



# Sistema Robotizado para Apoio à Avaliação Clínica da Sensibilidade Superficial Plantar em Pacientes Diabéticos

**TATIANA ISABEL FERREIRA DA COSTA**

julho de 2021

# Sistema Robotizado para Apoio à Avaliação Clínica da Sensibilidade Superficial Plantar em Pacientes Diabéticos

Tatiana Isabel Ferreira da Costa



**Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2020/2021



Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Tatiana Isabel Ferreira da Costa, Nº 1161257, 1161257@isep.ipp.pt

Orientação científica: Luís Filipe Martins Pinto Coelho, lfc@isep.ipp.pt

Coorientação científica: Manuel Fernando Santos Silva, mss@isep.ipp.pt

Empresa: Tecnogial - Projectos e Tecnologia Industrial, Lda

Supervisão: Celso Filipe Neves Martins Cavadas, celso.cavadas@gmail.com



**Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores**

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

30 de julho de 2021



---

# Agradecimentos

---

Agradeço ao Engenheiro Luís Filipe Martins Pinto Coelho e ao Engenheiro Manuel Fernando Santos Silva pela orientação e coorientação científica prestada, tanto na implementação como escrita da presente dissertação.

Agradeço ao Engenheiro Celso Filipe Neves Martins Cavadas pela supervisão e à Tecnogial - Projectos e Tecnologia Industrial, Lda pela disponibilidade e recursos facultados para o desenvolvimento do projeto.

Agradeço a todos os familiares e colegas que de algum modo prestaram o seu apoio e se disponibilizaram a colaborar na fase de implementação e execução do projeto.



---

# Resumo

---

O presente documento visa a exposição do trabalho envolvido no desenvolvimento de um sistema robótico de apoio à análise clínica de sensibilidade superficial plantar de pacientes diabéticos, com recurso a um monofilamento.

A doença do pé diabético é uma complicação comum nestes pacientes e requer um tratamento atempado e adequado de modo a reduzir a necessidade de amputação. Surge assim a motivação que deu origem ao início do projeto que tem como finalidade apoiar profissionais de saúde na realização de um dos rastreios usualmente realizados.

Assim, após o estudo e levantamento dos principais requisitos para a realização do rastreio do monofilamento de Semmes-Weinstein que se pretende automatizar, foi idealizada uma arquitetura que procura responder a todas as tarefas envolvidas. Esta arquitetura engloba o desenvolvimento de um sistema de visão computacional responsável pela aquisição e processamento de imagem necessárias à identificação dos pontos considerados de interesse para o rastreio, um sistema robótico responsável pela tarefa de mover o monofilamento para os pontos de interesse identificados pelo sistema de visão, e um módulo de aquisição e armazenamento de dados do paciente e dos resultados do rastreio para que o profissional de saúde possa posteriormente analisar e avaliar.

Por uma questão de limitação temporal, apenas o sistema de visão foi alvo de atenção aquando da fase de implementação. No entanto, todos os sistemas necessários para que seja possível alcançar o propósito final foram expostos, com a finalidade de serem abordados e estudados em trabalhos futuros.

Relativamente aos resultados alcançados no que respeita ao sistema de visão, a identificação dos pontos de interesse foi conseguida para a maioria das áreas testadas. No entanto, o resultado da metodologia implementada para a identificação dos dedos pequenos deverá ser alvo de melhoramento para que se consiga garantir a sua correta identificação.

**Palavras-Chave:** Diabetes, Sistema de Visão Computacional, *Cobots*, Monofilamento de Semmes-Weinstein, OpenCV

---

# Abstract

---

The present document aims to expose the work involved in the development of a robotic system of support to the clinical analysis of superficial sensitivity in diabetic patients, with help of monofilament. The diabetic foot disease is a common concern in these patients and requires an upper hand and correct treatment, to be able to reduce the need of an amputation. Guided by this problem upcomes the motivation to this project which target is to help healthcare professionals when they are performing tests to detect this issue.

Therefore, after a period of research and requirements gathering to perform the automatic tracking with a Semmes-Weinstein monofilament, an architecture was idealized to respond to all tasks involved. This architecture includes the development of a computer vision system capable of getting and process the necessary images to identify spots considered of interest for the tracking, a robotic system responsible to move the monofilament to the spots of interest selected by the vision system, and a module of data storage and treatment to be able to process the data and present it the healthcare professional.

Due to a matter of a timing limit, just the computer vision system was developed. However, all the necessary systems to accomplish the final objective were exposed in a way that can be aborded in works done in the future.

Relatively to the results reached in what the computer vision system is about, the identification of the spots of interest was accomplished in most of the tested areas. However, the result of the implemented methodology to identify the smaller toes should be target of improvement just to guarantee its correct identification.

**Keywords:** Diabetes, Computer vision system, Cobots, Semmes-Weinstein Monofilament, OpenCV



---

# Índice

---

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Agradecimentos</b>  | <b>v</b>    |
| <b>Índice</b>  | <b>i</b>    |
| <b>Índice de Figuras</b>   | <b>v</b>    |
| <b>Índice de Tabelas</b>   | <b>xi</b>   |
| <b>Acrónimos</b>   | <b>xiii</b> |
| <b>1 Introdução</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1 Contextualização . . . . .   | 2           |
| 1.2 Motivação . . . . .  | 2           |
| 1.3 Objetivos . . . . .  | 3           |
| 1.4 Calendarização . . . . .   | 4           |
| 1.5 Organização do Relatório . . . . .   | 4           |
| <b>2 A Diabetes</b>  | <b>7</b>    |
| 2.1 Caraterização e Diagnóstico . . . . .  | 7           |
| 2.1.1 A Neuropatia Diabética . . . . .   | 8           |
| 2.2 Análise Clínica do Pé Diabético . . . . .  | 9           |
| 2.2.1 Avaliação da Sensibilidade Cutânea Utilizando o Monofila-<br>mento de Semmes-Weinstein . . . . .       | 11          |
| 2.3 Sistemas Automatizados de Apoio à Análise Clínica . . . . .  | 14          |
| 2.3.1 Exemplo de Sistema Robotizado de Apoio à Análise da<br>Sensibilidade Cutânea do Pé Diabético . . . . . | 15          |
| 2.4 Sumário . . . . .  | 18          |
| <b>3 Sistemas de Visão Artificial</b>  | <b>19</b>   |
| 3.1 Sistemas de Visão Computacional . . . . .  | 19          |
| 3.1.1 Aquisição de Imagem . . . . .  | 20          |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.2      | Técnicas de Pré-Processamento de Imagem . . . . .                  | 22        |
| 3.2.1    | Calibração . . . . .   | 22        |
| 3.2.2    | Filtragem de Ruído . . . . .                                       | 23        |
| 3.2.3    | Segmentação . . . . .  | 23        |
| 3.2.4    | Reconhecimento de Padrões . . . . .                                | 25        |
| 3.2.5    | Rastreamento . . . . .   | 26        |
| 3.3      | Ferramentas de Processamento de Imagem . . . . .                   | 27        |
| 3.3.1    | <i>Open Source Computer Vision Library</i> . . . . .               | 27        |
| 3.4      | Sumário . . . . .  | 29        |
| <b>4</b> | <b>A Robótica</b>  | <b>31</b> |
| 4.1      | Definição e Classificação . . . . .                                | 31        |
| 4.2      | Robótica Colaborativa . . . . .                                    | 33        |
| 4.2.1    | Aspetos de Segurança . . . . .                                     | 34        |
| 4.2.2    | Robôs Colaborativos Elite . . . . .                                | 36        |
| 4.3      | A Robótica no Apoio à Medicina . . . . .                           | 37        |
| 4.3.1    | Intervenção Cirúrgica Assistida . . . . .                          | 37        |
| 4.3.2    | Dispositivo Robotizado para Radioterapia . . . . .                 | 38        |
| 4.3.3    | Assistente de Enfermagem no Transporte de Pacientes . . . . .      | 39        |
| 4.3.4    | Exoesqueleto na Reabilitação Locomotiva . . . . .                  | 40        |
| 4.3.5    | Mobilização Passiva e Ativa Assistida . . . . .                    | 42        |
| 4.3.6    | Realização de Teste COVID-19 . . . . .                             | 43        |
| 4.4      | Sumário . . . . .  | 43        |
| <b>5</b> | <b>Arquitetura do Sistema</b>                                      | <b>45</b> |
| 5.1      | Arquitetura Geral . . . . .  | 45        |
| 5.1.1    | Sistema de Visão . . . . .   | 46        |
| 5.1.2    | Sistema Robótico . . . . .   | 48        |
| 5.1.3    | Módulo de Aquisição e Armazenamento de Dados . . . . .             | 48        |
| 5.2      | Sumário . . . . .  | 49        |
| <b>6</b> | <b>Implementação Prática do Sistema de Visão</b>                   | <b>51</b> |
| 6.1      | Sistema de Visão . . . . .   | 51        |
| 6.2      | Setup para Aquisição de Imagens Plantares . . . . .                | 52        |
| 6.3      | Segmentação da Imagem do Pé . . . . .                              | 53        |
| 6.3.1    | Segmentação por Limiar de Cor - Método de Threshold . . . . .      | 53        |
| 6.3.2    | Segmentação por Detecção de Contorno - Operador de Canny . . . . . | 60        |
| 6.3.3    | Detecção de Contornos e Validação de Áreas . . . . .               | 63        |
| 6.4      | Identificação do dedo Hálux . . . . .                              | 64        |
| 6.4.1    | Segmentação da Região de Interesse . . . . .                       | 65        |
| 6.4.2    | Landmarks Anátomo-Morfológicos . . . . .                           | 66        |
| 6.5      | Identificação dos Pontos na Região Plantar . . . . .               | 68        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 6.6      | Identificação dos Dedos Pequenos . . . . .   | 71         |
| 6.6.1    | Transformada de Hough . . . . .  | 73         |
| 6.6.2    | Método de Blobs . . . . .  | 74         |
| 6.6.3    | Método Watershed . . . . .   | 75         |
| 6.6.4    | Análise do Contorno do Pé . . . . .  | 75         |
| 6.6.4.1  | Detecção de Picos no Contorno do Pé . . . . .  | 75         |
| 6.6.4.2  | Detecção de Transições de Intensidade de pixels no Contorno do Pé . . . . .                                  | 78         |
| 6.6.5    | Relações de Proporção . . . . .  | 79         |
| 6.7      | Sumário . . . . .  | 81         |
| <b>7</b> | <b>Testes e Resultados</b>   | <b>83</b>  |
| 7.1      | Resultados da Segmentação da Imagem do Pé . . . . .  | 83         |
| 7.2      | Resultados da Identificação dos Pontos de Interesse . . . . .  | 84         |
| 7.2.1    | Resultados da Identificação dos Pontos de Interesse com Distinção do Pé Feminino e do Pé Masculino . . . . . | 85         |
| 7.2.2    | Resultados da Identificação dos Pontos de Interesse com Distinção do Pé Direito e do Pé Esquerdo . . . . .   | 86         |
| 7.3      | Tempo de Execução do Algoritmo de Identificação dos Pontos de Interesse . . . . .                            | 86         |
| 7.4      | Causas das Falhas no Algoritmo . . . . .   | 87         |
| 7.5      | Análise dos Pontos Fracos e dos Pontos Fortes do Algoritmo . . . . .   | 90         |
| 7.6      | Sumário . . . . .  | 91         |
| <b>8</b> | <b>Conclusões</b>  | <b>93</b>  |
| 8.1      | Conclusões do Trabalho Realizado . . . . .   | 93         |
| 8.2      | Proposta para Desenvolvimentos Futuros . . . . .   | 95         |
|          | <b>Referências Bibliográficas</b>  | <b>97</b>  |
| <b>A</b> | <b>Segmentação do pé</b>   | <b>103</b> |
| <b>B</b> | <b>Identificação do dedo hálux e dos pontos na planta do pé</b>  | <b>115</b> |
| <b>C</b> | <b>Identificação dos dedos pequenos</b>  | <b>119</b> |



---

# Índice de Figuras

---

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Gantt <i>chart</i> com o plano de trabalhos do projeto . . . . .  | 4  |
| 2.1  | Monofilamento de Semmes-Weinstein (MSW) de 10 g . . . . .   | 9  |
| 2.2  | Diapasão com cursor de 128 Hz . . . . .   | 10 |
| 2.3  | Discriminador de 2 pontos - Touch Tes . . . . .   | 11 |
| 2.4  | A - Monofilamento relaxado; B- Monofilamento com torção de 1 cm .   | 12 |
| 2.5  | Pontos pré-definidos utilizados na avaliação da sensibilidade cutânea através do método do MSW . . . . .  | 13 |
| 2.6  | Exemplo típico de uma imagem térmica plantar combinada do pé direito e esquerdo, capturada com o dispositivo de imagem térmica . . .  | 15 |
| 2.7  | Diagrama elucidativo das várias partes envolvidas no protótipo exposto  | 16 |
| 2.8  | Interface Gráfica para controlar e comandar o monofilamento robótico e armazenar os dados do paciente . . . . .   | 16 |
| 2.9  | Protótipo de um monofilamento robotizado . . . . .  | 17 |
| 2.10 | Modelo do movimento manual (seta vermelha) e movimento mecânico (seta azul) para um dos três pontos plantares utilizados pelo protótipo   | 17 |
| 3.1  | Arquitetura de um sistema de visão computacional . . . . .  | 20 |
| 3.2  | Sistema de visão Visor da SensoPart . . . . .   | 21 |
| 3.3  | Sistema de visão Gocator da LMI Technologies . . . . .  | 21 |
| 3.4  | Câmara OAK-D desenvolvida pela OpenCV . . . . .   | 22 |
| 3.5  | Segmentação por borda usando o operador de canny: à esquerda a imagem original e à direita a imagem segmentada . . . . .  | 24 |
| 3.6  | Segmentação por corte da imagem: à esquerda imagem original, ao centro histograma com ponto de corte e à direita imagem binária . . .   | 25 |
| 3.7  | Segmentação por crescimento de região.: à esquerda a imagem original e à direita a imagem segmentada . . . . .  | 25 |
| 3.8  | Aplicação da técnica de reconhecimento de padrões: à direita a imagem original e à esquerda a imagem com reconhecimento dos olhos, pele e boca que facilitam o reconhecimento da face . . . . . | 26 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.9  | Excerto de código exemplo para identificação de faces numa imagem com recurso à biblioteca OpenCV . . . . .   | 28 |
| 3.10 | Imagem original utilizada para teste do código exemplo desenvolvido com o OpenCV e resultado obtido . . . . .   | 28 |
| 4.1  | Esquema ilustrativo da constituição mecânica de um braço robótico: elos e juntas . . . . .  | 32 |
| 4.2  | Exemplos de robôs: Cartesiano, SCARA e Articulado . . . . .   | 33 |
| 4.3  | Modos de funcionamento colaborativos: paragem de segurança vigiada, guiamento manual, limitação de força e potência e monitoramento da distância e da velocidade . . . . .  | 34 |
| 4.4  | Padrões de segurança: diretrizes e normas a seguir numa avaliação do nível de risco de um robô colaborativo . . . . .   | 35 |
| 4.5  | Gama de robôs colaborativos Elite . . . . .   | 36 |
| 4.6  | Visualização do sistema robótico da Vinci Xi numa intervenção cirúrgica de um paciente com cancro gástrico . . . . .  | 38 |
| 4.7  | Modelo de um CyberKnife . . . . .   | 39 |
| 4.8  | Transporte de um paciente com um robô assistente de enfermagem RIBA . . . . .   | 40 |
| 4.9  | Exoesqueletos MB Active Knee e Atlas Pediatric Exo da Marsi Bionics   | 41 |
| 4.10 | Paciente tetraplégico com exoesqueleto controlado pela mente . . . . .  | 41 |
| 4.11 | <i>Kinetec 5190</i> e dispositivo elástico para resistência do tornozelo . . . . .  | 42 |
| 4.12 | Realização de um teste COVID-19 com recurso a um robô colaborativo da Universal Robots . . . . .  | 43 |
| 5.1  | Arquitetura geral do sistema projetado para o desenvolvimento de um sistema robótico de apoio à análise clínica da sensibilidade superficial plantar de pacientes diabéticos: sistema de visão, sistema robótico e módulo de aquisição de dados . . . . .           | 46 |
| 5.2  | Câmara de filmar utilizada para o desenvolvimento do projeto: Fujifilm X-T30 . . . . .  | 47 |
| 6.1  | Cenário de fundo construído para aquisição de imagens plantares: fundo de cor preta e objetos de dimensões conhecidas cor-de-rosa e verde fluorescente . . . . .  | 52 |
| 6.2  | Diagrama de exposição da sequência de tarefas inerentes à segmentação das imagens dos pés . . . . .   | 54 |
| 6.3  | Comportamento dos parâmetros da função <i>cv.threshold</i> utilizados para definir o tipo de limite a aplicar. Ao canto superior esquerdo encontra-se a imagem de entrada, sendo as restantes o resultado da aplicação de cada parâmetro sobre a original . . . . . | 54 |
| 6.4  | Cilindro representativo do modelo de espaço de cores HSV . . . . .  | 55 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 6.5  | Ilustração gráfica da lógica idealizada para análise dos histogramas das imagens a fim de determinar um limite de <i>threshold</i> : à esquerda os histogramas originais e à direita os histogramas no formato de soma acumulativa, com sinalização para cada um do ponto onde se atingem os 90% de pixels da imagem . . . . .   | 56 |
| 6.6  | Excerto de código representativo da lógica implementada para determinar limite de <i>threshold</i> , seguido de um <i>output</i> exemplo . . . . .   | 56 |
| 6.7  | Amostra de resultados do estudo realizado para determinar o valor de limite necessário à aplicação do método de <i>threshold</i> . Nas primeiras quatro linhas encontram-se os dados estudados, desde as imagens original, à escala de cinza e canal V, bem como os seus histogramas na forma acumulada. Na últimas quatro linhas encontram-se os resultados obtidos pela aplicação de diversas combinações dos dados estudados. | 58 |
| 6.8  | Amostra de resultados do estudo realizado para determinar a percentagem de pixels a considerar como pertencendo ao cenário de fundo na análise do histograma acumulativo . . . . .   | 59 |
| 6.9  | Comportamento de um filtro Gaussiano: à esquerda a imagem à escala de cinza e à direita a imagem após aplicação do filtro . . . . .  | 59 |
| 6.10 | Amostra de resultados do estudo para determinar valor limite de <i>threshold</i> pelo método de Otsu . . . . .   | 60 |
| 6.11 | Amostra de resultados do estudo inicial do comportamento da aplicação do método de Canny. Foram estudadas imagens à escala de cinza, do canal V e binarizadas, com ou sem filtro gaussiano . . . . .   | 61 |
| 6.12 | Comportamento das funções de erosão e dilatação da biblioteca OpenCV: à esquerda a imagem original, ao centro a imagem após uma erosão e à direita a imagem após uma dilatação . . . . .   | 62 |
| 6.13 | Amostra de resultados da aplicação do método de Canny, após utilização de técnicas de erosão e dilatação de regiões plantares . . . . .  | 62 |
| 6.14 | Amostra de resultados após a deteção de contorno e validação das áreas dos pés . . . . .   | 63 |
| 6.15 | Amostra de resultados de deteção de contornos com falhas resultantes da aplicação incorreta das técnicas de erosão e dilatação nas imagens .   | 64 |
| 6.16 | Diagrama de exposição da sequência de tarefas inerentes à tarefa de identificação do dedo hálux . . . . .  | 65 |
| 6.17 | Amostra de resultados obtidos pelo isolamento e processamento da região de interesse referente ao dedo hálux . . . . .   | 66 |
| 6.18 | Amostra de resultados obtidos na deteção do dedo hálux pelo isolamento, processamento das regiões de interesse e estudo do comportamento do contorno do pé . . . . .   | 67 |
| 6.19 | Correspondência de coordenadas de pontos identificados numa imagem processada face à imagem original: $x_3=x_1+x_2$ e $y_3=y_1+y_2$ . . . .  | 68 |

