



Universidade Federal da Bahia  
Instituto de Matemática / Escola Politécnica

Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica

**DMT: UM DISPOSITIVO MECATRÔNICO  
TERMOGRÁFICO DE BAIXO CUSTO**

Leandro Estrela Branco

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Salvador  
Agosto de 2020



LEANDRO ESTRELA BRANCO

**DMT: UM DISPOSITIVO MECATRÔNICO TERMOGRÁFICO DE  
BAIXO CUSTO**

Esta Dissertação de Mestrado foi apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Rebouças de Oliveira

Salvador  
Agosto de 2020

Sistema de Bibliotecas - UFBA

Branco, Leandro Estrela.

DMT: Um dispositivo mecatrônico termográfico de baixo custo / Leandro Estrela Branco – Salvador, 2020.

105p.: il.

Orientador: Prof. Dr. Prof. Dr. Luciano Rebouças de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Instituto de Matemática / Escola Politécnica, 2020.

1. termografia. 2. sensor infravermelho. 3. equipamento de baixo custo.  
I. Oliveira, Luciano Rebouças. II. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Matemática / Escola Politécnica. III Título.

CDD – XXX.XX

CDU – XXX.XX.XXX

# **TERMO DE APROVAÇÃO**

**LEANDRO ESTRELA BRANCO**

## **DMT: UM DISPOSITIVO MECATRÔNICO TERMOGRÁFICO DE BAIXO CUSTO**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada adequada à obtenção do título de Mestre em Mecatrônica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica da Universidade Federal da Bahia.

Salvador, 14 de Setembro de 2020

---

Prof. Dr. Alexandre da Costa e Silva Franco  
Instituto Federal da Bahia

---

Prof. Dr. Karcus Day Rosario Assis  
Universidade Federal da Bahia

---

Prof. Dr. Luciano Rebouças de Oliveira  
Universidade Federal da Bahia







## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo caminho a ser trilhado, pela perseverança a ser adquirida e pelo desafio a ser conquistado.

À minha noiva, Jéssica Alves, pelas orações, atenção e encorajamento dados, sem as quais esse projeto não se tornaria possível.

À minha família, pelas cobranças e apoio.

Ao Prof. Dr. Luciano Rebouças, pela orientação e paciência até o término desse projeto.

Aos colegas do laboratório, pelas observações e conselhos que ajudaram no andamento desse projeto.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB, pela bolsa de mestrado, essencial para o desenvolvimento desse projeto.



*Porque o SENHOR dá a sabedoria, e da sua boca vem a inteligência e  
o entendimento.*

*—BÍBLIA SAGRADA, PROVÉRBIOS 2, 6.*



## RESUMO

A descoberta da radiação infravermelha e o desenvolvimento de tecnologias capazes de detectá-la possibilitou o surgimento da termografia como ciência. A termografia é uma técnica de registro gráfico das temperaturas de um corpo, com a intenção de distinguir as áreas com diferentes temperaturas. Corpos com temperaturas acima de  $-273^{\circ}\text{C}$  (zero absoluto na escala Kelvin) são capazes de emitir radiação infravermelha. Essa característica permite estudar o comportamento da temperatura em diferentes objetos, estruturas e superfícies ao longo do tempo. As aplicações envolvendo a termografia englobam as áreas de segurança e aplicações militares, sendo utilizadas na vigilância de fronteiras, busca e salvamento, patrulhas marítimas e vigilância costeira, vida selvagem; através de estudos relacionados a compreensão da fisiologia térmica dos animais; cuidados relacionados a saúde e medicina veterinária; envolvendo o diagnóstico de diversas enfermidades, lesões relacionadas ao trabalho, estudos de comportamentos e diagnósticos em animais; e a área de engenharia, sendo aplicada em inspeções de equipamentos elétricos e mecânicos, inspeções de edifícios, conformidades em sistemas de climatização, gerenciamento e manutenção de instalações; não sendo esta uma lista exaustiva. A maior limitação para o desenvolvimento de estudos e aplicações envolvendo a termografia está relacionada ao alto custo de seu equipamento. Câmeras térmicas de bolso como a Fluke PTi120 e a FLIR C2 custam em média R\$ 6.000,00 e R\$ 3.000,00 respectivamente. Câmeras térmicas com tecnologias e recursos adicionais como a FLIR T1020 HD e a Fluke TiX 580 custam em média US\$ 41.500,00 e US\$ 14.000,00, respectivamente. A variação de preços está relacionada a aplicação que o equipamento terá, sua precisão, resolução da câmera, resolução do sensor, limites de medição de temperatura e tecnologias embarcadas produzidas por cada fabricante. Nesse sentido, a proposta desse projeto é apresentar o desenvolvimento de um dispositivo mecatrônico termográfico (DMT) de baixo custo responsável pela produção de imagens térmicas de objetos, contemplando as etapas de construção da estrutura física, aquisição de dados, sistema de movimentação, sistema de eletrônica e controle, sistema elétrico e *interface* gráfica para controle do dispositivo e formação da imagem. O DMT possui precisão de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , em temperatura ambiente entre  $0^{\circ}\text{C}$  e  $50^{\circ}\text{C}$ , possuindo área útil de leitura de  $20 \times 22 \text{ cm}$ , produzindo imagens com  $320 \times 360 \text{ pixels}$ , e capaz de realizar leitura de objetos com temperaturas entre  $0^{\circ}\text{C}$  e  $300^{\circ}\text{C}$ . O custo de construção desse dispositivo foi inferior a R\$ 800,00, podendo ser utilizado para estudos de termografia em pequenos corpos como a mão humana, objetos de pequeno porte que possuam variação de calor, circuitos e componentes eletrônicos e portáteis, como *smartphones*, baterias de íon de lítio ou tablets.

**Palavras-chave:** termografia, sensor infravermelho, equipamento baixo custo.



## ABSTRACT

The discovery of infrared radiation and the development of technologies capable of detecting it made possible the emergence of thermography as a science. Thermography is a technique for graphically recording body temperatures, with the intention of distinguishing areas with different temperatures. Bodies with temperatures above  $-273^{\circ}\text{C}$  are capable of emitting infrared radiation. This characteristic allows to study the behavior of the temperature in different objects, structures and surfaces over time. Applications involving thermography cover the areas of security and military applications, being used in border surveillance, search and rescue, sea patrols and coastal surveillance, wildlife; through studies related to understanding the thermal physiology of animals; health care and veterinary medicine; involving the diagnosis of various diseases, work-related injuries, studies of behaviors and diagnoses in animals; and the engineering, being applied in inspections of electrical and mechanical equipment, building inspections, conformities in air conditioning systems, management and maintenance of installations; this is not an exhaustive list. The biggest limitation for the development of studies and applications involving thermography is related to the high cost of its equipment. Pocket thermal cameras like Fluke PTi120 and FLIR C2 cost an average of R\$ 6,000.00 and R\$ 3,000.00 respectively. Thermal cameras with additional technologies and features like the FLIR T1020 HD and Fluke TiX 580 cost an average of US\$ 41,500.00 and US\$ 14,000.00 respectively. The price variation is related to the application that the equipment will have, its precision, camera resolution, sensor resolution, temperature measurement limits and embedded technologies produced by each manufacturer. In this sense, the purpose of this project is to present the development of a low-cost thermographic mechatronic device (DMT) responsible for the production of thermal images of objects, covering the stages of construction of the physical structure, data acquisition, movement system, system electronics and control, electrical system and graphic interface for device control and image formation. The DMT has an accuracy of  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , at ambient temperature between  $0^{\circ}\text{C}$  and  $50^{\circ}\text{C}$ , having a useful reading area of  $20 \times 22$  cm, producing images with  $320 \times 360$  pixels, and capable of reading objects with temperatures between  $0^{\circ}\text{C}$  and  $300^{\circ}\text{C}$ . The construction cost of this device was less than R\$ 800.00, and it can be used for studies of thermography in small bodies such as the human hand, small objects with heat variation, electronic circuits and components and portables, such as smartphones, lithium-ion batteries or tablets.

**Keywords:** thermography, infrared sensor, low cost equipment.



# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1—Introdução</b>	1
1.1 Requisitos de projeto . . . . .	3
1.2 Objetivos . . . . .	3
1.2.1 Objetivo geral . . . . .	3
1.2.2 Objetivo específico . . . . .	4
1.3 Contribuições . . . . .	4
1.4 Mapa dos capítulos . . . . .	4
<b>Capítulo 2— Fundamentação teórica</b>	5
2.1 Princípios físicos . . . . .	6
2.1.1 Radiação infravermelha . . . . .	7
2.1.2 Radiação térmica . . . . .	8
2.1.3 Corpo negro . . . . .	9
2.1.4 Lei de Planck . . . . .	10
2.1.5 Emissividade . . . . .	12
2.1.6 Lei de Stefan-Boltzman . . . . .	13
2.1.7 Tecnologias . . . . .	13
2.2 Aplicações de termografia . . . . .	16
2.2.1 Medicina . . . . .	16
2.2.2 Sistemas elétricos e eletrônicos . . . . .	17
2.2.3 Medicina veterinária e vida selvagem . . . . .	18
2.2.4 Inspeção, estruturas e refrigeração . . . . .	18
<b>Capítulo 3—Trabalhos relacionados</b>	19
3.1 Concepção de sensores semicondutores termográficos . . . . .	19
3.2 Sistemas que utilizam equipamentos termográficos . . . . .	21
3.3 Desenvolvimento de equipamentos termográficos a partir de sensores térmicos	22
3.4 Relação com o trabalho proposto . . . . .	24
<b>Capítulo 4—<i>Hardware e software</i> do DMT</b>	27
4.1 Hardware . . . . .	28
4.1.1 Elétrica / eletrônica . . . . .	29
4.1.1.1 Unidade microcontroladora do sistema . . . . .	30
4.1.1.2 Motores e unidade controladora de motores . . . . .	32

4.1.1.3	Fonte de alimentação . . . . .	34
4.2	Estrutura mecânica . . . . .	35
4.2.1	Dimensionamento . . . . .	36
4.2.2	Módulo Y . . . . .	37
4.2.3	Módulo X . . . . .	42
4.2.4	Movimentação . . . . .	45
4.3	Aquisição de dados . . . . .	47
4.3.1	Posição dos <i>pixels</i> e campo de visão . . . . .	51
4.3.2	Precisão do sensor . . . . .	55
4.3.3	Esquemático do sensor . . . . .	57
4.4	Interface . . . . .	58
4.4.1	Aquisição da imagem térmica . . . . .	62
4.5	Custo do projeto . . . . .	63
<b>Capítulo 5—Princípio de funcionamento</b>		<b>67</b>
5.1	Funcionamento . . . . .	67
5.2	Sistema de movimentação . . . . .	72
5.2.1	Precisão do sistema de movimento . . . . .	72
5.2.2	Torque do sistema de movimento . . . . .	73
5.3	Formação da imagem . . . . .	74
<b>Capítulo 6—Avaliação das características</b>		<b>83</b>
6.1	Precisão do sensor . . . . .	83
6.2	Precisão mecânica . . . . .	83
6.3	Precisão da imagem térmica . . . . .	86
<b>Capítulo 7—Conclusão</b>		<b>89</b>
7.1	Pontos fortes e pontos fracos . . . . .	89
7.2	Aplicações . . . . .	90
7.3	Limitações . . . . .	90
7.4	Trabalhos futuros . . . . .	91
<b>Apêndice A—Apêndice</b>		<b>103</b>
A.1	Alumínio estrutural . . . . .	103
A.2	Placa de policarbonato . . . . .	104
A.3	Rolamento e roldana . . . . .	105

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Espectro eletromagnético. O espectro eletromagnético é composto de diversos tipos de radiações. Entre estas está a radiação infravermelha, localizada após a luz visível, que será a principal fonte para detecção de calor dos corpos pelos instrumentos de termografia. . . . .	6
2.2	Interação entre a radiação térmica e um corpo. Um corpo ao receber energia, a depender da natureza do corpo, é capaz de absorver e refletir. A reflexão de energia por um corpo é um fator a ser considerado devido a sua capacidade de transmitir calor. . . . .	9
2.3	Modelo experimental do corpo negro. Essa é a representação de um modelo de corpo negro, onde é possível verificar o pequeno orifício de entrada, responsável pela passagem da radiação pelo interior do corpo e a forma como a radiação percorre todo o corpo negro em seu interior. . . . .	10
2.4	Curvas da lei de Planck para corpos com diferentes temperaturas. Fonte: (MULLER; SARAIVA; SARAIVA, 2015). . . . .	11
2.5	Etapas de funcionamento do sensor. Esse organograma ilustra de forma genérica como um sensor térmico se comporta ao receber a radiação infravermelha pelo sensor até sua transformação em dados a serem utilizados por um sistema qualquer. . . . .	14
2.6	Estrutura de uma termopilha. A região $T_a$ representa a junção fria, mantida em temperatura ambiente, enquanto que a região $T_b$ representa a junção quente, exposta a radiação infravermelha. . . . .	15
2.7	Estrutura de um bolômetro. A radiação incidente no resistor $R_b$ fará variar sua resistência. A região do resistor $R - L$ será responsável pela leitura da variação de tensão no ponto $V_s$ do circuito. A variação do resistor $R_b$ produzirá variação na tensão $V_s$ . Fonte: (PEDROSA; ATHAYDE, 2012). . . . .	15
2.8	Estrutura de um detector piroelétrico. A incidência da radiação infravermelha faz com que ocorra a variação de carga entre esses metais, consequentemente variando sua carga elétrica. Essa variação elétrica é responsável pela percepção da radiação pelo detector. Fonte: (PEDROSA; ATHAYDE, 2012). . . . .	16

- 3.1 Exemplos de semicondutores termográficos. A figura da esquerda apresenta Câmera MIRC desenvolvida com microbolômetro a-Si, a figura central ilustra encapsulamento de um bolômetro em chip e a figura da direita mostra uma visão micrométrica de um conjunto de microbolômetros desenvolvido para um projeto. Fontes: (SCHIMERT et al., 2001), (MANSI et al., 2003), (GEOFFRAY; GUERIN, 2001), respectivamente da esquerda para a direita. . . . . 20
- 3.2 Exemplos de sistemas com equipamentos termográficos. A figura mais a esquerda apresenta um drone utilizando o Flir Photon embarcado. A figura central mostra um sistema de detecção de falhas em painéis solares e a figura mais à direita um protótipo de hardware utilizando a câmera Flir Lepton. Fontes: (JAAKKOLA et al., 2010), (PESTANA; MENDONÇA; MORGADO-DIAS, 2017), (MONTE et al., 2019), respectivamente da esquerda para a direita. . . . . 21
- 3.3 Exemplos de sistemas térmicos utilizando sensores. A figura da esquerda apresenta sistema utilizando o MLX 90614. A figura da direita mostra um sistema térmico portátil utilizando o MLX 90621. A figura 3 mostra o desenvolvimento de um protótipo que será utilizado em aplicações médicas. Fontes: (LJUBENOVIC; MILIC, 2018), (CHIRILA; SZOLGA, 2019), (Kockara et al., 2014), respectivamente da esquerda para a direita. . . . . 23
- 3.4 Sistema DMT. As imagens superior direita e esquerda mostram a estrutura do sistema DMT, onde é possível observar seus componentes, bem como sua integração com laptop, onde se encontra a *interface* de controle do sistema. Na imagem inferior esquerda, é possível observar a integração entre a unidade controladora, sistema elétrico e eletrônico do sistema. A imagem inferior direita apresenta o circuito ligado ao sensor térmico MLX 90621, elemento central para captura das informações térmicas dos objetos. 24
- 3.5 Leitura térmica de dispositivo móvel (*tablet*) utilizando o DMT. Essa leitura possui uma temperatura mínima de 27.3°C, temperatura máxima de 38.6°C e temperatura média de 34.7°C. A imagem A1 é apresentado no mapa de cores hsv, imagem A2 com mapa de cores inferno e imagem A3 com mapa de cores jet. . . . . 25
- 3.6 Leitura térmica de celular utilizando o DMT. Essa leitura possui uma temperatura mínima de 27.8°C, temperatura máxima de 39.2°C e temperatura média de 31.1°C. A imagem A1 é apresentado no mapa de cores hsv, imagem A2 com mapa de cores jet e imagem A3 com mapa de cores inferno. 25
- 3.7 Leitura térmica de uma pistola de cola quente utilizando o DMT. Essa leitura possui uma temperatura mínima de 27.3°C, temperatura máxima de 111.2°C e temperatura média de 32.3°C. A imagem A1 é apresentado no mapa de cores hsv, imagem A2 com mapa de cores jet e imagem A3 com mapa de cores inferno. . . . . 26

3.8	Leitura térmica do dispositivo microcontrolado Arduíno utilizando o DMT. Baseado no experimento de Ljubenic e Milic (2018), utilizou-se a ligação de 10 <i>leds</i> com o dispositivo, sendo alimentado com fonte externa, no intuito de verificar o processo de aquecimento diante de uma aplicação real. Essa leitura possui uma temperatura mínima de 27.2°C, temperatura máxima de 75.9°C e temperatura média de 29.8°C. A imagem A1 é apresentado no mapa de cores hsv, imagem A2 com mapa de cores jet e imagem A3 com mapa de cores inferno. . . . .	26
4.1	Eixos mecatrônicos para o desenvolvimento do projeto. Esses eixos compõem o desenvolvimento do DMT, onde cada eixo tem funções específicas para sua construção física, integração de componentes, detalhamento de funções e funcionamento do DMT para produção de imagens térmicas. . . . .	28
4.2	Hardware do protótipo. O projeto do DMT é dividido em: estrutura, aquisição de dados (unidade sensora) e sistema eletroeletrônico (unidade motora, unidade de controle e fonte de energia). . . . .	29
4.3	Plataforma Arduino Mega 2560. A plataforma Arduino possibilita uma agilidade a nível de desenvolvimento e aplicação de sistemas embarcadas graças a sua integração e codificação através da utilização de ambientes de desenvolvimento próprio, bibliotecas, facilidade na escrita do código e sensores que podem ser conectados a ele e programados em um curto espaço de tempo. Fonte: <a href="https://store.arduino.cc">https://store.arduino.cc</a> . . . . .	30
4.4	Motor de passo 17HS4401/42BYGH. O motor de passo garante precisão e torque a um baixo custo, sem a necessidade acessórios externos para seu funcionamento. A sua facilidade de operação, configuração e uso é também um importante ponto a ser considerado para a escolha desse tipo de motor. . . . .	32
4.5	<i>Driver</i> DRV8825. O <i>driver</i> possibilita controle e configuração do funcionamento do motor de passo, além de aumentar a precisão do mesmo caso seja necessário. . . . .	33
4.6	Ligação do <i>Driver</i> DRV8825. Esquema elétrico de ligação do <i>driver</i> DRV8825, onde há pinos para ligação do motor, fonte de energia e pinos responsáveis por comandar os parâmetros do <i>driver</i> em relação ao motor. Fonte : <a href="https://www.pololu.com/">https://www.pololu.com/</a> . . . . .	33
4.7	Fonte chaveada 12 volts, 5 Amperes. A fonte chaveada é uma fonte eletrônica que possui baixo peso, baixo volume e alto rendimento se comparado as fontes lineares. Essa fonte fornece toda a energia necessária para a movimentação do DMT. . . . .	34
4.8	Guia linear, eixo linear e roldana. Esses são exemplos de componentes utilizados em sistemas que necessitam de deslocamento linear, possuindo características diferenciadas, tendo suas aplicações condicionadas a parâmetros de projeto e custo. . . . .	35

4.9	Principais esforços considerados nesse projeto. A força de deflexão no centro, local de maior deflexão nesse sistema, e as forças de cisalhamento nas extremidades de apoio nos pontos de fixação são os principais esforços considerados nessa estrutura. . . . .	37
4.10	Perfil em C segundo método dos elementos compostos. Essa representação mostra o método sendo aplicado nas áreas 1 e 2 do perfil em C. . . . .	38
4.11	Perfil em C com centroide localizado. Esse é o resultado da aplicação dos métodos compostos sobre o perfil em C. Esse resultado servirá como base para o cálculo dos momentos de inercia dos corpos do método composto. . . . .	39
4.12	Teste de tensão realizado na viga principal do modulo Y. Essa análise foi feita aplicando uma força equivalente, no centro do perfil em C, ao conjunto do eixo X. As laterais do perfil foram fixados na intenção de representar as colunas do DMT. . . . .	42
4.13	Deflexão que poderá ser ocasionada pela unidade sensora. A deflexão na extremidade, posição onde a flexão pode ser máxima nesse sistema, bem como o cisalhamento na junção de encaixe do perfil, são os esforços a serem considerados na estrutura do modulo X. . . . .	43
4.14	Teste de tensão realizado na viga principal do modulo Y. Essa análise é decorrente de uma possível deflexão do perfil ocasionado pela massa da unidade sensora na extremidade do perfil. Uma da extremidade do perfil foi fixada enquanto a outra foi submetida a uma força equivalente ao peso da unidade sensora. . . . .	45
4.15	Correia GT2. Essa figura apresenta os aspectos dimensionais do correia GT2, tendo como ponto importante a se observar o seu passo, que equivale a 2.00mm. Fonte: <a href="https://www.adafruit.com">https://www.adafruit.com</a> . . . . .	45
4.16	Polia GT2. . . . .	46
4.17	Distribuição de tensão nas correias. Através dessa figura, fica evidenciado a forma como a tensão se distribui em relação ao tipo de dente da correia. É interessante observar que o dente redondo apresenta uma distribuição mais uniforme quando submetida a um esforço pela polia acoplada a ela. Fonte: <a href="https://www.sdp-si.com/">https://www.sdp-si.com/</a> . . . . .	47
4.18	Procedimentos para aquisição de dados. A aquisição de dados é um procedimento que envolve a interação entre o DMT e a interface localizada em um computador. A interface será o componente que requisita esses dados e os recebe para posterior processamento. O microcontrolador é o meio que permite que a interface possa fazer essa requisição, solicitando esses dados ao sensor. . . . .	48
4.19	Sensor Melexis 90621. Fonte: (MELEXIS, 2016) . . . . .	49
4.20	Estrutura interna do sensor Melexis 90621. Internamente, o sensor Melexis 90621 possui um conjunto de termopilhas para a recepção da radiação e uma estrutura eletrônica que permite a filtragem dos dados, armazenamento de informações e meio físico para comunicação com periféricos externos. Fonte: (MELEXIS, 2016) . . . . .	49
4.21	Processo de formação da imagem pelo sensor. . . . .	50

4.22	Posição dos <i>pixels</i> do sensor. A matriz térmica possui 64 regiões que se encontram divididas entre 4 linhas e 16 colunas. Cada região é representada com uma linha e coluna na área de alcance do sensor. Essa área sofre variação de tamanho conforme a distância entre a região de leitura e sensor. Fonte: (MELEXIS, 2016) . . . . .	52
4.23	Sensibilidade do sensor. A efetividade de leitura do sensor está relacionada ao seu ângulo de incidência sobre o objeto. Sensor posicionado a 90° em relação ao objeto possui sensibilidade de 100%. Ângulos menores reduzem a sensibilidade do sensor. Fonte: (MELEXIS, 2016) . . . . .	52
4.24	Distância entre o sensor e sua região de leitura. . . . .	53
4.25	Campo de visão real do sensor Melexis 90621. A área hachurada apresenta a campo de visão real do sensor. As linhas vermelhas representam as limitações e marcações na medição. As imagens térmicas apresentadas expressam os limites utilizando o dedo de mão humana como objeto capaz de perceber os limites apresentados. O campo de visão real possui 28mm de verticalidade e 109mm de horizontalidade. . . . .	54
4.26	Precisão do sensor para diferentes temperaturas. A precisão do sensor está relacionada as temperaturas ambiente e do objeto. De acordo com esses fatores, pode ocorrer uma variação na precisão de leitura do sensor. Fonte: (MELEXIS, 2016) . . . . .	55
4.27	Resolução para os 4 <i>pixels</i> centrais. A resolução do sensor cresce conforme aumenta-se o número de quadros por segundo do sensor. a resolução está relacionada ao contraste das cores na imagem térmica. Essa figura refere-se aos 4 <i>pixels</i> centrais do sensor. . . . .	55
4.28	Resolução para os <i>pixels</i> restantes. Essa figura refere-se a resolução dos <i>pixels</i> do sensor na matriz térmica retirando os 4 <i>pixels</i> centrais. . . . .	56
4.29	Esquemático do sensor MLX 90621. O esquema elétrico do sensor possui uma alimentação do 3,3 volts com diodo (D1). Os canais <i>MCU_SDA</i> e <i>MCU_SCL</i> são responsáveis pela comunicação I2C com microcontrolador. R1 e R2 são resistores <i>Pullup</i> e C1 representa o capacitor para estabilizar eletricamente o sensor. . . . .	58
4.30	<i>Interface</i> para formação de imagem térmica. . . . .	59
4.31	Janela executada pelo botão visualizar junto com suas opções. . . . .	60
4.32	Sequência de passos para funcionamento do sistema. . . . .	62
5.1	Direção dos eixos do protótipo. O DMT possui dois eixos para o deslocamento. O eixo X é responsável pela movimentação da unidade sensora, enquanto que o eixo Y é responsável por todo o deslocamento do eixo X. . . . .	68
5.2	Região de leitura do sensor. O DMT realiza três regiões de leitura. Cada região é responsável pela formação de 1 imagem. As 3 imagens, resultante dessas regiões, sofrerão processamento para formação da imagem final. . . . .	68
5.3	Comparação das imagens em relação as leituras. As áreas em círculo apresentam as melhorias que resultam da média das 4 leituras em relação a leitura única do sensor. . . . .	69

5.4	comparação das imagens em relação as leituras. As leituras do sensor são consecutivas e compreendem apenas a metade da área do campo de visão do sensor. Essa região em comum entre duas leituras é usada para estabelecer uma comparação a nível estatístico e probabilístico com o intuito de se conhecer o quanto essas regiões tem em comum. . . . .	70
5.5	Forças atuantes no movimento do eixo. A força de tração é a força originada do torque do motor e responsável pelo movimento do eixo Y. As forças de atrito, peso e normal não são relevantes para análise da movimentação do eixo. . . . .	73
5.6	Imagens capturadas pelo sensor. Essas imagens foram capturadas pelo DMT através de 51 leituras realizadas pelo sensor. A resultante do processamento desses dados é apresentado por essas 3 imagens. Cada imagem é formada por 17 leituras do sensor. . . . .	75
5.7	Processos para formação da imagem final. A produção da imagem final obedece a uma serie de passos consecutivos e complementares para que sejam produzidos os parâmetros para formação da imagem final. . . . .	75
5.8	Imagem binaria formada pela temperatura média. . . . .	76
5.9	Mapas de cores inferno, jet e hsv. As imagens 1,3 e 5 representam seus mapas de cores da mesma imagem. As imagens 2,4 e 6 representam essas imagens com aplicação de <i>threshold</i> . Nota-se que o resultado do mapa inferno apresentou melhores resultados para realizar a binarização da imagem. . . . .	77
5.10	Resultado da binarização por <i>threshold</i> . . . . .	77
5.11	Marcação do ponto de referência. O ponto de referência (círculo vermelho na figura a direita) é o centro da matriz $3 \times 3$ que será tido como padrão para verificação de semelhança na imagem a esquerda. . . . .	78
5.12	Percurso da matriz de <i>pixel</i> $3 \times 3$ . A matriz tida como padrão pela escolha de seu ponto central será usado como comparador nessa imagem, percorrendo coluna a coluna e comparando os <i>pixels</i> existentes com aqueles da matriz padrão. . . . .	79
5.13	Ponto de referência e pontos encontrados. A figura à direita apresenta o ponto de referência marcado manualmente, sendo ele um padrão de comparação. Os pontos na imagem à esquerda, são os pontos que apresentam indicação de semelhança com o ponto de referência. Nesse caso foram apresentadas duas equivalências em relação ao ponto de referência. . . . .	80
5.14	Resultado da junção da imagem central com a imagem lateral direita. . . . .	80
5.15	Escolha do ponto de referência. Segue o mesmo procedimento mostrado acima (ver Fig. 5.11). . . . .	81
5.16	As imagens a esquerda e ao centro apresentam o ponto de referência e ponto encontrado, enquanto que a imagem a direita apresenta a concatenação das imagens a esquerda e ao centro baseado nos pontos escolhidos. . . . .	81
5.17	Resultado da junção da imagem central com as imagens laterais. . . . .	82

6.1	Princípio de medição do erro no posicionamento. Essa medição é necessária para se verificar o erro produzido pelo deslocamento nos eixos X e Y em relação a precisão do sistema. A diferença entre a precisão do sistema e a precisão do relógio comparador, ferramenta utilizada para medição, fez com que fosse necessário essa diferenciação entre posição do relógio comparador e a posição percorrida nos eixos. . . . .	84
6.2	Posições aferidas no eixo principal e auxiliar. Essas posições foram as posições percorridas nos eixos para avaliação do erro do sistema. A posição inicial é a região onde se encontra posicionada a unidade sensora e o conjunto do eixo X. . . . .	85
6.3	Imagem produzida pelo DMT com taxa de transferência de dados de 4Hz. A temperatura mínima é de 28.1°C, temperatura máxima de 35.8°C e temperatura média de 31.5°C. Os mapas de cores utilizados nas imagens são hsv, jet e inferno, respectivamente. . . . .	86
6.4	Imagem produzida pelo DMT com taxa de transferência de dados de 16Hz. A temperatura mínima é de 27.3°C, temperatura máxima de 35.3°C e temperatura média de 31.3°C. Os mapas de cores utilizados nas imagens são hsv, jet e inferno respectivamente. . . . .	87
6.5	Imagem produzida pelo DMT com taxa de transferência de dados de 32Hz. A temperatura mínima é de 27.7°C, temperatura máxima de 36.0°C e temperatura média de 31.6°C. Os mapas de cores utilizados nas imagens são hsv, jet e inferno respectivamente. . . . .	87
6.6	A imagens apresentadas mostram ruídos e alterações de resolução de temperatura do sensor nas taxas de 4Hz, 16Hz e 32Hz. As formas circulares em amarelo apresentam ruídos, as formas circulares em vermelho apresentam diferenciação no contraste, as formas brancas retangulares apresentam a distorção da imagem e as formas circulares brancas, nas imagens com o mapa de cor inferno, apresentam variações no fundo da imagem. . . . .	88
A.1	Perfil modular 40 × 80mm. Perfil estrutural utilizado na sustentação do eixo X, responsável pelo deslocamento do sensor. . . . .	103
A.2	Perfil modular 80 × 20mm. Perfil responsável pela sustentação dos eixos X e Y do sistema DMT. . . . .	104
A.3	Perfil modular 60 × 20mm. Perfil estrutural cuja função é servir de suporte e estabilidade para todo o conjunto, que compreende os eixos X e Y e a coluna que os sustenta (perfil 80 × 20mm). . . . .	104
A.4	Perfil modular 40 × 20mm. Perfil responsável pela sustentação da unidade sensora. Ele foi escolhido devido a sua pequena dimensão, se comparado aos outros perfis disponíveis, reduzindo os esforços necessários do sistema para sua sustentação. . . . .	104
A.5	Policarbonato compacto. Material utilizado em componentes estruturais do projeto, que possui resistência para suportar as cargas necessárias e a leveza para não acrescentar massa ao sistema estrutural. . . . .	105

- A.6 Roldana 625zz e polia em Delrin. Esse conjunto de componentes são responsáveis pelo deslocamento através do encaixe da polia na estrutura do perfil de alumínio, permitindo o movimento linear de componentes acoplados a roldana. Fontes: <https://www.skf.com> e <https://openbuildspartstore.com>.105

## LISTA DE TABELAS

2.1	Emissividade de alguns materiais. . . . .	13
3.1	Tecnologias de sensores semicondutores termográficos. . . . .	20
3.2	Tecnologias envolvendo equipamentos termográficos. . . . .	22
3.3	Trabalhos que utilizam sensores térmicos. . . . .	23
4.1	Quadro comparativo de microcontroladores . . . . .	31
4.2	Informações técnicas do motor de passo 17HS4401/42BYGH. . . . .	33
4.3	Consumo de energia dos dispositivos. . . . .	34
4.4	Componentes de movimentação linear. . . . .	35
4.5	Massa dos componentes e conjuntos mecânicos. . . . .	36
4.6	Informações sobre propriedade dos corpos. . . . .	38
4.7	Sistemas de movimentação. . . . .	46
4.8	Parâmetros de configuração do sensor. . . . .	56
4.9	Quadro comparativos dos sensores . . . . .	58
4.10	Custos dos componentes do projeto. . . . .	64
4.11	Comparativo das características das câmeras térmicas. . . . .	65
5.1	Resultado dos dados térmicos da 1 <sup>o</sup> – 17 <sup>o</sup> leitura do sensor. . . . .	70
5.2	Resultado dos dados térmicos da 18 <sup>o</sup> – 34 <sup>o</sup> leitura do sensor. . . . .	71
5.3	Resultado dos dados térmicos da 35 <sup>o</sup> – 51 <sup>o</sup> leitura do sensor. . . . .	71
5.4	Matriz padrão de pontos . . . . .	78
6.1	Parâmetros de precisão do sensor . . . . .	84
6.2	Medição do eixo auxiliar. . . . .	85
6.3	Medição do eixo principal. . . . .	86



**INTRODUÇÃO****Conteúdo**

1.1	Requisitos de projeto . . . . .	3
1.2	Objetivos . . . . .	3
1.2.1	Objetivo geral . . . . .	3
1.2.2	Objetivo específico . . . . .	4
1.3	Contribuições . . . . .	4
1.4	Mapa dos capítulos . . . . .	4

A termografia é uma técnica não invasiva usada para medir a distribuição de temperatura em determinado corpo, superfície ou estrutura. A imagem formada a partir dessa distribuição de temperatura é chamada de termograma. Uma câmera térmica é um dispositivo sem contato que detecta energia infravermelha (calor) e converte em sinal eletrônico, que será processado para produzir a imagem térmica (termograma) (S. et al., 2015). Tais câmeras realizam a leitura de pequenas alterações de energia infravermelha emitidas por todos os corpos que possuem temperatura acima de  $-273^{\circ}\text{C}$  (zero absoluto na escala Kelvin). Esses corpos irradiam uma potência eletromagnética na faixa de frequência do infravermelho, que se propaga na atmosfera até atingir a câmera térmica. Isso acontece por conta da agitação térmica dos átomos e moléculas que constituem esses corpos, podendo-se concluir que quanto maior a agitação, maior será a temperatura e emissão de radiação (ARAÚJO, 2014). Enquanto câmeras comuns operam no espectro da luz visível, capturando tudo que os olhos podem ver, as câmeras térmicas infravermelhas capturam radiação infravermelha próxima ao espectro da luz visível vermelha (CHIRILA; SZOLGA, 2019).

A medição da radiação proveniente de um corpo, realizada pelas câmeras térmicas, ocorre em duas etapas: primeiro, a radiação emitida pelo corpo é percebida pelo detector da câmera térmica e medida, em seguida essa informação é convertida em temperatura através de um algoritmo de cálculo que considera a lei de Planck (CHRZANOWSKI, 2001). A primeira câmera térmica foi desenvolvida em 1947, pela Texas Instrument,

quando o exército americano começou a ter interesse na tecnologia de imagens térmicas. No início, um *scanner* foi usado para produzir um termograma, este levando cerca de 1 hora para ser gerado. Devido a sua utilização em esforços de guerra, a tecnologia de câmeras térmicas teve um desenvolvimento muito rápido (THERMALSCOPE, 2020). No final da guerra fria foi permitido que as câmeras termográficas fossem usadas para aplicações civis. No final dos anos 90, o preço dos sensores infravermelhos diminuiu drasticamente, nascendo novos mercados e aplicações como a área automotiva, médica e de controle ambiental (CHIRILA; SZOLGA, 2019).

A temperatura pode ser um parâmetro importante quando se trata de detectar objetos específicos e coletar informações sobre eles. A termografia, por utilizar a temperatura como parâmetro de percepção da realidade, possui diversas aplicações como a agricultura, indústria de alimentos, inspeção e construções, aplicações industriais, aplicações militares e análise médica. Na agricultura, a termografia é aplicada na detecção de infecções fúngicas em plantações de trigo, conseguindo discriminar o trigo saudável do infectado (VELLAICHAMY; JAYAS; WHITE, 2010). Na indústria de alimento, a termografia atua no controle de temperatura da manufatura de alimento e o monitoramento de processos quentes, podendo também evidenciar informações, como danos e contusões, sobre a qualidade de frutas e vegetais (GOWEN et al., 2010). Na área de inspeção de construções, a termografia é utilizada como ferramenta para detecção de vazamento de telhado (ANGAITKAR et al., 2013), telhas desbotadas em acabamento de construções (LI et al., 2000), cupins no interior das superfícies das construções (JAMES; RICE, 2020) e fuga de calor, podendo empregar *drones* para realizar essa inspeção (DIOS; OLLERO, 2006). Na área industrial, a termografia é utilizada para detectar junções elétricas em sistemas de transmissão de força (ROGLER; LÖBL; SCHMIDT, 2007), condições térmicas em instalação elétrica (Jadin; Ghazali; Taib, 2013) e análises térmicas em pneus de carro de corrida (DANESE et al., 2008). As aplicações militares com a termografia englobam a detecção de tiros (PRICE et al., 2004), minas terrestres (SIEGEL, 2003) e até mesmo detecção de atiradores de elite (KASTEK et al., 2010). Sob o ponto de vista médico, a termografia pode ser utilizada para investigar uma ampla variedade de condições clínicas (WEBB, 1988), e possui uma elevada especificidade diagnóstica (BERZ, 2007), podendo auxiliar no diagnóstico de condição como tendinopatias, bursites, entesopatias e artropatias (BRIOSCHI; YENG; TEIXEIRA, 2007), reações inflamatórias do sistema musculoesquelético (BRIOSCHI, 2007), câncer de mama (QI; DIAKIDES, 2009), sendo empregado no diagnóstico complementar avançado de condições neuromusculares dolorosas como síndrome de dor miofascial, miosites, lesões musculoligamentosas, radiculopatias, discopatias, distrofia simpático-reflexa, síndromes do túnel do carpo e do tarso, polineuropatias, lesões esportivas, síndromes compressivas neurovasculares do desfiladeiro torácico e inflamações, como artrites, tendinites e bursites (BRIOSCHI; YENG; TEIXEIRA, 2007).

O principal impedimento para a utilização da termografia de forma mais ampla parece estar relacionado ao custo de seu equipamento. Uma câmera térmica Flir One Pro, conectada a *smartphones*, custa R\$2.689,00 (AMAZON, 2020). Câmeras térmicas de bolso como a Fluke PTi120 e a FLIR C2 custam em média R\$ 6.000,00 (LOJAKNIPEX, 2020) e R\$ 3.000,00 (LOJADOMECANICO, 2020), respectivamente. Câmeras térmicas com tecnologias e recursos adicionais como a FLIR T1020 HD e a Fluke TiX 580 custam em

média US\$ 41.500,00 (FLIR-DIRECT, 2020) e US\$ 14.000,00 (FLUKE-DIRECT, 2020), respectivamente. Câmeras termográficas com elevada precisão, como a FLIR T530 e a T540, possuem valores de aproximadamente US\$ 11.000 e US\$ 16.500, respectivamente (FLIR-DIRECT, 2020). Até mesmo câmeras para uso geral, como a FLIR TG165, que poderiam ser utilizadas para mensurar pequenos dispositivos, possuem valor elevado, custando em torno de R\$2.799,99 (C4M, 2020). A câmera Flir MR277, utilizada em inspeção de edifícios, custa R\$9.499,00 (AMAZON, 2020). A câmera termográfica Flir ETS 320, utilizada para produzir imagens térmicas para teste de componentes eletrônicos, custa R\$10.608,00 (AMAZON, 2020). O alto custo das câmeras térmicas, independentemente de sua especificidade e recursos, é um impeditivo para que a termografia, como uma ferramenta de apoio a produção científica, tenha êxito em sua aplicabilidade.

Diante de todo o exposto, a proposta desse projeto é apresentar o desenvolvimento de um sistema térmico de baixo custo chamado dispositivo mecatrônico termográfico (DMT), detalhando os aspectos técnicos de sua construção como estrutura física, sistema eletroeletrônico, aquisição de dados, integração do sistema e *interface* responsável pelo controle e produção da imagem térmica. Esse sistema utiliza o sensor térmico sem contato MLX 90621 (MELEXIS, 2016). Esse sistema possui precisão de  $\pm 1^\circ\text{C}$  com temperatura ambiente entre  $0^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$ , área útil de leitura de  $20 \times 22\text{cm}$ , capaz de produzir imagens com  $320 \times 360$  *pixels* e realizar leitura de objetos com temperaturas entre  $0^\circ\text{C}$  e  $300^\circ\text{C}$ . O custo de construção desse dispositivo foi inferior a R\$ 800,00.

