



**Universidade Federal do Maranhão**  
**Centro de Ciências Exatas e Tecnologia**  
**Programa de Pós-Graduação em Eng. de Eletricidade**

Daniel de Matos Luna dos Santos

**Método de Reposicionamento de Robôs por Entropia de  
Imagem Bioinspirado na Sensibilidade ao Campo Magnético  
Terrestre das Abelhas.**

São Luís-MA  
2022

Daniel de Matos Luna dos Santos

**Método de Reposicionamento de Robôs por Entropia de Imagem  
Bioinspirado na Sensibilidade ao Campo Magnético Terrestre das  
Abelhas.**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ewaldo Eder Carvalho Santana  
Coorientador: João Viana da Fonseca Neto

São Luís-MA  
2022

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

de Matos Luna dos Santos, Daniel.

Método de Reposicionamento de Robôs por Entropia de Imagem Bioinspirado na Sensibilidade ao Campo Magnético Terrestre das Abelhas / Daniel de Matos Luna dos Santos. - 2022.

87 p.

Coorientador(a): João Viana da Fonseca Neto.

Orientador(a): Ewaldo Éder Carvalho Santana Eder Carvalho Santana.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

1. Agricultura de Precisão. 2. Método Bioinspirado. 3. Reposicionamento Não-Supervisionado. I. Eder Carvalho Santana, Ewaldo Éder Carvalho Santana. II. Viana da Fonseca Neto, João. III. Título.

Daniel de Matos Luna dos Santos

**Método de Reposicionamento de robôs por Entropia de Imagem e Bioinspirado na Sensibilidade ao Campo Magnético Terrestre das Abelhas.**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

São Luís, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Ewaldo Eder Carvalho Santana (Orientador)  
*Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica-UFMA*

---

Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto (Co-Orientador)  
*Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica-UFMA*

---

Prof. Dr. Francisco das Chagas de Souza  
*Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica-UFMA*

---

Prof. Dr. Allan Kardec Duailibe Barros  
*Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica-UFMA*

---

Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire (Avaliador Externo)  
*Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica-UFMA*

---

Prof. Dr. Elyson Ádan Nunes Carvalho (Avaliador Externo)  
*Departamento de Engenharia Elétrica-UFS*

## Agradecimentos

Agradeço imensamente à minha família, em especial aos meus pais e minha esposa que suportaram comigo momentos extremamente difíceis no desenvolvimento do trabalho. Agradeço aos Professores Paulo Fernandes da Silva Junior (Universidade Estadual do Maranhão- UEMA) que auxiliou no processo de refino dos algoritmos, implementação e organização das ideias, ao professor João Viana da Fonseca Neto (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão- UFMA) pela Co-orientação do trabalho e auxílio nos conceitos relativos à Engenharia de Controle usados no projeto. Agradeço ao colega de Laboratório e Professor Dr. Jonathan de Araújo Queiroz (Laboratório de Processamento de Informação Biológica-UFMA) pela parceria no desenvolvimento em conjunto da técnica de Entropia aplicada à operadores de autofoco e do processamento de imagem com marcadores. Ao professor Dr. Carlos Cruz- Universidade Federal do Amazonas- UFAM, pelo reforço na organização das ideias e financiamento do trabalho em uma revista de Qualis A1, acreditando na relevância do trabalho no contexto do posicionamento autônomo. Ao professor Dr. Ewaldo Santana (Professor-Chefe do Laboratório de Aquisição e Processamento de Sinais-LAPS-UEMA) e ao professor Dr. Allan Kardec Barros (Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da UFMA) que gerenciaram e buscaram recursos para o desenvolvimento deste projeto e pela Orientação desde o início do desenvolvimento deste trabalho. Agradecemos à FAPEMA pelo suporte financeiro e à UEMA pela seção de espaço do laboratório LAPS para realização das simulações e das experimentações e ao Laboratório Processamento da Informação Biológica-PIB), por tornar essa tese e projeto viáveis.

## Dedicatória

Dedico este trabalho à Deus, o autor da Natureza e sentido pelo qual as ideias deste trabalho foram desenvolvidas, auxílio e sustento em cada momento deste trabalho com seu Grande Poder e Graça que permitiram o sucesso na concepção das ideias e nas mais difíceis implementações. Dedico este trabalho à meus pais e à minha esposa (em especial ao meu pai que fez da matemática um instrumento de mudança no universo dos seus alunos) além de sempre estarem comigo nesta caminhada. Dedico este trabalho à todas às pessoas que não medem esforços para redução da fome e desigualdade neste mundo pelo desenvolvimento de tecnologias mais acessíveis.



## Resumo

Neste trabalho é desenvolvido um método de posicionamento bioinspirado na memória das abelhas ao campo magnético terrestre, aplicado em uma plataforma robótica de polinização de exatidão, usando o método de entropia do Laplaciano. A plataforma robótica é composto de uma plataforma robótica de cinemática diferencial para deslocamento de sensores com dois motores de acionamento, quatro rodas, com um sistema de sondagem de içamento por cabo. A aplicação do método é em tempo real para o cálculo das características de nitidez por entropia e variância do Laplaciano de imagens segmentadas por cor no sistema HSV, com objetivo de rotação da plataforma em resposta à um valor ótimo encontrado. Foi desenvolvido um método complementar de posicionamento por içamento pela extração de características de área entre marcadores ativos, analisando características de cor, ruído e vibrações da sonda no tempo e na frequência, pela imagem lateral da sonda. Este método não é supervisionado e, a partir dos resultados pode-se observar que não é necessária uma calibração prévia das dimensões do alvo, histograma e distâncias envolvidas no posicionamento. O uso algoritmo promoveu um sistema com menor sensibilidade na extração das características de nitidez em relação ao número de arestas, e maior sensibilidade ao gradiente em relação ao método de variância de Laplaciano. O funcionamento da plataforma foi realizada em cenários de operação imprevistos, mesmo em pequenas variações de nitidez e resposta robusta à variação local, temporal e geofísica da declinação magnética, não necessitando de luminosidade após escaneamento, com dois graus de liberdade de rotação, o sistema de içamento da sonda e o sistema de rotação da plataforma. No sistema desenvolvido foi realizada a operação de varredura e busca da variação mínima entre a nitidez do objeto e o sistema de sondagem, sem variação quanto a declinação magnética, mesmo em ambientes com baixa luminosidade após a aquisição dos frames. O sistema pode ser utilizado em pesquisa de alvo a longa distância, posicionamento de guindastes, agricultura de precisão, etc. A partir dos resultados iniciais encontrou-se um erro angular de alinhamento máximo de 1 grau.

**Palavras-chave:** Reposicionamento Bioinspirado em abelhas, Memória de campo magnético, Robô, Agricultura de precisão.



# Abstract

In this work, a method bioinspired in the memory of the magnetic field of bees applied in a precision pollination rover is developed. The method calculates sharpening characteristics by entropy and Laplacian variance of color-segmented images in the HSV system in real time. A complementary positioning method was developed based on the extraction of area features between active markers, analyzing color, noise and vibration characteristics of the probe in time and frequency, through the lateral image of the probe. From the observed results, it can be observed that the unsupervised method does not require previous calibration of the target dimensions, histogram and distances involved in the positioning. The algorithm showed lower sensitivity in the extraction of sharpness characteristics in relation to the number of edges and greater sensitivity to the gradient, allowing unforeseen operating scenarios, even in small sharpness variations, and robust response to local, temporal and geophysical variation of magnetic declination, no need for luminosity after scanning, with two degrees of freedom of rotation. In the developed system, the scanning operation and the search for the minimum variation between the sharpness of the object and the sounding system are carried out, without variation regarding the magnetic declination, even in environments with low light after the acquisition of the frames. The system can be used in long-distance target research, crane positioning, precision agriculture, among others. From the initial results, it can be estimated that the angular alignment error is at most 1 degree.

**Keywords: Bioinspired repositioning in bees, Magnetic field memory, Robot, Precision agriculture.**

# Lista de Figuras

Figura 1. Dispositivo monocular de aquisição de imagem. Fonte: Autor .....	20
Figura 2. Imagem da sonda: a) Imagem do sistema de sondagem em um cenário artificial (laboratório); b) Imagem de um cenário Natural. Fonte: Autor.....	26
Figura 3. Sistema de Orientação Magnética presente nas abelhas do tipo “Honeybee”. Fonte: Autor.....	28
Figura 4. Aplicação do Operador Laplaciano em imagem de duas flores com diferentes distâncias em relação a distância focal na mesma cena.....	30
Figura 5. Estimação da profundidade com base na nitidez. Fonte: Autor.....	31
Figura 6. Processamento de imagem por histograma. Fonte: Autor.....	32
Figura 7. Laplacianos e suas distribuições. ....	33
Figura 8. Principais desvios e anomalia magnéticos terrestres. a) Declinação Magnética; b) Anomalia Magnética do Atlântico Sul em Azul no ano de 2020. Fonte: ©ESA-Agência Espacial Europeia.....	35
Figura 9. Dispositivo e diagrama de Efeito Hall. Fonte: .....	37
Figura 10. Sensor HMC5883L. Fonte: <i>Honeywell HMC5883L Datasheet</i> .....	39
Figura 11. Robô de análise química do solo desenvolvido com uma sonda de 5 G.D.L (Graus de Liberdade). Fonte: Wet Chemistry Laboratory (NASA).....	41
Figura 12. Mecanismo de coleta e fornecimento de cabo: Fonte: Autor.....	45
Figura 13. Diagrama esquemático do sistema de Locomoção da Plataforma. .	46
Figura 14. Projeto tridimensional do robô bioinspirado. Fonte: Autor. ....	47
Figura 15. Plataforma robótica com a indicação do sensor magnético. Fonte: Autor.....	48
Figura 16. Diagrama do sistema de reposicionamento bioinspirado. Fonte: Autor.....	49
Figura 17. Diagrama do processo de verificação/ varredura do ambiente proposto para o método não-supervisionado. Fonte: Autor. ....	50
Figura 18. Fluxograma do algoritmo de reposicionamento. Fonte: Autor. ....	55
Figura 19. Fluxograma do algoritmo de posicionamento do robô.....	56
Figura 20. Diagrama do sistema de controle proporcional utilizado para operação de reposicionamento da sonda. Fonte: Autor. ....	58
Figura 21. Diagrama dos Marcadores. Fonte. Autor. ....	58

Figura 22. Modelo proposto do sistema mecânico desenvolvido para extração de pólen. Fonte: Autor. ....	61
Figura 23. Ambiente de operação de teste da sonda. Fonte: Autor. ....	62
Figura 24. Segmentação da imagem no Sistema HSV. Fonte: Autor. ....	62
Figura 25. Segmentação de Região e Cálculo do Laplaciano. Fonte: Autor....	63
Figura 26. Diagrama do sistema de sondagem e do ponto desejado à ser alcançado de forma não supervisionada. Fonte Autor. ....	64
Figura 27. Sistema de sondagem e sua inspiração biológica: Fonte: Autor.....	65
Figura 28. Protótipo do robô de sondagem bioinspirado nos sistemas de lamber das abelhas. Fonte: Autor. ....	65
Figura 29. Diferença entre as variâncias dos Laplacianos das regiões da sonda e do alvo .....	66
Figura 30. Vetor de diferença entre entropias das regiões segmentadas. ....	67
Figura 31 Erro do sistema de controle na operação de reposicionamento. ....	68
Figura 32. Valores de área calculados entre os marcadores como uma função do número do <i>frame</i> . ....	69
Figura 33. Espectrogramas dos vetores de área entre os marcadores: a) Sonda em operação estática; b) Sonda em operação dinâmica. ....	69
Figura 34. Distância Euclidiana entre os Marcadores Azul e Vermelho: a) Sonda em operação estática (classe 0); b) sonda em operação de içamento (classe 1).....	70
Figura 35. Espectro de frequência da oscilação Vertical e Horizontal do marcador vermelho, na operação de içamento (classe 1).....	71
Figura 36. Espectro de frequências das oscilações verticais e horizontais do marcador Azul, na operação de içamento, classe 1.....	72
Figura 37. Vetor do Ruído de área. ....	73
Figura 38. Marcadores utilizados na análise em frequência. Fonte: Autor. ....	73
Figura 39. Sinal do sensor Magnético fixo em uma posição para medição do ruído. ....	75
Figura 40. Sinal do Sensor magnético normalizado (em azul) e o polinômio de regressão (em vermelho) utilizado para extração do ruído. ....	76
Figura 41. Espectrogramas do sinal do sensor magnético.....	77
Figura 42. Funções de Probabilidade do sinal (Preto) e função de Probabilidade do Ruído (Verde).....	77

Figura 43. Máscaras de Segmentação das Regiões. a) Alvo (flor); b) Extremidade da sonda.....	78
Figura 44. Comparativo das Matrizes H das regiões segmentadas e seus espectros. Fonte: Autor.....	78
Figura 45. Comparativo entre os espectros da Região da Sonda (cor laranja) e da região do Alvo, ou flor (cor azul) com a respectiva informação mútua entre as duas regiões. ....	79

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1. Valores de Correlação de Pearson entre marcadores e a distância rótula-Extremidade com a sonda estática na posição mínima.....	74
Tabela 2. Valores de Correlação de Pearson entre os marcadores e a distância Rótula-Extremidade, com a sonda em operação de levantamento.....	74

# Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 VARIABILIDADE DOS CENÁRIOS .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 OBJETIVO GERAL.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>16</b>
<b>1.4 HIPÓTESE.....</b>	<b>16</b>
<b>1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....</b>	<b>16</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. COMPORTAMENTO DAS ABELHAS .....</b>	<b>27</b>
<b>2.2. OPERADORES DE AUTOFOCO.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3. DECLINAÇÃO MAGNÉTICA E MAGNETÔMETROS .....</b>	<b>34</b>
<b>3. ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>40</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>44</b>
<b>4.1. ROBÔ DE SONDAGEM INSPIRADO NO DISPOSITIVO LAMBEDOR DA ABELHA .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2. MÉTODO DE REPOSICIONAMENTO NÃO-SUPERVISIONADO .....</b>	<b>48</b>
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>61</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>82</b>
<b>5.1. ARTIGOS PUBLICADOS .....</b>	<b>82</b>
<b>5.2. TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>

# 1. Introdução

Historicamente, os seres humanos desenvolvem processos para aumentar a produtividade. No último século, a automação dos processos agrícolas, industriais e bélicos foram usados de forma extensiva e massiva por meio da automação, unindo máquinas e programas de computador para gerar maior produção [1-3]. Dentre as máquinas utilizadas, os robôs com sensoriamento remoto são importantes para aumentar a aquisição de dados sem o consequente aumento de custo. A partir das análises de sensores embarcados em plataformas robóticas é possível melhorar os processos produtivos, como posicionamento para polinização de flores, busca de alvos, posicionamento autônomo de máquinas pesadas, etc. [1-7].

A tecnologia de posicionamento com exatidão pode ser dividida em duas partes [2]:

- Uso de sensores para capturar dados ambientais, indicando o melhor momento para a tomada de decisão; e

- Uso de atuadores para corrigir e/ou agir em determinadas situações específicas, como posição alvo, tamanho e forma do alvo, presença ou ausência de certas partículas, pólen em uma flor ou erva daninha em uma plantação, por exemplo [6-8].

Os robôs autônomos são compostos de mecanismos nos quais um ou mais sensores e atuadores podem ser carregados, atuando no processo de captura e tomada de decisões, utilizando um número maior do que 4 graus de liberdade [8]. Como forma de otimizar os processos, o uso, na engenharia, de soluções bioinspiradas cresceu. Nestes casos busca-se na natureza casos semelhantes que possam servir de base para a solução de problemas ou otimização de recursos na engenharia [9].

Uma metodologia para o uso de soluções de inspiração biológica é dividida em três estágios [9]:

- Identificação de analogias, com estruturas e métodos semelhantes;
- Compreensão, modelagem detalhada do comportamento biológico real;

- Simplificação do modelo e ajuste para aplicações técnicas.

As abelhas possuem uma característica que pode ser usado no posicionamento autônomo de plataformas robóticas, pois elas utilizam a informação do campo magnético terrestre para o seu posicionamento em longa distâncias [10]. O campo magnético terrestre pode ser conceituado como uma área ao redor do planeta Terra que sofre influência do campo de energia criado pelo magnetismo do núcleo terrestre [11].

Neste trabalho é proposto um método de posicionamento bioinspirado na memória das abelhas ao campo magnético terrestre, aplicado em uma plataforma robótica de polinização de exatidão. É utilizado um método de reposicionamento lateral, não supervisionado, com base na: nitidez; variação do Laplaciano; e na mínima diferença entre as entropias das imagens coloridas, segmentadas após a transformação para o sistema de cor HSV (*Hue, Saturation, Value*). Esses dados são usados no controle da rotação da plataforma robótica auxiliado por um sensor orientação magnética.

## 1.1 Variabilidade dos cenários

A variabilidade dos cenários naturais e artificiais, especificamente tendo como exemplo o processo de polinização exige de robôs autônomos um esforço crítico devido às alterações quanto ao tamanho das plantas, forma das flores, variáveis dinâmicas, correntes de ar gerando oscilação na posição das flores. Essas variações ocorrem em vários processos de posicionamento, como em ambientes agrícolas, posicionamento de guindastes, rastreamento de alvos e florestas densas, com baixa variabilidade entre as estatísticas das imagens relacionadas à trajetória da plataforma e ao ambiente de atuação do robô [12].

## 1.2 Justificativa

O uso de vários tipos de sensores para detecção das variáveis relacionadas ao posicionamento autônomo não-supervisionado exige níveis críticos de processamento e uma alta quantidade de dispositivos interligados para armazenar e processar as informações em diferentes níveis. Neste trabalho foi possível reduzir o número de sensores e de Graus de Liberdade do sistema mecânico de sondagem, com uma quantidade inferior de dispositivos para tomada de decisões, aumentando o número de cenários de operação, sem o uso de uma base de dados prévia.



## 1.3 Objetivo Geral

O objetivo principal da Tese é o desenvolvimento de um sistema de reposicionamento bioinspirado na memória das abelhas ao campo magnético terrestre, não-supervisionado para um plataforma robótica de sondagem, operando em ambientes no quais as variações de grandezas ambientais sejam críticas, usando o método de entropia do Laplaciano.

### 1.3.1 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo de reposicionamento bioinspirado;
- Desenvolver um operador de medida de foco baseado em entropia;
- Construir um conjunto de algoritmo de reposicionamento bioinspirado na plataforma robótica;
- Desenvolver e aplicar um algoritmo de segmentação baseada em cor;
- Desenvolver e aplicar um algoritmo para o cálculo da entropia e do Laplaciano da imagem;
- Desenvolver um algoritmo de busca baseado nas estatísticas da imagem e no valor de orientação magnética;
- Analisar e discutir os resultados obtidos.

## 1.4 Hipótese

O uso do conhecimento das abelhas, que o utilizam o campo magnético terrestre para o posicionamento, e da entropia do Laplaciano das imagens, pode ser usado para o desenvolvimento de um algoritmo bioinspirado não supervisionado, que reduza os graus de liberdade e a quantidade de informação no reposicionamento de uma plataforma robótica aplicada a um sistema polinização artificial.

## 1.5 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em mais cinco partes, além desta Introdução. No Capítulo 2 é delineada a fundamentação teórica sobre a óptica da medição de nitidez, a segmentação por níveis de cor no sistema HSV, e as estatísticas relativas às imagens naturais.

No Capítulo 3 é descrito o estado da arte sobre o tema. No Capítulo 4 são abordados os materiais e métodos utilizados na Tese. No Capítulo 5 são abordados e discutidos os resultados obtidos sobre o desenvolvimento e implementação do método e no Capítulo 6 as conclusões.

## 2. Fundamentação Teórica

Os algoritmos desenvolvidos para o processo reposicionamento, tanto supervisionado quanto não supervisionados, exigem o aumento do número de sensores, com o aumento do número variáveis a serem processadas, e o crescimento dos graus de liberdade dos sistemas. Este processo promove o aumento do custo e o tempo de implementação [13-14]. Uma solução para redução do número de variáveis é bem vinda, pois indica a redução do número de sensores, dos graus de liberdade e conseqüentemente o custo do e o tempo de implementação de sistemas em plataformas robóticas.

Neste trabalho é proposto um método de posicionamento bioinspirado na memória das abelhas ao campo magnético terrestre, e na entropia do Laplaciano das imagens, com o uso de apenas dois sensores, reduzindo o número de variáveis e os graus de liberdade em uma plataforma robótica de polinização.

Na aquisição de imagens em duas dimensões (2D) de um ambiente tridimensional (3D) usados nesse trabalho foi realizada por uma câmera *CMOS* (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*), não possuindo interação física com o ambiente, proporcionada por sensores infravermelhos e sensores ultrassônicos ou qualquer transdutor para armazenamento de informação de distância associada a um conjunto de pixels na imagem. Desta forma a imagem 2D adquirida por uma matriz com tríades de detectores para faixas de comprimentos de onda no sistema de cor RGB (*Red-Green-Blue*) perde a informação de profundidade absoluta associada a cada pixel [13]. Devido ao comportamento óptico das lentes da câmera, objetos localizados próximos ao plano focal da lente, possuirão níveis de nitidez alterados em relação à objetos mais distantes.

O processo de verificação de profundidade e localização tridimensional de objetos pelas imagens bidimensionais é uma tarefa que vem sendo desenvolvida em sistemas de visão computacional com a finalidade de recuperação de imagens, reposicionamento, tratamento de imagens adquiridas por satélites, e análise de qualidade, tanto dos dispositivos de aquisição, quanto dos algoritmos de pré ou pós-processamento de imagens [13-14].

Nesse trabalho é utilizado um sistema de captação de imagem monocular, que diferente dos sistemas binoculares ou trinoculares, consegue armazenar a informação de

profundidade a partir de uma grande quantidade de imagens, podendo identificar características como ângulo, distância variável ao plano focal da lente, sendo armazenadas e pós processadas, para recuperação da informação de profundidade [14]. A análise e mensuração da nitidez, caracterizada como nível de “*Blur*”, embaçamento ou borrão de objetos, pode ser extraída de várias imagens em um sistema monocular por meio de filtros com operadores de foco do tipo SFF (*Shape-From-Focus*), que executam operação na imagem para calcular o valor de nitidez em cada pixel dentro de um mesmo cenário [14]. Esse valor de nitidez é calculado para reconstrução de uma estimativa de profundidade de cada objeto na imagem [14-15]. As variáveis ópticas e o sistemas que descrevem o dispositivo monocular de aquisição da imagem podem ser observados na Figura 1.

À medida que estima a intensidade do nível de embaçamento ou *Blur* em uma imagem é caracterizada como círculo de espelhamento de radiação (Figura 1g) e seu diâmetro ( $k_{\sigma}$ ) é calculado pela relação trigonométrica da distância ( $\delta$ ) do dispositivo eletrônico de aquisição de dados (Figura 1a) está do plano focal da lente (Figura 1d), distância focal da lente ( $f$ ) (Figura 1h), e distância  $\mu$  do ao plano de simetria da lente (Figura 1f).

A equação que rege o a distância focal em função das distâncias no dispositivo óptico é descrita pela Lei de Gauss, dada por:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\mu} + \frac{1}{v} \quad (2.1)$$

sendo  $f$  a distância focal (Figura 1h),  $\mu$  a distância do objeto ao plano de simetria da lente (Figura 8f), e  $v$  a distância da lente ao plano focal da mesma, onde a imagem do objeto é projetada nitidamente. A distância do objeto ao plano de simetria da lente tem relação única com a distância ao plano de foco ( $v$ ). Desta forma para uma operação de ajuste automático de foco existirá uma única distância máxima do objeto onde o valor de nitidez será máximo, ou seja, à ausência de gradiente ou embaçamento nas bordas da projeção do objeto [14].

