

A Prototype of a Thermography Equipment

Leandro Estrela and Luciano Oliveira

Abstract—Thermography is a technique for graphically recording the temperature of bodies above $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ and capable of emitting infrared radiation. This feature allows for the study of temperature behavior in different objects, structures, and surfaces over time. This work aims to describe the conception of an opensource thermographic equipment. This paper covers the stages of construction of the physical structure, data acquisition, movement system, electronics, control, electrical system, and graphical interface for equipment control and image formation. The proposed equipment has an accuracy of $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, at a temperature between $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, a usable reading area of $20 \times 22\text{ cm}$, producing images with $32 \times 36\text{ pixels}$, and capable of reading objects with temperatures between $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. The equipment proposed here works for studies of thermography in small bodies, such as the human hand, small objects with heat variation, electronic circuits, and components and portable devices (e.g. smartphones, lithium-ion batteries, tablets), just to cite a few. The thermal images produced by the proposed equipment have well-defined contours and uniform thermal characteristics.

Index Terms—Thermographic equipment, prototype, thermal image.

I. INTRODUÇÃO

A termografia é uma técnica não invasiva usada para medir a distribuição de temperatura em determinado corpo, superfície ou estrutura. Uma câmera térmica é um dispositivo, sem contato, que detecta energia infravermelha (calor) através de uma matriz de sensores e converte em sinal eletrônico, o qual será processado para produzir a imagem térmica (termograma) [1]. Tais câmeras realizam a leitura de pequenas alterações de energia infravermelha emitidas por todos os corpos que possuem temperatura acima de $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2]. Esses corpos irradiam uma potência eletromagnética na faixa de frequência do infravermelho, que se propaga na atmosfera podendo 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 [3]. A medição da radiação proveniente de um corpo, realizada pelas câmeras térmicas, ocorre em duas etapas: (i) a radiação emitida pelo corpo é percebida pelo detector da câmera térmica e medida, e (ii) essa informação é convertida em temperatura através de um algoritmo de cálculo que considera a lei de Planck [4].

Por utilizar a temperatura como parâmetro de percepção da realidade, a termografia possui diversas aplicações, tais como detecção de infecções fúngicas em plantações de trigo, controle de temperatura da manufatura de alimento e o monitoramento de processos quentes, podendo também eviden-

ciar informações sobre a qualidade de frutas e vegetais [5], detecção de fuga de calor, podendo empregar *drones* para realizar essa inspeção [6], análise de condições térmicas em instalações elétricas [7] e detecção de minas terrestres [8], não sendo esta uma lista exaustiva.

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 US\$ 399,99. Câmeras térmicas de bolso, como a Fluke© PTi120 e a FLIR© C2 custam em média US\$ 899,99 e US\$ 351,58, respectivamente. Câmeras térmicas com tecnologias e recursos profissionais, tais como a FLIR© T1020 HD e a Fluke© TiX 580, custam em média US\$ 47.300,00 e US\$ 14.000,00, respectivamente. Câmeras térmicas com elevada precisão, como a FLIR© T530 e a T540, possuem valores de aproximadamente US\$ 11.000 e US\$ 16.500, respectivamente. Estes valores foram levantados nos sites de internet dos fabricantes, em 10 de dezembro de 2020. O custo das câmeras térmicas, que depende de sua especificidade e recursos, pode se tornar um fator impeditivo para que a termografia, como uma ferramenta de apoio a produção científica, tenha êxito em sua aplicação. Em relação a pesquisa científica envolvendo a termografia, o custo se torna um parâmetro crítico a depender da precisão, recursos da câmera e sua aplicação. Estudos na área de termografia clínica demandam câmeras térmicas de alta precisão ($\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$), que por sua vez necessitam de um alto investimento. Em vista disso, a proposta desse artigo é apresentar o desenvolvimento de um equipamento mecatrônico termográfico que pode ser reproduzido em laboratório com materiais genéricos, apresentando os aspectos mais relevantes de seu desenvolvimento, tais como estrutura física, sistema eletroeletrônico, aquisição de dados, integração do sistema e interface responsável pelo controle e produção da imagem térmica.

A. Trabalhos Relacionados

O desenvolvimento de equipamentos térmicos tem caminhado em três vertentes: semicondutores termográficos; integração de sistemas com câmeras comerciais e produção de sistemas com sensores térmicos sem contato.

Os **semicondutores termográficos** são estruturas encapsuladas utilizadas para a produção de detectores térmicos. As tecnologias utilizadas são InSb FPA (*focal plane array*) [9], microbolômetros utilizando diversos materiais [10], [11], [12], [13] e semicondutor termoeletrônico [14]. Os sistemas envolvendo o InSb FPA são tecnologias que fornecem soluções envolvendo sistemas térmicos de imagem, tornando-se os melhores candidatos para produção de dispositivos portáteis [9]. Os microbolômetros, como detectores de infravermelho, podem ser feitos de silício amorfo [10], [13], óxido de titânio

L. Estrela is a master student in the Graduation Program in Mechatronics (PPGM), Universidade Federal da Bahia, Bahia, Brazil, e-mail: (see <http://ivisionlab.ufba.br/people.html>).

L. Oliveira is an associate professor in the Computer Science Department and head of the IvisionLab (see <http://ivisionlab.ufba.br/people.html>).

[11] ou material piroelétrico [12]. Os detectores termoeletrônicos são construídos a partir de um material semiconductor-metal-óxido, podendo ser aplicados em detecções de presença e controle de construções [14].

A **integração de sistemas com câmeras comerciais** está relacionada à utilização de tecnologias comerciais para produção de protótipos que tenham a finalidade de gerar imagens térmicas. Os modelos de câmeras térmicas FLIR[®] têm sido aplicados nesses tipos de sistemas. A câmera FLIR[®] Lepton tem sido utilizada em manutenção preditiva industrial [15], comportamentos de sistemas térmicos [16], detecção de falhas em painéis solares [17]. Por exemplo, a câmera FLIR[®] Tau2 foi utilizada em um sistema de medição de temperatura sem fio [18] e a câmera FLIR[®] Photon foi acoplada a um sistema de escaneamento a *laser*, sendo embarcada em veículo terrestre ou *drone*, para ser utilizado na produção de medição de florestas e caracterização de árvores em florestas urbanas [19].