- 6.20 Abordagem desenvolvida e implementada para determinar pontos de interesse na superfície plantar. A imagem à esquerda representa a análise aplicada à imagem binária de modo a detetar transições nas extremidades laterais do pé, e por conseguinte a orientação do mesmo. A imagem ao centro representa as linhas orientadoras desenhadas com base nos pontos determinados na primeira imagem. A imagem à esquerda sinaliza os pontos detetados pela respetiva análise da intensidade dos pixels sobre as linhas orientadoras . . . . . 69
- 6.21 Diagrama de exposição da sequência de tarefas inerentes à tarefa de identificação dos pontos plantares de interesse . . . . . 70
- 6.22 Deslocamentos sobre as retas de orientação traçadas para identificar os pontos de interesse na planta do pé . . . . . 71
- 6.23 Amostra de resultados da implementação da metodologia desenvolvida para identificar pontos plantares . . . . . 72
- 6.24 Amostra de resultados da aplicação do método de Hough para detetar dedos dos pés . . . . . 74
- 6.25 Resultados exemplo da aplicação do método de *blobs* para detetar dedos dos pés . . . . . 74
- 6.26 Amostra de resultados da aplicação dos métodos de transformação de distâncias e *watershed* para detetar dedos dos pés . . . . . 76
- 6.27 Amostra de resultados da análise do contorno do pé para detetar os dedos . . . . . 77
- 6.28 Amostra de resultados da análise da primeira derivada do contorno do pé para detetar os dedos . . . . . 77
- 6.29 Amostra de resultados da análise do contorno do pé para detetar os dedos, em imagens adquiridas onde se garante uma separação física entre dedos . . . . . 78
- 6.30 Amostra de resultados da análise da intensidade dos pixels sobre o contorno do pé para detetar os dedos pelas transições de cor detetadas 79
- 6.31 Abordagem desenvolvida e implementada para determinar pontos dos dedos pequenos de interesse. A imagem à esquerda representa a análise aplicada à imagem binária de modo a detetar transições nas extremidades laterais do pé, e, por conseguinte, a orientação do mesmo. A imagem ao centro representa as linhas orientadoras desenhadas com base nos pontos determinados na primeira imagem. A imagem à direita sinaliza os pontos detetados pela respetiva análise da intensidade dos pixels sobre as linhas orientadoras . . . . . 80
- 6.32 Amostra de resultados da análise da intensidade dos pixels sobre o contorno do pé para detetar os dedos pelas transições de cor detetadas 81

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 7.1 | Legenda dos pontos de interesse para a realização do teste do MSW utilizada para a exposição dos resultados do sistema de visão implementado . . . . .   | 84 |
| 7.2 | Imagem da amostra testada onde se verifica uma falha na segmentação da imagem do pé. Ao canto superior esquerdo a imagem original, ao canto superior direito a imagem após binarização, erosão e dilatação, ao canto inferior esquerdo o resultado da aplicação do operador de Canny e ao canto inferior direito a imagem original com áreas dos pés detetados. . . . .  | 88 |
| 7.3 | Imagem da amostra testada onde se verifica falha devido à influência da iluminação no momento de aquisição da imagem. Ao canto superior esquerdo a imagem original, ao canto superior direito a imagem após binarização, erosão e dilatação, ao canto inferior esquerdo o resultado da aplicação do operador de Canny e ao canto inferior direito a imagem original com os pontos de interesse destacados. . . . . | 88 |
| 7.4 | Imagem da amostra testada onde se verifica falha devido à influência do objeto de dimensões conhecidas. À esquerda a imagem do pé isolado, ao centro a imagem binarizada e à direita os pontos de interesse estimados e sinalizados . . . . .  | 89 |
| 7.5 | Imagem da amostra testada onde se verifica falha devido à influência do corte parcial da área dos pés na aquisição das imagens. À esquerda encontra-se a imagem original e à direita os pontos de interesse da planta do pé estimados e sinalizados. . . . .   | 90 |



---

# Índice de Tabelas

---

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Quadro de classificação da neuropatia diabética . . . . .   | 9  |
| 2.2 | Categorização de risco face ao resultado do MSW . . . . .   | 14 |
| 4.1 | Caraterísticas dos robôs Elite . . . . .  | 36 |
| 7.1 | Resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido para identificação de cada um dos pontos de interesse para o rastreio do MSW . . . . .   | 84 |
| 7.2 | Resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido para identificação de cada um dos pontos de interesse para o rastreio do MSW, considerando a amostra de pés masculinos . . . . . | 85 |
| 7.3 | Resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido para identificação de cada um dos pontos de interesse para o rastreio do MSW, considerando a amostra de pés femininos . . . . .  | 85 |
| 7.4 | Resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido para identificação de cada um dos pontos de interesse para o rastreio do MSW, considerando o pé direito . . . . .                | 86 |
| 7.5 | Resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido para identificação de cada um dos pontos de interesse para o rastreio do MSW, considerando o pé esquerdo . . . . .               | 86 |



---

# Acrónimos

---

| Acrónimo | Descrição  | Página |
|----------|--|--------|
| ISEP     | Instituto Superior de Engenharia do Porto              | 1      |
| MEEC     | Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores | 1      |
| DEE      | Departamento de Engenharia Eletrotécnica               | 1      |
| MSW      | Monofilamento de Semmes-Weinstein                      | 1      |
| OpenCV   | <i>Open Source Computer Vision Library</i>             | 22     |
| AGV      | <i>Automated Guided Vehicle</i>                        | 33     |
| SCARA    | <i>Selective Compliance Assembly Robot Arm</i>         | 32     |
| RIBA     | <i>Robot for Interactive Body Assistance</i>           | 39     |
| MAK      | <i>MB Active Knee</i>                                  | 40     |
| ATLAS    | <i>Atlas Pediatric Exo</i>                             | 40     |
| HSV      | <i>Hue Saturation Value</i>                            | 55     |
| RGB      | <i>Red Green Blue</i>                                  | 55     |



# Capítulo 1

---

## Introdução

---

O presente documento apresenta o projeto desenvolvido no âmbito da unidade curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores (MEEC), do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE), do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), realizado em parceria com a empresa Tecnogial, Projectos e Tecnologia Industrial, Lda.

Propõe-se nesta dissertação apresentar o desenvolvimento de um sistema que facilite o rastreio do pé diabético, procurando não só melhorar a rapidez e precisão do processo, como também minimizar a intervenção do profissional de saúde. A doença do pé diabético que se destaca é conhecida com uma das principais complicações manifestadas em pacientes com a doença da diabetes.

A diabetes insere-se num grupo de doenças metabólicas caracterizado pelo descontrolo dos mecanismos de regulação da glicemia. Esta perturbação ocorre quando a quantidade de insulina produzida pelo corpo humano é insuficiente, ou gerida de modo desadequado. É responsável por provocar lesões a longo prazo, tendo como resultado a disfunção e falha de órgãos. Uma das primeiras consequências é a degradação de pequenos vasos sanguíneos que, por sua vez, provocam danos nos olhos, rins e nervos. Outro dos sintomas consiste na perda de sensibilidade e vascularização, particularmente nas extremidades do corpo humano que, no pior dos cenários, pode conduzir à necessidade de amputação.

Diferentes rastreios são realizados pelos profissionais de saúde com o intuito de avaliar os doentes diabéticos e os seus sintomas. De entre os mais variados rastreios, a avaliação da sensibilidade cutânea no pé diabético mostra-se fulcral para evitar situações extremas, onde, em muitos dos casos, a amputação é apontada como solução. Para avaliar a sensibilidade cutânea, os procedimentos internacionais recomendam o conhecido monofilamento de Semmes-Weinstein (MSW), que

se baseia na utilização de um monofilamento de 10 gf para testar a sensação de toque em pontos plantares pré-definidos.

Estando a robótica cada vez mais presente no nosso quotidiano, torna-se interessante estudar, analisar e considerar a sua evolução no que respeita o tema do apoio à medicina. Existem inúmeras formas de tornar útil a sua colaboração, nomeadamente em situações onde é possível substituir a mão humana, automatizando tarefas e abrindo caminho para o futuro da telemedicina ou, por outro lado, em situações onde os sistemas robotizados ultrapassam a capacidade humana.

Nos capítulos que se seguem expõe-se o desenvolvimento de um sistema robotizado de apoio à avaliação clínica, com vista a tornar possível automatizar o processo associado ao método de Semmes-Weinstein, frequentemente aplicado em pacientes diabéticos.

## 1.1 Contextualização

A diabetes é um dos principais problemas de saúde em todo o mundo. A doença do pé diabético é uma complicação comum nestes pacientes, onde um tratamento atempado e adequado reduz significativamente a necessidade de amputação e mortalidade [1].

Um dos problemas subjacentes a estes rastreios passa pela necessidade de alocar pessoal médico especializado para a sua realização. No entanto, a automatização desta tarefa num ambiente controlado manifestar-se-ia vantajosa. O processo inerente ao movimento do monofilamento passaria a ser realizado por um braço robótico, sendo assim possível realocar os profissionais de saúde em atividades especializadas, impossíveis de automatizar.

Paralelamente à situação exposta, a presença da robótica é cada vez mais evidente no ramo da medicina. A sua versatilidade e precisão são características que beneficiam os avanços tecnológicos na área da saúde humana.

Sendo a tarefa de aliar a engenharia à medicina imprescindível na atualidade, é fundamental que se desenvolvam modelos que permitam estudar até que ponto se pode dar uso aos recursos tecnológicos disponíveis, a fim de ajudar o ser humano nas mais variadas áreas do quotidiano. Deste modo, torna-se interessante avaliar a possibilidade de recorrer a um braço robotizado por forma a solucionar o caso exposto, onde dispensar a intervenção direta de um médico é uma possibilidade.

## 1.2 Motivação

A possibilidade de automatizar o rastreio referente à avaliação da sensibilidade cutânea de pacientes diabéticos é apontada com interesse pelos profissionais de

saúde. Isto acontece dado o tempo dedicado pelos mesmos na realização desta tarefa que, apesar de fundamental para a prevenção de complicações incontornáveis nos pacientes diabéticos, manifesta-se simultaneamente de baixa complexidade na sua execução. Assim, aponta-se este fator como o principal motivo desencadeador do projeto proposto nesta dissertação. Com o desenvolvimento deste sistema torna-se possível realocar os médicos para funções onde a sua intervenção é considerada indispensável e insubstituível.

Para além disso, outro fator que incentiva o desenvolvimento de um sistema automatizado com esta finalidade consiste na possibilidade de aumentar o raio de abrangência populacional, cobrindo principalmente situações onde o acesso ao rastreio é ditado por restrições geográficas. A utilização do mesmo em contexto de telemedicina poderia ser considerado um objetivo acessível a curto prazo, sendo o contacto com o paciente realizado pelo médico remotamente.

Aliado aos motivos apresentados, acresce ainda o interesse pessoal em fazer uso dos conhecimentos académicos adquiridos ao longo dos últimos anos, prestando assim contributo numa iniciativa que tem como principal finalidade apoiar a medicina numa tarefa de significativo impacto para a saúde do ser humano.

### 1.3 Objetivos

Pretende-se o desenvolvimento de um sistema robotizado de apoio à avaliação clínica da sensibilidade plantar em doentes diabéticos. Com este torna-se possível automatizar a tarefa realizada habitualmente por médicos.

Para isso, idealiza-se um sistema que recorra a mecanismos de visão artificial a fim de identificar a zona plantar e determinar os pontos pré-definidos recomendados para o rastreio [2]. Para realizar a tarefa de tocar nos pontos determinados pelo sistema de visão com o monofilamento, considera-se a utilização de um braço robótico. Este recebe uma coordenada do ponto a atingir enviada pelo sistema de visão, e após receber uma ordem inicia o movimento, aproximando-se do ponto recebido com o monofilamento posicionado na sua extremidade. Para além disso, considera-se ainda a necessidade de proceder ao armazenamento da resposta do paciente face à sensação de toque por forma a, posteriormente, apoiar o médico na análise do resultado do teste realizado.

Assim, com o intuito de atingir o objetivo descrito, definem-se os seguintes pontos de trabalhos:

- Desenvolver um sistema capaz de adquirir imagens plantares através de um sistema de visão.

- Recorrer a técnicas de visão artificial por forma a identificar numa imagem digital a superfície plantar e, dentro desta, determinar as coordenadas dos pontos previstos para a avaliação do pé.
- Utilizar um braço robótico para avaliar a sensibilidade nos pontos plantares pré-definidos.
- Estabelecer a comunicação necessária entre o *software* e um braço robótico.
- Receber e armazenar numa base de dados a reação do paciente à sensação de toque com o monofilamento, realizada por um braço robótico

## 1.4 Calendarização

De modo a resultar numa melhor gestão dos trabalhos a realizar ao longo do projeto, face ao tempo disponibilizado para o efeito, apresenta-se uma organização das tarefas a desenvolver em janelas temporais que definem o seu início e término, procurando assim garantir que se atinge o objetivo proposto.

O Gantt *chart* ilustrado na Figura 1.1 sumariza o plano de trabalhos para este projeto.

| Tarefa   | Início | Fim    | Duração     | 2020 |     | 2021 |     |     |     |     |     |     |  |  |  |
|--|--------|--------|-------------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|--|
|  |        |        |             | nov  | dez | jan  | fev | mar | abr | mai | jun | jul |  |  |  |
| Estudo técnicas de visão artificial                | 16/nov | 26/fev | 15 semanas  |      |     |      |     |     |     |     |     |     |  |  |  |
| Escrita Introdução e Estado de Arte da Dissertação | 16/nov | 12/fev | 13 semanas  |      |     |      |     |     |     |     |     |     |  |  |  |
| Desenvolvimento software tratamento imagem         | 22/fev | 31/mar | 5,5 semanas |      |     |      |     |     |     |     |     |     |  |  |  |
| Interligação sistema visão com braço robótico      | 22/mar | 30/abr | 6 semanas   |      |     |      |     |     |     |     |     |     |  |  |  |
| Escrita Capítulo implementação da Dissertação      | 05/abr | 14/mai | 6 semanas   |      |     |      |     |     |     |     |     |     |  |  |  |
| Início teste Sistema desenvolvido                  | 01/mai | 31/mai | 4 semanas   |      |     |      |     |     |     |     |     |     |  |  |  |
| Escrita dos Resultados e conclusões da Dissertação | 01/jun | 30/jun | 4 semanas   |      |     |      |     |     |     |     |     |     |  |  |  |
| Correções e Entrega                                | 22/jun | 15/jul | 3,5 semanas |      |     |      |     |     |     |     |     |     |  |  |  |

Figura 1.1: Gantt *chart* com o plano de trabalhos do projeto

## 1.5 Organização do Relatório

No capítulo 1 introduz-se o propósito da presente dissertação, onde se apresenta como projeto de desenvolvimento um sistema robotizado de apoio à análise clínica do pé diabético. Expõem-se uma contextualização bem como a motivação inerente ao mesmo, definem-se os objetivos a atingir e apresenta-se uma proposta de calendarização das tarefas a realizar.

No capítulo seguinte, 2, é definida a doença da diabetes e os seus diferentes diagnósticos, sendo também apresentadas as principais complicações a ela inerentes e quais os vários rastreios que se realizam com a finalidade de prevenir essas mesmas complicações em pacientes diabéticos. Por fim, neste mesmo capítulo,

são ainda apresentadas as principais técnicas e tecnologias utilizadas na atualidade que visam o desenvolvimento de sistemas automatizados de apoio à análise clínica.

No capítulo 3 apresenta-se o tema da visão computacional. Neste, expõem-se a arquitetura geral destes sistemas, seguindo-se uma breve passagem explicativa das várias etapas envolvidas nos mesmos. São apresentados um conjunto de sensores utilizados para aquisição e processamento de imagens, seguindo-se uma explicação das diversas técnicas de pré-processamento de imagem existentes, bem como ferramentas disponíveis para o desenvolvimento de aplicação.

No capítulo seguinte, 4, é apresentada a robótica, mais particularmente a colaborativa, onde se salientam as suas principais características. Para além disso, são alvo de atenção um conjunto de sistemas e aplicações reais onde o uso da robótica manifesta potencialidades no que ao apoio à medicina diz respeito, tendo como intenção enquadrar o seu uso no desenvolvimento do sistema proposto na presente dissertação.

No capítulo 5 encontra-se a arquitectura geral do sistema desenvolvido, onde se apresentam as tecnologias e requisitos de todos os subsistemas necessários para dar resposta ao problema apresentado. Assim, apresenta-se tanto o sistema de visão implementado na fase de desenvolvimento, como o sistema robótico e o módulo de aquisição e armazenamento de dados projetados para trabalhos futuros.