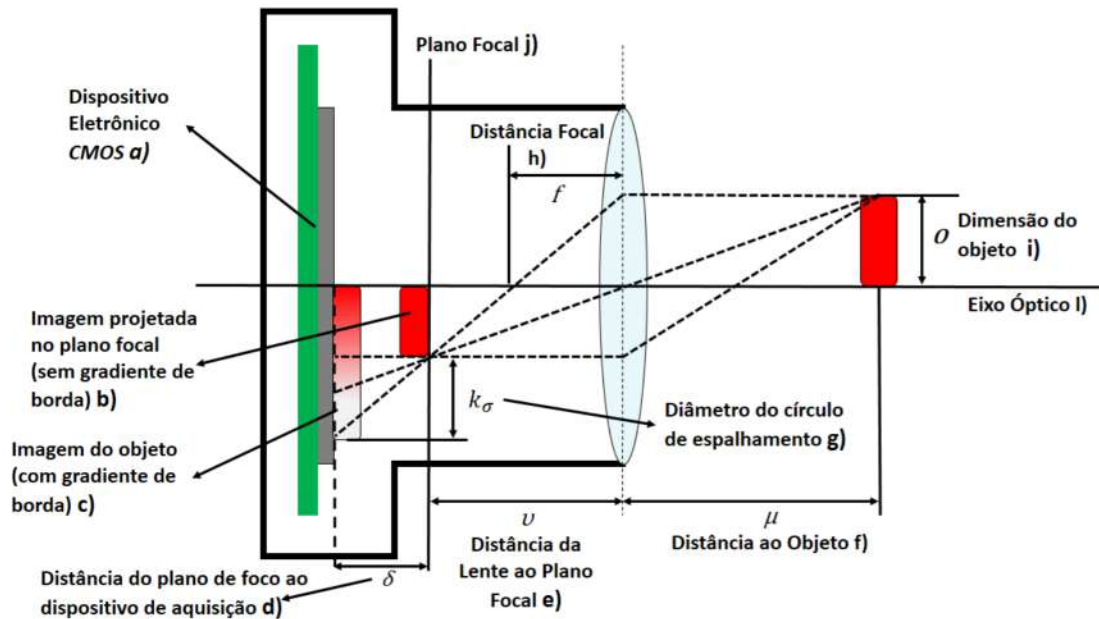


Figura 1. Dispositivo monocular de aquisição de imagem. Fonte: Autor

O processo de aquisição dos valores de nitidez para reconstrução de uma imagem tridimensional (3D) de um objeto ou processamento para posterior reposicionamento, consiste do cálculo dos valores de foco ou nitidez das imagens, para o caso de um sistema monocular, e posterior reconstrução ou tomada de decisão por parte do sistema. O valor de nitidez ou foco em cada imagem é dado por operadores de medida de foco.

Existem muitos operadores de autofoco, tanto para múltiplas imagens na abordagem SFF, utilizados para medição de valores de nitidez em uma única imagem. Nesta Tese são propostos conceitos de operadores de medida de foco baseados no Laplaciano da imagem, no Laplaciano do Gaussiano da imagem e na entropia como medida de informação média contida em um vetor, com o objetivo de propor um algoritmo de reposicionamento que utilize o operador de variância do Laplaciano e a entropia do Laplaciano como um novo operador de medida de foco [14].

O efeito de embaçamento ou falta de foco na imagem é associado à retirada das frequências mais altas da imagem [13], resultando em um processo de filtragem descrito matematicamente por um operador Gaussiano em sua forma isotrópica, circularmente simétrica, que pode ser estimado por:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.2)$$

Sendo a média igual à zero ( $\bar{x} = 0$ ) e desvio padrão, ( $\sigma = 1$ ),  $(x, y)$  as coordenadas da imagem e  $\sigma^2$  a variância. A equação forma uma máscara ou *kernel*, núcleo do filtro, que retira altas frequências da imagem à medida que o desvio padrão ( $\sigma$ ) do filtro aumenta. Para associar um parâmetro de embaçamento ou espalhamento de radiação ao parâmetro de profundidade, distância  $\mu$  do objeto ao plano de simetria da lente, considera-se que uma imagem desfocada  $I_d$  seja uma imagem  $I$  nítida convoluída com um filtro passa-baixas ( $h$ ), dado por [14]:

$$I_d = I * h \quad (2.3)$$

O filtro passa-baixas é caracterizado como uma função de espalhamento de ponto (PSF – *Point Spread Function*), sendo a resposta do dispositivo de aquisição de imagem à uma fonte pontual unitária [14]. Analisando essa função pela óptica limitada por difração com iluminação não coerente, a função de espalhamento (PSF) pode ser simplificada por uma função Gaussiana bidimensional, dada por [14]:

$$h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_h^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\pi\sigma_h^2}} \quad (2.4)$$

sendo  $\sigma_h$  um parâmetro de embaçamento ou falta de nitidez e  $h(x, y)$  o núcleo da convolução. A relação das variáveis ópticas do dispositivo de aquisição da imagem descrito na Figura 1 é derivada por Petland [14] podendo ser descrita por:

$$\sigma_h = \frac{kf^2}{A} \frac{|u - u_f|}{u(u_f - f)} \quad (2.5)$$

sendo  $u_f$  a posição do objeto para uma posição de foco da câmera, distância para qual o objeto estará focado no cenário,  $k$  é uma constante que depende do dispositivo de aquisição,  $f$  é a distância focal da lente,  $u$  é a distância do objeto ao plano de simetria da lente no momento da aquisição da imagem,  $A$  é uma constante que representa o *f-number* ou Abertura da lente, dada pela relação da distância focal  $f$  e o diâmetro efetivo  $D$  de entrada dos fótons

na lente. Em dispositivos ópticos de aquisição de imagem existem diafragmas que regulam o diâmetro efetivo para entrada dos fótons que realizarão a projeção da imagem [14].

A necessidade da relação da medida física de profundidade com uma variável encontrada no núcleo do filtro gaussiano ocorre devido a respostas de células cerebrais de forma semelhante à função Gaussiana [14]. As máquinas podem utilizar uma variedade de operadores, sendo o operador Laplaciano a segunda derivada do valor da função bidimensional de intensidade que descreve seus pixels [12]. Em que  $I(x, y)$  é uma função bidimensional que modela a imagem, o Laplaciano é descrito por:

$$L_{x,y} = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2}, \quad (2.6)$$

em que  $L_{x,y}$  corresponde ao operador do Laplaciano.

A imagem processada por filtros Laplacianos possui sensibilidade com relação à ruídos [12]. Desta forma, o operador de medida de autofocus que utiliza a resposta ao filtro Laplaciano é antes suavizado por um filtro Gaussiano (Equação 2.5) [14]. O filtro resultante processa a segunda derivada da imagem suavizada pelo filtro Gaussiano. O filtro Laplaciano do Gaussiano  $LoG(x, y)$  é dado por:

$$LoG(x, y) = -\frac{1}{\pi\sigma^4} \left[ 1 - \frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right] e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.7)$$

sendo  $LoG(x, y)$  o núcleo do operador Laplaciano do Gaussiano,  $\sigma$  o desvio padrão e  $(x, y)$  as coordenadas da máscara ou núcleo matricial do filtro.

A quantidade de informação contida em uma imagem pode ser definida como a medida do nível de aleatoriedade, ou incerteza contida na mesma imagem, como o número de bits necessários para codificar e decodificar a imagem de forma completa, sem perda de informação [16]. As imagens desfocadas ou suavizadas na frequência por filtros gaussianos, modelo mais próximo adotado para modelar matematicamente a característica de nitidez [14], ocorre com a retirada das altas frequências, de forma que a imagem perde informação, a qual pode ser estimada pela quantidade de frequências perdidas. A maior parte da informação de imagens está contida em baixas frequências [13]. As bordas, mudanças

abruptas, gradientes de alta intensidade e informações que tornam uma imagem nítida, estão localizadas nas altas frequências [13].

Em operações de reposicionamento de robôs móveis, características de profundidade, posição, cor e textura de objetos são necessários à manipulação de elementos [6-8]. São utilizadas tecnologias como LiDAR (*Light Detection And Ranging*) para medição de profundidade em sistemas binoculares, trinoculares ou visão estéreo, buscando assegurar que o manipulador alcance o objetivo desejado com maior precisão [17]. Para o trabalho proposto, o uso de uma câmera e um sensor magnético têm como finalidade adquirir a maior quantidade de informação possível, sendo a informação de profundidade diretamente relacionada a nitidez dos objetos. É necessário que a informação seja adquirida com uma quantidade máxima de frequências do cenário. Desta forma, a medida de quantidade de informação da imagem segmentada pela cor, método proposto para o estudo, se torna necessária. A quantidade mínima de bits para representar um vetor aleatório ou fonte aleatória  $X$ , é dado pela entropia de Shannon, dado por [16]:

$$H(x) = - \sum_{x \in X} p(x) \log p(x) \equiv \sum_{x \in X} p(x) I(x) \quad (2.8)$$

sendo  $x$  o símbolo da fonte aleatória, correspondente ao elemento da variável aleatória  $X$ ,  $p(x)$  a probabilidade do mesmo elemento,  $I(x)$  é o logaritmo do inverso da probabilidade de ocorrência do elemento, e  $x \left( \log \frac{1}{p(x)} \right)$  análogo à medida de informação.

A medida de entropia associado ao Laplaciano da imagem propõe um método não-supervisionado de medição de profundidade, que relacione pequenas variações de nitidez entre as imagens segmentadas pela cor no sistema HSV, às diferenças de profundidade entre planos de dois objetos de cores diferentes, de modo a aproximá-los, operação de reposicionamento.

A função que modela a transformação do sistema RGB, sistema de cor utilizado no *hardware* de aquisição da imagem, para o sistema HSV, sistema de cor utilizado na segmentação, torna a cor ou matiz em um valor angular (0-360°) [12]. A cor definida pelos valores R, G e B possuem valores entre de 0 à 1, valores normalizados, sendo 0 e 1 o menor e o maior valor que o pixel pode assumir. O valor de  $H(\text{matiz})$  é dado por:



$$H \left\{ \begin{array}{l} 60 \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 0 \quad Se \ MAX = R \quad \& \quad G \geq B \\ 60 \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 360 \quad Se \ MAX = R \quad \& \quad G < B \\ 60 \times \frac{B - R}{MAX - MIN} + 120 \quad Se \ MAX = G \\ 60 \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 240 \quad Se \ MAX = B \end{array} \right. \quad (2.9)$$

O valor de saturação S, saturação, é dado por:

$$S \left\{ \begin{array}{l} \frac{MAX - MIN}{MAX} \quad Se \ MAX > 0. \\ 0 \quad Se \ MAX = 0 \end{array} \right. \quad (2.10)$$

O valor V, brilho da imagem, é dado pelo valor máximo da faixa do sistema RGB, indicado por:

$$V = MAX. \quad (2.11)$$

O valor utilizado para segmentação da cor no método não supervisionado é o matiz ou *Hue* possuindo valores angulares para segmentação. A cor é a única variável a ser configurável para cada problema ou mudança na aplicação do método. O processo de segmentação por cor descrito, tem como função limitar as regiões que serão submetidas às operações por *kernels* Laplacianos. O cálculo de nitidez de uma região da imagem necessita da segmentação de áreas específicas em uma mesma cena. A verificação da quantidade de informação que uma região segmentada considera as regiões como variáveis aleatórias, podendo ser caracterizada como uma medida da qualidade da segmentação.

A entropia de Shannon quantifica a informação contida em uma variável aleatória com base na sua probabilidade de ocorrência [16]. Desta forma, quando uma variável aleatória, região da imagem, contém alguma informação acerca de outra região segmentada na mesma cena, a Informação Mútua (*Mutual Information* – MI) pode ser o método escolhido para verificação da qualidade de segmentação. A informação mútua com base nas distribuições de probabilidade conjuntas e marginais das variáveis aleatórias pode estar na seguinte forma:

$$MI(X, Y) = \sum_{y \in Y} \sum_{x \in X} p(x, y) \cdot \log \left( \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \right) \quad (2.12)$$

Sendo MI a medida de informação mútua entre duas variáveis aleatórias  $X$  e  $Y$ , sendo estas o plano *Hue*, matriz  $\mathbf{H}$ , das regiões da imagem segmentada.  $p(x, y)$  a distribuição conjunta das duas variáveis aleatórias e  $p(x)$  e  $p(y)$  as distribuições marginais correspondentes a probabilidades de os pixels corresponderem aos respectivos valores de matiz.

Uma outra forma de extração de características da imagem é a visualização na frequência, realizada pela Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform – DFT*) em duas dimensões. A DFT em um domínio espacial é dada por:

$$f(K_x, K_y) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi \left( \frac{K_x x}{N} + \frac{K_y y}{N} \right)} \quad (2.13)$$

em que  $(K_x, K_y)$  são os valores espaciais de frequência,  $x, y$  é a posição espacial do pixel na imagem,  $f(x, y)$  é a imagem de entrada a ser decomposta,  $N$  é a dimensão da imagem, e  $j$  é o número complexo do tipo  $j^2 = -1$ .

A representação do espectro de potência parte do valor absoluto de  $f(K_x, K_y)$ , imagem no domínio da frequência, é dado por:

$$\left| |f(K_x, K_y)| \right|^2 = Re \left( f(K_x, K_y) \right)^2 + Im \left( f(K_x, K_y) \right)^2 \quad (2.14)$$

em que  $Re \left( f(K_x, K_y) \right)^2$  são as componentes reais e  $Im \left( f(K_x, K_y) \right)^2$  são as componentes imaginárias da DFT.

A DFT descrita na Equação 2.14 de imagens naturais, possui como característica principal picos mais suaves ou menos pronunciados em relação a imagens ou objetos artificiais. Uma análise detalhada de 12.000 espectros de potência média de imagens, com 6.000 de imagens naturais e 6.000 imagens artificiais, observando que imagens naturais possuem a curva de potência do sinal em função da frequência, apresentam a forma de espectro indicada por  $\frac{1}{f^\alpha}$ , com  $\alpha \sim 2$  ou  $\alpha \sim 1$  [18]. Para observação da variação das formas

da DFT, foi adquirida uma imagem da sonda, extraída em um ambiente artificial e uma imagem de um cenário natural (Figura 2). É possível observar nitidamente a mudança na forma do espectro.

A variação das estatísticas em ambientes naturais, devido à variação do tipo de objeto, torna o problema de posicionamento de objetos artificiais em meio a cenários naturais um problema complexo, pois contempla as estatísticas de ambos os tipos de imagens. O sistema de sondagem desenvolvido com um cenário natural pode ser observado na Figura 2.

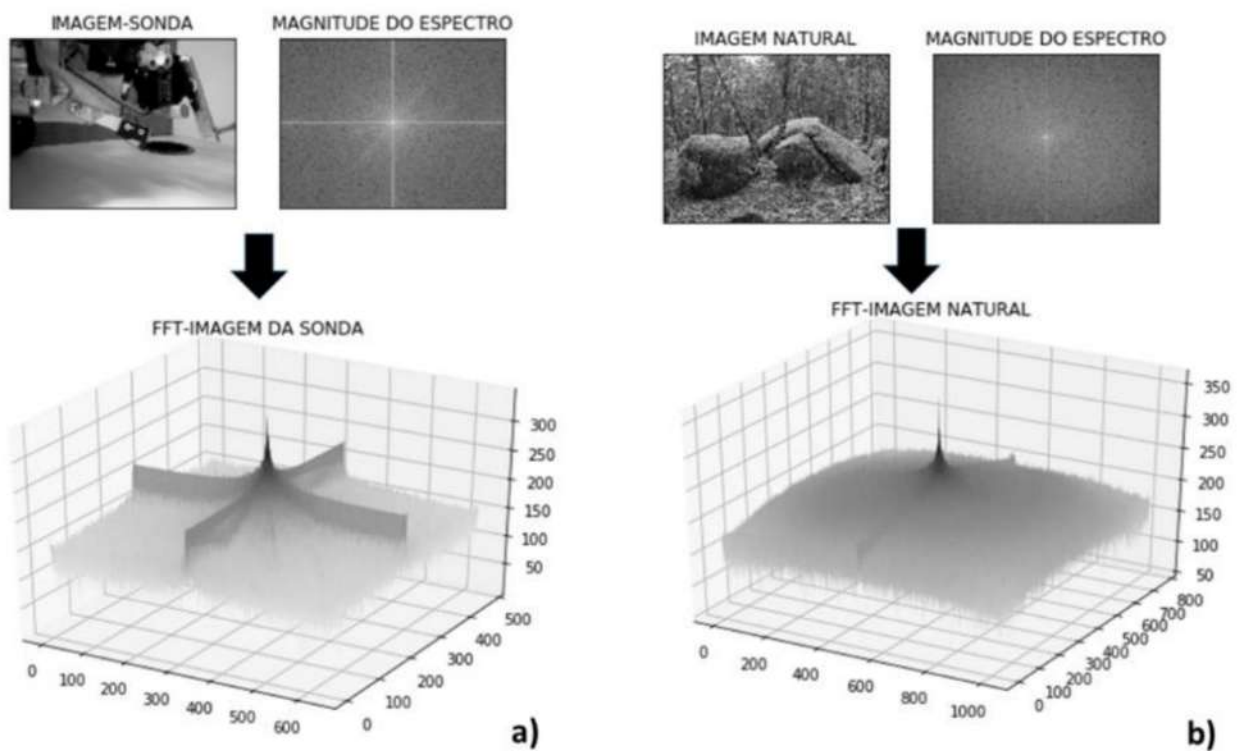


Figura 2. Imagem da sonda: a) Imagem do sistema de sondagem em um cenário artificial (laboratório); b) Imagem de um cenário Natural. Fonte: Autor

No trabalho são utilizadas as coordenadas polares para modelagem do comportamento do espectro. Levando a definição do espectro de potência para coordenadas polares, seu valor esperado gera um modelo mais completo do espectro de potência [18] dado por:

$$E \left[ |I(f, \theta)|^2 \right] \cong \frac{A_s(\theta)}{f^{\alpha_s(\theta)}} \quad (2.15)$$

em que  $A_s(\theta)$  é a amplitude como um fator de escala para cada orientação  $\theta$  e  $\alpha_s(\theta)$  é o expoente da frequência como um fator da orientação.

O modelo descrito pela Equação 2.15, [18] considera ambos espectros de potência média de imagens naturais e imagens de cenários construídos pelo homem ou objetos fabricados pelo mesmo. É possível observar que, para cada tipo de cenário ou objeto a ser localizado na imagem, a forma ou orientação do espectro de frequências possuirá variações, tornando o posicionamento em ambientes naturais um problema complexo, devido à mudança constante nas estatísticas da imagem. Neste Capítulo foi apresentada a fundamentação teórica para o desenvolvimento o projeto, no próximo Capítulo é tratado o Estado da Arte relacionado à pesquisa desenvolvida.

## 2.1. Comportamento das Abelhas

As abelhas produtoras de mel ou *Honeybees* conseguem coletar alimento à uma distância de 12 km da colmeia [10]. Essa capacidade é proporcionada pela presença de receptores magnéticos localizados na região do abdômen, gerando diferentes padrões de sinais para ângulos diferentes de orientação magnética. Em [10], foi realizado um experimento conduzido com recompensa de solução de sucralose pela mudança de orientação do inseto em presença de campos magnéticos uniformes de intensidade de  $65 \mu T$ . Em seguida foram retirados os órgãos locomotores assim como o sistema de visão neutralizado, e implantados eletrodos no cordão nervoso ventral, os quais mostraram que grânulos de Ferro nesse cordão respondem de forma diferente à diferentes direções no vetor de campo magnético. A orientação magnética permite que esses insetos consigam andar por ambientes naturais e construir estruturas complexas sem a presença da luz solar como pode ser observado na Figura 4.

No processo de desenvolvimento conceitual do sistema de reposicionamento, foram buscados ganhos mecânicos reduzindo o número de partes móveis ou Graus de Liberdade, e ganhos no algoritmo de posicionamento não-supervisionado com o uso de extração de características de cor.

Pelos experimentos de condicionamento por recompensa [10], foi evidenciado que as abelhas do tipo *Apis mellifera* possuem um sistema de visão colorido tricromático, que compartilha propriedades fundamentais com o sistema de visão dos humanos e primatas, como constância de cor, habilidade de reconhecimento de cor independentemente do nível de luminosidade à que os objetos estão expostos, oponência de cor, formação e compreensão da cor pelas cores oponentes, segregação de cor, reconhecimento, separação de cor, e codificação de brilho [10].

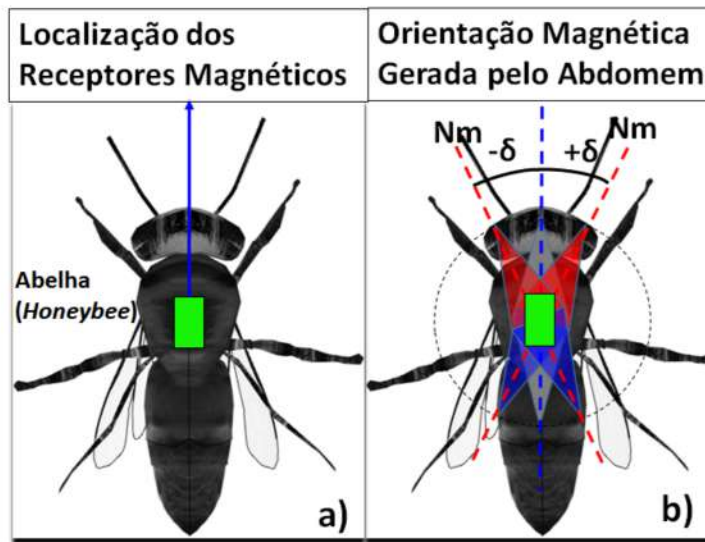


Figura 3. Sistema de Orientação Magnética presente nas abelhas do tipo “Honeybee”.  
Fonte: Autor.

A visão colorida das abelhas é caracterizada por três tipos de fotorreceptores, com pico de absorção nas partes UV, Azul e Verde do espectro visível. Os fotorreceptores são caracterizados como *S*, sensibilidade à comprimentos de onda curto ( $\lambda_{max} = 344nm$ ), *M* comprimento de onda médio ( $\lambda_{max} = 436nm$ ) e *L* comprimento de onda longo ( $\lambda_{max} = 544nm$ ). Após os sinais espectrais captados os mecanismos de pós-recepção irão realizar uma codificação de aspectos cromáticos [19-20]. Os mecanismos de pós-recepção podem funcionar por oponência de cor, mecanismo onde a subtração dos estímulos resulta na informação de cor, mecanismos de codificação de aspectos cromáticos de estímulos coloridos, e mecanismos não-oponentes de codificação de aspectos acromáticos, como a codificação do brilho.

O processo de extração de substâncias superficiais, pólen, água ou organismos menores, é uma tarefa realizada pelas abelhas, com níveis de orientação por campo magnético para grandes distâncias, odor e cor produzido pelos carotenóides e antocianinas para escolha do alvo em meio à uma variedade de flores, e sensibilidade à radiação ultravioleta para orientação de local de pouso na flor. Assim como a sensibilidade de certos pigmentos de cor presente no sistema visual aos campos magnéticos sugerem que a sensibilidade à cor possui respostas diferentes em relação as diversas intensidades de campo magnético na superfície terrestre [10], [19-20].

## 2.2. Operadores de Autofoco

A estimação de profundidade a partir de uma imagem bidimensional é um processo largamente analisado, e necessário devido à extração da informação de profundidade de uma cena, sem a necessidade de interação física. Em geral, padrões de profundidade são extraídos automaticamente de sistemas binoculares ou trinoculares. Em sistemas monoculares, o uso de várias imagens em diferentes posições, e configurações da câmera na cena pode ser utilizado para a extração da informação de profundidade. A SFF tem sido utilizada como método passivo de recuperação de formas tridimensionais na cena adquirida. Na abordagem SFF, a mudança na variação do foco da câmera é utilizada como uma estimativa de profundidade. Ambos operadores matemáticos que permitem a medição quantitativa do foco e o algoritmo utilizado para ajuste de foco, assim como, sua medição são caracterizados por operadores de medida de foco (*Focus Measure – FM*).

Os operadores de foco podem ser divididos em famílias como operadores baseados no gradiente da imagem, operadores baseados no Laplaciano da imagem, operadores baseados em *Wavelets*, operadores baseados na Transformada Discreta do Cosseno (*Discrete Cossine Transform – DCT*), operadores baseados em Estatísticas da imagem e operadores baseados em técnicas diversas. Uma análise detalhada do desempenho dos operadores de autofocus foi desenvolvida por [14]. A partir dessas análises foram observados que, operadores de autofocus baseados em Laplacianos, possuem melhores performances quando submetidos a variação de condições ambientais como qualidade de dispositivos de aquisição, lentes e filtragem do ruído. O operador Laplaciano aplicado

computacionalmente é uma aproximação discreta da segunda derivada da imagem em regiões de rápida mudança de intensidade.

A aplicação do filtro Laplaciano na imagem suavizada por um filtro Gaussiano pode ser observado na Figura 5, indicando: a) Imagem adquirida por um sistema monocular; b) Região de Interesse referente à flor mais distante do plano focal da câmera (menor nitidez). c) Região mais próxima do plano focal da câmera (maior nitidez); d) Aplicação do operador Laplaciano na imagem menos nítida; e) Aplicação do operador Laplaciano na imagem mais nítida.