A terceira vertente tecnológica está relacionada à produção de equipamentos para geração de imagens térmicas, utilizando sensores infravermelho sem contato. A empresa Melexis é a responsável pela fabricação dos modelos MLX90614 [20], MLX90620 [1], [21] e MLX90621 [22], [23]. 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 [22], [20], sistema de imagem térmica para diagnóstico médico [1], [21], sistema de proteção de crianças no interior de veículos [23], proteção da vida selvagem entre a vegetação devido ao processo de ceifa [24], entre outros. Esses sistemas possuem um custo relativamente inferior se comparado às outras linhas de pesquisa apresentadas anteriormente. O equipamento proposto nesse artigo se encaixa nesse terceira vertente e utiliza o sensor MLX90621.

B. Contribuições

Como contribuição, esse artigo traz o desenvolvimento de um equipamento cujo sensor possui precisão de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ¹, com temperatura ambiente entre $0 \text{ }^\circ\text{C}$ e $50 \text{ }^\circ\text{C}$, área útil de leitura de $20 \times 22 \text{ cm}$, produzindo imagens com $32 \times 36 \text{ pixels}$ de resolução, e capaz de realizar leitura de objetos com temperaturas entre $0 \text{ }^\circ\text{C}$ e $300 \text{ }^\circ\text{C}$, com um custo de fabricação abaixo de US\$ 143,00. Ele é capaz de produzir imagens térmicas de objetos, áreas e estruturas, como a geração de imagens térmicas de dispositivos eletrônicos e produtos de pequeno porte. A Fig. 1 apresenta a imagem de um *smartphone* (imagem A0) e as imagens térmicas desse dispositivo produzidas no equipamento aqui proposto, utilizando os mapas de cores HSV (imagem A1), jet (imagem A2) e inferno (imagem A3).

Os equipamentos propostos em [20] e [22] apresentam custos inferiores ao equipamento proposto nesse artigo já que não possuem uma estrutura física na sua construção. Em contrapartida, o equipamento introduzido em [20] possui uma perda de sensibilidade devido a angulação do sensor e leitura térmica limitada a 1 pixel por leitura, e os trabalhos

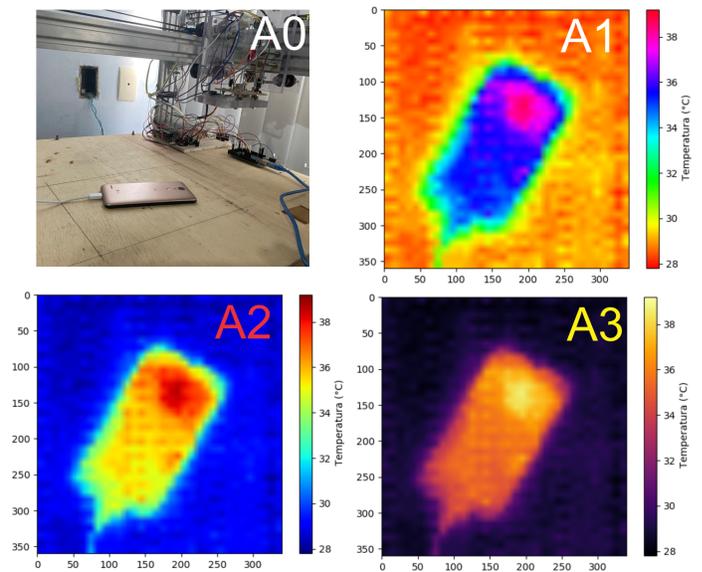


Fig. 1. Leitura térmica de um aparelho celular utilizando o protótipo. Essa leitura possui uma temperatura mínima de $27.8 \text{ }^\circ\text{C}$, temperatura máxima de $39.2 \text{ }^\circ\text{C}$. A imagem A0 apresenta o aparelho celular na área de leitura do protótipo. A imagem A1 apresenta a leitura em mapa de cores **HSV**. A imagem A2 apresenta a leitura com mapa de cores **jet**, e a imagem A3 com mapa de cores **inferno**.

em [22] e [1] apresentam restrições na produção de imagem, limitada a $16 \times 4 \text{ pixels}$. O trabalho proposto em [22] possui limitação na imagem térmica, sendo visualizada apenas em um *display* LCD de $1,8 \text{ polegadas}$. O equipamento aqui proposto, apesar de apresentar um custo até 33% maior do que alguns trabalhos anteriores, pode produzir imagem com resolução térmica de $32 \times 36 \text{ pixels}$, podendo ser aumentada até a área útil total do protótipo, necessitando apenas de alterações em seu algoritmo de funcionamento e formação da imagem. Vale ressaltar também que o equipamento apresentado nesse artigo não possui perda de sensibilidade do sensor, limitação encontrada nos trabalhos citados anteriormente, ou restrições na produção de imagens maiores que $16 \times 4 \text{ pixels}$. A Table I mostra um quadro comparativo entre os modelos de sensores utilizados nos trabalhos acima mencionados.

II. PROTÓTIPO DE UM EQUIPAMENTO TERMOGRÁFICO

O desenvolvimento desse protótipo foi dividido em *hardware*, aquisição de dados e interface. O *hardware* é formado por toda estrutura física necessária para apoiar o funcionamento da estrutura de aquisição de dados. A aquisição de dados é responsável por toda coleta de dados pelo sensor MLX90621 e envio dessas informações para que a interface tenha meios de produzir a imagem térmica. A interface é responsável por promover toda interação com o usuário do sistema e todo processamento e análise para a produção da imagem térmica.

A. Hardware

Na Fig. 2 é representado o *hardware* do equipamento, composto por estrutura, unidade sensora, unidade de controle, unidade motora e movimento, e unidade de energia.

¹Precisão informada pelo *datasheet* do sensor.

