. Conforme a figura 78, nos mesmos pontos de coleta (ponto 11 da aleta, extremidade do módulo 1) o emissor de luz apresentou 44,13 °C e o modelo da adaptação 7 apresentou 37,84 °C.

Figura 78 - Vista Isométrica da Análise térmica do equipamento emissor de luz e otimizado

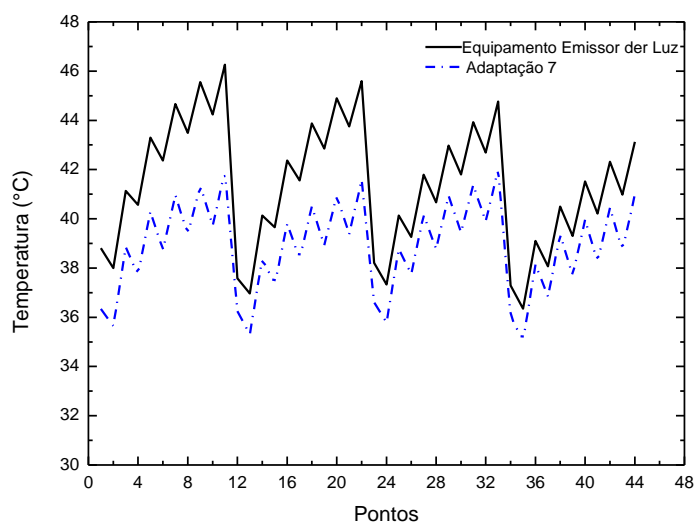


Fonte: Próprio Autor.

Os cortes no meio dos módulos seguem os mesmos parâmetros da figura 55 (corte nas regiões A, B, C e D). A variação de temperatura dos modelos analisados pode ser notada no gráfico 4. Vale ressaltar que os pontos medidos foram internos e com 1,5 mm da fonte de calor, sendo um material específico para condução de calor (Alumínio 6165 T5), o que dificulta a diferença de temperatura de um projeto para o outro.

A figura 79 representa uma diminuição de temperatura considerada do modelo utilizado para o otimizado, sendo que o último ainda apresentou um resultado constante para todos os módulos.

Figura 79 - Comparativo de temperatura do emissor de luz e a adaptação 7.

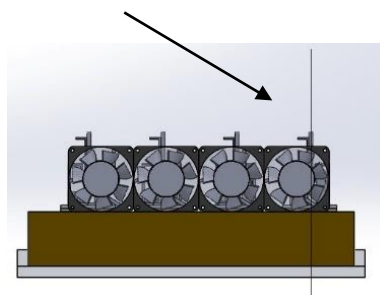


Fonte: Próprio Autor.

5.6.2 Comparativo térmico do fluido entre o equipamento emissor de luz e o modelo otimizado

O motivo da variação de temperatura demonstrada da figura 79 pode ser explicada por diversos fatores, entre eles, a temperatura do fluido, sendo uma consequência que interfere na temperatura do módulo, com melhor aproveitamento do fluxo de ar ocorre a diminuição da temperatura do fluido, como comparação realizada pelo corte no módulo 1. O plano de corte é indicado na figura 80, sendo realizado no meio do módulo no sentido axial de seu eixo.

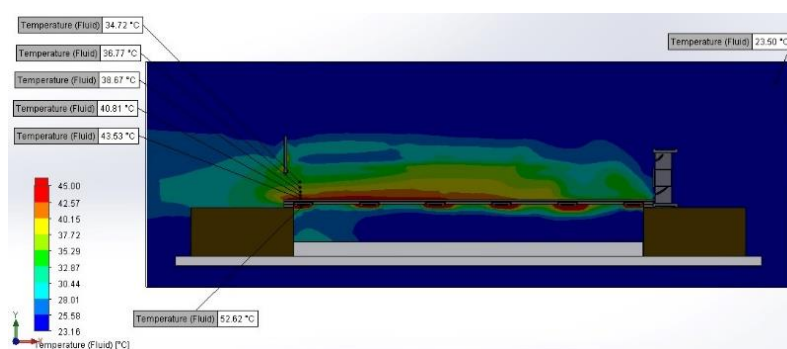
Figura 80 - Região de corte - Módulo 1, Vista lateral direita com linha de corte no meio do módulo.



Fonte: Próprio Autor.

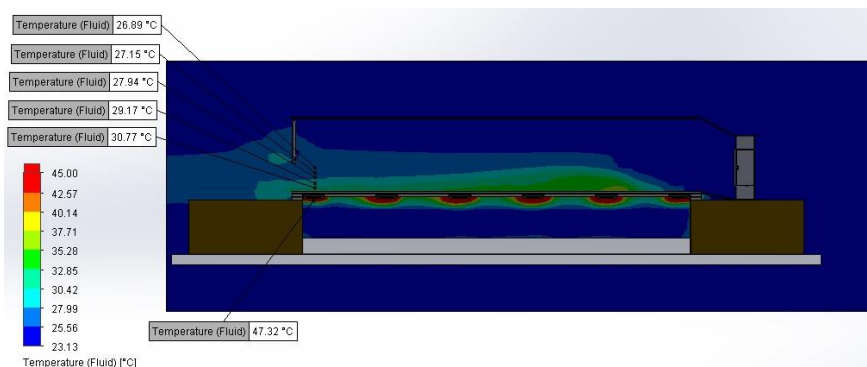
A temperatura do fluido na figura 81 indica um ápice de 52,62 °C, enquanto que no modelo da adaptação 7 visto na figura 82 é de 47,32 °C. Já na medida rente à superfície do LED, na parte interna dos módulos, o modelo utilizado chegou em 43,53 °C, enquanto que na adaptação 7 é de 30,77 °C. Vale ressaltar que no modelo utilizado sem a canaleta o fluxo de ar é dissipado e um volume de ar vai para baixo do módulo refrigerando a prancha, porém não foi obtida menores temperaturas que o modelo utilizando a canaleta. No modelo da adaptação 7 em relação ao emissor de luz a variação de temperatura chegou em 12,76 °C.

Figura 81 – Temperatura do fluido no equipamento emissor de luz com o corte no módulo 1.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 82 - Análise da temperatura do fluido na adaptação 7, indicando unidades de temperaturas inferiores ao modelo utilizado pelo emissor de luz.

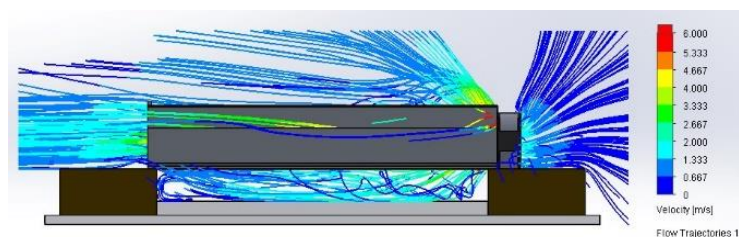


Fonte: Próprio Autor.

5.6.3 Comparativo do fluxo de ar entre o equipamento emissor de luz e o modelo otimizado

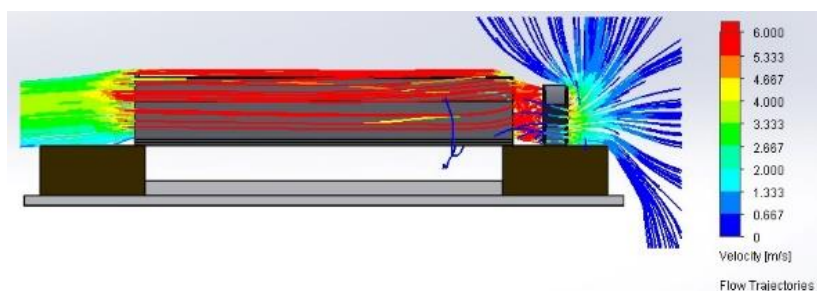
O modelo da adaptação 7 consegue manter uma troca de calor e massa com maior eficiência em relação ao modelo utilizado, como pode ser comparado nas imagens das figuras 83 e 84. Na primeira há uma dissipação de ar, na segunda o ar é canalizado e não apresenta perda de volume e velocidade até à extremidade do módulo.

Figura 83 - Vista frontal do emissor de luz indicando a dissipação do fluxo de ar nos módulos.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 84 - Vista frontal da adaptação 7, indicando o aproveitamento do fluxo de ar em todo o módulo.



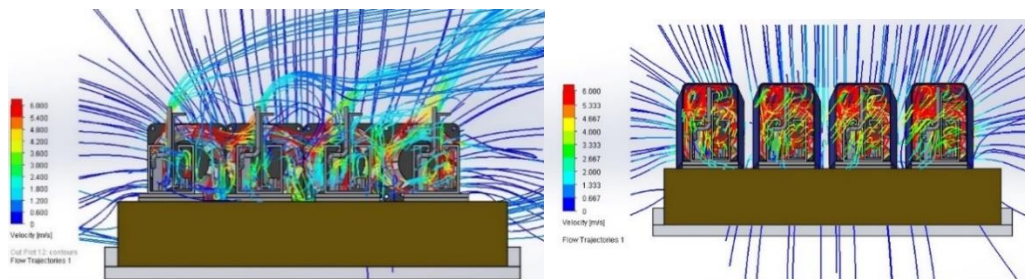
Fonte: Próprio Autor.

A justificativa mencionada acima pode ser aplicada nas análises das figuras 85, comparando a dissipação de fluidos com a vista lateral esquerda do modelo utilizado e da adaptação 7, sendo evidente a dissipação do fluido no emissor de luz.

Figura 85 - Análise da dissipação do fluido do emissor de luz e do adaptação 7.

Emissor de Luz (modelo utilizado)

Adaptação 7



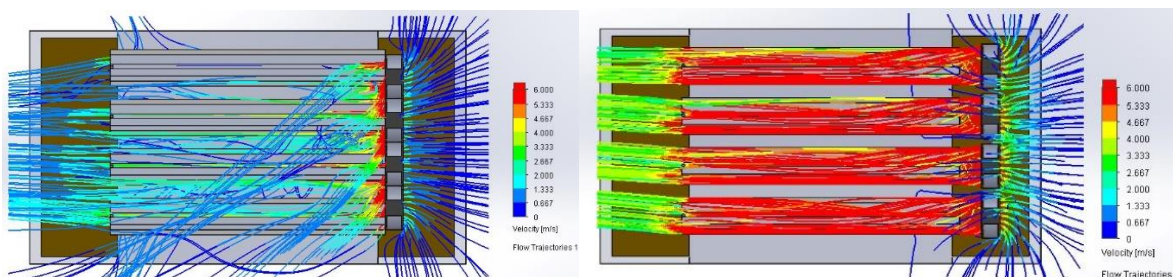
Fonte: Próprio Autor.

Por outro ângulo, vista superior das imagens da figuras 86, pode ser observado que na extremidade do módulo há uma diferença na velocidade do fluido, no Emissor de Luz o fluxo de ar no módulo 1 chega na extremidade com 0,4 m/s, enquanto que na Adaptação 7 chega com velocidade de 6 m/s.

Figura 86 - Vista superior do fluxo de ar do emissor de luz e adaptação 7.

Emissor de Luz

Adaptação 7



Fonte: Próprio Autor.

5.7 Dissipador em leque

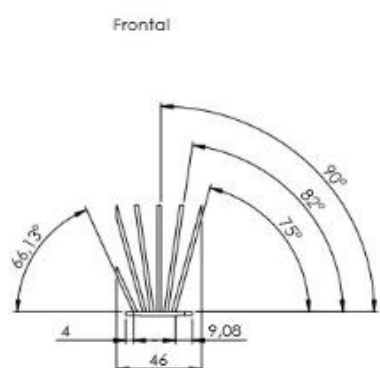
O Dissipador em leque foi o resultado de um dimensionamento baseado nos conceitos teóricos apresentados no início da pesquisa, seu desenho pode ser considerado como geometria em leque, o motivo da modelagem com essa geometria foi para que a base onde ficam os LEDs

tenham mais aletas para condução térmica, deixando a região superior onde há um acúmulo de fluido com energia térmica mais elevada seja de fácil retirada.

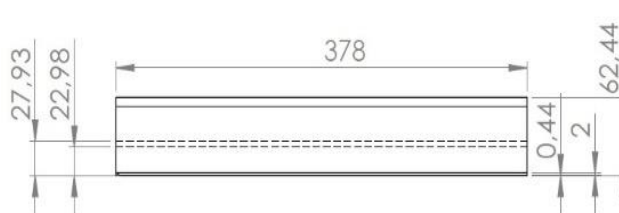
Para ter parâmetros de comparação, o dissipador em leque segue com as mesmas dimensões de comprimento, largura, altura, espessura e material do emissor de luz. Na figura 87 pode ser avaliada a vista frontal e a lateral esquerda, respectivamente, e suas cotas de dimensões em mm. A Figura 88 representa a vista explodida indicando os 61 componentes.

Figura 87 - Vista frontal e lateral esquerda do dissipador - dissipador em leque, representado por suas cotas.

Vista frontal

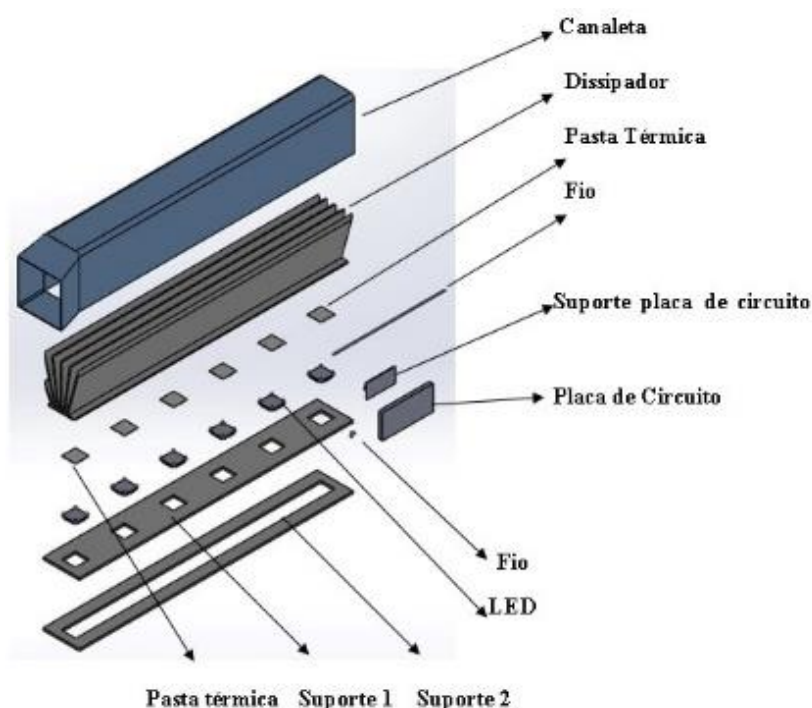


Lateral esquerda



Fonte: Próprio Autor.