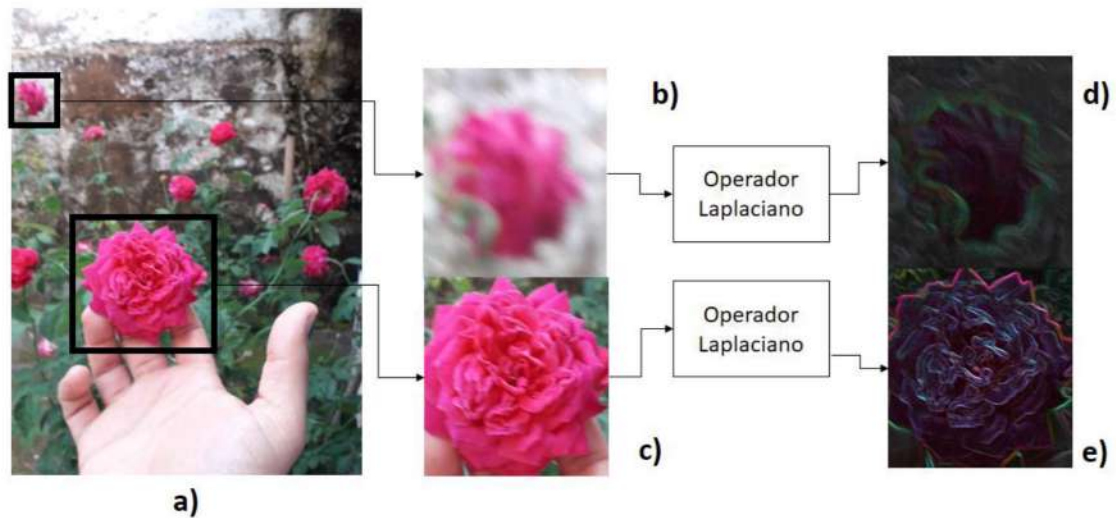


Figura 4. Aplicação do Operador Laplaciano em imagem de duas flores com diferentes distâncias em relação a distância focal na mesma cena.

Na Figura 5 é possível observar a variação do gradiente e a quantidade das bordas. A variação gera limitação nos operadores de foco, dificultando o uso de critérios universais de desempenho. A dificuldade em sistemas não-supervisionados representa a diminuição da robustez do algoritmo de medida de foco em diferentes operações.

Os operadores de foco baseados em Laplaciano possuem um melhor desempenho em relação a mudança de cenários e de hardware de aquisição, mantendo baixos níveis de ruído, redução de contraste e variações na saturação da imagem. Devido ao comportamento da segunda derivada da imagem, o operador detecta pequenas variações de foco, tornando-o adequado ao posicionamento de precisão por nitidez, reconhecendo-as em diferentes pontos na mesma imagem.

A estimação da profundidade, ou distância com base na nitidez é um problema enfrentado nos dispositivos de imagem. Um exemplo de estimação de profundidade pode

ser observado na Figura 6: a) Dispositivo Monocular Digital DSLR; b) Extração da informação de profundidade ou distância de uma imagem bidimensional; c) Nitidez das áreas de interesse, correspondendo à maior afastamento da distância focal (Nitidez 2) ou maior proximidade com a distância focal (Nitidez 1).

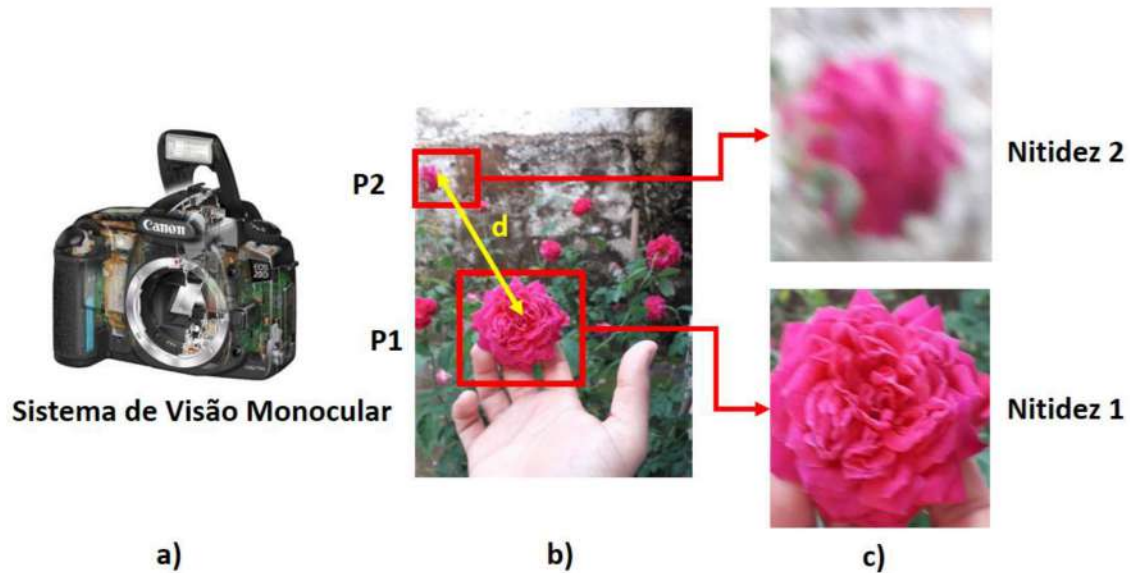


Figura 5. Estimação da profundidade com base na nitidez. Fonte: Autor.

A performance do operador de medida de foco é reduzida quando ocorrem variações de luminosidade, contraste e quantidade de ruído, desta forma são adicionados pré-processamentos na imagem como adição de um filtro Gaussiano para redução de ruído e análise estatística da Região de Interesse (*Region of Interest- R.O.I*). Operadores de foco como a Variância do Laplaciano são mais robustos e menos suscetíveis a quantidade de bordas da imagem, no qual o operador Laplaciano é mais sensível.

O uso da entropia sobre o operador Laplaciano, realiza a verificação das mudanças em altas frequências pela medição da quantidade de informação da imagem, e é menos suscetível à quantidade de bordas, característica essa que varia com a mudança da cena ou ambiente onde o sistema mecânico está inserido.

Alguns dos métodos para medição de qualidade da imagem usam a entropia aplicada ao Histograma para estimação de nitidez, porém com limitações na variação de cena, contraste e luminosidade. A Variância é uma medida de dispersão que mede a variabilidade total dos dados amostrais em relação à média amostral, na qual a imagem representada como uma variável aleatória, e o Laplaciano gera um mapa de bordas que



considera uma variável aleatória, estimando a distribuição de probabilidades e suas características. A variância pode ser estimada a partir de:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (2.16)$$

em que  $S^2$  é a variância do vetor do Laplaciano da imagem,  $X_i$  é o elemento do vetor relativo ao pixel, resultante da convolução da imagem de entrada em escala de cinza, com o núcleo discreto da estimativa da segunda derivada da imagem, o operador Laplaciano,  $\bar{X}$  é o valor esperado do pixel com base em sua distribuição estimada.

O processamento de imagem por histograma, com a indicação da imagem original, e em escala de cinza, podem ser observados na Figura 7, com a indicação da: a) Imagem de entrada; b) Extração da região de interesse; c) Histogramas dos três planos de cor da região, RGB; d) Transformação da região de interesse; e) Geração do histograma da imagem em escala de cinza para extração das estatísticas do histograma. A partir do histograma observado na Figura 7e, são retirados valores de variância, e o cálculo de qualidade da imagem, pela entropia. Os métodos foram inicialmente aplicados nas imagens adquiridas da plataforma, para análise das técnicas desenvolvidas.

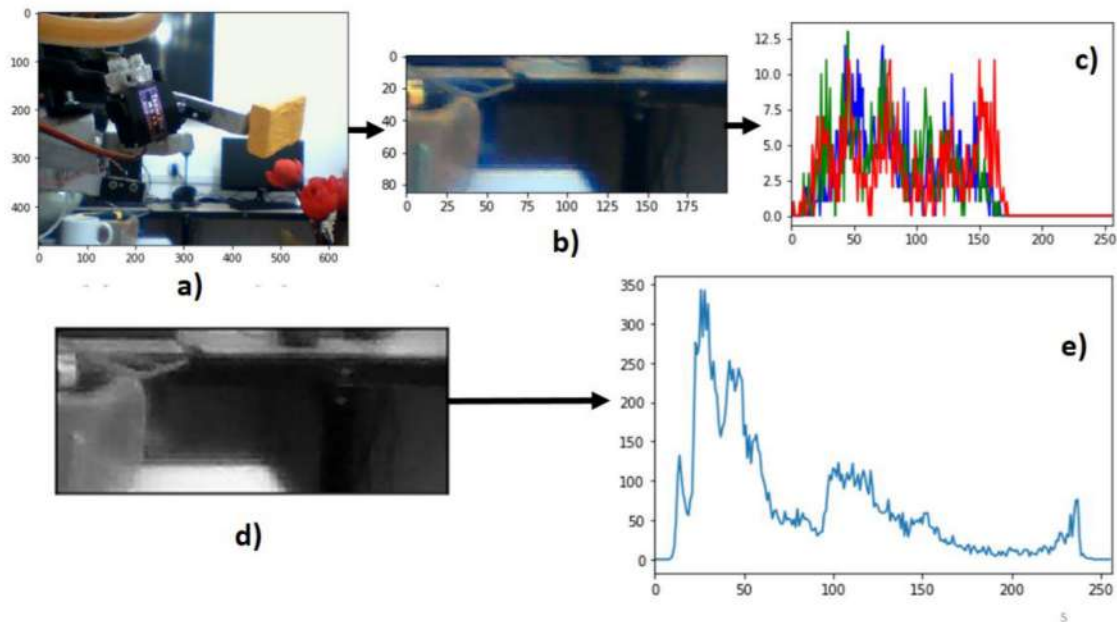


Figura 6. Processamento de imagem por histograma. Fonte: Autor

As imagens que serão processadas por técnicas estatísticas, como a variância do Laplaciano e estatísticas de alta ordem, podem ser consideradas como variáveis aleatórias, de forma que, as estimativas de suas distribuições de probabilidade (*Probability Density Functions* – PDF), e taxa de variação da distribuição são geradas a partir de histogramas e frequências relativas das imagens, que são matrizes transformadas em vetores.

A operação de transformação das matrizes dos Laplacianos das regiões de interesse em vetores e suas PDFs estimadas podem ser observadas na Figura 8, com: a) Laplaciano da região da sonda, objeto 1; b) Laplaciano da região da flor, objeto 2; c) vetor-linha do Laplaciano da região da sonda; d) vetor-linha da variável aleatória do Laplaciano da região do alvo; e) Estimativa das distribuições de probabilidade dos Laplacianos das regiões de interesse. A medida em que as regiões forem mais próximas, as distribuições se tornam semelhantes e conseqüentemente mais difíceis de serem diferenciadas, exigindo do operador de medida de foco maior sensibilidade à pequenas variações. Pode ocorrer, devido a fatores computacionais e operações de convolução, que as regiões possuam tamanhos diferentes como na Figura 8 a e b.

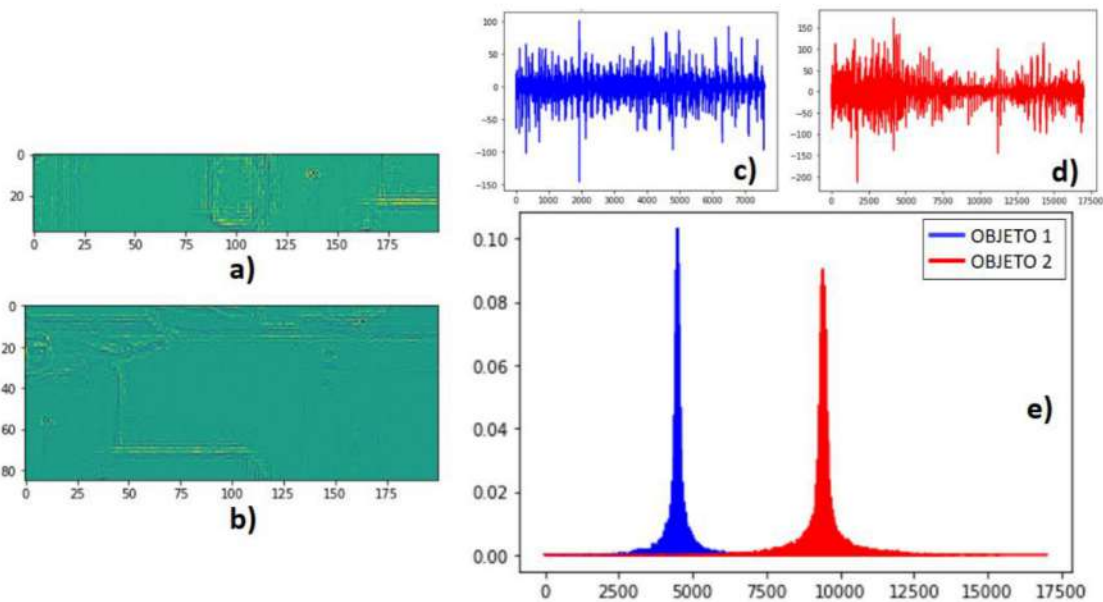


Figura 7. Laplacianos e suas distribuições.

A extração da PDF e as operações relacionadas as regiões de interesse são normalizadas, devido à manutenção do desempenho do operador de medida de foco utilizado. As operações foram realizadas nas imagens e regiões de interesse da plataforma robótica.

### 2.3. Declinação Magnética e Magnetômetros

O geomagnetismo terrestre tem sua origem estimada no núcleo da Terra, em que, uma grande quantidade de ferro derretido, gera um campo magnético suficiente para a proteção da contra radiação cósmica, e torna a globo terrestre um gigantesco ímã.

A região composta por gases rarefeitos ionizadas por espúrios da radiação desviada pelo campo magnético é denominada como ionosfera, meio no qual são refletidas as ondas de rádio responsáveis pelas telecomunicações. Devido ao campo magnético terrestre depender de vários fatores como, rotação da Terra, inclinação, composição das rochas e deslocamento da massa no núcleo da Terra, ocorre um desvio angular entre o norte geográfico e o norte magnético, podendo variar o valor com a composição do solo e com a órbita terrestre.

Os valores de declinação variam em cada parte do planeta, sendo necessários observatórios magnéticos em órbita e terrestres para o mapeamento das mudanças, geração de modelos matemáticos e Cartas de declinação magnética em relação aos meridianos. O modelo do núcleo terrestre não é totalmente conhecido, existindo anomalias dinâmicas com relação ao campo magnético do globo terrestre, pressupondo que o modelo do campo magnético gerado pelo núcleo de ferro esteja deslocado do centro, resultando em locais da crosta terrestre com intensidade de campo magnético reduzido.

A anomalia é denominada de anomalia magnética do Atlântico Sul. A anomalia torna o estudo do campo magnético mais complexo, implicando em sérias modificações como inativação de módulos espaciais de satélites artificiais orbitando sobre a região da anomalia, geração de bolhas na ionosfera terrestre por ventos solares, desvio e/ou corte do sinal entre satélites artificiais da constelação que forma o Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System – GPS*).

Na Figura 9 é indicado um cenário do campo magnético terrestre e suas implicações tecnológicas. Pode ser observado na Figura 9b a distribuição do campo magnético Terrestre no ano de 2020 e pode-se observar a variabilidade do campo magnético, levando à constantes medições para atualização de cartas magnéticas para navegação.

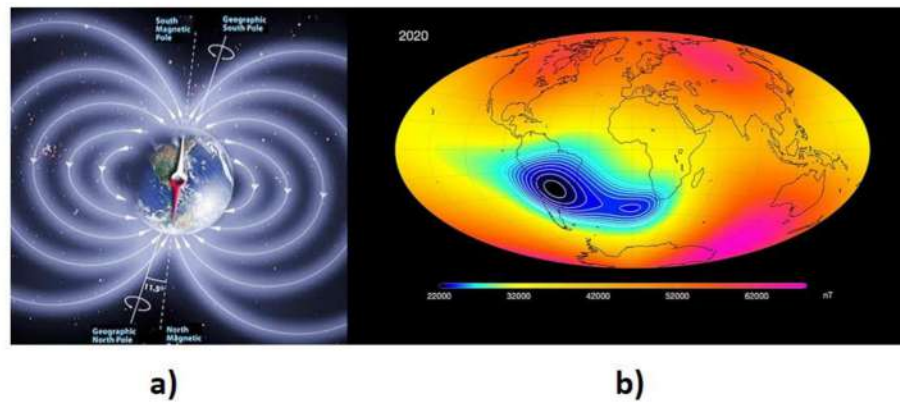


Figura 8. Principais desvios e anomalia magnéticos terrestres. a) Declinação Magnética; b) Anomalia Magnética do Atlântico Sul em Azul no ano de 2020. Fonte: ©ESA- Agência Espacial Europeia.

Para medição dos valores de campo magnético das estruturas de amostras com precisão são utilizados transdutores, que utilizam vários princípios físico para transformar a intensidade de campo magnético em sinal de corrente elétrica. Alguns desses efeitos podem ser caracterizados como resposta de uma amostra à corrente alternada, como o efeito Josephson de quantização do fluxo magnético e o efeito Hall. Alguns aparelhos foram desenvolvidos tendo como finalidade medir a resposta magnéticas de amostras com base nestes efeitos, como o magnetômetro de amostra vibrante, o magnetômetro SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*), e o magnetômetros de efeito Hall [20].

Atualmente uma parte considerável dos magnetômetros comerciais são desenvolvidos com base no Efeito Hall, sendo desenvolvidas várias versões com pesquisas para a otimização de medição de campo geomagnético. O efeito Hall, em detrimento dos outros efeitos magnéticos permite a construção de dispositivos de estado sólido de baixo custo, para fins comerciais, industriais e agrícolas não necessita de sistemas complexos de refrigeração, supercondutores ou sistemas mecânicos de vibração para a medição da resposta magnética ao sinal gerado por uma fonte.

O efeito Hall consiste na geração de uma diferença de potencial perpendicular à um condutor percorrido por uma corrente elétrica, submetido à um campo magnético perpendicular. Depois de adquirido, o sinal é condicionado pelos amplificadores e filtros, e digitalizado para que o valor da orientação magnética em relação ao norte magnético seja processado por computadores ou dispositivos digitais.

O efeito Hall foi descoberto quando estavam sendo investigadas as forças magnéticas em um condutor transportando uma corrente elétrica por E. H. HALL em 1978, observada uma deflexão dos portadores das cargas quando o campo é aplicado perpendicularmente à velocidade de deriva dos portadores de carga eletrônica. De forma simplificado o fenômeno pode ser observado como a força de Lorentz sobre os elétrons livres no material. As cargas elétricas são acumuladas com sinais contrários nas laterais do condutor, gerando um campo que gera uma força elétrica contrária à força magnética, reduzindo o fluxo transversal dos elétrons. A migração das cargas cessa a quando os módulos das forças magnética e elétrica se igualam [21].

O efeito Hall gera uma magnetorresistência no condutor que é usada para transformar a intensidade do campo magnético em diferença de potencial [21]. A intensidade de campo magnético,  $H$ , do efeito Hall pode ser observada na Figura 10, com a indicação do: a) Diagrama da tensão de Hall em um dispositivo condutor; b) Diagrama do Campo magnético agindo no condutor provocando à mudança de direção dos elétrons; c) Diagrama vetorial dos vetores dos campos magnético ( $\mathbf{B}$ ), elétrico ( $\mathbf{E}$ ) e do vetor de densidade de corrente no condutor ( $\mathbf{J}$ ).

O desvio dos elétrons pode ser observado na Figura 10b, que é o responsável pelo acúmulo de cargas. O modelo do dispositivo observado na Figura 10a é caracterizado por uma magnetorresistência transversal, um campo magnético perpendicular à corrente e ao plano da amostra. A variação percentual da magnetorresistência pode ser descrita como:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho(0)} (\%) = \frac{\rho(H) - \rho(0)}{\rho(0)} \times 100, \quad (2.17)$$

em que,

$$\rho(H) = \frac{E_d(H)}{J}, \quad (2.18)$$

em que  $\mathbf{H}$  é o campo magnético inserido na amostra,  $\mathbf{E}_d$  é o campo elétrico desenvolvido entre os contatos,  $\mathbf{J}$  é a densidade de corrente,  $\rho(H)$  é a resistividade do material sob a influência de  $\mathbf{H}$ , e  $\rho(0)$  é a resistividade do material sem a influência de  $\mathbf{H}$ .

A medição da magnetorresistência é realizada pelos contatos localizados ao longo da direção de propagação da corrente. Para a medição do efeito Hall, a medição é realizada transversalmente ao fluxo da corrente, com o campo elétrico de Hall  $E_H = E_d(H)$ , atuando no caso não linear. Materiais não-magnéticos possuem um comportamento do campo elétrico de Hall linear, proporcional ao campo magnético inserido no condutor  $H$  e a densidade de corrente  $J$ , descrito por uma grandeza escalar de campo. O módulo do campo de Hall é dado por:

$$E_H = R_H J H \quad (2.19)$$

em que,  $R_H$  é a constante de Hall para cada material, sendo uma condição dependente da anisotropia ou propriedades magnéticas em cada direção do material. Para o caso não linear, onde o valor do campo elétrico é função da intensidade do campo magnético a Equação 2.20 pode ser modelada na forma:

$$R_H = J^{-1} \frac{\partial E_H}{\partial H} \quad (2.20)$$

em que,  $\frac{\partial E_H}{\partial H}$  é o gradiente de  $E_H$  em função do campo magnético inserido.

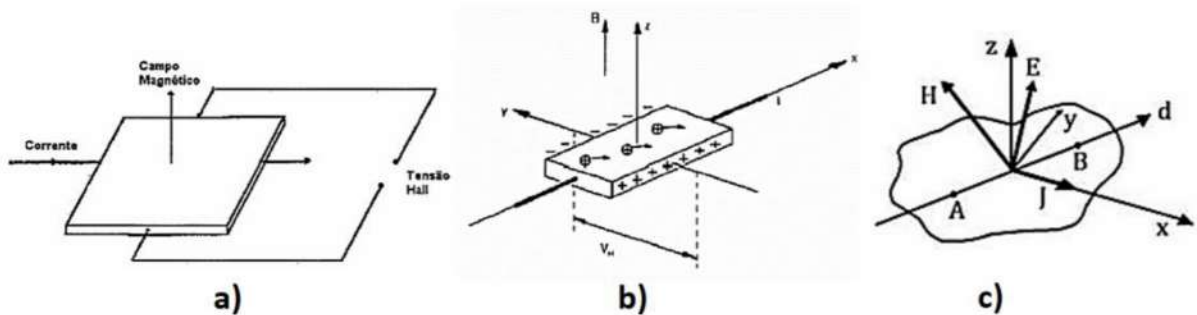


Figura 9. Dispositivo e diagrama de Efeito Hall. Fonte:

A Equação 2.20 pode ser utilizada para modelar um campo também variante no tempo, necessários para os casos onde são necessárias várias leituras do campo magnético, como no caso as bússolas eletrônicas, e nas indicações de inclinações dinâmicas em relação

ao norte magnético. O comportamento dos magnetômetros podem revelar propriedades e fenômenos físicos do campo magnético necessários à navegação autônoma, como a extração do ruído magnético e sua função densidade de probabilidade, para estimação da fonte magnética geradora do ruído.

Os sensores de efeito Hall apresentam vantagens e desvantagens em relação à um grupo de sensores que utilizam a magnetorresistência anisotrópica, uma propriedade que também é consequência da alteração do momento magnético dos elétrons no material condutor em presença de Campo Magnético Externo. A magnetorresistência anisotropia pode ser observada em filmes finos como ligas do tipo  $Ni_{81}Fe_{19}$ , conhecidas como *Permalloy*. Os sensores de Efeito Hall apresentam características de linearidade mesmo em presença de campos magnéticos extremos em relação a faixa dimensionada, porém apresentam baixa sensibilidade em relação aos sensores magnetorresistência anisotrópica (*Anisotropic Magneto Resistive – AMR*) em filmes finos.

O efeito de magnetorresistência, descoberto por William Thomson, é limitado a um máximo 5% da resistência nominal do material em condições iniciais. O efeito foi identificado como uma resistência magnética ordinária (*Magnetic Resistance Ordinary – MRO*). A intensidade da magnetorresistência é definida como:

$$MR = \frac{R(H) - R(H_0)}{R(H_0)} \times 100 \quad (2.21)$$

em que,  $R(H)$  é a resistência da amostra na presença de campo magnético externo  $H$  e  $R(H_0)$  é a resistência na ausência de campo magnético. Pela Equação 2.21 é possível modelar a variação percentual de resistência em função do campo magnético. A sensibilidade com relação aos efeitos magnetorresistivos pode ser definida por:

$$S = 100\% \times \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{H_s} \quad (2.22)$$

em que, a unidade de  $S$  dada em  $\%/Oe$  (*Oersted*) e  $H_s$  constituem o campo mínimo para saturação dos efeitos magnetorresistivos na amostra. A dependência da resistividade com a orientação relativa do campo magnético  $\theta_M$  e da corrente  $\theta_i$  sobre a amostra de resistência na ausência de campo magnético  $R_o$  pode ser expressa por:

$$R(\theta) = R_0 + \Delta R_{AMR} \times \cos(\theta_M - \theta_i) \quad (2.23)$$

em que,  $\Delta R_{AMR}$  é a variação de resistência causada pelo efeito AMR. Os sistemas de medição de campo magnético terrestres utilizam sensores baseados no efeito de resistência magnetoanisotrópica, como os mostrados na Figura 11, podendo ser observado: a) Invólucro do sensor para montagem em placas de circuitos Impressos de Superfície; b) Diagrama dos Sistemas e Protocolos de comunicação do sensor.