TABLE I
COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS DE SENSOR TÉRMICO SEM CONTATO.

Característica	Sensor MLX90614	MLX90620	MLX90621
Referência que usa o sensor	[20]	[1], [21]	[22], [24], Protótipo proposto
Resolução do sensor (<i>pixels</i>)	1 × 1	16 × 4	16 × 4
Medição de temperatura	-70 °C a 380 °C	-50 °C a 300 °C	-20 °C a 300 °C
Campo de visão do sensor	35°/10°/12° /5°/13°	60° × 40°	120° × 25°/ 40° × 10°/ 60° × 16°
Precisão do sensor	± (0,5 °C a 4 °C)	± (1 °C a 5,5 °C)	± (1 °C a 5,5 °C)

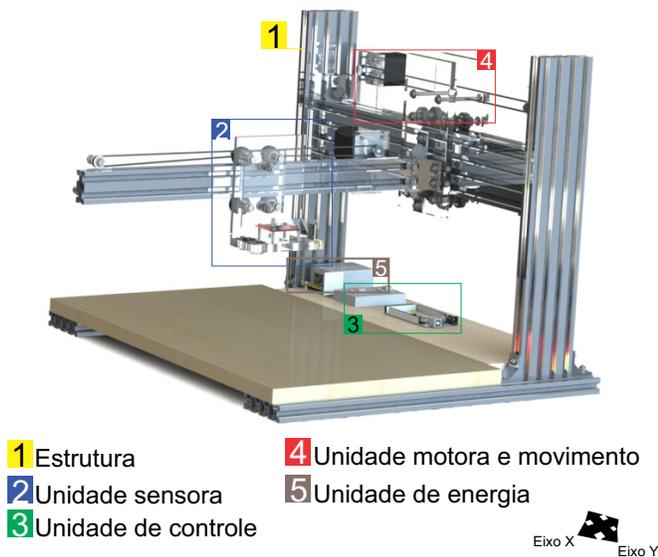


Fig. 2. Representação do *hardware* do protótipo, com os módulos responsáveis pelo seu funcionamento. Todos esses módulos funcionam de forma integrada para realizar a produção das imagens térmicas.

1) *Estrutura*: A estrutura é a unidade responsável por sustentar todo o protótipo sob o ponto de vista mecânico, utilizando perfis de liga de alumínio 6063, placas de polycarbonato de 10mm, parafusos de aço e cantoneiras. Essa estrutura é capaz de suportar todos os esforços mecânicos necessários e futuras alterações, caso sejam necessárias. O principal esforço sofrido na estrutura do protótipo está relacionado a capacidade do perfil em flexionar em razão do peso da unidade sensora no eixo X, possuindo em torno de 300 gramas, onde a deflexão máxima deve ocorrer na extremidade do eixo X, e no conjunto do eixo X, envolvendo a unidade sensora e o perfil de alumínio, em relação ao eixo Y, onde a deflexão máxima ocorre no centro do eixo Y, conforme ilustrado na Fig. 3. Essas forças de deflexão estão localizadas no centro do eixo Y e na extremidade do eixo X.

Segundo Pinheiro (2010) [25], a deflexão máxima no eixo Y, causada por uma força central em um perfil bi-apoiado, é representado por

$$D_y = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I}, \quad (1)$$

onde D_y representa a deflexão ocorrida, em mm, P é a força central ao perfil, em kN, L é a distância entre a força e o ponto de apoio do perfil em metros, E é o módulo de elasticidade do perfil em MPa, e I = momento de inércia do perfil em mm^4 . Sabendo-se que, nessa estrutura, $P = 22608$ N, $L = 0,25$ m,

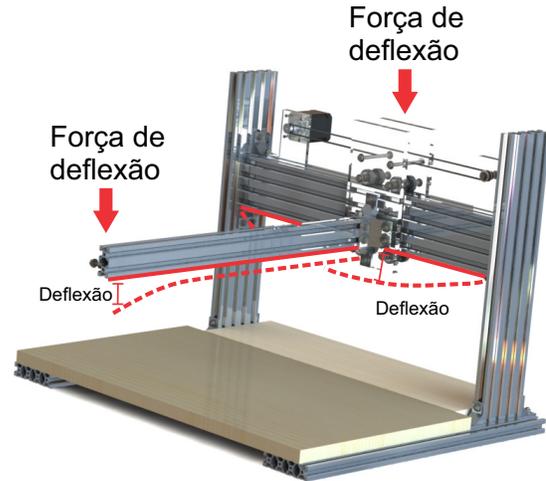


Fig. 3. Ilustração da força de deflexão no centro, no eixo Y, e na extremidade do eixo X. Essas forças são ocasionadas pela massa do conjunto no eixo Y e massa da unidade sensora no eixo X.

$E = 70000$ MPa e $I = 5200000$ mm^4 , é possível afirmar que a deflexão máxima (D_y) que poderá ocorrer no eixo Y é de $2,02 \cdot 10^{-11}$ mm.

Outro caso de deflexão poderá ocorrer no eixo X por conta do esforço causado pela unidade sensora (ver Fig. 3). Segundo Beer (2013) [26], a deflexão em X, proporcionada por uma força transversal a um perfil, é representada por

$$D_x = -\frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}, \quad (2)$$

onde D_x é dado em mm, P é a força transversal ao perfil (kN), L é a distância entre a força e o ponto de apoio do perfil em metros, E é o módulo de elasticidade do perfil (MPa), e I = momento de inércia do perfil (mm^4). Sabendo-se que $P = 2980$ N, $L = 0,4$ m, $E = 70000$ MPa e $I = 26666$ mm^4 , podemos afirmar que a deflexão (D_x) que possa ocorrer na extremidade do eixo X é de $-3,406 \cdot 10^{-8}$ mm.

A partir dos cálculos apresentados, observa-se que a estrutura do protótipo suportará os esforços empregados tanto no eixo X, quanto no eixo Y, devido a deflexão dos eixos apresentarem resultados extremamente ínfimos, podendo ser considerados nulos, sob o ponto de vista estrutural. Os valores apresentados mostram que a deflexão é um esforço irrelevante em relação a integridade estrutural do protótipo.