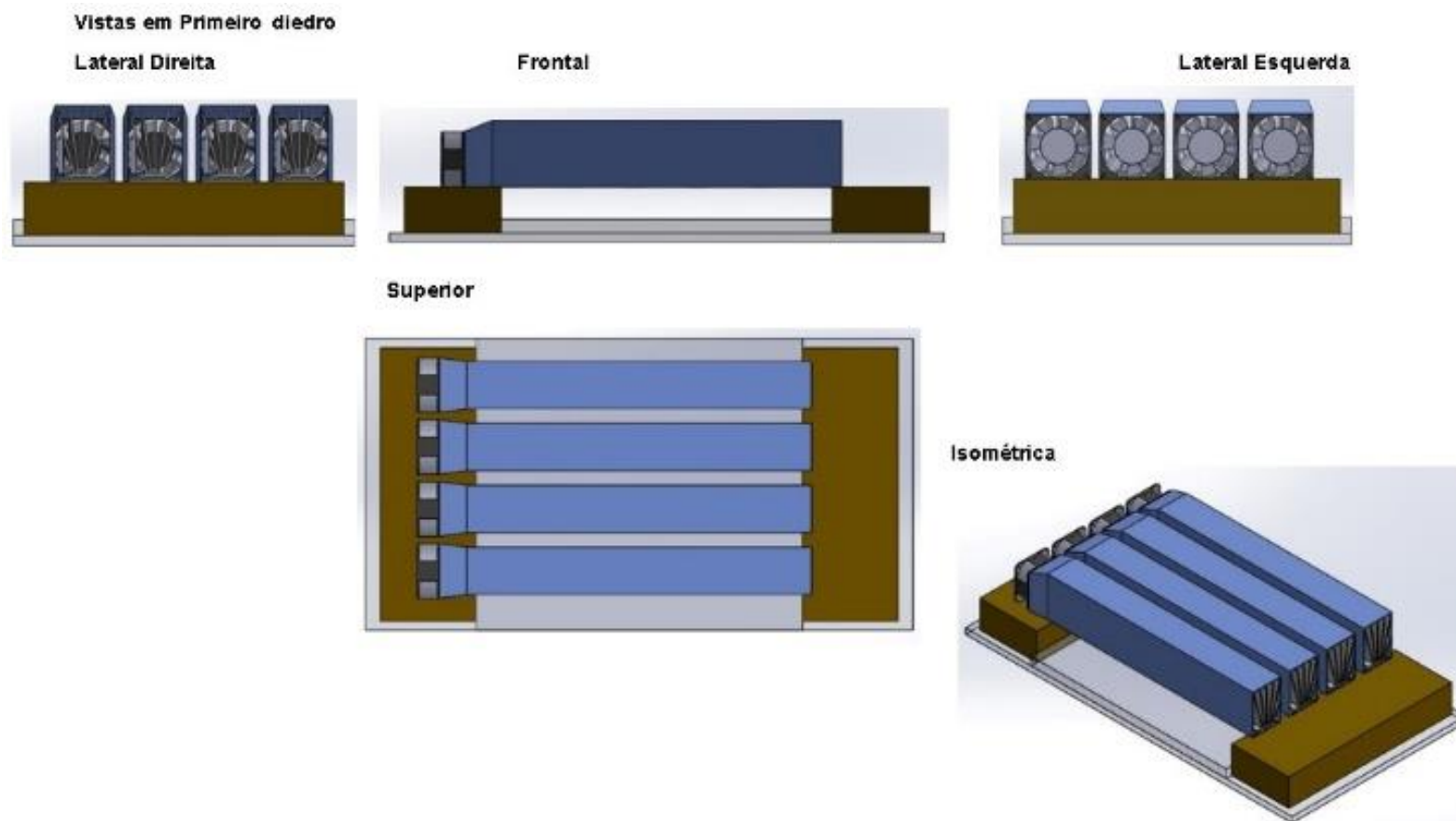
Figura 88 - Vista explodida e os componentes que integram cada módulo do dissipador em leque.



Fonte: Próprio Autor.

A montagem do emissor de luz utilizando o dissipador do dissipador em leque pode ser vista na figura 89 com a apresentação das vistas.

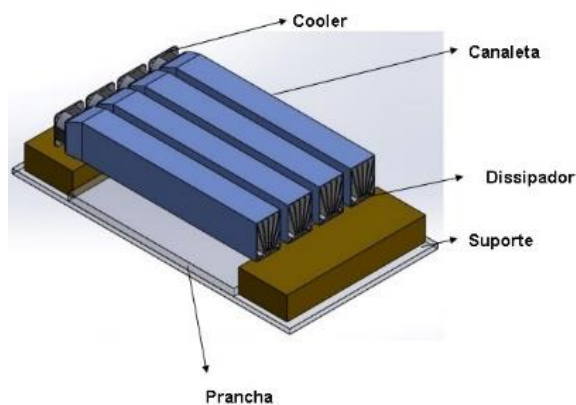
Figura 89 - Representação das vistas do dissipador em leque.



Fonte: Próprio Autor.

A montagem do dispositivo com o dissipador em leque é a mesma utilizada nos projetos anteriores, os módulos seguem as mesmas distâncias com suporte e prancha na mesma posição. A figura 90 representa a vista isométrica com nomenclatura, a diferença é na posição do conjunto de ventilador (*cooler*) sendo posicionado no lado esquerdo do equipamento.

Figura 90 - Dissipador em leque montado para a simulação representado a nomenclatura de cada componente externo.



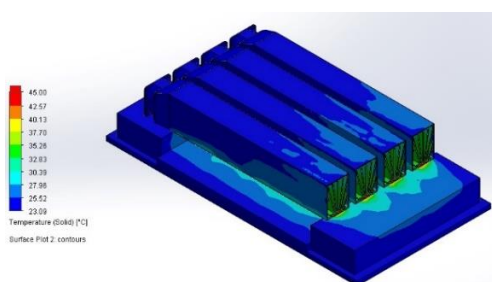
Fonte: Próprio Autor.

5.7.1 Análise térmica do dissipador em leque

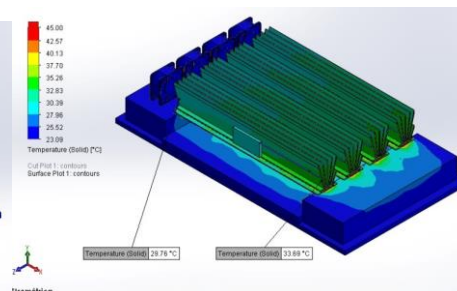
Na figura 91, observa-se a temperatura do dissipador de calor do dissipador em leque. Na primeira imagem, com as canaletas, a temperatura máxima de 28,7 °C, no lado direito as canaletas estão com visualização em comando invisível, porém as mesmas estão presentes nas simulações. A temperatura na extremidade do dissipador do módulo 1 (primeiro módulo de baixo para cima) foi de 29,7 °C próximo ao ventilador, e com 33,69 °C na extremidade oposta.

Figura 91 - Vista isométrica do dispositivo do dissipador em leque, representando a temperatura da canaleta e dos módulos com canaletas invisíveis.

Canaleta aparente



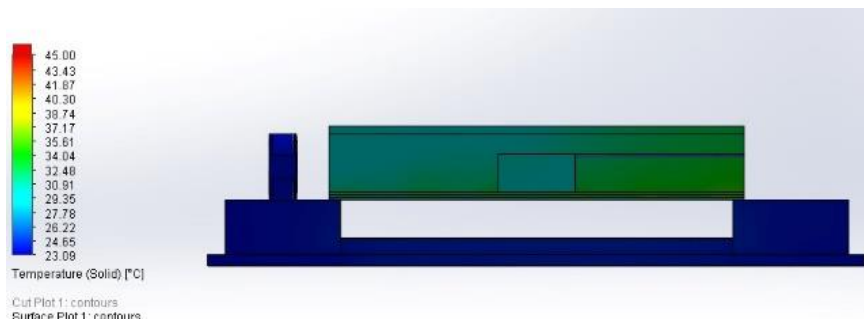
Canaleta no modo invisível



Fonte: Próprio Autor.

Pela figura 91, por uma avaliação analítica, não há diferenças de temperatura de um módulo para o outro, diferença presente no modelo utilizado pelo emissor de luz. O gradiente de temperatura pode ser representado pela vista frontal (figura 92). A vista posterior apresenta os mesmos resultados.

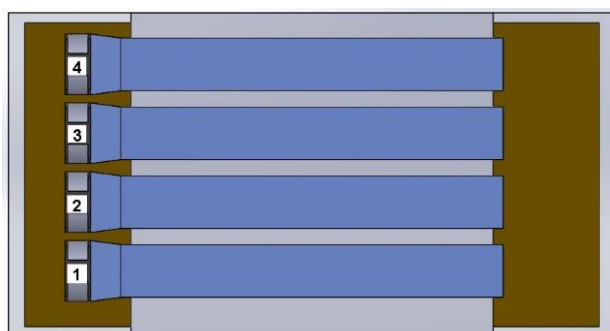
Figura 92 - Vista frontal do módulo 1 demonstrando o acréscimo de temperatura da esquerda para a direita e a diminuição de baixo para cima.



Fonte: Próprio Autor.

Para o dissipador em leque os ventiladores foram numerados de baixo para cima conforme a figura 93, os pontos de referência para aferição de temperatura estão da esquerda para a direita. A mudança em relação ao modelo e aos pontos numerados pelo fabricante do emissor de luz é devido a praticidade de análise e montagem. A progressão da esquerda para a direita e de baixo para cima é mais usual e intuitiva, a mesma serve como referência de critérios internacionais de engenharia de produtos.^{20,50}

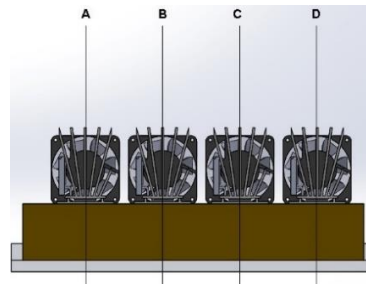
Figura 93 - Vista superior do dispositivo do dissipador em leque com numeração dos módulos representadas de baixo para cima.



Fonte: Próprio Autor.

Os módulos seguiram o padrão de corte representado na figura 94. Os pontos de medição estão demonstrados na figura 95, seguindo a sequência da esquerda para a direita.

Figura 94 - Planos de corte dos módulos representados pelas linhas (A, B, C e D), vista lateral.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 95 - Marcação dos pontos de medição no módulo 1, corte no meio do módulo representados pelo plano “A” – Vista frontal.



Fonte: Próprio Autor.

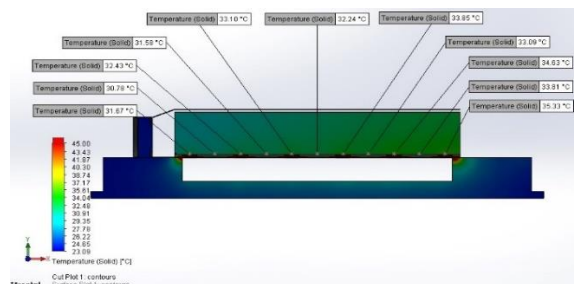
Os pontos foram numerados em cada módulo e são demonstrados na sequência de acordo com a tabela 6. Nas figuras 96 a 99 estão indicados os cortes do módulo 1 ao 4 e a temperatura em cada ponto de medição, indicando um equilíbrio de temperatura nos módulos.

Tabela 6 - Pontos de numeração para medição de temperatura em cada módulo.

Módulo	Pontos de medição
1	01 ao 11
2	12 ao 22
3	23 ao 33
4	34 ao 45

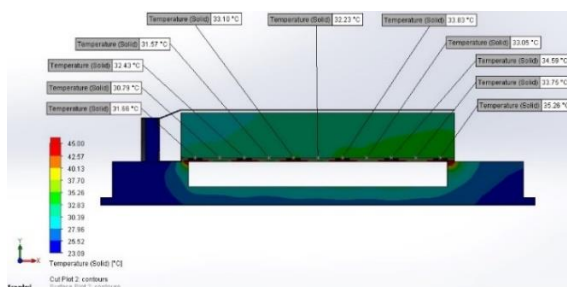
Fonte: Próprio Autor.

Figura 96 - Corte no plano "A" (módulo 1) com as medições de temperatura em um acréscimo dos pontos da esquerda para a direita.



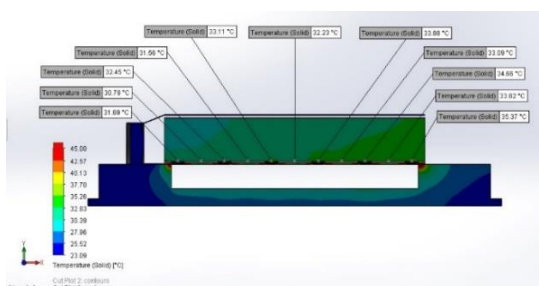
Fonte: Próprio Autor.

Figura 97 - Corte no plano "B" (módulo 2) com as medições de temperatura em um acréscimo dos pontos da esquerda para a direita.



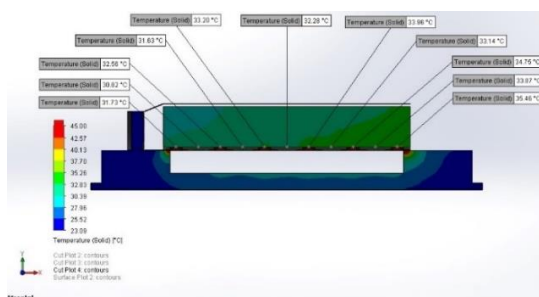
Fonte: Próprio Autor.