O sensor observado é o encapsulamento na Figura 11a possui além de transdutores magnetoresistivos, circuitos de amplificação, filtragem e conversão analógico-digital como também o uso do protocolo serial para envio de dados, Figura 11b.

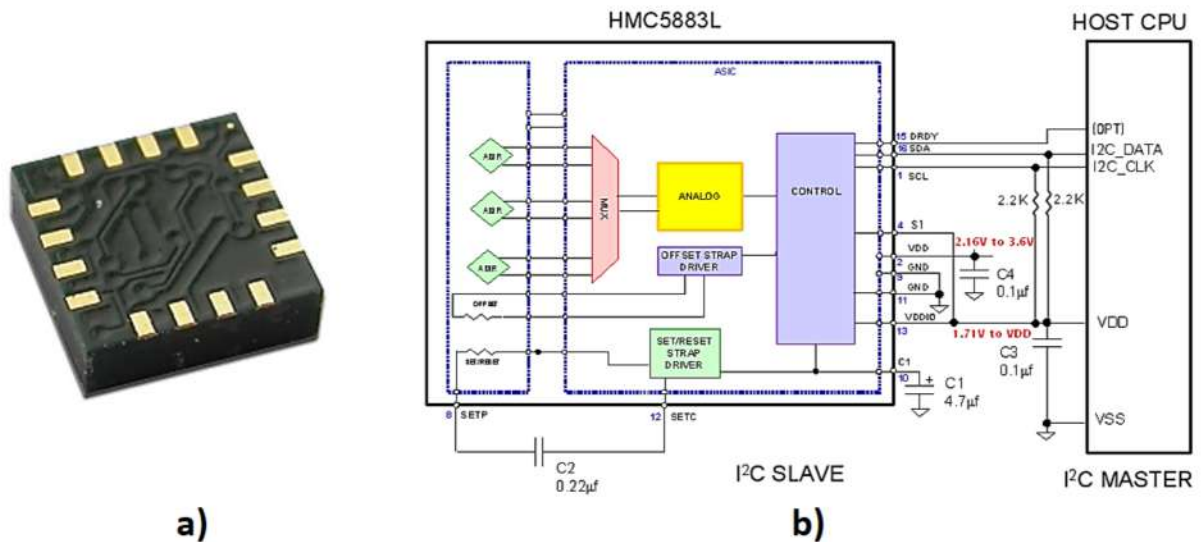


Figura 10. Sensor HMC5883L. Fonte: *Honeywell HMC5883L Datasheet*.

Neste Capítulo foi abordado a fundamentação teórica sobre as tecnologias utilizadas no desenvolvimento da Tese. No Capítulo seguinte será indicado o estado da arte sobre o uso de soluções bioinspiradas em posicionamento autônomo de robôs.



### 3. Estado da Arte

O posicionamento autônomo supervisionado e não supervisionado de plataformas mecânicas que manipulam objetos, como rochas, metais, frutas, verduras, flores, e que podem inferir dados sobre os objetos, como quantidade de pólen, qualidade dos frutos, PH do uma amostra, espectro de uma rocha, representa um desafio para resolução de tarefas realizadas por robôs autônomos. O processo desenvolvido na Tese pode ser aplicado em operações de polinização, proporcionando avanços nas áreas da agricultura, militar, aplicações em resgate, sondagem aeroespacial, etc., com uma quantidade de variáveis de cenário e de alvos que tornam o processamento de informações uma tarefa complexa.

O posicionamento autônomo de micro aeronaves não tripuladas em florestas densas, ou plataformas como o Laboratório Robótico de Análises Químicas (*Robotic Chemical Analysis Laboratory – R.C.A.L*) foram desenvolvidos tendo como um dos principais objetivos o posicionamento autônomo em ambientes naturais [12].

Pode ser observado na Figura 3 o braço robótico com cinco Graus de Liberdade, extraindo amostras em meio às rochas e solo arenoso. Para a sondagem autônoma, é necessário identificar o objeto, assim como sua forma e dimensões, em qual posição se encontra em relação ao braço mecânico, e a estratégia de reposicionamento.

Na Figura 3 pode ser observado que o sistema de análise propriamente dito ou *R.C.A.L* está instalado sobre um plataforma robótica de retorno de amostra (*Sample Rover Return – SRR*), desenvolvido para de testes em análises químicas e robô de treinamento. A aplicação do método é limitada a ambiente internos com variáveis controladas, como brilho, cor e variação angular. A captura de sedimentos superficiais do solo é realizada pelo braço robótico e deve ser levada até a entrada do sistema de análise que pode ser observado no canto superior direito da Figura 3.

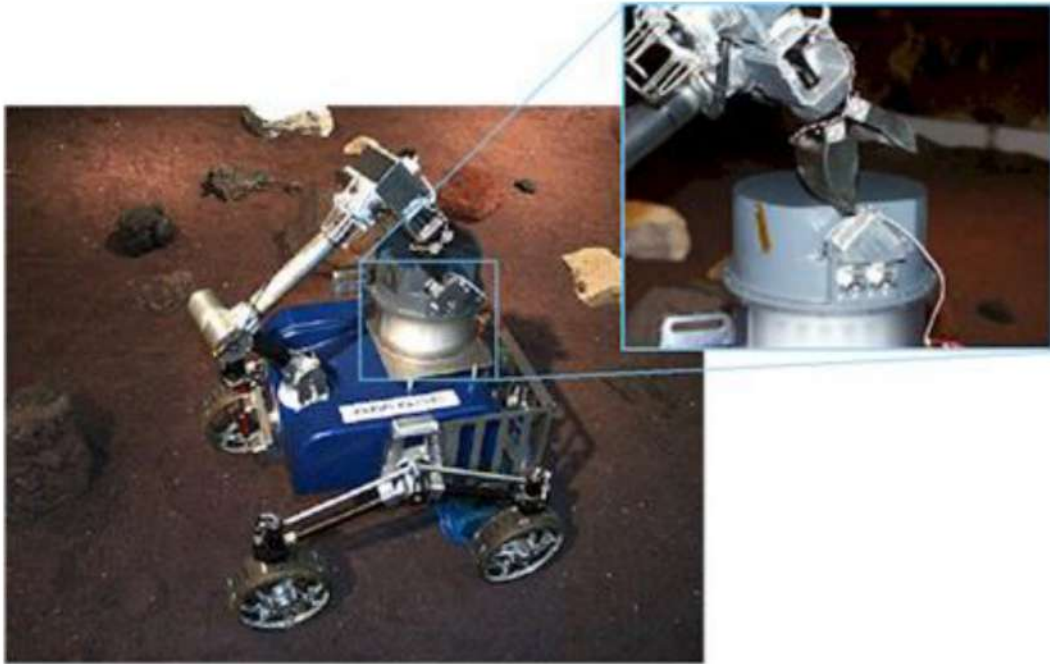


Figura 11. Robô de análise química do solo desenvolvido com uma sonda de 5 G.D.L (Graus de Liberdade). Fonte: *Wet Chemistry Laboratory* (NASA).

As soluções bioinspiradas aplicadas nos robôs são apresentadas como possibilidades de melhor aproveitamento de hardware e software, promovendo melhorias nos sistemas. O desenvolvimento de extremidades para braços robóticos para realizar o processo de polinização artificial, utilizando sistemas de visão estéreo e sensores como L.i.D.A.R. para o mapeamento do ambiente e verificação do estado de maturação das flores é um exemplo [22-23].

Vários trabalhos utilizam algoritmos bioinspirados no controle e otimização dos robôs. Em [23] foi desenvolvido, o controle dos robôs Omni-wheels utilizando um algoritmo bioinspirado no sistema límbico do cérebro. Algoritmos de otimizações bioinspirados, como *Particle Swarm Optimization* e Algoritmo Genético, são usados na sintonia de modelos de retina para extração de características hierárquicas de imagens [24]. Em [25] foi desenvolvido o algoritmo de *denoising*, bioinspirado em abelhas para condições de luminosidade fraca, utilizado no algoritmo de visão noturna para mimetizar a amplificação do processo de transdução em fotorreceptores de *Megalopta genalis*. Soluções bioinspiradas com o objetivo de imitar o comportamento de insetos são implementadas em software e hardware. Em [26] foi desenvolvida uma extremidade bioinspirada no mecanismo de

polinização do zangão acoplado a um braço robótico, projetado para realizar o processo de polinização.

As plantações são ambientes de mudança contínua. As partes das plantas e flores podem crescer, mudar de cor ou até cair em um período muito curto, como horas ou dias. Assim, robôs autônomos que utilizam processamento de imagens no processo de polinização necessitam de um método de controle ajustável que não dependa de conhecimento prévio sobre a área a ser polinizada.

Métodos de posicionamento de nitidez com operadores de foco automático baseados na variância Laplaciana e métodos baseados em histograma são usados em várias aplicações. Uma limitação dos métodos é a calibração prévia do algoritmo com dados de tamanho do objeto. Para polinização artificial, o processamento da imagem da flor e do ambiente de polinização requer um método que realize a convergência da distância entre a extremidade da sonda de polinização e a flor, sem conhecimento prévio do tamanho do alvo, que seja robusto à quantidade de informação, que pode filtrar informações desnecessárias ao processo, como cor, forma ou quantidade de objetos.

O uso de quantidades mínimas de câmeras, principalmente em plataformas robóticas mais simplificados, é um fator determinante para a miniaturização das plataformas. Métodos de controle não supervisionados com uma única câmera são recomendados. O método que apresenta baixa necessidade de calibração prévia são os algoritmos que envolvem operadores de autofoco para calcular distâncias entre objetos. Vários trabalhos desenvolveram métodos não supervisionados bioinspirados para controle de robôs, com visão computacional na detecção de objetos para percepção de cenas internas [27-28], navegação em ambientes abertos [29], e com aplicações de rede de robôs [30-31].

O uso de operadores de foco automático está relacionado à distância focal do objeto em função do gradiente dos objetos em cada ponto da imagem. Isso gera até mesmo funções de variação de gradiente, que precisam de informações adicionais sobre a orientação do objeto em relação ao ponto focal. Um sensor que armazena informações de orientação e com um sistema de coordenadas global em relação ao ambiente resolve essa limitação. As abelhas se movem por longas distâncias, detectando variações no campo magnético da Terra em seu abdômen. Essa sensibilidade ao campo magnético pode ser usada como analogia com a solução de orientação para operadores de foco automático. Uma bússola eletrônica é um

sensor eficiente e de baixo custo que pode ser utilizado como solução no processo de posicionamento com operadores de foco automático.

## 4. Materiais e Métodos

Os materiais e métodos propostos são compostos por duas partes:

- O desenvolvimento de um método de reposicionamento não supervisionado, inspirado nas abelhas, que utiliza a nitidez e o campo magnético, pela variação e entropia do Laplaciano como operadores de foco automático; e

- A aplicação da solução em um robô de sondagem inspirado no sistema de lambedor da abelha para operações de polinização com finalidade de teste do método. Nesse caso, o robô e o método de reposicionamento são bioinspirados nas abelhas.

### 4.1. Robô de sondagem inspirado no dispositivo lambedor da abelha

Um robô de sondagem é composto por uma plataforma robótica com um sistema de locomoção diferencial. Ele utiliza dois motores de corrente contínua (CC) do tipo escovado, acoplados em caixas de engrenagens nas extremidades na parte dianteira, com dois rodízios rotativos na parte traseira (Figura 13c). O sistema é caracterizado pelo uso de dois motores de tração e quatro rodas no total, auxiliados por um sistema de fonte de alimentação e um sinal de controle para os motores CC.

O posicionamento do sistema de sondagem é realizado usando um mecanismo de elevação de cabo. Nesse sistema, um tambor para coletar e fornecer cabos fixados à plataforma e um mecanismo de redução mecânica acoplado a um motor DC executa o processo de elevação e abaixamento da sonda.

A sonda possui dois pontos de suporte, um dos quais está preso ao cabo, tratado mecanicamente como um acoplamento esférico e o outro na rótula, que permite a rotação com 1 grau de liberdade. Como pode ser observado na Figura 12, temos indicados: a) Motor elétrico DC; b) Redução Mecânica; c) Variáveis de velocidade angular e linear ( $\omega_{drum}$  and  $V_{cable}$ ); d) Tambor de elevação de cabo acoplado ao eixo de saída da caixa de engrenagens.

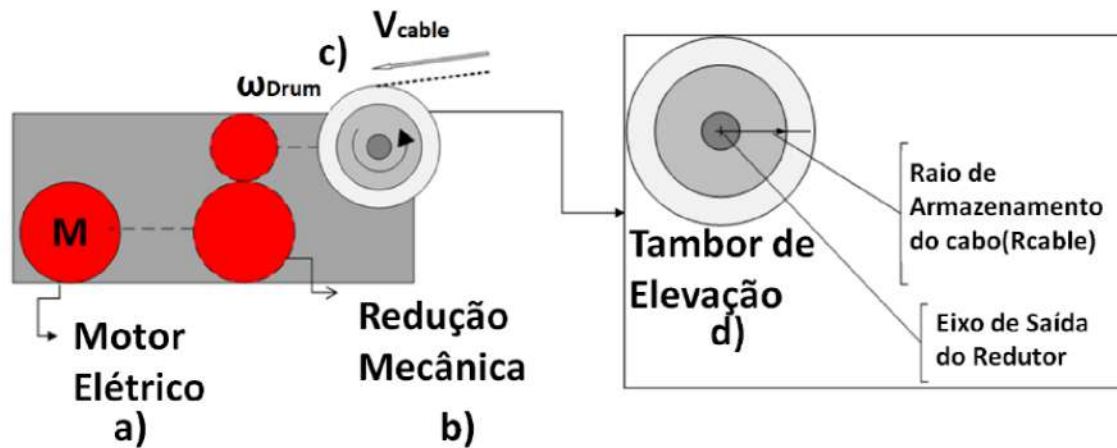


Figura 12. Mecanismo de coleta e fornecimento de cabo: Fonte: Autor

A retração do cabo de velocidade constante é acionada por um motor elétrico escovado, Figura 12a, controlado por um pulso modulação por largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*) com ciclo de serviço constante. O modelo de levantamento geométrico, bem como seu mecanismo de posicionamento (Figura 14), correspondem ao sistema de posicionamento vertical da sonda, no qual o modelo de locomoção do robô possui dois graus de liberdade.

Pode ser observado na Figura 13 o diagrama esquemático do sistema de locomoção da plataforma.

O modelo tridimensional inclui:

- As forças de tração nas rodas dianteiras responsáveis pela translação e rotação da plataforma (Figura 13d);
- A força lateral causada pela diferença de rotação das rodas dianteiras, bem como o seu ponto de rotação (Figura 13b);
- O ponto da rótula onde o sistema de perfuração irá girar (Círculo verde na Figura 13; e

- O mecanismo de redução mecânica é acionado por um motor elétrico responsável por remover e fornecer o cabo que realiza o levantamento da plataforma (Figura 13e).

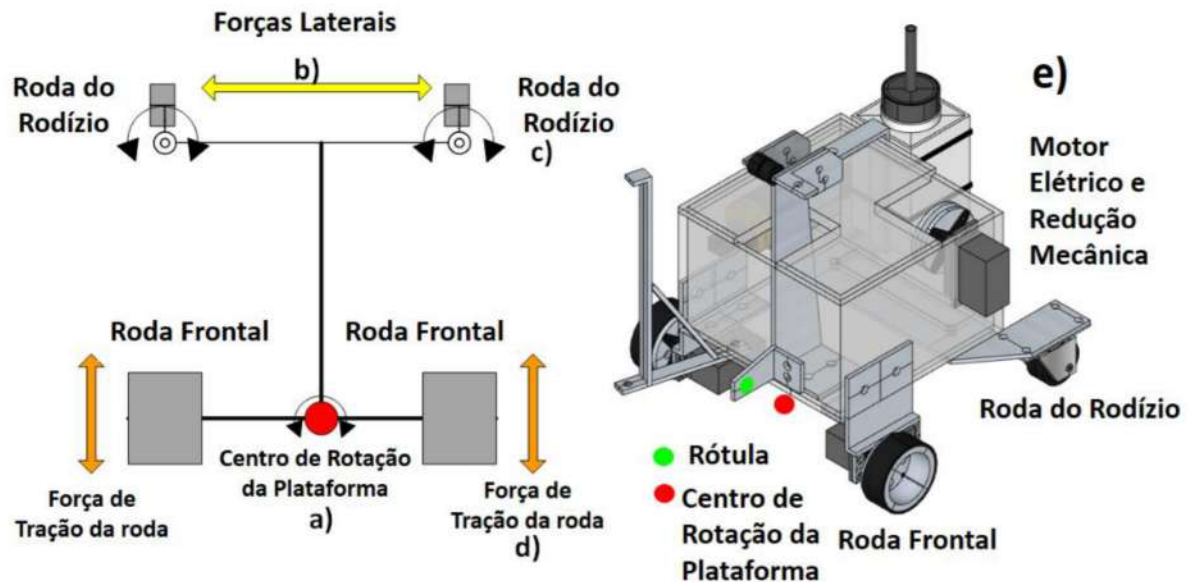


Figura 13. Diagrama esquemático do sistema de Locomoção da Plataforma.

O modelo do sistema de sondagem, observado na Figura 14, é composto por:

- Robô plataforma com cinemática diferencial, 2 rodas dianteiras com motores elétricos de corrente contínua em cada roda, Figura 14a;
- Sistema de sondagem inspirado no aparelho lambedor que realiza a extração de líquidos nas flores, com o suporte de material poroso, responsável pelo contato direto com a amostra a ser removida do alvo, flor para o caso da aplicação em polinização Figura 14b;
- Câmera lateral de aquisição de imagem, Figura 14c;
- Diagrama bidimensional do sistema de sondagem, com o sistema de acionamento mecânico do sistema de elevação por cabo, Figura 14d;
- Sistema de Sondagem, Figura 14e;

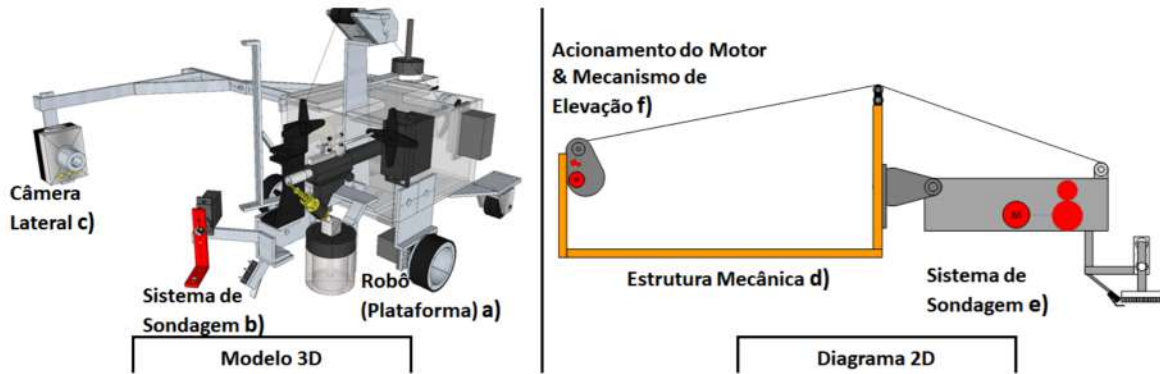


Figura 14. Projeto tridimensional do robô bioinspirado. Fonte: Autor.

As imagens do sistema de sondagem e do objeto para o qual o sistema de sondagem deve ser reposicionado são adquiridas com uma câmera lateral, tipo CMOS de 2,0 MP, instalada no Rover, cujo foco é ajustado manualmente, com resolução de 30 FPS.

A plataforma robótica utilizada e os sensores usados no projeto podem ser observados na Figura 15. O sinal de orientação magnética é adquirido por um módulo GY-273 com um sensor magneto-resistivo HMC5883L de 3 eixos e resolução de 3 milli-Gauss. O sensor foi instalado no centro de rotação da plataforma robótica, ajustado pelo algoritmo de posicionamento, com capacidade de medir campos na faixa entre  $\pm 8$  Gauss, utilizando a declinação magnética em São Luís-MA-BR em 04/08/2019, definido para  $-20,53$  'W'.

O sinal angular varia de 0 a 359 graus, com uma precisão mínima de 1 grau. O sinal é enviado via protocolo I2C para um microcontrolador ATmega328 e transferido para o servidor via protocolo serial. Após o processamento das informações pelo servidor, os dados sobre a direção e a intensidade de rotação da plataforma são enviados para uma placa de desenvolvimento Arduino MEGA 250® acoplada a um circuito integrado L293D, para controlar os motores de corrente contínua responsáveis pela rotação da plataforma.

Na plataforma, foram inseridos LEDs como marcadores ativos [10], utilizados para a segmentação dos pontos do sistema de sondagem referente à rótula e extremidade da sonda. Os LEDs operam em frequências correspondentes às cores vermelha, com comprimento de onda de  $\lambda = 645$  nm, verde ( $\lambda = 565$  nm) e azul ( $\lambda = 430$  nm). As características da área extraídas pelos marcadores são usadas como um limiar para acionar o sistema de elevação da sonda.



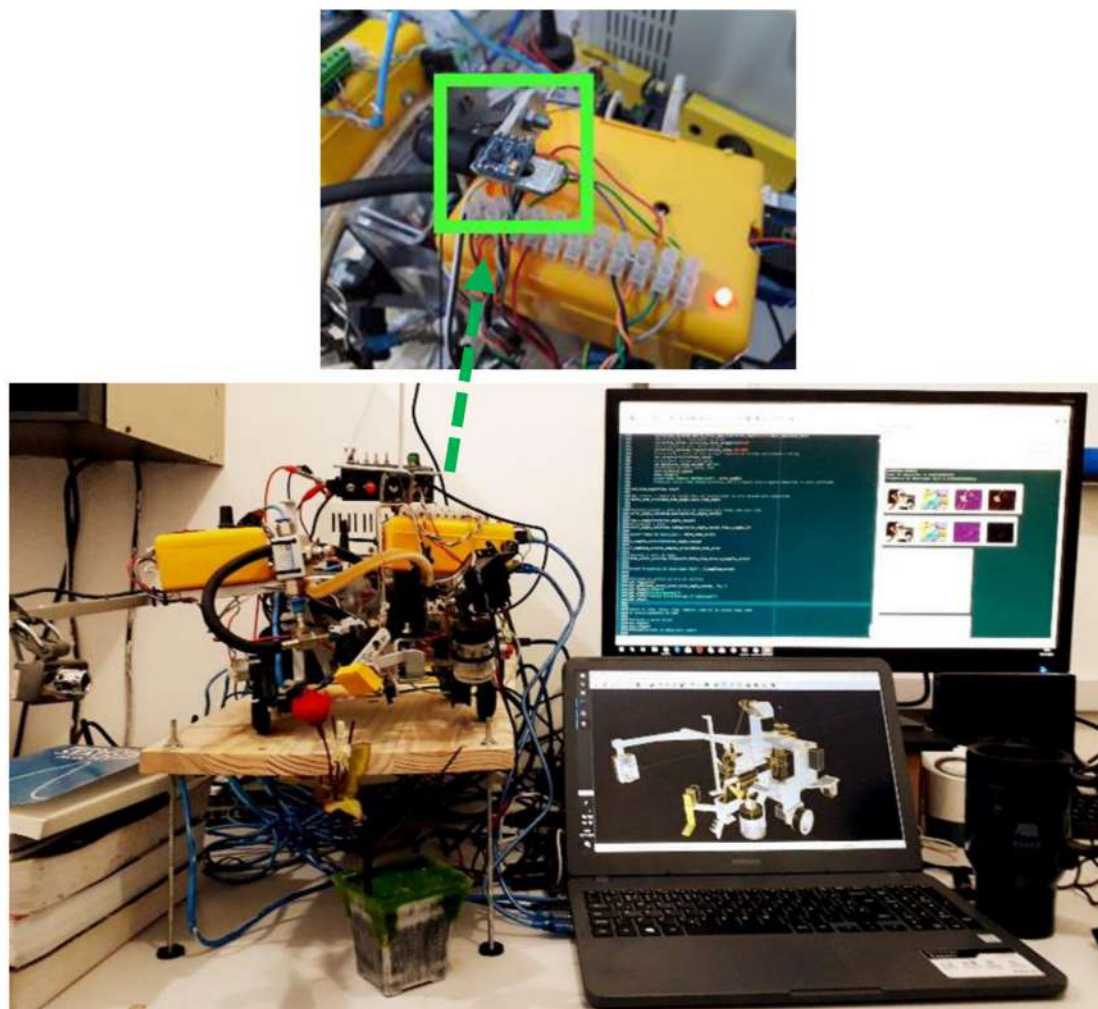


Figura 15. Plataforma robótica com a indicação do sensor magnético. Fonte: Autor.