2) *Unidade sensora*: A unidade sensora é composta pelo sensor sem contato MLX90621 (ver Fig. 4), produzindo uma matriz térmica de leitura de 16×4 *pixels*, totalizando a formação de 64 *pixels* térmicos em uma única leitura. A Fig.

4 mostra a unidade sensora, apresentado lateralmente o sensor MLX90621, que se encontra embutido no circuito selecionado. Ele possui calibração de fábrica, onde as informações de calibração se encontram armazenadas na memória EEPROM do sensor. O MLX90621 é capaz de realizar leituras de temperatura do ambiente que variam entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, e temperaturas de objetos com variações entre $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. O campo de visão do modelo utilizado na construção desse protótipo é de $40^{\circ} \times 10^{\circ}$. O sensor MLX 90621 foi escolhido graças ao tamanho da sua matriz térmica resultante e da facilidade de aquisição de dados (ver comparação na Table I).

A determinação do comprimento do campo de visão (CV_H), assim como sua largura (CV_V), 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 (AC_V), conforme mostrado na Fig. 5, onde são representadas as variáveis necessárias para o cálculo da região de leitura, utilizando relações trigonométricas. Sabendo-se que os ângulos do campo de visão do sensor possuem 40° horizontal e 10° vertical, pode-se afirmar que

$$CV_H = CV_V = 2 \cdot DT \cdot \tan \frac{AC_V(^{\circ})}{2}, \quad (3)$$

onde $DT = 153\text{ mm}$, tangente de $20^{\circ} = 0,36397$ e tangente de $5^{\circ} = 0,087489$. A partir dessas informações, chega-se a dimensão teórica do campo de visão do sensor, expressa por $CV_H = 111\text{ mm}$ e $CV_V = 27\text{ mm}$. Testes práticos, utilizando um corpo com temperatura constante, com o sensor mostraram que o sensor apresenta uma largura real de 109 mm e comprimento real de 28 mm .

3) *Unidade de controle*: O dispositivo responsável pelo controle dos motores, aquisição dos dados pelo sensor e comunicação com a interface do protótipo é o microcontrolador ATmega 2560, vinculado à plataforma de prototipagem rápida Arduino mega 2560. A plataforma Arduino foi escolhida por atender os critérios de custo, desempenho e periféricos.

4) *Unidade motora e movimento*: A unidade motora do protótipo é constituída por motores de passo Nema 17 HS4401 e *drivers* DRV8825, utilizados no controle de movimentação dos motores. Os motores de passo foram escolhidos, em relação aos servomotores, por causa de sua precisão superior. A movimentação dos eixos envolve uma integração entre roldanas com rolamentos, polias e correias.



Fig. 4. Unidade sensora montada no protótipo mecânico termográfico, onde se encontra o sensor MLX90621, integrado a um circuito eletrônico.

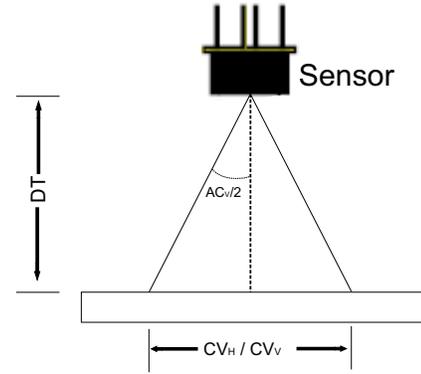


Fig. 5. Distância entre o sensor e sua região de leitura. Esses parâmetros são utilizados para dimensionamento do campo de visão do sensor.

A precisão na movimentação, necessária para a aquisição dos dados, é uma relação que é estabelecida pelas características da correia, polia e motor de passo. A princípio, o sistema do protótipo necessita de uma precisão de $\pm 1\text{ mm}$, por conta do campo de visão do sensor, visto que precisões maiores não iriam melhorar a medição desse campo de visão. Sabendo-se que a correia possui passo de 2 mm , a polia possui 20 dentes e o motor de passo opera na configuração passo completo, que equivale a 200 passos por revolução, é possível afirmar que

$$\tau = \frac{M_p \cdot C_m}{P_c \cdot D_p}, \quad (4)$$

onde τ é dado em passos/mm, M_p são os passos do motor, C_m é a configuração de micro passo, P_c é o passo da correia e D_p representa os dentes da polia. Sendo a configuração de micro passo igual a 1, devido a configuração passo completo, então $\tau = 5$. Diante disso, é possível afirmar que a precisão do sistema é de $0,2\text{ mm}$, visto que

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{5} = 0,2. \quad (5)$$

5) *Unidade de energia*: O fornecimento de energia para os motores de passo e *drivers* para controle dos motores foi realizado por uma fonte chaveada de 12 volts e 5 amperes. O consumo energético total dos motores e *drivers* é de $4,01\text{ A}$. A fonte chaveada foi escolhida devido a sua grande eficiência energética, peso e tamanho reduzido e menor dissipação de calor.

B. Aquisição de Dados

A aquisição de dados é uma interação que ocorre entre o microcontrolador, o sensor MLX90621 e a interface, conforme mostrado na Fig. 6, onde é representada a interação entre a interface, o microcontrolador e o sensor. Essa interação é responsável pela aquisição de dados do protótipo. O processo de aquisição se inicia com a solicitação feita pelo usuário do protótipo através da interface. Essa requisição de dados é feita pelo microcontrolador, que ao trocar informações com o sensor, realiza todo o processamento necessário para que

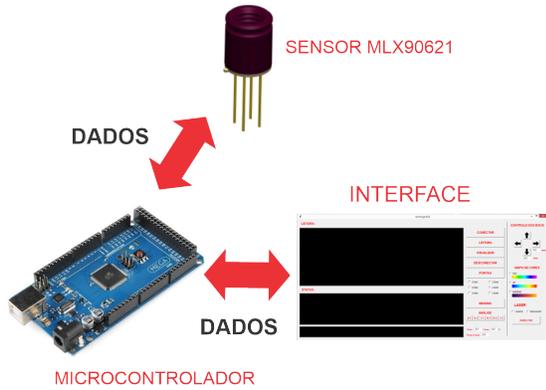


Fig. 6. A aquisição de dados é um procedimento que envolve a interação entre o protótipo e a interface, que se encontra localizada em um computador.

os dados térmicos sejam produzidos. Todos os cálculos e processamento necessários são feitos pelo microcontrolador, através de biblioteca específica do sensor. Após a produção dos dados térmicos pelo microcontrolador, essas informações são enviadas a interface, que realiza todo o processamento necessário até a produção da imagem térmica final do objeto lido.