## 1.1 REQUISITOS DE PROJETO

Os requisitos que fundamentam esse projeto são:

- **Baixo custo:** o desenvolvimento desse projeto visa apresentar uma solução de baixo custo para geração de imagem térmica diante das opções de produtos que realizam a mesma função com determinada precisão.
- **Praticidade:** o sistema deve apresentar facilidade para o usuário com relação a seu manuseio e procedimento para geração da imagem térmica.
- **Confiabilidade:** o projeto deve apresentar um resultado esperado ao seu propósito, que seria a reprodução do objeto analisado a ser digitalizado para gerar uma imagem térmica.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um dispositivo termográfico de baixo custo, envolvendo as etapas de construção da estrutura física, sistema elétrico, eletrônico e controle, aquisição de dados, integração do sistema e desenvolvimento de *interface* responsável pelo controle do dispositivo e formação da imagem térmica.

### 1.2.2 Objetivo específico

- Desenvolver um método para costura das imagens e formação da imagem térmica;
- Propor uma estrutura mecânica com 2 graus de liberdade para deslocamento do sensor de temperatura ao longo do percurso estabelecido para a detecção térmica;
- Desenvolver um sistema de integração entre a movimentação da estrutura mecânica, leitura do sensor e envio de dados através de microcontrolador especificado;
- Criar uma Interface para capturar, formar e apresentar imagem térmica através dos dados obtidos pelo sensor infravermelho.

## 1.3 CONTRIBUIÇÕES

O presente projeto deixará como contribuição um protótipo que possui precisão de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  em temperatura entre  $0^{\circ}\text{C}$  e  $50^{\circ}\text{C}$ , com área útil de leitura de  $20 \times 22$  cm, produzindo imagens com  $320 \times 360$  *pixels* de resolução, e capaz de realizar leitura de objetos com temperaturas entre  $0^{\circ}\text{C}$  e  $300^{\circ}\text{C}$ , com um custo de fabricação abaixo de R\$800,00.

## 1.4 MAPA DOS CAPÍTULOS

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

- **Capítulo 2** - introduz os conceitos fundamentais, elementos e tecnologias utilizadas no campo da termografia.
- **Capítulo 3** - apresenta os trabalhos relacionados ao desenvolvimento de sistemas termográficos de baixo custo, evidenciando suas características e seus aspectos tecnológicos.
- **Capítulo 4** - descreve o sistema proposto, detalhando o *hardware*, aquisição de dados, *interface* e custo do projeto.
- **Capítulo 5** - apresenta o sistema de funcionamento do dispositivo e o sistema computacional para a costura e formação da imagem térmica.
- **Capítulo 6** - discute as características relacionadas a precisão eletrônica do sensor, precisão mecânica e parâmetros voltados para a qualidade da imagem.
- **Capítulo 7** - conclui o documento com discussões sobre vantagens, limitações e aplicações do projeto, assim como melhorias que poderiam ser feitas em trabalhos futuros.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### Conteúdo

2.1	Princípios físicos . . . . .	6
2.1.1	Radiação infravermelha . . . . .	7
2.1.2	Radiação térmica . . . . .	8
2.1.3	Corpo negro . . . . .	9
2.1.4	Lei de Planck . . . . .	10
2.1.5	Emissividade . . . . .	12
2.1.6	Lei de Stefan-Boltzman . . . . .	13
2.1.7	Tecnologias . . . . .	13
2.2	Aplicações de termografia . . . . .	16
2.2.1	Medicina . . . . .	16
2.2.2	Sistemas elétricos e eletrônicos . . . . .	17
2.2.3	Medicina veterinária e vida selvagem . . . . .	18
2.2.4	Inspeção, estruturas e refrigeração . . . . .	18

Muitos cientistas como Roger Bacon, Kepler, Francis Bacon e Boyle buscaram compreender a natureza do calor. Eles afirmavam que seria um tipo de fluido. Benjamin Thompson, observando o disparo de canhões, relatou que o calor não se tratava de um fluido, mas de um movimento vibratório entre partículas dos corpos. No final do século XIX, Joule, através de experiências, derrubou a teoria de que o calor fosse um fluido. A partir daquele momento, buscou-se pensar sobre o calor como uma forma de energia.

O calor, por definição, é a transferência de energia térmica entre corpos que possuem temperaturas distintas. O calor não está diretamente relacionado com a temperatura, mas a diferença de temperatura entre diferentes corpos é capaz de gerar um fluxo de energia térmica (IF-UFRG, 2020). A energia térmica é a movimentação das partículas de um determinado corpo, gerando calor. Quanto maior a movimentação dessas partículas, maior a energia liberada (TRADENER, 2020). Essa energia térmica produzida pelos

corpos, transmitida ao ambiente pelo processo de radiação, deu origem a descoberta do fenômeno da radiação térmica. Esse fenômeno desempenhou um papel de destaque na história da física, sendo teoricamente descrita por Max Planck. Radiação térmica é a radiação eletromagnética gerada pelo movimento térmico das partículas eletricamente carregadas que formam a matéria (RAD-TERM, 2020). Todas essas descobertas no campo da ciência, desde o entendimento sobre o calor até formas de explicar como este se originava e propagava, foram essenciais para o desenvolvimento da termografia.

Nesse capítulo, serão apresentados os conceitos fundamentais para o entendimento da termografia, como a definição e características da radiação infravermelha, formas de como essa radiação se propaga, definições importantes relacionadas a termografia, como corpo negro, emissividade, lei de Stephan-Boltzman e as tecnologias empregadas no desenvolvimento de câmeras térmicas.

## 2.1 PRINCÍPIOS FÍSICOS

A radiação eletromagnética são ondas que se propagam no ar ou no vácuo, atingindo a velocidade da luz (aproximadamente 300.000 km/s) e transportando energia ou informação. Essa radiação abrange um conjunto de diversos tipos de ondas, podendo ser diferenciadas por seu comprimento de onda e frequência. A esse conjunto chamamos de espectro eletromagnético, conforme ilustrado na Fig. 2.1.

O espectro eletromagnético abrange radiações ionizantes, como os raios gama, raio-X e ultravioletas, que formam íons capazes de desestruturar moléculas e átomos, e radiações não ionizantes, que não são capazes de gerar íons, como a luz visível, infravermelho e ondas de rádio.

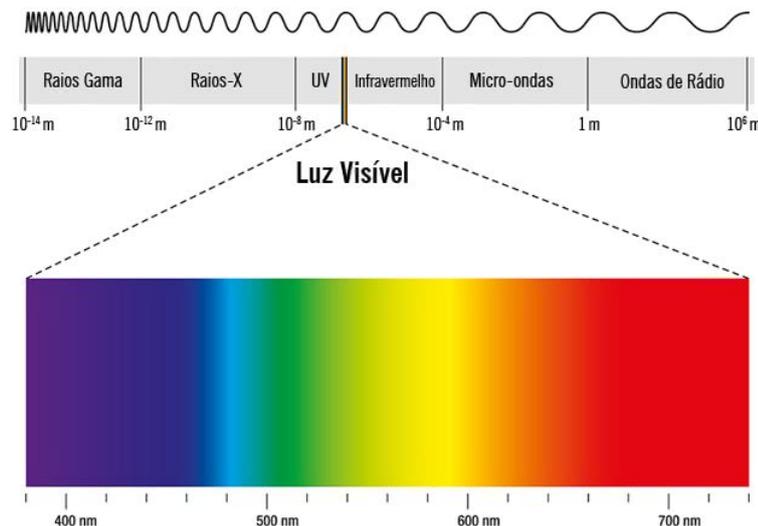


Figura 2.1: Espectro eletromagnético. O espectro eletromagnético é composto de diversos tipos de radiações. Entre estas está a radiação infravermelha, localizada após a luz visível, que será a principal fonte para detecção de calor dos corpos pelos instrumentos de termografia.

O tipo de radiação a ser estudado nesse trabalho será a radiação infravermelha, assim como suas características relacionadas a formação e transferência de calor. Os primeiros estudos e experimentos realizados para uma melhor compreensão do que viria a ser a radiação infravermelha foram realizados por William Herschel (OLIVEIRA; SILVA, 2014). Herschel foi um astrônomo alemão que não possuía conhecimentos matemáticos necessários, mas possuía métodos de observação e descritivos (que o tornaram famoso pela descoberta do planeta urano), sendo utilizados como principal ingrediente para seus estudos sobre os princípios físicos dos raios solares, e conseqüentemente do calor. Utilizando um prisma, responsável pela decomposição dos raios solares, Herschel percebeu que algumas cores eram mais aptas a produzir calor enquanto outras estavam relacionados basicamente a sua capacidade de poder iluminar o ambiente. Herschel também percebeu que a cor vermelha produzia maiores alterações de temperatura, levando-o a crer que existiam raios luminosos invisíveis responsáveis pela produção de calor (OLIVEIRA; SILVA, 2014). Para verificar essa suposição, ele realizava experimentos e descobriu que a maior produção de calor ocorre além do espectro visível do vermelho. Apesar dos experimentos de Herschel terem sido confrontados, levou muitos outros pesquisadores como Macedonio Meloni e John Leslie a buscar entender a relação entre luz e calor (OLIVEIRA; SILVA, 2014).

### 2.1.1 Radiação infravermelha

Radiação infravermelha (IR <sup>1</sup>) é uma radiação não visível ao olho humano, cujo espectro eletromagnético possui um comprimento de onda que varia entre  $0,75\mu m$  a  $100\mu m$ , estando situada entre a luz visível e o micro-ondas. No espectro da luz, essa radiação está localizada após a cor vermelha, por isso a origem de seu nome. A radiação infravermelha possui três tipos de tamanhos de ondas, a curta ( $0,5\mu m$  a  $1,5\mu m$ ), a média ( $1,5\mu m$  a  $10\mu m$ ) e a longa ( $10\mu m$  a  $1000\mu m$ ). A onda infravermelha **curta** possui relação com a luz visível sendo produzida por outras fontes de luz. A onda de infravermelha **média** é utilizado na espectroscopia, avaliando a qualidade de produtos como café, combustíveis e compostos químicos em geral. A onda infravermelha **longa** tem como benefício o aumento da imunidade no organismo, diminuindo inflamações, aliviando dores nas costas e articulações e favorecendo o processo de cicatrização tecidual (MAEDA, 1997). A descoberta da radiação infravermelha possibilitou utilizá-la em diversas aplicações como a produção de mísseis guiados por infravermelho que capta a radiação da turbina dos aviões inimigos, na astronomia para detecção de objetos distantes, nos controles remotos como sinal de transmissão de informação e até mesmo na medicina onde se busca realizar diagnósticos utilizando imagens térmicas do corpo como ferramenta para o descobrimento de doenças.

O IR é emitido por todos os corpos que possuem temperatura acima de  $-273^{\circ}C$  (zero absoluto na escala Kelvin). O corpo humano também possui a capacidade de emitir IR indicando o grau de agitação molecular. Essa radiação infravermelha, também conhecida como radiação térmica, é proporcional a sua temperatura, ou seja, quanto maior for a temperatura, maior é a emissão de radiação infravermelha (ML et al., 2011); (LAHIRI et

---

<sup>1</sup>Do inglês, infrared(IR)

al., 2012). Essa relação entre o infravermelho e as respostas fisiológicas do corpo humano, relacionadas a alteração de temperatura, possibilitou o desenvolvimento, no campo médico, de uma especialização chamada de termografia clínica. A termografia clínica é um método diagnóstico capaz de apontar alterações metabólicas ou fisiológicas, ajudando nos diagnósticos clínicos, sendo um exame não invasivo e que permite visualizar alterações térmicas da superfície cutânea (SBF, 2019). Diversas disfunções e estados patológicos causam alterações de calor em partes do corpo humano, tendo como consequência a irradiação desse calor para a região cutânea, permitindo que ocorra a avaliação das estruturas internas do corpo utilizando aparelhos de imagens específicos para captação e conversão em imagens da radiação infravermelha emitida pelo corpo (GHELMAN, 2019).

Existem três mecanismos para a transferência de calor, sendo eles a condução, convecção e radiação. A **condução** consiste na transferência de calor entre substâncias que estão em contato físico direto. Em nível atômico, a condução ocorre através da colisão entre átomos e moléculas vizinhas, devido a sua maior energia cinética, realizando colisões e ocasionando a transferência de energia entre eles. No interior do metal, alguns elétrons possuem a liberdade de vagar pela rede cristalina da substância de forma livre, podendo transferir energia graças a essa facilidade de deslocamento. Nesse mecanismo, o calor flui de regiões com maior quantidade de energia para regiões com menor quantidade de energia, tendo os metais como bons condutores de calor. A transferência de energia só é possível entre regiões com temperaturas diferentes (FREEDMAN; YOUNG, 2008). A **convecção** somente ocorre entre líquidos e gases e consiste na transferência de calor pela movimentação de massa de uma região do fluido para outra. O aquecimento de água nas residências, fluxo de sangue pelo corpo e sistema de refrigeração do motor de um automóvel são exemplos de como a convecção ocorre em nosso cotidiano. Por ser um processo muito complexo, não existe uma equação para descrevê-la, mas há algumas informações obtidas através de dados experimentais, como o fato de que a taxa de transferência por convecção é diretamente proporcional a área de superfície e a viscosidade do fluido retarda o movimento de convecção natural nas vizinhanças de superfícies estacionárias (FREEDMAN; YOUNG, 2008). A convecção ocorre devido a diferença na densidade do ar. O ar é aquecido nas partes mais baixas da atmosfera através de condução e **radiação**. Esse ar quente perde calor para o ar sobrejacente ao primeiro, fazendo com que se torne menos denso que o ar frio, fazendo-o subir e consequentemente o ar frio descer. O ar frio é então aquecido fazendo com que o processo se repita.

### 2.1.2 Radiação térmica

A radiação térmica consiste na transferência de calor sob a forma de onda eletromagnética em função da temperatura, onde não necessita de meio material para se propagar, ou seja, se propagam no vácuo. Qualquer corpo acima do zero absoluto é capaz de emitir energia sob a forma de radiação eletromagnética. Um corpo, com uma temperatura em torno de 20°C, emite radiação infravermelha, cujo comprimento de onda é maior do que a luz visível. Com o aumento da temperatura, o comprimento de onda diminui. O aumento da temperatura fará com que o corpo se aproxime cada vez mais da luz visível, fazendo com que o mesmo consiga emitir radiação no espectro de luz visível. A taxa de radiação

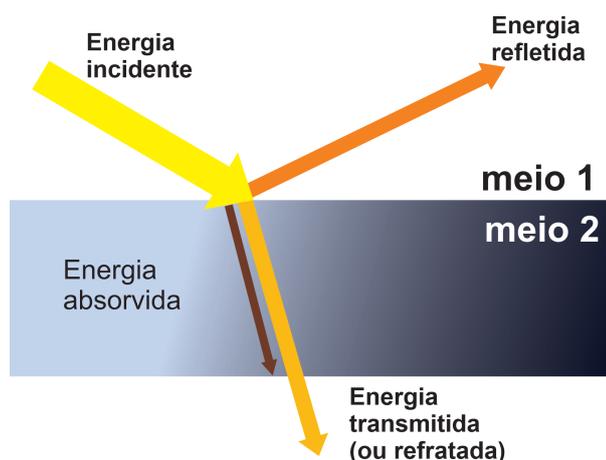


Figura 2.2: Interação entre a radiação térmica e um corpo. Um corpo ao receber energia, a depender da natureza do corpo, é capaz de absorver e refletir. A reflexão de energia por um corpo é um fator a ser considerado devido a sua capacidade de transmitir calor.

emitida pelo corpo é proporcional a sua área, a temperatura envolvida e a natureza do corpo, ou seja, o tipo de material no qual ele é formado (FREEDMAN; YOUNG, 2008).

O processo de transferência de calor para esse tipo de mecanismo reside no conceito de radiação térmica, onde na ausência de meio, a transferência de calor se dará por radiação entre duas superfícies que se encontram com temperaturas diferentes. Um exemplo do conceito de radiação térmica é o calor sentido pela aproximação da mão diante de uma lâmpada incandescente, onde o resultado da emissão de radiação infravermelha do filamento é percebido pelo calor absorvido pela mão (DONOSO, 2009). Esse será o principal mecanismo de transferência de calor a ser estudado nesse trabalho.

A resposta entre a radiação térmica e um corpo está em sua capacidade de refletir, absorver ou transmitir essa radiação, conforme ilustrado na Fig. 2.2. A radiação incidente sobre um corpo pode ser absorvida, momento no qual o calor é absorvido pelo corpo; refletido, quando a radiação incidente é redirecionada pelo corpo para o ambiente; e transmitido, quando a radiação térmica atravessa o corpo devido a propriedades específicas do mesmo. As propriedades radiativas dependem do comprimento de onda da radiação incidente e apresentam comportamentos diferenciados entre materiais sólidos, líquidos ou gasosos. Nos corpos gasosos a sua composição, pressão e temperatura interferem em suas propriedades. Nos sólidos e líquidos, a radiação térmica é absorvida em intensidades distintas para cada comprimento de onda (NOVO et al., 2014).

### 2.1.3 Corpo negro

A compreensão do conceito de um corpo negro é um importante passo para o entendimento de como a radiação térmica se comporta. Entre 1859-1860, os físicos buscavam descrever matematicamente como um corpo aquecido irradiava energia. Na tentativa de abordar o problema, Gustav Robert Kirchhoff desenvolve um modelo teórico simplificado: o corpo negro. O corpo negro seria um objeto capaz de absorver toda a radiação incidente

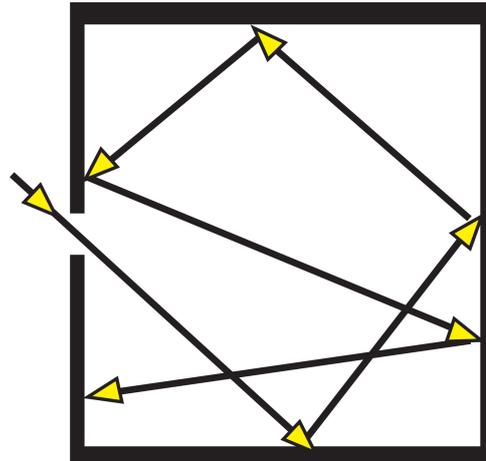


Figura 2.3: Modelo experimental do corpo negro. Essa é a representação de um modelo de corpo negro, onde é possível verificar o pequeno orifício de entrada, responsável pela passagem da radiação pelo interior do corpo e a forma como a radiação percorre todo o corpo negro em seu interior.

sobre ele, sem refletir nada dessa radiação. O corpo negro dependia apenas da temperatura, sem ter relação alguma com o material, estado da superfície ou qualquer outro parâmetro (HALLIDAY; RESNICK, 2016), (MULLER; SARAIVA; SARAIVA, 2015). Como o corpo negro apresenta fácil realização prática, sua experimentação tornou-se essencial para o estudo de radiações térmicas. Através de um arranjo experimental, onde se criava um corpo negro como um objeto oco em seu interior que possibilitava a reflexão de qualquer radiação, possuindo um pequeno orifício de entrada que permitiria que a radiação entrasse, mas não saísse, permanecendo assim em seu interior, conforme ilustrado na Fig. 2.3. Esse pequeno orifício é utilizado para obter uma amostra da radiação térmica armazenada no objeto. Esse furo é suficientemente pequeno para que uma pequena fração da radiação térmica escape sem comprometer a estabilidade térmica do objeto (HALLIDAY; RESNICK, 2016). O entendimento do corpo negro irá auxiliar na compreensão da emissividade em relação a capacidade de um corpo em transferir calor para o meio.

#### 2.1.4 Lei de Planck

A teoria clássica da radiação se iguala às observações experimentais apenas em grandes comprimentos de ondas, sendo muito diferentes para pequenos comprimentos de onda. A curva teórica proposta pela física clássica aumenta, tendendo ao infinito conforme a redução do comprimento de onda, que para os físicos do século XVIII eram uma falha inexplicável da teoria. Na época, se postulava que o equilíbrio térmico da radiação no interior do corpo negro ocorria através da troca de energia entre a radiação e os átomos das paredes a uma dada temperatura. O modelo clássico afirmava que a troca térmica da radiação, em uma dada frequência, com o sistema de átomos, oscilava na mesma frequência da radiação (NESSENZVEIG, 1998).

Em 1900, Max Planck apresentou na reunião da sociedade alemã de física uma pro-

posta que satisfazia a relação de radiação espectral em relação ao comprimento de onda em toda sua extensão, correspondendo ao experimento da radiação do corpo negro. Na física clássica, pensava-se que a troca de energia entre a radiação e os átomos da parede do corpo negro se dava de forma contínua. Planck postulou que a troca seria quantizada, ou seja, fracionada em pequenos pacotes de energia chamados de “quantum”. Cada pacote de energia  $E$ , expressado na equação 2.1, é proporcional a sua frequência (MULLER; SARAIVA; SARAIVA, 2015), na forma

$$E = h \cdot \nu, \quad (2.1)$$

onde  $E$  = quantum de energia,  $h$  = constante de Planck, valendo  $6,626 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s} = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , e  $\nu$  = frequência do comprimento de onda.

A quantização de energia,  $E$ , permitiu a Planck deduzir a intensidade de um campo de radiação. Planck encontrou uma expressão da intensidade da radiação espectral da radiação,  $S$ , que reproduzisse com fidelidade os resultados experimentais do corpo negro, dada por

$$S(\lambda) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\frac{hc}{e^{\lambda k T}} - 1}, \quad (2.2)$$

onde  $S$  = intensidade da radiação espectral,  $c$  = velocidade da luz,  $h$  = constante de Planck,  $k$  = constante de Boltzman, que é  $1,38 \cdot 10^{-16} \text{ ergs/K}$ ,  $\lambda$  = comprimento de onda e  $T$  = temperatura do corpo.

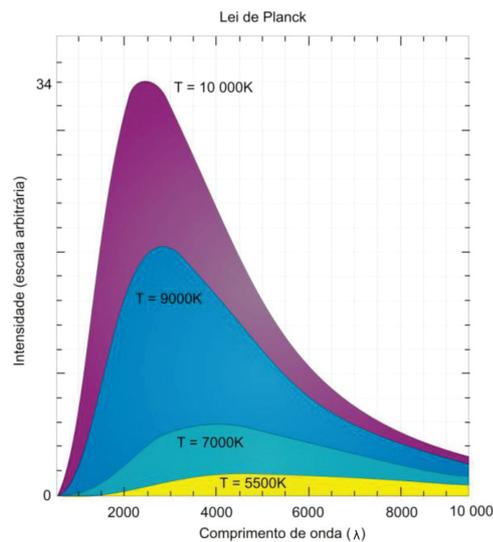


Figura 2.4: Curvas da lei de Planck para corpos com diferentes temperaturas. Fonte: (MULLER; SARAIVA; SARAIVA, 2015).

Qualquer corpo em equilíbrio termodinâmico emitirá “quantum” com uma distribuição de onda dada por  $S(\lambda)$ , idealizada por Planck. Essa radiação é chamada de radiação térmica, pois depende unicamente da temperatura do corpo (MULLER; SARAIVA; SARAIVA, 2015). Quando  $S$  é calculada para diversas temperaturas, que variam entre a temperatura ambiente até a temperatura solar, mostra-se que a excitação espectral assume seus valores máximos em comprimentos de onda de  $1\mu m$  a  $20\mu m$ , faixa contida no espectro de infravermelho (INCROPERA; DEWITT, 1999).

As câmeras térmicas disponíveis no mercado operam nessa faixa de comprimento de onda, no espectro do infravermelho (VOLLMER; MÖLLMANN, 2010). A curva da lei de Planck, representada na Fig. 2.4, para corpos com diferentes temperaturas mostra que a intensidade em irradiar energia, em todos os comprimentos de onda, aumenta fortemente com o aumento da temperatura. Esse é um importante conceito a ser observado na termografia, visto que o aumento da temperatura é uma condição significativa para melhor percepção da radiação pelas câmeras térmicas devido ao aumento da radiação emitida pelo objeto analisado.

### 2.1.5 Emissividade

A emissividade ( $\epsilon$ ) é calculada pela razão entre a energia irradiada pela superfície de um corpo real e a energia irradiada por um corpo negro, possuindo as mesmas áreas, sob a mesma condição de temperatura, e é representada por

$$\epsilon = \frac{\text{energia irradiada por um corpo real}}{\text{energia irradiada por um corpo negro}}. \quad (2.3)$$

A emissividade trata da capacidade de uma superfície real de irradiar energia em relação ao um padrão, que nesse caso é o corpo negro. O corpo negro não só absorve toda a energia eletromagnética que incide sobre ele, mas irradia a maior quantidade de energia possível. Sob o ponto de vista prático, os corpos reais não se comportam como os corpos negros, sendo capazes de emitir e refletir a radiação que incide sobre esses materiais (OLIVEIRA, 2010).

Por definição, a emissividade do corpo negro equivale a 1, para todos os comprimentos de onda, e a emissividade da superfície de um corpo real varia entre 0 e 1. O sensor MLX90621, em sua configuração de fábrica, possui o parâmetro emissividade do sensor igual a 1. O sensor, nesse caso, busca se comportar como um absorvedor ideal de radiação infravermelha. A emissividade de um corpo real depende de alguns fatores como temperatura do corpo, comprimento de onda da energia emitida, ângulo de emissão e tratamento dado a superfície do corpo real (PERIN, 2009). Por exemplo, o alumínio polido tem uma emissividade que pode variar entre 0,04 e 0,06, enquanto que o mesmo alumínio com uma superfície anodizada tem uma emissividade de 0,55 (CONTEMP, 2020). A pele humana é um excelente emissor e absorvedor de energia infravermelha, independentemente de sua cor. A sua eficiência varia entre 94% a 99%, podendo possuir uma emissividade de 0,978 (SOBRATERM, 2016). A Tabela 2.1 sumariza alguns exemplos de materiais e seus índices de emissividade.

Material	Emissividade( $\epsilon$ )
Vegetação, solo, água, pele	0,92-0,96
Asfalto	0,85-0,93
Aço inox polido	0,17
Ouro, prata e cobre polido	0,018-0,035

Tabela 2.1: Emissividade de alguns materiais.

### 2.1.6 Lei de Stefan-Boltzman

A lei de Stefan-Boltzman está relacionada ao poder emissivo, que é a capacidade de um corpo emitir energia radiante por unidade de superfície. A lei toma como base a característica do corpo negro. O poder emissivo,  $F$ , de um corpo é dado por

$$F = \sigma T^4, \quad (2.4)$$

onde  $\sigma = 5,67 \times 10^{-5} \text{ ergs} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^4 \cdot \text{S}^{-1}$ , conhecida como constante de Stefan-Boltzman e  $T$  = temperatura absoluta.

A energia transferida,  $F$ , mostra que o fluxo de energia radiante do corpo negro é proporcional a quarta potência da temperatura. A partir disso, é possível se obter

$$E_t = \epsilon \cdot \sigma (T_c^4 - T_a^4), \quad (2.5)$$

onde  $E_t$  = Energia transferida,  $\epsilon$  = emissividade,  $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman,  $T_c$  = temperatura absoluta do corpo ou objeto (K) e  $T_a$  = temperatura absoluta do ambiente (K).

$E_t$  mostra que a energia radiante, emitida por um corpo para o ambiente, depende da emissividade do material e da diferença de temperatura entre o objeto e o ambiente. Grandes variações de temperatura entre o objeto e o ambiente produzirão uma grande quantidade de energia transmitida, sendo essa uma característica de grande importância para a produção de imagens térmicas utilizando sensores. O sensor MLX 90621, por exemplo, utilizado nesse projeto, possui internamente um termômetro capaz de medir a temperatura ambiente. Essa característica permite que o sensor tenha os recursos para realização dos cálculos necessários respeitando princípios físicos importantes.

### 2.1.7 Tecnologias

As tecnologias que capturam radiações térmicas do ambiente ou objetos são divididas em detectores térmicos e detectores quânticos ou de fótons (PEDROSA; ATHAYDE, 2012). Nesse trabalho, serão considerados apenas os detectores térmicos, visto que são as tecnologias comumente utilizadas em dispositivos de termografia. Os detectores convertem radiação infravermelha em sinais que podem ser mensurados, como tensão, corrente ou resistência (SPECTRUM, 1998). O aspecto construtivo básico de um sensor térmico está voltado para o seu detector de radiação infravermelha. O funcionamento do sensor,

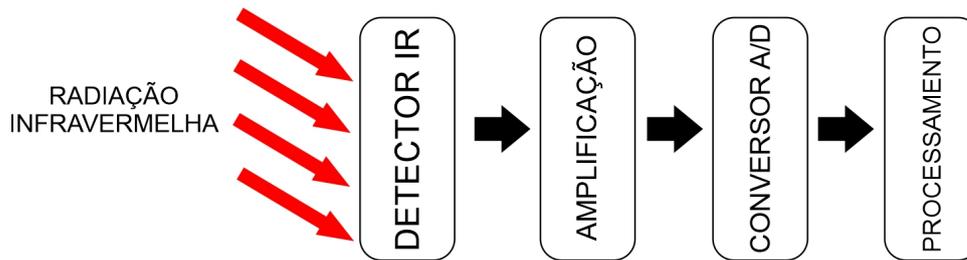


Figura 2.5: Etapas de funcionamento do sensor. Esse organograma ilustra de forma genérica como um sensor térmico se comporta ao receber a radiação infravermelha pelo sensor até sua transformação em dados a serem utilizados por um sistema qualquer.

mostrado na fig. 2.5, compreende as etapas de captação do sinal, amplificação, conversão e processamento (MEASUREMENTS, 2019). O detector de radiação infravermelha percebe essa radiação e converte em sinal analógico. Esse sinal possui uma grandeza inferior a percepção de um circuito eletrônico, sendo necessário realizar sua amplificação. Após a amplificação, o sinal analógico é convertido em sinal digital para posteriormente ser processado.

Os detectores térmicos absorvem radiação infravermelha provocando o aquecimento do elemento sensor do detector e conseqüentemente produzindo alguma alteração no material em função da temperatura, possibilitando a mensuração dessa grandeza (PEDROSA; ATHAYDE, 2012). A temperatura, nos detectores, pode ser medida da seguinte forma:

- Medida direta da temperatura (calorimetria);
- Mudança na resistência elétrica do material;
- Sinal de corrente ou tensão termoelétrica;
- Alteração de carga ou capacitância do dispositivo.

Os detectores térmicos podem ser divididos em termopilha, bolômetro e piroelétrico. Antes de conceituar termopilhas, é necessário ter a compreensão de seu elemento básico: o termopar. O termopar é a junção de dois condutores com coeficientes termoelétricos diferentes, ligados entre si, que ao serem aquecidos produzem uma diferença de potencial elétrico em função da temperatura. A termopilha, ilustrada na Fig. 2.6, nada mais é do que um conjunto de termopares em série, soldados em tiras e pintados de preto, para aumentar a absorção (INFRATEMP, 2010). A termopilha é composta de duas junções: a junção fria e a junção quente. A junção fria é mantida a temperatura ambiente, enquanto que a junção quente é exposta a radiação incidente. A diferença de temperatura entre a junção fria e quente produz uma diferença de potencial elétrico, sendo essa saída proporcional à radiação incidente. A conexão de vários termopares possibilita uma tensão maior na saída. Esse tipo de detector permite leitura de temperaturas a distância a um baixo custo, não sendo necessário resfriamento (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011).

O detector bolômetro (ver Fig. 2.7) é um termistor, ou seja, é uma resistência elétrica que varia de acordo com a temperatura. Ele pode ser construído tanto com metais

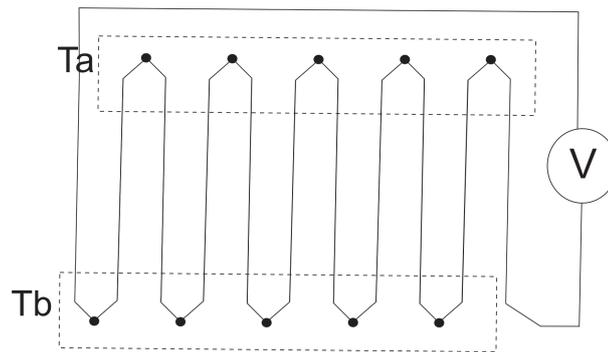


Figura 2.6: Estrutura de uma termopilha. A região Ta representa a junção fria, mantida em temperatura ambiente, enquanto que a região Tb representa a junção quente, exposta a radiação infravermelha.

quanto semicondutores (PEDROSA; ATHAYDE, 2012). A radiação incidente modifica a resistividade elétrica da resistência, ocasionando uma diferença de potencial elétrico entre a tensão de referência ( $V_b$ ) e a tensão de saída  $V_s$ . A variação dessa voltagem está diretamente relacionada com a mudança de temperatura.

O detector piroelétrico (ver Fig. 2.8) é constituído de cristais dielétricos que possuem naturalmente uma diferença de potencial elétrico. Esse detector é construído utilizando metais que se encontram posicionados na forma de um capacitor com esses cristais dielétricos no centro. Na presença de radiação incidente, ocorre a produção de uma corrente ou diferença de potencial elétrico que pode ser medido por um circuito externo (PEDROSA; ATHAYDE, 2012).

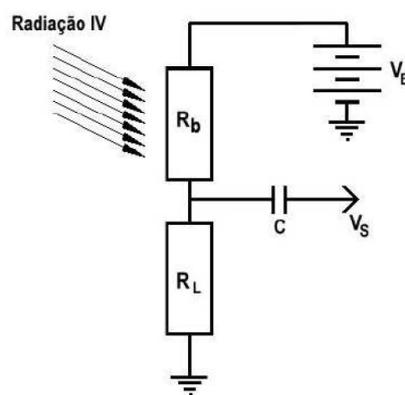


Figura 2.7: Estrutura de um bolômetro. A radiação incidente no resistor  $R_b$  fará variar sua resistência. A região do resistor  $R - L$  será responsável pela leitura da variação de tensão no ponto  $V_s$  do circuito. A variação do resistor  $R_b$  produzirá variação na tensão  $V_s$ . Fonte: (PEDROSA; ATHAYDE, 2012).

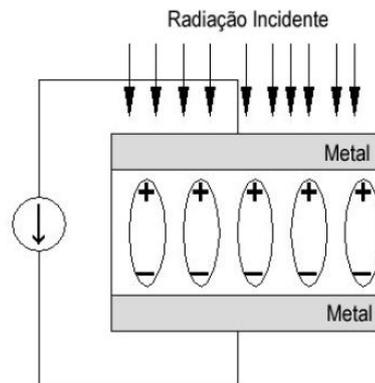


Figura 2.8: Estrutura de um detector piroelétrico. A incidência da radiação infravermelha faz com que ocorra a variação de carga entre esses metais, conseqüentemente variando sua carga elétrica. Essa variação elétrica é responsável pela percepção da radiação pelo detector. Fonte: (PEDROSA; ATHAYDE, 2012).

## 2.2 APLICAÇÕES DE TERMOGRAFIA

### 2.2.1 Medicina

A termografia tem desempenhado grande papel na medicina ocupacional, através de estudos que envolvem as lesões por esforço repetitivo (LER) ou distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho (DORT) (PORTICH, 2003). GARCIA (2004) apresentou uma assertividade de 90,9 % em exames de punhos. Magas et al. (2012), nos casos de tendinite de punho, apresentaram uma sensibilidade e especificidade de 71 % e 82 %, respectivamente. No diagnóstico de distrofia reflexa simpática, GARCIA (2004) apresentou 90% de exatidão utilizando a termografia. Além do campo da medicina ocupacional, estudos tem sido desenvolvidos buscando adotar a tecnologia térmica no diagnóstico de enfermidades, como os casos de LER no joelho e tendinopatia patelar (HILDEBRANDT; RASCHNER; AMMER, 2010), regeneração óssea pós-fratura (MORASIEWICZ et al., 2008), avaliação da disfunção da articulação temporomandibular (NAHM et al., 2007); avaliação de deformidade dentofacial classe III (LEE et al., 2007), câncer na tireoide (GAVRILOAIA et al., 2011), controle da evolução e resposta ao tratamento de xenoinxertos tumorais (SONG et al., 2007), diagnóstico de varicocele (KULIS et al., 2011), avaliação de lesões hemorrágicas traumáticas (COOKE et al., 2011) e avaliação dinâmica da função microvascular das mãos (PAULING et al., 2011). Lim et al. (2014) utilizou a termografia como ferramenta de exame complementar no diagnóstico de síndrome de Raynaud. Huygen et al. (2004) usou a termografia para detectar, em estágios precoces, a síndrome da dor regional complexa tipo 1. Frize et al. (2011) e Frize et al. (2009) detectaram a presença de artrite reumatoide em humanos e Brioschi, Abramavicus e Correa (2005), Brioschi, Yeng e Pastor (2007), nessa mesma enfermidade, alcançaram uma acurácia maior do que 90 % . Os estudos com termografia na área médica provou ser capaz de detectar neuropatias, ajudando na prevenção de deformidades e deficiências causadas pela hanseníase (CAVALHEIRO et al., 2016), mostrando-se eficaz no diagnóstico de artrite psoriásica,

onde Ismail et al. (2014) obtiveram 100 % de eficácia e Živcák, Madarász e Hudák (2011) apresentaram 71,4 % de eficácia no diagnóstico para síndrome do túnel do carpo. Esses mesmos estudos têm mostrado a termografia como um método útil para avaliação de fistulas arteriovenosas em pacientes renais (ALLEN et al., 2006), disfunção simpática da pele nas doenças de Parkinson (ANTONIO-RUBIO et al., 2015), urticária de contato (MEYER et al., 2013), osteoartropatia hipertrófica primária (JAJIC; JAJIC; NEMČÍČ, 2001), síndrome dolorosa miofascial (KRUSE; CHRISTIANSEN, 1992), doenças ligadas a danos nos nervos (RUIJS et al., 2009), má formação arteriovenosa (HARDWICKE; TITLEY, 2016) e distrofia simpática reflexiva (HASSAN et al., 2003).

### 2.2.2 Sistemas elétricos e eletrônicos

A termografia também tem sido utilizada no estudo do comportamento térmico de componentes, circuitos eletrônicos e sistemas elétricos, assim como outros dispositivos elétricos em geral. A diminuição da performance de um componente pode ser ocasionada pelo aumento de temperatura, seja por um sistema deficiente na dissipação de calor ou pelo aumento de parâmetros como a corrente elétrica (GUAN et al., 2016). Em dispositivos eletrônicos de potência, o próprio aquecimento do dispositivo pode afetar seu desempenho elétrica e confiabilidade.

A interação de parâmetros elétricos e térmicos podem gerar comportamentos complexos e inesperados (D'AMORE; MAFFEZZONI, 2000). Os dispositivos de potência são construídos a partir de uma combinação de materiais que possuem coeficientes de dilatação térmica diferentes. Aumento de temperatura nesses dispositivos podem produzir estresse térmico em diversas regiões do dispositivo, resultando em falhas (D'AMORE; MAFFEZZONI, 2000). A análise térmica de circuitos eletrônicos tem sua importância no intuito de verificar a confiabilidade dos componentes do circuito eletrônico (AL; YAZDANI; MOHAMMADI, 2017). A termografia tem desempenhado um importante papel na análise térmica de dispositivos, como a baterias de íon lítium, responsáveis pela explosão de *smartphones* (KIM; JEONG; BANG, 2018), medição da distribuição da temperatura em dispositivos (WATANABE; MASUDA; OMURA, 2019), estudo de gerenciamento térmico em dispositivos eletrônicos com o intuito de preservar a segurança daqueles que o utilizam (KIM; JEONG; BANG, 2018), estudo de perdas e rendimentos em motores elétricos (YAMACHITA, 2013), análise de defeitos em instalações elétricas (SCHUÍNA; MUNIZ; BRUNORO, 2015), detecção de anomalias térmicas em sistemas elétricos de potência (AMARANTE; PONTES; MICHALOSKI, 2016), estudo dos critérios de diagnóstico em instalações elétricas defeituosas (ASSUNÇÃO et al., 2015), avaliação do desempenho em placas fotovoltaicas (FERREIRA, 2018), apresentar diagnóstico de elementos eletrônicos utilizando termogramas (DOMBEK, 2020), desenvolvimento de experimentos para alunos de escolas e universidades envolvendo visualização térmica dos processos térmicos em circuitos elétricos (KACOVSKY, 2019) e ensino de circuitos de corrente contínua utilizando imagens térmicas (WONG; SUBRAMANIAM, 2018). A termografia também pode vir a ser aplicada como uma ferramenta auxiliar para validar modelos teóricos termoelétricos e simulações em componentes eletrônicos (D'AMORE; MAFFEZZONI, 2000; AL; YAZDANI; MOHAMMADI, 2017).