## 4.2. Método de reposicionamento não-supervisionado

O método de posicionamento desenvolvido neste trabalho, de 2 graus de liberdade, é bioinspirado na orientação das abelhas em relação ao campo magnético. As abelhas têm partículas sensíveis ao campo magnético no abdômen, por isso elas são capazes de se reorientar com base no campo magnético da terra, mesmo sem a presença de luz [13]. Foi comprovado pelos testes com campos magnéticos uniformes em rotação, que concluíram que as abelhas têm uma memória magnética do posicionamento da colmeia e, mesmo dentro

da colmeia, sem nenhuma fonte de luz, utiliza a memória como referência para o posicionamento e construção da estrutura [13].

Pode ser observado na Figura 16 o diagrama da plataforma juntamente com os subsistemas que a integram e realizam o processo de reposicionamento em relação ao alvo desejado. Na Figura 16 (a e b) podem ser observados os sensores que irão compor o processo de reposicionamento como Câmera Lateral, Figura 16a, e Bússola eletrônica para orientação magnética, Figura 16b. O servidor de processamento, Figura 16d, via interface serial irá receber os dados de imagem pela câmera lateral e de orientação magnética pré-processado por meio do sistema de aquisição de dados, Figura 16c. Após o processamento da imagem pelo servidor e calculado o ângulo de correção, será enviada uma informação de porcentagem de Ciclo Ativo empregado na modulação da largura de pulso gerenciado pelo sistema de acionamento aos motores elétricos, Figura 16e. O processo de aquisição do ângulo de orientação magnética pela bússola eletrônica pode ser observado na Figura 16f.

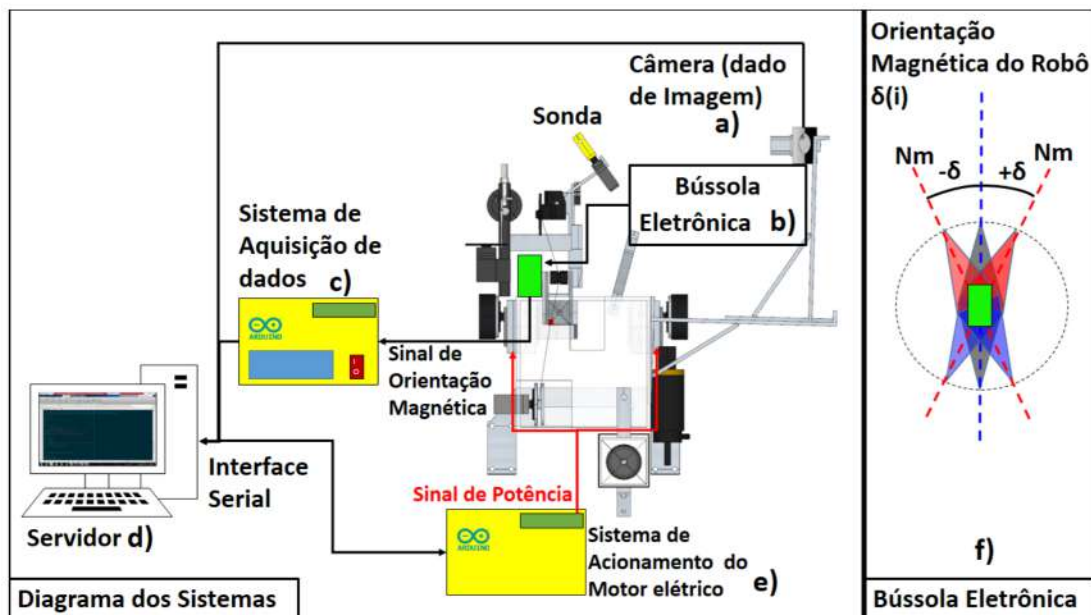


Figura 16. Diagrama do sistema de reposicionamento bioinspirado. Fonte: Autor.

O método de reposicionamento de inspiração biológica usa duas hipóteses de aproximação, usando apenas uma câmera e uma bússola eletrônica:

1 - A área formada pelos pontos de marcação com valor mínimo é um valor ótimo que pode ser utilizado no controle da plataforma;

2 - Dois objetos no mesmo plano ou na mesma imagem têm valores quantitativos muito próximos da nitidez. Assim, a diferença entre as medidas de nitidez dos objetos está diretamente relacionada à distância entre os dois planos de localização. A intensidade dessa diferença leva a controlar atitudes que buscam um valor mínimo de diferença, representando o alinhamento entre o objeto e o sistema de pesquisa.

Ambas as hipóteses levam a uma metodologia não supervisionada de aproximação por imagem e orientação magnética, estratégia semelhante à utilizada pelas abelhas no processo de busca de alimentos, robusta às variações no ambiente e nos objetos que, neste caso, são segmentados por sua cor, flor vermelha e extremidade amarela da sonda, tendo como padrão a tonalidade desejada para a extremidade da sonda e a tonalidade desejada para o objeto para o qual o sistema de sondagem deve ser reposicionado. Este método é implementado na prática em dois processos, varredura do ambiente e captura de imagem.

O processo de digitalização do ambiente e captura de imagens de objetos com planos deslocados e suas distâncias focais pode ser visto na Figura 17.

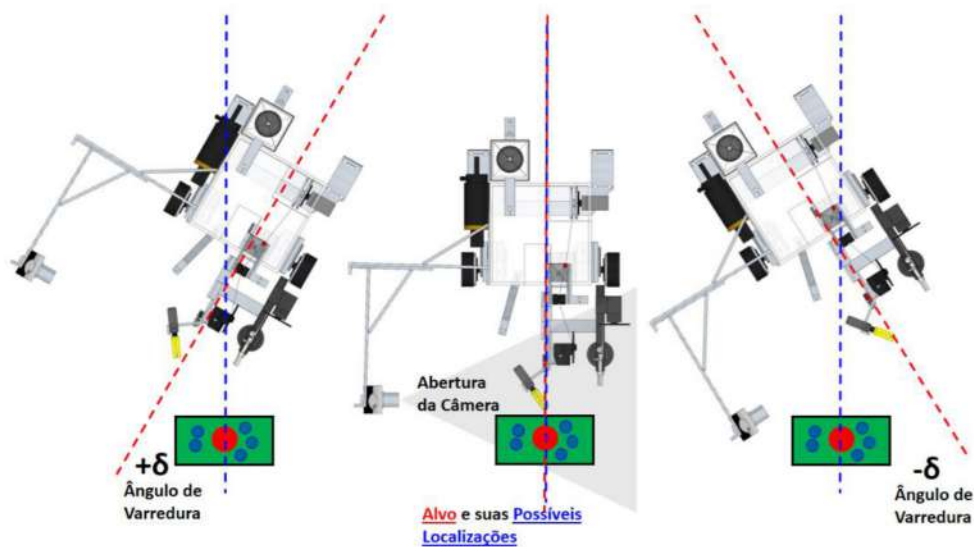


Figura 17. Diagrama do processo de verificação/ varredura do ambiente proposto para o método não-supervisionado. Fonte: Autor.

No processo de varredura, é gerada uma rotina aleatória com uma variação angular no sentido horário e anti-horário, cujo alcance é limitado a um número fixo de pulsos de corrente enviados aos motores de corrente direta, em regime de malha aberta e devido a imperfeições de nos sistemas mecânico, elétrico e de piso em que o robô está localizado, os ângulos atingidos em cada rotina de varredura não são simétricos e possuem módulos diferentes. O segundo processo é a transformação do quadro adquirido do sistema RGB-HSV para segmentação por cor no plano H, tanto na extremidade da sonda quanto na posição do alvo, com o objetivo de segmentação, binarização e posterior cálculo dos baricentros dos objetos.

As imagens resultantes são processadas para obter suas funções de densidade de probabilidade (PDF) com base na normalização dos histogramas, com os valores das entropias e das variâncias dos Laplacianos, ambos como medidas de nitidez, estatísticas da sonda e do alvo. Subtraídas os valores de nitidez são concatenados em dois vetores.

O processo de segmentação gera matrizes binárias dos objetos. A posição horizontal do baricentro da sonda e da flor são calculados a partir dos histogramas dos pixels das linhas da imagem, enquanto que a posição vertical do baricentro é calculado a partir do histograma das colunas da imagem. Os objetos do baricentro servem como pontos centrais para o corte das regiões de interesse, com uma transformação posterior dessas regiões em escala de cinza, sendo extraído o operador do Laplaciano da imagem (Equação 2.6) para a extração das bordas [15-16]. As matrizes resultantes da convolução são vetorizadas e armazenadas, sendo usadas para calcular as entropias e variâncias das distribuições de probabilidade.

O operador proposto calcula a partir do vetor  $vec(L_{x,y})$  um vetor unidimensional, o vetor de probabilidade da região da imagem. A partir do vetor de probabilidade é calculado então a entropia desse vetor, para a região da sonda e para região do objeto ou alvo desejado. O vetor de probabilidade e a equação da entropia para este vetor são dados por:

$$Pr\left(vec(L_{x,y})\right) = p, \quad (3.1)$$

em que,  $\Pr(\text{vec}(L_{x,y})_i)$  é a probabilidade  $p(i)$  de cada elemento do vetor  $\text{vec}(L_{x,y})$ .

A entropia  $H_i$  será calculada por:

$$H_i = - \sum_{i=1}^{i=\text{len}(\mathbf{Pr})} p_i \log p_i, \quad (3.2)$$

onde,  $H_i$  é a entropia da região segmentada no respectivo quadro  $i$ ,  $p_i$  é o elemento respectivo do vetor de probabilidade e o limite superior  $i = \text{len}(\mathbf{p}_r)$ , com o último elemento do vetor de probabilidade  $\mathbf{p}_r$ .

Em seguida, ocorre a busca pelo elemento mínimo do vetor de diferenças, entropia e variâncias dos Laplacianos. O índice do elemento do vetor de diferença é então comparado ao índice de orientação magnética, a fim de encontrar o valor do ângulo ao qual o sistema de sondagem deverá ser reposicionado ( $\theta_{alvo}$ ).

A operação de diferença entre as Entropias do Laplaciano é dada por:

$$\mathbf{H}_{dif} = \mathbf{H}_o \mathbf{L}_{sonda} - \mathbf{H}_o \mathbf{L}_{alvo}, \quad (3.3)$$

em que,  $\mathbf{H}_{dif}$  é o vetor formado pela diferença dos valores diferenças entre entropias da sonda e do objeto ou alvo a ser alcançado. Os valores das entropias dos Laplacianos da sonda e do alvo são concatenados em vetores  $\mathbf{H}_o \mathbf{L}_{sonda}$  e  $\mathbf{H}_o \mathbf{L}_{alvo}$  correspondendo aos vetores de medida de nitidez propostos.

A análise de vários operadores de autofoco [14], torna necessária a comparação do operador de entropia do Laplaciano com outro operador que tenha por base o Laplaciano da imagem. Desta forma o algoritmo proposto para comparação com o operador desenvolvido, Entropia do Laplaciano, será o operador de variância do Laplaciano, diferença entre os valores da região da sonda e do alvo. A operação de diferença da Variância do Laplaciano é dada por:

$$\sigma_{dif} = \sigma_o \mathbf{L}_{sonda} - \sigma_o \mathbf{L}_{alvo}, \quad (3.4)$$

onde,  $\sigma_{dif}$  é o vetor de diferença entre os valores concatenados da variância do Laplaciano da sonda ( $\sigma_o L_{sonda}$ ) e da Variância do Laplaciano do alvo ( $\sigma_o L_{alvo}$ ).

Por meio do processamento dos frames na varredura, os valores de variância  $\sigma_{dif}$ , diferença entre variâncias do Laplaciano da sonda e do alvo e entropia  $H_{dif}$ , que é a diferença entre entropia dos Laplacianos da sonda e do alvo, e são concatenados de forma que o algoritmo irá buscar pelo índice do elemento no vetor, cujo módulo é o mínimo. Essa estratégia foi adotada devido a função que modela o deslocamento entre planos, com base na nitidez ser caracterizada como uma função Par, e que pode ser modelada por:

$$Index_{H_{dif}^*} = \min |H_{dif}|, \quad (3.5)$$

em que  $Index_{H_{dif}^*}$  é o índice ótimo ou desejado pelo algoritmo correspondente ao valor de diferenças dos operadores de nitidez baseados em entropia cujo módulo seja mínimo.

O algoritmo proposto realiza como comparação, a mesma operação com o operador de variância do Laplaciano, sendo a busca pelo índice de valor mínimo dado por:

$$Index_{\sigma_{dif}^*} = \min |\sigma_{dif}|, \quad (3.6)$$

onde  $Index_{H_{dif}^*}$  é o índice ótimo ou desejado pelo algoritmo correspondente ao valor de diferenças dos operadores de nitidez baseados em variância da resposta ao filtro Laplaciano na imagem.

O valor de ângulo de orientação magnética  $\theta$  é sincronizado ao frame, com um frame para cada valor de orientação magnética. Desta forma, ocorre a concatenação do vetor de orientação magnética  $\theta$ , para posterior aquisição do índice numericamente igual nos vetores de diferenças entre operadores de autofoco, sonda e objeto. Para o operador de Entropia do Laplaciano o ângulo-alvo pode ser observado por:

$$Index_{\theta_{alvo}} \equiv Index_{H_{dif}^*}, \quad (3.7)$$

em que  $Index_{\theta_{alvo}}$  é o índice no vetor de orientação magnética  $\theta$ , com  $i$  valor de ângulo para o qual a sonda deverá ser reposicionada. Para comparação, a busca com base no operador de variância do Laplaciano pode ser observada por:

$$Index_{\theta_{alvo}} \equiv Index_{\sigma_{dif}^*}. \quad (3.8)$$

O valor de orientação magnética  $\theta_{alvo}$  é então tomado como ponto de ajuste do sistema de controle proporcional, em malha fechada proposto para correção de orientação. O erro entre o ponto de ajuste de orientação magnética  $\theta_{alvo}$  e o valor de orientação magnética adquirido em tempo real  $\theta(i)$  no processo de reposicionamento pode ser observado na Equação 3.9:

$$\theta_{alvo} - \theta(i) = e(t), \quad (3.9)$$

em que,  $e(t)$  é o erro e tempo real no processo de reposicionamento. O valor  $u(t)$  inserido no controlador pode ser obtido por:

$$u(t) = K_p e(t) + u_o. \quad (3.10)$$

O fluxograma do método não supervisionado de reposicionamento pode ser observado na Figura 18, sendo indicadas suas etapas como: a) Aquisição de imagens e valores de orientação magnética; b) segmentação de cores das áreas ao redor da sonda e do alvo; c) Corte da imagem com base nos baricentros da segmentação pela cor e posterior transformação em escala de cinza; d) Transposição de matrizes relacionadas a imagens segmentadas convoluídas com núcleos Laplacianos; e) Geração de funções de probabilidade (Funções de Densidade de Probabilidade - PDFs); e) Cálculo de Estatística (Entropia e Variância), bem como extração de características de nitidez; g) Inserção de valores no algoritmo de busca para diferenças mínimas e posterior associação com o valor desejado de orientação magnética; i) Sinal de controle enviado ao Motor Driver para a potência dos motores de rotação da plataforma; j) Rotação para reposicionamento.

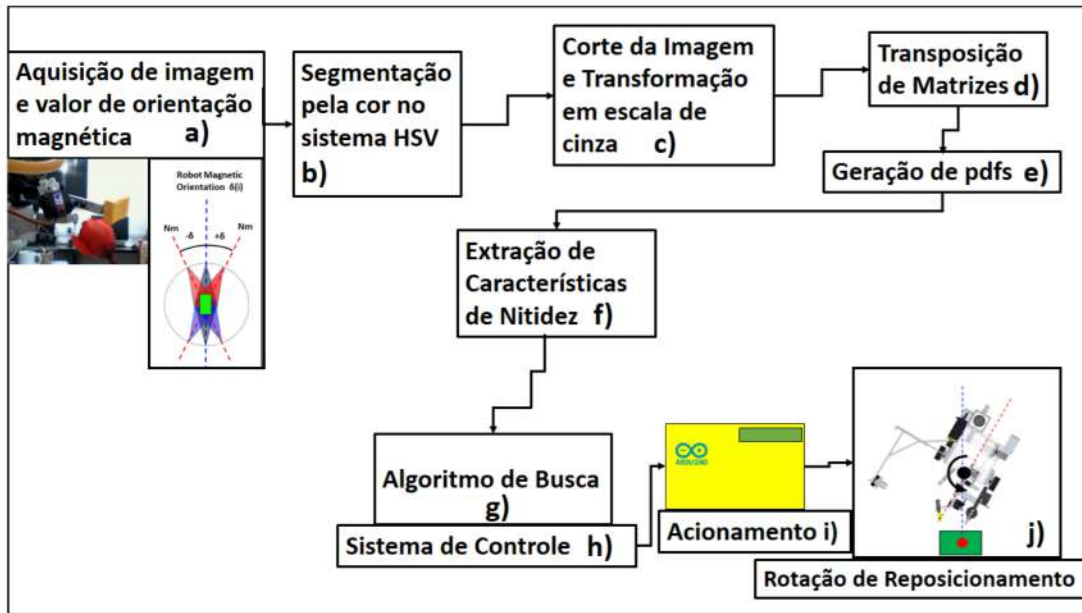


Figura 18. Fluxograma do algoritmo de reposicionamento. Fonte: Autor.

Os processos realizados pelo algoritmo de posicionamento são descritas na Figura 19. Especificamente na geração das funções densidade de probabilidade e posterior cálculo de característica de nitidez, tem-se  $\sigma_o L_{sonda}$ ,  $\sigma_o L_{alvo}$ ,  $H_o L_{sonda}$ ,  $H_o L_{alvo}$  sendo as variâncias do operador Laplaciano da região da sonda, variância do operador Laplaciano da região do alvo, Entropia de Shannon do operador Laplaciano da região da sonda e Entropia de Shannon do operador Laplaciano da região do alvo, respectivamente. São calculados operadores de nitidez para os vetores das regiões de interesse e posteriormente submetidos a operação de subtração. Desta forma, a mínima diferença entre os planos é encontrada no algoritmo de busca que associa o índice do elemento do vetor de valores de orientação magnética que está relacionado à mínima diferença de nitidez entre os planos,  $\min(V_{nitidez\ relativa})_{indice}$  e o respectivo elemento do vetor de orientação magnética, valor este que passa a ser o ângulo-alvo de orientação magnética  $(\theta_{sonda})_{indice} = \theta_{alvo}$ .



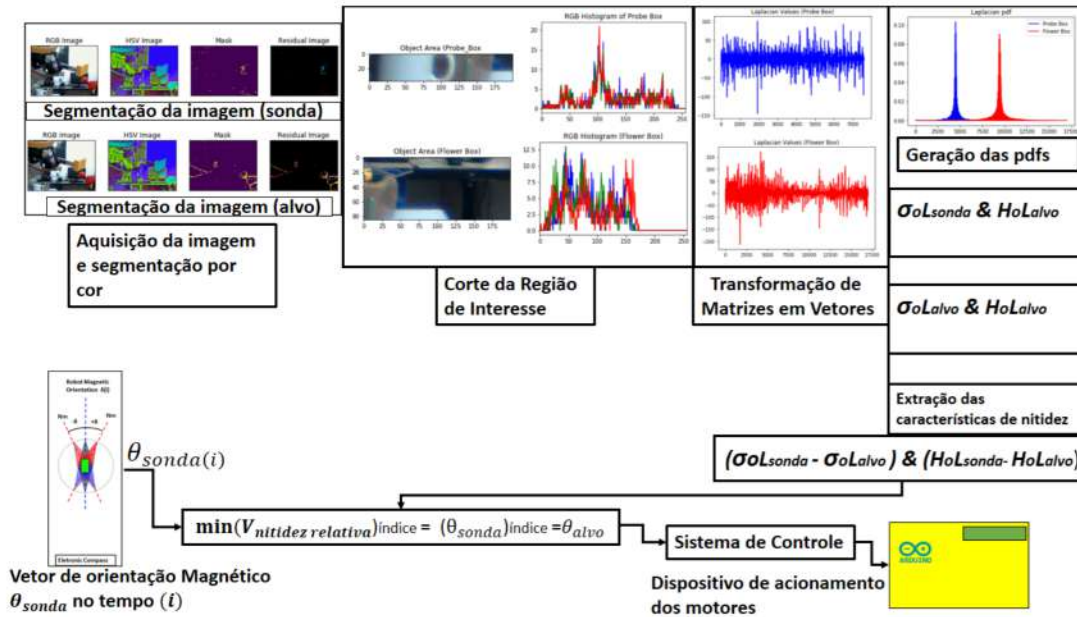


Figura 19. Fluxograma do algoritmo de posicionamento do robô.

O método não supervisionado de reposicionamento proposto realiza a varredura em um ângulo fixo, com base no tempo de acionamento dos motores, mas que devido às imperfeições do solo, sistemas mecânicos e variações mínima nos modelos elétricos dos motores DC, torna os ângulos de varredura  $(+\delta \text{ até } -\delta)$ , em relação ao Norte magnético valores aleatórios. Os quadros ou imagens adquiridas no processo de varredura são adquiridos paralelamente, o que gera uma imagem lateral do sistema de sondagem associada para cada valor de orientação magnético, Figura 18a. Após a aquisição dos quadros ou imagens durante a varredura, ocorre o processo de segmentação por cor, Figura 18b, com a imagem adquirida no sistema de cor *RGB* (*Red, Green, Blue*) transformada para o sistema *HSV* (*Hue, Saturation, Value*) pelas da Equações 2.9, 2.10 e 2.11.

As imagens no sistema *HSV* sofrem um processo de segmentação pela cor configurada para cor encontrada na extremidade da sonda e encontrada no alvo a ser reposicionado. A partir dos pontos selecionados pela cor, são selecionados os baricentros da sonda e do alvo, sendo tomados como pontos centrais para o corte das regiões de interesse ou *ROI* (*Region of Interest*). Após o corte dessas regiões, as imagens resultantes são transformadas em escala de cinza (Figura 18c), transpostas (Figura 18d) em vetores para o cálculo das suas FDPs, Figura 18e, com o cálculo das Entropias e variâncias do operador Laplaciano aplicado à essas regiões, caracterizado como extração de características de nitidez, Figura 18f. O processo de cálculo ou estimativa dos valores de nitidez das regiões

de interesse é então inserido em um algoritmo de busca, Figura 18g, para a busca do valor de orientação magnético (Equações 3.7 e 3.8), relativo à mínima diferença entre valores de nitidez Equações (3.3 e 3.4), com o alinhamento entre planos.

A partir do valor de orientação magnética considerado ótimo, indicado pelo maior alinhamento entre planos, é realizada a aquisição do valor de ângulo em que se encontra a plataforma e comparada ao valor de ângulo ótimo (Equação 3.7). O erro entre esses valores (Equação 3.9) gera um valor proporcional de porcentagem de ciclo ativo que é transferida aos motores pelo sistema de controle, Figura 18h, por meio do sistema de acionamento elétrico, Figura 18i, ocasionando uma rotação para o reposicionamento da plataforma, Figura 18j.

O processo de reorientação magnética pode ser observado na Figura 20, realizado em malha fechada com base no erro  $e(t)$  e no ganho proporcional  $K_p$ , gerando uma resposta de controle  $u(t)$  transformada em um valor serial e enviada para um microcontrolador ATMEGA 2560, onde o sinal serial é codificado em 1 byte (valores 0-255), sendo convertido em pulsos com polaridade e porcentagem do ciclo de serviço (% DC) ajustável. Valores entre 0-127 são responsáveis por ativar o motor DC no sentido horário e valores entre 127-255 serão responsáveis pela ativação do controle de velocidade de motores no sentido anti-horário e porcentagem (%) da velocidade dos motores DC.

Devido à redução mecânica, a ação de controle tem sua amplitude dividida por um fator  $K_{mec}$ , necessário para o reposicionamento angular com um valor de erro admitido menor  $e(t)_{min} \leq 1^\circ$  para a operação de reposicionamento. O sensor de reorientação magnética envia dados via interface I2C por meio de um microcontrolador ATMEGA 328 para o servidor em que o algoritmo de processamento de imagem está sendo executado e, em seguida, o sinal de controle é enviado aos motores.

O diagrama do sistema de controle pode ser observado na Figura 20. A operação de reposicionamento do sistema de sondagem possui ainda um posicionamento vertical proposto que também utiliza a câmera lateral, totalizando somente uma câmera e um sensor de orientação magnética para posicionamento espacial em 2 Graus de Liberdade.

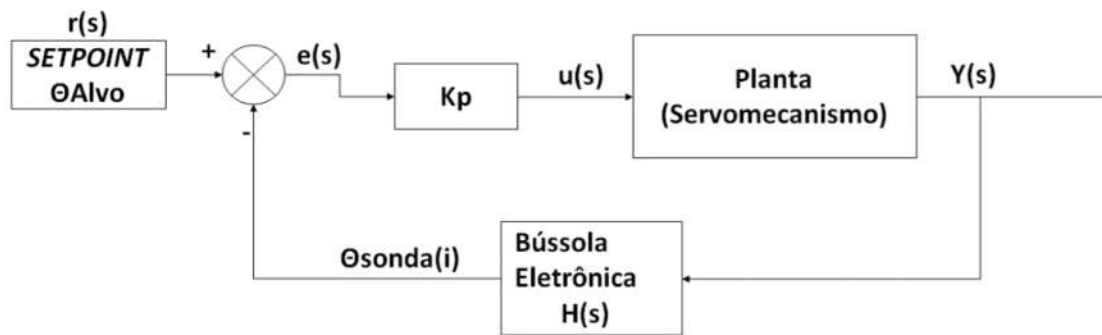


Figura 20. Diagrama do sistema de controle proporcional utilizado para operação de reposicionamento da sonda. Fonte: Autor.