C. Interface

A interface é o meio de interação entre o usuário e o protótipo. Através dela, é possível realizar a aquisição de dados térmicos do objeto a ser medido, análise para melhoria do algoritmo de costura da imagem, definição de parâmetros das imagens térmicas como a amplitude do mapa de cor e seu tipo e movimentação do protótipo.

III. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO TERMÓGRAFO

O princípio de funcionamento do protótipo está relacionado diretamente ao deslocamento dos eixos, cuja movimentação

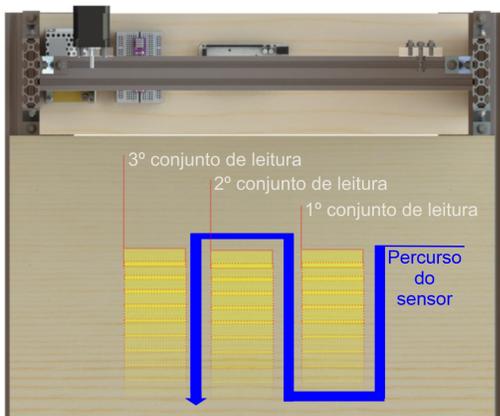


Fig. 7. Estágios de leitura do sensor ao longo da movimentação dos eixos. O percurso em azul apresenta a forma como o sensor se desloca utilizando os eixos do protótipo. As regiões em amarelo apresenta a forma como o sensor realiza a captura das informações térmicas em relação ao movimento da unidade sensora do protótipo.

é responsável por deslocar a unidade sensora e realizar a leitura térmica do objeto. O sentido de leitura é uma interação entre a movimentação dos Eixos X e Y em relação a área útil de leitura do protótipo (ver Fig. 7). Área útil de leitura é toda a região percorrida pelo sensor em seu deslocamento no momento da leitura. A Fig. 7 mostra o percurso realizado pela unidade sensora, em azul, e seus conjuntos de leituras, em amarelo, necessários para formação da imagem térmica final. Cada estágio compreende um conjunto de 17 leituras do sensor, totalizando 51 imagens térmicas capturadas com resolução de 16×4 pixels cada. A resolução de 16×4 pixels refere-se a resolução do sensor. A junção das 51 imagens térmicas provenientes da leitura do sensor produz uma imagem térmica de 32×36 pixels. Em cada conjunto de leitura, o sensor captura 4 matrizes térmicas por leitura, buscando homogeneizar a representação gráfica da imagem térmica final.

A. Image Stitching

O processo de formação das imagens primárias utiliza o método analítico quantitativo. A Figura 8 ilustra os procedimentos utilizados para comparação de dados capturados pelo sensor. O processo de leitura e aquisição de dados pelo sensor gera as imagens primárias (ver Fig. 9-I), necessárias ao processo de *image stitching* e formação da imagem final. O método consiste em utilizar ferramentas estatísticas para verificar a equivalência amostral dos dados e de probabilidade com o intuito de verificação de sua equivalência binária. A probabilidade da equivalência dos binários (P_{eb}) é dada por

$$P_{eb} = \frac{\sum [(P_{a(x,y)} = P_{b(x,y)} > 1) + (P_{a(x,y)} = P_{b(x,y)} < 1)]}{32}, \quad (6)$$

onde $P_{a(x,y)}$ são os *pixels* da região A e $P_{b(x,y)}$ são os *pixels* da região B. O primeiro conjunto de leitura apresentou uma probabilidade de equivalência binária mínima de 81,2%, obtendo uma variação amostral da média de 1,8% e 1,7% da mediana, com uma variação máxima entre as regiões de 0,5 °C. O segundo conjunto de leitura apresentou uma probabilidade de equivalência binária, em sua maioria, de 75,0%, obtendo uma variação amostral da média de 1,8% e 3,8% da mediana, com uma variação máxima entre as regiões de 0,5 °C. O terceiro conjunto de leitura apresentou uma probabilidade de equivalência binária mínima de 82,1%, obtendo uma variação amostral da média de 2,8% e 2,5% da mediana, com uma variação máxima entre as regiões de 0,5 °C.

O processo de *image stitching* necessita de um *pixel* de referência, que assume a configuração de

$$\begin{bmatrix} P_{(X_0-1, Y_0+1)} & P_{(X_0, Y_0+1)} & P_{(X_0+1, Y_0+1)} \\ P_{(X_0-1, Y_0)} & P_{(X_0, Y_0)} & P_{(X_0+1, Y_0)} \\ P_{(X_0-1, Y_0-1)} & P_{(X_0, Y_0-1)} & P_{(X_0+1, Y_0-1)} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Sendo utilizado como padrão para comparação *pixel a pixel*. Na ausência de equivalências, assume-se que o padrão de *pixels* encontrados tenha, no mínimo, 75% de chances de serem equivalentes, sendo

$$\frac{\sum P_e}{9} \cdot 100 \geq 75, \quad (8)$$

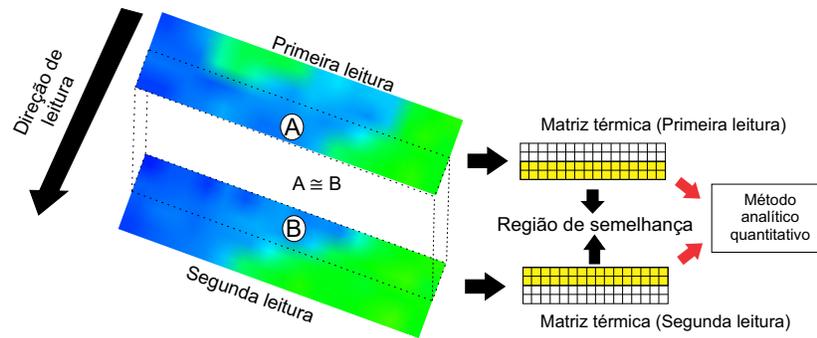


Fig. 8. Comparação das imagens em relação as leituras. Essa comparação é feita utilizando o método analítico quantitativo a partir de amostras das matrizes térmicas produzidas pelo sensor, ao longo de seu percurso de deslocamento.