### 2.2.3 Medicina veterinária e vida selvagem

A termografia tem sido utilizada na medicina veterinária como ferramenta diagnóstica na detecção e acompanhamento de patologias e alterações fisiológicas relacionadas aos animais e a produção animal, além de estudos voltados a vida selvagem e florestas. A termografia, na medicina veterinária, foi usada para detectar estresse térmico em bovino (DALTRO, 2014), avaliar a adaptação de caprinos leiteiros no semiárido brasileiro (SILVA et al., 2014), estresse térmico em vacas holandesas em lactação (LODI; TAVARES; SCHIASSI L.AND ARAUJO, 2014), detectar e monitorar lesões acometidas em cavalos de corrida (TURNER; EDDY, 2001), ferramenta auxiliar no diagnóstico de mastite em ovinos (NOGUEIRA et al., 2013), detecção de artrite e ruptura de ligamento cruzado em cães, onde Loughin e Marino (2007) apresentou mais de 85% de sensibilidade. A termografia também atuou nos diagnósticos de inflamação em cascos de ovinos (LEHUGEUR, 2014), estimativa do conforto térmico de frangos de corte (NASCIMENTO et al., 2014), determinação da qualidade da silagem de milho após o processo fermentativo para alimentação dos animais (MIOTELLO et al., 2009), detecção e estudo de pequenas espécies de animais ocultos em seus habitats naturais (KARP, 2020), estudo de populações de veados através de drones equipados com tecnologia térmica (BEAVER et al., 2020) e avaliação de micro climas em sistemas agroflorestais (JUNIOR et al., 2020).

### 2.2.4 Inspeção, estruturas e refrigeração

A termografia infravermelha é uma tecnologia que não necessita de contato direto com o objeto analisado, sendo assim representa um ensaio não destrutivo, capaz de analisar grandes e pequenas áreas, preciso e reprodutível. Essas características permitem que sejam feitas inspeções não destrutivas em obras civis, podendo ser utilizada como um instrumento de engenharia preventiva, detectando defeitos que ainda não se mostraram aparentes. Os estudos térmicos no setor de construção tem sido uma outra aplicabilidade da termografia, visto que a compreensão dos fenômenos térmicos ligados as estruturas podem gerar repostas para as anomalias encontradas nas mesmas. Na área de refrigeração, a termografia tem desempenhado um importante papel ao realizar análises térmicas em equipamentos de refrigeração, avaliação do desempenho energético e parâmetros ambientais ligados a essa área. A termografia é utilizada na Inspeção em fachadas de edifícios buscando avalia-las qualitativamente (SANTOS, 2014), detecção de infiltrações em áreas internas de edifícios, buscando áreas de umidade que apresentem manifestações patológicas ligadas a esse problema (ROCHA et al., 2018), estudo de eficiência térmica nos edifícios (DINIS, 2009), inspeção e manutenção de edifícios (MENDONÇA; AMARAL; CATARINO, 2013), detecção de anomalias associadas a impermeabilização de coberturas planas (MELRINHO; MATIAS; FARIA, 2015), avaliação do desempenho de cortinas de ar (NETO; SILVA, 2003) e avaliação de instalações de refrigeração através das análises de câmaras frigoríficas e salas climatizadas (GARCIA; FONTES, 2007).

## TRABALHOS RELACIONADOS

### Conteúdo

---

3.1	Concepção de sensores semicondutores termográficos . . . . .	19
3.2	Sistemas que utilizam equipamentos termográficos . . . . .	21
3.3	Desenvolvimento de equipamentos termográficos a partir de sensores térmicos	22
3.4	Relação com o trabalho proposto . . . . .	24

---

A grande diversidade de aplicações envolvendo a termografia e seu elevado custo tem ocasionado o surgimento de pesquisas voltadas a produzir sistemas de produção de imagens térmicas de baixo custo, aplicando diversos componentes tecnológicos para sua fabricação (HARIPRIYA; SUNITHA; MAHIMA, 2020; MINAR; RIHA, 2012; SAFRIN et al., 2020). As tecnologias utilizadas para a criação de dispositivos térmicos têm caminhado em três direções: desenvolvimento de dispositivos semicondutores termográficos, integração de sistemas com câmeras comerciais de baixo custo e produção de sistemas com sensores térmicos sem contato. Nesse capítulo, abordaremos cada vertente tecnológica e relacionaremos com o dispositivo desenvolvido nesse trabalho.

### 3.1 CONCEPÇÃO DE SENSORES SEMICONDUTORES TERMOGRÁFICOS

Há três tecnologias envolvendo o encapsulamento de estruturas semicondutoras para a produção de detectores térmicos de baixo custo. Elas são InSb FPA (KUMAR; NEGI, 2004), microbolômetros utilizando diversos materiais (SCHIMERT et al., 2001), (MANSI et al., 2003), (WU et al., 2005), (GEOFFRAY; GUERIN, 2001) e semicondutor termoe-létrico (SCHAUFELBUHL et al., 2002). Os sistemas envolvendo o **InSb FPA** são tecnologias que fornecem soluções de baixo custo envolvendo sistemas térmicos de imagem, tornando-se os melhores candidatos para produção de dispositivos portáteis e possuindo melhores desempenhos em ambientes marinhos. Esse sistema tem a pretensão de ter uma distância de leitura de até 2 Km, pesando em torno de 3 quilos (KUMAR; NEGI, 2004). As tecnologias utilizando o **microbolômetro** como detector de infravermelho podem ser

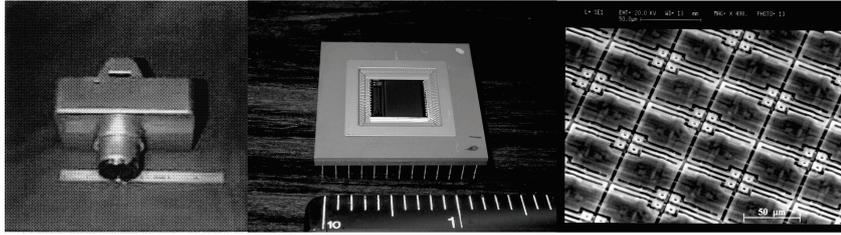


Figura 3.1: Exemplos de semicondutores termográficos. A figura da esquerda apresenta Câmera MIRC desenvolvida com microbolômetro a-Si, a figura central ilustra encapsulamento de um bolômetro em chip e a figura da direita mostra uma visão micrométrica de um conjunto de microbolômetros desenvolvido para um projeto. Fontes: (SCHIMERT et al., 2001), (MANSI et al., 2003), (GEOFFRAY; GUERIN, 2001), respectivamente da esquerda para a direita.

feitos de silício amorfo (SCHIMERT et al., 2001), (GEOFFRAY; GUERIN, 2001), óxido de titânio (MANSI et al., 2003) ou material piroelétrico (WU et al., 2005). O **detector termoeletrônico** é construído a partir de um material semiconductor-metal-óxido, onde cada pixel possui um sistema aquecedor integrado que permite a calibração e teste do próprio detector, podendo ser aplicado em detecções de presença e controle de construções (SCHAUFELBUHL et al., 2002). Todas essas tecnologias se propõem a ser de baixo custo, e exemplos são ilustrados na Fig. 3.1.

Tabela 3.1: Tecnologias de sensores semicondutores termográficos.

Trabalho	Característica	Precisão
(KUMAR; NEGI, 2004)	Resolução = $640 \times 480$ , Comprimento de onda = $3-5\mu m$ , $FOV = 3.7^\circ \times 2.7^\circ / 7.4^\circ \times 5.4^\circ$ , Eletrônica = FPGA	não informada
(SCHIMERT et al., 2001)	Resolução = $120 \times 160$ , Comprimento de onda = $8-12\mu m$ , $FOV = 36^\circ \times 50^\circ$ , Eletrônica = DSP	não informada
(MANSI et al., 2003)	Resolução = $128 \times 96$ , comprimento de onda = $9-11\mu m$	não informada
(WU et al., 2005)	Resolução = $160 \times 120$ , comprimento de onda = $8-15\mu m$ ,	não informada
(GEOFFRAY; GUERIN, 2001)	Resolução = $320 \times 240$ , Comprimento de onda = $8-12\mu m$ , $FOV = 7.2^\circ$ , massa = até 4 kg	não informada
(SCHAUFELBUHL et al., 2002)	Resolução = $10 \times 10$ , Comprimento de onda = $2-20\mu m$ , temperatura de medição = $12^\circ C$ a $82^\circ C$	não informada

A produção e desenvolvimento dessa tecnologia se torna viável graças a convênios entre instituições dominantes no desenvolvimento e confecção dessa tecnologia (MANSI et al., 2003), (SCHAUFELBUHL et al., 2002), organizações governamentais que tem interesse na tecnologia (GEOFFRAY; GUERIN, 2001) e programas de desenvolvimento tecnológico ligados a governos como a DARPA (SCHIMERT et al., 2001). A Tabela 3.1 apresenta os estudos referentes a semicondutores termográficos com suas características.

### 3.2 SISTEMAS QUE UTILIZAM EQUIPAMENTOS TERMOGRÁFICOS

A segunda vertente voltada a construção de sistemas térmicos de baixo custo (ver Fig. 3.2) está relacionada a utilização de tecnologias comerciais para produção de protótipos que tenham a finalidade de gerar imagens térmicas (ver Tabela 3.2). As companhias FLIR, Tamarisk, e Optris possuem câmeras térmicas para aplicações de baixo custo. O modelo de câmera térmica FLIR Lepton tem sido utilizada em manutenção preditiva industrial (XHABA, 2017), comportamentos de sistemas térmicos (MONTE et al., 2019) e detecção de falhas em painéis solares (PESTANA; MENDONÇA; MORGADO-DIAS, 2017). Existem outros produtos da FLIR, como o Tau2, que foi utilizado em um sistema de medição de temperatura sem fio (LEIZI; ZHAO; DAMING, 2015). O modelo FLIR Photon foi acoplada a um sistema de escaneamento a laser, sendo embarcado em veículo terrestre ou drone, para ser utilizado na produção de medição de florestas e caracterização de árvores em florestas urbanas (JAAKKOLA et al., 2010). A Tamarisk possui um módulo compacto, de baixo peso, com boa qualidade de imagem e baixo custo, voltado a um programa da DARPA para construção de dispositivos térmicos com custo de até 500 dólares, para produção de até 10.000 unidades por mês (LI et al., 2013). A Optris possui o modelo PI160, embarcado em uma unidade robótica móvel para inspeção de ambientes utilizando imagens térmicas (BORRMANN et al., 2014). Esses sistemas possuem unidades de transmissão de dados e processamento feitos por microcontroladores, FPGA e smartphone.

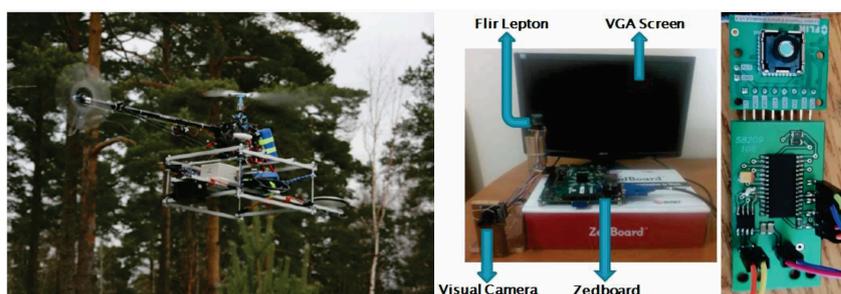


Figura 3.2: Exemplos de sistemas com equipamentos termográficos. A figura mais a esquerda apresenta um drone utilizando o Flir Photon embarcado. A figura central mostra um sistema de detecção de falhas em painéis solares e a figura mais à direita um protótipo de hardware utilizando a câmera Flir Lepton. Fontes: (JAAKKOLA et al., 2010), (PESTANA; MENDONÇA; MORGADO-DIAS, 2017), (MONTE et al., 2019), respectivamente da esquerda para a direita.

Tabela 3.2: Tecnologias envolvendo equipamentos termográficos.

Trabalho	Característica	Precisão
(XHAFÁ, 2017), (MONTE et al., 2019), (PESTANA; MEN- DONÇA; MORGADO- DIAS, 2017), (LIN; LU; LIN, 2019)	FLIR Lepton, Resolução = $160 \times 120$ , Temperatura = $-10^{\circ}\text{C}$ a $400^{\circ}\text{C}$ , FOV = $71^{\circ} \times 57^{\circ}$	$\pm 5^{\circ}\text{C}$
(LEIZI; ZHAO; DA- MING, 2015)	FLIR tau2, Resolução = $640 \times 512$ , Comprimento de onda = $7,5\text{-}13,5\mu\text{m}$ , Temperatura = $-25^{\circ}\text{C}$ a $550^{\circ}\text{C}$ , FOV = $90^{\circ} \times 69^{\circ}$	$\pm 5^{\circ}\text{C}$
(JAAKKOLA et al., 2010)	FLIR Photon 320, Resolução = $324 \times 256$ , Comprimento de onda = $7,5\text{-}13,5\mu\text{m}$ , Temperatura = $-25^{\circ}\text{C}$ a $550^{\circ}\text{C}$ , FOV = $50^{\circ} \times 38^{\circ}$	não informada.
(LI et al., 2013)	DRS Tamarisk 320, Resolução = $320 \times 240$ , Comprimento de onda = $8\text{-}14\mu\text{m}$ .	não informada.
(BORRMANN et al., 2014)	Optris pi160, Resolução = $160 \times 120$ , Comprimento de onda = $8\text{-}14\mu\text{m}$ , temperatura = $-20^{\circ}\text{C}$ a $250^{\circ}\text{C}$ .	$\pm 2\%$ ou $\pm 2^{\circ}\text{C}$ , o que for maior.

### 3.3 DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTOS TERMOGRÁFICOS A PARTIR DE SENSORES TÉRMICOS

A terceira direção que envolve a produção de dispositivos de baixo custo para utilização de imagens térmicas, está relacionada a aplicação de sensores infravermelho sem contato, que são elencadas na Tabela 3.3 e exemplificadas na Fig. 3.3. A empresa Melexis é a principal fabricante desses sensores, tendo os modelos MLX90614 (LJUBENOVIC; MILIC, 2018), MLX90620 (S. et al., 2015), (Kockara et al., 2014) e MLX90621 (CHIRILA; SZOLGA, 2019), (BROGGIO, 2017) como os principais sensores envolvidos em aplicações de baixo custo. Esses sensores sem contato são versáteis sob o ponto de vista de aplicações, podendo ser utilizados para produção de câmeras para inspeção de circuitos eletrônicos (CHIRILA; SZOLGA, 2019), (LJUBENOVIC; MILIC, 2018), sistema de imagem térmica para diagnóstico médico (S. et al., 2015), (Kockara et al., 2014), sistema de proteção de crianças no interior de veículos (BROGGIO, 2017), proteção da vida selvagem entre a vegetação devido ao processo de ceifa (LEV et al., 2017), entre outros. Esses sistemas possuem um custo relativamente inferior se comparado as outras linhas de pesquisa apresentadas até agora. Esses sistemas utilizam microcontroladores para sua

operação.

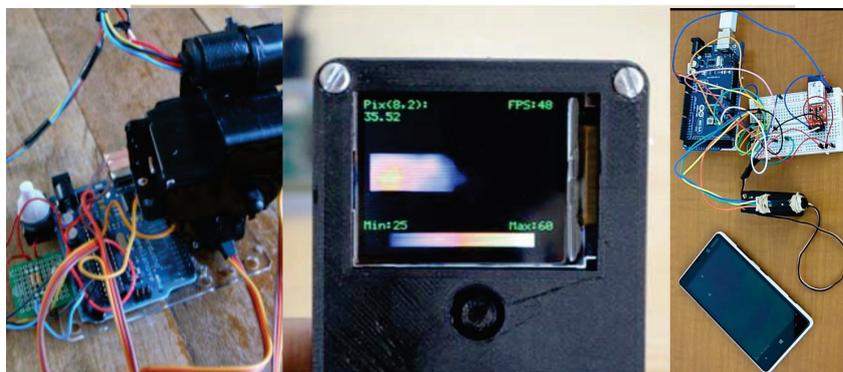


Figura 3.3: Exemplos de sistemas térmicos utilizando sensores. A figura da esquerda apresenta sistema utilizando o MLX 90614. A figura da direita mostra um sistema térmico portátil utilizando o MLX 90621. A figura 3 mostra o desenvolvimento de um protótipo que será utilizado em aplicações médicas. Fontes: (LJUBENOVIC; MILIC, 2018), (CHIRILA; SZOLGA, 2019), (Kockara et al., 2014), respectivamente da esquerda para a direita.

Tabela 3.3: Trabalhos que utilizam sensores térmicos.

Trabalho	Característica	Precisão
(LJUBENOVIC; MILIC, 2018)	Sensor MLX 90614, Resolução = $1 \times 1$ , medição pontual, Temperatura = $-70^{\circ}\text{C}$ a $380^{\circ}\text{C}$ (TO), FOV = $35^{\circ} / 10^{\circ} / 12^{\circ} / 5^{\circ} / 13^{\circ}$	$\pm (0,5^{\circ}\text{C a } 4^{\circ}\text{C})$
(S. et al., 2015), (Kockara et al., 2014)	Sensor MLX 90620, Resolução = $16 \times 4$ , Temperatura = $-50^{\circ}\text{C}$ a $300^{\circ}\text{C}$ (TO), FOV = $60^{\circ} / 40^{\circ}$ .	$\pm (1^{\circ}\text{C a } 5,5^{\circ}\text{C})$
(CHIRILA; SZOLGA, 2019), (BROGGIO, 2017), (LEV et al., 2017)	Sensor MLX 90621, Resolução = $16 \times 4$ , Temperatura = $-20^{\circ}\text{C}$ a $300^{\circ}\text{C}$ (TO), FOV = $120^{\circ}\times 25^{\circ} / 40^{\circ}\times 10^{\circ} / 60^{\circ}\times 16^{\circ}$	$\pm (1^{\circ}\text{C a } 5,5^{\circ}\text{C})$

### 3.4 RELAÇÃO COM O TRABALHO PROPOSTO

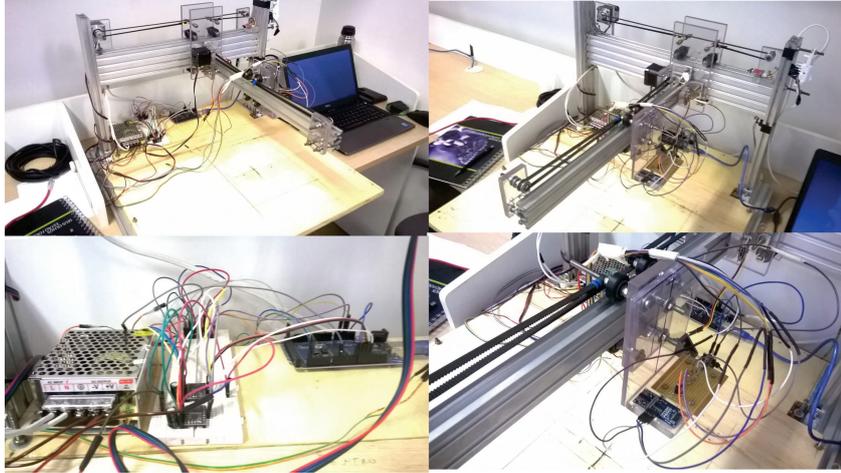


Figura 3.4: Sistema DMT. As imagens superior direita e esquerda mostram a estrutura do sistema DMT, onde é possível observar seus componentes, bem como sua integração com laptop, onde se encontra a *interface* de controle do sistema. Na imagem inferior esquerda, é possível observar a integração entre a unidade controladora, sistema elétrico e eletrônico do sistema. A imagem inferior direita apresenta o circuito ligado ao sensor térmico MLX 90621, elemento central para captura das informações térmicas dos objetos.

O desenvolvimento de um detector, baseado em semicondutores, para câmeras térmicas, exige alto custo, tempo e tecnologias disponíveis para sua fabricação. Os equipamentos comerciais possuem um custo relativamente alto se comparados aos sensores térmicos de baixo custo sem contato. Devido as limitações apresentadas, o sistema DMT foi desenvolvido tendo como fundamento a captura de informações térmicas a partir de sensores térmicos. O sistema DMT (ver Fig. 3.4), devido ao baixo custo como requisito de projeto, seguiu uma linha de projeto de um sistema construído a partir do sensor térmico sem contato MLX 90621. Tal sensor pode ser embarcado em circuitos eletrônicos sem custos adicionais, precisando apenas soldá-los, ao contrário da FLIR Lepton, FLIR tau2 e o FLIR Photon 320 que necessitam de componentes eletrônicos adicionais e componentes de software para serem manipulados. A aquisição desses últimos acessórios citados acabariam encarecendo o projeto como um todo. A Tamarisk e a Optris possuem valores superiores aos equipamentos térmicos comerciais apresentados, tornando-os dispensáveis para esse projeto. Os sensores térmicos de baixo custo possuem toda documentação necessária para serem manipulados a nível de hardware, onde o desenvolvedor consegue acessar a variável térmica sem a necessidade de kits de desenvolvimento, conseguindo dessa forma manipular as informações do dispositivo conforme a necessidade do seu projeto. O baixo custo, facilidade na montagem, ampla documentação e liberdade em seu desenvolvimento foram características determinantes para que os sensores térmicos de baixo custo fossem escolhidos para fazerem parte desse projeto. O DMT é capaz de produzir imagens térmicas de objetos que apresentem variações de temperatura, conforme exemplificado nas Fig. 3.5, Fig. 3.6, Fig.3.7 e Fig. 3.8.

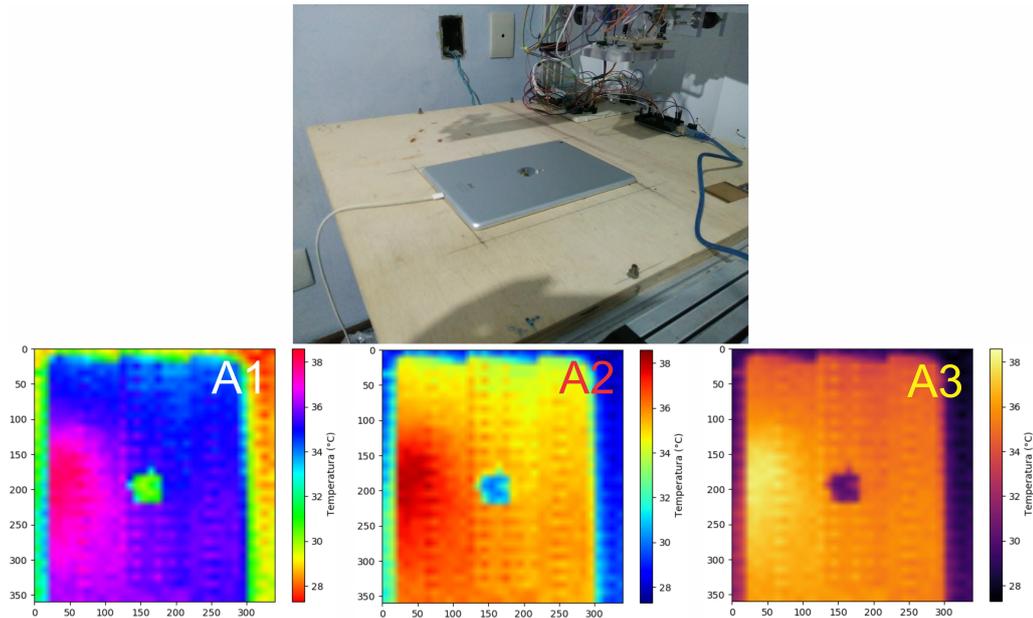


Figura 3.5: Leitura térmica de dispositivo móvel (*tablet*) utilizando o DMT. Essa leitura possui uma temperatura mínima de  $27.3^{\circ}\text{C}$ , temperatura máxima de  $38.6^{\circ}\text{C}$  e temperatura média de  $34.7^{\circ}\text{C}$ . A imagem A1 é apresentado no mapa de cores hsv, imagem A2 com mapa de cores inferno e imagem A3 com mapa de cores jet.

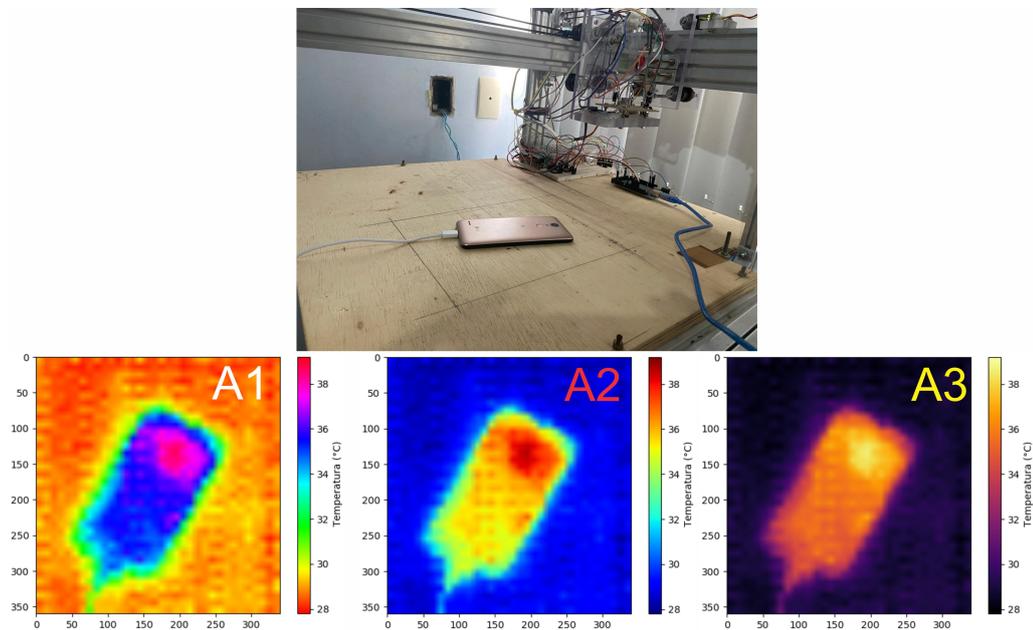


Figura 3.6: Leitura térmica de celular utilizando o DMT. Essa leitura possui uma temperatura mínima de  $27.8^{\circ}\text{C}$ , temperatura máxima de  $39.2^{\circ}\text{C}$  e temperatura média de  $31.1^{\circ}\text{C}$ . A imagem A1 é apresentado no mapa de cores hsv, imagem A2 com mapa de cores jet e imagem A3 com mapa de cores inferno.

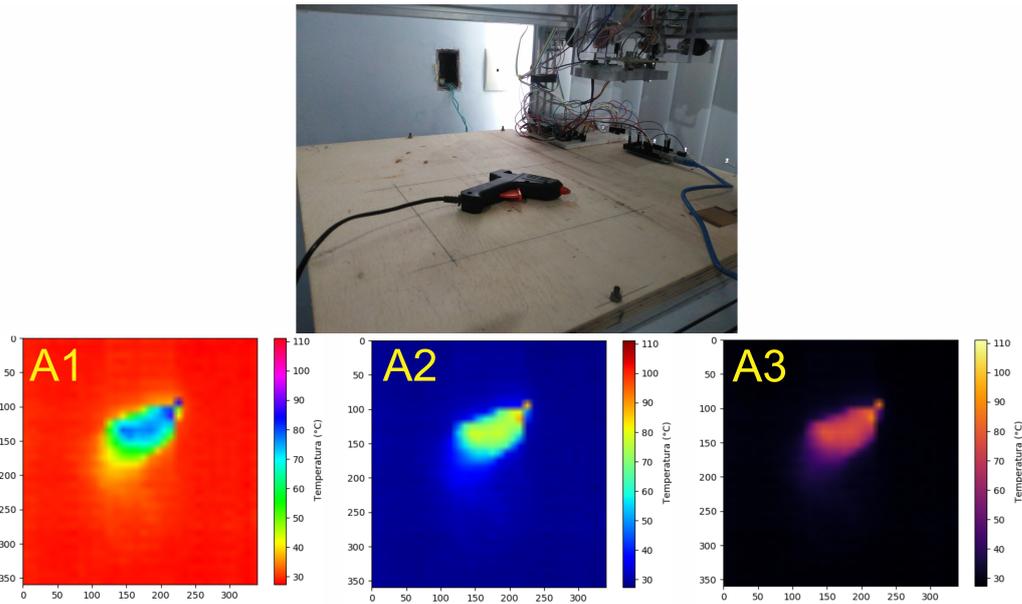


Figura 3.7: Leitura térmica de uma pistola de cola quente utilizando o DMT. Essa leitura possui uma temperatura mínima de  $27.3^{\circ}\text{C}$ , temperatura máxima de  $111.2^{\circ}\text{C}$  e temperatura média de  $32.3^{\circ}\text{C}$ . A imagem A1 é apresentado no mapa de cores hsv, imagem A2 com mapa de cores jet e imagem A3 com mapa de cores inferno.

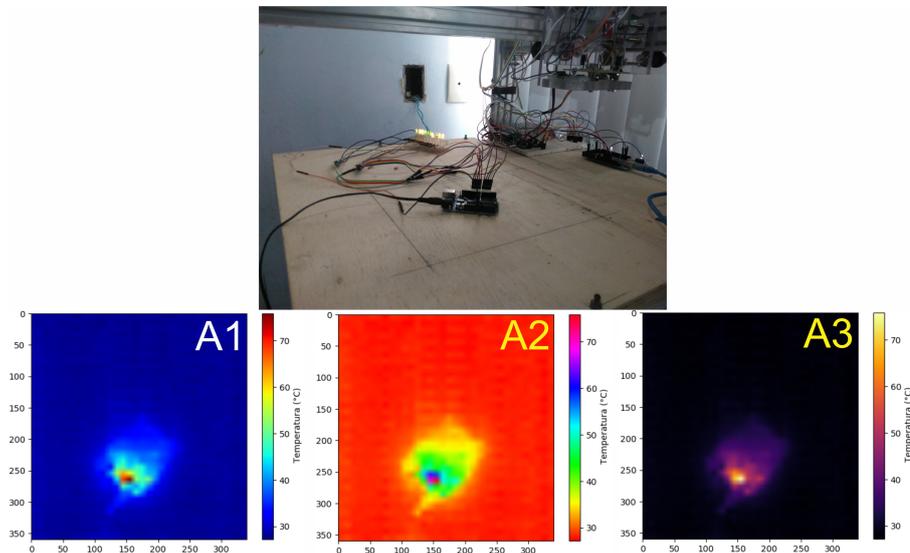


Figura 3.8: Leitura térmica do dispositivo microcontrolado Arduino utilizando o DMT. Baseado no experimento de Ljubenic e Milic (2018), utilizou-se a ligação de 10 *leds* com o dispositivo, sendo alimentado com fonte externa, no intuito de verificar o processo de aquecimento diante de uma aplicação real. Essa leitura possui uma temperatura mínima de  $27.2^{\circ}\text{C}$ , temperatura máxima de  $75.9^{\circ}\text{C}$  e temperatura média de  $29.8^{\circ}\text{C}$ . A imagem A1 é apresentado no mapa de cores hsv, imagem A2 com mapa de cores jet e imagem A3 com mapa de cores inferno.

**HARDWARE E SOFTWARE DO DMT****Conteúdo**

4.1	Hardware . . . . .	28
4.1.1	Elétrica / eletrônica . . . . .	29
4.1.1.1	Unidade microcontroladora do sistema . . . . .	30
4.1.1.2	Motores e unidade controladora de motores . . . . .	32
4.1.1.3	Fonte de alimentação . . . . .	34
4.2	Estrutura mecânica . . . . .	35
4.2.1	Dimensionamento . . . . .	36
4.2.2	Módulo Y . . . . .	37
4.2.3	Módulo X . . . . .	42
4.2.4	Movimentação . . . . .	45
4.3	Aquisição de dados . . . . .	47
4.3.1	Posição dos <i>pixels</i> e campo de visão . . . . .	51
4.3.2	Precisão do sensor . . . . .	55
4.3.3	Esquemático do sensor . . . . .	57
4.4	Interface . . . . .	58
4.4.1	Aquisição da imagem térmica . . . . .	62
4.5	Custo do projeto . . . . .	63

O DMT foi desenvolvido a partir de 3 eixos mecatrônicos para, de forma integrada, produzir um sistema que pudesse capturar imagens térmicas com um baixo custo de investimento. Esses 3 eixos são hardware, aquisição de dados e **interface** (ver Fig. 4.1). O **hardware** é toda estrutura física disponível que tornará possível a aquisição de dados. A **aquisição de dados** refere-se ao uso do sensor térmico MLX 90621 para realizar a coleta de temperatura do objeto a ser mensurado termicamente. A **interface** de usuário é a parte gráfica do software de suporte à aquisição que pretende coletar os dados disponíveis pelo sensor e gerar as imagens térmicas. Essa *interface* é responsável por prover ao usuário todas as funções de controle do DMT.



Figura 4.1: Eixos mecatrônicos para o desenvolvimento do projeto. Esses eixos compõem o desenvolvimento do DMT, onde cada eixo tem funções específicas para sua construção física, integração de componentes, detalhamento de funções e funcionamento do DMT para produção de imagens térmicas.

Nesse capítulo, serão apresentados os parâmetros técnicos envolvidos para a construção do **hardware** – sistema elétrico e eletrônico, unidade microcontroladora, motores usados para movimentação do hardware, apresentação da estrutura mecânica do dispositivo com os componentes utilizados e os devidos cálculos, especificação do sensor com suas características e particularidades – sistema de **aquisição de dados** e **interface** desenvolvida pra controle do dispositivo.

#### 4.1 HARDWARE

Esse projeto tem como objetivo desenvolver um dispositivo de baixo custo, denominado aqui de DMT e representado pela Fig. 4.2. O DMT tem como característica produzir imagens térmicas de objetos, áreas e estruturas, tais como a geração de mapas de calor em dispositivos eletrônicos e produtos de pequeno porte, respeitando apenas o limite da região de leitura do sensor.

O DMT é constituído das seguintes partes:

1. **UNIDADE SENSORA:** É responsável pela captura da radiação infravermelha do objeto e conversão em informação térmica. Essa ação é realizada pelo sensor térmico MLX 90621. Esse sensor produz uma matriz térmica a cada leitura, que posteriormente será responsável pela formação da imagem. Essa unidade possui também um dispositivo laser para testes de medições de distância e um sensor ultrassônico para medição da distância entre o sensor e a base.
2. **UNIDADE DE CONTROLE:** Essa unidade realiza o controle do sistema de movimentação do dispositivo através do acionamento dos motores de passo, que por sua vez, deslocam os eixos para realizar o processo de captura das informações térmicas. Essa unidade possui uma plataforma de prototipagem com um microcontrolador embutido e *drivers* de micro passo. A plataforma é responsável pela configuração e controle dos *drivers*, enquanto que os *drivers* são responsáveis pela movimentação dos motores de passo.
3. **ESTRUTURA:** A estrutura é a unidade responsável por sustentar todo o dispositivo sob o ponto de vista mecânico. A estrutura é composta por perfis de liga de alumínio modular, placas de policarbonato, parafusos de aço e cantoneiras de liga de alumínio. Essa estrutura foi pensada no intuito de suportar todos os esforços mecânicos necessários para a funcionamento do dispositivo, e caso seja necessário,

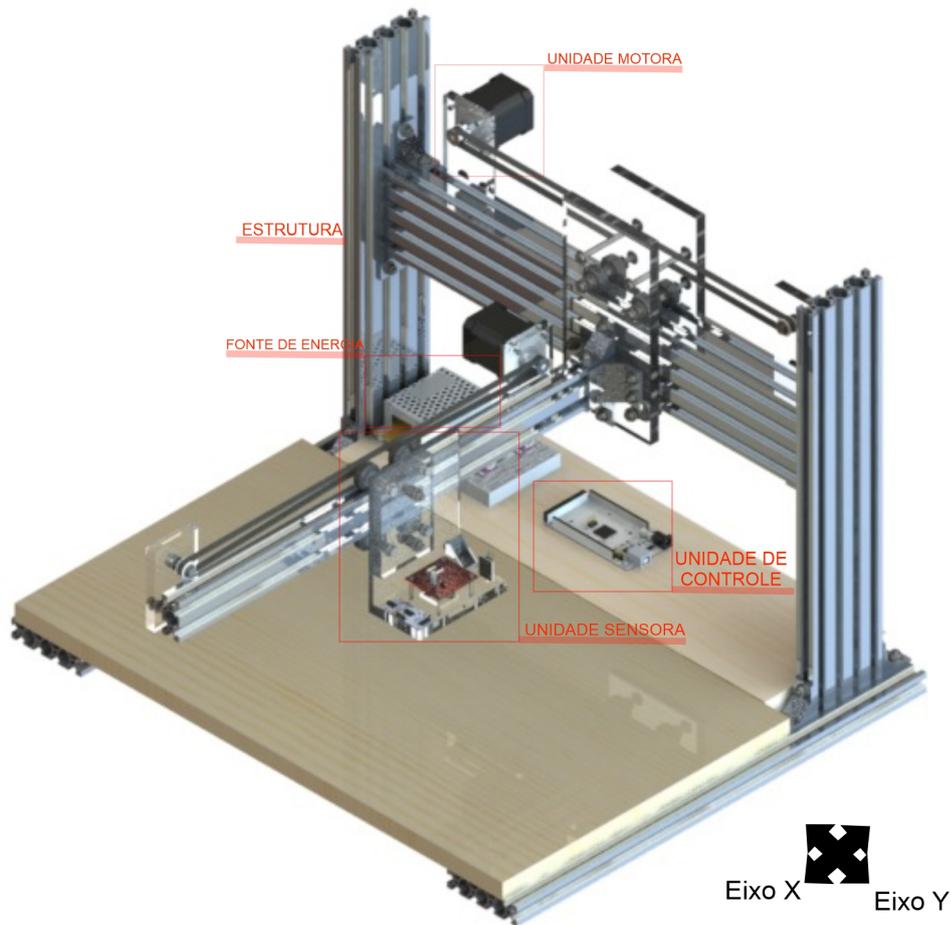


Figura 4.2: Hardware do protótipo. O projeto do DMT é dividido em: estrutura, aquisição de dados (unidade sensora) e sistema eletroeletrônico (unidade motora, unidade de controle e fonte de energia).

tolerar futuras alterações, seja com incremento de esforços ou adição de componentes.

4. **UNIDADE MOTORA:** A unidade motora é responsável pela movimentação direta dos eixos do dispositivo. Essa movimentação só é possível graças ao sistema de movimentação composto por polias com roldanas e correia. Eles, junto com os motores, são responsáveis pelo deslocamento dos eixos.
5. **FONTE DE ENERGIA:** A fonte de energia é responsável por fornecer energia aos motores de passo.

#### 4.1.1 Elétrica / eletrônica

O sistema de controle e motorização é composto de unidade microcontroladora do sistema, motores, unidade controladora de motores e fonte de alimentação para fornecer

energia ao sistema.

**4.1.1.1 Unidade microcontroladora do sistema** A unidade microcontroladora é composta de um microcontrolador responsável pela aquisição de dados de temperatura pelo sensor, transmissão dos dados para a *interface* e controle de movimentação dos motores. O microcontrolador utilizado é o ATmega 2560, vinculado a plataforma arduino mega 2560.

Arduino é uma plataforma eletrônica *open-source*, fundamentada em sua facilidade de uso, tanto em seu *hardware*, quanto em seu *software* de programação. Desde seu nascimento, a plataforma arduino tem sido utilizada em milhares de projetos e aplicações, auxiliando estudantes, programadores e profissionais a desenvolverem soluções para as mais diversas áreas do conhecimento como aplicações em *internet of things* (IoT), impressoras 3D, ambientes embarcados e dispositivos vestíveis. A plataforma arduino é fácil de ser utilizada por usuários iniciantes, e suficientemente flexível para usuários avançados. Essa plataforma se tornou popular devido a seu baixo custo, se comparado a outras plataformas microcontroladas, por ser multitplataforma, podendo ser utilizada em sistemas operacionais Windows, Mac e Linux, possuindo um ambiente de programação simples de ser utilizado, e com capacidade de personalização a nível de *software* e *hardware* pelo usuário (ARDUINO, 2020).

A plataforma Arduino Mega 2560 (ver Fig. 4.3) possui o microcontrolador ATmega 2560. Tal plataforma foi desenvolvida para atender projetos mais complexos. Ele possui 54 pinos digitais de entrada e saída, sendo que 15 saídas podem ser usadas como *pulse with modulation* (PWM), 16 entradas analógicas, 4 portas que podem ser utilizadas para comunicação serial e um cristal oscilador de 16 MHz.

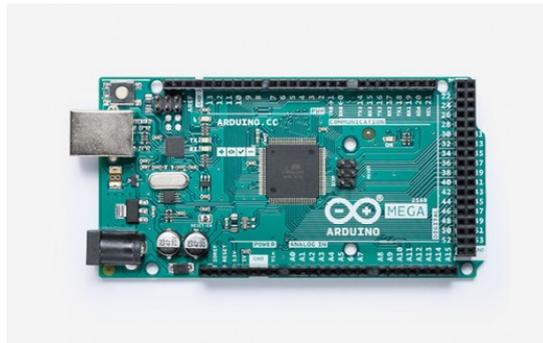


Figura 4.3: Plataforma Arduino Mega 2560. A plataforma Arduino possibilita uma agilidade a nível de desenvolvimento e aplicação de sistemas embarcadas graças a sua integração e codificação através da utilização de ambientes de desenvolvimento próprio, bibliotecas, facilidade na escrita do código e sensores que podem ser conectados a ele e programados em um curto espaço de tempo. Fonte: <https://store.arduino.cc>.