No capítulo seguinte, 6, descreve-se toda a fase de implementação inerente ao desenvolvimento do sistema de visão. É apresentado o *setup* construído para a aquisição das imagens plantares, assim como descrito o *software* desenvolvido. Todas as técnicas e metodologias testadas, estudadas e implementadas para identificar cada um dos pontos necessários à realização do teste do MSW encontram-se expostas e devidamente acompanhadas de resultados intermédios que foram analisados durante a evolução dos trabalhos.

No capítulo 7 são referidos e apresentados os resultados dos testes realizados a fim de validar e verificar o sistema desenvolvido. Neste encontra-se uma análise e discussão dos resultados alcançados, seguida de uma identificação de quais as falhas no sistema, quais as condições necessárias ao correto funcionamento, e ainda que pontos fortes se salientam no mesmo.

No último capítulo, 8, são reunidas as principais conclusões e perspetivados futuros desenvolvimentos, cruzando para o efeito os objetivos traçados inicialmente com os resultados alcançados aquando da fase de implementação.



## Capítulo 2

---

# A Diabetes

---

*A diabetes é uma doença metabólica caracterizado por descontrolo dos mecanismos de regulação da glicemia. Esta perturbação está diretamente associada a problemas de disfunção e falha de órgãos, consequências resultantes da incapacidade do corpo humano para produzir insulina e geri-la de forma adequada [3]. Este capítulo procura sensibilizar e contextualizar o leitor para o tema da diabetes, classificando-a e expondo as suas principais implicações para o ser humano. Para além disso, e em concordância com o tema em estudo, serão expostas técnicas e tecnologias usadas pelos médicos no que respeita a avaliar e prevenir complicações resultantes do pé diabético.*

### 2.1 Caraterização e Diagnóstico

Existem duas categorias que permitem caraterizar os pacientes diabéticos. Estas categorias são denominadas por diabetes do tipo 1 e diabetes do tipo 2 [3]. Na diabetes do tipo 1 o diagnóstico indica a existência de uma deficiência absoluta da secreção de insulina. No que respeita a diabetes do tipo 2, a causa resulta da combinação entre uma resistência à ação da insulina e uma resposta inadequada de secreção da mesma [4].

A diabetes compreende um conjunto heterogéneo de distúrbios caracterizados pelos elevados níveis de glicose no sangue, contudo, é possível diferenciar três principais grupos [3, 4].

O primeiro grupo distingue a diabetes dependente de insulina, onde o indivíduo carece de secreção residual de insulina e, portanto, necessita desta para a sua sobrevivência. No segundo grupo encontra-se a diabetes não dependente de insulina, onde o indivíduo tem a capacidade de controlar os seus níveis glicémicos, por exemplo, através da redução de peso e prática de exercício físico, ou

por apresentar alguma secreção residual de insulina. Por último, o terceiro grupo engloba a diabetes subjacente a outras doenças, onde estas são responsáveis por provocar uma diminuição da glicose em jejum e/ou uma diminuição da tolerância à glicose no indivíduo, sem por isso se cumprir nenhum dos critérios definidos para o diagnóstico da diabetes [3, 4].

Complicações como a neuropatia, retinopatia e nefropatia surgem como conseqüências a longo prazo. A neuropatia encontra-se associada a sintomas como perda de sensibilidade e vascularização, particularmente nas extremidades do corpo humano, podendo resultar na necessidade de amputação. A retinopatia é responsável pela perda potencial de visão e a nefropatia relaciona-se com a insuficiência renal [3].

### 2.1.1 A Neuropatia Diabética

Por forma a melhor enquadrar o propósito do projeto, torna-se interessante explorar uma variante de complicações resultantes da diabetes em particular: a neuropatia diabética.

A neuropatia diabética pode afetar qualquer parte do sistema nervoso [1]. Sabe-se que a neuropatia periférica é a mais comum em pacientes diabéticos, comprometendo todos os tecidos corporais e sendo responsável pela significativa mortalidade associada à perturbação em estudo [5].

A lesão neurológica na neuropatia diabética envolve amplamente todo o sistema nervoso periférico, apresentando-se de duas formas principais: polineuropatia sensitivo-motora simétrica e neuropatia autonómica (cardiovascular, respiratória, digestiva e genitourinária). Um paciente diabético pode apresentar apenas um tipo de neuropatia ou desenvolver diferentes combinações [1]. Por esse motivo, o quadro clínico da neuropatia pode variar desde formas assintomáticas até à presença de múltiplas manifestações pouco específicas, somáticas ou autonómicas. Para além disso, e apesar de ocorrer com menos frequência, a lesão neuropática pode ser mais localizada, apresentando-se na forma de neuropatia focal e multifocal (craniana, radiculoneuropatia toraco-lombar, focal dos membros ou amiotrofia) [5]. A Tabela 2.1 apresenta um quadro de classificação da neuropatia diabética.

As principais manifestações de comprometimento somático são a dormência e sensação de queimadura nos membros inferiores, formigueiro, agulhadas nas pernas e nos pés, sensação de desconforto e dor, e diminuição ou perda de sensibilidade tátil ou térmica, frequentemente nos membros inferiores. A avaliação e rastreio dos pacientes diabéticos é fundamental dado que a ausência dos sinais e sintomas típicos da neuropatia diabética não exclui a presença da mesma. Esta pode conduzir diretamente a uma perda total de sensibilidade [5].

Tabela 2.1: Quadro de classificação da neuropatia diabética. Adaptado de [5]

| <b>Classificação da Neuropatia Diabética</b> |
|--|
| Polineuropatias simétricas generalizadas     |
| Sensitivo-motora (crónica)                   |
| Sensitiva aguda                              |
| Autonómica                                   |
| Neuropatias focais e multifocais             |
| Craniana                                     |
| Radiculoneuropatia toraco-lombar             |
| Focal dos membros                            |
| Motora proximal (amiotrofia)                 |

## 2.2 Análise Clínica do Pé Diabético

A identificação de pacientes diabéticos com risco de úlceras neuropáticas nos pés e amputação é altamente desejável. Para isso, são realizados essencialmente quatro tipos de testes pelos médicos por forma a avaliar a presença do pé diabético. Estes podem ser testes de deteção de pressão, deteção de vibração, sensibilidade térmica ou sensibilidade tátil [6].

Para a realização de testes de deteção de pressão, os procedimentos internacionais recomendam a prática do conhecido método do monofilamento de Semmes-Weinstein (MSW), utilizado para testar a sensação de toque em pontos plantares pré-definidos. É considerado um teste não invasivo, de baixo custo, rápido e fácil de aplicar, frequentemente usado em testes clínicos e auto-avaliação de rotina [7]. A perda da capacidade de detetar a sensação de pressão em um ou mais locais anatómicos na superfície plantar associa-se à perda da função nervosa de fibras grandes, podendo originar úlceras nos pés e amputação de membros inferiores em pacientes diabéticos [8, 9]. A Figura 2.1 apresenta um monofilamento típico utilizado na avaliação da deteção de pressão da superfície plantar.



Figura 2.1: Monofilamento de Semmes-Weinstein (MSW) de 10 g [10]

Na realização dos testes de percepção vibratória é utilizado um diapasão de 128 Hz, como o representado na Figura 2.2, dado que torna o teste económico e fácil de realizar [5]. Nesta avaliação, o examinador segura um diapasão na ponta do dedo do pé durante 5 segundos. Se o paciente sentir vibração inicialmente, bem como ao fim dos 5 segundos, considera-se o diagnóstico de sensação de vibração normal. Se o paciente detetar sensação vibratória no início, mas não após os 5 segundos, considera-se sensação de vibração anormal. Por último, se o paciente não revelar sensação vibratória em nenhum dos momentos, considera-se sensação de vibração ausente [9].



Figura 2.2: Diapasão com cursor de 128 Hz [11]

No que respeita aos testes de sensibilidade térmica, afirma-se que as complicações no pé diabético se encontram frequentemente relacionadas com a distribuição da temperatura na região plantar [12]. Estudos clínicos sobre a tarefa de monitorização doméstica da temperatura plantar do pé indicam que a avaliação e tratamento atempados de pacientes onde se verificam diferenças de temperatura superiores a 2,2 °C entre uma região do pé e a mesma região do pé contralateral, pode prever complicações no pé diabético [12, 13].

Por último, os testes de sensibilidade tátil encontram-se associados ao método MSW e deteção vibratória, fazendo parte de alguns protocolos de avaliação da sensibilidade cutânea. Para a sua realização é frequentemente utilizado o método de discriminação de dois pontos, que permite avaliar a sensibilidade cutânea da superfície plantar através do uso de um discriminador. Tipicamente são utilizados discriminadores de dois pontos, como o que se apresenta na Figura 2.3, com medidas de 1 a 25 mm. Este aparelho é posicionado perpendicularmente à superfície plantar por forma a que as duas pontas toquem no pé ao mesmo tempo. De seguida, o paciente é questionado sobre a deteção de sensação de toque do respetivo equipamento. Cada distância entre as pontas é testada três vezes aleatoriamente, considerando-se como resposta de menor distância percebida entre os dois pontos aquela que apresentar, no mínimo, duas respostas corretas [14].

Dos quatro rastreios apresentados para o apoio na avaliação da sensibilidade



Figura 2.3: Discriminador de 2 pontos - Touch Test [15]

cutânea do pé diabético, a fim de prevenir complicações que desse diagnóstico possam advir, importa salientar um em particular: o teste de detecção de pressão com recurso ao monofilamento de Semmes-Weinstein (MSW). Este é o método de avaliação que se pretende automatizar na fase de desenvolvimento do projeto, daí a importância em estudá-lo com detalhe.

### 2.2.1 Avaliação da Sensibilidade Cutânea Utilizando o Monofilamento de Semmes-Weinstein

O MSW é utilizado com a finalidade de avaliar a capacidade de detetar a sensação de pressão em um ou mais locais anatómicos na superfície plantar do pé em pacientes diabéticos, procurando assim prever o desenvolvimento de úlceras nos pés [7]. Com vista a estudar e clarificar o funcionamento do projeto a desenvolver na fase de implementação, apresenta-se de seguida o método do MSW, expondo para isso todo o procedimento que lhe está subjacente. É fundamental entender todos os passos envolventes na avaliação da sensibilidade plantar com recurso ao método do MSW, uma vez que este projeto surge com a finalidade de automatizar e apoiar clinicamente a realização do presente modelo de avaliação do pé diabético.

Assim, relativamente à sua composição sabe-se que o MSW é composto por fios de náilon monofibra calibrados, frequentemente identificado através de uma numeração compreendida entre 1,65 e 6,65 [7]. Quanto maior for o valor do filamento, mais rígido e difícil de dobrar se torna, sendo o mais comum e recomendado para diagnosticar a neuropatia periférica o monofilamento 5,07/10 g, onde é necessária uma força de 10 g para que se torne possível dobrar ou torcer o mesmo [7, 9, 8].

No que às condições ambientais diz respeito, aquando da realização da avaliação utilizando o método do MSW, exige-se que seja garantido um ambiente

tranquilo e relaxado. Para além disso, o paciente deve ser posicionado por forma a ser incapaz de ver onde e quando lhe está a ser pressionado o monofilamento. Garantidas as condições apresentadas, recomenda-se que a primeira aplicação de pressão seja feita na parte interna do pulso para que o paciente saiba o que esperar. Deve ser aplicada uma força suficiente para fazer com que o monofilamento dobre ou entorte cerca de 1 cm, tal como representado na Figura 2.4 [2].

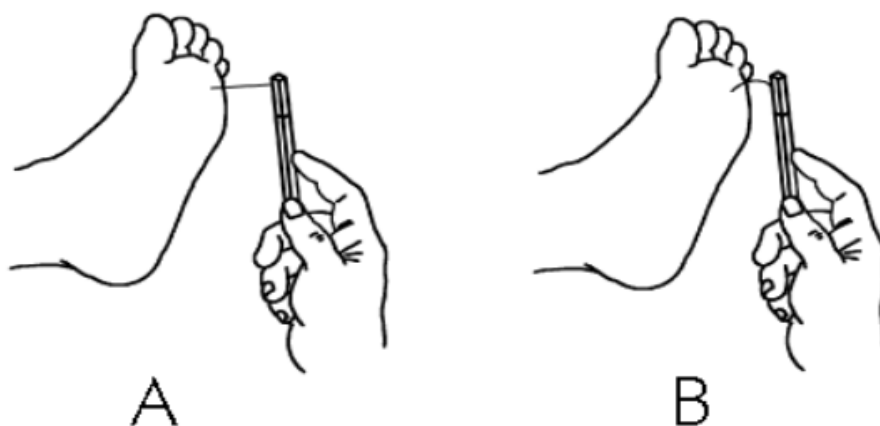


Figura 2.4: A - Monofilamento relaxado; B- Monofilamento com torção de 1 cm [2]

Seguidamente apresentam-se os sete passos envolvidos no procedimento referente à avaliação da sensibilidade cutânea, com recurso ao método do MSW [16].

**Passo 1:** Lavar as mãos e calçar luvas limpas. Devem ser usadas luvas limpas sempre que existir uma área aberta, secreção ou erupção na zona do pé ou tornozelo.

**Passo 2:** Pedir ao paciente para remover as meias e os sapatos de ambos os pés.

**Passo 3:** Explicar o procedimento ao paciente e mostrar o monofilamento.

**Passo 4:** Tocar com o monofilamento no braço ou mão do paciente para que entenda o que esperar quando se iniciar o teste de monofilamento.

**Passo 5:** Fazer com que o paciente feche os olhos. Quando este sentir o monofilamento a tocar o pé deve responder “sim”.

**Passo 6:** Segurar o monofilamento perpendicularmente ao pé e com um movimento suave e constante, tocar na pele até que o monofilamento dobre aproximadamente 1 cm. Segurá-lo contra a pele por aproximadamente 2 segundos.

**Passo 7:** Testar aleatoriamente 10 locais em cada pé, conforme indicado na Figura 2.5. A seleção aleatória dos locais de teste impedirá que o paciente antecipe

a próxima área de teste. Se houver úlcera, calo ou cicatriz no pé, aplicar o monofilamento numa área adjacente e nunca diretamente. Se o paciente apresentar os dedos dos pés amputados, testar os máximos locais restantes possíveis.

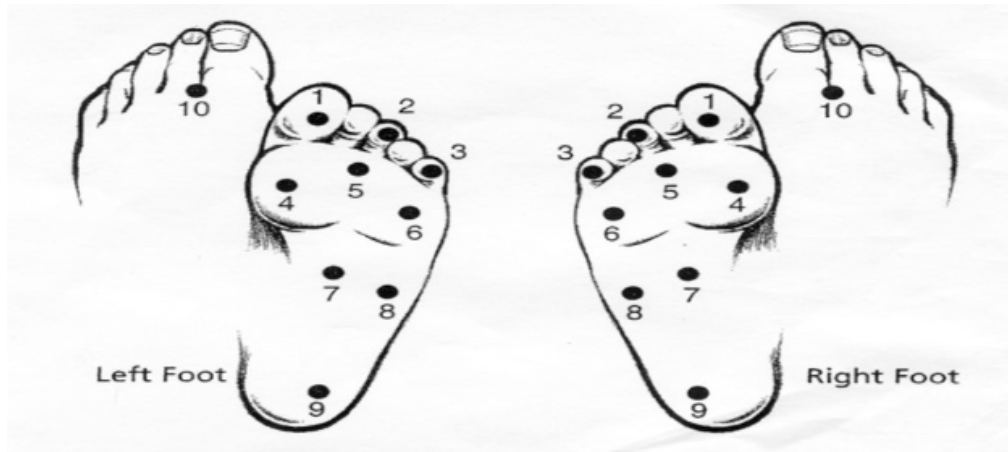


Figura 2.5: Pontos pré-definidos utilizados na avaliação da sensibilidade cutânea através do método do MSW [2]

Com base no resultado final do exame realizado, se todos os pontos são testados e o paciente sente o monofilamento em cada uma das áreas, então não existe registo de perda de sensibilidade. Por outro lado, se o monofilamento não for sentido numa área do pé, isso indica perda de sensação de proteção naquela zona em específico, sendo necessário encaminhamento médico [16].

Com o resultado do teste do MSW é possível determinar o risco do paciente, permitindo assim determinar a necessidade de exigir um exame mais abrangente [2].

A Tabela 2.2 refere as quatro categorias de risco usualmente atribuídas consoante o resultado obtido com o MSW, bem como quais as ações que devem ser executadas face a cada situação. Em suma, os quatro riscos que podem ser atribuídos denominam-se e ordenam-se na sua forma crescente de importância como baixo, médio, alto ou de emergência. O baixo risco é atribuído a pacientes com o melhor resultado possível na realização do teste, sendo que se regista sensação de pressão em todos os pontos plantares pré-definidos. A emergência é atribuída a pacientes com o pior cenário, onde a deteção de sensação de pressão durante a realização da avaliação é inexistente [2].

Tabela 2.2: Categorização de risco face ao resultado do MSW. Adaptado de [2]

| Risco       | Observação  | Ação                                      |
|-------------|---|---|
| Baixo Risco | Sensação normal e pulsos palpáveis  | Avaliação anual do pé.<br>Educação do pé  |
| Médio Risco | Neuropatia, pulsos ausentes ou fatores de risco (calçado de baixa qualidade, mau controlo diabetes) | Consultar podologista.<br>Educação do pé  |
| Alto Risco  | Neuropatia, pulsos ausentes, deformidade do pé ou espessamento da pele                              | Consultar podologista.<br>Educação do pé  |
| Emergência  | Úlceras, inchaço ou descoloração  | Acompanhamento permanente do pé diabético |

### 2.3 Sistemas Automatizados de Apoio à Análise Clínica

A deteção precoce de complicações no pé diabético pode proteger pacientes de qualquer diagnóstico perigoso que se desenvolva posteriormente, prevenindo cenários de amputação dos membros inferiores. Para isso, são usualmente desenvolvidos projetos que têm a finalidade de criar, testar e estudar sistemas dedicados a automatizar os rastreios que se realizam. De seguida expõem-se algumas técnicas e tecnologias utilizadas na atualidade. De entre os quatro testes expostos (pressão, vibração, térmico e tátil), os que apresentam maior viabilidade na tarefa de automatizar o processo são os de deteção de pressão e sensibilidade térmica, sendo o segundo teste o que se apresenta com maior foco ao nível da investigação e desenvolvimento dos últimos anos.