Figura 98 - Corte no plano "C" (módulo 3) com as medições de temperatura em um acréscimo dos pontos da esquerda para a direita.



Fonte: Próprio Autor.

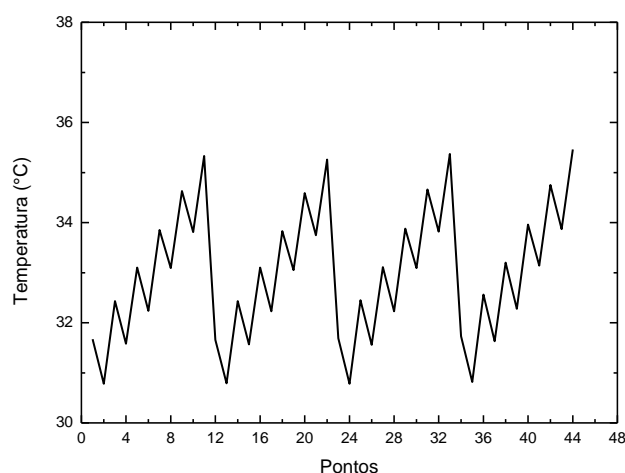
Figura 99 - Corte no plano "D" (módulo 4) com as medições de temperatura em um acréscimo dos pontos da esquerda para a direita.



Fonte: Próprio Autor.

Temperaturas nos cortes (A, B, C e D) dos módulos 1 ao 4 estão representadas na figura 100, os dados serão comparados em uma tabela e um gráfico global de temperatura no decorrer da apresentação dos outros projetos, no entanto o dissipador em leque representa uma temperatura regular entre os módulos, como exemplo do módulo 1 o pico de temperatura foi de 35,6 °C e a temperatura na extremidade próxima ao ventilador foi de 31,73 °C.

Figura 100 - Temperatura em função aos pontos de medição no corte dos módulos do dissipador em leque.

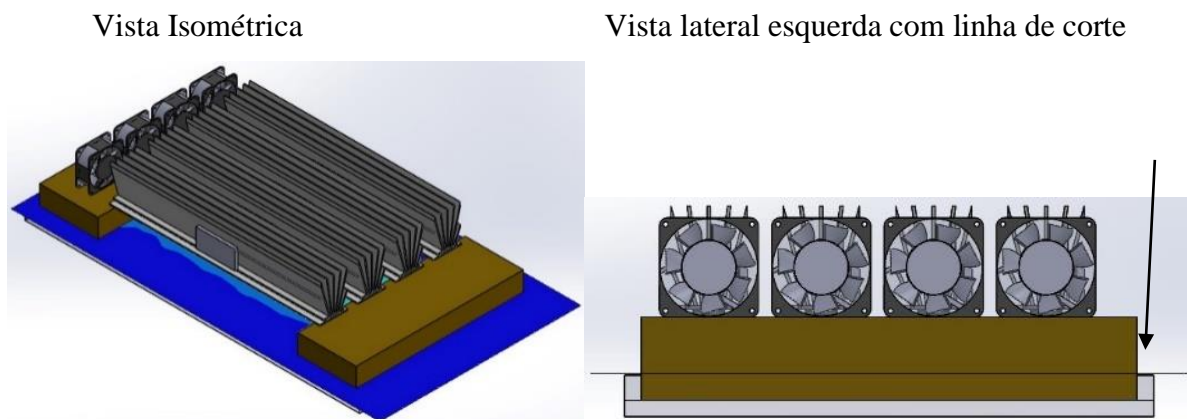


Fonte: Próprio Autor.

5.7.2 Análise da temperatura do fluido do dissipador em leque

O dissipador em leque apresenta um estudo de geometria diferente do dissipador do modelo utilizado. Porém como citado anteriormente e por uma questão de comparação, foi mantida as dimensões de largura, altura e comprimento do modelo anterior. Mantendo o padrão e a sequência de análises, o primeiro resultado da temperatura do fluido é com uma linha rente à prancha, o corte pode ser considerado nas figuras 101.

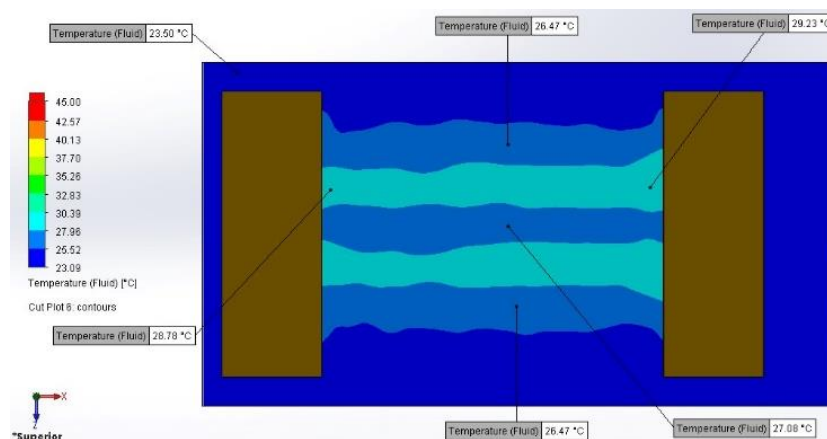
Figura 101 - Vista isométrica e lateral esquerda com o plano de medição da temperatura do fluido do dissipador em leque.



Fonte: Próprio Autor.

A maior temperatura foi registrada foi de 29,23 °C, a menor foi de 23,5 °C conforme indicada na figura 102.

Figura 102 - Vista superior - Temperatura do fluido na prancha com o plano de medição.

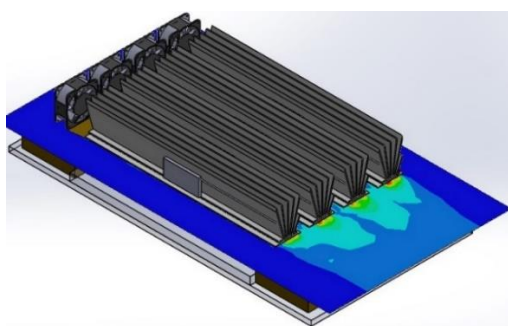


Fonte: Próprio Autor.

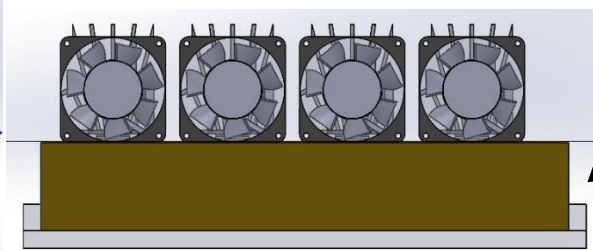
A figura 103 é referente a temperatura do fluido rente a fonte de calor (LEDs), a direita a vista isométrica e à esquerda a vista lateral esquerda com a linha de corte.

Figura 103 - Vista Isométrica e lateral esquerda com o plano de medição da temperatura do fluido rente à superfície dos LEDs do dissipador em leque.

Vista Isométrica



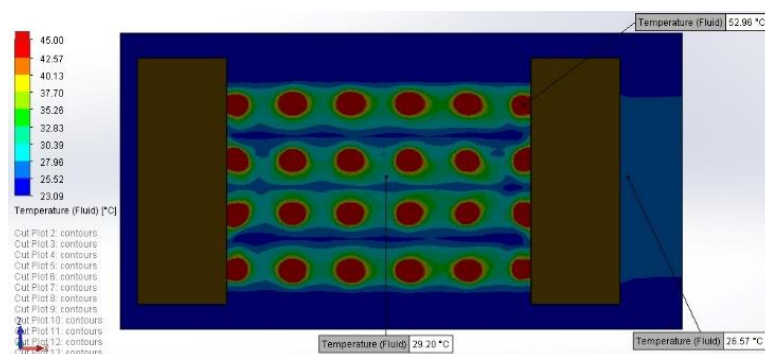
Vista lateral esquerda com linha de corte



Fonte: Próprio Autor.

Na vista inferior, figura 104, é visto que a maior temperatura registrada do fluido foi de 52,96 °C e a menor de 25,52 °C.

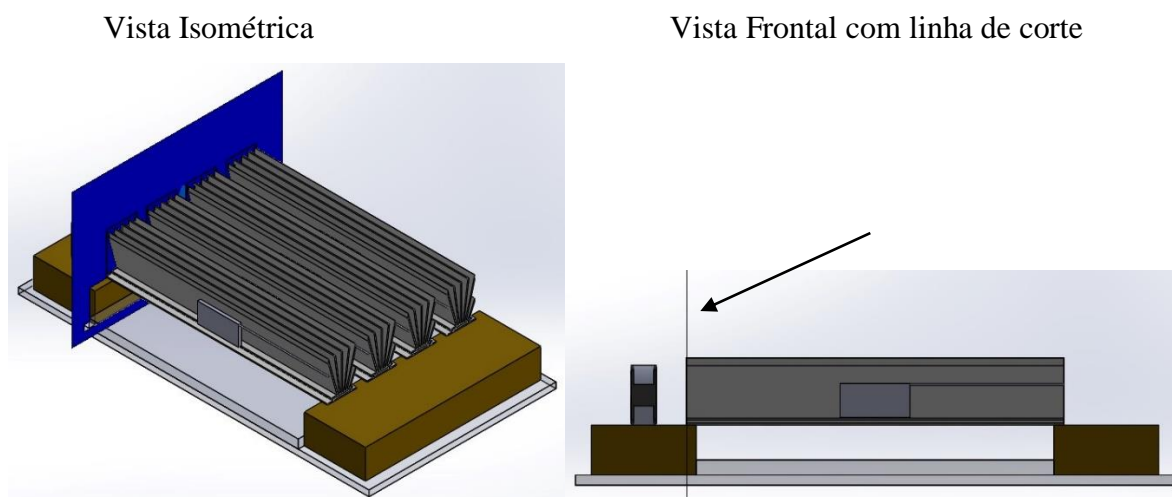
Figura 104 - Vista Inferior da temperatura do fluido na base do dissipador do dissipador em leque, onde o maior registro de temperatura foi de 52,96 °C.



Fonte: Próprio Autor.

A temperatura de entrada do fluido é um parâmetro importante para entender o seu comportamento no módulo, a mesma é representada na figura 105 pelas vistas isométrica e frontal com o plano de corte.

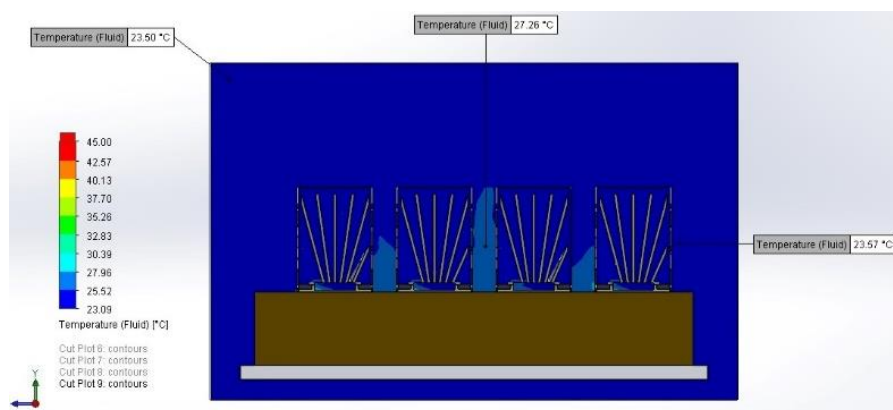
Figura 105 - Vista Isométrica e Frontal com linha de corte do dissipador em leque.



Fonte: Próprio Autor.

A maior temperatura foi de 27,26 °C obtida entre os módulos 2 e 3, a menor de 23,5 °C, ambas temperaturas podem ser observadas na figura 106. O módulo 1 é sempre apresentado a esquerda da imagem.

Figura 106 - Vista lateral direita - Temperatura do fluido próximo aos ventiladores do dissipador em leque.

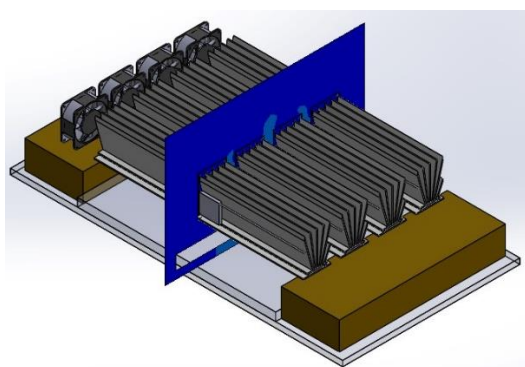


Fonte: Próprio Autor.

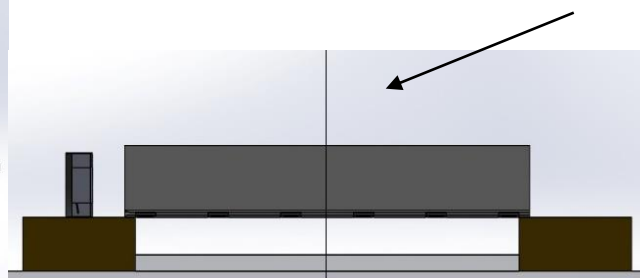
Acompanhando a evolução da temperatura do fluido no decorrer do módulo, a figura 107 representa a vista isométrica e vista frontal com a linha de corte.

Figura 107 - Vista Isométrica e Vista frontal com o plano de medição no meio do dissipador em leque.

Vista Isométrica



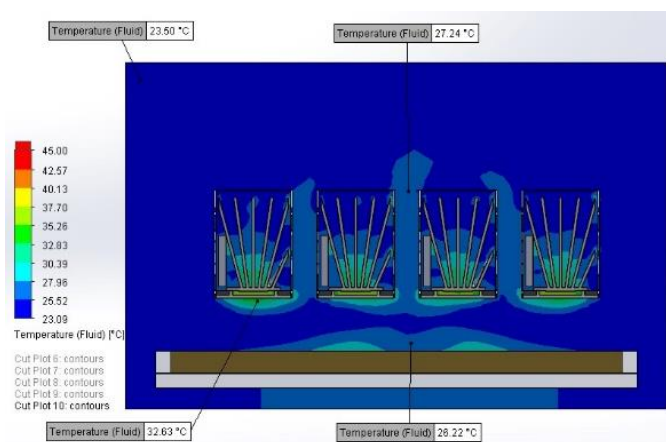
Vista Frontal com linha de corte



Fonte: Próprio Autor.