A plataforma a ser utilizada nesse projeto teve como critérios de escolha o custo, desempenho e periféricos. Dentre as diversas plataformas de mercado, foram analisadas as plataformas *open-source* Arduino, Raspberry PI e Beaglebone Black. A Tabela 4.1

sumariza as características de cada tipo de microcontrolador. Apesar de se tratar de kits de desenvolvimento comerciais, possuem naturezas diferentes. O Raspberry PI e Beaglebone Black possuem um sistema microprocessado capaz de realizar tarefas que exigem uma grande quantidade de processamento como processamento de imagens, exibição de conteúdo em alta definição e aplicações multitarefas. O Arduino possui um sistema microcontrolado capaz de realizar controle e processamentos que não requeiram grandes quantidades de informação ou complexidade. Como se trata de protótipo que tem como critério objetivo o baixo custo, optou-se pela utilização do Arduino, visto que atenderia todos os quesitos com relação aos parâmetros do projeto como aquisição e transferência de dados e acionamento de motores, apresentando um custo inferior se comparado ao Raspberry PI e Beaglebone Black. Como o projeto não requer grande quantidade de processamento, visto que essa função está sendo delegada ao computador conectado ao protótipo, esses sistemas microprocessados foram deixados de lado nessa aplicação. Caso o projeto futuramente apresente outras funcionalidades que necessitem de maiores quantidades de processamento, pode-se levar em consideração esses kits de desenvolvimento comerciais mais robustos.

Tabela 4.1: Quadro comparativo de microcontroladores

	Arduino	Raspberry PI	Beaglebone Black
Custo	\$7.97 - \$38.50* (Modelo Arduino Mega 2560)	\$35.00 - \$55.00** (Modelo Raspberry Pi 4 Model B)	\$56.96 - \$62.38**
Desempenho	mediano	alto	alto
Periféricos	Microcontrolador ATmega2560, 54 portas digitais sendo 15 saídas PWM, 16 pinos analógicos, memória flash 256 KB com 8 KB usados para bootloader, SRAM 8 KB, EEPROM 4 KB, Velocidade de Clock de 16 MHz.	Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz, 1GB, 2GB ou 4GB LPDDR4-3200 SDRAM (dependendo do modelo), 2.4 GHz e 5.0 GHz IEEE 802.11ac wireless, Bluetooth 5.0, BLE-Gigabit Ethernet 2 portas USB 3.0 ; 2 portas USB 2.0, 40 pinos GPIO.	AM335x 1GHz ARM® Cortex-A8, 512MB DDR3 RAM, 4GB 8-bit, placa aceleradora gráfica 3D e 2x 46 pinos

\* Loja oficial Arduino e site de varejo *on-line* Aliexpress. \*\* Sites de lojas parceiras.

**4.1.1.2 Motores e unidade controladora de motores** Motores de passo são dispositivos elétricos capazes de converter sinais elétricos em movimento mecânico. Seu aspecto construtivo, utilizando um número fixo de polos magnéticos, permite que eles tenham certa precisão através de movimentos modulares chamados de passo. O passo é o ângulo de rotação único do eixo do motor. Todo o movimento do motor de passo é realizado pela contagem dos passos em sentido horário ou anti-horário. Por isso, eles não necessitam, a princípio, de qualquer sensor de posição para realizar seu controle de deslocamento, trabalhando em malha aberta.

A grande maioria dos motores de passo comerciais possuem um passo equivalente a  $1,8^\circ$  sem a utilização de controladores de passo. Isso permite que eles consigam rotacionar até 200 passos por revolução completa. A precisão de um sistema não leva em conta apenas o sistema de transmissão de força, mas a quantidade de passos que podem ser realizados pelo motor na aplicação. Através de *drivers* de passo é possível chegar a 102.400 passos.

Para a maioria das aplicações de pequeno porte, os motores de passo atendem ao quesito torque  $\times$  custo de forma mais benéfica. Eles possuem custo menores se comparados aos servomotores e possuem melhor precisão. Os motores de passo têm a vantagem de serem mais simples quanto a sua montagem e uso, não necessitando de *encoders* e *resolvers* para funcionar. É necessário apenas que eles possuam *drivers* para realizar seu controle de posicionamento e velocidade. O motor de passo utilizado nesse projeto é o Nema 17 HS4401/42BYGH (ver Fig. 4.4). A Tabela 4.2 apresenta as características técnicas do motor de passo usado no projeto. Algumas dessas especificações serão utilizadas na realização de cálculos ao longo do descritivo do projeto.



Figura 4.4: Motor de passo 17HS4401/42BYGH. O motor de passo garante precisão e torque a um baixo custo, sem a necessidade acessórios externos para seu funcionamento. A sua facilidade de operação, configuração e uso é também um importante ponto a ser considerado para a escolha desse tipo de motor.

Tabela 4.2: Informações técnicas do motor de passo 17HS4401/42BYGH.

Ângulo de passo (grau)	1,8°
Corrente (A)	1,7
Torque Retenção (N.cm)	42
Inercia do Rotor (g.cm <sup>2</sup> )	54
Número de fios	4
Peso do motor (g)	280

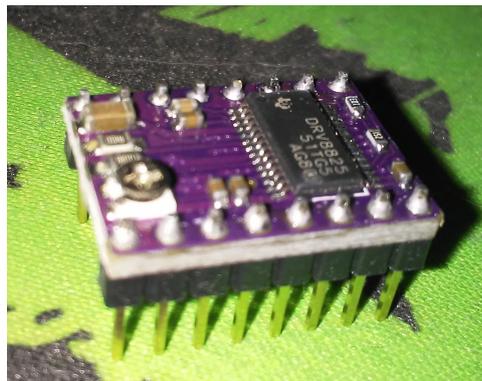


Figura 4.5: *Driver* DRV8825. O *driver* possibilita controle e configuração do funcionamento do motor de passo, além de aumentar a precisão do mesmo caso seja necessário.

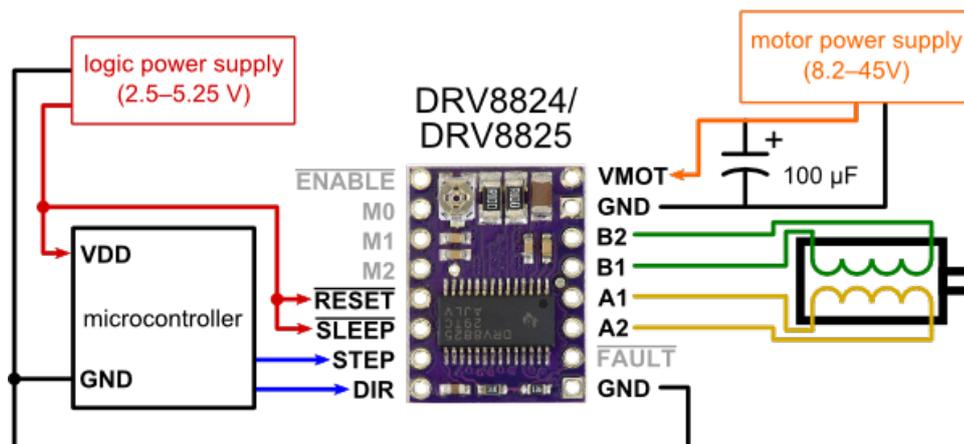


Figura 4.6: Ligação do *Driver* DRV8825. Esquema elétrico de ligação do *driver* DRV8825, onde há pinos para ligação do motor, fonte de energia e pinos responsáveis por comandar os parâmetros do *driver* em relação ao motor. Fonte : <https://www.pololu.com/>

O *drive* de motor de passo são módulos eletrônicos utilizados para o controle de motores de passo. O *driver* utilizado para esse projeto é o DRV8825 (ver Fig. 4.5). Esse *drive* permite o controle de motores de passos bipolares, permitindo que possa

melhorar a precisão com o recurso de micro passos. O recurso de micro passo permite com que a angulação nominal de  $1,8^\circ$  do motor de passo possa ser subdividido, aumentando a resolução do motor. As resoluções disponíveis para esse tipo de *drive* são o passo completo, meio passo, 1/4 passo, 1/8 passo, 1/16 passos e 1/32 passos. Esse drive também possui limitador de corrente ajustável e proteção contra sobre corrente e temperatura. Ele opera com voltagens que variam entre 8,2 volts a 45 volts, entregando aproximadamente 1,5 amperes de corrente por fase até 2,2 amperes (utilizando algum recurso adicional para resfriamento do *driver*). A Fig. 4.6 apresenta o esquema elétrico para ligação do *driver* com a fonte de alimentação, motor de passo e microcontrolador. Essa versatilidade na integração dos componentes ao *driver* permite uma maior agilidade em projetos onde esse dispositivo é utilizado.

**4.1.1.3 Fonte de alimentação** A implementação desse projeto necessita de uma fonte de alimentação para possibilitar o fornecimento de energia para os motores. A Tabela 4.3 sumariza o consumo de energia dos dispositivos usados no DMT.

Foi utilizada uma fonte chaveada de 12 volts e 5 amperes, ilustrada na Fig. 4.7, visto que se trata de uma fonte com grande eficiência energética, peso, tamanho reduzido e menor dissipação de calor.

Tabela 4.3: Consumo de energia dos dispositivos.

Componentes	Quantidade	Corrente individual	Corrente total
Motor de passo (12v)	2	1A (fase)	4A
<i>Driver</i> motor de passo (12v)	2	5mA	10mA
Demanda energética total			4,01A

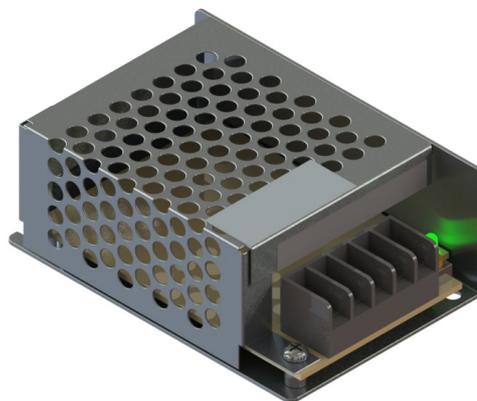


Figura 4.7: Fonte chaveada 12 volts, 5 Amperes. A fonte chaveada é uma fonte eletrônica que possui baixo peso, baixo volume e alto rendimento se comparado as fontes lineares. Essa fonte fornece toda a energia necessária para a movimentação do DMT.

## 4.2 ESTRUTURA MECÂNICA

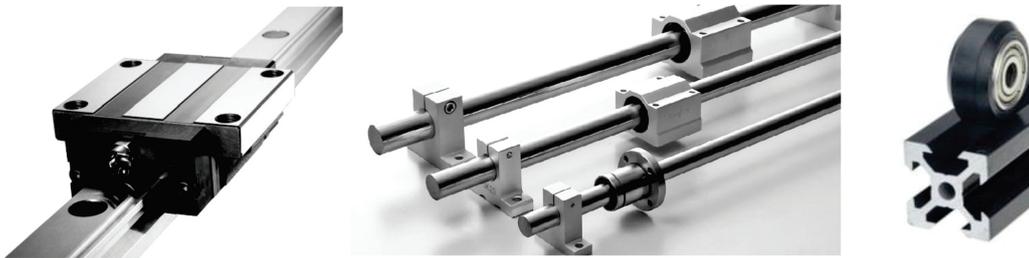


Figura 4.8: Guia linear, eixo linear e roldana. Esses são exemplos de componentes utilizados em sistemas que necessitam de deslocamento linear, possuindo características diferenciadas, tendo suas aplicações condicionadas a parâmetros de projeto e custo.

Os sistemas para movimentação de eixos de máquinas de pequeno porte são usualmente compostos por guias lineares, eixos lineares ou roldanas (ver exemplos na Fig. 4.8). **Guias lineares** são sistemas de movimentação linear projetados para deslocamento com alta precisão, de forma suave, possuindo grande rigidez em sua estrutura, capaz de suportar grandes cargas, velocidade e aceleração em seu deslocamento. Sua estrutura é composta de guia e patins. As **guias** se assemelham a régua metálicas modificadas por onde os patins se deslocam. Os patins são estruturas de encaixe na guia que possui em seu interior um sistema de rolo ou esferas metálicas que permitem o seu deslocamento de forma suave. Os **eixos lineares** são os componentes de movimentação mais utilizados em aplicações de pequeno porte. Tem um custo-benefício melhor do que as guias lineares devido ao seu custo mais acessível. Esse sistema é composto por um perfil cilíndrico, o qual serve de guia para deslocamento de rolamentos lineares, que sofrem deslocamento por conta de esferas em seu interior. Possuem alta dureza superficial e excelente acabamento (KALATEC... , 2019). As **roldanas** são aplicações de baixo custo muito utilizadas em impressoras 3D e máquinas a laser de pequeno porte, onde a roldana se desloca através de encaixe específico no perfil estrutural utilizado. Esta possui um rolamento interno, e externamente a roldana, é constituída por um plástico de engenharia (*delrin* ou policarbonato) ou aço.

Tabela 4.4: Componentes de movimentação linear.

Característica	Guia linear	Eixo linear	Roldana
Precisão	0,0037mm (1)	0,009mm - 0,025mm (1)	0,026mm (2)
Custo	Guia 15 – 600mm – R\$ 100,00 (1) Patins 15 –R\$ 88,00 (1)	Eixo 12mm (500mm) – R\$ 43,00 (1) Rolamento pillow block - R\$ 34,61 (1)	R\$ 9,50 (unidade) (3)

Fontes: (1) [www.kalatec.com.br](http://www.kalatec.com.br), (2) [openbuildspartstore.com](http://openbuildspartstore.com), (3) [www.openbrasilcnc.com.br](http://www.openbrasilcnc.com.br)

O sistema de roldanas foi escolhido como sistema de movimentação para esse projeto,

pois possui facilidade na montagem e manutenção, possui excelente relação custo benefício e atende aos quesitos de precisão para esse projeto (ver Tabela 4.4). A estrutura do projeto para construção dos eixos X e Y é composta por perfis de alumínio estrutural, placas de policarbonato, rolamentos, roldanas e acessórios como parafusos e cantoneiras, que foram utilizados como componentes de sustentação, fixação e montagem. Maiores informações sobre esses componentes estruturais são encontrados no apêndice A.

#### 4.2.1 Dimensionamento

Nessa seção, serão consideradas as forças responsáveis pela sustentação e movimentação do protótipo e os esforços sofridos nessas estruturas. Os cálculos serão em torno da carga suportada pelo eixo Y para deslocamento do eixo X e o conjunto formado pelo carrinho junto a sustentação do sensor ao longo do curso do eixo X em determinadas situações. O eixo Y terá que suportar a carga proporcionada pelo eixo X em duas posições principais: no centro da estrutura onde existirá um equilíbrio do eixo X sobre o eixo Y, local de deflexão máxima nesse contexto, podendo ocasionar deflexão do perfil estrutural de alumínio e na extremidade onde existirá uma carga maior sobre o acoplamento formado pela cantoneira e parafuso, podendo ocorrer uma tensão de cisalhamento sobre o parafuso. No eixo X, os principais esforços a serem considerados serão aqueles realizados pelo posicionamento do sensor na extremidade do eixo, onde existirá uma tendência maior a ocorrer deflexão por conta do peso da unidade sensora e a tensão de cisalhamento dos parafusos existente na junção entre o perfil de alumínio e a placa de policarbonato, conjunto responsável pela sustentação de todo o eixo Y. Nesse primeiro momento, será realizado uma estimativa das massas (ver Tabela 4.5) que exercerão esforços na estrutura, sendo desprezada a massa dos parafusos, junto a seus componentes para melhor compreensão e resolução dos cálculos.

Tabela 4.5: Massa dos componentes e conjuntos mecânicos.

Item	Descrição	Massa (g)
Carrinho eixo Y	Composto de 2 placas de policarbonato junto a 8 roldanas e cantoneiras de fixação.	757,68
Conjunto motor de passo	Composto por placa de policarbonato para fixação do motor e motor de passo.	703,52
Eixo X	Composto por perfil de alumínio e sustentação da correia	501,40
Unidade sensora	Composto por circuito sensor, placas de policarbonato e roldanas.	298,27
Perfil em C	Composto pelo perfil em C	1081,70

### 4.2.2 Módulo Y

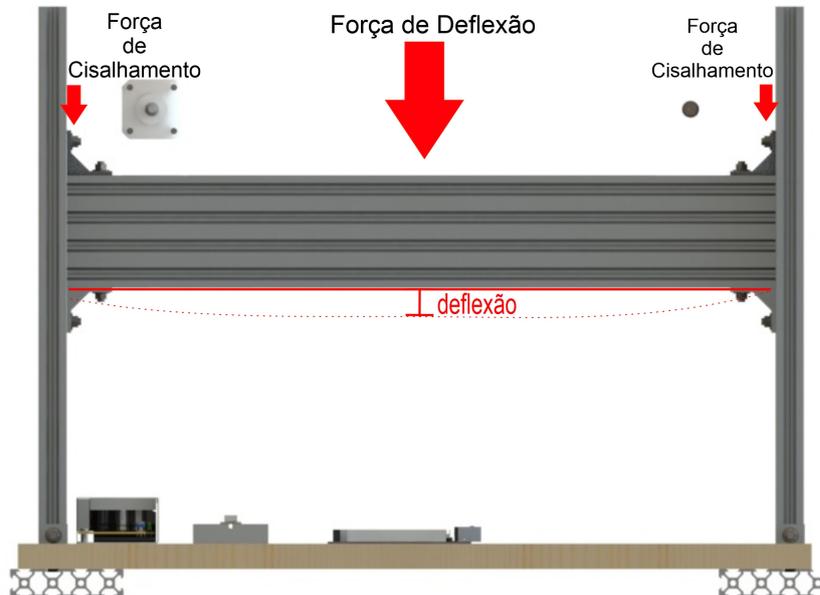


Figura 4.9: Principais esforços considerados nesse projeto. A força de deflexão no centro, local de maior deflexão nesse sistema, e as forças de cisalhamento nas extremidades de apoio nos pontos de fixação são os principais esforços considerados nessa estrutura.

O eixo Y é o eixo responsável por sustentar toda estrutura do eixo X, e por isso, deve possuir uma estrutura mais robusta. As principais forças atuantes (ver Fig. 4.9) que podem ser críticas nesse projeto são a deflexão, que pode ocorrer em sua intensidade máxima no centro do eixo, e o cisalhamento, que pode ser ocasionado nas extremidades onde se encontram a sustentação de todo o eixo através de cantoneiras e parafusos.

Como o perfil que forma o eixo Y tem uma estrutura geométrica diferenciada, cujo formato é em C, é necessário achar seu centroide primeiramente para posteriormente encontrar seu momento de inércia e a deflexão do perfil. Nesse caso, para encontrar o centroide, foi utilizado o método dos corpos compostos, onde se busca converter uma estrutura de formato complexo em um conjunto de estruturas de formatos mais simples, que podem ser triangulares, retangulares, semicirculares etc. O método dos corpos compostos é representado por

$$X = \frac{\sum AW}{\sum W} \quad Y = \frac{\sum BW}{\sum W}, \quad (4.1)$$

onde X,Y representam as coordenadas do centro de gravidade do corpo composto, A,B representam as coordenadas do centro de gravidade de cada parte que constitui o corpo e  $\sum W$  é a soma dos pesos de todas as partes que constituem o corpo ou é simplesmente o peso total do corpo composto.

Tabela 4.6: Informações sobre propriedade dos corpos.

corpo	Área (mm <sup>2</sup> )	A (mm)	B (mm)	A*Área (mm <sup>3</sup> )	B*Área (mm <sup>3</sup> )
1	-800	-10	40	8000	-32000
2	3200	0	40	0	128000

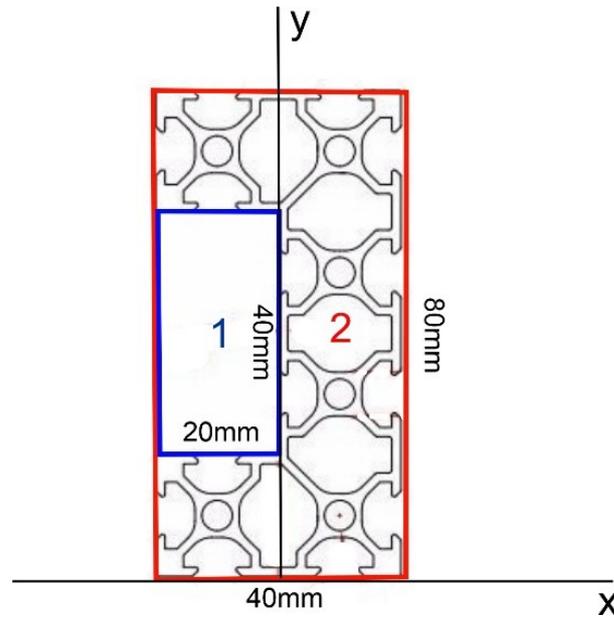


Figura 4.10: Perfil em C segundo método dos elementos compostos. Essa representação mostra o método sendo aplicado nas áreas 1 e 2 do perfil em C.

Utilizando o método dos corpos compostos (ver Fig. 4.10), o perfil em C é dividido em dois retângulos, estruturas mais simples, para se conseguir encontrar o centroide desse perfil. Será realizado os cálculos do corpo 1 e 2, e posteriormente haverá a subtração do corpo 1 em relação ao corpo 2 para que se encontre o centroide do perfil em C, conforme apresentado na Tabela 4.6. O sinal negativo no corpo 1 indica que ele irá ser subtraído, permanecendo apenas a área do perfil em C onde o centroide estar sendo encontrado.

$$X = \frac{\Sigma A \cdot \acute{a}rea}{\Sigma} = \frac{8000}{2400} = 3,33mm, \quad (4.2)$$

$$Y = \frac{\Sigma B \cdot \acute{a}rea}{\Sigma} = \frac{960000}{2400} = 40mm. \quad (4.3)$$

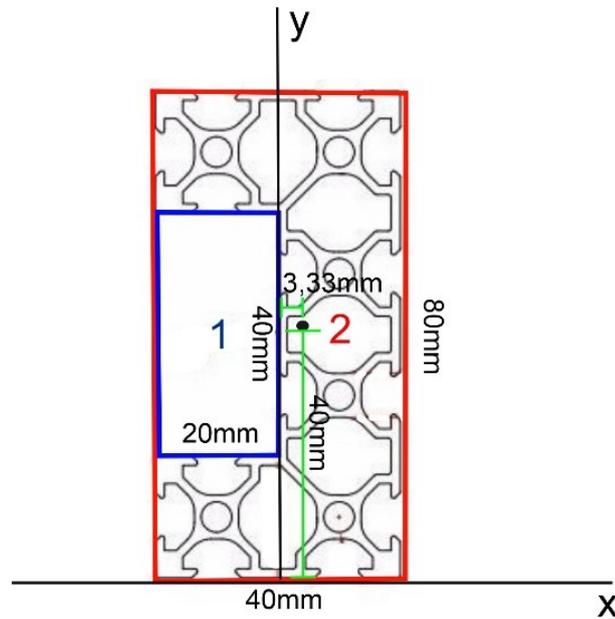


Figura 4.11: Perfil em C com centroide localizado. Esse é o resultado da aplicação dos métodos compostos sobre o perfil em C. Esse resultado servirá como base para o cálculo dos momentos de inércia dos corpos do método composto.

Conhecendo-se o centroide do perfil (ver Fig. 4.11), é possível determinar o momento de inércia, em relação ao eixo X, do mesmo utilizando o método dos momentos de inércia. Os momentos de inércia,  $I$ , nesse caso é

$$I = M_x + Ad^2, \quad (4.4)$$

onde  $M_x$  = momento de inércia da forma geométrica e  $Ad^2$  = área multiplicada pela distância do eixo de referência em relação ao centroide.

Segundo Hibbler (2005), o momento de inércia ( $M_x$ ) das formas geométricas apresentadas são

$$M_x = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3, \quad (4.5)$$

onde  $M_x$  é dado em  $mm^4$ ,  $b$  = base do retângulo (mm) e  $h$  = altura do retângulo (mm).

Então, o momento de inércia do corpo 1 é

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{1}{12} \cdot 40 \cdot 20^3 + 40 \cdot 20 \cdot 20^2, \\ I_1 &= 26.666,666 + 320.000, \\ I_1 &= 346.666,666mm^4. \end{aligned} \quad (4.6)$$

O momento de inércia do corpo 2 é

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{1}{12} \cdot 80 \cdot 40^3 + 80 \cdot 40 \cdot 40^2, \\ I_2 &= 426.666,666 + 5.120.000, \\ I_2 &= 5.546.666,666 \text{mm}^4. \end{aligned} \quad (4.7)$$

O momento de inércia do perfil em C é

$$\begin{aligned} I &= I_2 - I_1, \\ I &= 5.546.666,666 - 346.666,666, \\ I &= 5.200.000 \text{mm}^4. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Segundo Pinheiro L.M (2010), a deflexão máxima, Y, causada por uma força central em um perfil bi-apoiado é representado por

$$Y = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}, \quad (4.9)$$

onde Y = deflexão ocorrida (mm), P = força central ao perfil (KN), L = distância entre a força e o ponto de apoio do perfil (m), E = módulo de elasticidade do perfil (MPa) e I = momento de inércia do perfil ( $\text{mm}^4$ ).

Diante disso, a deflexão máxima ocorrida no perfil de alumínio em C, no eixo Y, é de

$$\begin{aligned} Y &= \frac{(0,0226 \cdot 10^3) \cdot 0,25^3}{(48 \cdot (70000 \cdot 10^3) \cdot 5.200.000)}, \\ Y &= \frac{(0,000353125 \cdot 10^3)}{(17.472.000.000.000 \cdot 10^3)}, \\ Y &= 2,02 \cdot 10^{-17} \text{mm}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Esse resultado expressa que a deflexão pode ser considerada nula pelo esforço aplicado pelo eixo X, afirmando que a estrutura suporta todo o esforço aplicado sobre o eixo Y, sem sofrer qualquer tipo de deformação significativa. Outro fato a se considerar com relação ao aspecto estrutural do projeto é a questão da tensão de cisalhamento ocorrido na junção dos perfis, onde se utiliza cantoneiras e parafusos para uní-los. A tensão de cisalhamento é obtida pelo esforço causado no parafuso devido o mesmo suportar o perfil em C no eixo Y e toda estrutura do eixo X. A tensão média de cisalhamento é dada por

$$\tau = \frac{P}{A}, \quad (4.11)$$

onde P = força cortante no qual o componente está sendo submetido (N) e A = área de seção transversal do componente ( $\text{m}^2$ ).

A área de seção transversal (A) de uma estrutura circular, é dada por

$$A = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2, \quad (4.12)$$

onde  $d$  = diâmetro do parafuso.

O parafuso utilizado como fixação das cantoneiras é o parafuso M5, produzido em aço 1020, com diâmetro de 5mm. Esse parafuso possui uma área de seção transversal de

$$\begin{aligned} A &= \pi \cdot \left(\frac{5}{2}\right)^2, \\ A &= 19,63mm^2 = 1,963 \cdot 10^{-5}m^2. \end{aligned} \quad (4.13)$$

Sendo que o esforço cortante produzido pelo peso do perfil em C do eixo Y e pelo eixo X é de aproximadamente 32,6 N. Temos a tensão de cisalhamento de

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{32,6}{1,963 \cdot 10^{-5}}, \\ \tau &= 166.072,34 = 0,166MPa. \end{aligned} \quad (4.14)$$

A verificação da validação do parafuso como componente de sustentação, suportando as forças sobre ele impostas, necessita ser comparado com a tensão admissível do material em relação a tensão de cisalhamento encontrada. A tensão admissível é dada por

$$\tau_{adm} = \frac{\tau_{limite}}{CS}, \quad (4.15)$$

onde  $\tau_{limite}$  = tensão do limite de escoamento do material (MPa) e  $CS$  = coeficiente de segurança.

O coeficiente de segurança é uma escala que varia entre 3 e 12, variando de acordo com a aplicação do componente no projeto. Como esse projeto não demanda grandes esforços sobre o ponto de vista estrutural, irá se utilizar o coeficiente de segurança igual a 3. O limite de escoamento do aço 1020 é de 330 MPa. Tendo conhecimento dessas informações, podemos afirmar que a tensão admissível do aço 1020 é de

$$\begin{aligned} \tau_{adm} &= \frac{330 \cdot 10^6}{3}, \\ \tau_{adm} &= 110 \cdot 10^6 = 110MPa. \end{aligned} \quad (4.16)$$

A tensão de cisalhamento é de 0,166 MPa, enquanto que a tensão máxima suportada pelo parafuso é de 110MPa. Isso mostra que o parafuso irá suportar a tensão submetida pelo perfil em C e o eixo Y. Através do *software* Solidworks 2018, foi realizado uma análise estática de tensão no perfil em C (ver Fig. 4.12). Essa análise levou em consideração o ponto mais crítico de deflexão que seria o centro do perfil causada pelo peso do eixo

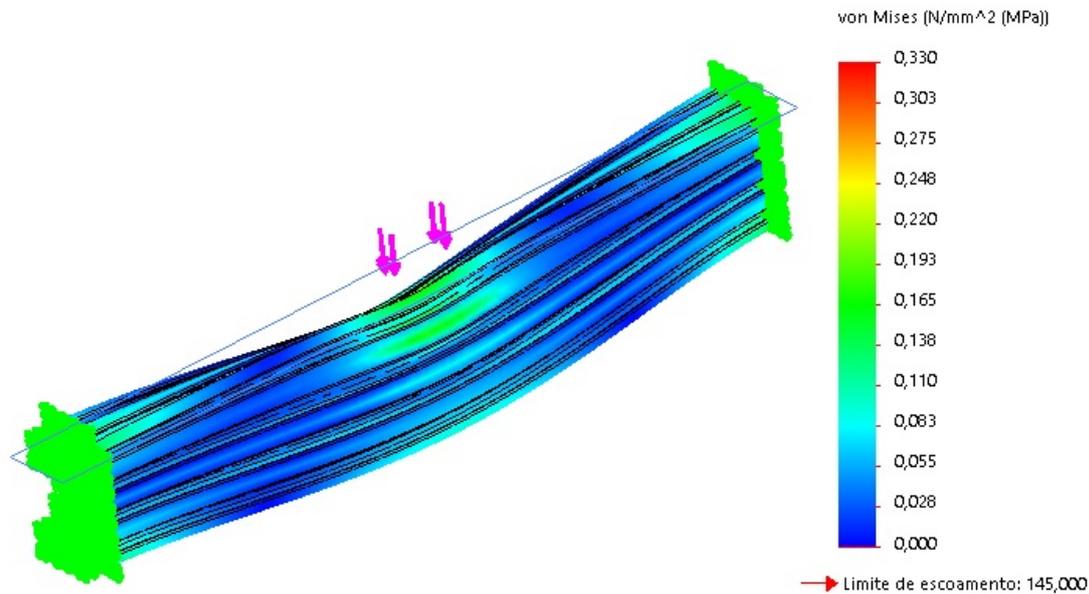


Figura 4.12: Teste de tensão realizado na viga principal do módulo Y. Essa análise foi feita aplicando uma força equivalente, no centro do perfil em C, ao conjunto do eixo X. As laterais do perfil foram fixados na intenção de representar as colunas do DMT.

X sobre ele. Essa análise permite observar que a tensão máxima resultante do esforço é de 0,330 MPa – tensão extremamente inferior ao limite de escoamento do material. A tensão resultante sobre a força aplicada gira em torno de 0,110MPa a 0,220MPa. Tanto a tensão máxima quanto a tensão localizada sobre a força são variáveis não significativas em relação a deformação que poderia ocorrer no perfil em C com aplicação de um esforço central.

### 4.2.3 Módulo X

A deflexão ocasionada por uma força, gerada pelo peso da unidade sensora, no perfil de alumínio do eixo X pode ocorrer quando essa força é aplicada na região mais distante da sustentação desse eixo, nesse caso, na extremidade do eixo X (ver Fig. 4.13). Antes de realizar o cálculo de deflexão, é necessário conhecer o momento de inércia do perfil do eixo.

Segundo (HIBBLER, 2005), o momento de inércia (  $I$  ) dessa forma geométrica é representado por

$$I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3, \quad (4.17)$$

onde  $b = 40\text{mm}$  e  $h = 20\text{mm}$ .

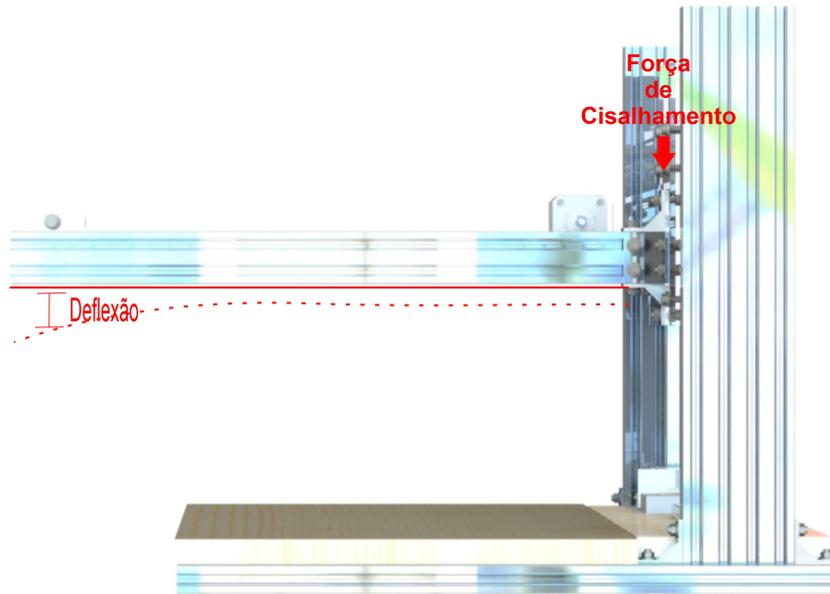


Figura 4.13: Deflexão que poderá ser ocasionada pela unidade sensora. A deflexão na extremidade, posição onde a flexão pode ser máxima nesse sistema, bem como o cisalhamento na junção de encaixe do perfil, são os esforços a serem considerados na estrutura do modulo X.

Então, o momento de inércia do perfil do eixo X é dado por

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{1}{12} \cdot 40 \cdot 20^3, \\
 I &= \frac{320.000}{12}, \\
 I &= 26,666 \cdot 10^4 \text{mm}^4.
 \end{aligned}
 \tag{4.18}$$

Beer (2013) mostra que a deflexão (  $Y$  ) proporcionada por uma força transversal a um perfil é representada por

$$Y = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I},
 \tag{4.19}$$

onde  $Y$  é dado em mm,  $P$  = força transversal ao perfil (KN),  $L$  = distância entre a força e o ponto de apoio do perfil (m),  $E$  = módulo de elasticidade do perfil (MPa) e  $I$  = momento de inércia do perfil ( $\text{mm}^4$ ).

Portanto podemos afirmar que a deflexão que possa ocorrer no eixo X ,na extremidade é

$$\begin{aligned}
Y &= -\frac{(0,00298 \cdot 10^3) \cdot 0,4^3}{3 \cdot (70.000 \cdot 10^3) \cdot (26,666 \cdot 10^3)}, \\
Y &= -\frac{0,00019072 \cdot 10^3}{5599860 \cdot 10^3}, \\
Y &= -3,406 \cdot 10^{-11} mm.
\end{aligned} \tag{4.20}$$

Esse resultado mostra que o perfil de liga de alumínio possui resistência suficiente para suportar a unidade sensora sem que ocorra qualquer alteração em sua estrutura, tornando a capacidade de deflexão devido a força transversal proporcionada pela unidade sensora como um fenômeno que pode ser desprezado sem danos a estrutura do projeto. Assim como no módulo Y, um fator importante a se considerar com relação ao aspecto estrutural do projeto no eixo X é a questão da tensão de cisalhamento ocorrida nos parafusos que suportam o peso do perfil e da unidade sensora, onde se utiliza 6 cantoneiras e parafusos para segurar o perfil com a unidade sensora acoplada. O esforço cortante produzido pelo conjunto perfil, unidade sensora e motor de passo é de 14N. A tensão de cisalhamento produzida pelo conjunto é

$$\begin{aligned}
\tau &= \frac{14}{1,963 \cdot 10^{-5}}, \\
\tau &= 713.1940,09 = 0,713 MPa.
\end{aligned} \tag{4.21}$$

Utilizando-se o mesmo coeficiente de segurança do módulo Y, o mesmo tipo de parafuso na sustentação, a tensão admissível utilizada nesse caso será de 110 MPa. A tensão de cisalhamento é de 0,713 MPa, enquanto que a tensão máxima suportada pelo parafuso é de 110MPa. Os cálculos mostram que o esforço causado pelas estruturas acopladas ao eixo Y não irão causar nenhum tipo de tensão excessiva na estrutura a ponto de causar algum dano significativo. Através de simulação no *software* Solidworks 2018, realizando uma análise de tensão, é possível observar como o perfil se comporta quando submetido a uma força transversal em sua extremidade (ver Fig. 4.14). Essa simulação buscou atender os requisitos do projeto, fixando uma das extremidades e aplicando a mesma força resultante do peso da unidade sensora. Essa análise permite observar que a tensão máxima resultante do esforço é de 0,791 MPa; tensão extremamente inferior ao limite de escoamento do material. A tensão resultante sobre a força aplicada na extremidade do eixo gira em torno de 0,000MPa a 0,264MPa. Tanto a tensão máxima quanto a tensão localizada no perfil são variáveis não significativas em relação a deformação que poderia ocorrer no perfil que sustenta a unidade sensora com aplicação de um esforço em sua extremidade.

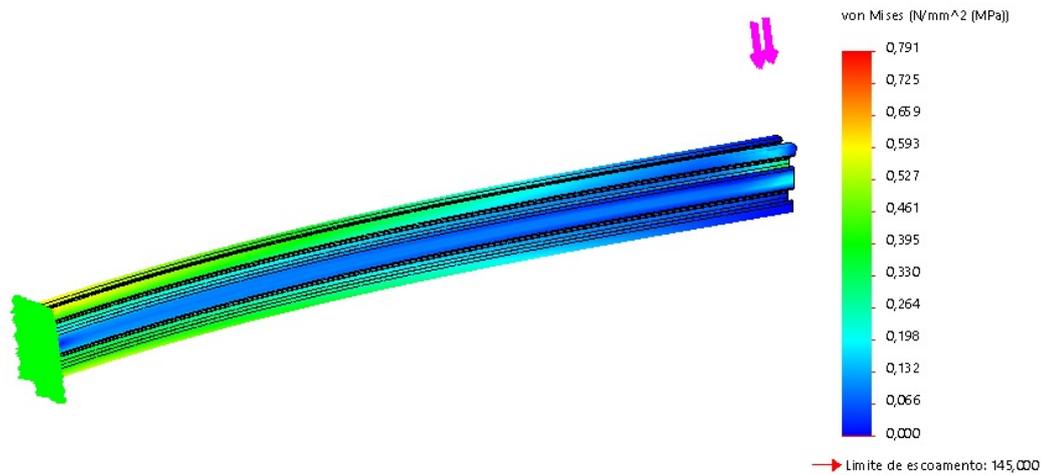


Figura 4.14: Teste de tensão realizado na viga principal do modulo Y. Essa análise é decorrente de uma possível deflexão do perfil ocasionado pela massa da unidade sensora na extremidade do perfil. Uma da extremidade do perfil foi fixada enquanto a outra foi submetida a uma força equivalente ao peso da unidade sensora.

#### 4.2.4 Movimentação

Sistemas de transmissão de movimento são conjuntos de componentes utilizados para realizar movimentos de sua fonte geradora até pontos onde esse movimento precisa ser realizado. A natureza dessa transmissão de movimento tem como princípio um movimento rotativo. A conversão do movimento rotativo para linear é desempenhado por componentes que são ligados entre si com a função de fazer essa conversão. O princípio de movimentação desse projeto teve como base o sistema de movimentação de máquinas de pequeno e médio porte como impressoras 3D, máquinas com controle numérico computadorizado (CNC), máquinas CNC a laser e máquinas CNC *Router*. Os principais sistemas de movimentação dessas máquinas são pinhão e cremalheira, polias e correia e fusos trapezoidais ou esferas recirculantes. Os principais parâmetros para definição do tipo de sistema levaram em questão quesitos como custo, precisão e rendimento (ver Tabela 4.7).