No que respeita ao teste de deteção de pressão recorrendo ao MSW, é frequente o desenvolvimento e estudo de sistemas robotizados capazes de auxiliar na tarefa de avaliação da sensibilidade cutânea. Nestes sistemas, é comum o desenvolvimento de aplicações que permitem transferir remotamente os dados recolhidos durante a realização do teste, tornando possível diagnosticar a doença em contexto de telemedicina [17, 18].

Para a realização do teste de sensibilidade térmica é comum o recurso à técnica de termografia, considerada uma modalidade promissora em sistemas de monitoramento inteligente por telemedicina [13]. Diferenciam-se duas tecnologias: a termografia de cristal líquido e a termografia infravermelha. A primeira corresponde a uma representação de cor proporcional à temperatura da superfície do pé

em contacto com o cristal líquido. A segunda corresponde à aquisição de imagens térmicas com base no calor emitido pelo corpo [12].

A termografia infravermelha é classificada como não invasiva, sendo considerada, de entre as duas apresentadas, a melhor tecnologia a explorar em contexto de telemedicina, no que respeita a análise térmica do pé diabético [12, 13]. A título ilustrativo, a Figura 2.6 representa um exemplo típico de uma imagem térmica plantar combinada do pé direito e esquerdo, capturada com o dispositivo de imagem térmica.

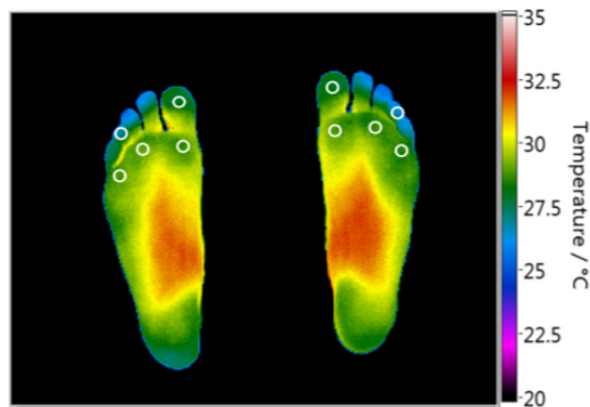


Figura 2.6: Exemplo típico de uma imagem térmica plantar combinada do pé direito e esquerdo, capturada com o dispositivo de imagem térmica [19]

Alguns investigadores dedicam-se a projetar e estudar modelos de deteção automática de complicações do pé diabético recorrendo a processamento de imagens térmicas. Como *hardware* exploram-se as mais variadas tecnologias, desde dispositivos de imagem térmica conectados a *smartphones* a termómetros infravermelhos portáteis [12, 19]. Uma igual preocupação passa por procurar entender qual a fiabilidade deste tipo de sistemas de análise automatizada, testando-os em ambientes controlados e não controlados [20].

### 2.3.1 Exemplo de Sistema Robotizado de Apoio à Análise da Sensibilidade Cutânea do Pé Diabético

Com o intuito de automatizar o teste do MSW, um grupo de investigadores - da Universidade Mahidol, Tailândia e da Universidade Médica do Norte do Estado, Nova York - dedica-se ao desenvolvimento de protótipos de sistemas robóticos para o rastreamento da neuropatia diabética. Torna-se interessante analisar com maior detalhe os mesmos dada a sua semelhança quanto ao seu objetivo final, quando comparado com o objetivo proposto na presente dissertação.

Nestes sistemas destacam-se essencialmente o desenvolvimento de *software*, um controlador e um monofilamento robótico. A Figura 2.7 ilustra a interação entre as várias partes envolvidas.

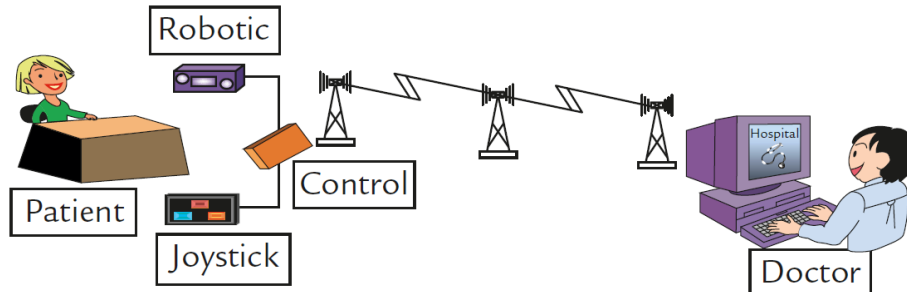


Figura 2.7: Diagrama elucidativo das várias partes envolvidas no protótipo exposto [18].

Como *software* é comum o desenvolvimento de um programa para controlar e comandar a ação do monofilamento robótico, sendo enviados os respetivos comandos pelo controlador. Este *software* é responsável por receber a resposta enviada pelo paciente, através de um *joystick*, e armazenar os dados do mesmo, bem como os respetivos resultados do teste, numa base de dados. Inclui ainda o desenvolvimento de uma interface gráfica com a finalidade de apresentar ao médico os respetivos dados do paciente, facilitando assim a tarefa de avaliar o rastreio realizado e dele retirar conclusões. A Figura 2.8 apresenta um exemplo de uma interface gráfica desenvolvida com essa finalidade.

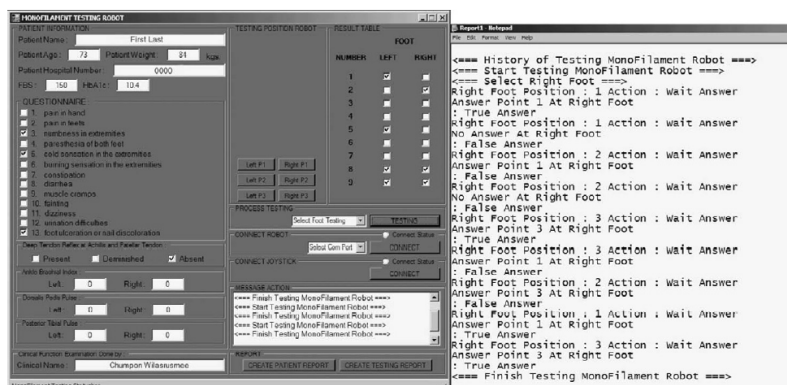


Figura 2.8: Interface Gráfica para controlar e comandar o monofilamento robótico e armazenar os dados do paciente [17]

O controlador é um sistema eletrônico composto por um microcontrolador. Este é responsável pela troca de informação entre a interface gráfica e o monofilamento robótico. Recebe comandos do *software* e envia os mesmos ao monofilamento robótico para que sejam executados. Em contrapartida, envia para a interface gráfica as respostas do paciente, realizadas por meio de um *joystick*, para que sejam armazenadas numa base de dados e consultadas remotamente pelo médico, aquando da definição do diagnóstico final [2].

O monofilamento robótico consiste no desenvolvimento de uma máquina responsável por controlar o monofilamento, realizando o movimento de tocar no pé do paciente quando recebe o comando enviado pelo controlador [17]. A Figura 2.9 ilustra um exemplo de protótipo desenvolvido.

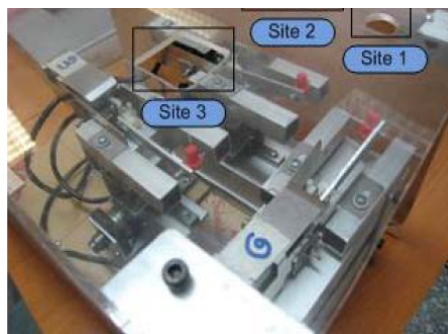


Figura 2.9: Protótipo de um monofilamento robotizado [17]

Para direcionar e posicionar o monofilamento robótico nos respetivos pontos plantares pré-definidos para a avaliação segundo o MSW, o médico tem a possibilidade de controlar os necessários movimentos em torno dos eixos  $x$  e  $y$  remotamente [17], tal como ilustrado a vermelho na Figura 2.10.

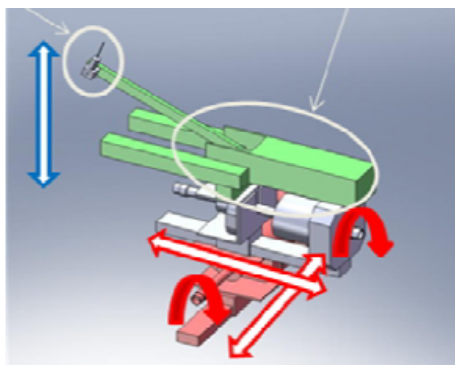


Figura 2.10: Modelo do movimento manual (seta vermelha) e movimento mecânico (seta azul) para um dos três pontos plantares utilizados pelo protótipo [17]

Um das limitações encontra-se no facto de apenas se testarem três dos dez pontos plantares pré-definidos recomendados no método do MSW, bem como na necessidade observada em proceder a um ajuste quanto à forma e superfície do monofilamento robótico de modo a melhor se ajustar aos diferentes pacientes. No entanto, é de salientar a sua conquista no que respeita ao seu enquadramento na telemedicina e envio remoto de dados [17].

## 2.4 Sumário

Neste capítulo definiu-se a diabetes, apresentando-a como uma doença metabólica caracterizada pelo descontrolo dos mecanismos de regulação da glicemia. Foram distinguidos os vários tipos de pacientes diabéticos que se podem diagnosticar consoante a sua carência face à presença de insulina, bem como as diversas complicações que se podem originar.

Dentro das muitas complicações, explorou-se uma em particular, a neuropatia diabética. É neste grupo que se insere o diagnóstico do pé diabético, foco de estudo face ao propósito do projeto que se apresenta, que consiste no desenvolvimento de um sistema automatizado de apoio à análise clínica da sensibilidade cutânea.

Para avaliar a sensibilidade cutânea do pé diabético por forma a mitigar as consequências subjacentes a ele, nomeadamente a necessidade de amputação, utilizam-se essencialmente quatro tipos de rastreio: pressão, térmico, vibratório e tátil. Para o teste de deteção de pressão, entidades internacionais recomendam o método do monofilamento de Semmes-Weinstein (MSW). Sendo esse o método que se pretende reproduzir na fase de desenvolvimento do projeto, expôs-se todo o procedimento a ele inerente.

Por fim, foram apresentadas as principais técnicas e tecnologias utilizadas nos dias de hoje que visam ajudar na automatização dos rastreios realizados pelos profissionais de saúde.

## Capítulo 3

---

# Sistemas de Visão Artificial

---

*Com o intuito de enquadrar o leitor no tema da visão artificial, justificando simultaneamente a razão inerente à decisão da sua utilização neste projeto, torna-se interessante estudar e salientar as suas principais características, dedicando-lhe por esse motivo o presente capítulo. Será por isso apresentada a arquitetura geral de um sistema de visão computacional, seguindo-se a exposição de técnicas de aquisição, pré-processamento e processamento de imagem utilizadas na atualidade, assim como ferramentas de software open source disponíveis para o desenvolvimento de aplicações.*

### 3.1 Sistemas de Visão Computacional

Entende-se por visão computacional a transformação de dados de uma câmara fotográfica ou de vídeo numa decisão ou nova representação. Todas essas transformações são feitas para atingir um objetivo específico. Uma decisão pode significar uma conclusão do que se apresenta na imagem, ao passo que uma nova representação pode significar transformar uma imagem colorida numa imagem em tons de cinza, ou ainda traduzir o movimento da câmara numa sequência de imagens [21].

Um sistema de visão computacional apresenta tipicamente a arquitetura representada na Figura 3.1, sendo composto pelas etapas de aquisição de imagem, pré-processamento, extração de características, deteção e segmentação, e processamento [22, 23].

No que respeita a **aquisição de imagem**, sabe-se que todas as imagens digitais são criadas por um ou mais sensores. Dependendo do sensor utilizado, é possível obter vários tipos de imagens, podendo estas serem bidimensionais, tridimensionais ou sequências de imagens, onde cada pixel representa o valor responsável por uma intensidade de luz numa ou mais faixas de cor [22].

Na fase de **pré-processamento** é necessário verificar se a imagem satisfaz as condições necessárias ao método que se pretende implementar numa dada aplicação. Para isso, utilizam-se várias técnicas, como são exemplo o remapeamento para assegurar um sistema de coordenadas, a redução de ruído para assegurar a minimização de informação indesejada/errada e o aumento de contraste para assegurar que se detetam informações relevantes [22].

Para a **extração de características** é comum o recurso a características matemáticas que se podem obter numa imagem, como por exemplo deteção de bordas, cantos ou pontos, textura, formato e movimento [22].

A **deteção e segmentação** corresponde a uma parte do processo onde se toma uma determinada decisão em relação às regiões de interesse que serão processadas no futuro. Nesta fase procede-se à seleção de regiões de interesse específicas e segmentação das mesmas por forma a detetar os objetos de interesse [22].

Por último, na etapa de **processamento** a entrada é definida como um conjunto pequeno de dados. Este processo caracteriza-se pela verificação da satisfação dos dados, pela estimativa de parâmetros sobre a imagem e pela classificação dos objetos detetados em diferentes categorias, que resultaram numa ação final [22]. Em suma, corresponde a uma etapa de reconhecimento e interpretação [23].

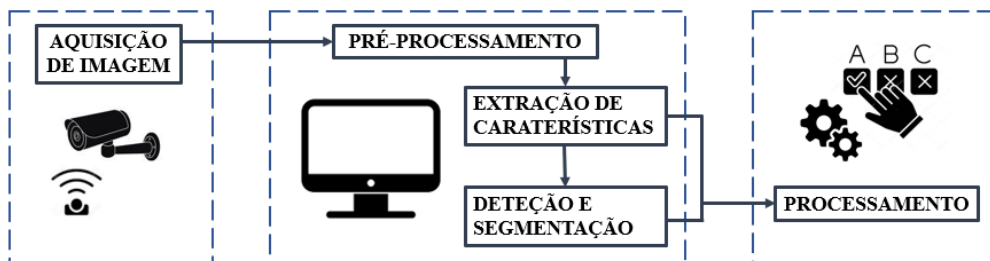


Figura 3.1: Arquitetura de um sistema de visão computacional. Adaptado de [22]

### 3.1.1 Aquisição de Imagem

O recurso a sensores de visão ao nível industrial é frequente, nomeadamente em processos onde se exige o reconhecimento automático de objetos a fim de, por exemplo, detetar defeitos na produção [24]. Apresentam-se de seguida alguns destes sistemas a título exemplificativo, com os quais existiu a hipótese de explorar na prática.

O Visor, fabricado pela SensoPart, é um sensor de visão para automação industrial. Possui ferramentas de processamento de imagem configuráveis, bem como filtros de pré-processamento, e a resolução da imagem pode ser dimensionada por meio do seu *software* de análise. A Figura 3.2 apresenta o sistema de

visão que se expõe bem como o *software* de configuração e parametrização que o acompanha [25].

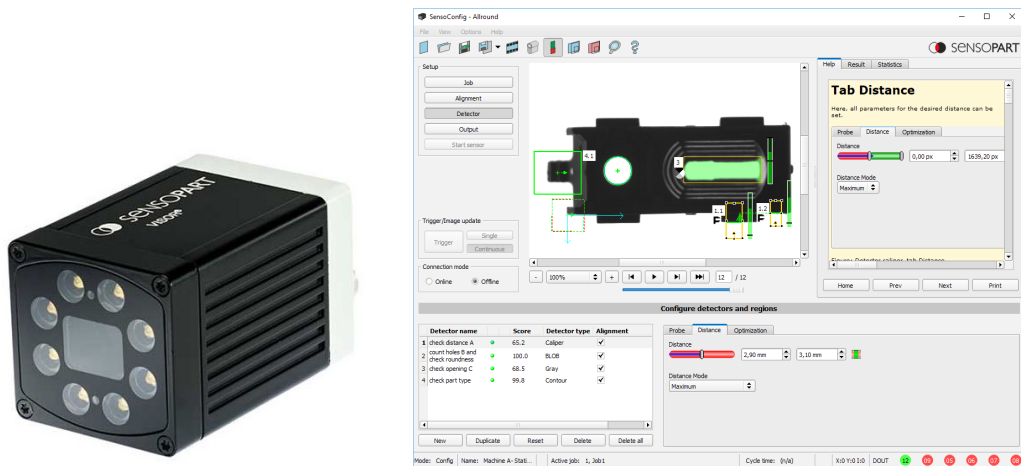


Figura 3.2: Sistema de visão Visor da SensoPart [25]

Um outro exemplo é o sensor de visão para automação industrial Gocator fabricado pela LMI Technologies. Permite o processamento de dados em tempo real, minimizando o atraso entre aquisição de dados e saídas de decisão, e permite que os utilizadores desenvolvam e incorporem ferramentas de medição personalizadas diretamente no *firmware*, ou que utilizem ferramentas nativas integradas. Além disso, oferece suporte integrado para trabalhar diretamente com robôs [24].

Na Figura 3.2 apresenta-se o sistema de visão constituído por uma câmara e o seu respetivo *software*. Este *software* é utilizado para parametrizar e treinar a câmara por forma a que esta se torne capaz de processar a imagem em função do resultado que se pretende.