A figura 108 representa a temperatura do fluido no plano de corte, a maior temperatura foi dentro dos módulos com 32,83 °C na região dos LEDs.

Figura 108 - Vista lateral direita - Temperatura do fluido no meio do módulo dissipador em leque.

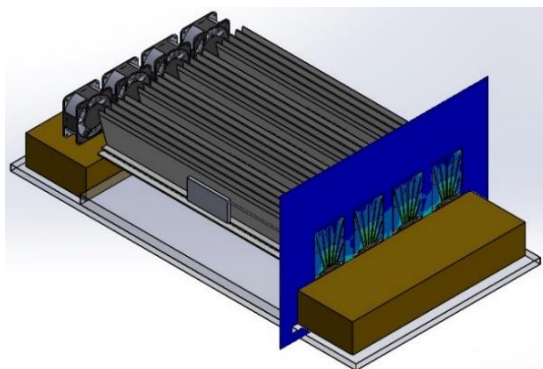


Fonte: Próprio Autor.

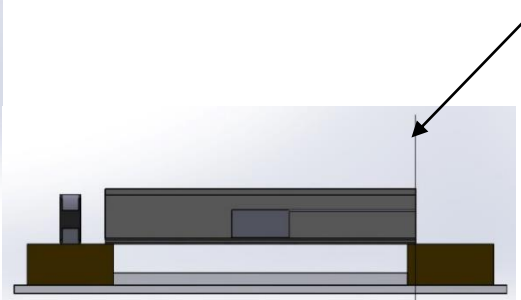
A extremidade do módulo é o ponto de maior aquecimento do fluido, a linha de medida pode ser vista na figura 109.

Figura 109 - Vista Isométrica e Vista frontal com o plano de medição na extremidade do dissipador em leque.

Vista Isométrica



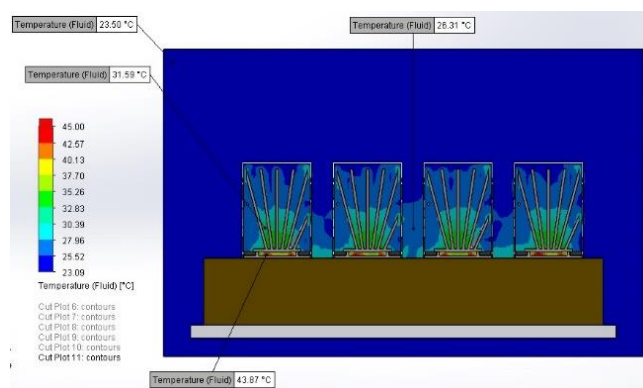
Vista Frontal com linha de corte



Fonte: Próprio Autor.

Como o dissipador em leque muda a geometria da base com um ressalto (mantendo a espessura padrão de 2 mm) é possível observar a temperatura rente aos LEDs. A energia térmica de maior registro foi de 43,87 °C (rente aos LEDs), enquanto na parte superior do dissipador a maior temperatura foi de 31,59 °C e a menor de 26,5 °C, medidas representadas na figura 110.

Figura 110 - Vista lateral direita - Temperatura do fluido na extremidade do módulo do dissipador em leque.

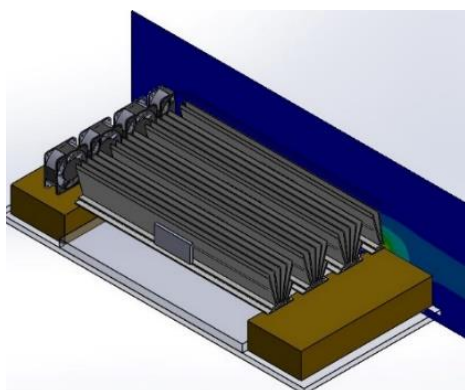


Fonte: Próprio Autor.

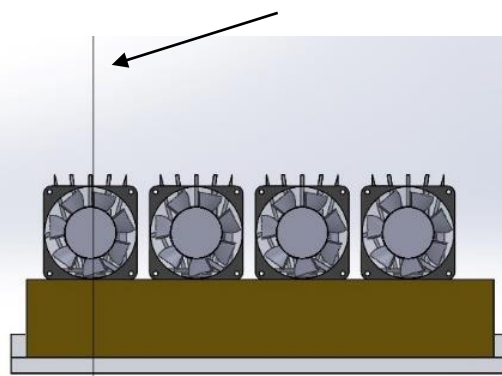
A análise da passagem do fluido no módulo do dissipador em leque pode ser vista na linha de corte selecionada no módulo 4 (figura 111). Diferente do dissipador do modelo utilizado, os módulos do dissipador em leque não apresentam variações de temperatura do fluido entre si, logo o gradiente de temperatura da figura 111 é comum para todos os dissipadores do dispositivo.

Figura 111 - Vista Isométrica e Lateral esquerda com o plano de medição do fluido do módulo 1 no sentido axial do dissipador em leque.

Vista Isométrica



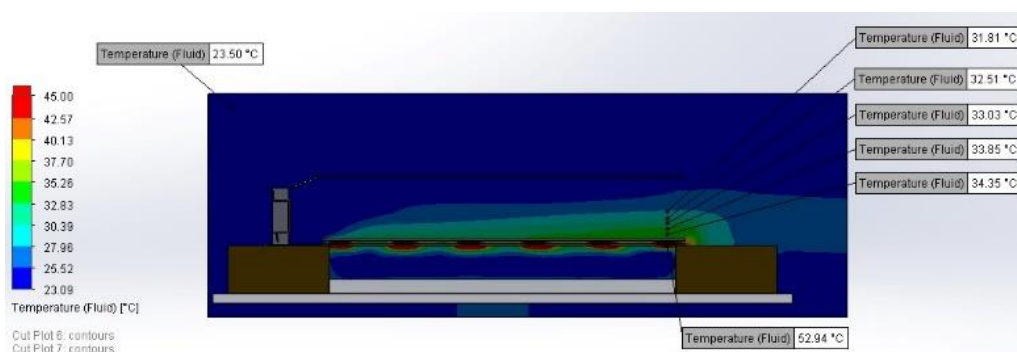
Vista lateral direita com linha de corte



Fonte: Próprio Autor.

O registro de maior amplitude térmica no corte representado pela figura 112 foi de 34,35 °C e o menor de 25,52 °C.

Figura 112 - Vista frontal do corte axial do módulo 1, temperatura do fluido no módulo 4.

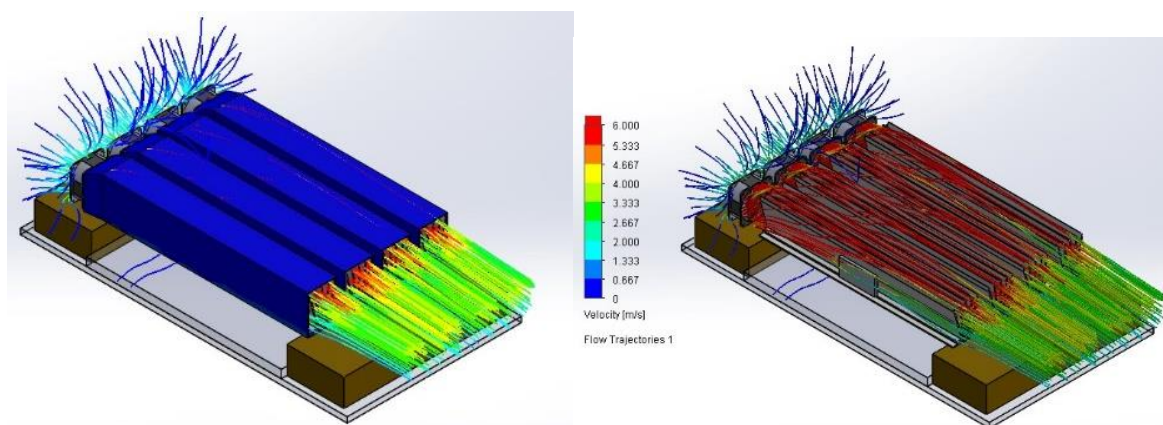


Fonte: Próprio Autor.

5.7.3 Análise do fluxo de ar do dissipador em leque

As informações da velocidade do fluxo de ar representam uma explicação no estudo térmico, envolvendo assim a energia térmica do fluido e das aletas de condução. Com a vista isométrica da figura 113 é possível ver o fluido sair dos dissipadores com velocidade de 6 m/s.

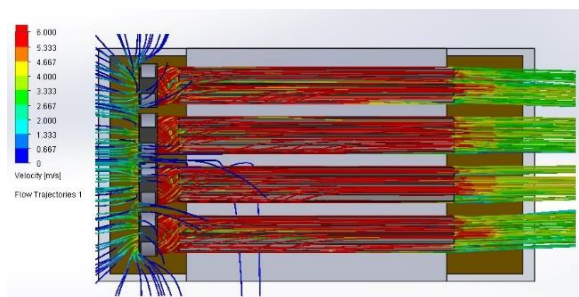
Figura 113 - Vista Isométrica do fluxo de ar com canaleta aparente e invisível, respectivamente da esquerda para a direita do dissipador em leque, representando a velocidade do fluido.



Fonte: Próprio Autor.

Com as imagens das figuras 114 e 115, observa-se que o fluxo de ar consegue correr com mais facilidade. Elementos de fixação, como parafusos, foram dimensionados para não impedir ou dispersar a passagem do fluido.

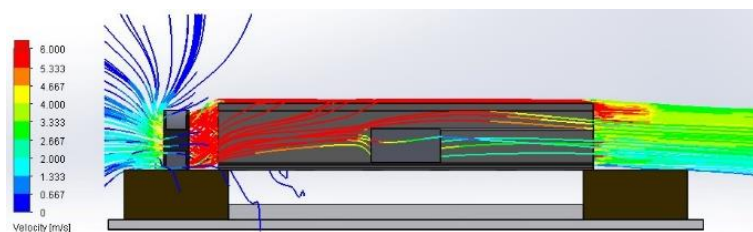
Figura 114 - Vista superior do fluxo de ar demonstrando a velocidade do entre os módulos.



Fonte: Próprio Autor.

A maior resistência do fluxo deu-se com a placa de circuito que pode ser vista na figura 115, tal resistência acaba sendo inevitável devido a refrigeração do componente.

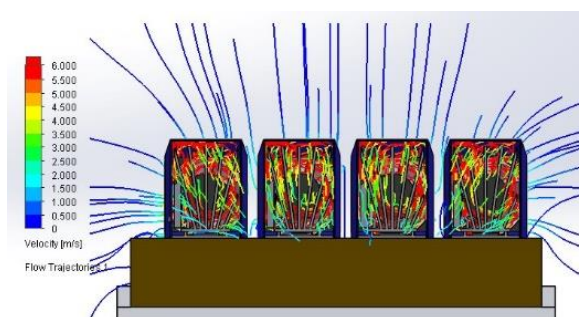
Figura 115 - Vista frontal do fluxo de ar indicando a resistência que a placa de circuito causa na lateral no dissipador.



Fonte: Próprio Autor.

A figura 116 (vista lateral direita) representa a saída do fluido de dentro dos módulos, não apresentando nenhuma anormalidade de um módulo para o outro.

Figura 116 - Vista lateral direita do fluxo de ar na extremidade dos módulos do dissipador em leque.



Fonte: Próprio Autor.

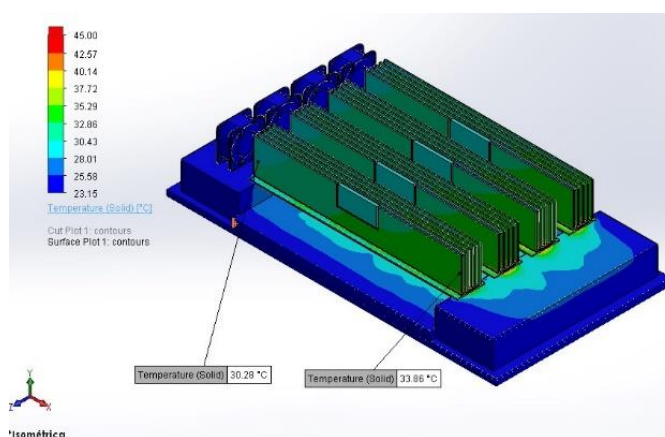
5.8 Análises de geometrias

A geometria de um dissipador de calor influencia diretamente no arrefecimento do componente. Como um dos objetivos do trabalho foi desenvolvido um estudo de geometria em comparações. Dissipador em leque apresenta aletas retangulares dispostas em forma de leque, não havendo no mercado até o presente momento um dissipador com essas características. No entanto, dissipadores usuais com aletas verticais retangulares são amplamente utilizados, também há uma linha de novos dissipadores com aletas circulares e verticais, ambos os modelos vêm apresentando grande eficiência para diversas aplicações.

5.8.1 Dissipador com aletas retangulares e verticais

Os dados foram coletados seguindo a mesma metodologia de cortes nos módulos e sequência de pontos. Examinando os dissipadores com aletas retangulares e verticais (Figura 117), onde as temperaturas nas extremidades foram de 30,29 °C e 33,86 °C, logo pode ser visto a eficiência na dissipação de calor em relação ao dissipador utilizado no emissor de luz, conforme dados de temperatura exibidos na figura 118.