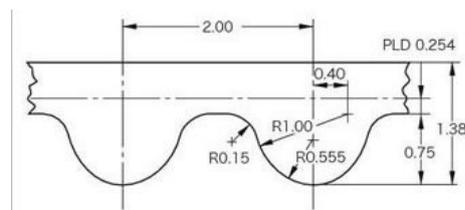


Figura 4.15: Correia GT2. Essa figura apresenta os aspectos dimensionais do correia GT2, tendo como ponto importante a se observar o seu passo, que equivale a 2.00mm. Fonte: <https://www.adafruit.com>.

Tabela 4.7: Sistemas de movimentação.

	PINHÃO CREMA- LHEIRA	POLIA CORREIA	FUSO TRA- PEZOIDAL	FUSO DE ES- FERA RECIR- CULANTES
RENDIMENTO	—————	97-99% (2)	40-50% (1)	97-98% (1)
PRECISÃO	0,015 mm (Passo 3,1416mm)	0,2mm (passo 2mm)	0,01mm (passo 2mm)	0,01mm (passo 2mm)
CUSTO	Médio ( R\$ 50,00 - R\$ 150,00)	Baixo (até R\$ 50,00)	Baixo (até R\$ 50,00)	Alto (acima de R\$ 150,00)

(1) - (RAC, 2019) (2) - (BUDYNAS; NISBETT, 2011)

O sistema de movimento escolhido para esse projeto é o conjunto polia e correia devido ao custo benefício entre rendimento, custo dos componentes e precisão. Ele é o mais econômico entre os sistemas listados. Por não ser um sistema que requeira precisão, e sim um sistema de movimentação para deslocamento do sensor na captura dos dados térmicos, uma precisão com centésimos de milímetros não iria favorecer ou acrescentar qualquer benefício ao projeto. Por possuir um bom rendimento, não será necessário sobre dimensionar o motor para compensar as perdas no processo de movimentação por conta dos fatores construtivos do sistema de movimentação. O sistema de movimentação dos eixos X e Y do protótipo é composto por um conjunto de polia e correia, em uma configuração de polias sincronizadas, capazes de transferir movimento rotacional do eixo do motor em movimento linear proporcionado pelo deslocamento da correia no sistema. Esse sistema é formado por correias e polias GT2. Eles são componentes comumente utilizados em impressoras 3D e máquinas de pequeno porte de controle numérico computadorizado. As correias possuem uma estrutura de borracha com alma de fibra de vidro, como reforço para aumento de sua resistência, permitindo que não ocorram distensões ao longo do uso. A correia GT2 utilizada nesse projeto possui passo de 2mm e largura de 6mm (ver Fig. 4.15).



Figura 4.16: Polia GT2.



Figura 4.17: Distribuição de tensão nas correias. Através dessa figura, fica evidenciado a forma como a tensão se distribui em relação ao tipo de dente da correia. É interessante observar que o dente redondo apresenta uma distribuição mais uniforme quando submetida a um esforço pela polia acoplada a ela. Fonte: <https://www.sdp-si.com/>.

O perfil arredondado de seus dentes se comparado as polias com dentes trapezoidais, possuem uma melhor distribuição do estresse em torno do contato entre o dente da correia e a polia (ver Fig. 4.17). Nota-se que no dente trapezoidal existe uma concentração de tensão na raiz do dente trapezoidal com baixa dispersão de tensão pelo restante do corpo do dente, enquanto que no dente com perfil arredondado existe uma tensão uniforme, quase constante, em torno do corpo do dente (SDP/SI, 2019).

A polia utilizada no sistema de movimento é a polia GT2 (ver Fig. 4.16), construída em alumínio, passo de 2mm, com 20 dentes.

### 4.3 AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados é feita a partir da interação entre a *interface* gráfica, microcontrolador e o sensor MLX90621 (ver Fig. 4.18). O processo de aquisição se inicia pelo operador do dispositivo através de operação específica na *interface*. A solicitação dos dados pela *interface* é enviado ao microcontrolador que irá solicitar essas informações do sensor. A interação entre a interface e o microcontrolador é feita por comunicação serial (cabo USB). A *interface* se localiza em dispositivo móvel (notebook), que será responsável por todo o controle e interação do sistema. Todo pedido de solicitação de dados terá a *interface* como responsável por iniciar o processo. O microcontrolador solicita os dados de temperatura para o sensor. Nesse momento, existe uma troca de informações para que ocorra a produção desses dados térmicos visto que o sensor utiliza a unidade de processamento do microcontrolador para realizar os cálculos necessários para produção dos dados térmicos. A comunicação entre o microcontrolador e o sensor é feita pelo protocolo I2C.

Finalizado o processamento, os dados térmicos são enviados do microcontrolador para a *interface* para serem armazenados e posteriormente serem processados para formação da imagem térmica. Esse processo de comunicação entre o microcontrolador e o sensor e envio para a *interface* é repetido diversas vezes até que se complete o ciclo de leitura do objeto que está sendo lido pelo sensor.

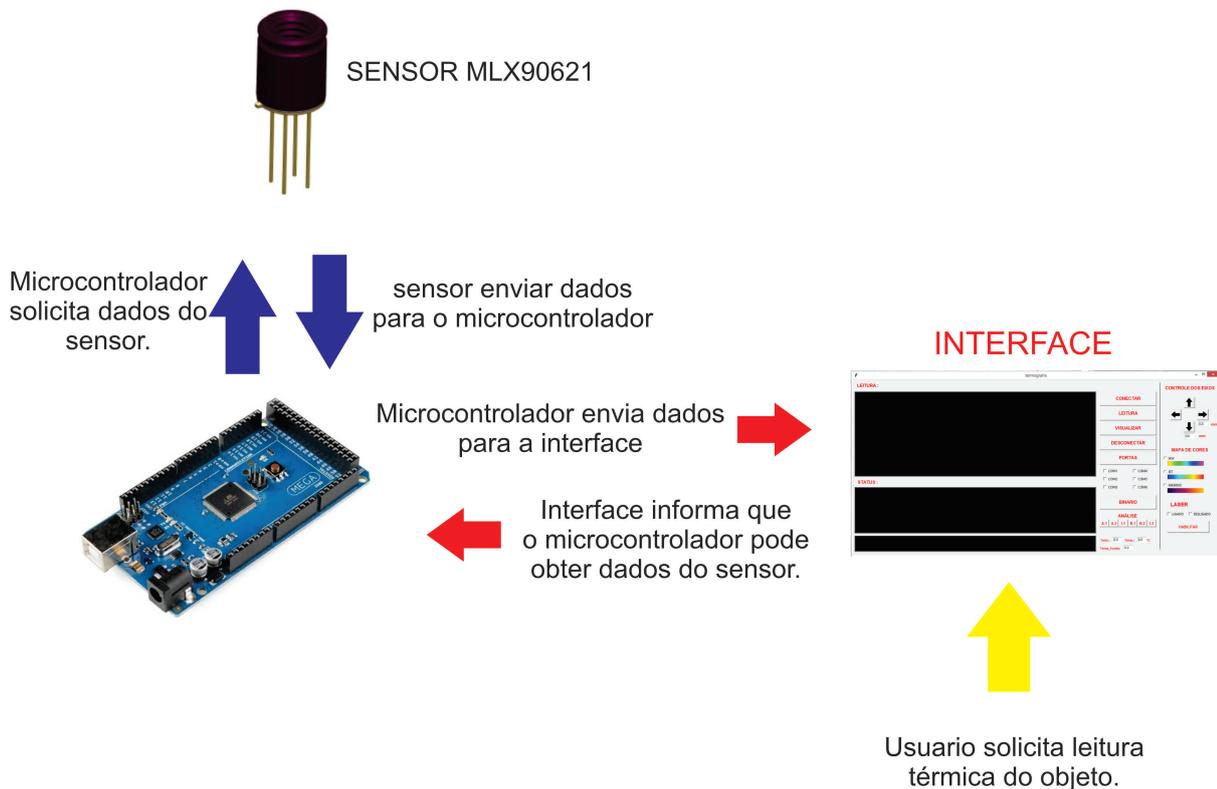


Figura 4.18: Procedimentos para aquisição de dados. A aquisição de dados é um procedimento que envolve a interação entre o DMT e a interface localizada em um computador. A interface será o componente que requisita esses dados e os recebe para posterior processamento. O microcontrolador é o meio que permite que a interface possa fazer essa requisição, solicitando esses dados ao sensor.

O sensor MLX 90621 (ver Fig 4.19) é um dispositivo de medição de temperatura de objetos sem a necessidade de contato, produzido pela Melexis, empresa de origem Belga que produz soluções utilizando semicondutores microeletrônicos. O MLX 90621 possui a capacidade de realizar leituras de regiões térmicas do ambiente e objetos produzindo uma matriz térmica da leitura do infravermelho emitido com tamanho de 4 *pixels* de altura por 16 *pixels* de largura, totalizando a formação de 64 *pixels* térmicos registrados pelo sensor em uma única leitura. Ele apresenta tamanho compacto, utilizando encapsulamento TO39, possuindo calibração de fábrica, onde os parâmetros de calibração são registrados na memória EEPROM no interior do sensor. É possível através dele realizar leituras de temperaturas do ambiente que variem de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $85^{\circ}\text{C}$ , e temperaturas de objetos com variação de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $300^{\circ}\text{C}$ . Esse sensor possui 3 modelos, cujas variações ocorrem no campo de visão de leitura do sensor. Ele possui campos de visão de  $120^{\circ} \times 25^{\circ}$ ,  $60^{\circ} \times 16^{\circ}$  e  $40^{\circ} \times 10^{\circ}$ . Esses campos de visão se referem basicamente a angulação de leitura do sensor no sentido horizontal e vertical, respectivamente. Ele possui diversas aplicações como identificação de fugas térmica em casas, sistema de controle térmico de condicionamento de ar em automóveis, *scanners* térmicos, portões de segurança, localização de pessoas e detectores de presença. O sensor utilizado nesse projeto possui um ângulo de visão de

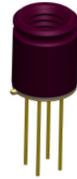


Figura 4.19: Sensor Melexis 90621. Fonte: (MELEXIS, 2016)

$40^\circ \times 10^\circ$ .

Internamente, o sensor MLX 90621 possui dois chips que se comunicam para realizar a leitura e formação da matriz térmica (ver Fig. 4.20). O primeiro chip possui o encapsulamento de uma matriz de 64 termopilhas, estruturas utilizadas para leitura da radiação infravermelha vinda do meio externo. Posteriormente a captação desses dados no ambiente, essas informações passam por um filtro de condicionamento de sinal e armazenados na memória RAM do sensor para serem utilizados por quaisquer dispositivos que requeiram esse tipo de informação do sensor. Ele possui também uma *interface* I2C, responsável pela transferência de dados do sensor para qualquer dispositivo que utilize o mesmo protocolo de comunicação e um regulador de voltagem, responsável pela estabilidade do sinal elétrico de alimentação de uma fonte externa. Esse regulador é importante, pois o sensor trabalha com uma voltagem mínima e máxima de 2,5 e 3,3 volts, respectivamente. Qualquer sinal elétrico acima de 3,3 volts pode danificar o sensor de forma permanente. A memória EEPROM é utilizada para guardar as informações referentes a calibração do sensor, sendo utilizado como parâmetro de cálculo pelo sensor para estabelecer a temperatura final de cada informação de infravermelho captado por cada termopilha.

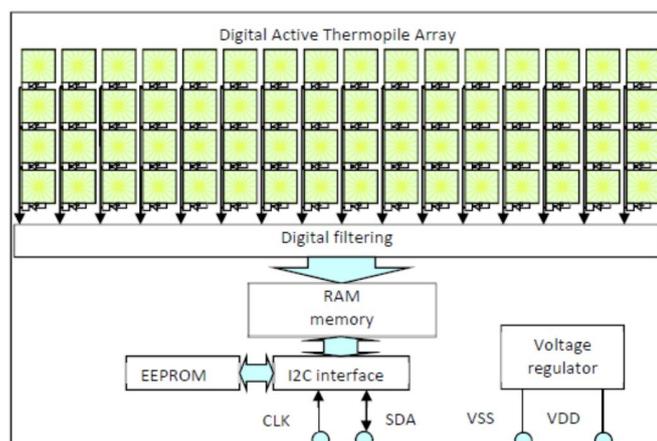


Figura 4.20: Estrutura interna do sensor Melexis 90621. Internamente, o sensor Melexis 90621 possui um conjunto de termopilhas para a recepção da radiação e uma estrutura eletrônica que permite a filtragem dos dados, armazenamento de informações e meio físico para comunicação com periféricos externos. Fonte: (MELEXIS, 2016)

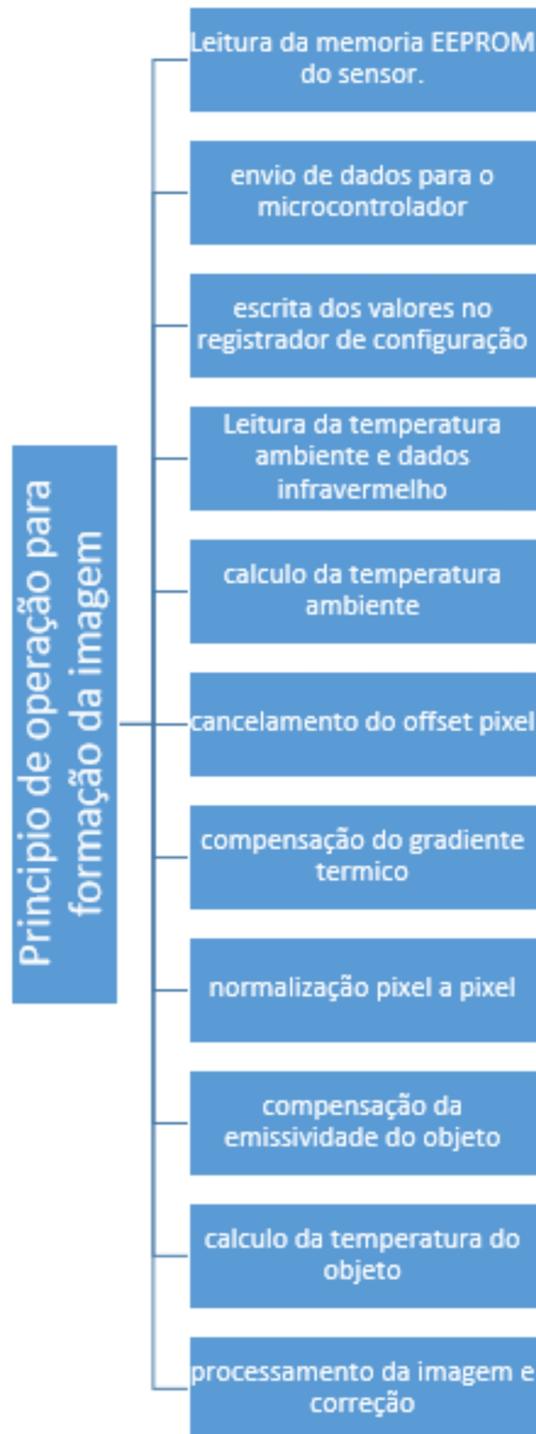


Figura 4.21: Processo de formação da imagem pelo sensor.

O processo de produção de uma matriz térmica pelo sensor MLX 90621 é composto de várias etapas como pode ser visto no diagrama da Fig. 4.21.

Primeiramente é feito a leitura na memória EEPROM do sensor, onde contém as constantes de calibração que serão utilizadas em cálculos posteriores e configuração do dispositivo. Após a leitura dos dados da memória EEPROM do sensor, esses dados são enviados para a memória RAM do microcontrolador para possibilitar um rápido acesso desses parâmetros no processo de cálculo para formação da matriz térmica  $16 \times 4$ . O sensor MLX 90621 pode receber parâmetros de configuração que mexem com a resolução dos dados recebidos pelo sensor, que variam entre 15 e 18 bits; taxa de atualização de quadros da imagem térmica capturada, que variam entre 0,5Hz a 512Hz, além de muitos outros parâmetros que irão interferir na forma como o sensor está sendo utilizado na produção da imagem. Após os dados serem enviados para a memória RAM do microcontrolador, é feito a escrita do registrador de 16 bits que contém os valores de configuração do sensor para verificar em que parâmetros o sensor deve funcionar. Posteriormente a essa escrita, é iniciado a leitura dos dados de medição do sensor para a formação da imagem.

A medição da temperatura ambiente absoluta é realizada por um sensor PTAT integrado ao chip do MLX 90621. Após a transferência dos dados para a memória do microcontrolador, é feita a leitura da temperatura absoluta do ambiente e leitura dos dados referente ao infravermelho capturado pelas termopilhas. A leitura dos dados sobre o infravermelho pode ser feita pixel a pixel, linha a linha, coluna a coluna ou pelo envio dos dados de uma só vez. A melhor maneira de realizar a leitura desses dados aproveitando a velocidade da taxa de atualização de quadros é através do envio dos dados com um todo. Posteriormente a essa leitura, segue-se um conjunto de cálculos até a formação da imagem térmica. A saída do sinal infravermelho é relativa a temperatura da junção fria, e por isso torna-se necessário conhecer a temperatura ambiente para a temperatura do objeto. Para realizar o cálculo da temperatura ambiente utiliza-se a temperatura absoluta do sensor PTAT e parâmetros armazenados na memória EEPROM do sensor que foram transferidos para o microcontrolador. Após a obtenção da temperatura ambiente, segue-se uma serie de cálculos que levam a obtenção da temperatura do objeto a ser medido. Todo esse processo é feito pixel a pixel até a formação da matriz térmica composta com 64 regiões com suas respectivas temperaturas.

#### 4.3.1 Posição dos *pixels* e campo de visão

A matriz do sensor MLX 93621 consiste em 64 sensores de infravermelho (termopilhas), também chamados de *pixels*, onde cada *pixel* é identificado com uma posição de intersecção entre linha e coluna da matriz (ver Fig. 4.22). O pino de referência é utilizado como guia para verificar a posição da matriz como um todo em relação ao posicionamento do sensor. É interessante observar que matriz térmica cresce ou diminui conforme a distância do sensor em relação ao objeto. Essa particularidade interfere no tamanho da área do *pixel* a ser medido. O modelo  $40^\circ \times 10^\circ$  foi escolhido para esse projeto por ter uma menor angulação tanto na horizontal quanto na vertical, possibilitando uma região menor para o pixel e, conseqüentemente, uma maior quantidade de informações em relação a área total a ser lida para formação da imagem.

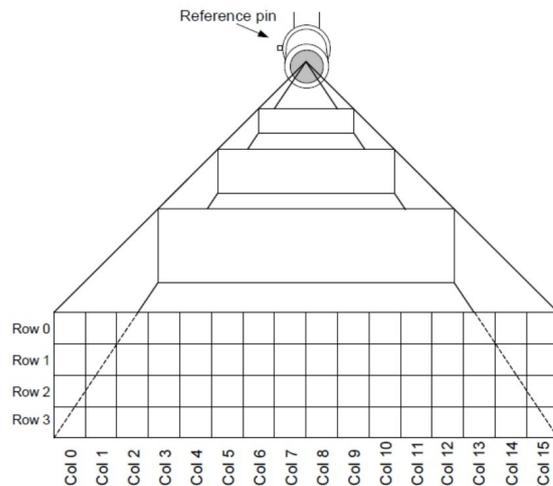


Figura 4.22: Posição dos *pixels* do sensor. A matriz térmica possui 64 regiões que se encontram divididas entre 4 linhas e 16 colunas. Cada região é representada com uma linha e coluna na área de alcance do sensor. Essa área sofre variação de tamanho conforme a distância entre a região de leitura e sensor. Fonte: (MELEXIS, 2016)

Outro fator a se observar é o posicionamento do sensor no momento da leitura em relação ao objeto que está sendo lido (ver Fig. 4.23). A posição do sensor onde se obtém maior sensibilidade é aquela formada com um ângulo de  $90^\circ$  em relação ao objeto que está sendo lido. Rotações tanto para a direita como para a esquerda no campo de visão, no momento da leitura, reduzem a sensibilidade do sensor na captura das informações e conseqüentemente reduzindo a confiabilidade na formação da matriz térmica.

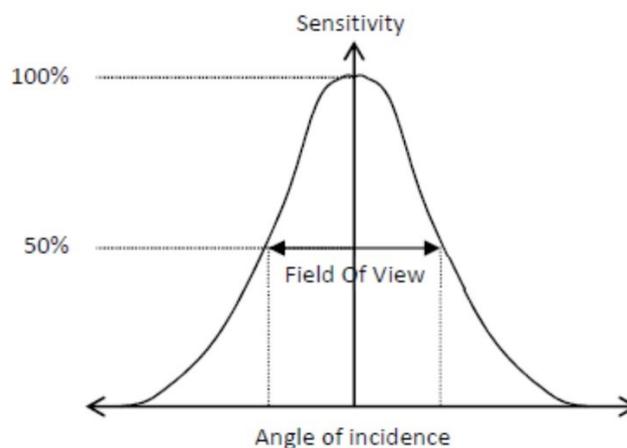


Figura 4.23: Sensibilidade do sensor. A efetividade de leitura do sensor está relacionada ao seu ângulo de incidência sobre o objeto. Sensor posicionado a  $90^\circ$  em relação ao objeto possui sensibilidade de 100%. Ângulos menores reduzem a sensibilidade do sensor. Fonte: (MELEXIS, 2016)

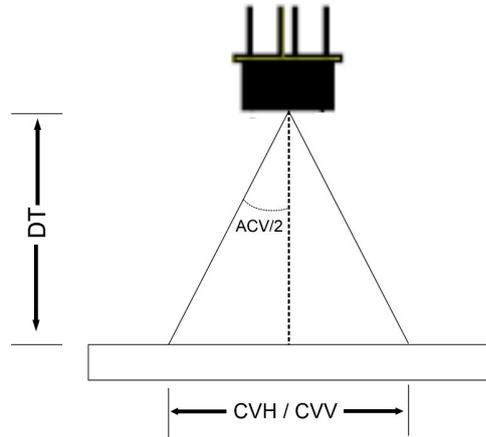


Figura 4.24: Distância entre o sensor e sua região de leitura.

Fonte: (MELEXIS, 2016)

Um parâmetro importante a se considerar nesse projeto é o campo de visão captado pelo sensor. O campo de visão é basicamente a área que é percebida pelo sensor no momento da leitura. Esse é um fator determinante para se conhecer como o sensor irá se deslocar ao longo do percurso do protótipo e a área necessária para a leitura do objeto. A determinação do comprimento do campo de visão (CVH), assim como sua largura (CVV), tem como parâmetros de cálculo a distância entre o sensor e a base de leitura (DT) e o ângulo do campo de visão do sensor (ACV) (ver Fig. 4.24). O ângulo do sensor é de  $40^\circ$  referente ao campo de visão horizontal e  $10^\circ$  referente ao campo de visão vertical. A distância do sensor para objeto é medida pelo sensor ultrassônico HC-SR04 localizado ao lado da posição do sensor térmico. Esse sensor possui um erro de 3 milímetros, podendo realizar medições até uma distância de 4 metros. Esse sensor utiliza pulsos de alta frequência que se propagam a velocidade do som, onde a reflexão desse pulso no objeto, junto com o tempo em que esse fenômeno ocorre, são utilizados como dados para a mensuração da distância desse objeto até o sensor. Esse sensor pode informar distância com precisão de décimos de milímetros, satisfazendo sua utilização nesse quesito da construção do protótipo.

A compreensão do cálculo do campo de visão horizontal e vertical do sensor é fundamentado em relações trigonométricas. Sabendo-se que os ângulos do campo de visão do sensor possuem  $40^\circ$  horizontal e  $10^\circ$  vertical, então:

$$CVH(mm) = 2 \cdot DT \cdot \tan \frac{ACV(^{\circ})}{2}, \quad (4.22)$$

$$CVV(mm) = 2 \cdot DT \cdot \tan \frac{ACV(^{\circ})}{2}. \quad (4.23)$$

A distância do sensor para a base do protótipo é de 153 mm. A tangente de  $20^\circ$  é 0,36397, e a tangente de  $5^\circ$  é 0,087489. Assim:

$$\begin{aligned} CVH &= 2 \cdot 153 \cdot 0,36397 \rightarrow CVH = 111mm, \\ CVV &= 2 \cdot 153 \cdot 0,087489 \rightarrow CVV = 27mm. \end{aligned} \quad (4.24)$$

Através desses cálculos é possível afirmar que a uma distância de 153mm entre o sensor e a base do protótipo, tem um campo de visão horizontal de 111mm e um campo de visão vertical de 27mm. Esse é um dimensionamento teórico a respeito do campo de visão do sensor.

Na busca de se comprovar que os cálculos realizados condizem com a realidade, foram feitos testes utilizando um corpo de prova sensível ao sensor para verificar o campo de visão real do sensor no dispositivo DMT. O testes realizados buscam verificar se o campo de visão através de dimensionamento teórico condiz com a realidade. Os dedo da mão humana foi utilizado como corpo de prova, visto que sua temperatura se mantém constante, e conseqüentemente sua emissão de radiação infravermelha também, tornando a leitura de fácil visualização sem o risco de variação ao longo do tempo. Tomando a ponta do dedo como delimitador de área, buscou-se verificar metricamente os limites do campo de visão real do sensor (ver Fig. 4.25). Enquanto que o campo de visão teórico horizontal do sensor apresentou 111 milímetros, o campo de visão medido através de experimento foi de 109 milímetros. O campo de visão teórico vertical apresentou 27 milímetros, enquanto que o campo de visão medido foi de 28 milímetros. Esse experimento mostrou que o calculo teórico do campo de visão possui equivalência com a medição do campo de visão proporcionado pelo sensor, respeitando erros de medição e a delimitação térmica do sensor, visto que a percepção de uma imagem térmica não possui contornos aparentemente definidos e temperaturas constantes ao longo de um corpo de prova, sendo incapaz de produzir contornos aparentes para verificação dos limites do campo de visão do sensor de forma precisa.

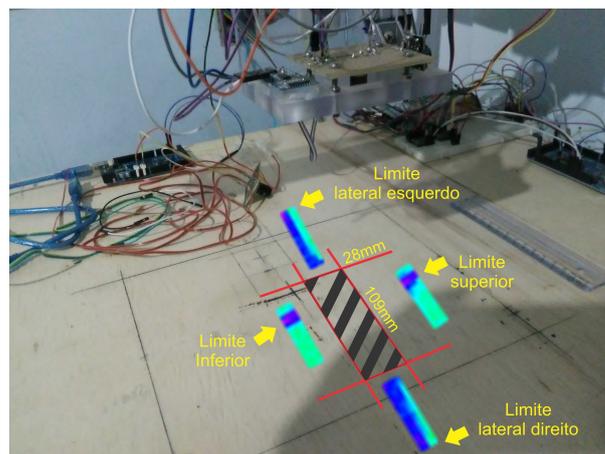


Figura 4.25: Campo de visão real do sensor Melexis 90621. A área hachurada apresenta a campo de visão real do sensor. As linhas vermelhas representam as limitações e marcações na medição. As imagens térmicas apresentadas expressam os limites utilizando o dedo de mão humana como objeto capaz de perceber os limites apresentados. O campo de visão real possui 28mm de verticalidade e 109mm de horizontalidade.

### 4.3.2 Precisão do sensor

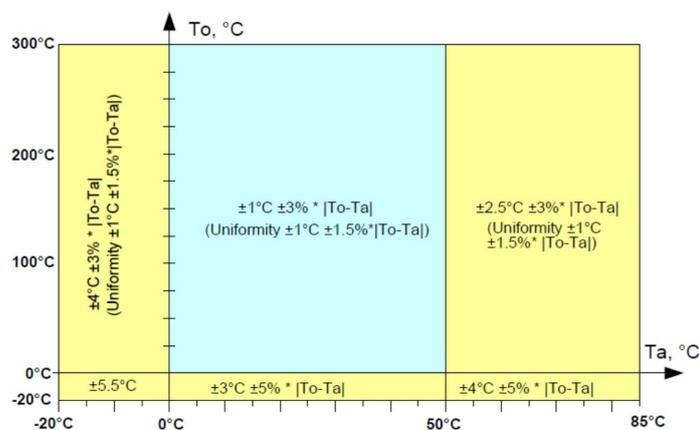


Figura 4.26: Precisão do sensor para diferentes temperaturas. A precisão do sensor está relacionada as temperaturas ambiente e do objeto. De acordo com esses fatores, pode ocorrer uma variação na precisão de leitura do sensor. Fonte: (MELEXIS, 2016)

Segundo o fabricante, a precisão do sensor está relacionada a temperatura do ambiente e a temperatura do objeto medido (ver Fig. 4.26). Esses dois parâmetros informam a variação da precisão em diferentes condições de temperatura ambiente, assim como variações na temperatura do objeto. Caso as medições dos objetos tenham variações de temperatura entre  $0^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$ , tendo como temperatura ambiente  $25^\circ\text{C}$ , a precisão assegurada pelo fabricante para essa aplicação é de mais ou menos  $1^\circ\text{C}$  ou mais ou menos 3% entre a diferença da temperatura do objeto e temperatura ambiente para os quatro *pixels* centrais do sensor e mais ou menos  $1^\circ\text{C}$  ou mais ou menos 1,5% da diferença entre a temperatura do objeto e a temperatura ambiente para o restante dos *pixels*.

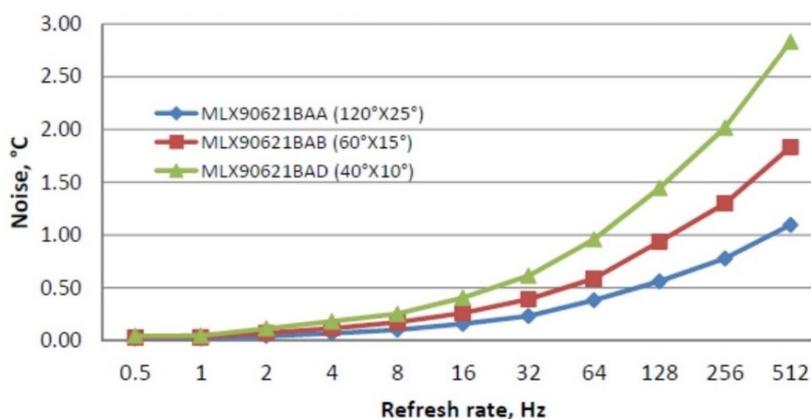


Figura 4.27: Resolução para os 4 *pixels* centrais. A resolução do sensor cresce conforme aumenta-se o número de quadros por segundo do sensor. a resolução está relacionada ao contraste das cores na imagem térmica. Essa figura refere-se aos 4 *pixels* centrais do sensor.

Fonte: (MELEXIS, 2016)

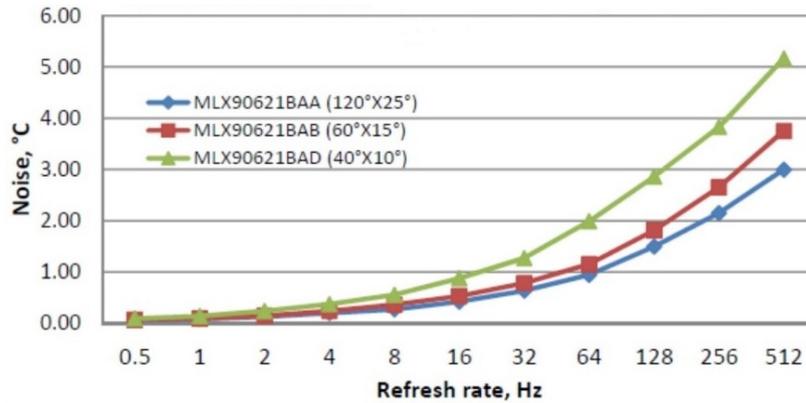


Figura 4.28: Resolução para os *pixels* restantes. Essa figura refere-se a resolução dos *pixels* do sensor na matriz térmica retirando os 4 *pixels* centrais.

Fonte: (MELEXIS, 2016)

Além da precisão do sensor, existe um outro parâmetro importante a ser usado como garantia para confiabilidade dos dados a serem coletados e a imagem final produzida. Esse parâmetro é o *Noise Equivalent Temperature Difference* (NETD). O NETD é um parâmetro que está relacionado a resolução do sensor. A resolução é a percepção que o sensor tem quando ocorre uma mudança de temperatura. Esse parâmetro possibilita um maior contraste e diferenciação de cores na imagem térmica. O sensor MLX 90621 possui resoluções que variam de 0°C até 3°C, a depender da taxa de atualização de quadros que esteja sendo utilizada para realização da leitura. A taxa de atualização de quadros que será utilizado nesse projeto é 4 Hz. Nessa frequência, é possível ter uma resolução de 0,2°C (ver Fig. 4.27 e 4.28). A princípio, a escolha por menores frequências apresenta-

Tabela 4.8: Parâmetros de configuração do sensor.

Temperatura Ambiente	25°C
Tensão de alimentação do sensor	2,6 volts (melhor performance do sensor)
Taxa de atualização de quadros	4Hz
Resolução dos dados do sensor	18 bits
Ângulo de leitura	90° (100% da sensibilidade do sensor)
Tipo de leitura dos dados infravermelhos	Leitura de toda matriz por vez
Resolução	0,2°C
proteção	Utilização de capacitor de 100 $\eta$ f para redução do ruído no sinal elétrico de alimentação do sensor.

riam leituras mais lentas, enquanto que frequências maiores tornariam as resoluções mais altas, reduzindo o contraste de cores nas imagens térmicas, tornando-as ineficazes para a resolução que se pretende utilizar nesse projeto.

Parâmetros ambientais, elétricos e de configuração do sensor (ver Tabela 4.8) foram escolhidos no intuito de possibilitar uma melhor performance na leitura dos dados.

### 4.3.3 Esquemático do sensor

Segundo o fabricante, o sensor pode ser alimentado com uma tensão que pode variar entre 2,5 volts a 3,3 volts. O fabricante também informa que o melhor desempenho do sensor é alcançado quando a sua tensão de alimentação fica em torno de 2,6 volts. Acima de 2,7 volts, é necessário aplicar um algoritmo de compensação para ajustar a leitura da temperatura. No intuito de tornar a leitura da temperatura confiável, buscou-se alimentar o sensor com uma tensão de 2,6 volts. A menor tensão disponível no microcontrolador para alimentação é de 3,3 volts. Para se criar uma tensão de 2,6 volts, através do sistema elétrico de alimentação do microcontrolador, foi necessário a utilização de um diodo de silício. O diodo utilizado é o 1N4007. O diodo ao ser percorrido por uma corrente acaba ocasionando uma queda de tensão que varia em média de 0,7 volts nos diodos de silício (ver Fig. 4.29). Utilizando esse conhecimento dos dispositivos semicondutores tornou-se possível alimentar a sensor com a tensão desejada. A esse circuito foi adicionado um capacitor eletrolítico de 100 nano Faraday como forma de evitar ruídos no sistema de alimentação, assegurando seu funcionamento e estabilidade elétrica.

A comunicação I2C com o microcontrolador necessita de resistores *pullup* ligados aos pinos de comunicação. Esses resistores são necessários para melhorar a estabilidade da transferência de dados. O valor mínimo do resistor foi calculado de acordo com informações do *datasheet* do microcontrolador, e é dado por

$$R = \frac{VCC - 0.4v}{3mA}, \quad (4.25)$$

onde o vcc será a tensão de 3,3 volts, resultando em um valor mínimo de 967 ohms para o resistor *pullup*. O resistor escolhido para *pullup* terá o valor de 4700 ohms.

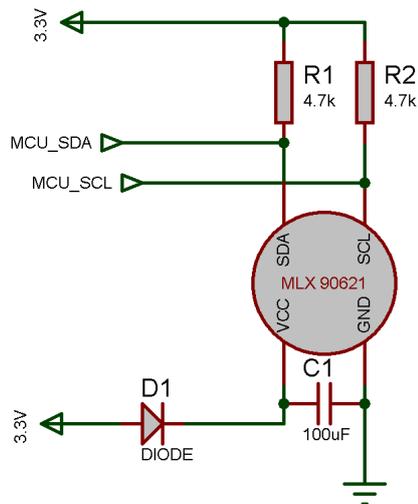


Figura 4.29: Esquemático do sensor MLX 90621. O esquema elétrico do sensor possui uma alimentação do 3,3 volts com diodo (D1). Os canais *MCU\_SDA* e *MCU\_SCL* são responsáveis pela comunicação I2C com microcontrolador. R1 e R2 são resistores *Pullup* e C1 representa o capacitor para estabilizar eletricamente o sensor.

Tabela 4.9: Quadro comparativos dos sensores

SENSOR	MATRIZ	FOV ( <i>Field of view</i> )	PREÇO
MLX 90621	16 × 4	40° × 10°	\$ 39.33
PANASONIC AMG8833	8 × 8	60° × 60°	\$ 22.16
OMRON D6T-44L-06	4 × 4	44,2° × 45,7°	\$ 24.21

O sensor Melexis foi escolhido por possuir um melhor custo benefício entre os 3 sensores apresentados (ver Tabela 4.9). Ele produz uma matriz térmica maior, sendo possível capturar uma maior quantidade de dados com um campo de visão menor. Entre os três sensores, possui um preço mais elevado, mas possui um melhor benefício quanto ao resultado esperado com relação a resolução da imagem visto que é possível, com ele, capturar uma maior quantidade de informação em relação aos outros sensores, graças ao seu campo de visão ser menor que os demais.

#### 4.4 INTERFACE

A interface homem-máquina foi criada para facilitar a utilização do protótipo e visualizar todo o processo ocorrendo em tempo real. Conforme ilustrado na Fig. 4.30, ela é composta de botões que são utilizados para chamar algum processo-chave, campos onde é necessário colocar alguma informação com o intuito de tornar todo o processo de formação da imagem mais dinâmico e campos de visualização de informações, onde é possível verificar o que está ocorrendo em determinado processo que está sendo executado. Cada campo enumerado apresenta uma função específica para o controle e compreensão de como

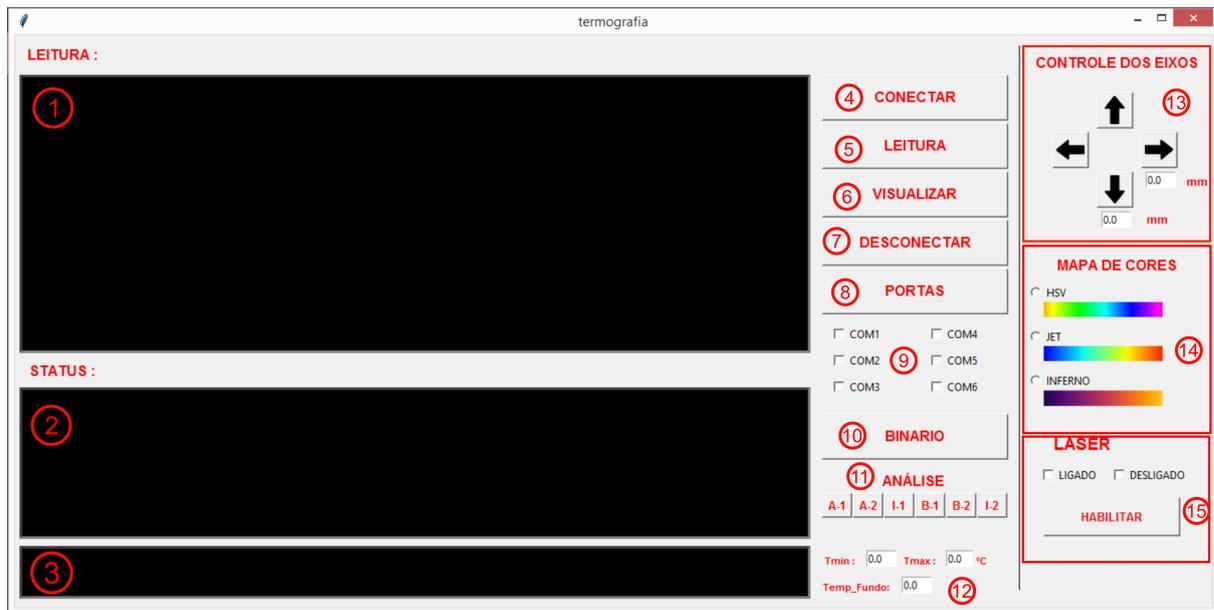


Figura 4.30: Interface para formação de imagem térmica.

ocorre a interação pela *interface*. Será conceituado cada componente, enumerando-os e mostrando sua função no funcionamento do protótipo.