A extração da característica ocorre pelo método de limiar de área formada entre os marcadores de frequência fixos no espectro visível. Os marcadores são implementados na forma de diodos emissores de luz (LEDs), descritos na Figura 21a. O diagrama do sistema mecânico com marcadores (LED1, LED2 e LED3) indicando o método de classificação está descrito na Figura 21, indicando: a) Localização dos marcadores; b) Área  $A_1$  entre marcadores que excedem o limiar  $\alpha$  (sonda distante do ponto desejado); c) Área  $A_2$  entre marcadores que não excedem o limiar  $\alpha$  (sonda estática no ponto desejado).

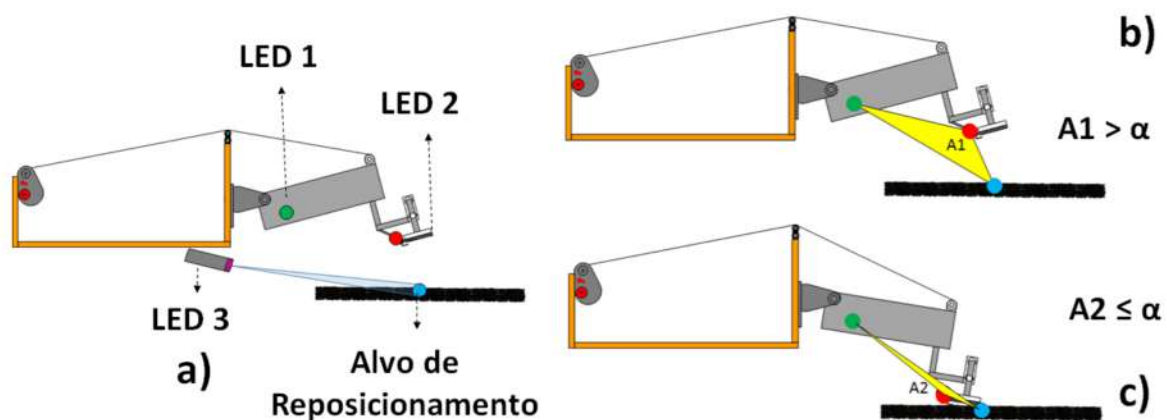


Figura 21. Diagrama dos Marcadores. Fonte: Autor.

As diferentes áreas entre os marcadores podem ser observadas com a sonda perto e longe do ponto de reposicionamento desejado (Figura 21b e c), com o cálculo da área fornecido por

$$A = \frac{1}{2} \|\det(\mathbf{M})\|, \quad (3.11)$$

em que,  $A$  é a área formada entre os marcadores e a matriz  $\mathbf{M}$  formada pela média das coordenadas (baricentros) dos pixels de intensidade máxima. A matriz  $\mathbf{M}$  é dada por:

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} \bar{x}_{red} & \bar{y}_{red} & 1 \\ \bar{x}_{green} & \bar{y}_{green} & 1 \\ \bar{x}_{blue} & \bar{y}_{blue} & 1 \end{pmatrix}, \quad (3.12)$$

onde,  $x$  e  $y$  são as coordenadas (médias) de pixel do valor máximo nos respectivos planos vermelhos, verde e azul. O critério de classificação próximo ao ponto desejado pode ser obtido por:

$$C = \begin{cases} \text{Classe 1,} & A > \alpha \\ \text{Classe 0,} & A \leq \alpha \end{cases} \quad (3.13)$$

onde,  $\alpha$  é o limiar de decisão. Quando a área entre os marcadores exceder o limite  $\alpha$ , a sonda deve ser reposicionada no ponto desejado. Caso contrário, um comando será gerado para concluir o processo de reposicionamento.

O posicionamento vertical possui como característica a extração da área entre marcadores coloridos com o objetivo de ser invariante a translação e oscilação dos mesmos no processo de subida e descida da sonda. Análises na frequência sobre da posição dos marcadores assim como sua correlação na frequência é proposta como refino do método medindo a qualidade de aquisição da imagem.

Neste Capítulo foram apresentados os materiais e métodos aplicados no desenvolvimento no trabalho, a seguir são abordados os resultados obtidos.



## 5. Resultados

O método bioinspirado proposto possui um número reduzido de variáveis de calibração para a operação de posicionamento em relação a um objeto ou alvo, pois utiliza apenas dois sensores. Este método necessita somente da configuração prévia das cores do objeto e do alvo desejado para onde ocorra o processo de reposicionamento.

As modelagens anteriores são também aplicadas ao processamento do objeto ou alvo desejado dentro da imagem. O problema em estudo pode ser melhor observado na Figura 21, com a identificação da: a) Câmera USB para aquisição das imagens do ambiente para extração do pólen; b) Sistema para varredura de pólen; c) ângulo de abertura da Câmera, diretamente relacionada à área da imagem adquirida; d) ponto desejado de extração do pólen na flor. Pode ser observado na Figura 22 o modelo do sistema de sondagem e o ponto desejado de extração do pólen, uma de suas aplicações devido à complexidade do processo, objetivo do sistema de sondagem.

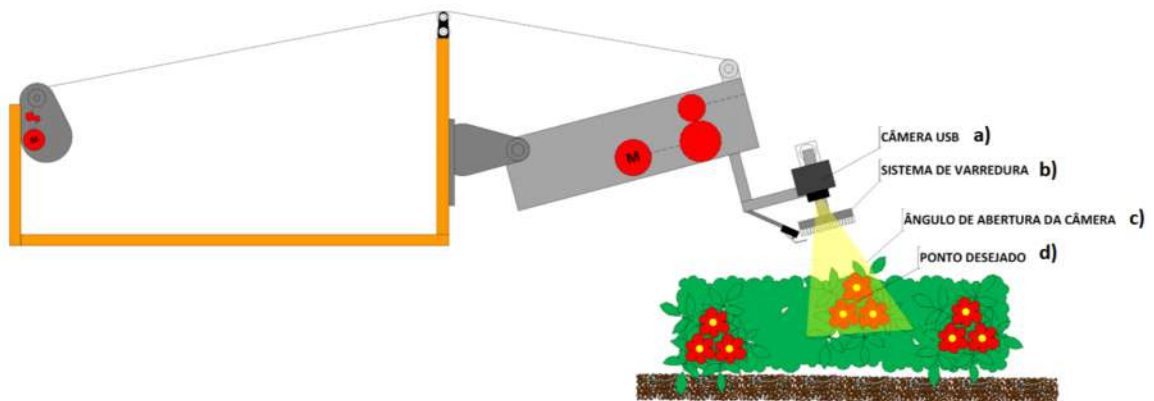


Figura 22. Modelo proposto do sistema mecânico desenvolvido para extração de pólen. Fonte: Autor.

O ponto desejado é formado por objetos naturais, pétalas de flores, em meio a objetos também naturais, folhas, galhos e solo. O pólen e qualquer ponto no centro desses objetos possuem variações de cor, forma e textura, além de movimentação relacionada às correntes de ar, desta forma, um sistema de posicionamento deve ser robusto à essas variações. O ambiente de operação do sistema de sondagem pode ser observado na Figura 23. O ambiente de operação da Figura 23 contempla o ponto-alvo

que são as flores e seu centro com o pólen, assim como os objetos que fazem parte de um ambiente agrícola. O algoritmo de localização e reposicionamento deve levar o sistema de varredura até o ponto desejado para que seja extraído o pólen da flor, para ser



armazenado ou analisado.

Figura 23. Ambiente de operação de teste da sonda. Fonte: Autor.

A segmentação no sistema de cor, tanto da extremidade da sonda, como da flor, pode ser observada na Figura 24, com a indicação da imagem de entrada, imagem no formato RGB, a imagem transformada para o sistema de cor HSV, a máscara de segmentação formada pelos filtros de cor e a imagem residual final com os pontos nas duas cores para o cálculo do baricentro da área a ser formada pela cor.

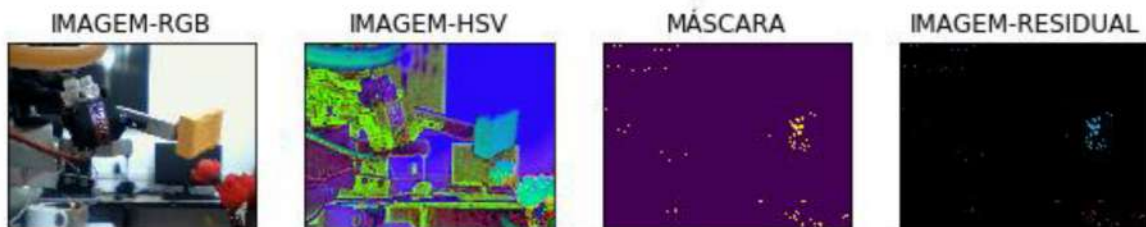


Figura 24. Segmentação da imagem no Sistema HSV. Fonte: Autor.

O processo de filtragem da imagem pelo Laplaciano pode ser observado na Figura 25, indicando: a) Segmentação da área do objeto 1 em escala de cinza, sua magnitude de espectro e o resultado do filtro Laplaciano da área relativa à extremidade da sonda; b) Segmentação da área do objeto 2 em escala de cinza, sua magnitude de espectro e o resultado do filtro Laplaciano da área relativa ao alvo.

A segmentação por cor tem como passo posterior a segmentação em escala de cinza e posterior cálculo do Laplaciano, Figura 25 a e b. Foi observado que devido às

imperfeições na segmentação por cor os operadores de medida de nitidez têm como tarefa, serem menos suscetíveis à quantidade de bordas da imagem e mais sensíveis aos gradientes das bordas das regiões segmentadas de interesse, tornando mais necessário o uso da entropia como medida de informação e sua relação com a nitidez.

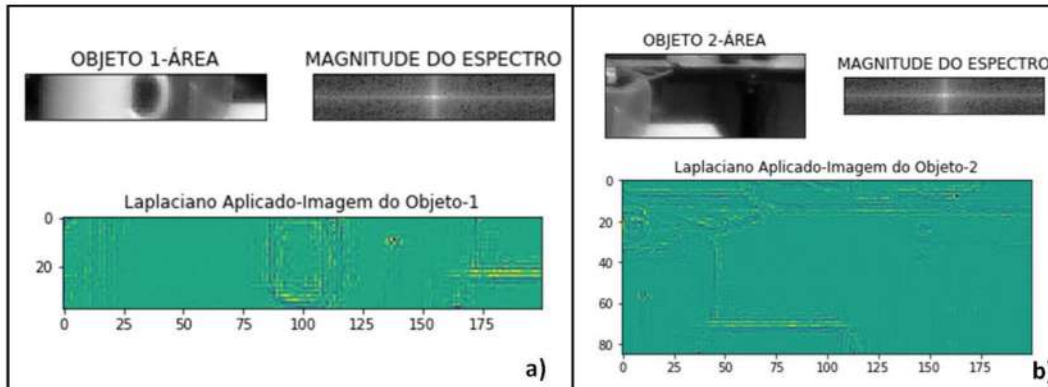


Figura 25. Segmentação de Região e Cálculo do Laplaciano. Fonte: Autor.

O sistemas de varredura, o alvo e o deslocamento entre planos pode ser observado na Figura 26, sendo indicadas as seguintes partes: a) Extremidade da Sonda que será reposicionada, com os dois objetos adquiridos em uma única imagem pela câmera lateral; b) Sistema de varredura responsável pela extração do pólen, e a diferença entre os planos; c) Ponto desejado (centro da flor em vermelho) para aproximação da extremidade do sistema de sondagem; d) Deslocamento entre os planos do ponto desejado (em vermelho) e a extremidade da sonda (desta forma, um posicionamento angular, tanto horizontal quanto vertical são necessários).

A diferença entre os planos, Figura 26c, gera uma diferença entre o valor de nitidez entre os dois objetos. A diferença entre os planos do objeto, Ponto Vermelho, e da extremidade da sonda, ponto amarelo, e que são relacionados pelo método de reposicionamento com os valores de nitidez, medidos pela entropia do Laplaciano, operador de medida de nitidez proposto, e inseridos no algoritmo de busca para posterior atitude de reposicionamento.



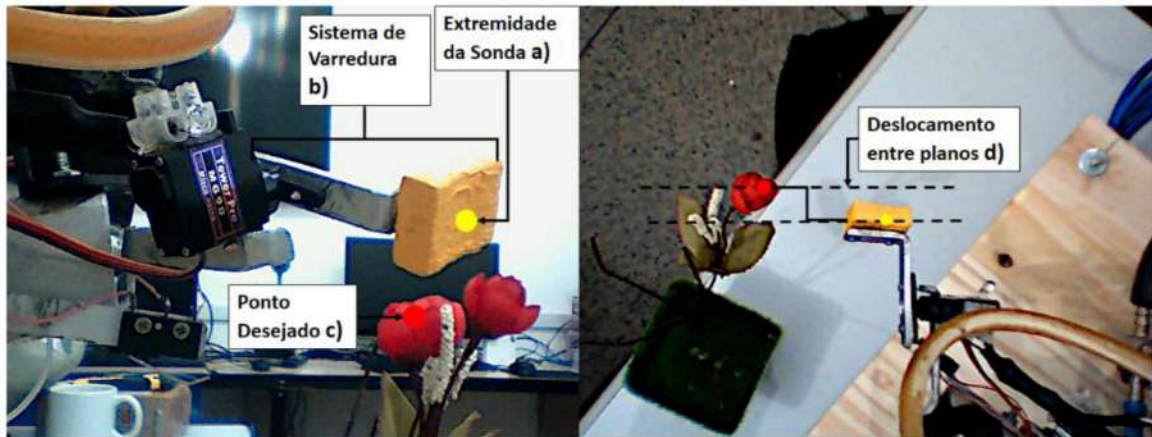


Figura 26. Diagrama do sistema de sondagem e do ponto desejado à ser alcançado de forma não supervisionada. Fonte Autor.

As características levantadas no Estado da Arte sobre o comportamento das abelhas foram levadas em conta no processo de escolha do método de reposicionamento, com o objetivo de conseguir ganhos mecânicos, proposta uma redução do número de 5 (cinco) para 2 (dois) Graus de Liberdade com o desenvolvimento do sistema de sondagem com base no aparelho lambedor da abelha, sistema já desenvolvido, mas intimamente ligado ao processo de posicionamento) e robustez no processamento da imagem com a proposta do uso de marcadores para, por meio da segmentação por cor, ser extraída uma característica de área entre marcadores com objetivo de filtrar imperfeições na aquisição da imagem, vibrações mecânicas e variações no processo de calibração quanto à distância ao objeto desejado.

O sistema de sondagem projetado e o aparelho lambedor do inseto em operação de extração de substância podem ser observados na Figura 27, sendo suas partes indicadas: a) Sistema Mecânico de sondagem embarcado; b) sistema de varredura para extração do pólen ou substâncias superficiais; c) Abelha e seu aparelho lambedor realizando extração de água e sedimentos sobre uma folha. Pode ser observado no servomecanismo do sistema de varredura (Figura 27b) embarcado na plataforma de testes

desenvolvido com base no aparelho lambedor da abelha, com o objetivo extração de pólen ou de substâncias superficiais.

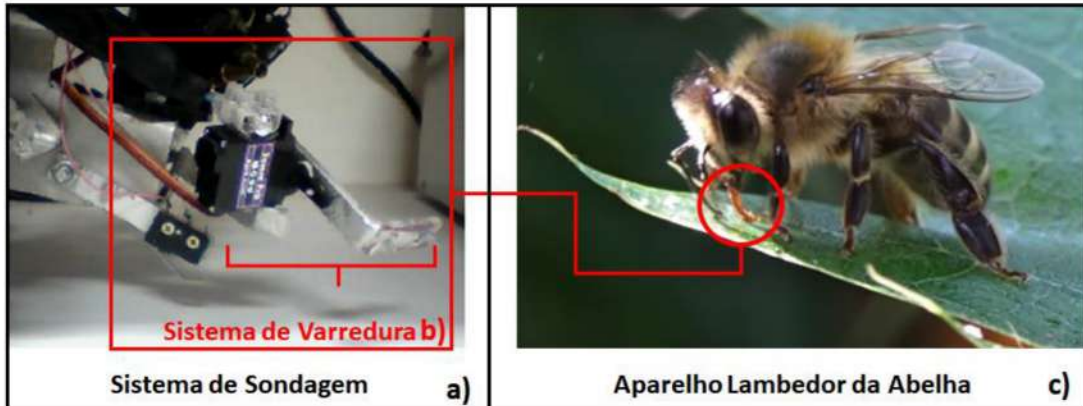


Figura 27. Sistema de sondagem e sua inspiração biológica: Fonte: Autor

A Figura 28 mostra o protótipo do robô sonda bioinspirado nos sistemas de lamber das abelhas, com indicação da sonda, câmera, objeto alvo e movimento do dispositivo de lamber. As partes estão descritas como: a) Distância do alvo à câmera menor que a distância focal; b) Distância do alvo à câmera maior que a distância focal; c) Ângulo de varredura ( $-\delta$ ); d) Ângulo de varredura ( $+\delta$ ); e) Sonda; f) Câmera lateral; g) Flor (Alvo); h) Estrutura Mecânica.

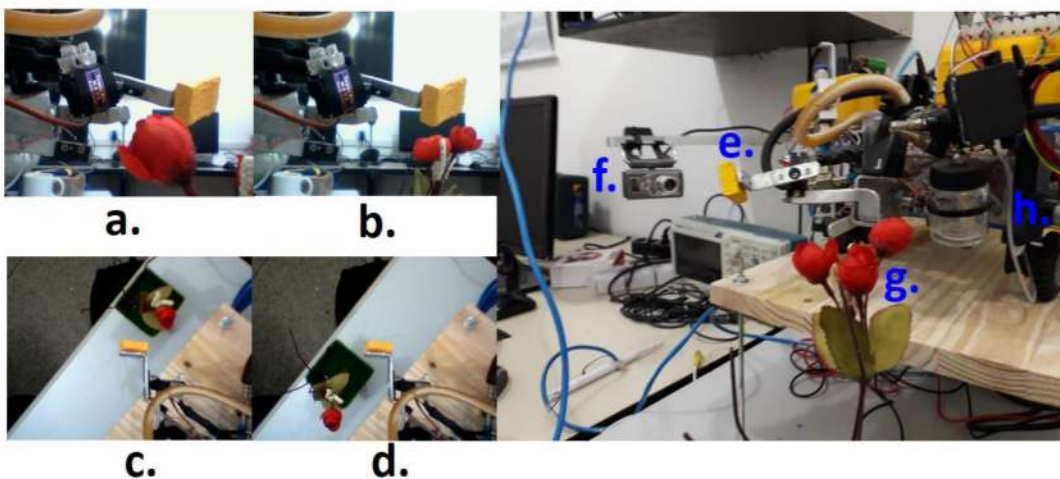


Figura 28. Protótipo do robô de sondagem bioinspirado nos sistemas de lamber das abelhas. Fonte: Autor.

Na Figura 29 pode ser visualizado o gráfico da diferença entre as variâncias dos operadores Laplacianos da sonda e do alvo. A variância do laplaciano é um dos métodos encontrados nas referências especializadas para quantificação da nitidez. Os valores de grandeza negativos

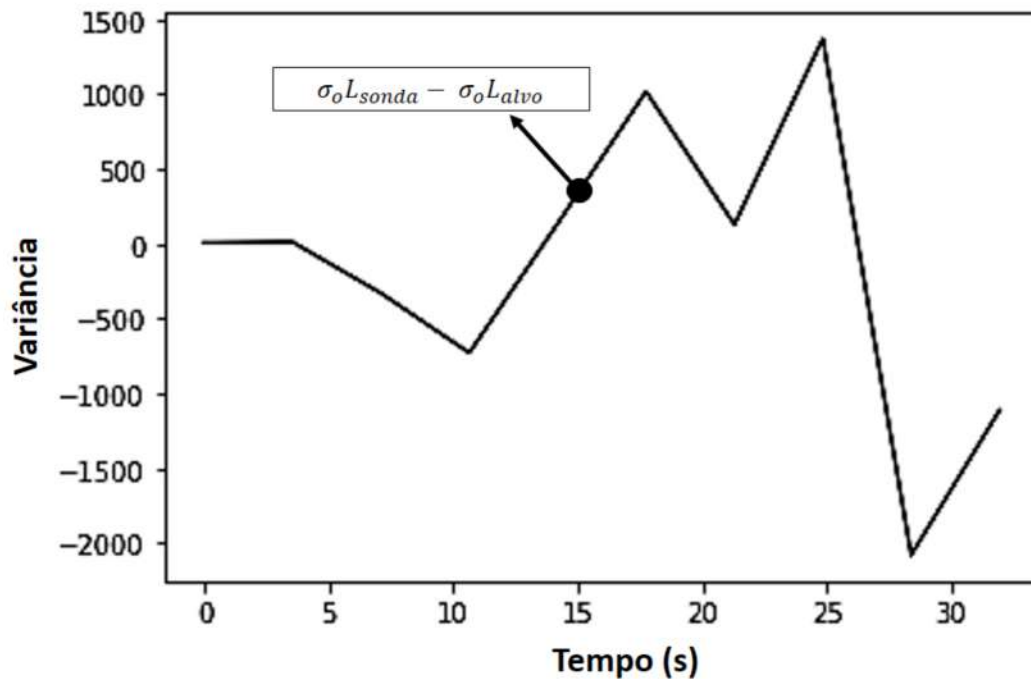


Figura 29. Diferença entre as variâncias dos Laplacianos das regiões da sonda e do alvo

O valor da entropia está em uma escala muito menor comparado à variância do Laplaciano, com variação máxima de dois bits (para o operador baseado em entropia), enquanto as variações relativas à ao operador de foco baseado na variância do Laplaciano são maiores que três mil unidades. Assim, pode-se concluir que a entropia para esta aplicação oferece resultados menos suscetíveis ao número de arestas da imagem e mais suscetíveis ao gradiente dessas arestas, tornando os resultados mais estáveis, visto que a entropia trabalha com a quantidade de informação média contida no sinal em comparação com a variância do Laplaciano, operador de foco automático usado nas referências bibliográficas especializadas.

O vetor de diferença entre as entropias dos Laplacianos nas regiões pode ser visto com mais detalhes na Figura 31. Os valores negativos podem ser explicados pelo uso da diferença entre valores de grandezas positivas extraídas entre os planos, gerando pontos negativos, que representam a menor diferença entre os planos.

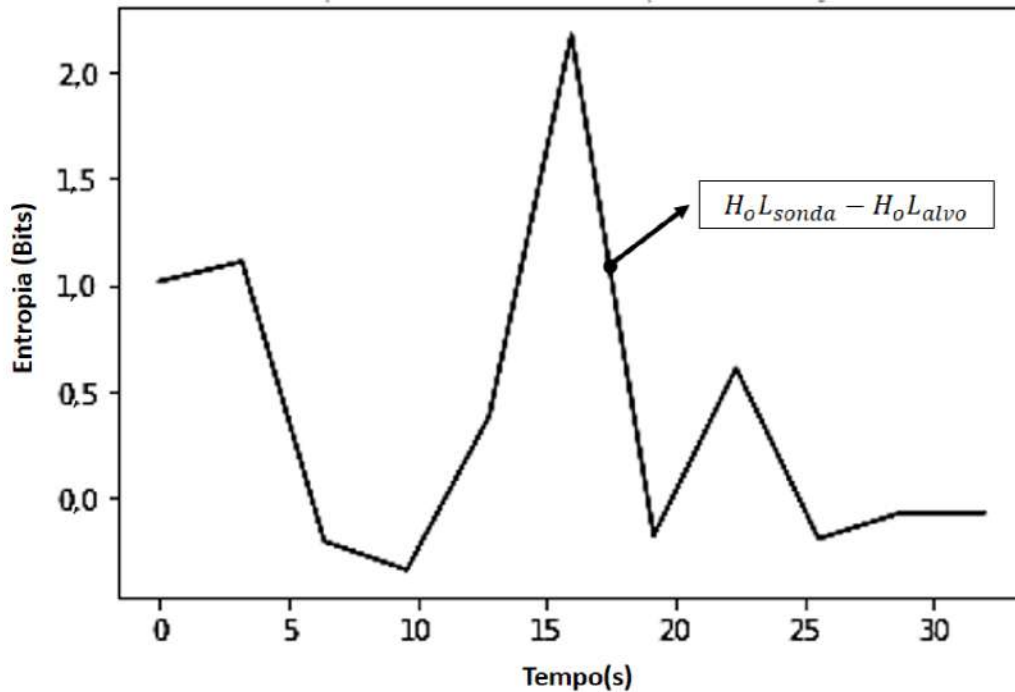


Figura 30. Vetor de diferença entre entropias das regiões segmentadas.