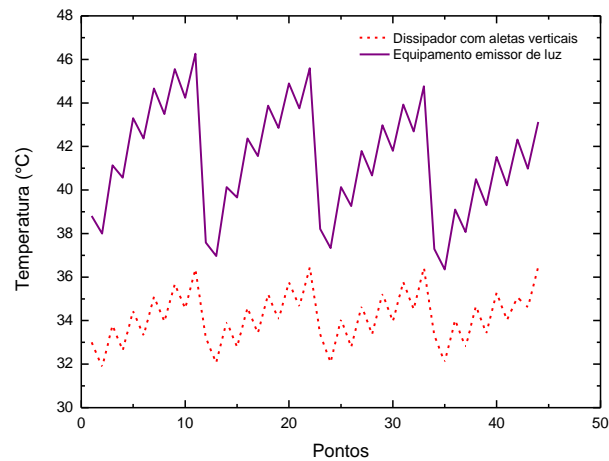
Figura 117 - Análise térmica do projeto de dissipador com aletas verticais (Canaletas invisíveis).



Fonte: Próprio Autor.

A figura 118 representa um comparativo de temperatura entre os dissipadores do emissor de luz e o dissipador com aletas verticais retangulares, os dados indicam que além da regularidade do segundo, as temperaturas também são inferiores, mostrando maior eficiência em relação ao modelo utilizado.

Figura 118 - Temperatura dos dissipadores com aletas verticais e do equipamento emissor de luz, no dissipador com aletas verticais.

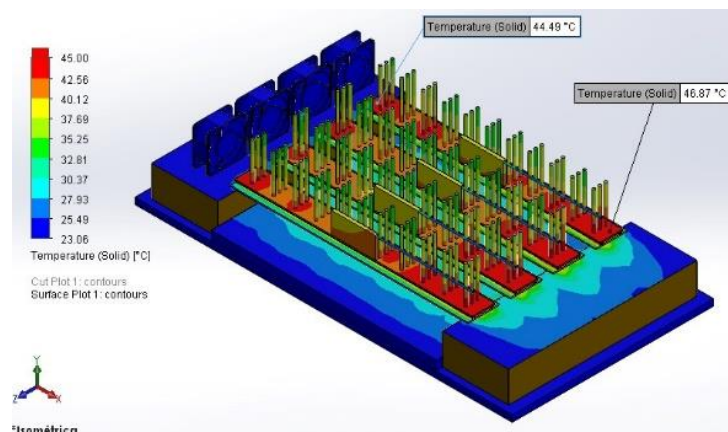


Fonte: Próprio Autor.

5.8.2 Dissipador com aletas circulares

Os dissipadores com aletas circulares foram modelados para que as aletas ficassem sobre e entre os LEDs, conforme figura 119 (com canaletas invisíveis), esse tipo de dissipador vem sendo utilizado em processadores de sistemas computacionais, no entanto pelas análises térmicas da figura seguinte, esse modelo não apresentou grande eficiência trabalhando com LEDs e com o modelo de refrigeração implantado no projeto, foi registrado um pico de temperatura de 46,87 °C na extremidade do módulo.

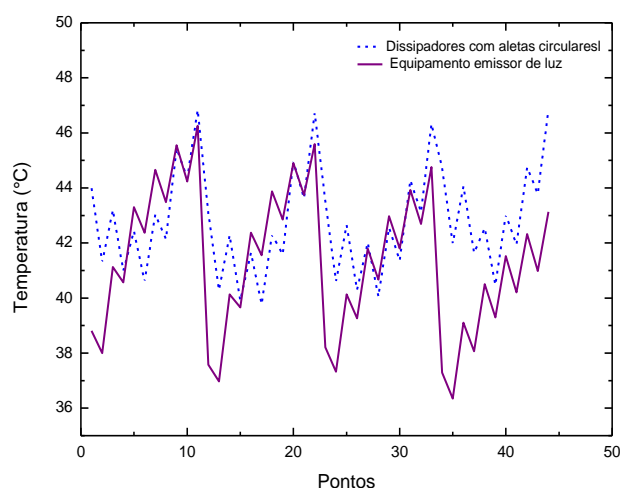
Figura 119 - Análise térmica do projeto de dissipador com aletas circulares.



Fonte: Próprio Autor.

O dissipador com aleta circular em relação ao modelo do emissor de luz com aletas contínuas (retangulares), não apresentou melhorias, a justificativa pode ser dada que as aletas que vão do início ao fim do módulo como nos outros projetos há uma quantidade maior de material para dissipação com o fluido em contato, logo o fluido vai diminuindo a energia térmica do componente. A proposta do dissipador circular é de evitar a transferência de calor de uma aleta para outra, porém com a energia térmica produzida pelos LEDs nas aletas circulares não foram capazes de dissipar o calor. O comparativo de desempenho com o emissor de luz pode ser observado na figura 120, além de apresentar irregularidades na energia térmica entre os módulos o modelo ainda apresentou desempenho inferior ao modelo utilizado no emissor de luz.

Figura 120 - Comparativo de temperatura do dissipador com aletas circulares e do emissor de luz. O dissipador com aletas circulares representa picos de temperaturas mais elevadas.

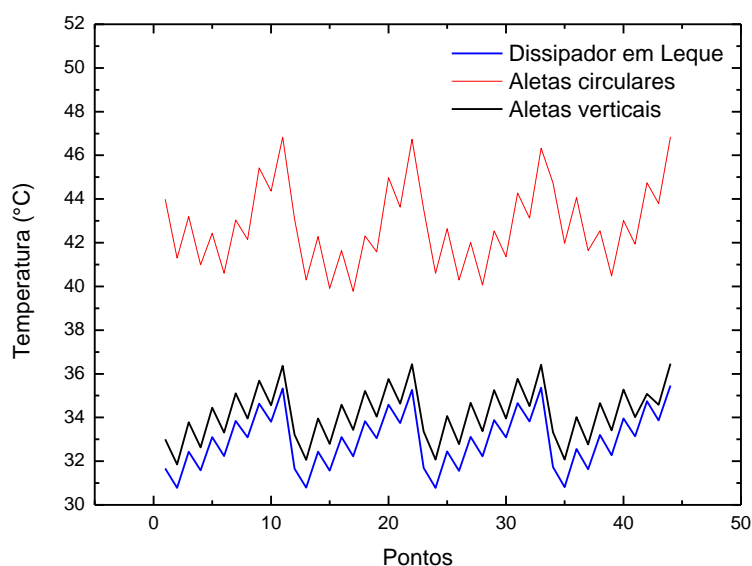


Fonte: Próprio Autor.

5.8.3 Comparativo de temperatura das geometrias modeladas

O comparativo das temperaturas nos pontos internos dos dissipadores pode ser analisado na figura 121. O dissipador em leque (em alumínio) apresentou melhor dissipação de calor e regularidade entre os módulos quando comparado ao projeto com aletas circulares e aletas verticais.

Figura 121 - Comparativo de temperatura entre os dissipadores em leque, aletas circulares e aletas verticais.



Fonte: Próprio Autor.

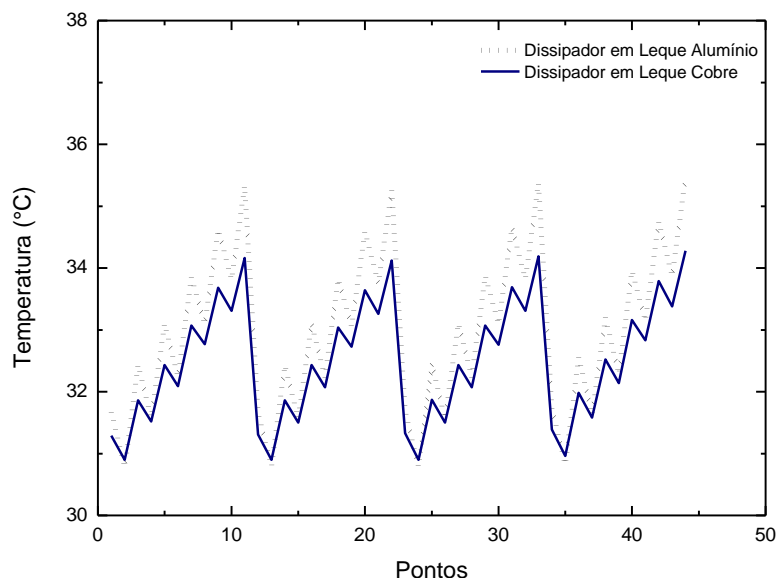
As simulações de velocidade e temperatura do fluido foram realizadas nos dissipadores com barras circulares e com aletas verticais retangulares. A velocidade se manteve em 6 m/s até a extremidade das canaletas, no entanto as temperaturas do fluido coincidem com os valores mais elevados nas extremidades dos dissipadores, sendo o dissipador com aletas circulares o de maior temperatura do fluido e posteriormente o dissipador com aletas verticais.

5.9 Estudo de material - Análise com dissipador em cobre

O cobre apresenta diferenças de comportamento térmico em relação ao alumínio, uma vez que possui menor resistência térmica e melhor condutividade, conforme a tabela 1. Foi realizada uma simulação tendo o cobre como principal material no dissipador em leque sendo o dissipador escolhido pela melhor troca térmica entre modelos dimensionados.

A variação de temperatura com o estudo de materiais pode ser analisada na figura 122 e tabela C do apêndice. O alumínio, como previsto, apresenta valores mais elevados uma vez que sua transferência de energia térmica é menor que o cobre, com o cobre a energia térmica é transferida com mais facilidade e com a condução forçada sobre maior dissipação de calor. As variações são maiores nas extremidades dos módulos devido a maior energia térmica.

Figura 122 - Comparativo do dissipador em leque com alumínio e cobre.



Fonte: Próprio Autor.

5.10 Estudo de malha

Durante a pesquisa foi necessário um estudo da melhor malha utilizada. O programa utilizado tem a opção de gerar uma malha automática e sua seleção é de acordo com a geometria em questão. A indicação do software foi da malha com nível 3 (termo específico para o *software* utilizado), pela bibliografia utilizada no presente trabalho e com base na característica geométrica, a malha ideal para o estudo coincide com a seleção automática.²² No entanto, se fez necessário a simulação de malha com nível 2 e 4 para comparações de resultado e tempo utilizado em cada estudo.

As figuras 123 e 125 representam respectivamente as malhas de nível 2 a 4. O dissipador utilizado foi do Emissor de luz. Cada malha apresenta um número diferente de elementos, a malha é refinada quando apresenta maior número de elementos, a malha com maior número de elementos é a de nível 4 e a menor a de nível 2.

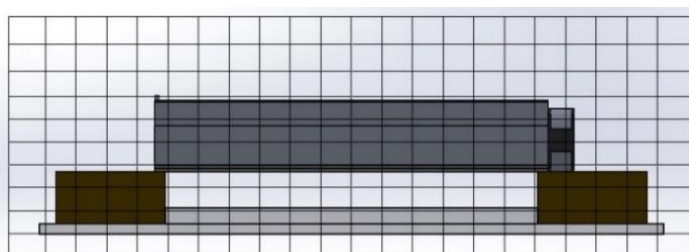
As simulações de todos os projetos e validação computacional ocorreram com a malha em nível 3 (figura 124). O parâmetro de malha do nível 3 teve um tempo de aproximadamente duas horas a mais em relação a malha de nível 2, dados demonstrados na tabela 7.

Figura 123 - Malha nível 2 com menor número de elementos.



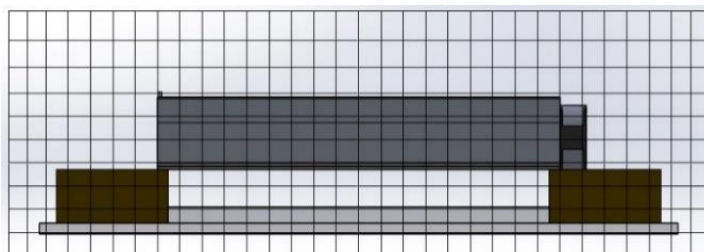
Fonte: Próprio Autor.

Figura 124 - Malha nível 3 com número de elementos mais elevado que no nível 2.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 125 - Malha nível 4, com números mais elevados de elementos em relação as anteriores.



Fonte: Próprio Autor.

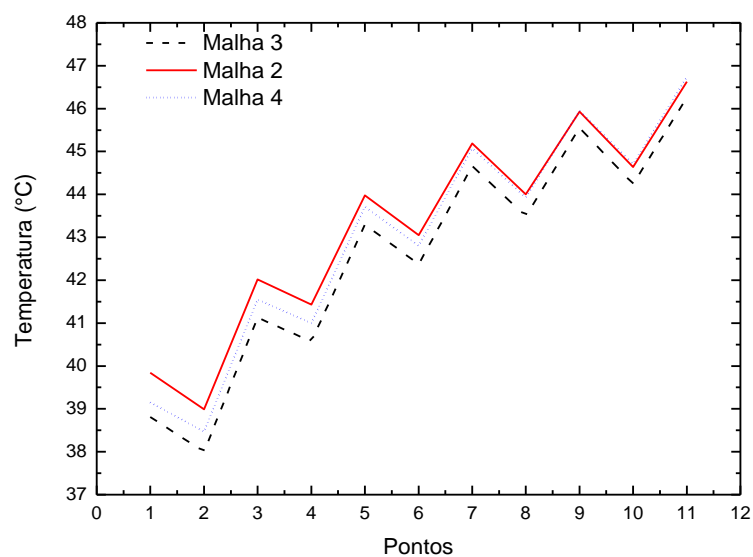
Tabela 7 - Dados gerais do controle de malha, número de cálculos e tempo percorrido.

Malha	Número de Cálculos	Tempo
2	3040	4h 14min
3	4305	6h 25min
4	5588	8h 32min

Fonte: Próprio Autor.

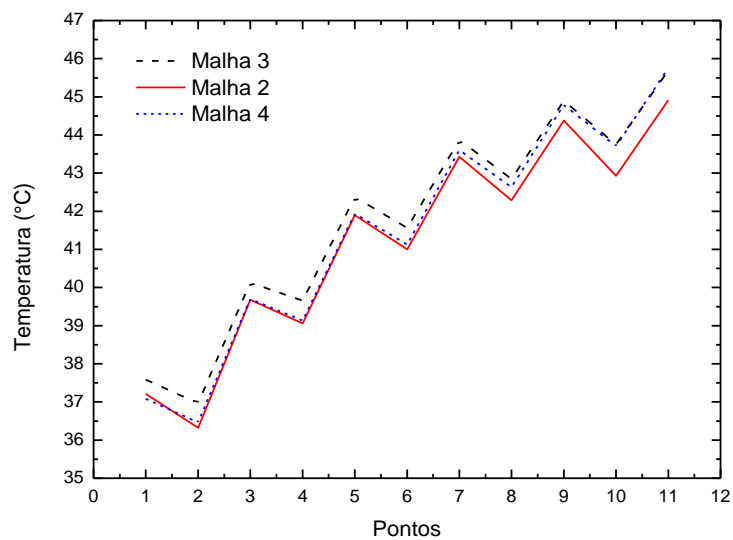
As figuras 126 a 129 e tabela D do apêndice, indicam a comparação dos valores das temperaturas em cada nível de malha.