1. A tela de exibição leitura informa todas as leituras que estão sendo feitas pelo sensor de temperatura no momento que o botão leitura estiver sendo pressionado.
2. A tela de exibição status mostra todas informações concernentes ao andamento do programa, assim como situações que podem ser previstas no momento em que os botões estiverem sendo pressionados.
3. A tela de exibição 3 apresenta informações auxiliares para melhor configuração e visualização da imagem térmica. Nela é apresentada informações como a temperatura média, temperatura mínima e temperatura máxima do conjunto de dados capturados pelo sensor térmico. Eles podem ser utilizados para preencher o campo 12, sendo utilizados nos campos  $T_{min}$ ,  $T_{max}$  e  $Temp\_fundo$ .
4. O botão conectar realiza a conexão do protótipo com o computador através da criação de canal para comunicação serial que ocorrerá por meio da porta USB do computador com o microcontrolador. Ele só conseguirá estabelecer uma comunicação com sucesso após os componentes 7 e 8 estiverem sido executados e marcados.
5. O botão leitura realiza a leitura da temperatura do objeto pelo sensor e realiza a transferência dos dados produzidos pelo sensor, passando a exibi-los na tela de exibição leitura. Uma vez executado, ele só poderá ser executado novamente após o término da leitura atual. Esse processo não pode ser interrompido.

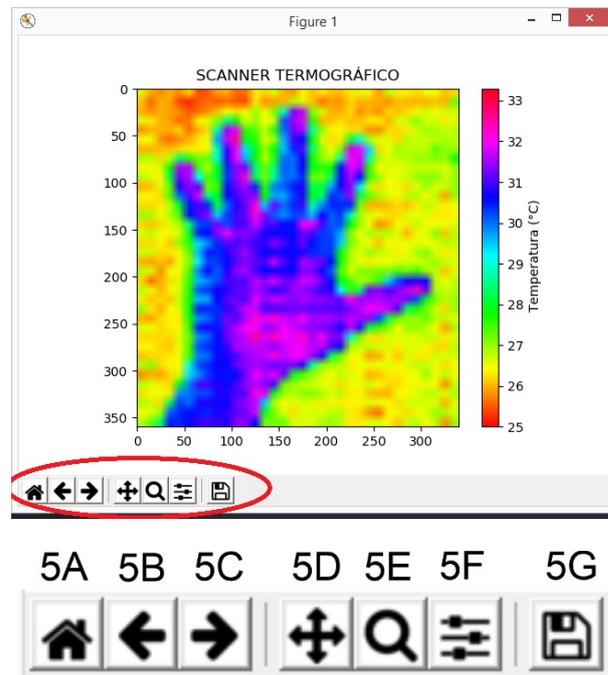


Figura 4.31: Janela executada pelo botão visualizar junto com suas opções.

6. O botão visualizar permite visualizar a imagem térmica formada através dos dados de leitura do sensor. Junto com a janela exibida, existem opções que podem ser utilizadas para alterar a visualização da imagem e salvar a mesma caso seja necessário. O botão 5A retorna a versão original de visualização caso seja feita alguma alteração pelos botões restantes. Os botões 5B e 5C não apresentam função nessa aplicação visto que não existem imagens em sequência que possam ser exibidas. O botão 5D permite movimentar ou ampliar a imagem de acordo com os botões do mouse que estão sendo pressionados. O botão 5E realiza a função de aumentar a imagem caso seja selecionado. O botão 5F altera os componentes de visualização da janela apresentada. O botão 5G realiza a opção de salvar a imagem apresentada com nome a ser definido pelo usuário, assim como local onde se deseja salvar a imagem (ver Fig. 4.31).
7. O botão desconectar desfaz a conexão que foi estabelecida pelo botão conectar. Após o botão desconectar ser pressionado, é necessário que o botão conectar seja acionado novamente para que ocorra a criação de uma nova conexão entre o protótipo e o computador.
8. O botão portas informa na tela de exibição status em que porta o protótipo está conectado. Esse botão é necessário porque a porta pode ser modificada a depender do computador que esteja sendo usado. Para não ser necessário mexer no algoritmo do programa para modificar a porta, esse botão de verificação foi criado. Antes de executar o botão conectar, é necessário saber que porta está sendo utilizada e

informar a *interface* para que a porta seja selecionada.

9. A área de seleção informa a porta que irá ser utilizada para realizar a conexão entre o protótipo e o computador. Para saber qual porta será selecionada, é necessário executar o botão portas antes.
10. O botão binário mostra imagens binárias dividida em três partes das imagens formadas no processo de leitura e formação da imagem. Ele é utilizado para fins didáticos, não sendo necessário ser executado para a formação e visualização da imagem. Esse botão reage de duas formas. Quando vc preenche o campo *Temp\_fundo*, ele utiliza essa informação para geração das imagens binárias. Caso esse campo não seja preenchido ele será direcionado para outro processo para formação das imagens binárias.
11. Os botões do campo análise são utilizados para marcação de ponto de referência para junção das imagens, encontro de convergência entre as três imagens e resultados parciais das imagens térmicas. O botão A-I faz a marcação do primeiro ponto de referência na imagem lateral direita. Todo esse processo é feito a partir de imagens binárias. O botão A-2 mostra o ponto de referência marcado na imagem lateral e os pontos semelhantes marcados na imagem central. Esse processo é feito com as imagens térmicas. O botão I-1 apresenta a junção da imagem central e lateral direita com os recortes feitos a partir dos pontos de referências dados. O botão B-1 apresenta o mesmo processo do botão A-1, utilizando dessa vez a imagem lateral esquerda e central. O botão B-2 realiza o mesmo processo do botão A-2, utilizando a imagem lateral esquerda e central. O botão I-2 apresenta a imagem formada pelos pontos referenciados nas imagens central e lateral esquerda, como o botão I-1.
12. Os parâmetros *Tmin* (temperatura mínima) e *Tmax* (temperatura máxima) são campos que precisam ser preenchidos pelo usuário para que a imagem possa ser visualizada de forma correta. Esses parâmetros são utilizados para estabelecer os limites do mapa de cor mostrado na visualização a imagem. O parâmetro *Temp\_fundo* representa uma temperatura de referência para produção da imagem binária. Para o preenchimento desse parâmetro, é interessante colocar a temperatura média de toda leitura, que é mostrada na tela 3 após o termino da leitura do objeto.
13. O controle dos eixos está diretamente relacionado ao controle do deslocamento dos eixos X e Y do protótipo, realizando sua movimentação através de distancias pré-estabelecidas. Para ocorrer a movimentação do eixo, se faz necessário digitar a distância, em milímetros, a ser percorrida pelo eixo e acionar através do pressionar do botão a direção a ser movimentada. O eixo horizontal do controle realiza movimentos no eixo principal do protótipo, enquanto que o eixo vertical é capaz de movimentar o eixo responsável pela unidade sensora.
14. Através desse campo é possível escolher o mapa de cores que será utilizado para gerar a imagem térmica. É necessário apenas selecionar o tipo de mapa desejado

antes de realizar a visualização da imagem. Os mapas de cores que podem ser utilizados são hsv, jet e inferno.

15. O campo *laser* é responsável por ligar e desligar o laser embutido na unidade sensora. Para liga-lo ou desliga-lo, escolhe-se a opção desejado e pressiona o botão habilitar logo abaixo a região de seleção.

#### 4.4.1 Aquisição da imagem térmica

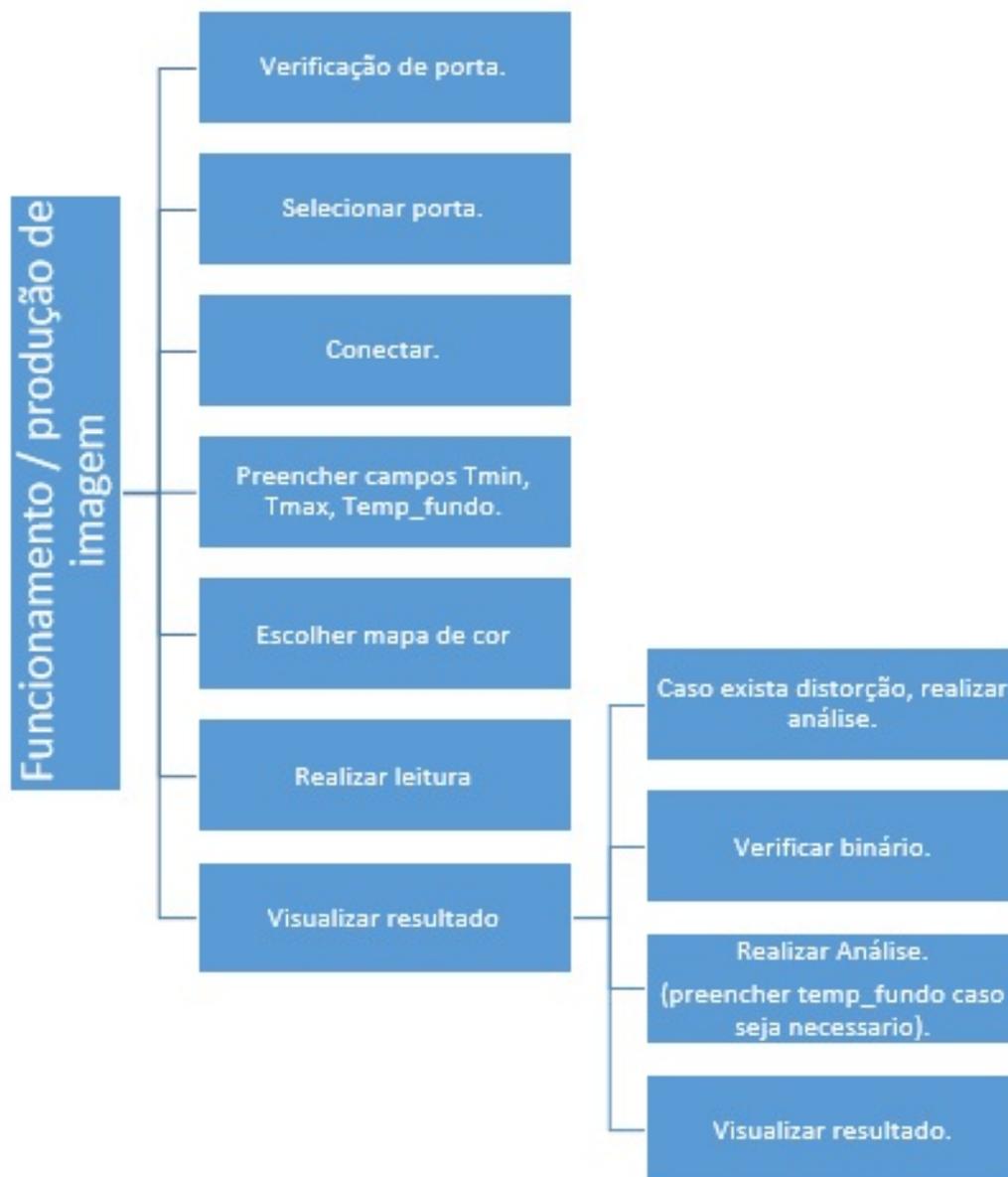


Figura 4.32: Sequência de passos para funcionamento do sistema.

A geração e visualização da imagem através da *interface* obedece a alguns passos e procedimentos (ver Fig. 4.32). Primeiramente, é necessário conectar o protótipo ao computador na qual está instalado a *interface*. É comum que um computador venha com diversas portas USB em sua estrutura. Através do botão portas, a *interface* informa em que porta é necessário conectar. Diante dessa informação, seleciona a porta informada e pressiona o botão conectar. A conexão realizada permite que o computador troque informações e comandos com o protótipo. Caso necessite que essa conexão seja desfeita, é só pressionar o botão desconectar. Caso queira conectar novamente, é só repetir todo o processo de conexão descrito anteriormente.

A visualização da imagem térmica necessita de alguns parâmetros para poder ser gerada. Esses parâmetros são a temperatura mínima, temperatura máxima e temperatura de fundo. As **temperaturas mínimas e máximas** referem-se aos limites estabelecidos para os mapas de cores no processo de visualização da imagem. Sem esses parâmetros de temperatura, não será possível visualizar a imagem térmica, visto que seu mapa de cor não possui limite de visualização de cor. A **temperatura de fundo** é um parâmetro opcional do usuário. Ao utilizá-lo, o usuário irá realizar o processo de produção de imagem binária através do valor informado nesse campo. Caso ele permaneça como o valor 0.0, o sistema entende que o usuário resolveu realizar o processo de binarização da imagem através do processo de *threshold*. O próximo passo é escolher o mapa de cores que o usuário quer utilizar na produção da imagem térmica. Após a configuração desses parâmetros, já é possível realizar a leitura do objeto a ser digitalizado termicamente. Para que isso ocorra, é necessário pressionar o botão leitura para realizar a captura dos dados pelo sensor. Quando a leitura estiver finalizada, basta apenas pressionar o botão visualizar para que seja mostrado em uma nova janela o resultado de todo o processo de captura, a visualização da imagem térmica produzida. Essa visualização é possível graças a pontos pré-definidos no sistema para junção das imagens na leitura do sensor.

Caso exista alguma distorção na imagem por falta de alinhamento entre as imagens produzidas pelo processo de leitura do sensor, é necessário realizar um processo de análise para produzir novos pontos para se criar uma nova junção entre elas. Esse processo será feito através dos botões no parâmetro análise. Esses botões devem ser executados em sequência, sem que exista nenhum salto entre eles a nível de execução. Posteriormente a essa análise, recorre-se ao botão visualizar para observar a imagem térmica resultante da análise dos pontos realizada pelo usuário.

## 4.5 CUSTO DO PROJETO

O custo do projeto, sumarizado na Tabela 4.10, é um dos fatores de maior relevância para sua idealização. A intenção desse trabalho foi tornar esse protótipo uma opção de baixo custo. O conceito de baixo custo é relativo, sem uma definição clara, podendo variar sua análise em relação a cada área e mercado, podendo encontrar pontos em comum que possam ser utilizados como parâmetros para se chegar a um conceito que satisfaça a condição de baixo custo. O conceito de baixo custo aplicado nesse projeto se fundamenta em três diretrizes bases:

- **Padronização de sua construção e funcionamento.** A padronização permite

Tabela 4.10: Custos dos componentes do projeto.

COMPONENTE	CUSTO (R\$)	LOCAL
Sensor MLX 90621	159,68 ( \$39.33 – dólar = 4,06 – 16/12/2019)	<a href="https://www.mouser.com/">https://www.mouser.com/</a>
Placas de policarbonato	120,00	<a href="https://www.mercadolivre.com.br/">https://www.mercadolivre.com.br/</a>
Perfis de alumínio	235,00	<a href="https://www.mercadolivre.com.br/">https://www.mercadolivre.com.br/</a>
Motores de passo (2 unidades)	61,56	<a href="https://pt.aliexpress.com/">https://pt.aliexpress.com/</a>
Correias e polias	28,05	<a href="https://pt.aliexpress.com/">https://pt.aliexpress.com/</a>
Roldanas (12 unidades)	35,56	<a href="https://pt.aliexpress.com/">https://pt.aliexpress.com/</a>
Cantoneiras	19,35	<a href="https://pt.aliexpress.com/">https://pt.aliexpress.com/</a>
Arduino (microcontrolador)	26,12	<a href="https://pt.aliexpress.com/">https://pt.aliexpress.com/</a>
Fonte chaveada 12v	37,76	<a href="https://pt.aliexpress.com/">https://pt.aliexpress.com/</a>
<i>Drivers</i> (2 unidades)	12,76	<a href="https://pt.aliexpress.com/">https://pt.aliexpress.com/</a>
Total -		735,84

que os insumos necessários para sua construção possam ser encontrados em diversos fornecedores, facilitando seu processo construtivo, afastando a dependência de uma única cadeia de produção para sua construção ou a utilização de componentes específicos e patenteados para sua montagem e operação.

- **Desempenhar sua função principal na qual ela foi idealizada.** Nesse projeto, a função principal a ser desempenhada seria a formação de uma imagem térmica, especificamente a imagem térmica da mão, componentes eletrônicos e produtos de pequeno porte.
- **Custo inferior a produtos que desempenhem a mesma função.** O custo é um importante fator a se considerar, e por isso terá um papel fundamental no aspecto comparativo com produtos presentes no mercado. Como não é possível estabelecer uma comparação direta, pois não existem produtos iguais ao protótipo do projeto, buscou realizar uma comparação baseada no preço de produtos, sua função principal e especificações técnicas semelhantes.

O valor final para a construção do protótipo foi de R\$ 735,84, podendo variar de acordo com os fornecedores e quantidade de componentes comprados. Por se tratar de um protótipo, utilizou-se diversos locais para compra dos insumos para construção do protótipo, sejam locais nacionais ou internacionais.

Os equipamentos escolhidos possuem configurações e preços diferenciados, sendo FLIR ONE PRO um modelo de entrada para a categoria, até modelos mais avançados como o FLIR E85, chegando a modelos com uma quantidade maior de recursos tecnológicos como o FLIR 1030sc. Utilizaremos esses modelos buscando estabelecer um aspecto comparativo em relação ao dispositivo DMT. Os parâmetros a serem considerados são a precisão na

Tabela 4.11: Comparativo das características das câmeras térmicas.

	FLIR ONE PRO	FLIR E85	FLIR 1030sc	DMT
Precisão	$\pm 3^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 5\%*(T_o-T_a)$	$\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 2\%*(T_o-T_a)$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 1\%*(T_o-T_a)$	$\pm 1^{\circ}\text{C}$ ou $\pm 3\%*(T_o-T_a)$
Sensibilidade	0,15 <sup>o</sup> C	0,04 <sup>o</sup> C	0,02 <sup>o</sup> C	0,2 <sup>o</sup> C (4 quadros por segundo)
Temperatura de medição	-20 <sup>o</sup> C a 400 <sup>o</sup> C	-20 <sup>o</sup> C a 120 <sup>o</sup> C	-40 <sup>o</sup> C a 150 <sup>o</sup> C	-20 <sup>o</sup> C a 300 <sup>o</sup> C
Resolução térmica	160 × 120	384 × 288	1024 × 768	320 × 360
preço	\$399,99 <sup>(1)</sup> – R\$1619,95 <sup>(3)</sup>	\$8,750.00 <sup>(1)</sup> – R\$5.437,50 <sup>(3)</sup>	31,664.00 <sup>(2)</sup> – R\$143.121,28 <sup>(4)</sup>	R\$735,84

(1)-<https://www.flir.com/> (2)- <https://www.testex.co.uk/> (3)- dólar – R\$ 4,05 – 27/12/2019 (4)-Euro– R\$ 4,52 – 27/12/2019

medição, sensibilidade térmica, temperatura de medição, resolução térmica e o preço (ver Tabela 4.11).

A precisão na medição da temperatura é um importante parâmetro, pois quantifica o quanto sua imagem térmica se aproxima do modelo real a ser digitalizado termicamente. Quanto menor for a precisão, melhor será a fidelidade na medição com relação a realidade, pois informa que o erro de medição terá uma faixa menor. Quanto menor a precisão, melhor será sua aproximação em relação a realidade. O DMT tem na precisão sua característica mais importante. Sob condições apropriadas de temperatura ambiente e do objeto, o DMT consegue entregar uma precisão mais alta do que a FLIR ONE PRO e a FLIR E85, possuindo o mesmo nível de precisão se comparada a FLIR 1030sc nesse quesito. Fora das condições apropriadas, pode apresentar uma precisão equivalente a FLIR ONE PRO, mas com um custo inferior.

A sensibilidade térmica é um fator que contribui para o contraste da imagem. Essa sensibilidade também pode ser chamada de resolução do sensor. As maiores sensibilidades se encontram nas câmeras FLIR E85 e FLIR 1030sc, tendo o DMT e a FLIR ONE PRO como dispositivos secundários nesse quesito. A sensibilidade da FLIR E85 e FLIR 1030sc se tornam fatores relevantes na medição de objetos com variações pequenas de temperatura, onde a sensibilidade seria um fator determinante para a qualidade da imagem. De uma forma geral, o DMT e a FLIR ONE PRO podem satisfazer nas aplicações que não dependam de captações de pequenas variações de temperatura, visto que sua sensibilidade são de 0,2<sup>o</sup>C e 0,15<sup>o</sup>C respectivamente. Variações menores que o DMT e a FLIR ONE PRO, necessitam de câmeras mais sensíveis, como a FLIR E85 e FLIR 1030sc. A temperatura de medição não apresenta um importante fator de comparação, buscando o usuário do equipamento aplicar os dispositivos de acordo com sua necessidade de medição. A resolução térmica está relacionada ao tamanho total da imagem. A FLIR ONE PRO apresenta a menor resolução, enquanto que o DMT possui uma resolução intermediária entre os modelos apresentados. A resolução se torna um fator relevante

quando torna-se necessário visualizar detalhes na imagem térmica em grandes objetos. A importância desse parâmetro está relacionado ao tamanho do *pixel* em relação a distância do sensor e do objeto a ser medido junto com o processamento realizado na imagem para sua visualização. No caso do DMT, essa resolução está sendo apresentada em uma área definida (20cm × 22cm) a ser percorrida pelo sensor. Esse parâmetro pode ser alterado para percorrer áreas maiores, apresentando resoluções maiores conseqüentemente. O DMT possui distância fixa do sensor, produzindo *pixels* de aproximadamente 0,7mm de altura e largura. Com relação ao custo, produtos com sensores com maior precisão, sensibilidade e resolução apresentam preços maiores. A vantagem do DMT em relação aos modelos apresentados é que ele possui uma alta precisão, se comparada a um dispositivo de alto custo como o FLIR 1030sc, uma resolução térmica melhor, se comparada ao FLIR E85 com um preço mais acessível. A única desvantagem é sua sensibilidade. O DMT seria uma opção de baixo custo em relação a seus benefícios em aplicações onde uma sensibilidade da temperatura não seja um fator determinante, não necessitando de sensibilidade inferior a 0,2°C. O protótipo apresentou um valor final de 735,84 reais, sendo útil em aplicações onde se faz necessário a produção de mapas de calor em pequenas áreas.

## PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

### Conteúdo

---

5.1	Funcionamento . . . . .	67
5.2	Sistema de movimentação . . . . .	72
5.2.1	Precisão do sistema de movimento . . . . .	72
5.2.2	Torque do sistema de movimento . . . . .	73
5.3	Formação da imagem . . . . .	74

---

O sistema DMT se comporta como um dispositivo de pequeno porte, com limitação do eixo Z, como nas impressoras 3D, máquinas CNC e *laser*. Esse capítulo apresentará a forma como ele se desloca, em relação aos 2 eixos, para coletar os dados ao longo da área útil disponível na superfície, apresentado as particularidades de seu sistema quanto ao descolamento e a forma como ele se comporta. Serão apresentadas também informações relacionadas a precisão da estrutura mecânica e os cálculos necessários a movimentação dos eixos, bem como o processo de formação da imagem, mostrando todas as etapas essenciais a produção da imagem térmica final.

### 5.1 FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento do protótipo está relacionado diretamente ao deslocamento dos eixos, conforme ilustrado na Fig. 5.1. A movimentação no eixo Y é responsável por deslocar todo o eixo X para realização da leitura a ser feita pela unidade sensora ao longo da área útil do protótipo, enquanto que o eixo X é responsável por movimentar a unidade sensora para realização da leitura em torno do objeto a ser medido. A área de medição é de 20 centímetros de largura por 22 centímetros de comprimento.

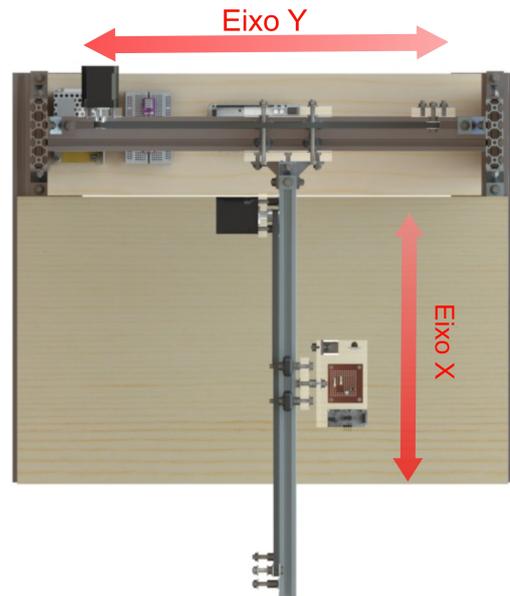


Figura 5.1: Direção dos eixos do protótipo. O DMT possui dois eixos para o deslocamento. O eixo X é responsável pela movimentação da unidade sensora, enquanto que o eixo Y é responsável por todo o deslocamento do eixo X.

A leitura para formação da imagem é realizada em 3 sentidos de leitura (ver Fig. 5.2). Cada sentido na movimentação do sensor realiza 17 leituras, sendo capturadas no total 51 imagens com resolução de  $16 \times 4$  pixels cada. Cada leitura para produção da imagem final é uma média de 4 leituras na mesma região devido à incerteza na medição do sensor. Isso é feito para se criar uma imagem mais homogênea e com menos variações na imagem final, facilitando a leitura da temperatura da imagem final (ver Fig. 5.3).

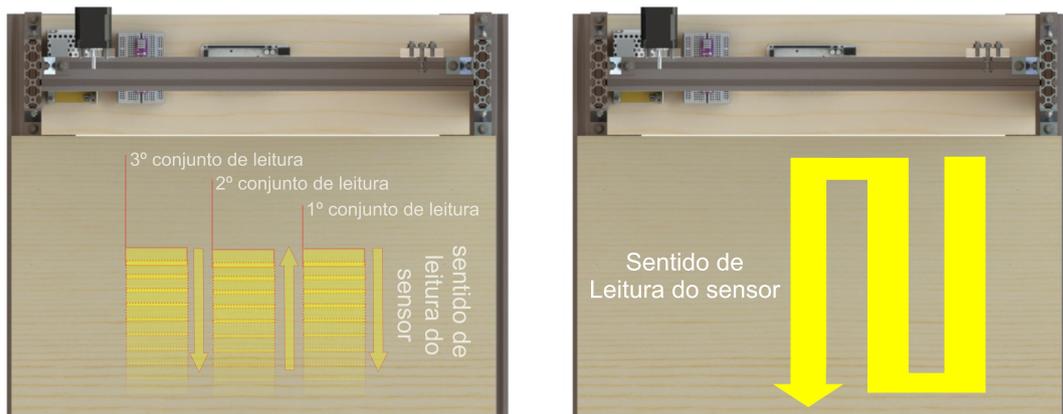


Figura 5.2: Região de leitura do sensor. O DMT realiza três regiões de leitura. Cada região é responsável pela formação de 1 imagem. As 3 imagens, resultante dessas regiões, sofrerão processamento para formação da imagem final.

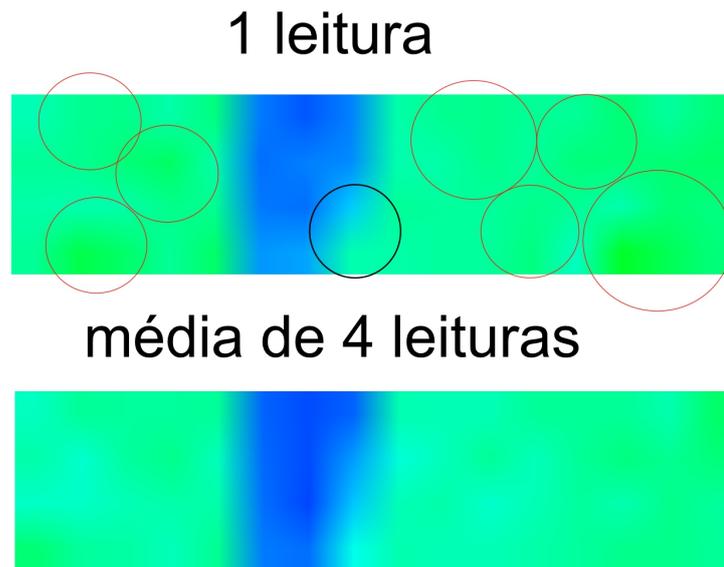


Figura 5.3: Comparação das imagens em relação as leituras. As áreas em círculo apresentam as melhorias que resultam da média das 4 leituras em relação a leitura única do sensor.

As imagens representadas na Fig. 5.3, produzidas com 1 leitura e uma média de 4 leituras, mostram uma melhora perceptível da formação da imagem final, tanto na temperatura de fundo, melhorando sua variação, tanto quanto na forma do objeto a ser medido, melhorando a percepção da forma na imagem.

A forma como o DMT se desloca para realização da leitura é algo a ser observado. Cada vez que o sensor se desloca para realizar uma leitura, sua distância de avanço é metade da distância da região lateral do sensor (ver Fig. 5.4). Isso permite que se crie uma região em comum, que será analisada no intuito de buscar uma posição segura na qual o sensor possa se deslocar sem que exista folga entre as leituras. A região A da primeira leitura possui uma razão de semelhança com a região B da segunda leitura. Estas não podem ser consideradas iguais, pois as regiões possuem variações de temperatura devido ao erro do sensor no momento da leitura. Como não é possível comparar as regiões sob o ponto de vista de imagens, já que não haveria um padrão entre eles para ser comparado, buscou-se utilizar os fundamentos da estatística descritiva e probabilidade na busca de estimar o grau de semelhança entre as leituras do sensor ao longo do seu percurso.

Na impossibilidade de reconhecer padrões nas imagens, buscou-se tratá-las como uma base de dados para se utilizar a estatística e probabilidade como ferramentas de comparação. Utilizou-se as regiões A e B (ver Fig. 5.4) como um conjunto de dados amostrais, tendo cada conjunto um total de 32 *pixels* de dados para comparação. Os elementos da estatística descritiva utilizadas nessa comparação foram a média, por ser um recurso que demonstra a concentração dos dados de uma amostra e a mediana, que também é uma medida de tendência central com a vantagem de que valores extremos em uma amostra não a afetam diretamente como afetaria a medição pela média. A probabilidade foi usada como ferramenta para identificar a probabilidade de semelhança entre duas amostras de

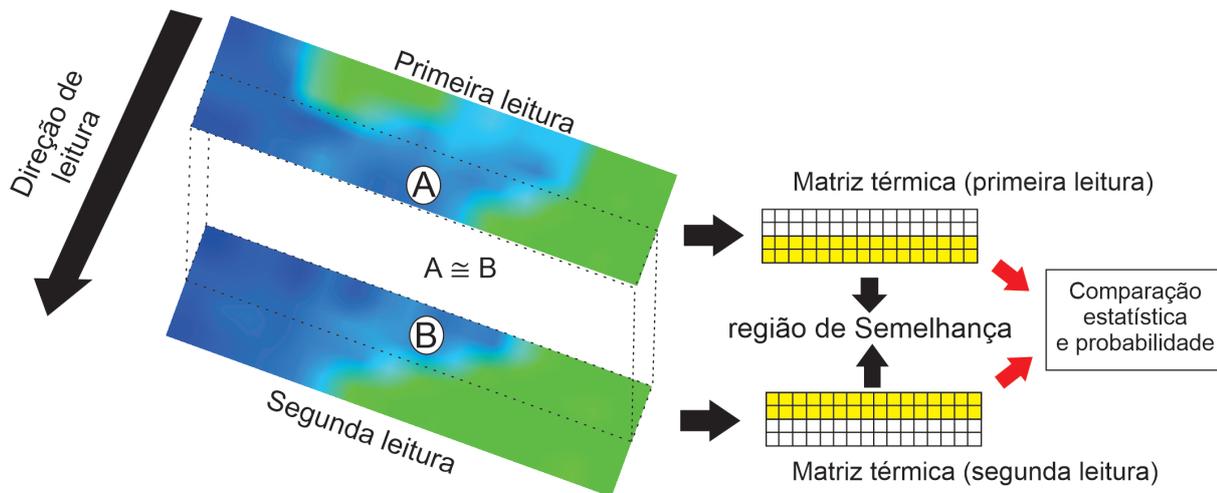


Figura 5.4: comparação das imagens em relação as leituras. As leituras do sensor são consecutivas e compreendem apenas a metade da área do campo de visão do sensor. Essa região em comum entre duas leituras é usada para estabelecer uma comparação a nível estatístico e probabilístico com o intuito de se conhecer o quanto essas regiões tem em comum.

leitura do sensor. Ela foi utilizada de forma a criar uma segmentação utilizando a mediana como parâmetro de corte. Após essa segmentação, foram comparadas as duas leituras de forma a encontrar os *pixels* semelhantes. A partir disso, encontrou-se a probabilidade entre duas amostras de medição térmica do sensor. L1 refere-se a primeira leitura e L2 a leitura posterior a L1. Lembrando que a amostra de dados refere-se a região de semelhança entre L1 e L2. Essas amostras foram retiradas das leituras capturadas pelo sensor (ver Fig. 5.6).

Tabela 5.1: Resultado dos dados térmicos da 1<sup>o</sup> – 17<sup>o</sup> leitura do sensor.

Média L1 (°C)	Média L2 (°C)	Mediana L1 (°C)	Mediana L2 (°C)	Varição das médias (%)	Varição das medianas (%)	Probabilidade (%)
27.1	26.8	26.7	26.5	1.0	0.8	81.2
26.8	27.3	26.5	26.8	1.6	1.3	100.0
27.3	27.5	26.8	27.0	1.1	0.6	93.8
27.5	27.5	27.0	26.8	0.4	0.7	100.0
27.5	27.2	26.8	26.7	1.1	0.4	93.8
27.2	27.6	26.7	27.0	1.8	0.9	100.0
27.6	27.9	27.0	27.1	0.9	0.6	100.0
27.9	27.6	27.1	26.7	1.1	1.7	87.5
27.6	27.4	26.7	26.6	0.7	0.2	87.5
27.4	27.9	26.6	26.8	1.8	0.9	100.0
27.9	28.1	26.8	26.9	0.7	0.2	100.0
28.1	27.8	26.9	26.5	0.8	1.3	87.5

27.8	27.5	26.5	26.5	1.0	0.0	87.5
27.5	27.8	26.5	26.7	1.0	0.6	93.8
27.8	27.9	26.7	26.8	0.3	0.4	87.5
27.9	27.8	26.8	26.5	0.3	0.9	93.8

Na Tabela 5.1, é possível observar que as médias e medianas possuem resultados com variação, em sua maioria, de no máximo  $0,5^{\circ}C$ , com uma variação máxima entre as médias de 1,8% e variação máxima da mediana de 1,7%. A probabilidade mínima de semelhança entre as amostras foi de 81,2%.

Tabela 5.2: Resultado dos dados térmicos da 18<sup>o</sup> – 34<sup>o</sup> leitura do sensor.

Média L1 ( $^{\circ}C$ )	Média L2 ( $^{\circ}C$ )	Mediana L1 ( $^{\circ}C$ )	Mediana L2 ( $^{\circ}C$ )	Variação das médias (%)	Variação das medianas (%)	Probabilidade (%)
27.5	27.8	26.4	26.7	0.8	1.1	87.5
27.8	27.9	26.7	26.8	0.3	0.4	75.0
27.9	27.8	26.8	26.5	0.3	0.9	93.8
27.8	27.4	26.5	26.2	1.2	1.0	93.8
27.4	27.6	26.2	26.6	0.7	1.3	81.2
27.6	27.8	26.6	26.8	0.5	0.8	81.2
27.8	27.8	26.8	26.5	0.0	0.9	75.0
27.8	27.4	26.5	26.3	1.1	0.8	75.0
27.4	28.0	26.3	27.3	1.8	3.8	50.0
28.0	28.3	27.3	28.0	1.3	2.2	75.0
28.3	28.2	28.0	27.5	0.5	1.6	56.2
28.2	28.1	27.5	27.5	0.3	0.0	68.8
28.1	28.7	27.5	28.5	2.0	3.5	75.0
28.7	28.9	28.5	28.8	0.9	1.2	75.0
28.9	28.8	28.8	28.6	0.2	0.7	75.0
28.8	28.7	28.6	28.5	0.6	0.4	75.0

Na Tabela 5.2 é possível observar o mesmo comportamento visto na Tabela 5.1 com relação a média e mediana. A variação máxima, em sua maioria, foi de  $0,5^{\circ}C$ , tendo 1,8% como alteração máxima entre as médias e 3,8% como variação máxima entre as medianas. A probabilidade mínima de semelhança é de 50%, apesar de ser pontual, contemplando apenas um único caso, e tendo 56,2 e 68,8 com características aproximadas. O restante possui taxa de assertividade superior a 75%. Essas variações para baixo foram causados pela variabilidade de algumas leituras de temperatura nas amostras.

Tabela 5.3: Resultado dos dados térmicos da 35<sup>o</sup> – 51<sup>o</sup> leitura do sensor.

Média L1 ( $^{\circ}C$ )	Média L2 ( $^{\circ}C$ )	Mediana L1 ( $^{\circ}C$ )	Mediana L2 ( $^{\circ}C$ )	Variação das médias (%)	Variação das medianas (%)	Probabilidade (%)
29.1	29.2	28.9	29.2	0.3	1.2	93.8

29.2	29.2	29.2	29.1	0.0	0.5	87.5
29.2	28.9	29.1	28.9	0.9	0.7	81.2
28.9	29.2	28.9	28.9	1.0	0.0	87.5
29.2	29.1	28.9	29.2	0.3	1.2	93.8
29.1	29.3	29.2	29.1	0.6	0.5	87.5
29.3	28.8	29.1	28.8	1.5	1.0	81.2
28.8	28.7	28.8	28.4	0.6	1.6	93.8
28.7	28.3	28.4	28.0	1.3	1.1	100.0
28.3	28.7	28.0	28.3	1.3	0.9	100.0
28.7	27.9	28.3	27.6	2.8	2.5	87.5
27.9	27.7	27.6	27.0	0.9	2.2	87.5
27.7	27.4	27.0	26.8	1.0	0.9	100.0
27.4	27.7	26.8	27.0	1.1	1.1	100.0
27.7	27.1	27.0	26.4	2.4	2.5	81.2
27.1	27.0	26.4	26.7	0.4	0.9	81.2

A Tabela 5.3 repete o mesmo comportamento das tabelas anteriores, apresentando uma variação máxima da média e mediana de 0,5% em sua maioria e variações máxima de 2,8% e 2,5% respectivamente. A taxa de assertividade mínima foi de 82,1%. As informações das tabelas mostram que existe uma relação de semelhança entre uma leitura e a leitura posterior feita pelo DMT visto que as variações percentuais das médias e medianas são baixas e a probabilidade entre os pares alcançou uma média de 86,46%.

## 5.2 SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO

### 5.2.1 Precisão do sistema de movimento

O motor de passo escolhido teve a configuração passo completo. Essa configuração informa que o motor irá funcionar em sua configuração normal, sem a adição de micro passos, ou seja, uma revolução do eixo do motor, uma volta completa, equivale a 200 passos. Conhecendo que a correia possui passo 2mm e polia possui 20 dentes, então é possível afirmar que

$$\frac{\text{passo}}{\text{mm}} = \frac{\text{passos do motor} \cdot \text{configuração micro passo}}{\text{passo da correia} \cdot \text{dentes da polia}}. \quad (5.1)$$

Sendo a configuração de micro passo é igual a 1, devido a configuração passo completo, então

$$\frac{\text{passo}}{\text{mm}} = \frac{200 \cdot 1}{2 \cdot 20} = 50. \quad (5.2)$$

Esse resultado informa que para percorrer 1mm é necessário enviar 50 pulsos para o motor. Cada pulso equivale a um passo. Sabendo-se que 1 passo é a menor movimentação realizada pelo motor de passo nessa configuração, então é possível afirmar que

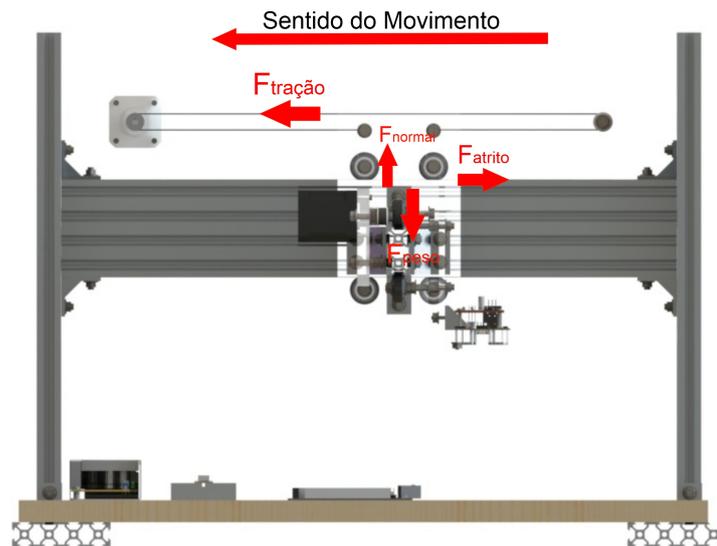


Figura 5.5: Forças atuantes no movimento do eixo. A força de tração é a força originada do torque do motor e responsável pelo movimento do eixo Y. As forças de atrito, peso e normal não são relevantes para análise da movimentação do eixo.

$$\frac{\text{passo}}{\text{mm}} = \frac{1}{50} = 0,2\text{mm} . \quad (5.3)$$

Então a precisão do sistema polia e correia nessa configuração é de 0,2mm, ou seja, 0,2 mm é o menor deslocamento linear realizado pelo sistema de movimento com a aplicação de um pulso no motor de passo para que ele se desloque com um passo.