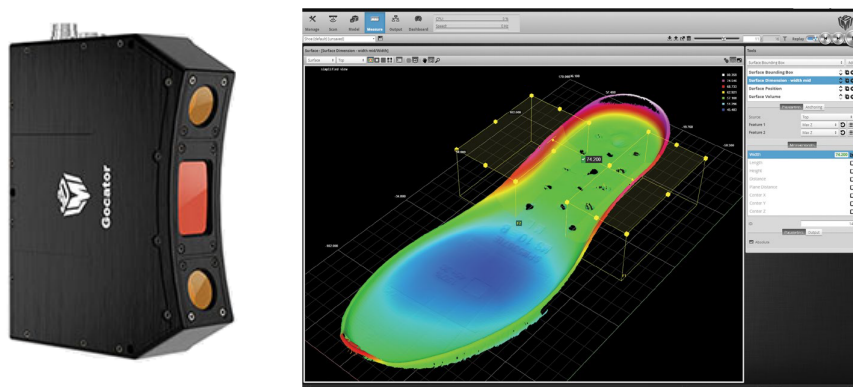


Figura 3.3: Sistema de visão Gocator da LMI Technologies [24]

Para além destas, existem outras câmaras cuja utilização seria igualmente de pertinência no que toca o desenvolvimento de sistemas de aquisição e processamento de imagens, como são exemplo as câmaras térmicas e a câmara OAK—D desenvolvida pela *Open Source Computer Vision Library* (OpenCV). Em relação ao projeto que se apresenta, com utilização de uma câmara térmica, o delinear da superfície plantar também seria possível uma vez que a temperatura corporal é diferente da temperatura ambiente, sendo a utilização desta característica na tarefa de segmentação da superfície plantar interessante. Relativamente à câmara OAK—D, esta apresenta diversas funcionalidades na aquisição e processamento de imagem. Disponibiliza um chamando OpenCV AI kit, um *software open source* de inteligência artificial embebido numa câmara 4k. Com esta, é possível desenvolver sistemas de visão computacional recorrendo à biblioteca OpenCV em paralelo com a criação de redes neuronais, diretamente no dispositivo de visão [26]. A câmara descrita encontra-se na Figura 3.4.



Figura 3.4: Câmara OAK-D desenvolvida pela OpenCV [26]

## 3.2 Técnicas de Pré-Processamento de Imagem

Nos sistemas de visão computacional, uma das etapas requeridas é a de pré-processamento [22]. Esta é responsável por recorrer a um conjunto de técnicas por forma a extrair das imagens informação relevante. Seguidamente apresentam-se algumas das técnicas e processos recorrentes nesta etapa de pré-processamento, nomeadamente no que respeita à calibração de câmaras e aplicação de filtros para remoção de ruído, bem como técnicas de segmentação, reconhecimento e rastreamento de imagens [27].

### 3.2.1 Calibração

Para a utilização de uma câmara como sensor visual, é fundamental que se dominem os seus parâmetros para que seja possível utilizá-la com essa finalidade. Assim, é parte integrante para o desenvolvimento do projeto proposto o conhe-

cimento das várias etapas envolvidas na calibração de câmaras, tal como o seu significado [28].

A calibração de uma câmara permite que seja possível determinar uma relação precisa entre um ponto 3D no mundo real e sua projeção 2D correspondente na imagem capturada pela câmara calibrada. Existem três principais métodos de calibração conhecidos: padrão de calibração, pistas geométricas e *deep learning based* [27].

O método do padrão de calibração é comum quando existe controlo total sobre o processo de imagem, sendo a melhor maneira de realizar a calibração a captura de várias imagens de um objeto ou padrão de dimensões conhecidas, segundo diferentes perspetivas. O método das pistas geométricas é aconselhado quando existem outras pistas geométricas em cena, como linhas retas e pontos de fuga de dimensões conhecidas, que podem ser usados como referência na tarefa de calibração. Por último, o método baseado em *deep learning* é utilizado quando existe pouco controlo sobre a configuração da imagem, tornando-se assim possível obter informações de calibração da câmara usando técnicas de *deep learning* [28].

### 3.2.2 Filtragem de Ruído

A filtragem é uma etapa de pré-processamento recorrente nos processos de visão computacional, sendo esta responsável pela remoção de ruído proveniente do processo de aquisição de imagem. A origem do ruído pode advir de diversas fontes como o tipo de sensor, condições climáticas no momento de aquisição da imagem e posição relativa entre objetos de interesse e a câmara. Assim, é possível afirmar que o ruído pode ser tanto uma interferência no sinal de captura da imagem, como interferências que possam influenciar a interpretação e o reconhecimento de objetos [27].

Para contornar a ação do ruído, são utilizados dois tipos de filtros, os espaciais e os de frequência. Os filtros espaciais atuam diretamente na imagem, ao passo que os filtros de frequência exigem inicialmente que a imagem seja transformada para o domínio de frequência com recurso à transformada de Fourier, sendo posteriormente filtrada nesse domínio, e por fim, transformada novamente para o domínio do espaço [27].

### 3.2.3 Segmentação

O processo de segmentação consiste na partição de uma imagem em regiões ou objetos distintos. Este processo é geralmente guiado por características da região ou objeto, como a cor ou a proximidade, sendo o nível de detalhe do processo de segmentação dependente da tarefa a ser executada e da resolução da imagem. Por exemplo, considerando o cenário onde se pretende procurar uma casa em imagens, se estas forem obtidas ao nível da rua ou por satélites, embora a tarefa

seja a mesma, a resolução é diferente e o tratamento utilizado na segmentação pode também ele diferir por esse motivo [29].

Existem diversas técnicas utilizadas no processo de segmentação de uma imagem, como são exemplo a segmentação por detecção de borda, a segmentação por corte e a segmentação por crescimento de região [29].

**Segmentação por detecção de borda:** uma borda de uma imagem é caracterizada por uma mudança, normalmente abrupta, no nível de intensidade dos pixels. Os detectores de borda são definidos para encontrar este tipo de variação nos pixels, bem como conectá-los quando estes são próximos uns dos outros, formando uma borda ou contorno sobre uma região. As variações nos níveis de intensidade dos pixels podem ser determinadas pelas derivadas de primeira e/ou segunda ordem, sendo para este processo necessário definir máscaras que caracterizem estas variações, que posteriormente são utilizadas na convolução da respetiva imagem [29]. A Figura 3.5 representa um exemplo de segmentação de imagem por detecção de borda utilizando o operador de Canny.

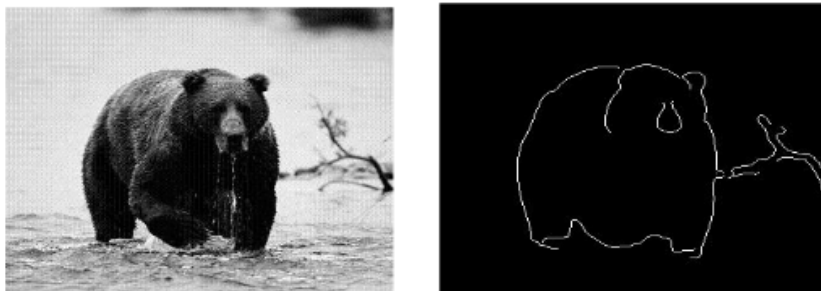


Figura 3.5: Segmentação por borda usando o operador de canny: à esquerda a imagem original e à direita a imagem segmentada [29]

**Segmentação por corte:** é uma técnica de segmentação mais simples quando comparada com outras. Recorre a propriedades intuitivas para criar a imagem segmentada, que resulta da partição de uma imagem diretamente em regiões com base nos valores de intensidade e/ou propriedades desses valores. Este processo passa por verificar no histograma da imagem quantas regiões existem - picos e vales - e segmentar a imagem com base nessa informação [29]. A Figura 3.6 apresenta um exemplo de imagem onde se aplicou a técnica de segmentação por corte, estado representado o seu histograma com um possível local para partição e a imagem binária após o corte.

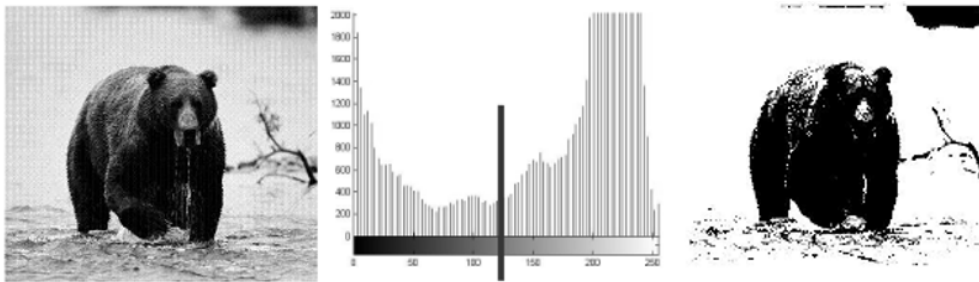


Figura 3.6: Segmentação por corte da imagem: à esquerda imagem original, ao centro histograma com ponto de corte e à direita imagem binária [29]

**Segmentação por Crescimento de Região:** esta técnica permite encontrar regiões diretamente na imagem, agrupando pixels ou sub-regiões em regiões maiores com base em critérios de crescimento pré-definidos. Para isso, é necessário um conjunto de pontos denominados sementes, sendo a partir destes que se formam grupos de pontos utilizando uma vizinhança de influência. Nesta vizinhança são analisadas propriedades e medidas similaridades para determinar se o pixel faz parte ou não de uma dada região. Como propriedades considera-se, de entre outras, a cor, a intensidade de nível de cinza e a textura [29]. A Figura 3.7 apresenta um exemplo de segmentação pelo método de crescimento de região.

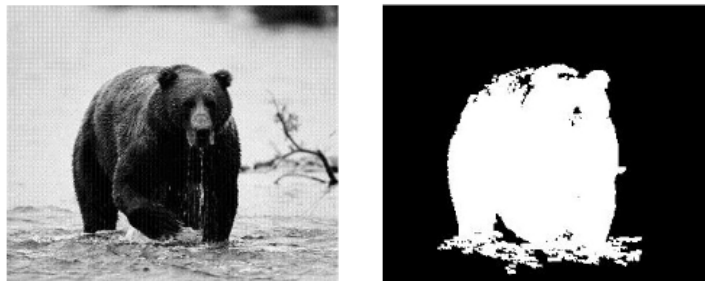


Figura 3.7: Segmentação por crescimento de região.: à esquerda a imagem original e à direita a imagem segmentada [29]

### 3.2.4 Reconhecimento de Padrões

O reconhecimento de objetos é uma das principais funções inerentes aos sistemas de visão computacional e está relacionado diretamente com o reconhecimento de padrões. Um objeto pode ser definido por um ou mais padrões, como textura, forma, cor e dimensão, e o reconhecimento individual de cada um destes padrões pode facilitar o reconhecimento do objeto como um todo [29].

Para o processo de reconhecimento, um sistema de visão necessita de conhecer

os objetos a serem reconhecidos. Para isso, esta base de conhecimento pode ser implementada diretamente no código, através, por exemplo, de um sistema baseado em regras, ou pode ser garantida a partir de um conjunto de amostras dos objetos a serem reconhecidos, utilizando técnicas de *machine learning* [29]. O reconhecimento de padrões pode ser feito com técnicas do tipo estruturais, onde os padrões são descritos de forma simbólica e a estrutura é a forma como estes padrões se relacionam, ou ainda baseado em técnicas que utilizam teoria de decisão, onde os padrões são descritos por propriedades quantitativas utilizadas para decidir se o objeto possui ou não certas propriedades [29].

A Figura 3.8 apresenta um exemplo de aplicação do processo de reconhecimento de padrões. No reconhecimento de faces é utilizado um modelo estrutural por forma a determinar o local mais provável para se encontrar partes de uma face, como boca, olhos e pele. Para o reconhecimento de cada uma destas partes utilizam-se técnicas de teoria de decisão, nomeadamente técnicas de *machine learning* para reconhecimento dos olhos, análise estatística para reconhecimento da pele e critérios de distância mínima para reconhecimento da boca [29].



Figura 3.8: Aplicação da técnica de reconhecimento de padrões: à direita a imagem original e à esquerda a imagem com reconhecimento dos olhos, pele e boca que facilitam o reconhecimento da face [29]

### 3.2.5 Rastreamento

O processo de rastreamento é semelhante ao processo de reconhecimento de padrões, sendo geralmente aplicado a sequências de imagens. Assim, este processo necessita igualmente de uma base de conhecimento sobre o movimento do objeto que está a ser rastreado por forma a minimizar a procura de entre as imagens de uma sequência. Para a implementação deste processo existem diversas técnicas

que podem ser abordadas, tais como: *corner finding*, *subpixel corners*, *optical flow*, *mean-shift* e *camshift* e estimadores [29].

A técnica *corner finding* pressupõe a procura de um dado objeto de interesse em sequências de imagens num vídeo, com base em pontos diferenciados numa imagem, passíveis de serem novamente encontrados em imagens subsequentes. A técnica *subpixel corners* é utilizada quando se pretende conhecer com maior precisão a localização de determinados detalhes numa imagem, sendo frequentemente utilizada na calibragem de câmaras. No que respeita à técnica *optical flow*, importa salientar que esta possibilita a identificação de movimento entre sequências de imagens sem que se conheça a priori o conteúdo das mesmas. O *mean-shift* e *camshift* é um algoritmo desenvolvido para o rastreamento de cor e rastreamento de faces que recorre a estatísticas para procurar o pico entre distribuições de probabilidade em gradientes de densidade. Por último, os **estimadores** são algoritmos capazes de estimar, por exemplo, a localização de uma pessoa ou objeto em movimento numa sequência de imagens [29].

### 3.3 Ferramentas de Processamento de Imagem

Existem bibliotecas desenvolvidas com a finalidade de auxiliar o desenvolvimento de aplicações de visão computacional e processamento de imagem nas mais variadas linguagens de programação, como C, C++, Python, Java e MATLAB. Exemplo das mesmas são as bibliotecas OpenCV e Scikit-Image [21, 30].

O OpenCV é uma biblioteca de *software* de visão computacional *open source* que surgiu de uma iniciativa da Intel Research com o intuito de fornecer uma infraestrutura comum a aplicações de visão artificial. É escrito nativamente em C e C++, possui interfaces C++, Python, Java e MATLAB, e é compatível com vários sistemas operativos como Windows, Linux, Android e Mac OS, sendo amplamente utilizado por empresas, investigadores e órgãos governamentais [21, 31].

O Scikit-Image é outra biblioteca de processamento de imagens *open source* desenvolvida para processamento de imagem na linguagem de programação Python. Inclui algoritmos para segmentação, transformações geométricas, manipulação do espaço de cores, análise, filtragem, morfologia e detecção de recursos [30].

#### 3.3.1 Open Source Computer Vision Library

O OpenCV foi projetado para eficiência computacional, tendo como foco aplicações de tempo real, dado que, por ser nativo em C e C++, consegue aproveitar as vantagens do processamento de vários núcleos [21].

Esta biblioteca é constituída por um conjunto de algoritmos otimizados de visão computacional e *machine learning* que podem ser usados para análise, in-

interpretação e processamento de imagens em tempo real, como por exemplo detecção e reconhecimento de rostos, identificação de objetos, classificação de ações humanas em vídeos, rastreamento de movimentos de câmaras ou objetos em movimento, extração de modelos 3D de objetos e identificação de imagens semelhantes segundo uma base de dados [31].

Carateriza-se por ser uma ferramenta que suporta o desenvolvimento de projetos que envolvam manipulação de imagens, contribuindo assim para aumentar a confiança nas aplicações desenvolvidas [32].

Apresenta-se na Figura 3.9 um exemplo de código desenvolvido em Python. Neste exemplo recorre-se à ferramenta OpenCV, que permite realizar a identificação dos rostos presentes numa imagem e sinalizá-los desenhando um quadrado por cima das respetivas regiões.

```

1  import numpy as np
2  import cv2 as cv
3
4  face_classifier = cv.CascadeClassifier( 'haarcascade_frontalface_default.xml')
5  image = cv.imread('./image2.jpg')
6  image_gray = cv.cvtColor(image, cv.COLOR_BGR2GRAY)
7
8  faces = face_classifier.detectMultiScale(image_gray, 1.3, 5)
9
10 for(x,y,w,h) in faces:
11     cv.rectangle(image, (x,y), (x+w,y+h), (255,0,0), 2)
12
13 cv.imshow('imagem', image)
14 cv.waitKey(0)
15 cv.destroyAllWindows()

```

Figura 3.9: Excerto de código exemplo para identificação de faces numa imagem com recurso à biblioteca OpenCV

Na Figura 3.10 é possível comparar a imagem original e o resultado obtido com a utilização do algoritmo de reconhecimento de faces disponível no OpenCV.

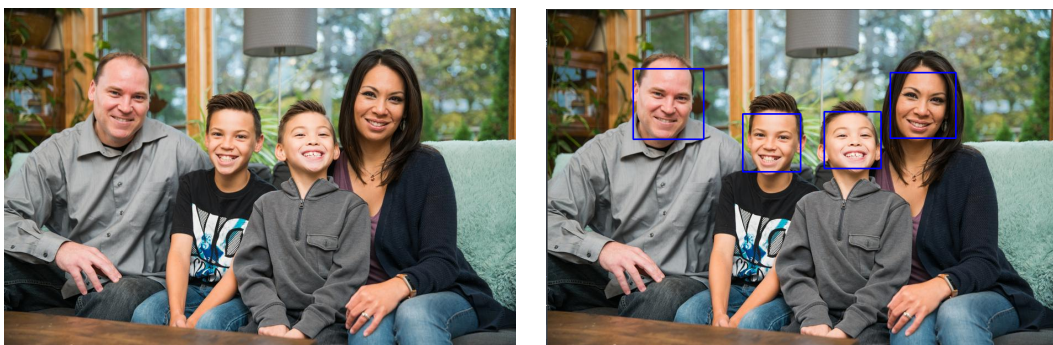


Figura 3.10: Imagem original utilizada para teste do código exemplo desenvolvido com o OpenCV e resultado obtido [33]

Este exemplo surge como apresentação da biblioteca OpenCV, recurso selecionado para a fase de desenvolvimento referente ao sistema de aquisição e processamento de imagens plantares adquiridas por meio de um sistema de visão.

### **3.4 Sumário**

Neste capítulo apresentou-se a arquitetura geral de um sistema de visão computacional, seguindo-se uma breve passagem expositiva de sistemas de aquisição de imagem, realçando para esse fim um conjunto de sensores e câmaras disponíveis no mercado.

Além disso, expôs-se o processo referente à tarefa de calibração de câmaras, e explicou-se o princípio de funcionamento das principais técnicas de pré-processamento de imagens, como a filtragem de ruído, a segmentação de imagens, o reconhecimento de padrões e o rastreamento de sequências de imagens de um vídeo.

Por último, foram apresentadas ferramentas de processamento de imagem frequentemente utilizadas no desenvolvimento de sistemas computacionais, dando ênfase à biblioteca OpenCV disponível para esse fim e eleita como recurso para o desenvolvimento do projeto que se apresenta.