Figura 126 - Controle de malha do módulo 1 com a malha de nível 2 apresentando maior gradiente de temperatura.



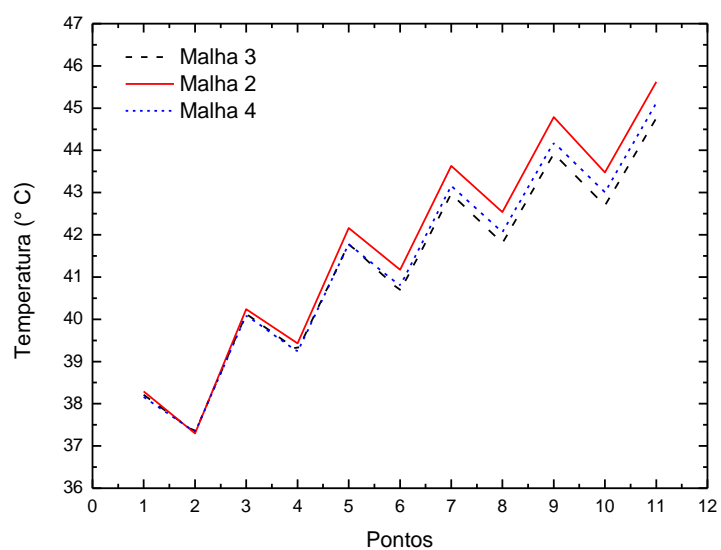
Fonte: Próprio Autor.

Figura 127 - Controle de malha no módulo 2 com a malha de nível 2 apresentando em maior parte as menores temperaturas.



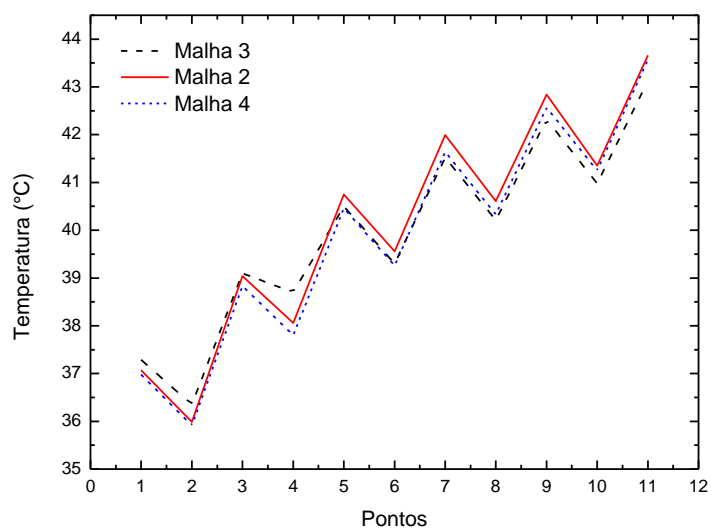
Fonte: Próprio Autor.

Figura 128 - Controle de malha do módulo 3 com o nível 3 apresentando menores temperaturas na extremidade do módulo.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 129 - Controle de malha do módulo 4, temperatura registrada nos diferentes pontos de análise adotando diferentes níveis de malha.



Fonte: Próprio Autor.

No módulo 1, o nível de malha 3 foi o de menor temperatura, e no módulo 2 o mesmo nível foi com a maioria dos pontos com maior temperatura. O refino de malha não está condicionado a números elevados e sim maior quantidade de cálculos. Porém, com geometrias simples o refinamento, além de tornar extenso o processo, pode gerar erros na interação e sintetização da elevada taxa de cálculo sendo uma das possíveis explicações para as diferenças de resultado.

5.11 Comparativo geral de temperatura

A comparação de todos os projetos do gradiente de energia térmica foi sintetizada na tabela 8, sendo possível observar desde a temperatura no dissipador do emissor de luz ao dissipador com aletas circulares, as menores temperaturas foram registradas no Dissipador em leque com material em cobre.

Tabela 8 - Comparativo entre os gradientes de temperatura de todos os dissipadores.

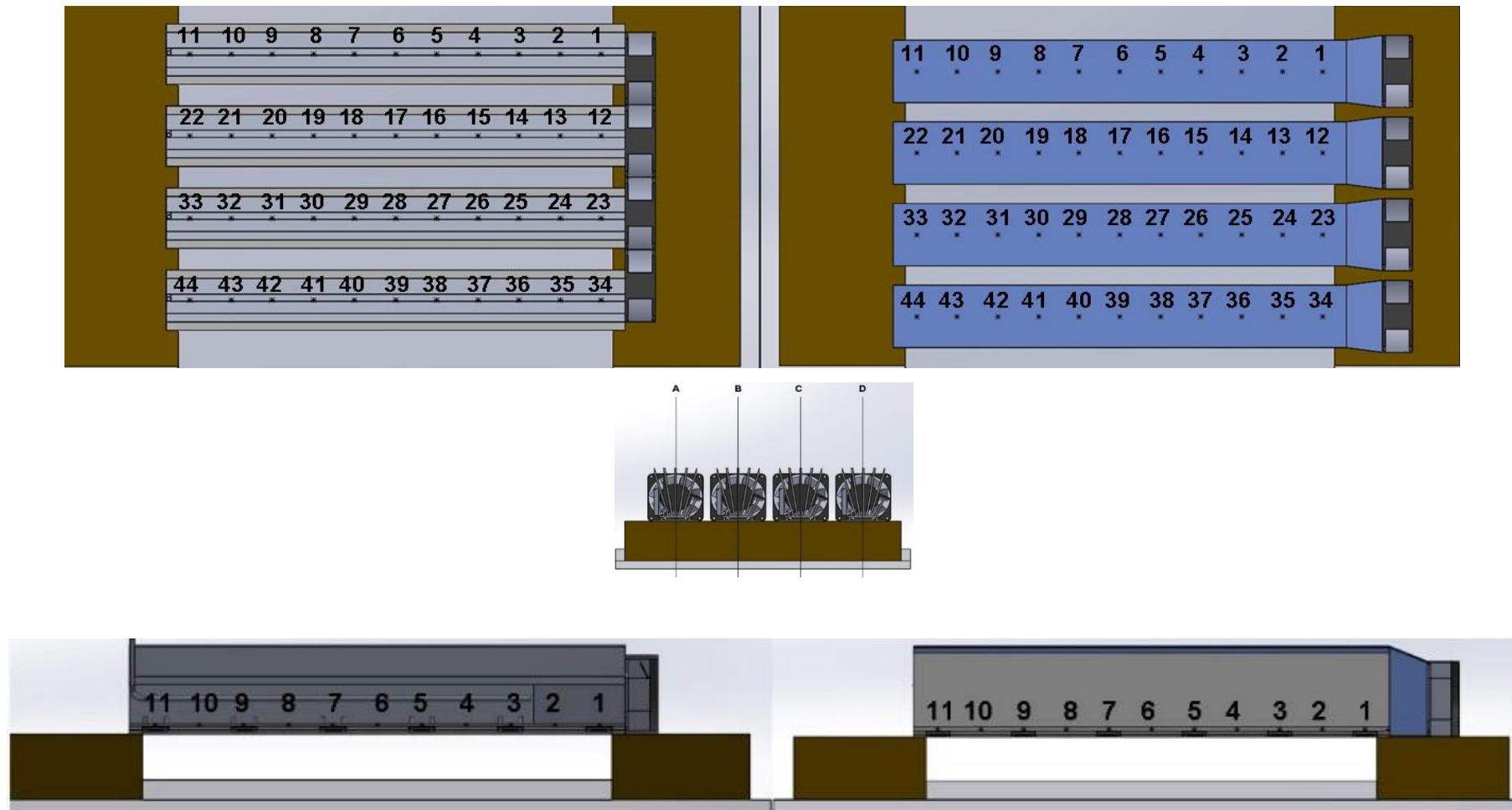
Pontos	Temperatura (°C)					
	Equipamento Emissor de Luz (Simulação)	Adaptação 7	Dissipador em leque Alumínio	Dissipador em leque Cobre	Dissipador com aletas verticais	Dissipador com aletas circulares
1	38,81	36,05	31,67	31,29	33,00	43,99
2	38,00	35,03	30,78	30,90	31,86	41,30
3	41,13	38,15	32,43	31,86	33,78	43,20
4	40,57	36,84	31,58	31,52	32,63	40,99
5	43,30	39,38	33,10	32,43	34,45	42,43
6	42,37	37,69	32,24	32,09	33,31	40,60
7	44,66	39,97	33,85	33,07	35,10	43,04
8	43,49	38,24	33,09	32,77	33,95	42,15
9	45,55	40,45	34,63	33,68	35,68	45,43
10	44,24	38,72	33,81	33,31	34,56	44,36
11	46,26	40,98	35,33	34,16	36,36	46,83
12	37,58	36,61	31,66	31,31	33,21	43,08
13	36,97	35,78	30,79	30,90	32,06	40,29
14	40,13	38,78	32,43	31,86	33,95	42,28
15	39,66	37,76	31,57	31,50	32,79	39,91
16	42,37	40,16	33,10	32,43	34,59	41,64
17	41,56	38,78	32,23	32,07	33,43	39,78
18	43,87	40,93	33,83	33,04	35,21	42,31
19	42,85	39,45	33,05	32,73	34,04	41,58
20	44,90	41,38	34,59	33,64	35,76	44,98
21	43,75	39,90	33,75	33,26	34,63	43,63
22	45,59	42,00	35,26	34,12	36,44	46,73
23	38,21	36,24	31,69	31,33	33,36	43,53

Pontos	Temperatura (°C)					
	Equipamento Emissor de Luz (Simulação)	Adaptação 7	Dissipador em leque Alumínio	Dissipador em leque Cobre	Dissipador com aletas verticais	Dissipador com aletas circulares
24	37,33	35,31	30,78	30,90	32,08	40,60
25	40,13	38,4	32,45	31,87	34,07	42,65
26	39,26	37,32	31,56	31,50	32,78	40,30
27	41,79	39,80	33,11	32,43	34,67	42,01
28	40,67	38,36	32,23	32,07	33,37	40,06
29	42,97	40,51	33,88	33,07	35,25	42,55
30	41,80	38,92	33,09	32,76	33,96	41,36
31	43,92	40,94	34,66	33,69	35,77	44,28
32	42,69	39,37	33,82	33,31	34,52	43,12
33	44,76	41,58	35,37	34,19	36,42	46,33
34	37,29	36,34	31,73	31,39	33,33	44,73
35	36,35	35,64	30,82	30,96	32,08	41,98
36	39,10	38,85	32,56	31,98	34,02	44,06
37	38,07	37,72	31,63	31,58	32,77	41,64
38	40,50	40,29	33,20	32,52	34,66	42,54
39	39,30	38,73	32,28	32,14	33,41	40,48
40	41,52	40,96	33,96	33,16	35,28	43,02
41	40,21	39,36	33,14	32,83	34,02	41,94
42	42,32	41,36	34,75	33,79	35,08	44,75
43	40,98	39,73	33,87	33,38	34,59	43,79
44	43,13	41,93	35,46	34,28	36,46	46,85

Fonte: Próprio Autor.

Para criar um parâmetro de comparação entre o dissipador do modelo utilizado e do dissipador em leque, estes foram rotacionados em 180°, mantendo a mesma direção do fluxo de ar. Seus pontos de medição foram remarcados para equivaler a posição do dissipador do emissor de radiação. Na figura 130 pode ser visto o alinhamento do mesmo sentido do fluxo, ventiladores e corte dos módulos.

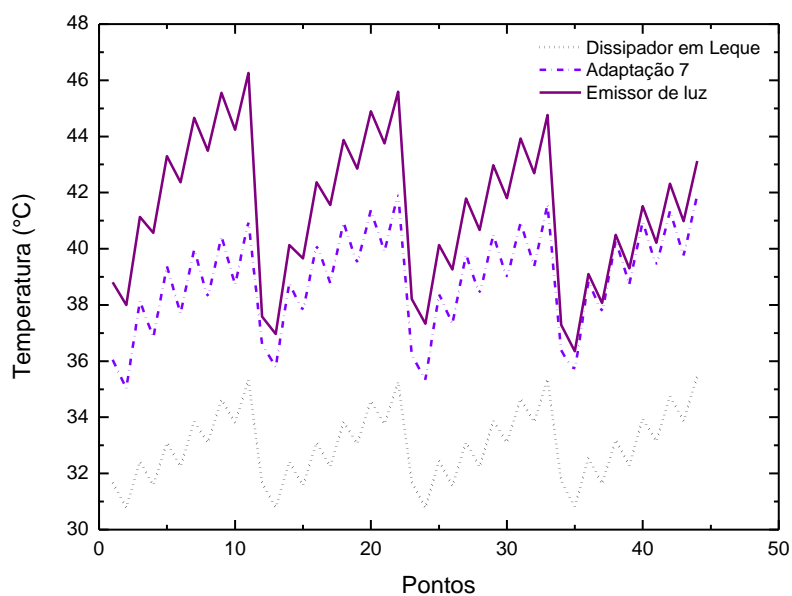
Figura 130 - Definição dos pontos de marcação do emissor de luz e o dispositivo do dissipador em leque.



Fonte: Próprio Autor.

O projeto de dissipador em leque utilizou o material em alumínio sendo comparado assim com o material real do dispositivo utilizado (emissor de luz). Na figura 131 é possível ver a diferença de temperatura de cada dispositivo.

Figura 131 - Comparativo das temperaturas do dissipador em leque, adaptação 7 e emissor de luz.



Fonte: Próprio Autor.