### 5.2.2 Torque do sistema de movimento

Torque é a resultante de uma força aplicada a uma determinada distância de um eixo. Quando se pretende apertar a porca de um parafuso com uma chave de boca, aplica-se uma força sobre a chave que possui uma determinada distância até o eixo que irá rotacionar. Nota-se que quanto maior a distância entre a força aplicada e o eixo que irá rotacionar, mais facilidade se encontra para girar a porca do parafuso. A tendência que uma força tem de rotacionar um corpo sobre o qual ela é aplicada é denominada torque, e é definido como

$$T = F \cdot D , \quad (5.4)$$

onde F = força aplicada para rotacionar o eixo (N) e D = distância entre o eixo de rotação e a força (m).

No caso do motor de passo, possuindo um sistema de movimentação composto de correia e uma polia acoplada em seu eixo, sabendo-se que o torque do motor de passo é de 0,42 N.m, tendo o raio da polia com 6mm, utilizando a fórmula de torque podemos determinar que

$$\begin{aligned} F_m &= \frac{T_m}{R}, \\ F_m &= \frac{0,42}{0,06}, \\ F_m &= 7N, \end{aligned} \quad (5.5)$$

onde é possível afirmar que a força máxima aplicada para movimentação da correia é de 7 N. O que irá movimentar o eixo Y é a força de tração ( $F_t$ ) exercido na correia pela força realizada pelo giro do motor. Como o eixo Y possui roldanas com rolamentos, a força de atrito de rolamento que é de 0,0013, segundo manual da NSK, será desprezada. As forças peso e normal não foram consideradas por não possuírem relevância no deslocamento do eixo Y (ver Fig. 5.5).

A fórmula para a força de tração para deslocamento do eixo Y é

$$F_t = M_y \cdot A_y, \quad (5.6)$$

onde  $F_t$  = força de tração para deslocamento do eixo Y (N),  $M_y$  = massa do eixo Y que está sendo deslocado (kg) e  $A_y$  = aceleração realizada pelo eixo Y ( $m/s^2$ ).

Sendo a aceleração do eixo Y igual a  $1000mm/s^2 = 1,0m/s^2$ , então

$$F_t = 2,260 \cdot 1,0 = 2,26N. \quad (5.7)$$

Como o eixo Y possui o mesmo modelo de motor, e utiliza o mesmo princípio de movimentação, então é possível afirmar que a força de tração necessária para deslocar a unidade sensora, que possui massa de 298g, é de

$$F_t = 0,298 \cdot 2,5 = 0,745N. \quad (5.8)$$

### 5.3 FORMAÇÃO DA IMAGEM

Após o processo de aquisição de dados pelo sensor e posterior processamento das matrizes térmicas, formam-se 3 conjuntos de imagens térmicas (ver Fig. 5.6). Essas imagens possuem características em comum e precisam ser tratadas para se criar uma costura entre os pontos em comum.

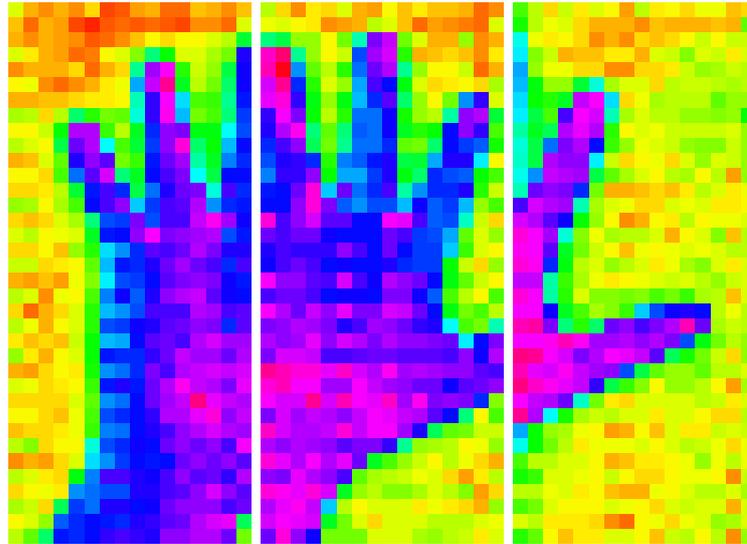


Figura 5.6: Imagens capturadas pelo sensor. Essas imagens foram capturadas pelo DMT através de 51 leituras realizadas pelo sensor. A resultante do processamento desses dados é apresentado por essas 3 imagens. Cada imagem é formada por 17 leituras do sensor.

Para realizar a junção entre as três imagens foram criados procedimentos que permitissem encontrar pontos em comum entre as imagens laterais com relação a imagem central, que possuem padrões em comum do objeto apresentado, tanto com a imagem lateral esquerda, assim como a imagem lateral direita. O processo de formação da imagem final passa pelos processos apresentados na Fig. 5.7).



Figura 5.7: Processos para formação da imagem final. A produção da imagem final obedece a uma serie de passos consecutivos e complementares para que sejam produzidos os parâmetros para formação da imagem final.

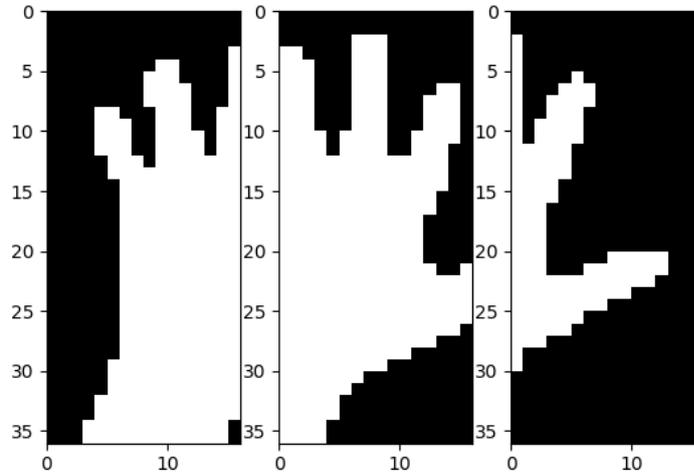


Figura 5.8: Imagem binária formada pela temperatura média.

Elaboração da imagem binária compreende um processo de transformar a imagem colorida em uma imagem com dois padrões de cores com a intenção de intensificar sua forma, realizando uma segmentação entre o fundo da imagem e o contorno do objeto. Para realizar essa segmentação, criaram-se dois caminhos que buscam produzir imagens capazes de apresentarem características relevantes para a seleção do ponto de referência, e conseqüentemente, a busca de um padrão em seus pares de imagens. O primeiro caminho diz respeito a sua segmentação levando em consideração a temperatura média (TM) de toda a imagem como parâmetro de corte para a definição dos padrões pretos e brancos na produção da imagem (ver Fig. 5.8). Todo pixel com valor acima da temperatura média teria a cor branca, enquanto que todo valor abaixo possuiria a cor preta (binarização). Lembrando que esse valor médio pode ser modificado pelo usuário do sistema em qualquer leitura. A escolha da temperatura média se fundamentou na possibilidade de ser uma informação mensurável, e não apenas um número aleatório em torno de um limite de temperatura determinado.

$$P_{(x,y)} > TM \rightarrow P_{(x,y)} = 255(\text{branco}), P_{(x,y)} < TM \rightarrow P_{(x,y)} = 0(\text{preto}). \quad (5.9)$$

O segundo caminho está relacionado a utilização de *Thresholding*, por meio da biblioteca de visão computacional OpenCV. O *Thresholding* é um algoritmo de limiarização para formação de imagens binárias. Os mapas de cores escolhidos para geração das imagens térmicas foram inferno, jet e hsv (ver Fig. 5.9). Esses mapas foram escolhidos devido a sua diversidade de cores, possibilitando uma maior identificação das variações térmicas e seu contraste, produzindo uma melhor visualização do objeto em relação ao fundo. A aplicação do *threshold* foi realizado a partir de imagens produzidos pelo mapa de cores

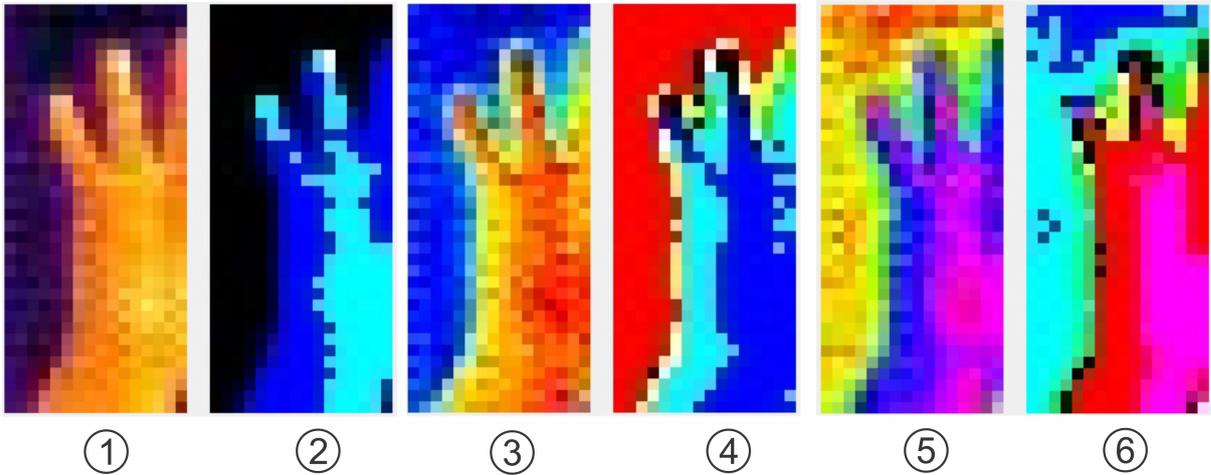


Figura 5.9: Mapas de cores inferno, jet e hsv. As imagens 1,3 e 5 representam seus mapas de cores da mesma imagem. As imagens 2,4 e 6 representam essas imagens com aplicação de *threshold*. Nota-se que o resultado do mapa inferno apresentou melhores resultados para realizar a binarização da imagem.

inferno. Ele foi escolhido por apresentar uma melhor segmentação visual entre temperatura de fundo e temperatura do objeto, sendo utilizado em processamento posterior para produção das imagens binárias. O nível de *threshold* aplicado na imagem é feito pelo usuário através de controle manual.

A imagem resultante do *threshold* (ver Fig. 5.10) sofrerá processo de segmentação. O processo de segmentação consiste em manter o fundo preto, segmentado pelo *threshold*, e converter para branco todos os *pixels* restantes, não importando a sua cor formada pelo *threshold*.



Figura 5.10: Resultado da binarização por *threshold*.

$$P_{(x,y)} = 0(\text{preto}) \rightarrow P_{(x,y)} = 0, P_{(x,y)} = 0(\text{preto}) \rightarrow P_{(x,y)} = 255(\text{branco}). \quad (5.10)$$

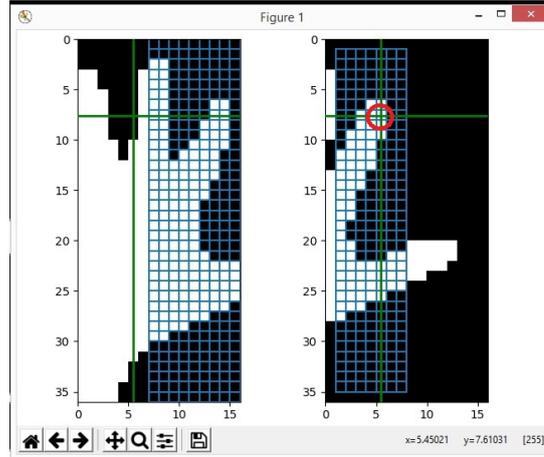


Figura 5.11: Marcação do ponto de referência. O ponto de referência (círculo vermelho na figura a direita) é o centro da matriz  $3 \times 3$  que será tido como padrão para verificação de semelhança na imagem a esquerda.

Tabela 5.4: Matriz padrão de pontos

$P(X_0 - 1, Y_0 + 1)$	$P(X_0, Y_0 + 1)$	$P(X_0 + 1, Y_0 + 1)$
$P(X_0 - 1, Y_0)$	$P(X_0, Y_0)$	$P(X_0 + 1, Y_0)$
$P(X_0 - 1, Y_0 - 1)$	$P(X_0, Y_0 - 1)$	$P(X_0 + 1, Y_0 - 1)$

Após a binarização da imagem, é necessário realizar o recorte nas imagens para poder junta-las através de seus pontos em comum. O ponto escolhido na imagem binária lateral (ver Fig. 5.11) servirá de padrão de busca para a imagem central. É interessante observar que o ponto escolhido precisa ter características binárias, ou seja, *pixels* pretos e brancos. Essa diferenciação é necessária para não causar erros na busca entre os diversos *pixels* da linha da imagem, tornando difícil a verificação do padrão em torno do ponto escolhido.

Esse padrão (ver Tabela 5.4) corresponde a uma matriz  $3 \times 3$ , tendo o ponto escolhido como o centro da matriz  $(X_0, Y_0)$ . Essa matriz irá percorrer a imagem central na busca de pontos que tenham a mesma relação binária do ponto escolhido. Sendo  $P$  como pixel da matriz lateral e  $P1$  como pixel da matriz central, temos

$$P_{(X_0-1, Y_0+1)} = P1_{(13, Y_1+1)}, P_{(X_0, Y_0+1)} = P1_{(14, Y_1+1)}, P_{(X_0+1, Y_0+1)} = P1_{(15, Y_1+1)};$$

$$P_{(X_0-1, Y_0)} = P1_{(13, Y_1)}, P_{(X_0, Y_0)} = P1_{(14, Y_1)}, P_{(X_0+1, Y_0)} = P1_{(15, Y_1)};$$

$$P_{(X_0-1, Y_0-1)} = P1_{(13, Y_1-1)}, P_{(X_0, Y_0-1)} = P1_{(14, Y_1-1)}, P_{(X_0+1, Y_0-1)} = P1_{(15, Y_1-1)};$$

...

...

...

$$P_{(X_0-1, Y_0+1)} = P1_{(6, Y_1+1)}, P_{(X_0, Y_0+1)} = P1_{(7, Y_1+1)}, P_{(X_0+1, Y_0+1)} = P1_{(8, Y_1+1)};$$

$$P_{(X_0-1, Y_0)} = P1_{(6, Y_1)}, P_{(X_0, Y_0)} = P1_{(7, Y_1)}, P_{(X_0+1, Y_0)} = P1_{(8, Y_1)};$$

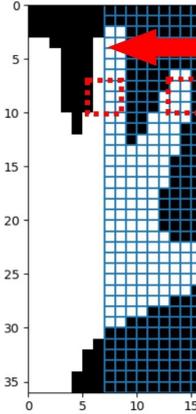


Figura 5.12: Percurso da matriz de *pixel*  $3 \times 3$ . A matriz tida como padrão pela escolha de seu ponto central será usado como comparador nessa imagem, percorrendo coluna a coluna e comparando os *pixels* existentes com aqueles da matriz padrão.

$(X_0 - 1, Y_0 - 1) = P1_{(6, Y_1 - 1)}, P_{(X_0, Y_0 - 1)} = P1_{(7, Y_1 - 1)}, P_{(X_0 + 1, Y_0 - 1)} = P1_{(8, Y_1 - 1)}$ ; onde é possível observar que a matriz binária da imagem lateral sofre um processo de comparação com os pontos da matriz binária central (ver Fig. 5.12), mantendo-se o padrão  $3 \times 3$ , ocorrendo a possibilidade de combinação quando

$$P_{(X_0 - 1, Y_0 + 1)} = P1_{(X_1 - 1, Y_1 + 1)}, P_{(X_0, Y_0 + 1)} = P1_{(X_1, Y_1 + 1)}, P_{(X_0 + 1, Y_0 + 1)} = P1_{(X_1 + 1, Y_1 + 1)};$$

$$P_{(X_0 - 1, Y_0)} = P1_{(X_1 - 1, Y_1)}, P_{(X_0, Y_0)} = P1_{(X_1, Y_1)}, P_{(X_0 + 1, Y_0)} = P1_{(X_1 + 1, Y_1)};$$

$P_{(X_0 - 1, Y_0 - 1)} = P1_{(X_1 - 1, Y_1 - 1)}, P_{(X_0, Y_0 - 1)} = P1_{(X_1, Y_1 - 1)}, P_{(X_0 + 1, Y_0 - 1)} = P1_{(X_1 + 1, Y_1 - 1)}$ ; onde as combinações são armazenadas para serem apresentadas como possíveis padrões percebidos na matriz central. Caso esse processo venha a falhar, ocorrerá uma segunda verificação onde será observado as chances de ocorrência desse padrão com uma assertividade acima de 75%. Nesse processo, será examinado a probabilidade de que o padrão  $3 \times 3$  possuía uma assertividade maior que 75%, será considerado um ponto provável de semelhança com o ponto de referência dado. Esse segundo processo se tornou necessário devido a contornos irregulares entre as imagens geradas causado pela variação da leitura do sensor, trazendo variação na percepção dos contornos produzidos no processo de binarização da imagem.

Como as imagens não sofrem translação, rotação ou qualquer outro tratamento que modifique a sua dimensão ou característica, a procura por padrões na imagem central segue o mesmo alinhamento do ponto lateral escolhido. O interessante é buscar pontos que possuam variações entre preto e branco para melhor construção de uma matriz para comparação de pontos. O ponto escolhido retornou dois pontos como padrões que coincidiram com a matriz binária  $3 \times 3$  do ponto da imagem lateral (ver Fig. 5.13). Como a matriz térmica sofre variação de temperatura, impossibilitando, a princípio, um algoritmo que pudesse realizar essa comparação entre os pontos encontrados e o ponto escolhidos, essa confirmação é feita pelo usuário do sistema em um primeiro momento.

Após a escolha do ponto de referência, a imagens são segmentadas tomando-se o

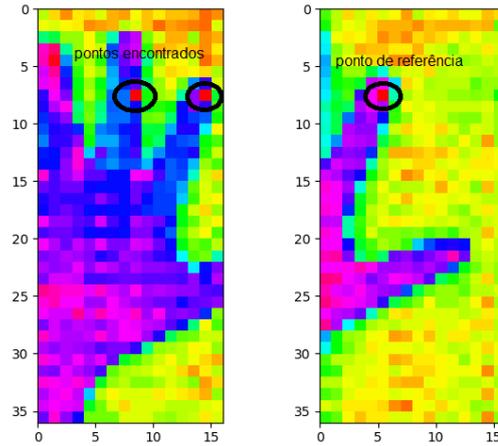


Figura 5.13: Ponto de referência e pontos encontrados. A figura à direita apresenta o ponto de referência marcado manualmente, sendo ele um padrão de comparação. Os pontos na imagem à esquerda, são os pontos que apresentam indicação de semelhança com o ponto de referência. Nesse caso foram apresentadas duas equivalências em relação ao ponto de referência.

ponto escolhido (ver Fig. 5.14), assim como o ponto encontrado como regiões limítrofes necessários para costura da imagem final.

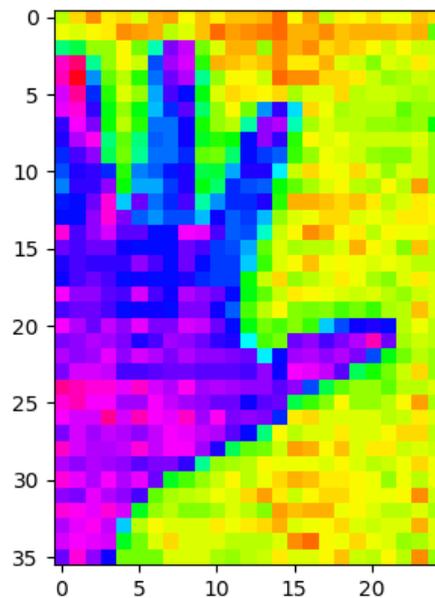


Figura 5.14: Resultado da junção da imagem central com a imagem lateral direita.

O mesmo procedimento é realizado com a imagem central e lateral esquerda (ver Fig. 5.15 e Fig. 5.16).

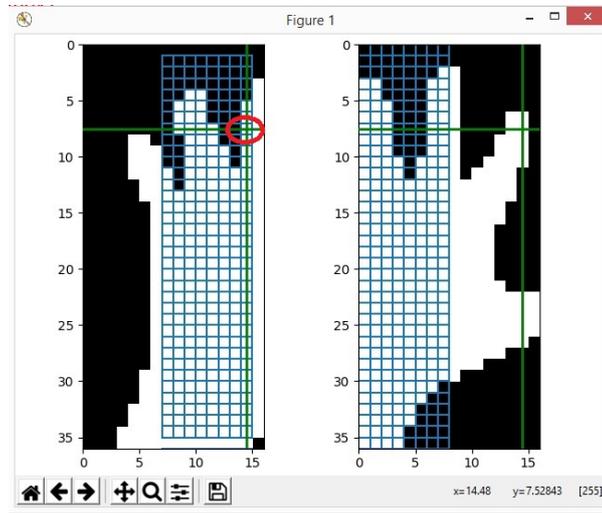


Figura 5.15: Escolha do ponto de referência. Segue o mesmo procedimento mostrado acima (ver Fig. 5.11).

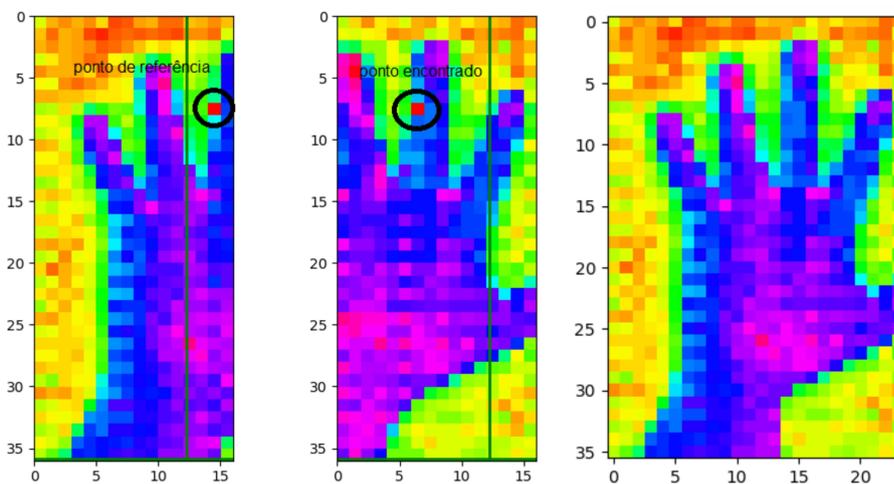


Figura 5.16: As imagens à esquerda e ao centro apresentam o ponto de referência e ponto encontrado, enquanto que a imagem à direita apresenta a concatenação das imagens à esquerda e ao centro baseado nos pontos escolhidos.

Após a segmentação das imagens utilizando os pontos informados e os encontrados, ocorre a produção da imagem final (ver Fig. 5.17).

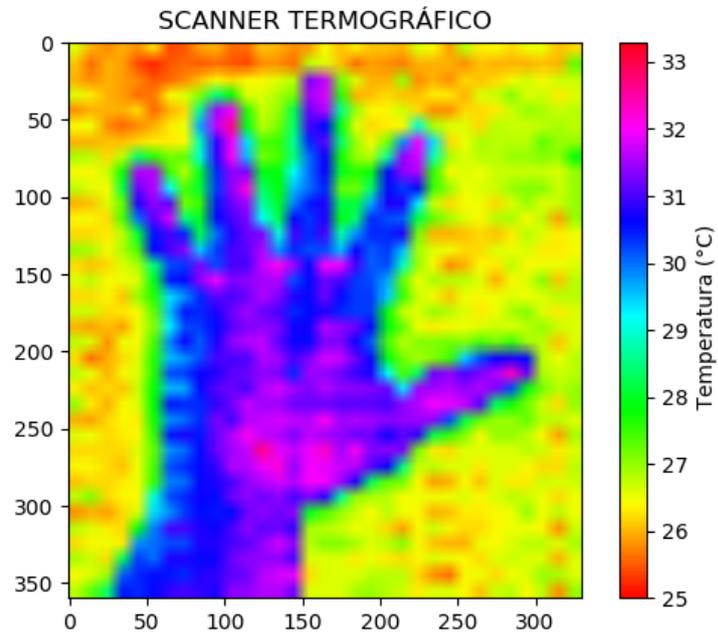


Figura 5.17: Resultado da junção da imagem central com as imagens laterais.

## AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS

### Conteúdo

6.1	Precisão do sensor . . . . .	83
6.2	Precisão mecânica . . . . .	83
6.3	Precisão da imagem térmica . . . . .	86

O desenvolvimento de um dispositivo tem suas particularidades únicas, que nascem como consequências do seu processo de construção. Nesse capítulo, serão apresentadas informações de características relevantes para uma melhor compreensão das capacidades e limitações do sistema. Será abordado a precisão do sensor, precisão mecânica de seu sistema de movimentação e precisão da imagem, quando relacionado ao seu contraste, que é responsável pela qualidade da visualização da imagem térmica produzida.

### 6.1 PRECISÃO DO SENSOR

A avaliação da precisão do sensor MLX 90621 está relacionado a satisfação de seus parâmetros elétricos, de configuração, montagem e ambientais informados em seu *datasheet*, buscando um melhor desempenho do mesmo em seu funcionamento (ver Tabela 6.1). Atingidos esses parâmetros, não julgou ser necessário realizar testes posteriores para confirmar as informações sobre precisão informadas pelo fabricante.

### 6.2 PRECISÃO MECÂNICA

A precisão mecânica está relacionada a satisfação do resultado alcançado de uma medição em relação às suas medidas exatas. Essa precisão foi obtida através de medições utilizando um relógio comparador, instrumento empregado em medições de precisão. O sistema do protótipo possui uma precisão com décimos de milímetros, enquanto que o relógio comparador possui uma precisão em centésimos de milímetros. Não é possível determinar se o erro apresentado na movimentação terá valores positivos ou negativos,

Tabela 6.1: Parâmetros de precisão do sensor

Temperatura Ambiente	0°C a 50°C
Tensão de alimentação do sensor	2,6 volts (melhor performance do sensor)
Taxa de atualização de quadros	4Hz (resolução de 0,2 °C)
Resolução dos dados do sensor	18 bits
Ângulo de leitura	90° (100% da sensibilidade do sensor)
proteção	Utilização de capacitor de 100 nF para redução do ruído no sinal elétrico de alimentação do sensor.
Temperatura do objeto	0°C a 300°C
Temperatura para validação dos parâmetros elétricos	25°C

ou seja, se apresentarem erros maiores ou menores que a posição determinada para deslocamento. Diante dessa incerteza, buscou-se convencionar a posição inicial do relógio comparador 1 milímetro menor que a posição preestabelecida para realizar as medições, tanto no eixo auxiliar como no eixo principal (ver Fig. 6.1).

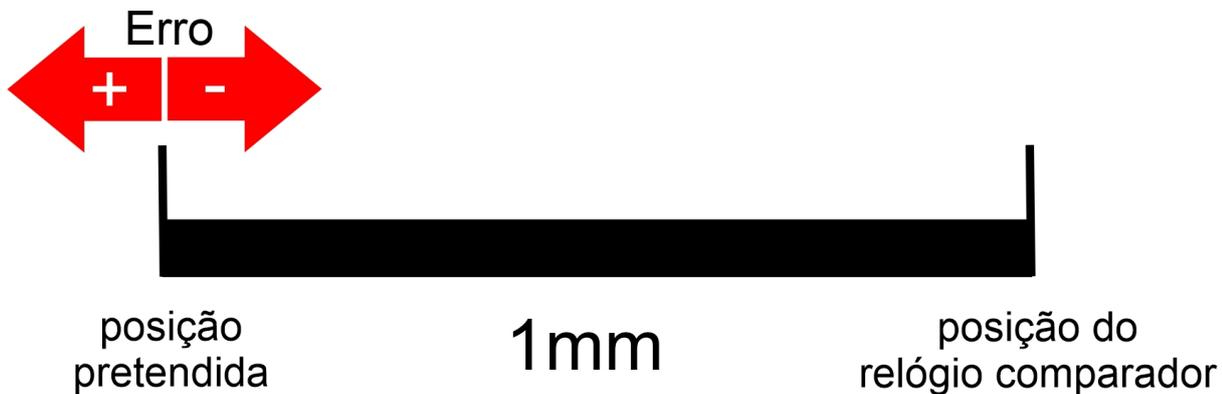


Figura 6.1: Princípio de medição do erro no posicionamento. Essa medição é necessária para se verificar o erro produzido pelo deslocamento nos eixos X e Y em relação a precisão do sistema. A diferença entre a precisão do sistema e a precisão do relógio comparador, ferramenta utilizada para a medição, fez com que fosse necessário essa diferenciação entre a posição do relógio comparador e a posição percorrida nos eixos.

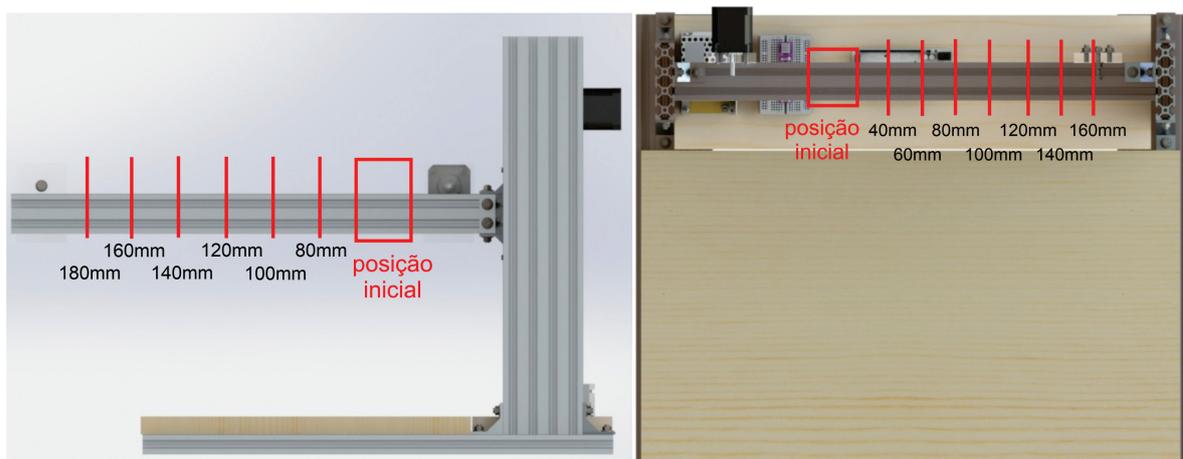


Figura 6.2: Posições aferidas no eixo principal e auxiliar. Essas posições foram as posições percorridas nos eixos para avaliação do erro do sistema. A posição inicial é a região onde se encontra posicionada a unidade sensora e o conjunto do eixo X.

O procedimento de medição consiste em solicitar a interface que percorra distâncias preestabelecidas e realizar a medição do erro fazendo uso do relógio comparador. As distâncias estabelecidas para o eixo auxiliar são 80, 100, 120, 140, 160 e 180 milímetros. O eixo principal distâncias estabelecidas de 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 160 milímetros (ver Fig. 6.2). O resultado do experimento de medição do eixo auxiliar e do eixo principal é mostrado nas Tabela 6.2 e Tabela 6.3.

Como é possível observar, o erro médio no eixo auxiliar gira em torno de 0,45 mm, enquanto que o eixo principal possui um erro médio de 0,24 mm. Esses erros não se mostram significativos a ponto de realizarem qualquer alteração na precisão da coleta de dados térmicos. Apesar de possuírem o mesmo sistema de movimento, os erros do eixo principal possuem um erro de comportamento positivo, enquanto que o eixo auxiliar possui um erro de comportamento negativo. Esse erro pode ser ocasionado por alguma configuração no sistema mecânico, não sendo possível determinar a causa até o momento.

Tabela 6.2: Medição do eixo auxiliar.

Distância informada (mm)	Distância alcançada (mm)	Erro (mm)
80	79,49	- 0,51
100	99,63	- 0,37
120	119,45	- 0,55
140	139,61	- 0,39
160	159,66	- 0,34
180	179,42	- 0,58

Tabela 6.3: Medição do eixo principal.

Distância informada (mm)	Distância alcançada (mm)	Erro (mm)
40	40,41	0,41
60	60,24	0,24
80	80,14	0,14
100	100,1	0,10
120	120,31	0,31
140	140,16	0,16
160	160,32	0,32

### 6.3 PRECISÃO DA IMAGEM TÉRMICA

O *datasheet* do sensor MLX90621 informa que o aumento da resolução do sensor diminui o ruído e melhora o desempenho geral do ruído. Diante do propósito em conhecer a relação entre ruído e resolução da temperatura do sensor (NETD) com relação a velocidade de produção de quadros, realizou-se a produção de imagem de um mesmo corpo utilizando o DMT, adotando a frequência de atualização de quadros de 4Hz (ver Fig. 6.3), 16Hz (ver Fig. 6.4) e 32Hz (ver Fig. 6.5). As imagens de uma forma geral, não apresentaram variações significativas na temperatura média das imagens, apresentando uma variação de até  $0,2^{\circ}\text{C}$ , mostrando que o conjunto de dados coletados pelo sensor possuem uma equivalência estatística observando esse parâmetro. A temperatura máxima acompanha o mesmo entendimento, não apresentando variações significativas, com variações máximas de  $0,5^{\circ}\text{C}$  entre as imagens. A temperatura mínima apresentou variação máxima de  $0,8^{\circ}\text{C}$  entre as imagens. Diante disso, pode-se concluir que o sensor não apresenta variações significativas, com alterações entre  $0,2^{\circ}\text{C}$  e  $0,8^{\circ}\text{C}$ , no seu conjunto de dados, independente da frequência de dados utilizadas para geração das imagens.

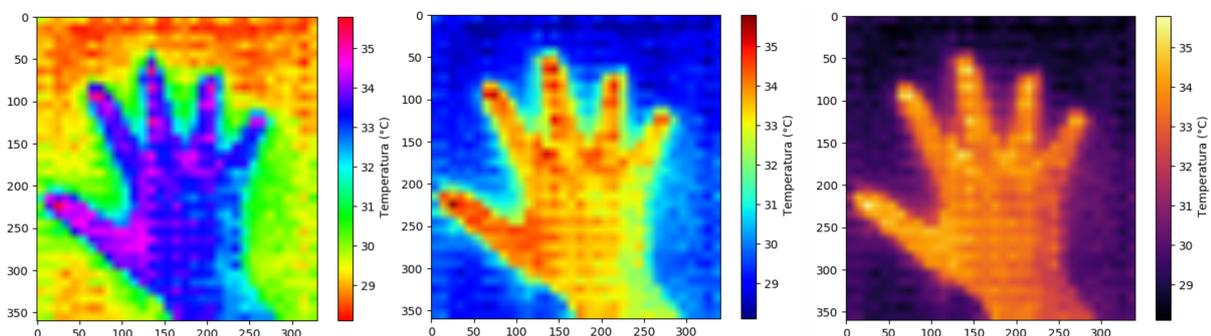


Figura 6.3: Imagem produzida pelo DMT com taxa de transferência de dados de 4Hz. A temperatura mínima é de  $28,1^{\circ}\text{C}$ , temperatura máxima de  $35,8^{\circ}\text{C}$  e temperatura media de  $31,5^{\circ}\text{C}$ . Os mapas de cores utilizados nas imagens são hsv, jet e inferno, respectivamente.

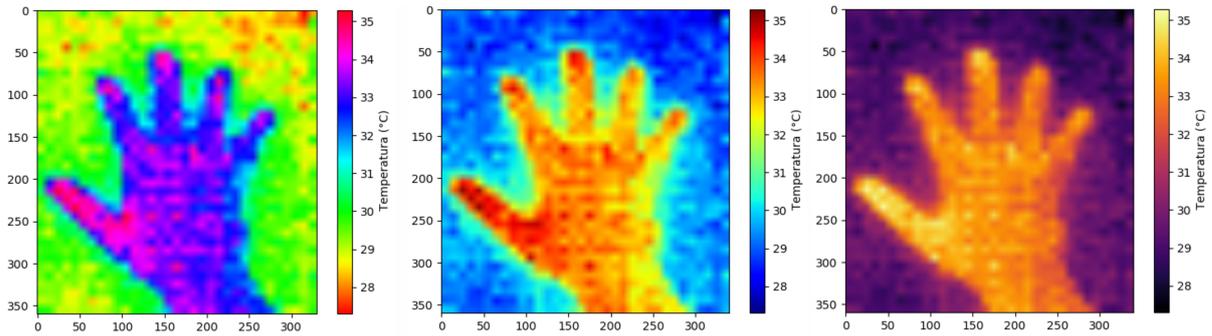


Figura 6.4: Imagem produzida pelo DMT com taxa de transferência de dados de 16Hz. A temperatura mínima é de  $27.3^{\circ}\text{C}$ , temperatura máxima de  $35.3^{\circ}\text{C}$  e temperatura média de  $31.3^{\circ}\text{C}$ . Os mapas de cores utilizados nas imagens são hsv, jet e inferno respectivamente.

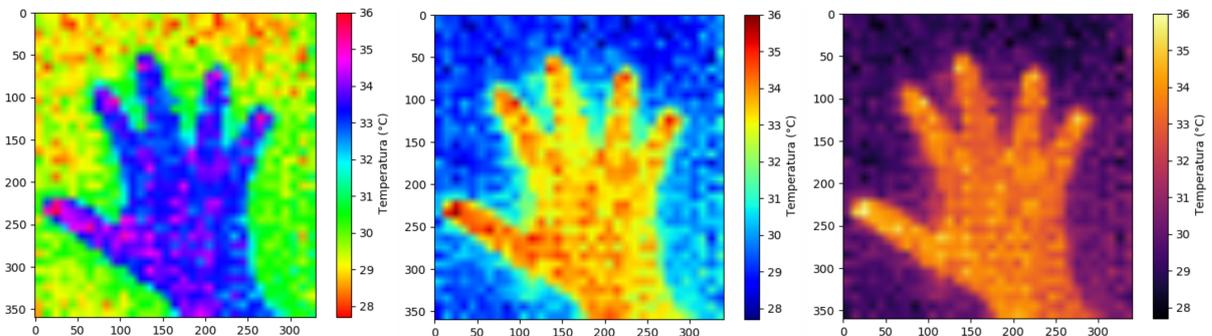


Figura 6.5: Imagem produzida pelo DMT com taxa de transferência de dados de 32Hz. A temperatura mínima é de  $27.7^{\circ}\text{C}$ , temperatura máxima de  $36.0^{\circ}\text{C}$  e temperatura média de  $31.6^{\circ}\text{C}$ . Os mapas de cores utilizados nas imagens são hsv, jet e inferno respectivamente.