## Capítulo 4

---

# A Robótica

---

*A robótica desempenha um papel fulcral no que respeita o apoio à medicina. Neste capítulo procura-se enquadrar a temática da robótica colaborativa como recurso na realização de tarefas do quotidiano, tendo em vista a melhoria das condições de trabalho dos profissionais de saúde. Será ainda apresentado o modelo de robô colaborativo disponível para a realização da fase de desenvolvimento do projeto, onde se propõe o desenvolvimento de um sistema robotizado de apoio à análise clínica da sensibilidade superficial plantar de pacientes diabéticos.*

### 4.1 Definição e Classificação

Os robôs são constituídos por vários corpos conectados por articulações que exigem o estudo das relações espaciais entre esses mesmos corpos e os seus movimentos, e que permitem realizar uma série de ações automaticamente, especialmente se programadas por um computador [34, 35]. Um robô é considerado um sistema de controlo automatizado com três ou mais eixos, programável e reprogramável sem que haja a necessidade de alterações físicas, e adaptável a diversas aplicações como pintura, selagem, soldadura e embalagem [36].

Os robôs são especificados pela sua carga útil - que corresponde ao peso que este consegue carregar -, área de trabalho - região que consegue cobrir -, alcance - distância que pode ser alcançada pelo punho -, velocidade máxima e repetibilidade - capacidade de se reposicionar repetidamente sobre o mesmo ponto programado. Mecanicamente são constituídos por sequências de corpos rígidos denominados por elos (*links*) que se encontram acoplados entre eles por articulações denominadas juntas (*joints*). A Figura 4.1 ilustra a constituição mecânica descrita [37].

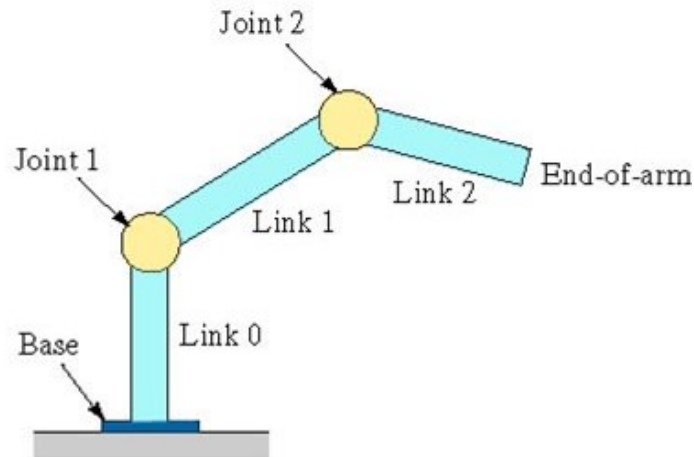


Figura 4.1: Esquema ilustrativo da constituição mecânica de um braço robótico: elos e juntas [38]

Os robôs classificam-se pela sua estrutura mecânica, estando divididos essencialmente em cinco tipos: lineares (como são exemplo os cartesianos), *Selective Compliance Assembly Robot Arm* (SCARA), articulados, paralelos e cilíndricos. Um **robô cartesiano** é um robô cujo braço possui três juntas prismáticas e cujos eixos coincidem com um sistema de coordenadas cartesiano, um **robô SCARA** é um robô que possui duas juntas rotativas paralelas para fornecer complacência num plano, um **robô articulado** é um robô cujo braço tem pelo menos três juntas rotativas, um **robô paralelo** é um robô cujos braços têm juntas prismáticas ou rotativas concorrentes, e por último, um **robô cilíndrico** é um robô cujos eixos formam um sistema de coordenadas cilíndricas [39].

A Figura 4.2 ilustra três tipos de robô. O cartesiano é utilizado em aplicações de manuseamento e montagem, o SCARA é tipicamente utilizado em aplicações de *pick and place* e montagem, e o articulado utilizado em praticamente todo o tipo de aplicações industriais [36].

Uma célula robotizada é composta por um manipulador utilizado para realizar a tarefa que se pretende, um controlador responsável por controlar o manipulador, e uma consola de programação para programar e controlar as tarefas. Além disso, é constituída por um conjunto de periféricos que possam ser necessários, como por exemplo elementos de segurança ou sensores necessários à realização das tarefas. Relativamente à ferramenta acoplada ao manipulador, esta varia consoante a aplicação que o robô venha a realizar [43].



Figura 4.2: Exemplos de robôs: Cartesiano [40], SCARA [41] e Articulado [42]

## 4.2 Robótica Colaborativa

A robótica colaborativa resulta da evolução da robótica tradicional. Os robôs colaborativos, usualmente designados por *cobots* por abreviação da designação inglesa *collaborative robot*, quando comparados com robôs industriais, são mais leves, compactos, fáceis de programar e instalar, sendo tendencialmente utilizados como complementos de máquinas e soluções [44].

São seguros dado que possibilitam partilhar o mesmo espaço com humanos sem a necessidade de vedações, e integram funções de segurança limitadoras de força e potência em concordância com a Norma ISO-10218 e com as diretrizes TS-15066 no que respeita a avaliação de riscos para aplicações colaborativas. Além disso, apresentam formas arredondadas e materiais macios de forma a não magoar o humano em situações de eventuais colisões ocasionais [45, 46].

Por outro lado, são considerados leves quando comparados com robôs industriais, dado serem constituídos por materiais que lhes conferem um baixo peso, compactos, dado serem facilmente transportados e deslocados entre zonas de trabalho dentro da fábrica, e flexíveis, por poderem ser instalados em qualquer orientação ou plataforma móvel - como são exemplo os sistemas elevatórios, os *Automated Guided Vehicles* (AGV) e os eixos lineares [45].

Por último, ao contrário dos robôs industriais que requerem muito espaço no chão de fábrica para serem isolados por meio de sistemas de proteção, os robôs colaborativos podem ser instalados em espaços apertados, e dependendo da aplicação podem dispensar a utilização de sistemas de proteção [45].

São robôs destinados a colaborar ou cooperar com o humano. Dizem-se colaborativos quando interagem diretamente com pessoas num espaço partilhado, e cooperativos quando integrados em espaços onde estão muito próximos de pessoas sem que haja necessidade de interação. Contudo, importa referir que, apesar de com eles os requisitos de segurança se tenham adaptado, é necessária sempre uma avaliação de riscos adequada e cuidada [44].

Surtem como resposta às necessidades exigidas pelo mercado no que toca a as-

petos de flexibilidade e rapidez de implementação e adaptação, quando solicitadas novas soluções [45]. O facto de os produtos serem cada vez mais personalizados e o seu nível de procura ser definido pelos clientes, implica um aumento da necessidade de as indústrias adotarem soluções produtivas que lhes permitam alterar em tempo real o que produzir, em que momentos e em que quantidades, mantendo simultaneamente a sua rentabilidade. Por esse motivo, o recurso a *cobots* permite efetuar rápidas mudanças de produtos e processos, em resposta às flutuações da procura [44, 45].

A colaboração entre o robô e o humano tem-se manifestado em diversas áreas, como são exemplo a logística e as indústrias de serviços voltadas para o consumidor. A razão subjacente à adoção da robótica colaborativa é usualmente o tema da segurança, particularmente em situações onde o humano trabalha nas proximidades ou diretamente com o robô. Para isso, é recorrente o recurso a sensores por forma a controlar a força, evitar colisões e detetar a presença de obstáculos [43].

#### 4.2.1 Aspetos de Segurança

Segundo as normas ISO 10218-2 e ISO/TS 15066 é possível nomear quatro modos de funcionamento colaborativos que, dependendo da exigência da respetiva aplicação e do *design* do sistema robótico, podem ser usados individualmente ou combinados. Esses quatro modos de funcionamento são a paragem de segurança vigiada, o guiamento manual, a limitação de força e de potência, e o monitoramento da distância e da velocidade, que se encontram ilustrados na Figura 4.3.



Figura 4.3: Modos de funcionamento colaborativos: paragem de segurança vigiada, guiamento manual, limitação de força e de potência e monitoramento da distância e da velocidade [47]

No modo **paragem de segurança vigiada**, o robô é parado no espaço colaborativo durante a interação com o operador. Este estado é monitorizado e o acionamento pode continuar ligado. No modo **guiamento manual**, a segurança da colaboração homem/máquina é garantida pelo fato de o robô poder ser conscientemente guiado manualmente, a uma velocidade reduzida e segura. No modo de **limitação de força e de potência**, o contacto físico entre o sistema robótico e o operador pode ocorrer intencionalmente ou inadvertidamente. A segurança

necessária é conseguida pela limitação da potência e da força para valores considerados seguros para evitar ferimentos ou ameaças. A especificação técnica ISO/TS 15066 inclui valores máximos, que não podem ser excedidos na colisão do robô com membros do corpo. Por último, no **monitoramento da distância e da velocidade**, a velocidade e trajetória do robô são monitorizados e adaptados em função da velocidade e da posição do operador no espaço protegido [47].

Considerando o cenário em que a tarefa do robô consiste no manuseamento de uma lâmina, por muito que este seja capaz de desempenhar o que se pretende, deixa automaticamente de ser considerado colaborativo. Assim, os fabricantes, integradores e utilizadores dos *cobots* devem consciencializar-se da importância de considerar tanto a aplicação como o ambiente colaborativo aquando da tarefa de avaliar o seu nível de segurança [43].

Para uma avaliação completa de risco é obrigatório que o sistema se encontre em conformidade com o prescrito nas normas desenvolvidas para o efeito, que são diretrizes criadas a nível europeu para cumprir a legislação europeia [43]. A Figura 4.4 esquematiza os tipos de avaliações de risco requeridos numa análise do nível de segurança. No que diz respeito diretamente ao robô, importa salientar e diferenciar duas normas: a ISO 10218-1 e a ISO 10218-2. A ISO 10218-1 refere-se às normas que se recomendam seguir numa avaliação do nível de segurança do robô isoladamente. A ISO 10218-2 refere-se a uma avaliação completa do nível de segurança referente ao conjunto célula e sistema do robô. Salienta-se ainda a existência das diretrizes ISO/TS 15066, onde se encontram especificados os critérios de avaliação de risco orientados aos robôs colaborativos [46].

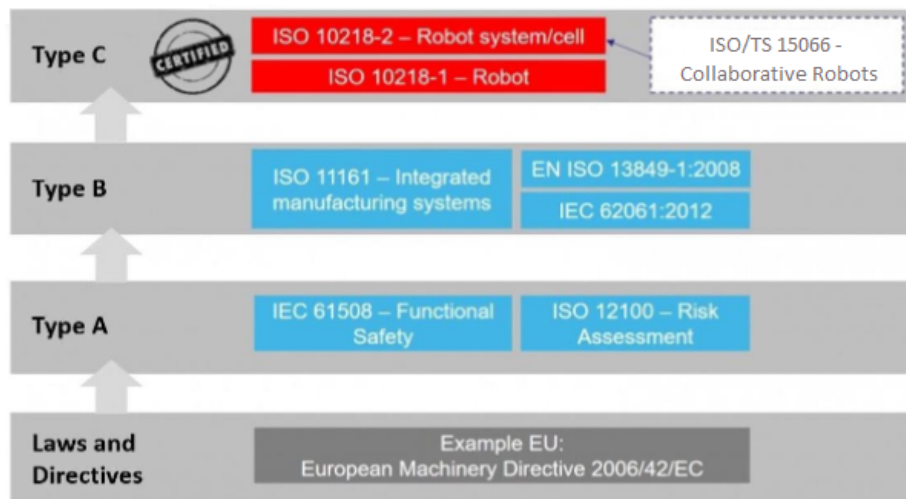


Figura 4.4: Padrões de segurança: diretrizes e normas a seguir numa avaliação do nível de risco de um robô colaborativo [46]

### 4.2.2 Robôs Colaborativos Elite

Os robôs colaborativos da Elite possuem seis graus de liberdade e existem em três modelos: EC63, EC66 e EC612. Na Figura 4.5 é possível visualizar o aspeto físico desta gama de *cobots* [48].



Figura 4.5: Gama de robôs colaborativos Elite [48]

A Tabela 4.1 reúne as principais características dos vários modelos, desde carga útil, alcance, amplitude, repetibilidade e velocidade [48].

Tabela 4.1: Características dos robôs Elite

|                       | <b>EC63</b>     | <b>EC66</b>     | <b>EC612</b>    |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Carga Útil</b>     | 3 kg            | 6 kg            | 12 kg           |
| <b>Alcance</b>        | 624 mm          | 914 mm          | 1304 mm         |
| <b>Amplitude</b>      | $\pm 360^\circ$ | $\pm 360^\circ$ | $\pm 360^\circ$ |
| <b>Repetibilidade</b> | $\pm 0,03$ mm   | $\pm 0,03$ mm   | $\pm 0,03$ mm   |
| <b>Velocidade</b>     | 2,0 m/s         | 2,8 m/s         | 3,2 m/s         |

A programação dos movimentos do robô apresenta a sintaxe referente à linguagem de programação Elite JBI, sendo esta linguagem de programação uma derivação do JBI da Yaskawa Motoman [49, 50].

Relativamente ao modo de programação *online*, esta é possível através do modo *Easy-Teaching* ou através da consola do robô. No modo de *Easy-Teaching* estão disponíveis dois botões na flange, um que permite libertar os travões para mover o robô manualmente e outro que permite gravar um conjunto de posições discretas ou movimentos contínuos. Os movimentos são traduzidos num ficheiro JBI, sendo que, no caso de se gravarem pontos discretos, é possível editar esse mesmo ficheiro para alterar ou acrescentar novas instruções. Na opção referente ao uso da consola de programação, é possível criar programas responsáveis por

executar movimentos onde são adicionadas instruções, sendo estas criadas a partir de formulários onde se apresentam os campos a preencher, bem como um intervalo de valores admissíveis [49].

No que ao modo de programação *offline* se pode referir, é possível utilizar um editor de texto normal, criar programas com as instruções pretendidas, e finalizar a tarefa transferindo o ficheiro para o controlador do robô [49].

Para além da linguagem de programação JBI utilizada no movimento do robô, existe ainda a possibilidade de se desenvolverem *scripts* na linguagem de programação LUA. Estes podem ser usados para chamar rotinas de cálculo numérico ou estabelecer comunicações com o exterior, como por exemplo com sistemas de visão, e podem ser executados simultaneamente com outros programas responsáveis pelo movimento do robô [49, 51].

Tanto o controlador como a flange do robô possuem um conjunto de interfaces com sinais digitais e sinais analógicos. Quanto à compatibilidade com protocolos de comunicação estão disponíveis no controlador ModbusTCP, ModbusRTU (RS485/RS232) e na flange RS485 [48].

Na fase de desenvolvimento e implementação do projeto que se apresenta nesta dissertação será possível recorrer a um robô colaborativo Elite, mais especificamente um EC63.

## 4.3 A Robótica no Apoio à Medicina

O recurso à robótica pode manifestar-se útil em diversas tarefas intrínsecas à medicina. Seguidamente, pretende-se salientar a título exemplificativo aplicações da robótica no apoio a intervenções cirúrgicas, tratamentos de radioterapia, fisioterapia e reabilitação, assistência de enfermagem, e ainda realização de testes COVID-19, tão requisitados neste período de pandemia.

### 4.3.1 Intervenção Cirúrgica Assistida

Quando se faz referência ao recurso a robôs no apoio a intervenções cirúrgicas, o nome que mais se salienta é o do robô da Vinci, desenvolvido pela Intuitive, que se apresenta na Figura 4.6. É um robô controlado remotamente por um médico. A arquitetura do sistema robótico em destaque apresenta um *design* compacto que permite um grau de movimentação dos instrumentos superior quando comparado com os movimentos realizados por um cirurgião numa intervenção convencional. No que ao paciente afeta, permite realizar cirurgias menos invasivas e, por isso, menos traumáticas, possibilitando por esse motivo uma melhor recuperação [52].



Figura 4.6: Visualização do sistema robótico da Vinci Xi numa intervenção cirúrgica de um paciente com cancro gástrico [53]

Este robô é utilizado pelos médicos na realização de variadas cirurgias, como são exemplo as gastrectomias para remoção parcial ou total do estômago [53], as miomectomias robóticas para remoção de miomas [52] e as tireoidectomias para a remoção da totalidade ou de parte da glândula tiróide [54].

#### 4.3.2 Dispositivo Robotizado para Radioterapia

O CyberKnife, fabricado pela Accuray Incorporated, é o primeiro dispositivo de radioterapia totalmente robotizado para o tratamento de tumores benignos e tumores malignos [55]. Utiliza um sistema denominado de terapia de radiação corporal estereotáxica através da orientação de imagem em tempo real, que se baseia no fornecimento de doses de radiação de forma localizada e com uma precisão superior à obtida com radioterapia convencional [56]. A sua flexibilidade no braço robótico permite que se incidam feixes de radiação em todas as direções, focalizando altas doses de radiação no tumor e simultaneamente minimizando a dose incidida aos tecidos saudáveis adjacentes [55].

Na Figura 4.7 apresenta-se um modelo do CyberKnife, frequentemente utilizado nos tratamentos de radioterapia realizados a doentes oncológicos. A sua

aplicação em tratamentos abrange diversos diagnósticos, tais como tumores intracranianos, cancro da próstata, cancro do pâncreas, cancro do fígado e cancro do pulmão [55].



Figura 4.7: Modelo de um CyberKnife [57]

### 4.3.3 Assistente de Enfermagem no Transporte de Pacientes

O transporte de um paciente incapaz de se mover sozinho de uma cama para uma cadeira de rodas, ou vice-versa, é das tarefas mais desafiantes fisicamente dos cuidados de enfermagem [58].

O *Robot for Interactive Body Assistance* (RIBA), representado na Figura 4.8, é um robô assistente de enfermagem desenvolvido por uma parceria japonesa entre o centro de colaboração RIKEN e a Tokai Rubber Industries, Ltd. [59]. Este robô é utilizado para levantar e transferir um paciente entre uma cama e uma cadeira de rodas através de instruções enviadas por um profissional de saúde, por meio de sensores táteis. O contacto entre o robô e o corpo humano é controlado por sensores que visam evitar a possibilidade de causar sensação de dor nos pacientes [58].



Figura 4.8: Transporte de um paciente com um robô assistente de enfermagem RIBA [59]

#### 4.3.4 Exoesqueleto na Reabilitação Locomotiva

Os exoesqueletos são estruturas robóticas que têm como finalidade auxiliar na reabilitação de pacientes que sofrem problemas de locomoção. A Marsi Bionics é uma empresa espanhola de exoesqueletos para reabilitação de marcha, personalizados a cada paciente. Desenvolveram dois modelos de exoesqueletos, os MB Active Knee (MAK) e os Atlas Pediatric Exo (ATLAS)[60].