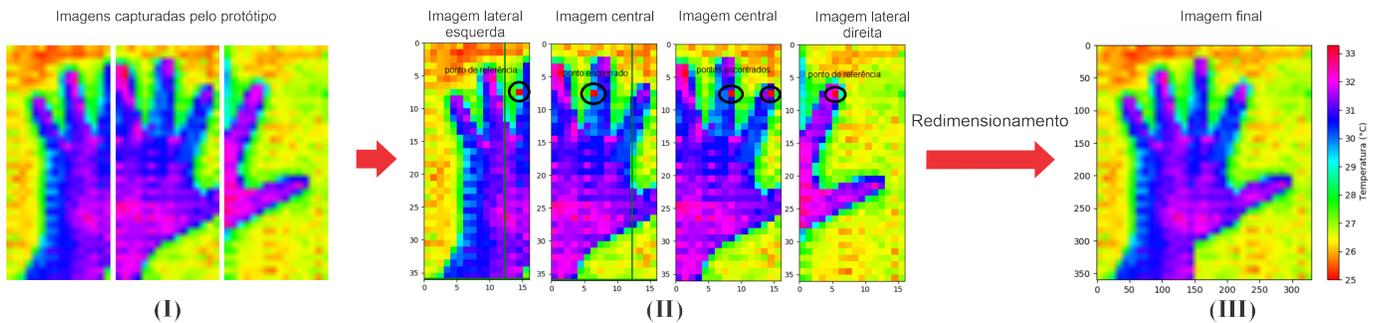


Fig. 9. Pontos selecionados e pontos encontrados nas imagens laterais e imagem central. Essa imagem ilustra a sequência de passos necessários até a produção da imagem térmica final. Após a produção das imagens principais (I), segue-se o processo de *image stitching* (II), até a produção da imagem final que passa por redimensionamento (III).

onde P_e são os pontos equivalentes binários encontrados. Obtendo os pontos de semelhança por método comparativo (ver Fig.9-II), busca-se recortar as imagens por subtração de *pixels* para formação da imagem térmica com 32×36 *pixels*. A imagem formada sofre um redimensionamento por interpolação bilinear, originando a imagem térmica final com 320×360 *pixels* (ver Fig.9-III). A Fig. 9 mostra todo o processo de *image stitching* para formação da imagem final, apresentando as etapas necessárias.

IV. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS

Nessa seção, serão avaliadas algumas características relevantes para uma melhor compreensão das capacidades e limitações do protótipo. Os parâmetros a serem abordados são precisão do sensor, precisão mecânica de seu sistema de movimentação e precisão da imagem, quando relacionado ao seu contraste e ruídos, fatores responsáveis pela qualidade da visualização da imagem térmica produzida, sumarizados na Table II.

1) *Precisão do Sensor*: A avaliação da precisão do sensor MLX90621 está relacionada a satisfação de seus parâmetros elétricos, de configuração, montagem e ambientais informados em seu *datasheet*, buscando um melhor desempenho do mesmo em seu funcionamento. Atingidos esses parâmetros, não julgou ser necessário realizar testes posteriores para confirmar as informações sobre precisão informadas pelo fabricante.

2) *Precisão Mecânica*: O procedimento de precisão mecânica do protótipo consistiu em realizar medições em distâncias preestabelecidas, para se conhecer o erro existente

no sistema de movimentação. As distâncias estabelecidas para o eixo X foi de 80, 100, 120, 140, 160 e 180 milímetros, enquanto que no eixo Y foram utilizadas as distâncias 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 160 milímetros. Os resultados mostraram que o erro médio no eixo X foi de 0,45 mm e no eixo Y foi de 0,24 mm. Esses erros não se mostram significativos a ponto de realizarem qualquer alteração na precisão da coleta de dados térmicos em ambos os eixos, visto que a precisão proposta de projeto (± 1 mm) se mostrou superior ao erro apresentado.

3) *Precisão da Imagem*: O *datasheet* do sensor MLX90621 informa que o aumento da resolução do sensor diminui o ruído, melhorando seu desempenho geral. No intuito de se conhecer a relação entre ruído e resolução da temperatura do sensor com relação à velocidade de produção de quadros, realizou-se a produção de imagem de um mesmo corpo, nesse

TABLE II
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

caso, uma mão humana, utilizando o protótipo e adotando a frequência de atualização de quadros de 4 Hz, 16 Hz e 32 Hz. A Fig 10 mostra imagens produzidas pelo protótipo em diferentes frequências e mapas de cores, e como essas alterações impactam na imagem térmica final.

Observando a Fig. 10, nota-se que o aumento da frequência produz ruído e perda de sensibilidade do sensor. Isso é mostrado na geometria circular amarela onde se encontra formação de ruído, que se acentua com o aumento da frequência; na geometria circular vermelha, apresentando perda de sensibilidade do sensor; nas formas retangulares brancas, apresentando deformações nos contornos das imagens, e, por fim, nas geometrias circulares brancas, mostrando uma variação na temperatura de fundo da imagem.