6 - CONCLUSÃO

Este trabalho analisou o comportamento de um equipamento emissor de luz e propôs um novo projeto de maior eficiência em dissipação de calor. Nas análises do equipamento foram acrescentadas uma validação computacional, e demonstrou-se uma metodologia teórica e experimental que uniu resultados práticos com cálculos teóricos. Por meio da validação e análise das simulações, o modelo utilizado foi recriado, o que permitiu entender os principais problemas do dispositivo e, assim, direcionar com soluções tangíveis um novo modelo de dissipador. Realizou-se estudos de geometria e aplicação de materiais, dos quais se adquiriu informações para que novo dissipador fosse projetado especificamente para dispositivo emissor de luz. Esse dissipador, denominado de dissipador em leque, apresentou o melhor resultado, com pontos definidos a 1,5 mm de distância de uma fonte de calor (LED), permitiu diminuir 23,62% da temperatura (medida realizada no ponto 11 do módulo 1). No ponto em que menos houve redução de temperatura, ainda foi possível diminuir 15,21% (ponto 35, segundo ponto de medição do módulo 4). Ressalta-se ainda que as medições foram tomadas próximas aos LEDs, e com um material de elevada transferência de energia térmica, na extremidade do módulo 1, com 2,5 mm do LED a diferença de temperatura foi registrada em 25,43%. Dessa maneira, o presente trabalho elencou condições de otimizar o equipamento que atualmente é utilizado e propor um projeto de novo dispositivo de dissipação térmica.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. **Fundamentos da transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2005.
- ² NAIA, F. R.; SILVA, A. L. F.; SILVA, S. M. M. de L. **Análise da transferência de calor por convecção natural em aletas planas retangulares**. XIV Congresso Nacional de estudantes de engenharia mecânica, 2007.
- ³ TREGENZA, P.; LOE, D. **Projeto de iluminação**. 2. ed. São Paulo/SP: Editora Bookman, 2015.
- ⁴ LIMA, A. R.; **Avaliação de corantes como agente fotossensibilizadores para controle fotodinâmico da população de larvas de *Aedes Aegypti* (Diptera: Culicidae)**. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal da Grande Dourados/UFGD, Dourados/MS, 2016.
- ⁵ CAIRES, C.S.A.; LEAL, C.R.B.; RODRIGUES, A.C.S.; LIMA, A.R.; SILVA, C.M.; RAMOS, C.A.N.; CHANG, M.R.; OLIVEIRA, S.L.; NASCIMENTO, V.A.; CAIRES A.R.L. **Photoinactivation effect of eosin methylene-blue and sodium-copper chlorophyllin against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli***. Laser Med Sci (Accepted), 2017.
- ⁶ NOGUEIRA, F. J.; SILVA, E. S.; RODRIGUES, C. R.B.S.; CAMPOS, M. F.C.; PINTO, D. P. BRAGA, H. A.C. **Influência da Temperatura no Desempenho de Luminárias LED**. NIMO – Núcleo de Iluminação Moderna – Universidade Federal de Juiz de Fora/MG.
- ⁷ REZENDE, S. M. **Materiais e dispositivos eletrônicos**. 1. ed. São Paulo/SP: Editora Livraria da Física, 2004.
- ⁸ ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa**. 4. ed. Porto Alegre/RS: Editora AMGH Limitada, 2012.
- ⁹ ANSELMO, B. de C. S. **Análise dos Parâmetros Geométricos e Estatística Usando Minitab no Estudo da Convecção Natural em Dissipadores**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI, Itajubá/MG, 2016.
- ¹⁰ SILVA, V. A. **Análise Experimental da Influência dos Parâmetros Geométricos de Dissipadores na Convecção Natural**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI, Itajubá/MG, 2015.

- ¹¹ SOUSA, T. N.R. **Estudo de transferência de calor utilizando recursos de modelamento 3D do Solidworks e simulação com o suplemento Flow Simulation.** Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) - Universidade Santa Cecília/UNISANTA, Santos/SP, 2015.
- ¹² LINGEN, O. D. A.; ACHEN, E. M. Z. C. **Manual do Engenheiro Mecânico Vol. 2.** 13. ed. São Paulo/SP: Hemus Livraria e Editora Ltda, 1979.
- ¹³ HALLYDAY, D.; RESNICK, R. **Fundamentos da Física. Gravitação, Ondas e Termodinâmica Vol. 2.** 9. ed. Rio de Janeiro/RJ: Editora LTC, 2012.
- ¹⁴ FISCHER, U.; GOMERINGER, R.; HEINZLER, M.; KILGUS, R.; NÄHER, F.; OESTERLE, S.; PAETZOLD, H.; STEPHAN, A. **Manual de Tecnologia Metal Mecânica.** 2 ed. São Paulo/SP: Editora Edgard Blucher, 2012.
- ¹⁵ LEVENSPIEL, O. **Termodinâmica Amistosa para Engenheiros.** 1. ed. São Paulo/SP: Editora Edgard Blucher, 2000.
- ¹⁶ MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para Engenharia.** 6. ed. Rio de Janeiro/RJ: Editora LTC, 2002.
- ¹⁷ GOIS, A. **LEDs na Iluminação Arquitetural.** 1. ed. São Paulo/SP: Lightingnow, 2008.
- ¹⁸ SILVA, M. L. da. **Luz Lâmpada e Iluminação.** 4. ed. São Paulo/SP: Editora Ciência Moderna, 2014.
- ¹⁹ JUVINALL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentos do projeto de componente de máquinas.** 4. ed. Rio de Janeiro/RJ: Editora LTC – Livros Técnicos e científicos, 2006.
- ²⁰ PAHL, G.; WOLFGANG, B.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. H. **Projeto na engenharia.** 6. ed. São Paulo/SP: Editora Edgard Blucher, 2013.
- ²¹ CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica vol. 3.** 2. ed. São Paulo/SP: Editora McGraw-Hill Ltda, 1986.
- ²² FIALHO, A. B. **Cosmos. Plataforma CAE do Solidworks 2008.** 1. ed. São Paulo/SP: Editora Érica, 2008.
- ²³ GARCIA, C. **Modelagem e Simulação.** 1. ed. São Paulo/SP: Editora Edusp, 1997.
- ²⁴ MATSSON, J. E. **An Introduction to Solidworks flow Simulation 2012.** 1. ed. New York: SDC Publications, 2012.
- ²⁵ PETROVA, R. V. **Introduction to Static Analysis Using Solidworks Simulation.** 1. ed. New York: CRC Press, 2015.
- ²⁶ VERMA, G.; WEBER. M. **Solidworks 2017 Back Book.** 4 ed. New York: CAD/CAM/CAE, 2017.

- ²⁷ GILAT, A. SUBRAMANIAM, V. **Métodos numéricos para Engenheiros e Cientistas**. 1. ed. Porto Alegre/RS: Editora Bookman, 2008.
- ²⁸ SCHÄFER, M. **Computacional Engineering. Introducion to numerical methods**. 1. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- ²⁹ LEVEQUE, R. J. **Finite-Volume Methods for hyperbolic Problems**. 1. ed. New York: Cambridge University Press, 2004.
- ³⁰ MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro/RJ: Editora LTC, 2004.
- ³¹ KOLDITZ, O. **Computational methods in Environmental fluid Mechanics**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- ³² GONÇALVES, N. D. F. **Método dos volumes finitos em malhas não estruturadas**. Dissertação (Mestrado em Matemática aplicada). Faculdade de Ciências da Universidade do Porto/U.Porto, Porto, 2007.
- ³³ FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2002.
- ³⁴ NOGUEIRA, D. **Análise de soluções por volumes finitos para convecção forçada em canais de trocadores de calor**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Fluminense/UFF, Niterói/RJ, 2009.
- ³⁵ GIACOMINI, F. de F. **Verificação da forma de aplicar condições de contorno em problemas unidimensionais com métodos de volumes finitos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de concentração em fenômeno de transporte e mecânica dos sólidos) - Universidade Federal do Paraná/UFPR, Curitiba /PR, 2009.
- ³⁶ BRENNY, F. **O método dos volumes finitos aplicado a propagação de ondas elásticas**. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Civi) - Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 2007.
- ³⁷ VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational fluid dynamics. The finite volume method**. 1. ed. New York: Longman Scientific & Technical, 1995.
- ³⁸ PLETCHER, R. H.; TANNEHILL, J. C.; ANDERSON, D. A. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**. 3. ed. New York: CRC Press, 2012.
- ³⁹ FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamic**. 3. ed. New York: Springer, 2002.

- ⁴⁰ SILVA, S. A. **Solução numérica da equação da difusão de calor em geometrias tridimensionais**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pernambuco/UFPE, Recife/PE, 2004.
- ⁴¹ PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. 2. ed. New York: Taylor & Francis, 1998.
- ⁴² ROCHA, P. A. C.; SILVEIRA, J. V. P. da. **Estudo e aplicação de simulação computacional em problemas simples de mecânica dos fluidos e transferência de calor**. Revista brasileira de ensino de física, V. 34, n. 3. 4306, 2012.
- ⁴³ FILHO, A. A. **Elementos finitos. A base da tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo/ SP: Editora Érica, 2013.
- ⁴⁴ FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **Um primeiro curso em elementos finitos**. 1. ed. Rio de Janeiro/RJ: Editora LTC, 2006.
- ⁴⁵ BOTELHO, M. H. C. **Resistência dos Materiais**. 2. ed. São Paulo/SP: Editora Blucher, 2013.
- ⁴⁶ NETO, J. B. C.; GARCIA, E. C.; RIVAS, G. A. R. **Modelo Computacional para Análise da Condução de Calor**. XV Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José do Campos/SP, 2009.
- ⁴⁷ SOLIMANI, M. R. **Estudo da Transferência de Calor e Obtenção de Dados de Referência para Simulação Numérica do Sistema de Resfriamento de Cilindros de Trabalho da Laminação a Quente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais/UFMG: Belo Horizonte/MG, 2011.
- ⁴⁸ FREIRE, L. de F. **A Transferência de Calor com o Uso de Experimentos Alternativos**. Revista Scientia Plena, Vol. 1 núm. 8, 2005.
- ⁴⁹ AZEVEDO, R. L.; HENRÍQUEZ, J. R. **Transferência de Calor e Distribuição de temperatura em um dissipador aletado Acoplado a um Microprocessador: Um estudo numérico**. Revista da Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. Paper CIT04-0212, 2004.
- ⁵⁰ POLAK, P. **Projetos em Engenharia**. 2. ed. São Paulo/SP: Editora Hemus, 1998.

APÊNDICE

Tabela A - Comparativo de temperatura média em pontos laterais dos módulos do emissor de luz e a sua modelagem, dados coletados pela câmera térmica, termopar e simulação da modelagem.

Pontos	Câmera térmica	Termopar	Simulação
1	33,40	34,96	35,97
2	36,13	37,03	36,86
3	37,16	37,53	37,91
4	40,20	38,53	39,38
5	42,53	39,10	40,28
6	43,26	40,43	41,32
7	44,16	41,66	41,91
8	45,20	42,16	42,70
9	46,46	43,03	43,10
10	47,30	43,63	43,57
11	47,13	44,63	43,97
12	45,63	45,23	44,13
13	32,06	34,20	35,58
14	35,23	36,26	36,25
15	35,86	37,40	37,37
16	38,60	38,23	38,64
17	40,40	39,80	39,79
18	41,83	40,80	40,79
19	42,66	41,30	41,62
20	44,30	42,20	42,18
21	44,83	42,63	42,72
22	45,53	43,10	43,15
23	45,36	43,50	43,38
24	43,26	43,76	43,35
25	30,70	33,63	35,46
26	33,90	35,46	36,08
Pontos	Câmera térmica	Termopar	Simulação
27	37,60	36,93	37,00
28	39,06	37,40	38,14
29	40,00	38,60	38,89
30	41,66	39,80	39,61
31	41,93	40,56	40,40
32	43,06	41,33	41,11
33	43,06	41,63	41,56
34	43,16	42,16	41,93
35	43,03	42,23	42,39
36	42,73	42,70	42,60
37	31,50	31,36	31,45
38	33,30	34,40	35,47
39	35,83	35,56	36,20
40	37,80	37,00	37,04
41	39,53	37,73	37,66
42	40,73	38,50	38,25
43	41,66	38,56	38,73
44	42,56	39,40	39,12
45	42,83	40,10	39,46
46	43,23	40,36	39,84
47	43,53	40,70	40,30
48	43,20	41,20	40,55

Fonte: Próprio Autor.

Tabela B - Comparativo de temperatura média nos pontos da superfície dos módulos do emissor de luz e a sua modelagem, dados coletados pela câmera térmica, termopar e simulação.

Pontos	Câmera térmica	Termopar	Simulação
1	31,33	32,20	33,84
2	33,16	33,66	34,72
3	35,40	34,36	35,82
4	37,86	35,33	36,99
5	39,96	37,36	38,14
6	41,26	38,66	39,13
7	42,73	39,63	39,96
8	43,36	40,16	40,55
9	43,80	41,13	41,23
10	44,23	41,60	41,65
11	44,26	41,80	41,87
12	44,06	42,10	41,82
13	29,06	32,16	33,33
14	30,03	34,60	34,19
15	31,40	35,53	35,43
16	34,00	36,53	36,77
17	36,30	37,33	38,06
18	37,86	38,43	39,13
19	39,43	39,50	39,94
20	40,80	40,73	40,58
21	41,30	41,20	41,13
22	41,53	41,43	41,43
23	41,46	41,70	41,48
24	41,23	41,93	41,33
25	28,76	31,43	32,95
26	29,86	33,43	33,80
27	31,03	34,16	34,73
Pontos	Câmera térmica	Termopar	Simulação
28	32,50	34,96	35,78
28	32,50	34,96	35,78
29	34,16	35,53	36,66
29	34,16	35,53	36,66
30	35,93	36,10	37,43
31	37,16	36,60	38,23
32	38,03	37,43	38,97
33	39,10	37,50	39,55
34	39,86	38,53	40,00
35	40,50	39,13	40,16
36	40,40	39,36	39,99
37	30,03	31,10	32,37
38	30,96	33,36	33,10
39	32,33	34,26	34,20
40	33,93	34,56	35,11
41	34,96	35,33	35,86
42	36,46	36,56	36,48
43	37,46	37,33	36,94
44	38,50	37,36	37,30
45	39,16	37,43	37,65
46	40,00	38,46	37,96
47	40,26	38,66	38,17
48	40,03	38,76	38,12

Fonte: Próprio Autor.