Os MAK são joelhos robóticos com uma rigidez adaptável às necessidades de cada paciente. Fornecem força, mobilidade e estabilidade necessárias à locomoção e suportam-se de sensores para analisar a marcha do paciente com o intuito de melhorá-la. O ATLAS é um exoesqueleto desenvolvido para a fisioterapia de crianças com doenças neurológicas, como paralisia cerebral, e doenças neuromusculares, como atrofia muscular espinhal e miopatias. Tem com função sustentar uma criança do tronco até aos pés e é composto por oito articulações ativas que fornecem mobilidade total sobre o solo. A Figura 4.9 apresenta os dois exoesqueletos descritos[60].



Figura 4.9: Exoesqueletos MB Active Knee e Atlas Pediatric Exo da Marsi Bionics [60]

Na Figura 4.10 apresenta-se outro exemplo de um paciente tetraplégico que, através de uma estrutura robótica controlada pelo cérebro, conseguiu controlar novamente os seus movimento [61]. Para o controlo deste exoesqueleto foi realizada uma cirurgia através da qual foram colocados dois implantes na superfície do cérebro, cobrindo as partes do cérebro responsáveis pelo controlo de movimentos. Estes implantes servem para ler a atividade cerebral e transmitir instruções para um computador. Seguidamente, por meio de *software*, as ondas cerebrais recebidas pelo computador são transformadas em instruções que servem para controlar o exoesqueleto colocado no paciente. Assim, quando este pensa em andar inicia-se uma cadeia de movimentos no exoesqueleto robótico que resulta no movimento das suas pernas [61].

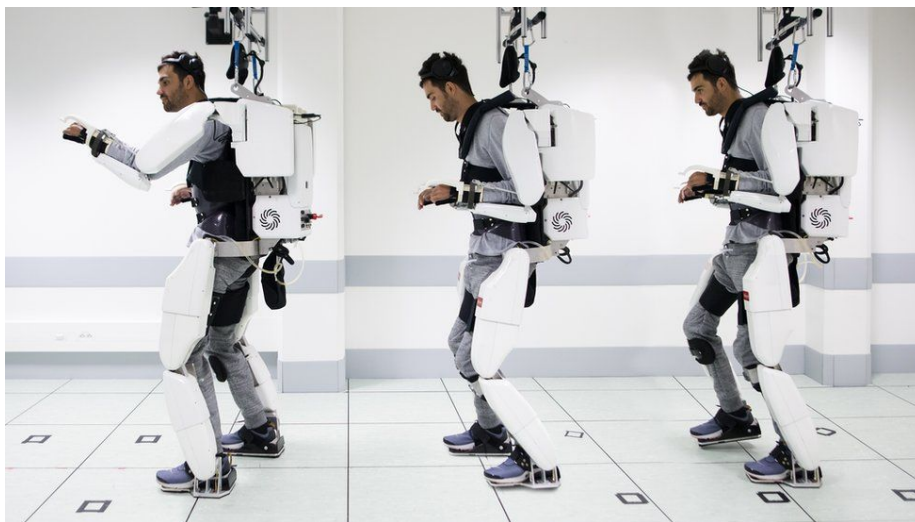


Figura 4.10: Paciente tetraplégico com exoesqueleto controlado pela mente [61]

### 4.3.5 Mobilização Passiva e Ativa Assistida

O recurso a aparelhos na realização de exercícios de reabilitação e fisioterapia é amplamente utilizado por terapeutas na atualidade. São exemplo de aparelhos os artromotores e os dispositivos elásticos para resistência do tornozelo, ambos ilustrados na Figura 4.11 [62].



Figura 4.11: *Kinetec 5190* e dispositivo elástico para resistência do tornozelo [62]

A mobilidade passiva associa-se a exercícios em que o movimento fica restringido à amplitude de movimentos e é produzido unicamente por uma força externa, com pouca ou nenhuma contração muscular voluntária. A força externa pode ter origem na força da gravidade, numa máquina, num terapeuta, ou na própria pessoa que recorre à força de outro segmento corporal [63].

A mobilização ativa assistida consiste na ação de uma força externa, manual ou mecânica, que assiste a realização de um movimento quando um paciente tem diminuição da mobilidade em alguns segmentos corporais. Tipicamente, este consegue iniciar o movimento, no entanto não tem capacidade para alcançar a sua amplitude máxima [63].

O Kinetec é um dispositivo utilizado na área da medicina física e de reabilitação passiva que se foca no tratamento de lesões na região da tibiotársica. Possibilita graduar em amplitude o movimento, permitindo uma flexão plantar de  $40^\circ$ , uma flexão dorsal de  $30^\circ$ , e uma eversão e inversão de  $25^\circ$ . É considerado uma forma segura de mobilização que não requer a presença constante de um profissional de saúde, isto é, pode ser utilizado pelo paciente em sua casa [62].

Os dispositivos elásticos para resistência do tornozelo, utilizados na reabilitação ativa, são um avanço das *thera-bands*. Estas são bandas elásticas utilizadas em treino de fortalecimento muscular. Uma das características destes dispositivos passa pelo facto de apresentarem mais rigor na realização dos exercícios [62].

### 4.3.6 Realização de Teste COVID-19

Neste período de pandemia, a necessidade sem precedentes por testes médicos resultou numa iniciativa da conhecida Universal Robots, que direcionou as suas energias para o desenvolvimento de um robô autónomo capaz de realizar testes COVID-19. Este robô, que se encontra ilustrado na Figura 4.12, foi lançado pela primeira vez na Dinamarca, pela empresa Lifeline Robotics, em março de 2020 [64].



Figura 4.12: Realização de um teste COVID-19 com recurso a um robô colaborativo da Universal Robots [64]

Desenvolvido em colaboração com investigadores em robótica da Universidade do Sul da Dinamarca, o sistema começa com a digitalização do cartão de identificação do paciente, prepara um *kit* de amostra composto por um recipiente com uma etiqueta de identificação, e recolhe a amostra numa zaragatoa. Na recolha da amostra recorre a um sistema de visão por forma a identificar os pontos certos a atingir na garganta do paciente. Seguidamente, coloca a amostra no recipiente que é atarraxado e enviado a um laboratório para análise [64].

## 4.4 Sumário

Neste capítulo procurou-se enquadrar o leitor no tema da robótica, expondo as suas principais características. Expôs-se o que se entende por aplicação e robótica colaborativa como forma justificativa para a escolha de utilização de um robô colaborativo na fase de implementação do projeto, onde se pretende o desenvolvimento de um sistema robotizado de apoio à avaliação da sensibilidade plantar. Apresentou-se ainda o *cobot* da marca Elite disponível para esse fim.

Além disso, expôs-se um conjunto de exemplos práticos onde o recurso à robótica manifesta vantagens no apoio a atividades relacionadas com a saúde humana.

Apresentou-se o robô da Vinci utilizado no apoio a intervenções cirúrgicas, o robô CyberKnife utilizado em tratamentos de radioterapia, o robô RIBA assistente de enfermagem, e o braço robótico da Universal Robots desenvolvido para realizar testes COVID-19.

## Capítulo 5

---

# Arquitetura do Sistema

---

*Este capítulo surge com a finalidade de expor a arquitetura do sistema projetada para a presente dissertação, onde se pretende o estudo e desenvolvimento de um sistema robótico de apoio à análise da sensibilidade plantar de pacientes diabéticos. Serão apresentados os subsistemas envolvidos, quais as suas funcionalidades e que ferramentas e tecnologias se alocaram a cada um.*

### 5.1 Arquitetura Geral

Tendo em vista o desenvolvimento do sistema robótico de apoio à análise da sensibilidade superficial plantar de pacientes diabéticos, recorrendo ao método de MSW, foi idealizado e projetado um sistema com o intuito de responder a todas as funcionalidades e requisitos envolvidos.

Subdividiu-se o sistema em três partes distintas. Uma primeira parte idealizada para o desenvolvimento de um sistema de visão, sendo o mesmo responsável pelo processo de aquisição e processamento de imagens plantares, por forma a detetar o pé e, dentro do mesmo, as coordenadas dos pontos envolvidos na realização do teste do MSW. Uma segunda parte dedicada ao sistema robótico, onde se propõe a utilização de um braço robótico para a realização da tarefa de testar com o monofilamento os pontos determinados pelo sistema de visão. Por último, uma terceira parte para adquirir dados do paciente e armazenar as respostas do mesmo que vão sendo enviadas através do sistema robótico, durante a realização do teste. A Figura 5.1 apresenta o diagrama geral da arquitetura do sistema, onde se salientam os pontos descritos.

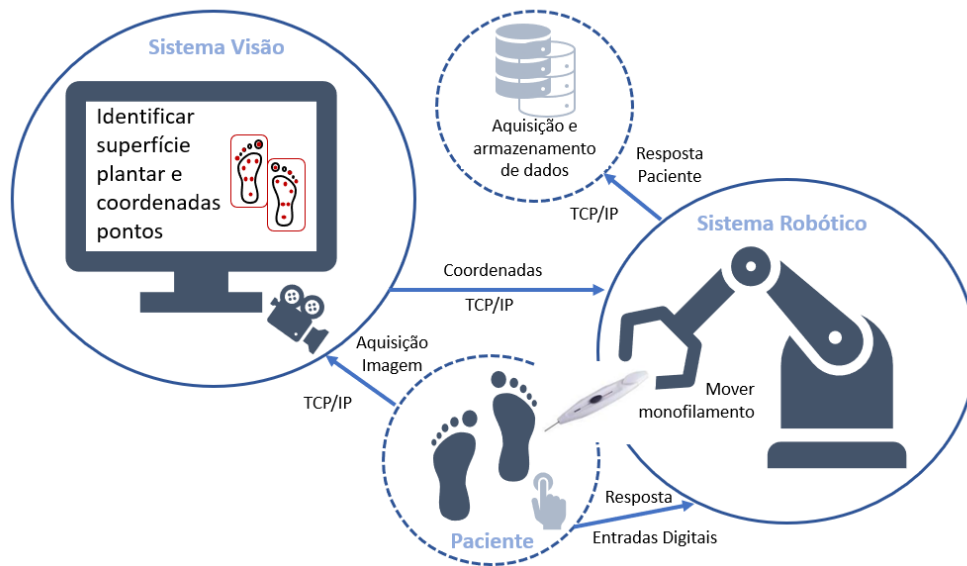


Figura 5.1: Arquitetura geral do sistema projetado para o desenvolvimento de um sistema robótico de apoio à análise clínica da sensibilidade superficial plantar de pacientes diabéticos: sistema de visão, sistema robótico e módulo de aquisição de dados

Por uma questão de limitação temporal para o desenvolvimento do presente projeto, apenas o sistema de visão foi alvo de implementação. No entanto, a arquitetura e tecnologias projetadas e estudadas para que se atinja o propósito final serão apresentadas, com a intenção de serem exploradas e analisadas em trabalhos futuros.

### 5.1.1 Sistema de Visão

Para o desenvolvimento do sistema de visão foi necessário recorrer a uma câmara por forma a realizar a aquisição das imagens plantares desejadas. Para além disso, foi necessário o desenvolvimento de um *software* capaz de processar essas mesmas imagens de modo a serem determinadas as coordenadas dos pontos envolvidos no teste do MSW.

No que respeita à aquisição de imagem, salienta-se também a necessidade observada em estudar o cenário a utilizar, dada a influência direta na tarefa de processamento de imagem. A utilização de um fundo preto tornou-se interessante devido ao contraste com a cor dos pés, bem como a utilização de objetos de dimensões conhecidas de modo a serem utilizados no momento de determinar as coordenadas dos pontos plantares identificados. Para a tarefa de processamento

de imagem recorreu-se à biblioteca de funções da OpenCV que aplica um conjunto de métodos e técnicas úteis para a finalidade em causa.

Assim, propôs-se o desenvolvimento de um *software* na linguagem de programação Python capaz de implementar as seguintes funcionalidades:

- Adquirir imagem da câmara de filmar utilizada.
- Aplicar técnicas de processamento de imagem por forma a segmentar os pés do paciente.
- Isolar cada pé e aplicar técnicas de processamento de imagem de modo a determinar a sua orientação.
- Aplicar técnicas e métodos de processamento de imagem de modo a identificar os dedos, bem como os outros pontos de interesse na planta do pé.
- Detetar, com recurso às técnicas de processamento de imagem, os objetos de dimensões conhecidas na imagem.
- Estabelecer relações espaciais entre os objetos de dimensões conhecidas e os pontos plantares identificados para o teste do MSW, de modo a determinar as coordenadas de cada ponto.
- Estabelecer uma conexão com o controlador do braço robótico - comunicação TCP/IP.
- Enviar cada coordenada encontrada e aguardar pela resposta do paciente através da comunicação estabelecida anteriormente.

A câmara utilizada para a aquisição de imagem foi uma câmara digital *mirrorless* Fujifilm X-T30, com 26 megapixéis de resolução, representada na Figura 5.2.



Figura 5.2: Câmara de filmar utilizada para o desenvolvimento do projeto: Fujifilm X-T30

### 5.1.2 Sistema Robótico

O sistema robótico terá como função manipular o monofilamento para as coordenadas dos pontos plantares enviados pelo sistema de visão e enviar a reação do paciente à sensação de toque a um módulo responsável pela aquisição de dados e armazenamento dos mesmos. Para essa tarefa será utilizado um modelo colaborativo da marca Elite.

Na implementação deste sistema robótico espera-se o desenvolvimento de dois programas. Um primeiro programa deverá ser desenvolvido na linguagem de programação LUA e terá como finalidade estabelecer as conexões necessárias, respetivamente com o *software* de visão e módulo de armazenamento de dados. Um outro programa deverá ser desenvolvido na linguagem de programação JBI e será responsável pelos movimentos do robô inerentes à tarefa de manipulação do monofilamento.

Assim, o programa desenvolvido na linguagem de programação LUA deverá respeitar a execução das seguintes tarefas:

- Estabelecer uma conexão TCP/IP com o sistema de visão.
- Receber as coordenadas dos pontos plantares utilizados no teste MSW.
- Mapear coordenadas dos pontos plantares em variáveis visíveis no programa JBI.
- Ler entradas digitais destinadas à receção de sensação de toque do paciente.
- Estabelecer uma conexão TCP/IP com o módulo de armazenamento de dados.
- Enviar resposta do paciente ao módulo de armazenamento de dados.

Outros aspetos tornam-se relevantes aquando da parametrização e configuração do braço robótico, como é exemplo a criação de um referencial necessário à correta interpretação das coordenadas recebidas, desenvolvimento de um *gripper* para agarrar o monofilamento, definição da ferramenta bem como dos seus dados de carga e configuração da função de deteção de colisão disponível no *cobot*.

### 5.1.3 Módulo de Aquisição e Armazenamento de Dados

Idealiza-se que este módulo tenha como principais finalidades adquirir dados de pacientes e armazená-los numa base de dados de maneira a que os mesmos possam posteriormente ser analisados por profissionais de saúde.

Para isso, torna-se interessante projetar uma interface gráfica tornando a sua interação mais apelativa e intuitiva. Este módulo deverá permitir a introdução de

dados de pacientes de modo a que os dados encaminhados pelo sistema robótico tenham uma correspondência aquando da análise dos mesmos.

## **5.2 Sumário**

Neste capítulo foi apresentada a arquitetura geral do sistema idealizado e projetado para dar resposta ao problema que se apresenta nesta dissertação. Encontram-se definidos os requisitos de cada um dos subsistemas, bem como apresentadas as tecnologias e ferramentas a utilizar em cada momento.



## Capítulo 6

---

# Implementação Prática do Sistema de Visão

---

*Este capítulo destina-se à apresentação dos desenvolvimentos referentes à fase de implementação do sistema de visão proposto. Para isso, será apresentado o setup construído e expostos todos os métodos adotados e técnicas exploradas com a finalidade de alcançar os objetivos. A cada técnica ou método estudado precederá de uma breve apresentação e análise de resultados intermédios, tarefa que se manifesta fulcral na fase de decisão dos passos a seguir.*

### 6.1 Sistema de Visão

O desenvolvimento do sistema de visão subdividiu-se em diversas tarefas. Numa primeira fase tornou-se necessário estudar o melhor cenário de fundo a utilizar na aquisição das imagens plantares. Depois de adquiridas as imagens, a fase seguinte passou pelo desenvolvimento de um *software* capaz de processar essas mesmas imagens e delas retirar a informação desejada.

Relativamente ao *software*, este é reponsável por inicialmente segmentar os pés do paciente na imagem por forma a isolá-los e orientá-los, e seguidamente identificar os dedos e os respetivos pontos de interesse para a realização do teste do MSW. Um segundo momento destina-se à tarefa de determinar as coordenadas dos pontos identificados anteriormente, onde se recorre a objetos de dimensões conhecidas de modo a criar e estudar relações espaciais e, por conseguinte, determinar as coordenadas desejadas. Para finalizar, pretende-se estabelecer uma comunicação com o sistema robótico por forma a enviar as coordenadas encontradas.

Numa tentativa de alcançar um resultado positivo nas várias tarefas que se apresentam para o desenvolvimento do *software* em destaque, foram estudadas e testadas diversas técnicas. Seguidamente serão expostas as metodologias adotadas a cada tarefa, bem como apresentadas as diversas abordagens que permitiram alcançar o resultado final.

## 6.2 Setup para Aquisição de Imagens Plantares

A construção do cenário de fundo para a aquisição de imagens manifestou-se uma tarefa relevante pela influência direta nas tarefas de processamento de imagem e determinação das coordenadas dos pontos plantares identificados.

Dada a tonalidade clara da cor dos pés, optou-se pela utilização de um fundo construído com cartolina preta de modo a aumentar o contraste necessário à tarefa de segmentação das imagens dos pés. Relativamente à tarefa de determinar as coordenadas dos pontos identificados, esta torna-se possível com a introdução de objetos de dimensões conhecidas na imagem, que permitirão criar relações espaciais. Uma vez que se optou por um fundo de cor escura, a tonalidade dos objetos é de cor clara por forma a ajudar na tarefa de segmentação. Assim, optou-se pela colagem de *post-its* cor-de-rosa e verde fluorescente.