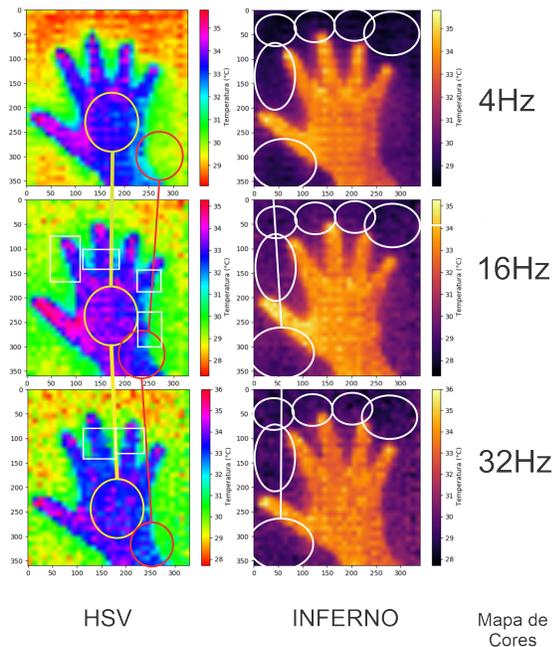


Fig. 10. Comparação das imagens em relação as leituras. Essa comparação é feita com imagens produzidas nas frequências de 4 Hz, 16 Hz e 32 Hz, nos mapas de cores hsv e inferno, para melhor visualização das alterações que ocorrem na produção das imagens.

V. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Nesse artigo, foi apresentado os detalhes de construção de um protótipo de equipamento termográfico, desenvolvido a partir de componentes genéricos, que possui a finalidade de produzir imagens térmicas. Esse protótipo foi concebido para ser uma solução *opensource* para pessoas, grupos de pesquisa ou laboratórios que tenham interesse em realizar estudos a partir de análises térmicas sem a necessidade de um equipamento de alto custo. O equipamento proposto utilizou-se de componentes que, de alguma forma, contribuíram para o seu rápido desenvolvimento, sem a necessidade de software proprietário ou recursos adicionais atrelados. Em contrapartida, o protótipo apresenta uma falta de portabilidade em seu tamanho final. Entre suas aplicações, o protótipo pode produzir imagens térmicas de dispositivos móveis como celulares e *tablets*, circuitos eletrônicos, ou quaisquer outros objetos que caibam na área de rastreamento e possuam uma alteração de calor

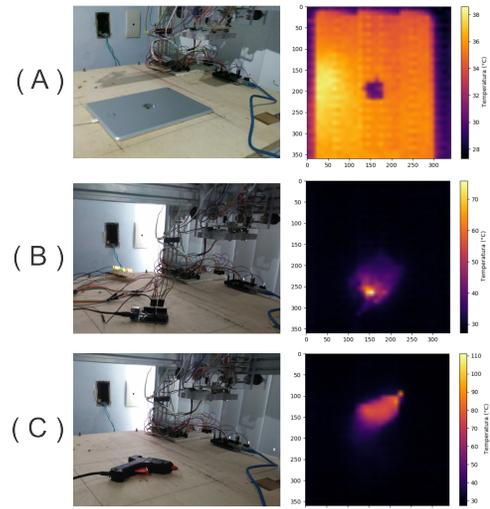


Fig. 11. Esse conjunto de figuras apresentam algumas aplicações do utilização do protótipo desenvolvido nesse trabalho. A figura A apresenta o termograma de um *tablet*, a figura B apresenta o termograma de um sistema microcontrolado (Arduino Uno) e a figura C apresenta o termograma de uma pistola de cola. Todos os termogramas gerados utilizam o mapa de cor inferno.

significativa. A Figura 11 mostra alguns exemplos de imagens térmicas feitas pelo protótipo, como um *tablet*, microcontrolador e uma pistola de cola quente. O protótipo pode também ser aplicado na medição de temperatura de corpos humanos ou de animais. O protótipo desenvolvido apresentou como resultado imagens com contornos bem definidos e contraste térmico perceptível, onde é possível observar as concentrações e variações de temperatura ao longo do da medição térmica.

Entre suas limitações, o tempo de duração de leitura é algo a ser considerado, levando cerca de 13,5 minutos para realização de uma leitura completa. Isso ocorre devido a limitação do microcontrolador em processar ações de componentes diferentes (sensor MLX90621 e motores de passo). Essa limitação pode ser corrigida através da criação de um sistema de tarefas específicas com outro microcontrolador, utilização de sistemas microprocessados ou até mesmo o uso de sistemas operacionais de tempo real *multi-thread*. Melhorias podem ser realizadas no protótipo, através da utilização do sensor MLX90640, sucessor tecnológico do MLX90621 ou adição de sensores de profundidade e câmeras RGB, resultando em uma integração de tecnologias capazes de gerar modelos térmicos em 3 dimensões [27], [28].

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), que proveu bolsa a Leandro Estrela, sob o termo de outorga de bolsa BOL1263 / 2017. O Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) apoiou Luciano Oliveira com uma bolsa de Produtividade em Pesquisa, sob o processo 307550/2018-4.

REFERENCES

- [1] S. S. and S. Mohan, "A low cost thermal imaging system for medical diagnostic applications," in *International Conference on Smart Technolo-*