O erro do Sistema de Controle na operação de reposicionamento, calculado pelo algoritmo baseado em entropia, pode ser observado como um ponto de ajuste na Figura 31. O erro mínimo em graus usado como limite para parar o sistema de reposicionamento foi  $\pm 1^\circ$  ( $-1^\circ \leq e(t) \leq 1^\circ$ ). O erro mínimo, calculado entre o ângulo medido pela bússola eletrônica e o ponto de referência (ângulo-alvo calculado pelo algoritmo de reposicionamento), causa a parada do sistema de reposicionamento. A diferença angular relativa entre o alvo e a sonda é caracterizada como a menor diferença entre valores de nitidez, e o limite da borda do alvo é calculado usando o operador de autofocus.

O sistema de foco automático busca uma situação ideal, com o menor erro absoluto em graus. Após a primeira varredura dos objetos, o sistema busca o ponto de menor erro para o efeito de auto ajuste, valor próximo a 1 grau. Para o operador de foco automático, uma nova leitura de imagens é desnecessária, pois o sistema de foco automático só usará reorientação magnética usando o menor erro no processo de rotação automática.

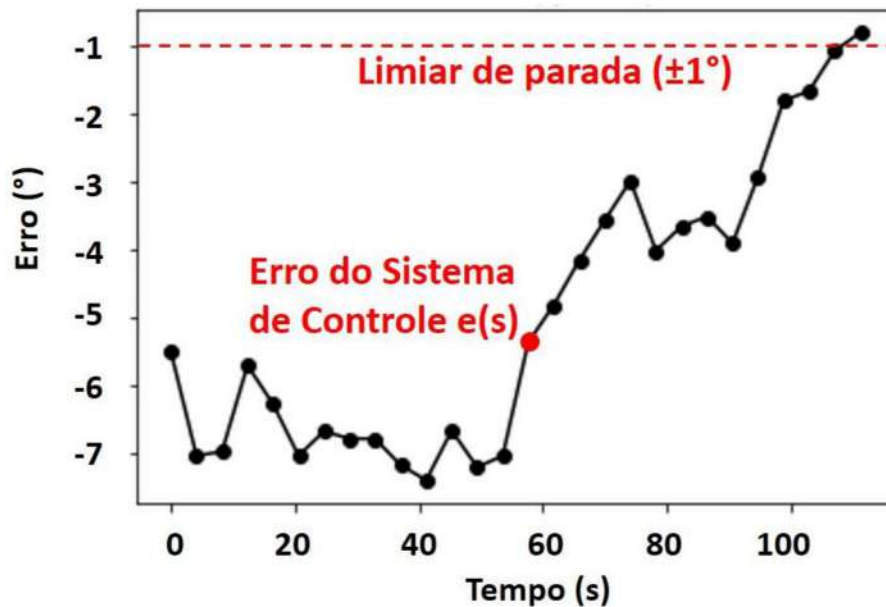


Figura 31 Erro do sistema de controle na operação de reposicionamento.

A Transformada Rápida de Fourier ou *Fast Fourier Transform* (FFT) e a transformada de Fourier de tempo curto ou *Short Time Fourier Transform* (STFT) foram aplicados ao vetor composto pelos valores da Área, espectrogramas de operação estática e dinâmica da sonda, juntamente com os sinais da área plotados nos vetores Original e Filtrado, utilizando um filtro de média móvel com janela de tamanho de dez unidades. Os vetores da área na posição mínima (classe 0), e na posição de levantamento (classe 1), original e filtrado podem ser vistos na Figura 32 e seus respectivos espectrogramas na Figura 33.

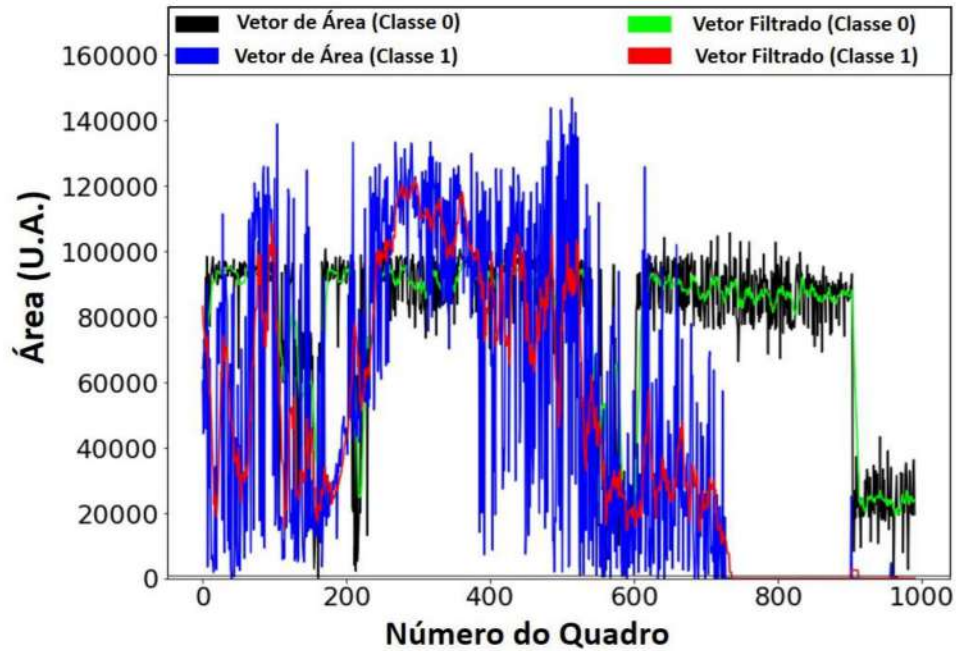


Figura 32. Valores de área calculados entre os marcadores como uma função do número do *frame*.

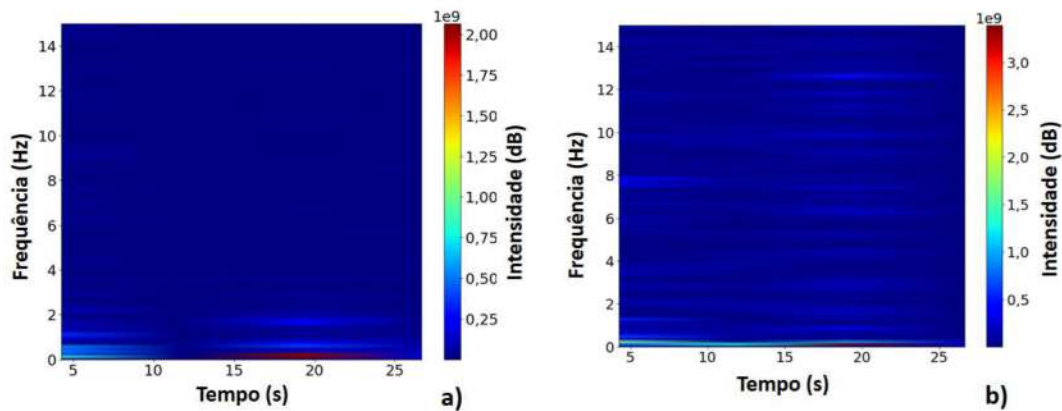


Figura 33. Espectrogramas dos vetores de área entre os marcadores: a) Sonda em operação estática; b) Sonda em operação dinâmica.

Os valores normalizados do espectro de luz são submetidos ao cálculo de correlação de Pearson entre o espectro do vetor de área e o espectro da oscilação vertical e horizontal de cada marcador, para identificar a fonte da oscilação na aquisição.

O Método de Classificação de Limiar de Área (ATCM) foi utilizado para analisar o tempo e a frequência de oscilação dos pontos referentes à extremidade da sonda e ao ponto da rótula. Foi observado que a distância entre a rótula e a ponta da sonda teoricamente de acordo com a norma euclidiana permaneceria constante. Devido às vibrações do sistema mecânico e imperfeições na aquisição de imagens, a distância entre a rótula e a ponta da sonda, calculadas por meio da localização dos baricentros dos marcadores pode ser tratada como um vetor variante do tempo (Figura 33a e b).

A medida da distância em pixels entre os marcadores foi então utilizada como medida de verificação das variações no sistema de aquisição de imagens.

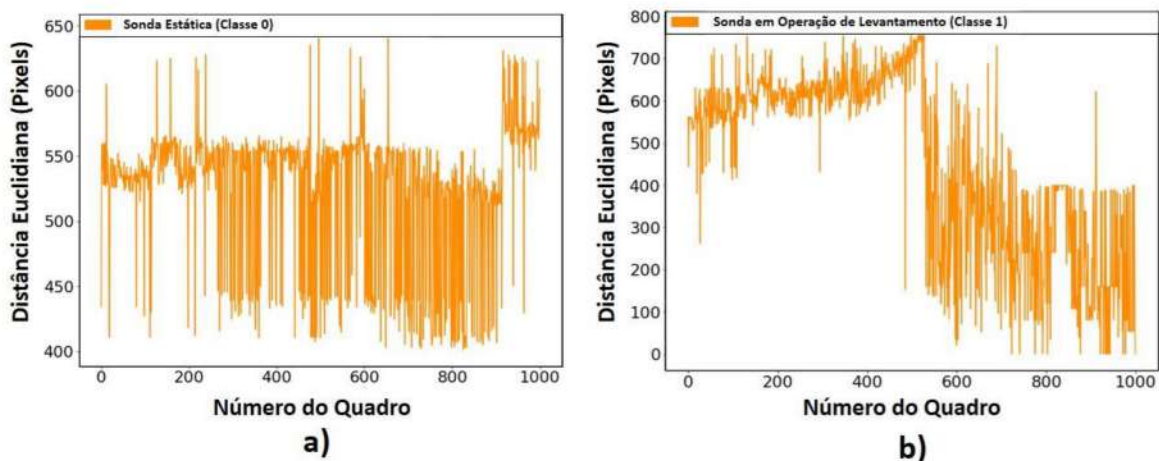


Figura 34. Distância Euclidiana entre os Marcadores Azul e Vermelho: a) Sonda em operação estática (classe 0); b) sonda em operação de içamento (classe 1).

Os sinais do marcador de extremidade da sonda correspondem ao seu movimento angular, com velocidade de retração do cabo constante. O maior valor de correlação entre os espectros de oscilação dos marcadores e o vetor de distância Euclidiana dos marcadores e sua correlação com a distância entre a rótula e a extremidade da sonda. A posição cartesiana dos marcadores tem forma não linear, devido ao modelo de posicionamento angular, imagens correspondentes à classe 1, que mostram a operação de levantamento da sonda.

A análise de frequência (FFT) das oscilações verticais e horizontais dos marcadores da extremidade da sonda (Azul) e da rótula (Vermelho) na operação de levantamento (classe 1) podem ser vistas nas Figuras 34 e 35. A operação de levantamento é a mais crítica em termos de falhas e vibrações nos sistemas, por isso podemos observar as frequências resultantes das vibrações mecânicas.

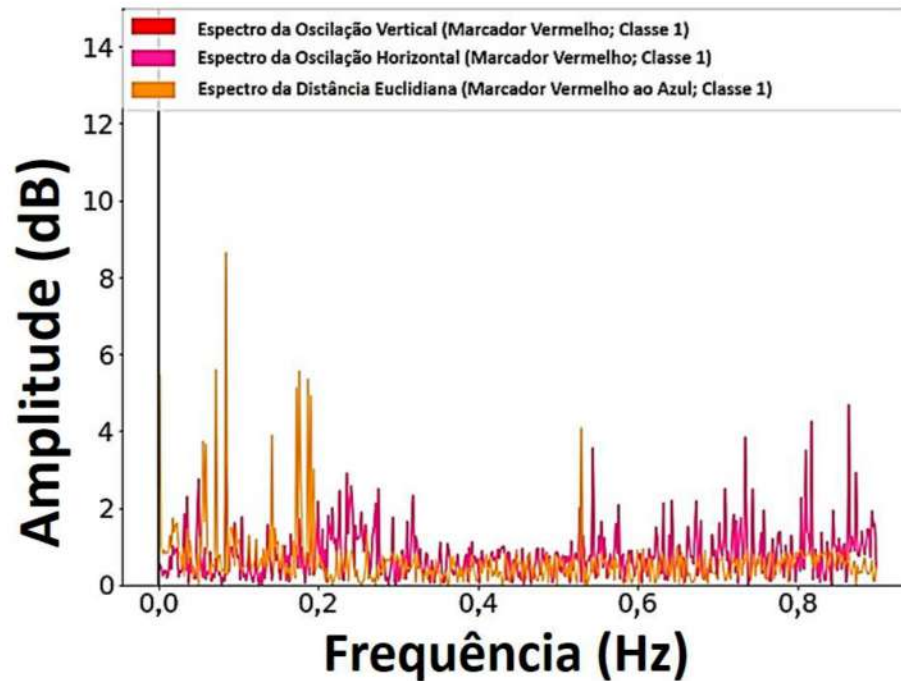


Figura 35. Espectro de frequência da oscilação Vertical e Horizontal do marcador vermelho, na operação de içamento (classe 1).



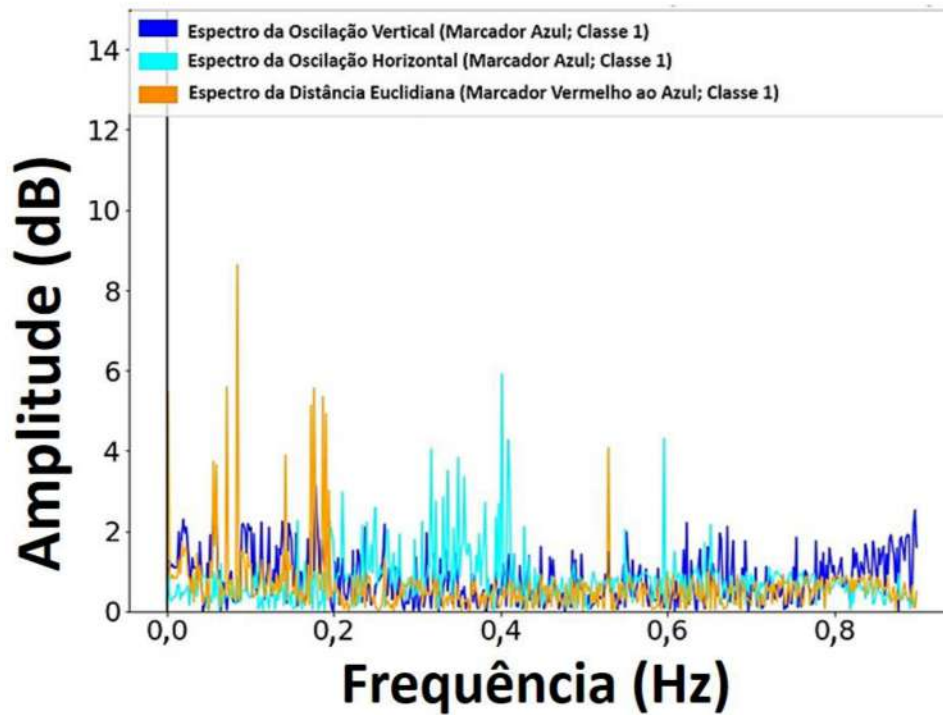


Figura 36. Espectro de frequências das oscilações verticais e horizontais do marcador Azul, na operação de içamento, classe 1.

A proposta de um classificador também requer um filtro que rastreie transições nítidas entre valores de área, com o objetivo de atenuação de ruído, considerando a variabilidade estatística dos sinais, neste caso, não são necessários valores de posição futuros, o que é ideal para reposicionamento não supervisionado. A atenuação do ruído foi realizada inserindo o filtro FIR de média móvel com dez amostras, apresentado na Figura 36. O ruído extraído dos sinais de área pode ser observado na Figura 36. Na Figura 36, a linha preta representa o ruído entre o vetor da área original e os vetores filtrados e os marcadores, classe 0. Enquanto, a linha azul representa o ruído entre o vetor da área original e o vetor filtrado com a sonda na classe 1, operação de levantamento.

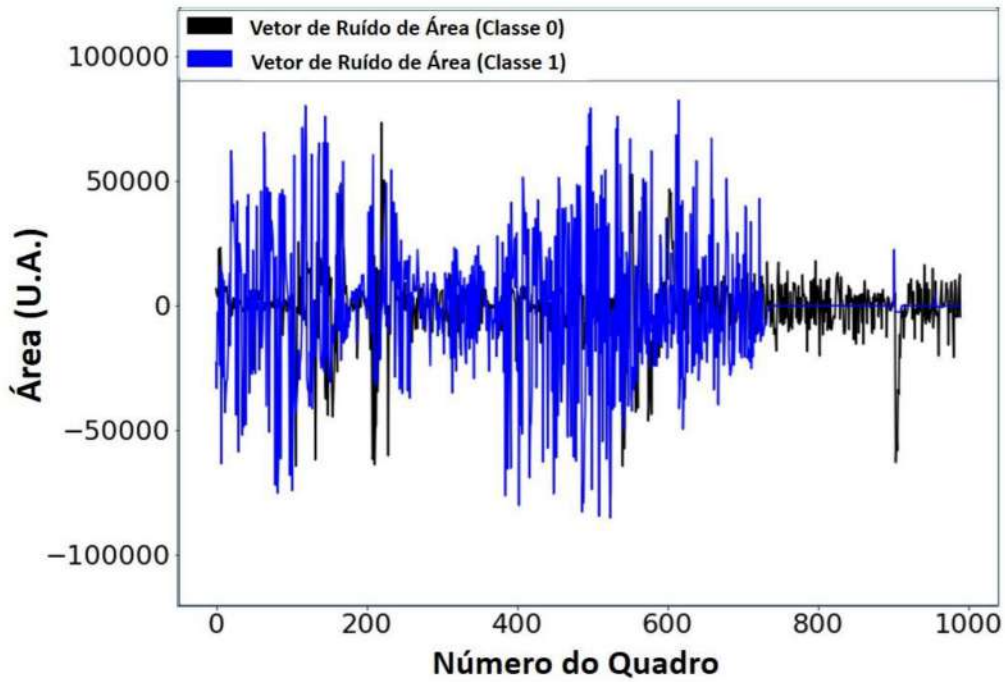


Figura 37. Vetor do Ruído de área.

Pode ser observado na Figura 38 o posicionamento dos marcadores ativos (LED's) nas posições de rótula (Red – Figura 38a), extremidade (Blue – Figura 38b) e alvo (Green-Figura 36e) do sistema de sondagem na imagem lateral da câmera (Figura 38c). A análise de Vibração e correlação na frequência foi realizada entre os marcadores da rótula, marcadores da extremidade e a distância Euclidiana rótula-extremidade (Figura 38d).

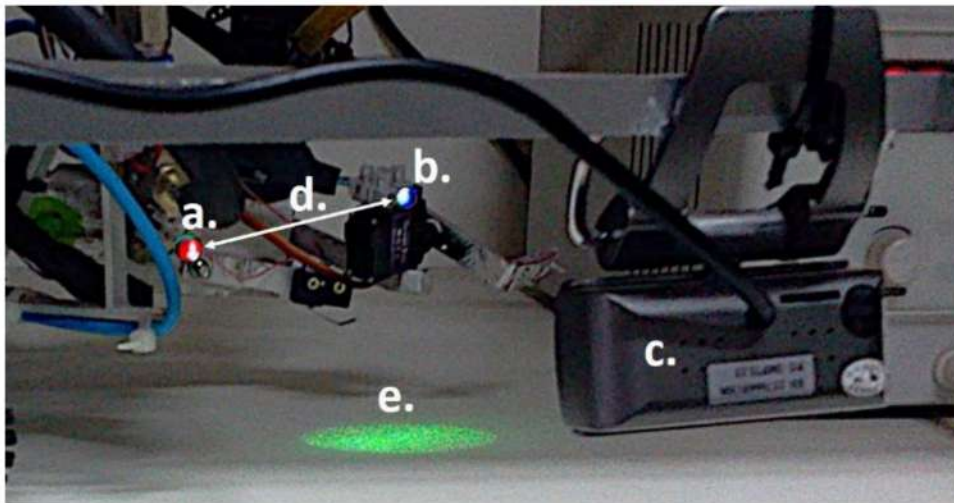


Figura 38. Marcadores utilizados na análise em frequência. Fonte: Autor.

Pode ser observado na Tabelas 1 os valores de correlação de Pearson entre a oscilação dos marcadores da rótula e da extremidade e a distância rótula-extremidade (Figura 38d), sendo esta teoricamente invariante na operação da sonda de acordo com o conceito de norma Euclidiana e considerando a disposição fixa dos marcadores, porém utilizada como medida de estabilidade devido à erros no processo de aquisição (esta distância se torna um vetor variante no tempo. Esta medição é realizada tanto na operação estática- Sonda parada na posição de mínima área entre os marcadores. Na Tabela 2 as medições são realizadas com a sonda em operação de levantamento em velocidade constante.

Tabela 1. Valores de Correlação de Pearson entre marcadores e a distância rótula-Extremidade com a sonda estática na posição mínima.

<b>Posição dos Marcadores</b>	<b>Orientação da Oscilação</b>	<b>Valor</b>
<b>Rótula (Marcador Vermelho)</b>	Horizontal	0.04089471
<b>Rótula (Marcador Vermelho)</b>	Vertical	0.04089471
<b>Extremidade (Marcador Azul)</b>	Horizontal	-0.12295771
<b>Extremidade (Marcador Azul)</b>	Vertical	-0.14011202

Tabela 2. Valores de Correlação de Pearson entre os marcadores e a distância Rótula-Extremidade, com a sonda em operação de levantamento.

<b>Posição do Marcador</b>	<b>Orientação da Oscilação</b>	<b>Valor</b>
<b>Rótula (Marcador Vermelho)</b>	Horizontal	0.05307159
<b>Rótula (Marcador Vermelho)</b>	Vertical	0.05307159
<b>Extremidade (Marcador Azul)</b>	Horizontal	-0.05106755
<b>Extremidade (Marcador Azul)</b>	Vertical	0.29337411

O sensor HMC5883L, magnetômetro de 3 eixos de efeito Hall, implementado na sonda próximo ao seu centro de rotação da plataforma, responsável pela aquisição dos sinais de orientação magnética foi utilizado para análise do ruído magnético. A aquisição do sinal em um determinado ângulo com o sensor fixo pode ser observada na Figura 39.

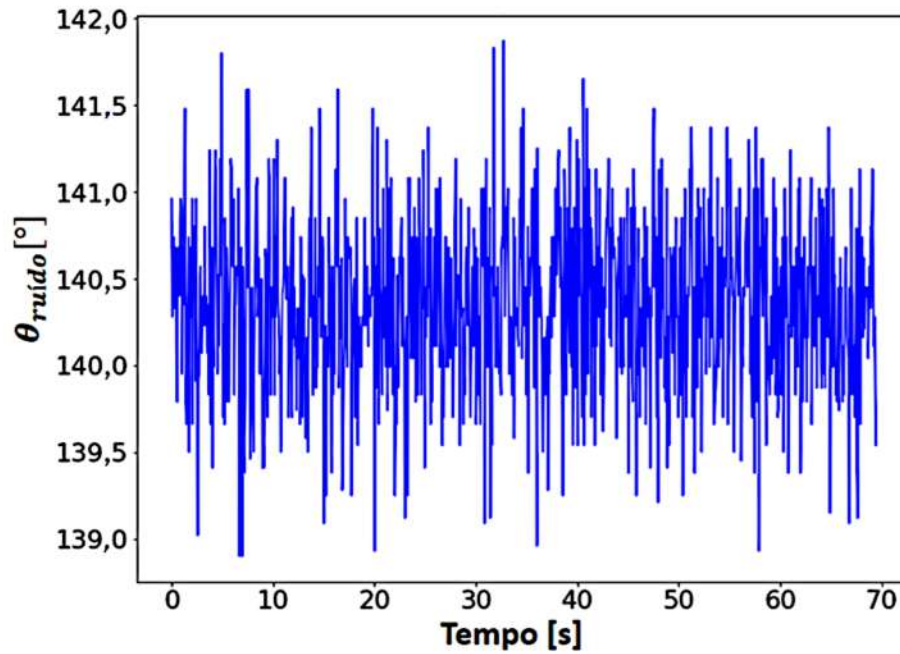


Figura 39. Sinal do sensor Magnético fixo em uma posição para medição do ruído.

A verificação da função densidade de probabilidade do ruído medido entre o sinal e seu polinômio de regressão podem ser observados na Figura 40.