Tabela C - Comparativo de temperaturas em todos os módulos do dissipador em leque com dissipadores em alumínio e cobre.

Módulo 1		
Pontos	Temperatura (°C) Dissipador em leque / Alumínio	Temperatura (°C) Dissipador em leque / Cobre
1	31,67	31,29
2	30,78	30,90
3	32,43	31,86
4	31,58	31,52
5	33,10	32,43
6	32,24	32,09
7	33,85	33,07
8	33,09	32,77
9	34,63	33,68
10	33,81	33,31
11	35,33	34,16
Módulo 2		
Pontos	Temperatura (°C) Dissipador em leque / Alumínio	Temperatura (°C) Dissipador em leque / Cobre
12	31,66	31,31
13	30,79	30,90
15	31,57	31,50
16	33,10	32,43
17	32,23	32,07
18	33,83	33,04
19	33,05	32,73
20	34,59	33,64
21	33,75	33,26
22	35,26	34,12

Módulo 3

Pontos	Temperatura (°C) Dissipador em leque / Alumínio	Temperatura (°C) Dissipador em leque / Cobre
23	31,69	31,33
24	30,78	30,90
25	32,45	31,87
26	31,56	31,50
27	33,11	32,43
28	32,23	32,07
29	33,88	33,07
30	33,09	32,76
31	34,66	33,69
32	33,82	33,31
33	35,37	34,19

Módulo 4

Pontos	Temperatura (°C) Dissipador em leque / Alumínio	Temperatura (°C) Dissipador em leque / Cobre
34	31,73	31,39
35	30,82	30,96
36	32,56	31,98
37	31,63	31,58
38	33,20	32,52
39	32,28	32,14
40	33,96	33,16
41	33,14	32,83
42	34,75	33,79
43	33,87	33,38
44	35,46	34,28

Fonte: Próprio Autor.

Tabela D - Comparativo de temperatura dos módulos do emissor de luz com diferentes malhas.

Módulo 1	Temperatura (°C)		
Pontos	Malha 3	Malha 2	Malha 4
1	38,81	39,84	39,15
2	38,00	38,99	38,47
3	41,13	42,02	41,55
4	40,57	41,43	41,00
5	43,30	43,98	43,71
6	42,37	43,05	42,80
7	44,66	45,19	45,08
8	43,49	44,00	43,93
9	45,55	45,93	45,95
10	44,24	44,64	44,71
11	46,26	46,63	46,74
Módulo 2	Temperatura (°C)		
Pontos	Malha 3	Malha 2	Malha 4
12	37,58	37,21	37,08
13	36,97	36,32	36,46
14	40,13	39,68	39,70
15	39,66	39,06	39,13
16	42,37	41,90	41,94
17	41,56	41,00	41,13
18	43,87	43,43	43,60
19	42,85	42,29	42,63
20	44,90	44,38	44,79
21	43,75	42,93	43,70
22	45,69	44,92	45,76

Módulo 3	Temperatura (°C)		
Pontos	Malha 3	Malha 2	Malha 4
23	38,21	38,29	38,16
24	37,33	37,30	37,33
25	40,13	40,24	40,10
26	39,26	39,43	39,23
27	41,79	42,16	41,78
28	40,67	41,17	40,79
30	41,80	42,54	42,06
31	43,92	44,79	44,19
32	42,69	43,48	43,01
33	44,76	45,62	45,12
Módulo 4	Temperatura (°C)		
Pontos	Malha 3	Malha 2	Malha 4
34	37,29	37,07	36,98
35	36,35	35,99	35,91
36	39,10	39,04	38,83
37	38,70	38,06	37,80
38	40,50	40,75	40,46
39	39,30	39,56	39,26
40	41,52	41,99	41,64
41	40,21	40,61	40,33
42	42,32	42,84	42,57
43	40,98	41,35	41,25
44	43,13	43,66	43,57

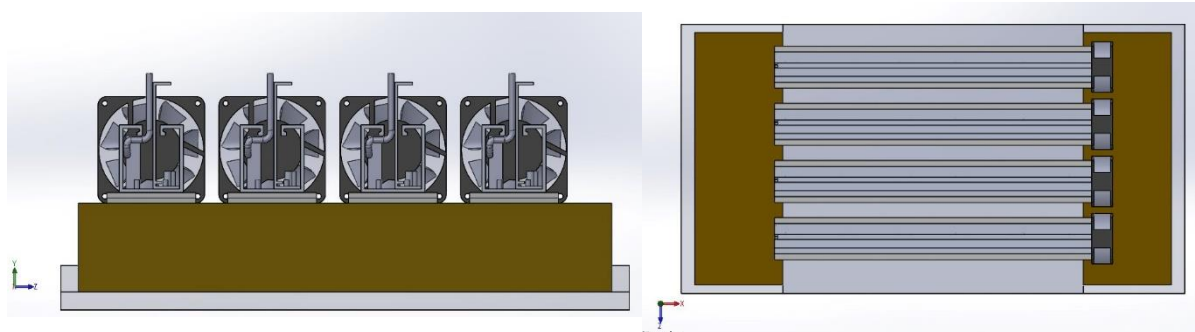
Fonte: Próprio Autor.

Figura A - Projetos das adaptações 1 a 3 do emissor de luz

Adaptação 1 - Ventiladores centralizados e rentes aos módulos.

Vista Lateral esquerda

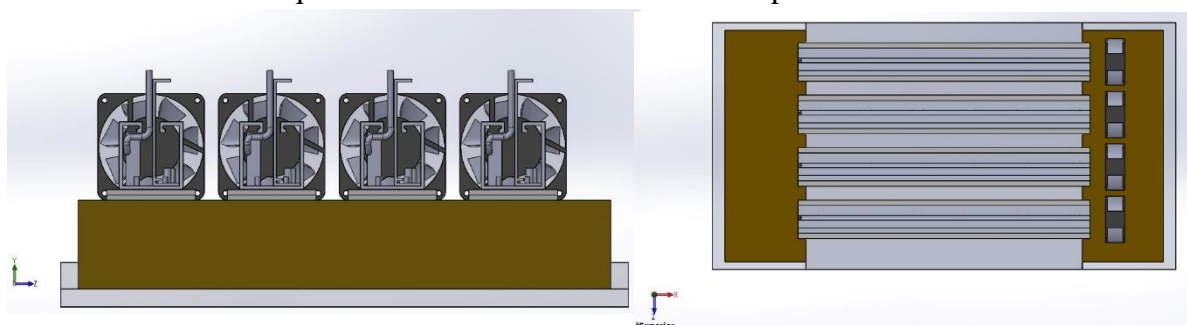
Vista Superior



Adaptação 2 - Ventiladores centralizados e afastados em 3 cm dos módulos.

Vista Lateral esquerda

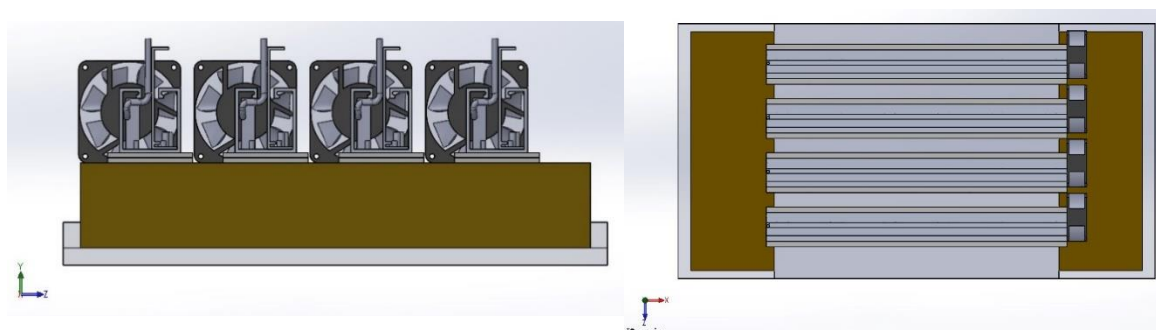
Vista Superior



Adaptação 3 - Ventiladores rentes a parte frontal do módulo e lateral direita.

Vista Lateral esquerda

Vista Superior

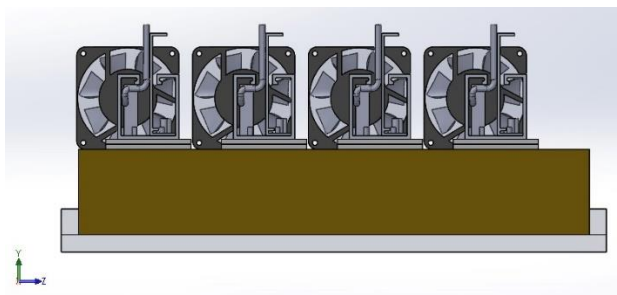


Fonte: Próprio Autor.

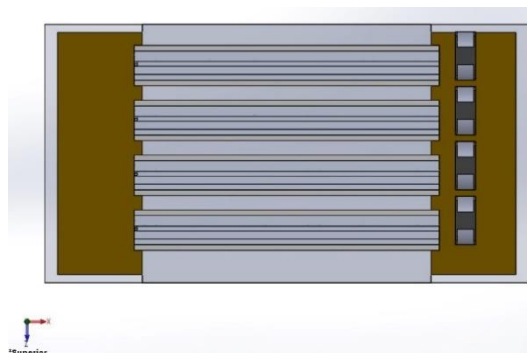
Figura B - Projetos das adaptações 4 a 6 do emissor de luz

Adaptação 4 - Ventiladores afastados em 3 cm e rentes a lateral direita dos módulos.

Vista Lateral esquerda

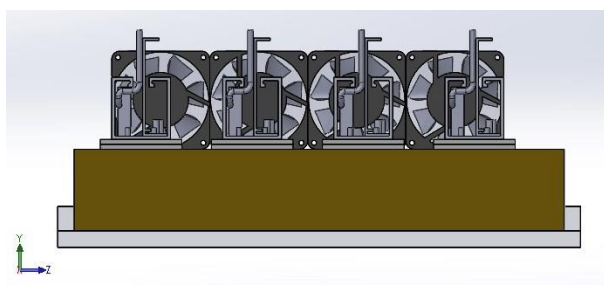


Vista Superior

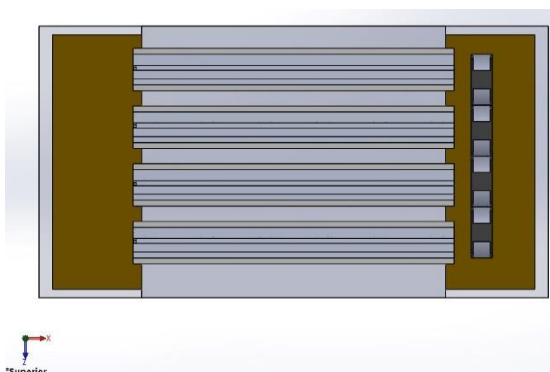


Adaptação 5 - Ventiladores afastados em 3 cm e rentes as laterais direita e esquerda dos módulos.

Vista Lateral esquerda

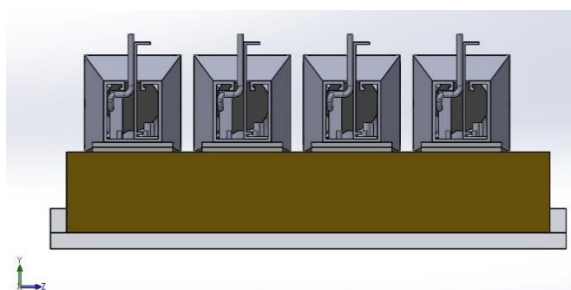


Vista Superior

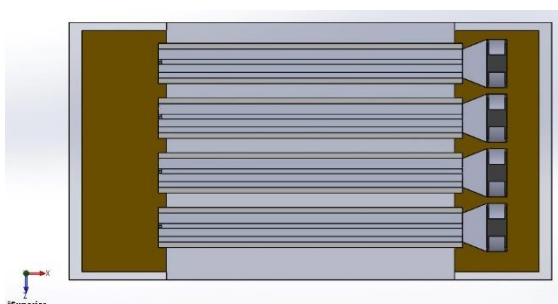


Adaptação 6 - Ventiladores centralizados, ligados ao interior dos módulos por canaletas.

Vista Lateral esquerda



Vista Superior



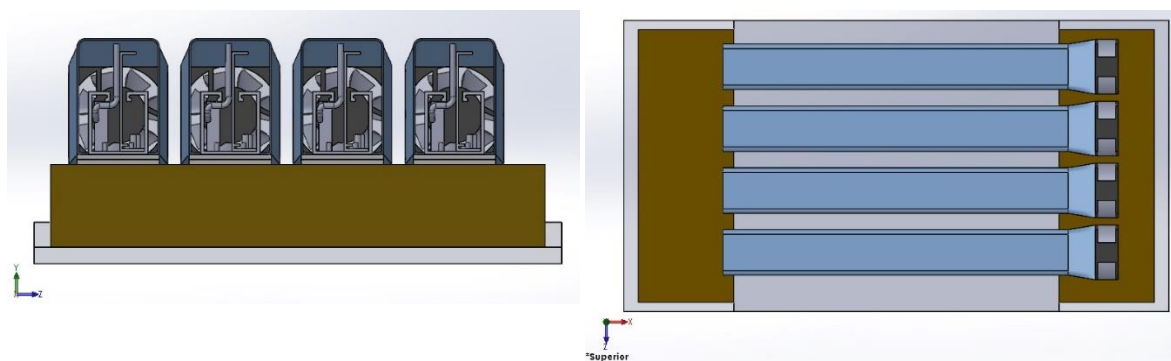
Fonte: Próprio Autor.

Figura C - Projeto da adaptação 7 do emissor de luz

Ventiladores centralizados, ligados ao até a extremidade dos módulos por canaletas.

Vista Lateral esquerda

Vista Superior



Fonte: Próprio Autor.