Através da Fig. 6.6, é possível observar alterações ocasionadas pela mudança na frequência de quadros e suas consequências, tendo a imagem produzida em 4Hz como padrão comparativo, visto que possui a melhor resolução referente a temperatura. Quando se aumenta o número da frequência de quadros, produzem-se comportamentos como ruídos na imagem e perda de sensibilidade por parte do sensor. A geometria circular amarela apresentada na Fig. 6.6 mostra a formação de ruído, que se mostra acentuada na imagem com 16Hz e declina na imagem com 32Hz, mas que apresenta sua permanência com o crescimento da frequência de quadros para produção da imagem. A geometria circular vermelha apresenta uma perda de sensibilidade do sensor com o crescimento do número de quadros. Esse aumento faz com que a sensibilidade do sensor seja modificada em relação a sua percepção da temperatura, precisando ter uma variação maior da temperatura do objeto para ser percebido pelo sensor. As formas geométricas retangulares na cor branca, mostrada na Fig. 6.6, mostrada nas imagens com mapa HSV, possuem deformações no formato dos dedos nas imagens produzidas com 16Hz e 32Hz. Essas deformações são ocasionadas devido ao ruído produzido pelo aumento no número de quadros para produção da imagem. As geometrias circulares brancas, apresentadas nas imagens com

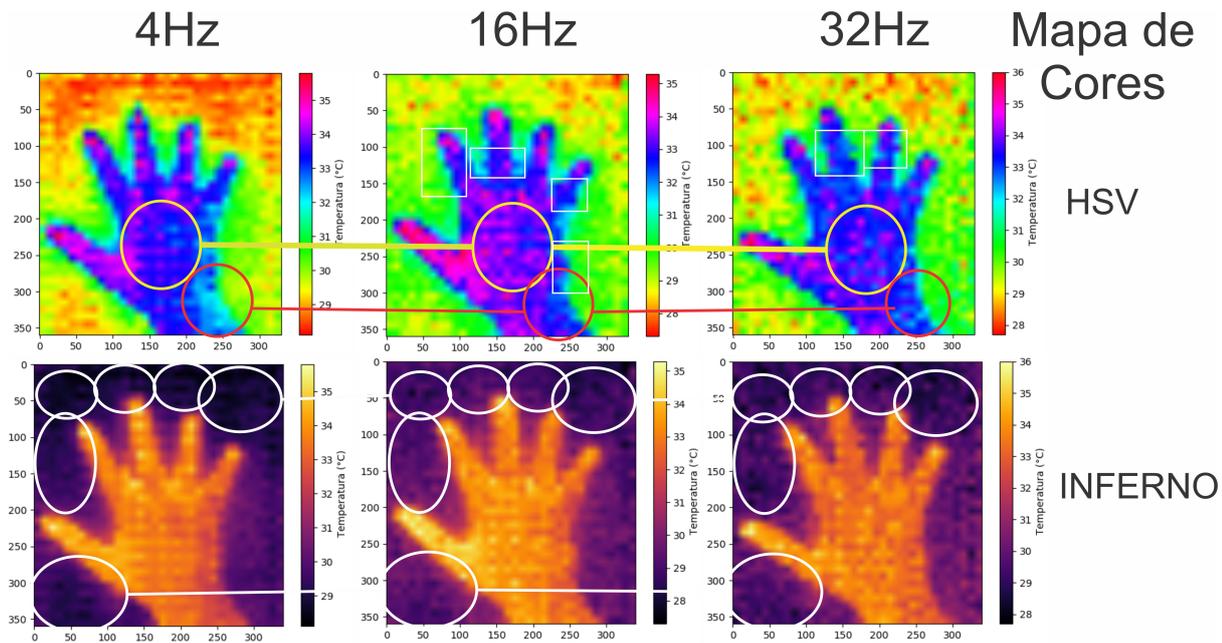


Figura 6.6: A imagens apresentadas mostram ruídos e alterações de resolução de temperatura do sensor nas taxas de 4Hz, 16Hz e 32Hz. As formas circulares em amarelo apresentam ruídos, as formas circulares em vermelho apresentam diferenciação no contraste, as formas brancas retangulares apresentam a distorção da imagem e as formas circulares brancas, nas imagens com o mapa de cor inferno, apresentam variações no fundo da imagem.

mapa inferno, mostram uma variação de leitura da temperatura no fundo da imagem. Essa variação se reflete nas modificações ocasionadas pela cor em seu fundo. Nota-se que existe uma perda de percepção em relação à temperatura, mostrando um aumento moderado na temperatura do fundo das imagens de 16Hz e 32Hz. Isso pode ser ocasionado pelo aumento da frequência de quadros, que poderá levar a uma perda de sensibilidade do sensor e produção de ruído na imagem. Essas observações mostram que a melhor condição para geração de imagens térmicas, utilizando o sensor MLX90621, possui seus melhores resultados na frequência de 4Hz. Qualquer aumento nesse parâmetro poderá ocasionar inconsistência na produção das imagens.

## CONCLUSÃO

### Conteúdo

7.1	Pontos fortes e pontos fracos . . . . .	89
7.2	Aplicações . . . . .	90
7.3	Limitações . . . . .	90
7.4	Trabalhos futuros . . . . .	91

Essa projeto de pesquisa apresentou uma solução de baixo custo para produção de imagens térmicas, chamada de DMT, cujo conceito nasceu como contraponto aos altos custos dos equipamentos existentes no mercado. Esse estudo apresentou os aspectos técnicos do projeto, através da exposição detalhada de seus componentes, cálculos estruturais e elétricos, custos necessários e particularidades do sistema. Nesse capítulo, será abordado os pontos fortes e fracos desse projeto, sua aplicabilidade, limitações e melhorias que poderão ser realizadas através de trabalhos futuros.

### 7.1 PONTOS FORTES E PONTOS FRACOS

Como pontos fortes, o DMT apresenta o baixo custo do seu projeto, possuindo sensor de baixo custo, bem como seus componentes elétricos e eletrônicos, a sua forma modular, apresentada em seu aspecto construtivo, não necessitando de sistemas de produção ou componentes exclusivos para que ele seja produzido ou montado, utilizando materiais de fácil acesso no mercado. O curto espaço de tempo entre o conceito de uma ideia e sua aplicação com relação ao uso do sensor, microcontrolador e produção da *interface* serão facilitadores para futuras modificações em seus mecanismos ou alterações em suas funcionalidades, não necessitando de softwares proprietários ou outros recursos adicionais.

Entre seus pontos fracos, o DMT possui a falta de portabilidade como um fator significativo, sendo um equipamento de bancada sem qualquer tipo de facilidade na mobilidade, sendo único nesse aspecto entre os equipamentos existentes no mercado. Outro ponto a se considerar é a limitação em sua área de leitura, restringindo o tamanho do objeto a ser lido termicamente.

## 7.2 APLICAÇÕES

Como foi mostrado em todo projeto, através de seus exemplos, o DMT pode realizar a produção de imagens térmicas de dispositivos moveis como celulares e tablets, circuitos eletrônicos, assim como seus componentes individuais ou objetos que possuam uma alteração de calor significativa. O DMT pode ser utilizado para verificação de temperaturas de trabalho, avaliação de pontos quentes em objetos e estudo do comportamento térmicos de materiais e objetos. A princípio, graças aos aspectos técnicos do sensor, como sua precisão, o DMT tem potencial para ser utilizado na termografia clínica, podendo ser aplicado na verificação de enfermidades em mãos e pulsos, necessitando apenas de testes e avaliação de especialistas para se verificar o nível de relevância que o DMT possa atingir nesse contexto.

## 7.3 LIMITAÇÕES

A limitação do DMT está relacionado ao seu tempo de duração na leitura, ação necessária para o recebimento de todos os dados para a produção da imagem térmica. Toda leitura realizada pelo DMT para captura de dados dura 13 minutos e 29 segundos, considerando sempre toda a área útil de leitura. Essa deficiência é ocasionada pela limitação do microcontrolador em controlar o sensor e o motor simultaneamente sem perda de informação. Quando o sensor solicita os dados produzidos pelo microcontrolador não existe perda de desempenho. Essa queda acontece no momento em que é introduzido o controle do motor de passo no sistema. Os cálculos para produção dos dados térmicos do sensor são feitos no sistema do microcontrolador. Existe uma troca de informações e alocações de memória entre eles nesse processo, devido a existência de uma biblioteca específica do sensor, para que ele realize essas ações. A cada 4 leituras, a unidade sensora realiza um movimento. A necessidade de movimentação faz com que o processamento do microcontrolador, que continha as informações do sensor, seja direcionado para a demanda do controle do motor de passo. O microcontrolador usado nesse projeto apresenta um único núcleo de processamento, executando uma ação por vez. No momento que a ação de controle do motor é tida como prioridade, todas as informações contidas na memória do microcontrolador relacionadas aos cálculos do sensor são perdidas. Para que o sensor venha a produzir dados térmicos para produção de novas imagens, este terá que realizar novos acessos a memória, buscando variáveis de calibração contidas na memória do sensor e realizar os cálculos necessários para produção dos dados.

Essa limitação pode ser corrigida utilizando-se algumas soluções. A primeira, seria utilizar mais de um microcontrolador no sistema, realizando uma comunicação entre si, tornando a produção dos dados pelo sensor como uma função específica de um dos microcontroladores, enquanto o outro cuida do restante do sistema. A segunda solução buscaria utilizar sistemas microprocessados embarcados que possuem maior capacidade de processamento e recursos para realizar funções multitarefas, tornando as funções de coleta de dados do sensor e controle do motor ações distintas, reduzindo o tempo de reposta do sistema. Uma solução que pode ser estudada é a utilização de sistemas operacionais de tempo real, onde é possível dividir a execução de um microcontrolador em

tarefas, apresentando a capacidade de executar diversas tarefas simultaneamente. Essa escolha pode necessitar de um outro modelo de microcontrolador, visto que os sistemas operacionais de tempo real podem ser aplicados em dispositivos específicos.

#### 7.4 TRABALHOS FUTUROS

O DMT, como um protótipo de um sistema térmico, pode sofrer modificações que podem ser benéficas ao longo do tempo. A Melexis, empresa desenvolvedora do MLX90621, desenvolveu o MLX90640 como substituição tecnológica ao seu antecessor, o MLX90621. O MLX90640 é capaz de produzir uma matriz térmica de  $32 \times 24$  *pixels* mantendo a precisão de  $\pm 1^\circ\text{C}$  em faixa de temperatura específica. Essa substituição no DMT poderá acrescentar mais informações nas imagens térmicas produzidas sem perda de qualidade com relação a precisão na temperatura. A Melexis, de forma a apoiar o desenvolvimento de aplicações com esse sensor, disponibilizou via *github* a biblioteca para aquisição de dados para esse novo sensor. Essa iniciativa da empresa permite encurtar o desenvolvimento de aplicações. Outra possibilidade de melhoria para o DMT seria acrescentar sensores de profundidade e câmeras RGB, que aliadas ao sensor térmico, seriam capazes de produzir modelos térmicos em 3 dimensões através da fusão dessas 3 fontes de dados visuais (VIDAS; MOGHADAM; BOSSE, 2013; ROCCO et al., 2016). A geração de modelos realísticos em 3 dimensões teriam a capacidade de melhorar a visualização termográfica e o comportamento do calor em objetos que naturalmente possuem 3 dimensões.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL, F.; YAZDANI, F.; MOHAMMADI, F. Intelligent testing for arduino uno based on thermal image. *Computers Electrical Engineering*, v. 58, p. 88–100, 02 2017.
- ALLEN, J. et al. Thermography and colour duplex ultrasound assessments of arterio-venous fistula function in renal patients. *Physiological measurement*, v. 27, p. 51–60, 02 2006.
- AMARANTE, H. M. S.; PONTES, J. C. A. D.; MICHALOSKI, A. O. Termografia na prevenção de acidentes no sistema elétrico de potência. *Revista ESPACIOS*, v. 37, 2016.
- AMAZON. 2020. Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/>>. Acesso em: 26 mai. 2020.
- ANGAITKAR, P. et al. Enhancement of infrared image for roof leakage detection. In: . [S.l.: s.n.], 2013. p. 580–585. ISBN 978-1-4673-5037-2.
- ANTONIO-RUBIO, I. et al. Abnormal thermography in parkinson’s disease. *Parkinsonism Related Disorders*, v. 21, 05 2015.
- ARAÚJO, H. B. Termografia infravermelha. UNIRV – UNIVERSIDADE DE RIO VERDE, 2014.
- ARDUINO. 2020. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 05 jun. 2020.
- ASSUNÇÃO, B. L. et al. Eficácia dos critérios de diagnóstico de instalações elétricas defeituosas por termografia infravermelha. *Revista Ifes Ciência*, v. 1, n. 2, p. 111–127, dez. 2015. Disponível em: <<https://ojs.ifes.edu.br/index.php/ric/article/view/312>>.
- BEAVER, J. et al. Evaluating the use of drones equipped with thermal sensors as an effective method for estimating wildlife. *Wildlife Society Bulletin*, 04 2020.
- BEER, F. e. a. *estática e mecânica dos materiais*. [S.l.]: editora Bookman, 2013. 612 p.
- BERZ, H. S. R. The medical use of infrared-thermography; history and recent applications. *Deutsche Gesellschaft für Thermographie und Regulationsmedizin.*, Thermografie-Kolloquium 2007 by DGZfP, p. 41–48, 10 2007.
- BORRMANN, D. et al. A mobile robot based system for fully automated thermal 3d mapping. *Advanced Engineering Informatics*, v. 28, 07 2014.
- BRIOSCHI, M.; ABRAMAVICUS, S.; CORREA, C. Valor da imagem infravermelha na avaliação da dor. *Rev Soc Bras Estudo Da Dor*, v. 6, p. 514–524, 01 2005.

BRIOSCHI, M.; YENG, L.; PASTOR, E. Documentação da síndrome dolorosa miofascial por imagem infravermelha. *Acta Fisiatr*, v. 14, p. 41–48, 01 2007.

BRIOSCHI, M.; YENG, L.; TEIXEIRA, M. Diagnóstico avançado em dor por imagem infravermelha e outras aplicações. *Pratica Hospitalar*, v. 50, p. 93–98, 01 2007.

BRIOSCHI, M. L. e. a. Utilização da imagem infravermelha em reumatologia. *Rev. Bras. Reumatol.*, v. 47, n. 1,, p. p.42–51, 2 2007.

BROGGIO, j. r. proposta de sistema de alerta de risco de insolação e hipertermia em criança dentro de automóvel, com sensor infravermelho. In: . [S.l.: s.n.], 2017.

BUDYNAS, R.; NISBETT, J. *Elementos de Máquinas de Shigley*. [S.l.]: Editora Bookman, 2011. (8<sup>o</sup> edição).

C4M. 2020. Disponível em: <<https://lojac4m.com.br/>>. Acesso em: 26 mai. 2020.

CAVALHEIRO, A. et al. Thermographic analysis and autonomic response in the hands of patients with leprosy. *Anais Brasileiros de Dermatologia*, v. 91, p. 274–283, 06 2016.

CHIRILA, C.; SZOLGA, L. Development of a thermal camera using a low noise high speed far infrared camera. In: . [S.l.: s.n.], 2019. p. 183–193.

CHRZANOWSKI, K. Non-contact thermometry measurement errors. In: . [S.l.: s.n.], 2001.

CONTEMP. 2020. Disponível em: <tabeladeemissividades>. Acesso em: 18 fev. 2020.

COOKE, W. et al. Digital infrared thermographic imaging for remote assessment of traumatic injury. *Journal of applied physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, v. 111, p. 1813–8, 09 2011.

DALTRO, D. d. S. *Uso da termografia infravermelha para avaliar a tolerância ao calor em bovinos de leite submetidos ao estresse térmico*. Monografia (mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Zootecnia., 2014.

D'AMORE, D.; MAFFEZZONI, P. Electro-thermal analysis of paralleled bipolar devices. *Microelectronics Journal*, v. 31, p. 753–758, 10 2000.

DANESE, G. et al. An embedded acquisition system for remote monitoring of tire status in f1 race cars through thermal images. In: . [S.l.: s.n.], 2008. v. 0, p. 432–437.

DINIS, B. *Termografia aplicada a física das construções*. Dissertação (B.S. thesis) — [sn], 2009.

DIOS, J. R. Martinez-de; OLLERO, A. Automatic detection of windows thermal heat losses in buildings using uavs. In: . [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–6. ISBN 1-889335-33-9.

- DOMBEK, G. Unsharpness of thermograms in thermography diagnostics of electronic elements. *Electronics*, v. 9, p. 897, 05 2020.
- DONOSO, J. *Transferência de calor por radiação*. [S.l.]: FCM 208 Física (arquitetura) - Universidade de São Paulo, 2009.
- FERREIRA, R. A. M. Metodologia para avaliação do desempenho de painéis fotovoltaicos utilizando um modelo elétrico-térmico e termografia quantitativa. Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.
- FLIR-DIRECT. 2020. Disponível em: <<https://www.flir-direct.com/>>. Acesso em: 04 jun. 2020.
- FLUKE-DIRECT. 2020. Disponível em: <<https://www.fluke-direct.com/>>. Acesso em: 04 jun. 2020.
- FREEDMAN, R.; YOUNG, H. *Física II. Termodinâmica e ondas*. [S.l.]: Editora Pearson, 2008.
- FRIZE, M. et al. Detection of rheumatoid arthritis using infrared imaging. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, v. 7962, p. 20–, 03 2011.
- FRIZE, M. et al. Preliminary results of severity of illness measures of rheumatoid arthritis using infrared imaging. *2009 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications, MeMeA 2009*, 05 2009.
- GARCIA, D. Validação da termografia no diagnóstico de lesões por esforços repetitivos/-distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho. *Universidade federal Rio Grande do Sul*, 2004.
- GARCIA, J.; FONTES, P. Termografia de infravermelhos aplicada a instalações de refrigeração. In: . [S.l.: s.n.], 2007.
- GAVRILOAIA, G. et al. Anisotropic diffusion filtering of infrared medical images. *International Conference on Systems, Signals, and Image Processing*, 01 2011.
- GEOFFRAY, H.; GUERIN, F. Measured performance of a low-cost thermal infrared pushbroom camera based on uncooled microbolometer fpa for space applications. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, v. 4540, 12 2001.
- GHELMAN. 2019. Disponível em: <<http://www.institutoghelman.com/programa?/2>>. Acesso em: 28 out. 2019.
- GOWEN, A. et al. Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment. *Trends in Food Science Technology*, v. 21, p. 190–200, 04 2010.
- GUAN, X.-y. et al. Device characteristics and thermal analysis of gan-based vertical light-emitting diodes with different types of packages. *Solid-State Electronics*, v. 127, 10 2016.

- HALLIDAY; RESNICK. *Fundamentos de Física*. [S.l.]: Editora LTC, 2016.
- HARDWICKE, J.; TITLEY, G. Thermographic assessment of a vascular malformation of the hand: A new imaging modality. *Journal of Clinical Imaging Science*, v. 6, p. 9, 03 2016.
- HARIPRIYA, A.; SUNITHA, K.; MAHIMA, B. Development of low-cost thermal imaging system as a preliminary screening instrument. *Procedia Computer Science*, v. 172, p. 283–288, 01 2020.
- HASSAN, M. et al. Infrared thermographic imaging for the assessment of temperature asymmetries in reflex sympathetic dystrophy. In: . [S.l.: s.n.], 2003. v. 2, p. 1102 – 1105 Vol.2. ISBN 0-7803-7789-3.
- HIBBLER, R. *estática, mecânica para engenharia*. [S.l.]: editora Pearson, 2005. 543 p. (10<sup>o</sup> edição).
- HILDEBRANDT, C.; RASCHNER, C.; AMMER, K. An overview of recent application of medical infrared thermography in sports medicine in austria. *Sensors (Basel, Switzerland)*, v. 10, p. 4700–15, 05 2010.
- HUYGEN, F. et al. Computer compiled skin videothermography is a high sensitive quality tool in the diagnosis and monitoring of complex regional pain syndrome type i. *European journal of applied physiology*, v. 91, p. 516–24, 05 2004.
- IF-UFRG. 2020. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/calor.htm>>. Acesso em: 27 mai. 2020.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentos de transferência de calor*. [S.l.]: ed. México: Prentice Hall, 1999. 912 p. (4).
- INFRATEMP. *Termometria infravermelha – teoria básica*. [S.l.]: INFRATEMP, 2010.
- ISMAIL, E. et al. Functional-thermoregulatory model for the differential diagnosis of psoriatic arthritis. *BioMedical Engineering OnLine*, v. 13, 12 2014.
- JAAKKOLA, A. et al. A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for tree measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 65, p. 514–522, 11 2010.
- Jadin, M. S.; Ghazali, K. H.; Taib, S. Thermal condition monitoring of electrical installations based on infrared image analysis. In: *2013 Saudi International Electronics, Communications and Photonics Conference*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6.
- JAJIC, Z.; JAJIC, I.; NEMČIĆ, T. Primary hypertrophic osteoarthropathy: Clinical, radiologic and scintigraphic characteristics. *Archives of medical research*, v. 32, p. 136–42, 03 2001.
- JAMES, K.; RICE, D. Finding termites with thermal imaging cameras. 05 2020.

JUNIOR, N. K. et al. Infrared thermography for microclimate assessment in agroforestry systems. *Science of The Total Environment*, v. 731, p. 139252, 05 2020.

KACOVSKY, P. Electric circuits as seen by thermal imaging cameras. *The Physics Teacher*, v. 57, p. 597–599, 12 2019.

KALATEC AUTOMAÇÃO. 2019. Disponível em: <<https://www.kalatec.com.br/>>. Acesso em: 02 dez. 2019.

KARP, D. Detecting small and cryptic animals by combining thermography and a wildlife detection dog. *Scientific Reports*, v. 10, 12 2020.

KASTEK, M. et al. Concept of infrared sensor module for sniper detection system. In: . [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–2. ISBN 978-1-4244-6655-9.

KIM, K. M.; JEONG, Y. S.; BANG, I. C. Thermal analysis of lithium ion battery-equipped smartphone explosions. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, v. 22, 12 2018.

Kockara, S. et al. Portable malignant lesion detection with low cost mobile infrared thermography. In: *2014 IEEE Innovations in Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5.

KRUSE, R.; CHRISTIANSEN, J. Thermographic imaging of myofascial trigger points: A follow-up study. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, v. 73, p. 819–23, 10 1992.

KULIS, T. et al. Scrotal infrared digital thermography in assessment of varicocele — pilot study. *Proceedings Elmar - International Symposium Electronics in Marine*, 01 2011.

KUMAR, A.; NEGI, S. Design development of a high performance 3rd generation hand held thermal camera. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 10 2004.

LAHIRI, B. et al. Medical applications of infrared thermography: A review. *Infrared Physics Technology*, v. 55, n. 4, p. 221 – 235, 2012. ISSN 1350-4495. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449512000308>>.

LEE, J.-G. et al. Thermographic assessment of inferior alveolar nerve injury in patients with dentofacial deformity. *Journal of oral and maxillofacial surgery : official journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, v. 65, p. 74–8, 02 2007.

LEHUGEUR, C. M. *Bem-estar em ovinos no Rio Grande do Sul: Termografia na avaliação de podridão dos cascos e estresse por calor*. Monografia (mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Veterinária. Programa de Pós-Graduação em Ciências Veterinárias., 2014.

LEIZI, J.; ZHAO, X.; DAMING, D. Design for temperature measurement system based on smart phone and infrared thermal camera core. In: . [S.l.: s.n.], 2015.

- LEV, J. et al. Low-cost infrared sensor for wildlife detection in vegetation. *Research in Agricultural Engineering*, v. 63, p. S13–S17, 12 2017.
- LI, C. et al. Low cost uncooled vox infrared camera development. *Proc SPIE*, 06 2013.
- LI, Z. et al. Application of infrared thermography technique in building finish evaluation. *Journal of Nondestructive Evaluation*, v. 19, p. 11–19, 03 2000.
- LIM, M. et al. Digital thermography of the fingers and toes in raynaud’s phenomenon. *Journal of Korean medical science*, v. 29, p. 502–6, 04 2014.
- LIN, J.-W.; LU, M.-H.; LIN, Y.-H. A thermal camera based continuous body temperature measurement system. In: . [S.l.: s.n.], 2019. p. 1681–1687.
- LJUBENOVIC, M.; MILIC, M. Arduino-based non-contact system for thermal-imaging of electronic circuits. In: . [S.l.: s.n.], 2018.
- LODI, D. J.; TAVARES, G. F.; SCHIASSI L.AND ARAUJO, H. B. *Uso da termografia na avaliação do conforto térmico de vacas holandesas em lactação*. Monografia — Universidade Federal de Mato Grosso, UFMT, Sinop-MT, 2014.
- LOJADOMECANICO. 2020. Disponível em: <<https://www.lojadomecanico.com.br/>>. Acesso em: 04 jun. 2020.
- LOJAKNIPEX. 2020. Disponível em: <<https://www.lojaknipex.com.br>>. Acesso em: 04 jun. 2020.
- LOUGHIN, C.; MARINO, D. Evaluation of thermographic imaging of the limbs of healthy dogs. *American journal of veterinary research*, v. 68, p. 1064–9, 11 2007.
- MAEDA, K. Far infrared- treatment and medical revolution. In: . [S.l.: s.n.], 1997.
- MAGAS, V. et al. Diagnosis of rsi - wmsd handle by thermography [avaliação da aplicação da termografia no diagnóstico de ler-dort de punho]. In: . [S.l.: s.n.], 2012.
- MANSI, M. et al. Authentic: a very low-cost infrared detector and camera system. In: . [S.l.: s.n.], 2003. p. 227–238.
- MEASUREMENTS, O. infrared. *infrared measurements, Basic Principles of non-contact temperature measurement*. [S.l.]: OPTRIS, 2019.
- MELEXIS. *Datasheet IR 16x4*. [S.l.], 2016. Rev. 3.0.
- MELRINHO, A.; MATIAS, L.; FARIA, P. Detecção de anomalias em impermeabilizações de coberturas em terraço através da termografia de infravermelhos. *Tech ITT*, Gatewit, v. 13, n. 37, p. 29–38, 2015.
- MENDONÇA, L. V.; AMARAL, M.; CATARINO, P. A termografia por infravermelhos como ferramenta para auxílio à inspeção e manutenção dos edifícios. *Jornadas de Engenharia de Manutenção*. ISEL, 2013.

- MEYER, J. et al. Mast cell dependent vascular changes associated with an acute response to cold immersion in primary contact urticaria. *PloS one*, v. 8, p. e56773, 02 2013.
- MINAR, J.; RIHA, K. The device for low-cost measurement of 2d thermal distribution. *International Journal of Advances in Telecommunications, Electrotechnics, Signals and Systems*, v. 1, 12 2012.
- MIOTELLO, S. et al. Infrared thermography a suitable technique to evaluate the quality of corn silage after the fermentation process. *Annual Meeting of the European Federation of Animal Science*, p. 4692, 2009.
- ML, B. et al. Termografia pericial. *RBFT*, p. 82–87, 2011.
- MONTE, G. et al. Smart sensing of systems thermal behavior using low cost infrared cameras. In: . [S.l.: s.n.], 2019. p. 5544–5549.
- MORASIEWICZ, L. et al. Use of thermography to monitor the bone regenerate during limb lengthening - preliminary communication. *Ortopedia, traumatologia, rehabilitacja*, v. 10, p. 279–85, 06 2008.
- MULLER, A.; SARAIVA, M.; SARAIVA, K. *Teoria da Radiação*. [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- NAHM, F. et al. Infrared thermography in the assessment of temporomandibular joint disorder. *The Korean Journal of Pain*, v. 20, 01 2007.
- NASCIMENTO, G. et al. Termografia infravermelho na estimativa de conforto térmico de frangos de corte. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, p. 658–663, 06 2014.
- NESSENZVEIG, H. *Curso de Física Básica*. [S.l.]: Editora Blucher, 1998.
- NETO, L.; SILVA, M. Gameiro da. Utilização da termografia por infra-vermelhos na avaliação do desempenho de cortinas de ar. In: . [S.l.: s.n.], 2003.
- NOGUEIRA, F. R. B. et al. Termografia infravermelha: Uma ferramenta para auxiliar no diagnóstico e prognóstico de mastite em ovelha. In: . [S.l.: s.n.], 2013.
- NOVO, M. M. M. et al. Fundamentos básicos de emissividade e sua correlação com os materiais refratários, conservação de energia e sustentabilidade. *Cerâmica 60*, p. 22–33, 2014.
- OLIVEIRA, J. H. E. d. *Inspeção Automatizada Utilizando Termografia*. 28 p. Monografia (mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, RIO GRANDE DO SUL, 2010.

OLIVEIRA, R. A. d.; SILVA, A. P. B. d. William Herschel, os raios invisíveis e as primeiras ideias sobre radiação infravermelha. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, scielo, v. 36, p. 01 – 11, 12 2014. ISSN 1806-1117. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\\_arttext&pid=S1806-11172014000400022&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1806-11172014000400022&nrm=iso)>.

PAULING, J. et al. Comparison of infrared thermography and laser speckle contrast imaging for the dynamic assessment of digital microvascular function. *Microvascular research*, v. 83, p. 162–7, 07 2011.

PEDROSA, J.; ATHAYDE, M. *Técnicas para instrumentação – sensores de temperatura aplicados a termografia*. [S.l.]: Universidade de Campinas, 2012.

PERIN, A. L. Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS), Departamento de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, Brasil*, 2009.

PESTANA, D. G.; MENDONÇA, F.; MORGADO-DIAS, F. A low cost fpga based thermal imaging camera for fault detection in pv panels. In: . [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

PINHEIRO L.M, e. a. *tabelas de vigas: deslocamentos e momentos de engastamento perfeito*. [S.l.], 2010.

PORTICH, P. Análise integrada da carga física de trabalho para prevenção da fadiga. dissertação (mestrado profissionalizante em engenharia de produção) – universidade do rio grande do sul, porto alegre,. In: . [S.l.: s.n.], 2003.

PRICE, J. et al. System capabilities, requirements and design of the gdl gunfire detection and location system. In: . [S.l.: s.n.], 2004. p. 257– 262. ISBN 0-7695-2250-5.

QI, H.; DIAKIDES, N. Thermal infrared imaging in early breast cancer detection. In: \_\_\_\_\_. [S.l.: s.n.], 2009. p. 139–152.

RAC. 2019. Disponível em: <<http://www.racml.com.br/>>. Acesso em: 02 dez. 2019.

RAD-TERM. 2020. Disponível em: <<https://www.antonioguilherme.web.br.com/blog/materiais-eletricos-e-magneticos/propriedades-termicas/radiacao-termica/>>. Acesso em: 27 mai. 2020.

ROCCO, I. et al. Rgb-d and thermal sensor fusion. In: . [S.l.: s.n.], 2016.

ROCHA, J. H. A. et al. Detecção de infiltração em áreas internas de edificação com termografia infravermelha: estudo de caso. *Ambiente Construção*, scielo, v. 18, p. 329 – 340, 10 2018. ISSN 1678-8621. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\\_arttext&pid=S1678-86212018000400329&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S1678-86212018000400329&nrm=iso)>.

ROGLER, R.-D.; LÖBL, H.; SCHMIDT, J. A diagnostic system for live electrical joints in power transmission systems. *European Transactions on Electrical Power*, v. 7, p. 331 – 336, 09 2007.

- RUIJS, A. et al. Digital rewarming patterns after median and ulnar nerve injury. *The Journal of hand surgery*, v. 34, p. 54–64, 02 2009.
- S., S. et al. A low cost thermal imaging system for medical diagnostic applications. In: . [S.l.: s.n.], 2015.
- SAFRIN, A. et al. Infrared thermal sensor for a low cost and non-invasive detection of skin cancer. In: \_\_\_\_\_. [S.l.: s.n.], 2020. p. 77–85. ISBN 978-981-15-2316-8.
- SANTOS, M. d. C. F. N. *Uso da termografia para caracterizar qualitativamente fachadas de edifícios*. Dissertação (Mestrado), 2014.
- SBF. 2019. Disponível em: <<https://sbf.org.br/blog/o-que-e-termografia-clinica-funcional-por-imagem-infravermelha/>>. Acesso em: 28 out. 2019.
- SCHAUFELBUHL, A. et al. Uncooled low-cost thermal imager based on micromachined cmos integrated sensor array. *Microelectromechanical Systems, Journal of*, v. 10, p. 503 – 510, 01 2002.
- SCHIMERT, T. et al. Low-cost low-power uncooled 120x160 a-si-based microinfrared camera for law enforcement applications. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, v. 4232, 02 2001.
- SCHUÍNA, L.; MUNIZ, P.; BRUNORO, M. Termografia infravermelha aplicada a conexões elétricas defeituosas. In: . [S.l.: s.n.], 2015.
- SDP/SI. *HANDBOOK OF TIMING BELTS AND PULLEYS*. [S.l.]: SDP/SI, 2019.
- SIEGEL, R. Land mine detection. *Instrumentation Measurement Magazine, IEEE*, v. 5, p. 22 – 28, 01 2003.
- SILVA, E. et al. Avaliação da adaptabilidade de caprinos leiteiros no semiárido brasileiro com auxílio da termografia infravermelha. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, v. 2, p. 95–101, 07 2014.
- SOBRATERM. Física do infravermelho. *Sociedade brasileira de termologia*, 2016.
- SONG, C. et al. Thermographic assessment of tumor growth in mouse xenografts. *International journal of cancer. Journal international du cancer*, v. 121, p. 1055–8, 09 2007.
- SPECTRUM. *Recursos para compreensão da tecnologia IR*. [S.l.]: Raytek, 1998.
- THERMALSCOPE. 2020. Disponível em: <<http://thermalscope.com/about-thermal-imaging>>. Acesso em: 26 mai. 2020.
- THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. *Sensores industriais – fundamentos e aplicações*. [S.l.]: 8ª edição, editora Erica, 2011.

TRADENER. 2020. Disponível em: <[http://www.tradener.com.br/atualidades/\\_detalhes/o-que-e-energia-termica](http://www.tradener.com.br/atualidades/_detalhes/o-que-e-energia-termica)>. Acesso em: 27 mai. 2020.

TURNER, T. A.; EDDY, L. Diagnóstico pela termografia. *Revista Veterinária*, nº 4, p. 17–95, 2001.

VELLAICHAMY, C.; JAYAS, D.; WHITE, N. Thermal imaging for detecting fungal infection in stored wheat. *Journal of Stored Products Research*, v. 46, p. 174–179, 07 2010.

VIDAS, S.; MOGHADAM, P.; BOSSE, M. 3d thermal mapping of building interiors using an rgb-d and thermal camera. In: . [S.l.: s.n.], 2013. p. 2303–2310.

VOLLMER, M.; MÖLLMANN, K.-P. *Infrared thermal imaging*. [S.l.]: Weinheim: Wiley-VCH, 2010. 611 p.

WATANABE, A.; MASUDA, Y.; OMURA, I. Infrared image correlation for thermal stress analysis of power devices. *Microelectronics Reliability*, v. 100-101, p. 113414, 09 2019.

WEBB, S. *The Physics of Medical Imaging*. [S.l.]: Institute of Physics Publishing, 1988.

WONG, C.; SUBRAMANIAM, R. Use of thermal imaging for understanding simple electrical circuits. *Physics Education*, v. 53, p. 063002, 11 2018.

WU, M. et al. Novel low-cost uncooled infrared camera (invited paper). *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 05 2005.

XHAFSA, A. Development and evaluation of a low-cost infrared thermal camera for industrial predictive maintenance applications. In: . [S.l.: s.n.], 2017.

YAMACHITA, R. A. *Determinação de perdas e rendimento em motores elétricos empregando termografia infravermelha*. Monografia (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

Živcák, J.; Madarász, L.; Hudák, R. Application of medical thermography in the diagnostics of carpal tunnel syndrome. In: *2011 IEEE 12th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 535–539.

APÊNDICE

Conteúdo

A.1	Alumínio estrutural . . . . .	103
A.2	Placa de policarbonato . . . . .	104
A.3	Rolamento e roldana . . . . .	105

Esta seção apresenta o descritivo de componentes utilizados no projeto do DMT, expondo suas características e especificações técnicas.

**A.1 ALUMÍNIO ESTRUTURAL**

Perfis de alumínio estrutural são opções econômicas para criação de estruturas modulares, possuindo grande resistência, sem a necessidade de solda para realizar sua junção. Esses perfis utilizam a liga de alumínio 6063. Essas ligas possuem alta resistência a corrosão e ao desgaste e media resistência mecânica, sendo aplicada em perfis para construção civil, tubos de irrigação, moveis, iluminação, aros para bicicleta e dissipadores de calor. Nesse projeto são utilizados perfis de 80x40 mm (ver Fig. A.1), 80 × 20 mm (ver Fig. A.2), 60 × 20mm (ver Fig. A.3) e 40x20mm (ver Fig. A.4).

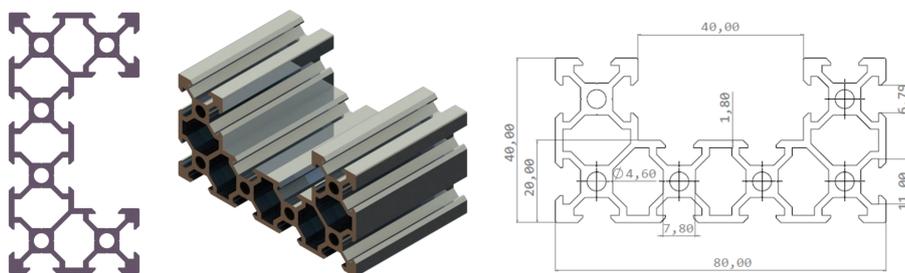


Figura A.1: Perfil modular 40 × 80mm. Perfil estrutural utilizado na sustentação do eixo X, responsável pelo deslocamento do sensor.

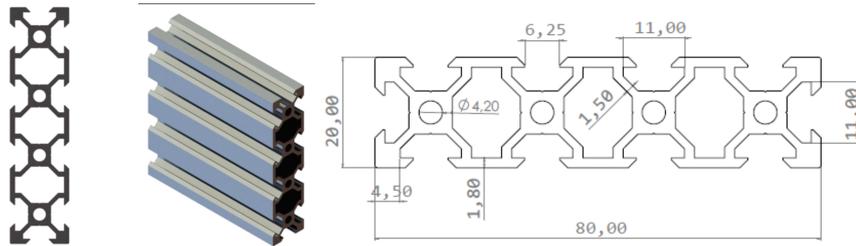


Figura A.2: Perfil modular  $80 \times 20\text{mm}$ . Perfil responsável pela sustentação dos eixos X e Y do sistema DMT.

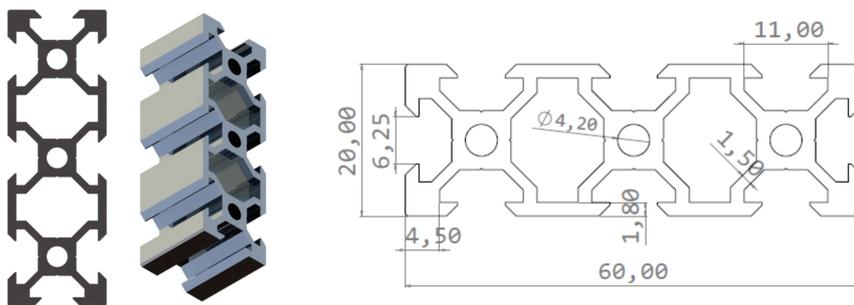


Figura A.3: Perfil modular  $60 \times 20\text{mm}$ . Perfil estrutural cuja função é servir de suporte e estabilidade para todo o conjunto, que compreende os eixos X e Y e a coluna que os sustenta (perfil  $80 \times 20\text{mm}$ ).

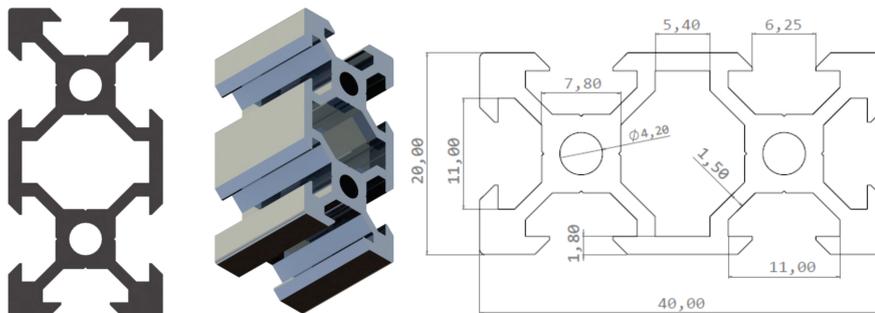


Figura A.4: Perfil modular  $40 \times 20\text{mm}$ . Perfil responsável pela sustentação da unidade sensora. Ele foi escolhido devido a sua pequena dimensão, se comparado aos outros perfis disponíveis, reduzindo os esforços necessários do sistema para sua sustentação.

## A.2 PLACA DE POLICARBONATO

Policarbonato é um polímero rígido, possuindo alta transparência, que aliada a alta resistência ao impacto e baixa densidade torna o policarbonato um plástico de engenharia muito utilizado na construção civil, em substituição ao vidro, em aplicações que

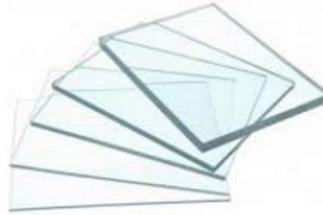


Figura A.5: Policarbonato compacto. Material utilizado em componentes estruturais do projeto, que possui resistência para suportar as cargas necessárias e a leveza para não acrescentar massa ao sistema estrutural.

demandam grande transparência em conjunto a uma grande resistência (ver exemplo na Fig. A.5). Possui alta resistência térmica e elevado módulo de flexão, sendo utilizado em produtos como lentes de óculos, mamadeiras, faróis e peças que necessitem de alta transparência e resistência mecânica.

### A.3 ROLAMENTO E ROLDANA

A roldana e rolamento (ver Fig. A.6) formam uma combinação importante que é responsável pela movimentação dos eixos da máquina nesse projeto. Esse conjunto possibilita a formação das polias responsáveis por suportar o eixo X e o deslocamento do sensor no eixo Y. O rolamento utilizado é um rolamento rígido de esfera SKF 625-ZZ. A roldana é confeccionada em Delrin, resina de acetal desenvolvida pela Dupont, que preenche, a nível de aplicação, um espaço deixado entre os metais e plásticos comuns, possuindo resistência à fluência, força, rigidez, dureza, estabilidade dimensional, robustez, resistência à fadiga, resistência a solventes e combustíveis, resistência à abrasão, baixo desgaste e baixo atrito, utilizado em sistemas de porta, automação de escritórios, soluções para esteiras, soluções para transmissão e produtos para esporte de inverno.



Figura A.6: Roldana 625zz e polia em Delrin. Esse conjunto de componentes são responsáveis pelo deslocamento através do encaixe da polia na estrutura do perfil de alumínio, permitindo o movimento linear de componentes acoplados a roldana. Fontes: <https://www.skf.com> e <https://openbuildspartstore.com>.