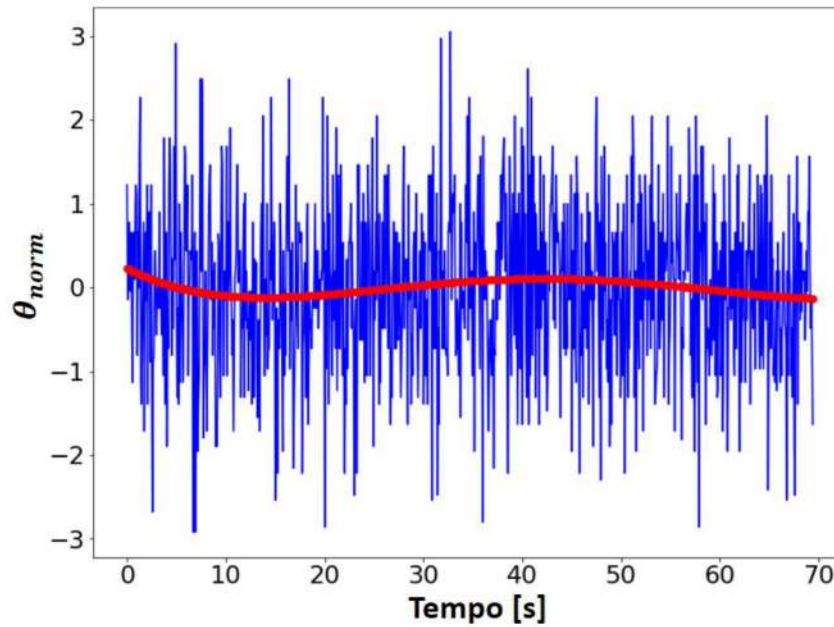


Figura 40. Sinal do Sensor magnético normalizado (em azul) e o polinômio de regressão (em vermelho) utilizado para extração do ruído.

Foi aplicado a STFT para extração do espectrograma posterior análise da variação das frequências durante o período de aquisição. O espectrograma foi extraído tanto do vetor de ângulo ruidoso, como do vetor formado a partir do polinômio de regressão, podendo ser observado na Figura 41, indicando: a) Espectro de frequências em função do tempo do sinal de orientação magnética ruidoso; b) Espectro de frequências em função do tempo do sinal formado pelo polinômio de regressão.

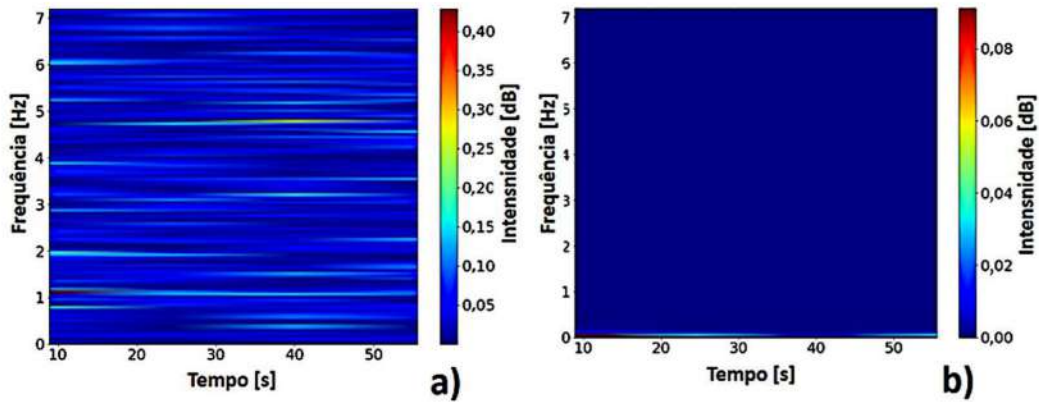


Figura 41. Espectrogramas do sinal do sensor magnético.

As Funções Densidade de Probabilidade do Sinal e do ruído para verificação estatística da natureza do ruído podem ser observadas na Figura 42.

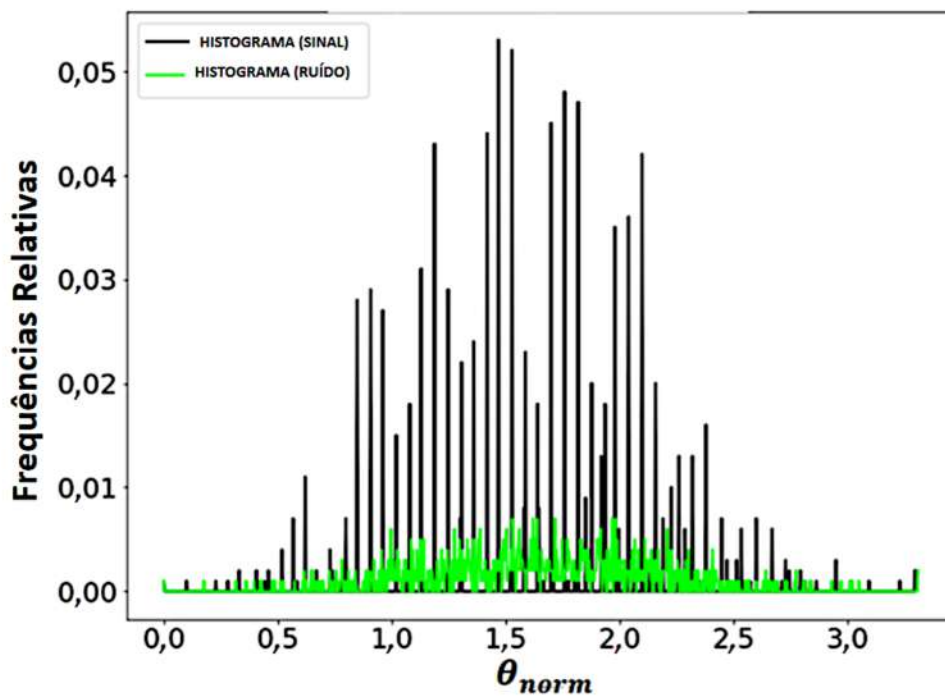


Figura 42. Funções de Probabilidade do sinal (Preto) e função de Probabilidade do Ruído (Verde).

A proposta de segmentação das regiões da sonda pelo matiz dos objetos desejados, em amarelo a extremidade da sonda e em vermelho o alvo, gerou a necessidade da análise da qualidade da segmentação. Após ser realizada a transformação do sistema

de cor *RGB* para o sistema HSV foram extraídos o plano *H* (*Hue*) da região da extremidade da sonda e do alvo, sendo estas matrizes a informação de cor das regiões. As Regiões segmentadas do alvo e da extremidade da sonda podem ser observadas na Figura 43.

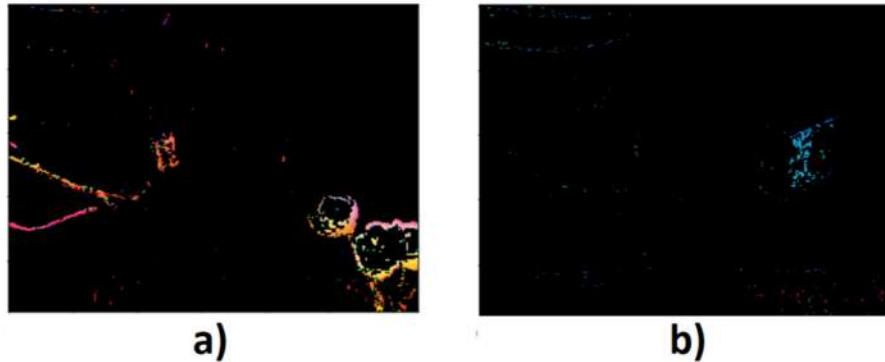


Figura 43. Máscaras de Segmentação das Regiões. a) Alvo (flor); b) Extremidade da sonda.

As matrizes foram transformadas em vetores unidimensionais e extraídos e normalizados seus histogramas, com o objetivo de formar o espectro de cor dessas regiões. As regiões, mostradas no plano *H* e seu espectro pode ser observada na Figura 44, sendo indicadas por: a) Plano Hue da região de Interesse (ROI-*Region of Interest*) da sonda; b) Plano Hue da região de interesse do alvo; c) Espectro de cor da Região de interesse da extremidade da sonda; d) Espectro de cor da região da extremidade do alvo.

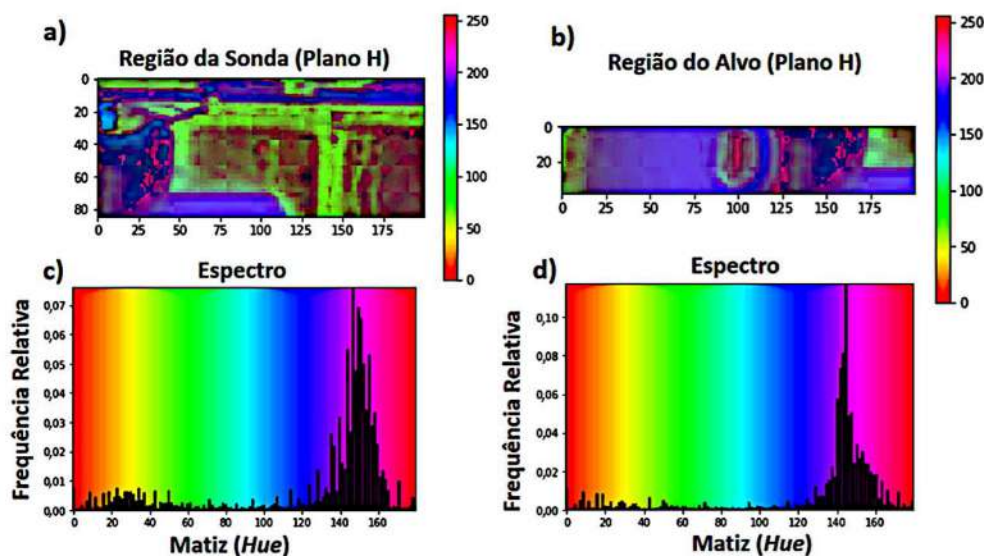


Figura 44. Comparativo das Matrizes H das regiões segmentadas e seus espectros.  
Fonte: Autor.

A segmentação das regiões de interesse possui relação direta com a qualidade do posicionamento, com características de nitidez extraídas com base na região segmentada. Para verificação da qualidade da segmentação, foi calculada a informação mútua entre os espectros das regiões para verificação da quantidade de informação comum aos dois espectros. O comparativo entre os espectros pode ser observado na Figura 45. A informação mútua foi medida com um valor de aproximadamente 0,094, podendo variar de acordo com o tamanho da área segmentada, podendo ser observada nas máscaras de segmentação na Figura 45.

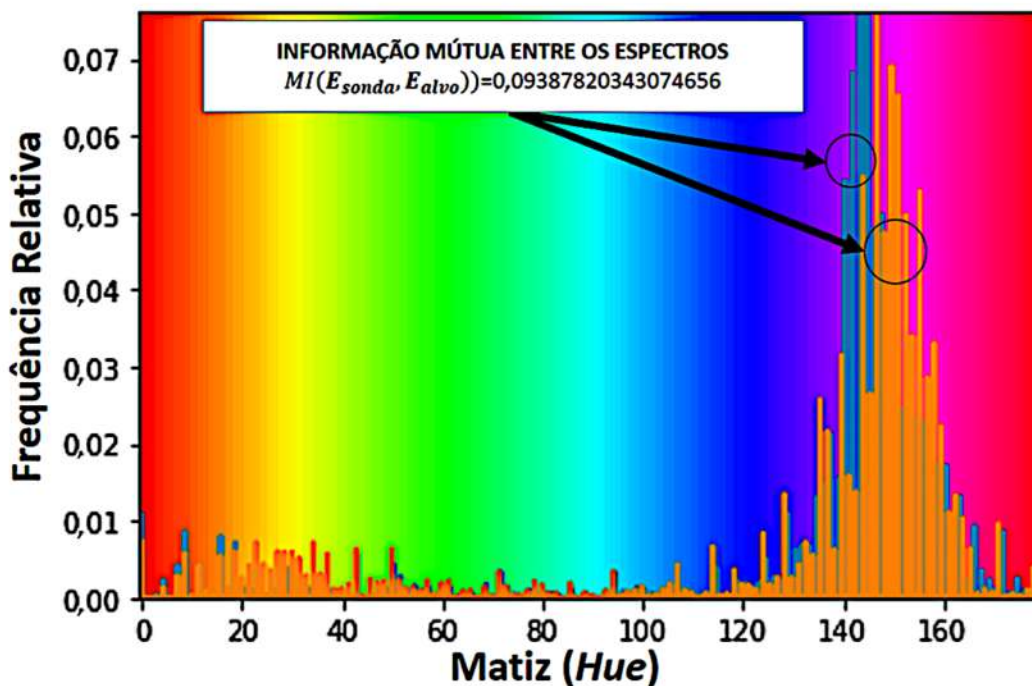


Figura 45. Comparativo entre os espectros da Região da Sonda (cor laranja) e da região do Alvo, ou flor (cor azul) com a respectiva informação mútua entre as duas regiões.

O desenvolvimento do método de reposicionamento trouxe como desafio a minimização da distância entre dois objetos pelo cálculo de nitidez entre os mesmos em uma única imagem, sem a medição ou calibração prévia de distâncias e dimensões entre os objetos. O processo de reposicionamento com base na memória de campo magnético trouxe o problema da declinação magnética, valor da variante temporal e geograficamente. O método proposto utiliza o processo de varredura (Figura 17) e busca do valor mínimo (Equação 3.7 e 3.8), tem como proposta a anulação do valor de



declinação magnética, configuração prévia necessária ao sensor proposto, necessário ao processo de posicionamento de precisão utilizando esta variável. O processamento da imagem ainda traz desafios na segmentação de cor no sistema HSV (*Hue-Saturation-Value*) como pode ser observado na Figura 26 para otimizar o processo de cálculo dos valores de nitidez. A princípio a plataforma robótica foi reposicionada com precisão de 1 grau nos testes iniciais a partir dos operadores desenvolvidos.

O sistema mecânico bioinspirado possui apenas dois graus de liberdade, reduzindo a complexidade em relação aos observados em periódicos especializados.

O operador de autofoco baseado na informação média da região segmentada propôs ser menos sensível diante dos resultados ao número de bordas nas regiões e mais sensível ao gradiente dessas bordas.

Desta forma, o algoritmo cumpriu os objetivos iniciais para os quais foi projetado, gerando também uma ferramenta para análise de vibrações e análise de qualidade em sistemas de posicionamento por imagem, método ATCM e sua análise em frequência.

O método desenvolvido opera na varredura e busca pela variação mínima entre a nitidez do objeto e o sistema de sondagem, o sistema utiliza o valor da declinação magnética, assim não é necessária iluminação para execução do sistema após a varredura. Pelos resultados pode-se avaliar que convergiu utilizando apenas a informação de cor, sem a necessidade de calibração prévia na execução do algoritmo (Figura 32). Pelas análises estatísticas realizadas nas regiões segmentadas, se pode indicar que a entropia do Laplaciano, demonstrou resultados estáveis em relação à variância do Laplaciano, método já consolidado nas referências bibliográficas especializadas.

Para a avaliação da oscilações da distância Euclidiana foi desenvolvido um algoritmo com a correlação de Pearson, indicando que houve maior variação no marcador da extremidade, com a sonda estática e em operação de elevação. Pode ser observado que a oscilação vertical do marcador azul obteve maior redução nas frequências acima de 0,8 Hz, em comparação o marcador da rótula. Pode-se concluir que os espectros são mais sensíveis à variação do marcador da extremidade.

Os espectros de oscilação apresentados foram normalizados para que pudesse ser realizado o cálculo de correlação. Devido às análises terem sido realizadas sobre espectros normalizados, a ferramenta mostrou-se robusta para análise de distúrbios provocados por vibrações em sistemas de aquisição de imagens. Pode ser observado análise em tempo-frequência a quantidade de frequências presentes no vetor de área, com a sonda em operação de içamento, em comparação a mesma análise em operação estática. Para áreas muito pequenas ( $< 10^5$  U. A. – Classe 0) a classificação pode ser melhor realizada considerando essas frequências presentes devido as vibrações causadas por imperfeições mecânicas e ruídos elétricos no sistema de aquisição.

A informação mútua como uma medida de dependência estocástica entre duas variáveis aleatórias, foi aplicado nos vetores dos espectros de cor das regiões segmentadas, como uma medida da quantidade de informação mútua entre as duas regiões. A informação mútua é simétrica, e importante ao processo não supervisionado, e foi utilizada como uma métrica de qualidade de segmentação, podendo ser relacionada à precisão, arco mínimo entre ângulo-alvo e o valor de ângulo geomagnético alcançado pelo robô no reposicionamento. A partir dos resultados obtidos pode-se considerar que, quanto maior a região segmentada e menor for a qualidade da segmentação por cor, dependendo da proximidade das cores predefinidas, como sonda e alvo, maior será a dependência entre os espectros de cor e menor a precisão no processo de reposicionamento devido à proximidade entre planos focais.

A partir dos resultados observados se pode avaliar que o uso do algoritmo biospirado na memória de campo magnético terrestre das abelhas, usando o método da entropia do Laplaciano promoveu a redução do número de sensores, extração de uma característica profunda da imagem, com a redução do número de variáveis e serem processadas e o a redução dos graus de liberdade do sistema aplicada a uma plataforma robótica para polinização.

## 6. Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo de posicionamento por nitidez, bioinspirado na memória de campo magnético das abelhas, utilizando a segmentação por cor no sistema HSV, com a entropia e variância do Laplaciano. O sistema de controle foi constituído de uma câmara lateral e uma magnetômetro de uso comercial como sensores, tendo como atuadores os motores elétricos de içamento e de rotação da plataforma totalizando cinematicamente um sistema com dois graus de liberdade. O uso do algoritmo desenvolvido na plataforma robótica possibilitou a redução do número de variáveis do sistema, com o uso de dois sensores, uma câmara e uma bússola eletrônica, e da cinemática do braço robótico de cinco para dois graus de liberdade. A partir do uso da ferramenta de análise de posição desenvolvida é possível avaliar a oscilação do sistema mecânico e variáveis geométricas de marcadores à distância. O sistema pode ser utilizado em pesquisa de alvo a longa distância, posicionamento de guindastes, agricultura de precisão, etc. A partir dos resultados iniciais encontrou-se um erro angular de alinhamento máximo de 1 grau.

### 5.1. Artigos Publicados

1. Santos, D. M. L.; Santana, E. E. C.; Silva Junior, P. F.; Queiroz, J. A.; Neto, J. V. F.; Barros, A. K.; Cruz, C. A. M.; Aquino, V. S.; Castro, L. S. O.; Freire, R. C. S.; Silva, P. H. F. Autofocus Entropy Repositioning Method Bioinspired in the Magnetic Field Memory of the Bees Applied to Pollination. *SENSORS*, v. 21, p. 6198, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/s21186198>.

### 5.2. Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros é proposto a aplicação do método de reposicionamento por entropia do Laplaciano bioinspirado na memória de campo magnético de abelhas:

- No posicionamento e navegação de veículos autônomos aplicados à agricultura de precisão e fazendas inteligentes;

- Navegação Astro-óptica e Astronomia, utilizando algoritmos de rastreamento de alvos de cor específica e verificação do seu movimento no tempo e na frequência.
- Na caracterização espectral de materiais e compostos biológicos e inorgânicos, no desenvolvimento do algoritmo de análise de espectro para verificação de eficiência de segmentação;



## Referências

- [1] S. M. Pedersen e E. Kim Martin Lind, *Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives*, Springer, 2017 .
- [2] Jawad HM, Nordin R, Gharghan SK, Jawad AM, Ismail M., “Energy-Efficient Wireless Sensor Networks for Precision Agriculture: A Review,” *Sensors*, vol. 17, nº 8, pp. 1-45, 2017.
- [3] R. L. a. B. A. Stewart, *Soil-Specific Farming-Precis*, CRC Press, 2016.
- [4] T. Yuan, S. Zhang, X. Sheng, D. Wang, Y. Gong and W. Li, “An Autonomous Pollination Robot for Hormone Treatment of Tomato Flower in Greenhouse,” em *The 2016 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2016)* , 2016.
- [5] A. Raw, *Bees of the World*, New York: Facts on File, Inc, 2004.
- [6] F. Group, *precision agriculture technology for crop farming*, CRC Press, 2016.
- [7] M. M. J. a. S. A. Ted Shaneyfelt, “A vision feedback robotic docking crane system with application to vanilla Pollination Ted Shaneyfelt; Mo M. Jamshidi; Sos Agaian,” *International Journal of Automation and Control*, vol. 7, nº 1/2, pp. 62-82, 2013.
- [8] Zhang T, Huang Z, You W, Lin J, Tang X, Huang H., “An Autonomous Fruit and Vegetable Harvester with a Low-Cost Gripper Using a 3D Sensor,” *Sensors* , vol. 20, nº 93, pp. 1-15, 2020.
- [9] F. Dressler e B. A. Ozgur, “A Survey on Bio-inspired Networking,” *Computer Networks*, pp. 1-20, 2010.
- [10] Liang, CH., Chuang, CL., Jiang, JA. et al. “Magnetic Sensing through the Abdomen A. Giusti, et al., “A Machine Learning Approach to Visual Perception of Forest Trails for Mobile Robots,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, nº 2, pp. 661-667, 2014.
- [11] J. F. Pinto, “Magnetometria por Efeito Hall,” Recife, 2010.
- [12] of the Honey bee,” *Scientific Reports*, vol. 6, 23657 , nº 6, pp. 1-7, 2016.
- [13] R. E. W. Rafael C. Gonzalez, *Digital Image Processing*, Prentie Hall, 2007.
- [14] Ali U, Mahmood MT., “Analysis of Blur Measure Operators for Single Image Blur Segmentation,” *Applied Sciences*, vol. 8, nº 807, pp. 1-32, 2018.
- [15] Said Pertuz, Domenec Puig, Miguel Angel Garcia., “Analysis of focus measure operators for shape-from-focus,” *Pattern Recognition*, vol. 46, pp. 1415-1432, 2013.
- [16] E. Desurvire, *Classical and Quantum information Teory*, New York: Cambridge University Press, 2009.

- [17] Ted Shaneyfelt, Mo M. Jamshidi, and Sos Aгаian, “A vision feedback robotic docking crane system with application to vanilla Pollination,” *International Journal of Automation and Control*, vol. 7, nº 1/2, pp. 62-82, 2013.
- [18] Kanjar De, V. Masilamani, “Image Sharpness Measure for Blurred Images in Frequency Domain,” em *International Conference on DESIGN AND MANUFACTURING, IConDM 2013*, 2013 .
- [19] Hempel de Ibarra, N., Vorobyev, M., Menzel, R., “Mechanisms, functions and ecology of colour vision in the honeybee,” *Journal of Comparative Physiology. A, Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioural Physiology*, vol. 200, nº 6, p. 411–433, 2014.
- [20] D. H. Hubel, Evolution of ideas on the primary visual cortex, 1955-1975:, The Nobel Foundation 1982, 1982, pp. 435-469.
- [21] Shaneyfelt, T.; Jamshidi, M. M.; Aгаian, S., “A vision feedback robotic docking crane system with application to vanilla Pollination,” *International Journal of Automation and Control* 2013, 7, 2, 62-82.
- [22] T. Yuan, S. Zhang, X. Sheng, D. Wang, Y. Gong and W. Li., “An autonomous pollination robot for hormone treatment of tomato flower in greenhouse. 2016 3rd International Conference on Systems and Informatics (ICSAI), 2016, 108-113.
- [23] Brunelli, D.; Tosato, P.; Rossi, M., “Flora Health Wireless Monitoring with Plant-Microbial Fuel Cell,” *Procedia Engineering* 2016, 168, 1646-1650.
- [24] Chaymaa Lamini, S. B., “Genetic Algorithm Based Approach for Autonomous Mobile Robot Path Planning,” *Science Direct* 2018, 127, 180-189.
- [25] Crespo-Cano, R.; Cuenca-Asensi, S.; Fernández, E.; Martínez-Álvarez, A., “Metaheuristic Optimisation Algorithms for Tuning a Bioinspired Retinal Model,” *Sensors* 2019, 19, 4834.
- [26] Hartbauer, H., “From Insect Vision to a Novel Bio-Inspired Algorithm for Image Denoising,” In: *Biomimetics*, IntechOpen, 2020, 2-14.
- [27] Nicholas, O.; Lassak, K.; Watson, R., Strader, J., et al., “Design of an Autonomous Precision Pollination Robot,” *Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System (IROS 2018)*, 1-5.
- [28] Wang, L.; Li, R.; Sun, J.; Liu, X.; Zhao, L.; Seah, H.S.; Quah, C.K.; Tandianus, B., “Multi-View Fusion-Based 3D Object Detection for Robot Indoor Scene Perception,” *Sensors* 2019, 19, 4092.
- [29] Zhou, X.; Bai, T.; Gao, Y.; Han, Y., “Vision-Based Robot Navigation through Combining Unsupervised Learning and Hierarchical Reinforcement Learning,” *Sensors* 2019, 19, 1576.
- [30] Lu, K.; Li, J.; An, X.; He, H., “Vision Sensor-Based Road Detection for Field Robot Navigation,” *Sensors* 2015, 15, 29594-29617.

- [31] Fraga, D.; Gutiérrez, Á.; Vallejo, J.C.; Campo, A.; Bankovic, Z., “Improving Social Odometry Robot Networks with Distributed Reputation Systems for Collaborative Purposes,” *Sensors* 2011, 11, 11372-11389.