- gies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM)*, 2015, pp. 621–623.
- [2] J. M. Callegari, L. Gusman, D. do Carmo Mendonça, W. Amorim, I. Alves, H. Pereira, and F. Pinto, “Detection of stressed electronic components in pv inverter using thermal imaging,” *IEEE Latin America Transactions*, p. 2, 10 2020.
 - [3] B. Araújo, “Termografia infravermelha,” 2014.
 - [4] K. Chrzanowski, *Non-contact Thermometry: Measurement Errors*, ser. RDT series. SPIE Polish Chapter, 2001.
 - [5] A. Gowen, T. Brijesh kumar, P. Cullen, K. McDonnell, and C. O’Donnell, “Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment,” *Trends in Food Science & Technology*, vol. 21, pp. 190–200, 2010.
 - [6] J. R. Martinez-de Dios and A. Ollero, “Automatic detection of windows thermal heat losses in buildings using uavs,” in *World Automation Congress*, 2006, pp. 1–6.
 - [7] M. Jadin, K. Ghazali, and S. Taib, “Thermal condition monitoring of electrical installations based on infrared image analysis,” in *International Electronics, Communications and Photonics Conference*, 2013, pp. 1–6.
 - [8] R. Siegel, “Land mine detection,” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 5, pp. 22–28, 2003.
 - [9] A. Kumar and S. S., “Design and development of a high-performance 3rd-generation handheld thermal camera,” in *Infrared Systems and Photoelectronic Technology*, vol. 5563, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2004, pp. 167–173.
 - [10] T. Schimert, N. Cunningham, G. Francisco, R. Gooch, J. Gooden, P. McCardel, B. Neal, B. Ritchey, J. Rife, A. Syllaios, J. Tregilgas, J. B. III, J. Gilstrap, and S. Ropson, “Low-cost low-power uncooled 120x160 a-si-based microinfrared camera for law enforcement applications,” in *Enabling Technologies for Law Enforcement and Security*, S. K. Bramble, E. M. Carapezza, L. I. Rudin, L. I. Rudin, and S. K. Bramble, Eds., vol. 4232, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2001, pp. 187–194.
 - [11] M. Mansi, M. Brookfield, S. Porter, I. Edwards, B. Bold, J. Shannon, P. Lambkin, and A. Mathewson, “Authentic: a very low-cost infrared detector and camera system,” in *Infrared Technology and Applications XXVIII*, vol. 4820, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2003, pp. 227–238.
 - [12] M. Wu, J. Cook, R. DeVito, J. Li, E. Ma, R. Murano, N. Nemchuk, M. Tabasky, and M. Wagner, “Novel low-cost uncooled infrared camera,” in *Infrared Technology and Applications XXXI*, vol. 5783, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2005, pp. 496–505.
 - [13] H. Geoffray and F. Guerin, “Measured performance of a low-cost thermal infrared pushbroom camera based on uncooled microbolometer fpa for space applications,” in *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites V*, vol. 4540, International Society for Optics and Photonics. SPIE, 2001, pp. 298–308.
 - [14] A. Schaufelbuhl, N. Schneeberger, U. Munch, M. Waelti, O. Paul, O. Brand, H. Baltes, C. Menolfi, Q. Huang, E. Doering, and M. Loeffe, “Uncooled low-cost thermal imager based on micromachined cmos integrated sensor array,” *Microelectromechanical Systems, Journal of*, vol. 10, pp. 503–510, 2002.
 - [15] A. Xhafa, “Development and evaluation of a low-cost infrared thermal camera for industrial predictive maintenance applications,” Master’s thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
 - [16] G. Monte, D. Marasco, L. Solorzano, J. Vallejos, and R. Bufanio, “Smart sensing of systems thermal behavior using low cost infrared cameras,” in *IECON - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2019, pp. 5544–5549.
 - [17] D. Garigali Pestana, F. Mendonça, and F. Morgado-Dias, “A low-cost fpga based thermal imaging camera for fault detection in pv panels,” in *International Conference on Internet of Things for the Global Community (IoTGC)*, 2017, pp. 1–6.
 - [18] J. Leizi, X. Zhao, and D. Daming, “Design for temperature measurement system based on smart phone and infrared thermal camera core,” in *International Conference on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering (ISRME)*, 2015, pp. 1336–1339.
 - [19] A. Jaakkola, J. Hyypä, A. Kukko, X. Yu, H. Kaartinen, M. Lehtomäki, and Y. Lin, “A low-cost multi-sensorial mobile mapping system and its feasibility for tree measurements,” *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 65, pp. 514–522, 2010.
 - [20] M. Ljubenovic and M. Milic, “Arduino-based non-contact system for thermal-imaging of electronic circuits,” in *Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference*, 2018, pp. 62–67.
 - [21] S. Kockara, T. Halic, C. Hudson, A. Loney, and A. Crawford, “Portable malignant lesion detection with low cost mobile infrared thermography,” in *IEEE Innovations in Technology Conference*, 2014, pp. 1–5.
 - [22] C. Chirila and L. Szolga, “Development of a thermal camera using a low noise high speed far infrared camera,” in *IEEE International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging*, 2019, pp. 183–193.
 - [23] J. Broggio, “Proposta de sistema de alerta de risco de insolação e hipertermia em criança dentro de automóvel, com sensor infravermelho,” Master’s thesis, Instituto de Engenharia Biomédica, campus Fernandópolis, 2017.
 - [24] J. Lev, V. Shapoval, J. Bartoska, and F. Kumhála, “Low-cost infrared sensor for wildlife detection in vegetation,” *Research in Agricultural Engineering*, vol. 63, pp. S13–S17, 2017.
 - [25] L. Pinheiro, “Tabelas de vigas: Deslocamentos e momentos de engastamento perfeito,” 2010.
 - [26] F. Beer, J. Dewolf, and D. Mazurek, *Estática e Mecânica dos Materiais*. Editora Bookman, 2013.
 - [27] S. Vidas, P. Moghadam, and M. Bosse, “3d thermal mapping of building interiors using an rgb-d and thermal camera,” 2013, pp. 2303–2310.
 - [28] I. Rocco, M. Antunes, D. Aouada, and B. Ottersten, “Rgb-d and thermal sensor fusion,” in *VISIGRAPP*, 2016, pp. 1–9.



Leandro Estrela graduated in Industrial Mechatronics from the Centro Universitário SENAI-CIMATEC, in 2016. He is currently a Master’s student in the Mechatronics Postgraduate Program at the Universidade Federal da Bahia (UFBA).



Luciano Oliveira received the Bachelor’s Degree in Computer Science, from Universidade Federal da Bahia, in 1997, the Master’s Degree in Mechatronics from Universidade Federal da Bahia, in 2005, and the Ph.D. in Electrical and Computer Engineering from Universidade de Coimbra, Portugal, in 2010. He is an associate professor at Universidade Federal da Bahia, working on computer vision and image pattern recognition. He is head of the Intelligent Vision Research Lab (Ivision). He is currently involved in many projects in the fields of Robotics, Digital Medicine, Biometric Systems, and Smart Cities. He is currently a CNPq productivity researcher.