A Figura 6.1 apresenta uma imagem retirada com a utilização do fundo criado para o efeito.

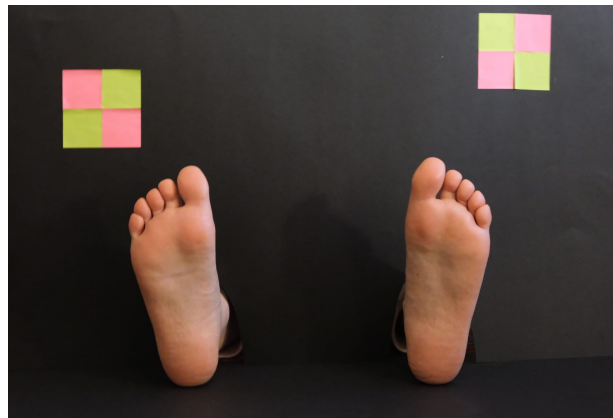


Figura 6.1: Cenário de fundo construído para aquisição de imagens plantares: fundo de cor preta e objetos de dimensões conhecidas cor-de-rosa e verde fluorescente

Para a realização dos testes necessários ao longo do desenvolvimento do algoritmo, foi criada uma amostra constituída por noventa imagens plantares. Desta amostra fazem parte quinze pessoas, com idades compreendidas entre os oito e os

sessenta e cinco anos, sendo nove delas do sexo feminino e seis do sexo masculino. De cada pessoa foram recolhidas diversas imagens, permitindo assim estudar o comportamento de factores como a inclinação dos pés, a incidência de luz, e a distância entre os objetos de dimensões conhecidas e os pés. Assim, obteve-se um total de quarenta e sete imagens plantares masculinas e quarenta e três imagens plantares femininas.

## 6.3 Segmentação da Imagem do Pé

Para realizar a segmentação da imagem do pé foram testadas diversas abordagens por forma a encontrar a que melhor se ajusta. De seguida será apresentada a abordagem adotada para alcançar o objetivo proposto, assim como apresentadas outras que não se manifestaram tão adequadas mas que suportam a tomada de decisão.

O diagrama da Figura 6.2 apresenta a sequência de tarefas referentes à abordagem final adotada. Numa primeira fase foi realizada uma segmentação por corte através de uma binarização da imagem original, seguiram-se técnicas como a erosão e dilatação, e finalizou-se com a aplicação de uma segmentação recorrendo ao método de Canny. Obtida uma imagem como resultado do operador de Canny, procedeu-se à identificação dos diversos elementos da imagem pelos seus contornos e validou-se as áreas detetadas por forma a garantir correspondência com os pés. Cada área foi isolada com o intuito de ser novamente processada e analisada em momentos seguintes.

### 6.3.1 Segmentação por Limiar de Cor - Método de Threshold

Com a aplicação do método de *Threshold* torna-se possível obter uma imagem binarizada. Esta abordagem consiste na análise da intensidade dos pixels, onde cada um é comparado com um valor de limite definido. Se o valor do pixel for menor que o limite este é considerado como 0, caso contrário, é atribuído com um valor máximo definido [65].

Para isso recorreu-se à função *cv.threshold* disponível na biblioteca de funções da OpenCV. O primeiro argumento desta função é a imagem de origem, que deve ser uma imagem em tons de cinza, o segundo argumento é o valor limite que é usado para classificar os valores de pixel, o terceiro argumento é o valor máximo atribuído aos valores de pixel que excedem o limite e o quarto argumento define o tipo de limite que se pretende de entre os parâmetros disponibilizados pela função - *cv.THRESH\_BINARY*, *cv.THRESH\_BINARY\_INV*, *cv.THRESH\_TRUNC*, *cv.THRESH\_TOZERO* ou *cv.THRESH\_TOZERO\_INV* [65]. A Figura 6.3 ilustra o comportamento de cada um destes parâmetros em função da imagem de origem utilizada.

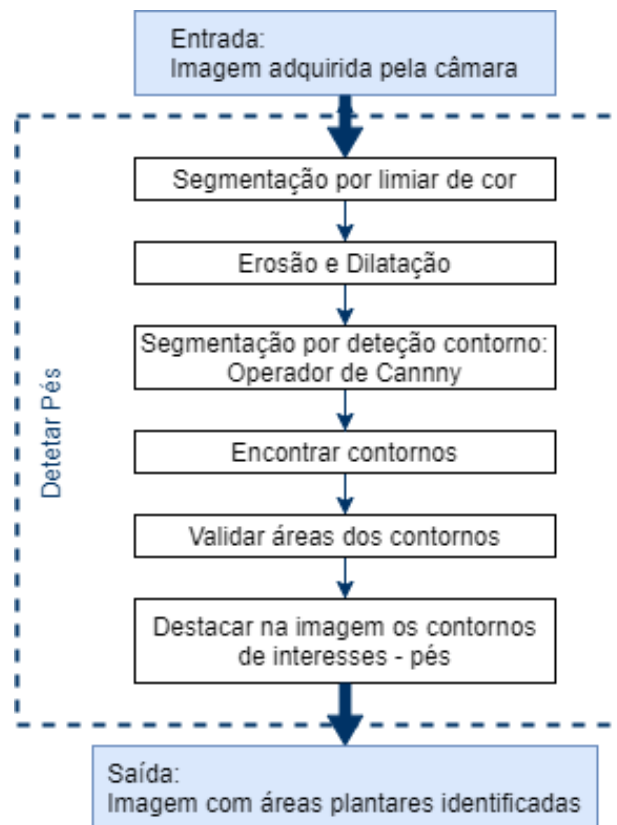


Figura 6.2: Diagrama de exposição da sequência de tarefas inerentes à segmentação das imagens dos pés

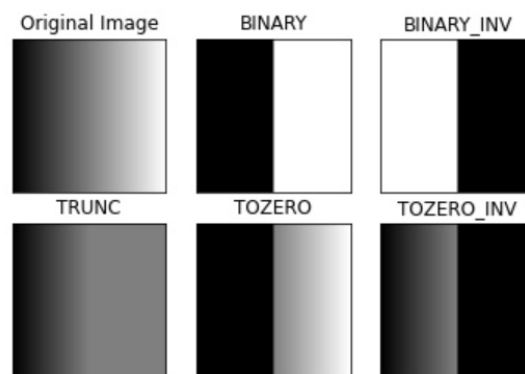


Figura 6.3: Comportamento dos parâmetros da função *cv.threshold* utilizados para definir o tipo de limite a aplicar. Ao canto superior esquerdo encontra-se a imagem de entrada, sendo as restantes o resultado da aplicação de cada parâmetro sobre a original [65]

Antes de recorrer à chamada da função apresentada foi necessário garantir a existência de todos os argumentos de entrada. Relativamente ao primeiro argumento, optou-se por estudar o resultado da função utilizando as imagens à escala de cinza e utilizando as imagens resultantes do canal V da transformação da imagem recorrendo ao modelo de representação de cores denominado Hue Saturation Value (HSV).

HSV é a abreviatura para o sistema de cores formado pelas componentes *hue* (matiz), *saturation* (saturação) e *value* (valor), sendo considerado um modelo de representação do espaço de cor semelhante ao modelo de cores Red Green Blue (RGB). Como o canal H modela o tipo de cor, manifesta-se útil em tarefas de processamento de imagem que requerem a segmentação de objetos com base na cor. Na variação da saturação representada no canal S, quanto menor o valor mais a imagem apresentará tons cinza e o canal V descreve o brilho ou a intensidade da cor [66]. Na Figura 6.4 encontra-se representado o cilindro HSV.

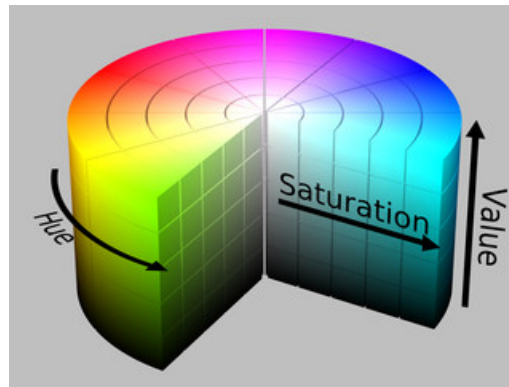


Figura 6.4: Cilindro representativo do modelo de espaço de cores HSV [66]

No que respeita o segundo argumento referente ao valor de limite a utilizar na binarização, procedeu-se à análise das imagens e dos seus histogramas de forma a desenvolver uma lógica que permitisse tornar dinâmico o valor a utilizar, dependendo da imagem de origem. Assim, ao analisar visualmente um conjunto de imagens plantares é possível afirmar que a maior parte dos pixels das mesmas representam cartolina, podendo esta área corresponder entre 80 a 95% da imagem.

Para determinar a intensidade do pixel correspondente a esses intervalos de percentagem, estudou-se o histograma acumulativo das imagens. Foi necessário encontrar o histograma de cada uma, representá-lo no formato de soma acumulativa, e procurar a intensidade da cor do pixel que representa uma determinada percentagem da mesma, recorrendo para isso a uma comparação seguida de uma derivada. A Figura 6.5 visa ilustrar a lógica idealizada e descrita.

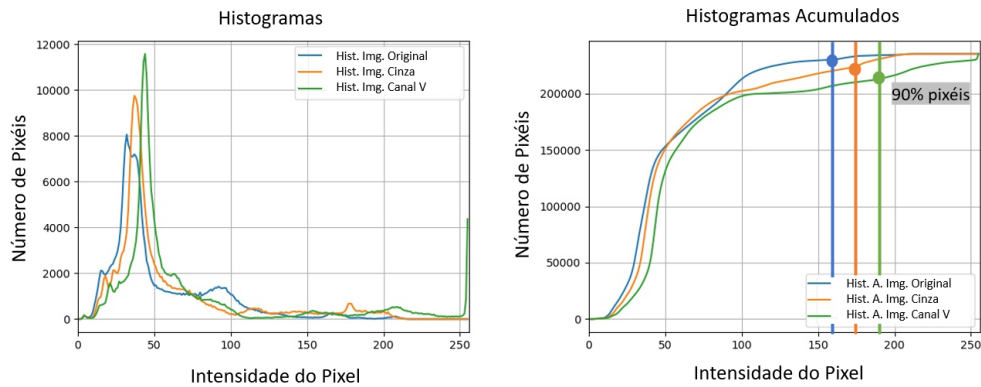


Figura 6.5: Ilustração gráfica da lógica idealizada para análise dos histogramas das imagens a fim de determinar um limite de *threshold*: à esquerda os histogramas originais e à direita os histogramas no formato de soma acumulativa, com sinalização para cada um do ponto onde se atingem os 90% de pixels da imagem

Em suma, o excerto de código representado na Figura 6.6 apresenta a lógica implementada, seguindo-se a exposição de um *output* exemplo. Foram utilizadas funções disponíveis na biblioteca OpenCV para determinar os histogramas de imagens, e de funções matemáticas da biblioteca *numpy* para calcular derivadas.

```
import cv2 as cv2
import numpy as np
...
(dx, dy, _) = image.shape
npixels = (dx*dy)/0.9
GrayImage = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
hist = cv2.calcHist([GrayImage], [0], None, [256], [0, 256])
sumHist = np.cumsum(hist)
print(sumHist)
filter = sumHist_GI > npixels
print(filter)
diff = np.diff(filter)
print(diff)
value_Thresh = list(compress(range(len(diff)), diff))
print(value_Thresh)
...
```

**Output:**

[0.00000e+00 0.00000e+00 ... 4.35200e+05 4.35200e+05]

[False False ... True True True True]

[False False ... True ... False False False]

[181]

Figura 6.6: Excerto de código representativo da lógica implementada para determinar limite de *threshold*, seguido de um *output* exemplo

Para o terceiro argumento definiu-se que o valor máximo a atribuir aos pixels com valores acima do limite utilizado seriam os 255 e no quarto argumento optou-se pelo parâmetro `THRESH_BINARY`.

A Figura 6.7 representa uma amostra dos resultados obtidos com as várias combinações testadas. Nesta é possível visualizar nas primeiras quatro, respetivamente, linhas a imagem original, a imagem à escala de cinza, o canal de valor da imagem HSV e os três histogramas representados na forma acumulativa que foram estudados para determinar um limite a utilizar na função de *threshold*: o histograma da imagem original, o histograma da imagem à escala de cinza e o histograma da imagem do canal V resultante da representação no modelo HSV.

Nas últimas quatro linhas estão representados, respetivamente, os resultados da aplicação do método de *threshold* consoante as combinações estudadas. Na quinta linha foi utilizada como imagem de origem a imagem à escala de cinza e o valor limite foi determinado pela análise do histograma, também ele da imagem à escala de cinza. Na sexta linha a imagem de origem utilizada corresponde ao canal V do modelo de cores HSV e o valor limite foi determinado pela análise do histograma da imagem à escala de cinza. Na sétima linha foi utilizada como imagem de origem a correspondente ao canal V da transformação no modelo HSV e o valor de limite foi determinado pela análise do histograma também ele do canal V. Por último, na oitava linha foi utilizada como imagem de origem o canal V do modelo HSV e o valor de limite foi determinado pela análise do histograma da imagem original.

Através dos resultados alcançados com a amostra testada, é possível afirmar que a o melhor valor de limite de intensidade de pixels surge na análise do histograma à escala de cinza. Posteriormente, este limite deve de ser aplicado à imagem do canal V obtida pela aplicação do modelo HSV na imagem original, tal como se pode ver pelas imagens apresentadas na sexta linha.

A percentagem a utilizar aquando do estudo dos histogramas da imagem e determinação do valor de limite a utilizar como argumento na chamada à função de *threshold* foi definida de modo empírico. Realizaram-se alguns testes com percentagem entre os 80 e os 95% onde se analisaram os resultados por forma a concluir qual a que melhor se ajusta. Pela análise das imagens resultantes, é possível afirmar que o melhor resultado surge ao considerar que 90% da imagem corresponde a cartolina, e 10% corresponde aos pés e objetos de dimensões conhecidas. A Figura 6.8 ilustra uma amostra dos resultados analisados.

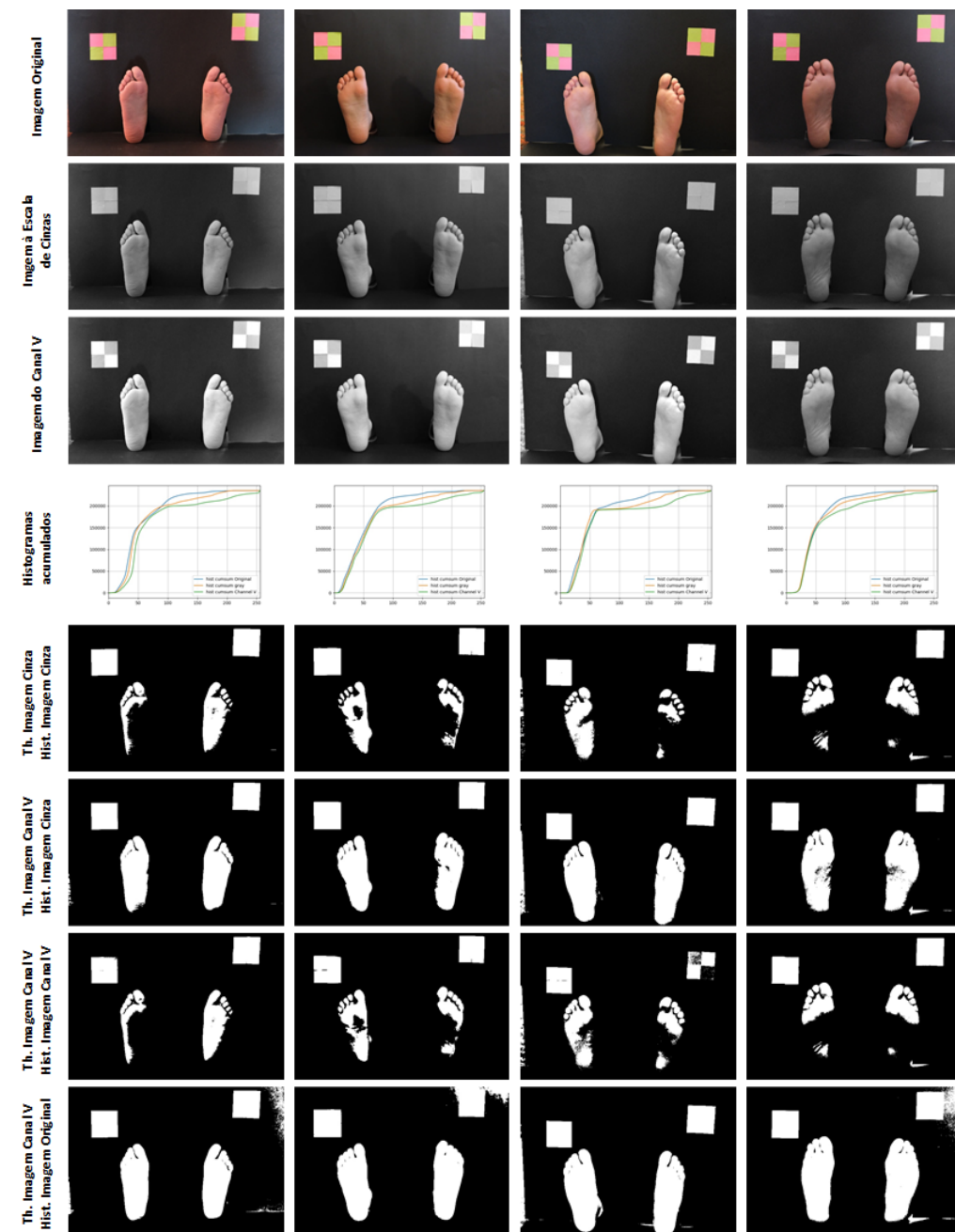


Figura 6.7: Amostra de resultados do estudo realizado para determinar o valor de limite necessário à aplicação do método de *threshold*. Nas primeiras quatro linhas encontram-se os dados estudados, desde as imagens original, à escala de cinza e canal V, bem como os seus histogramas na forma acumulada. Na últimas quatro linhas encontram-se os resultados obtidos pela aplicação de diversas combinações dos dados estudados.

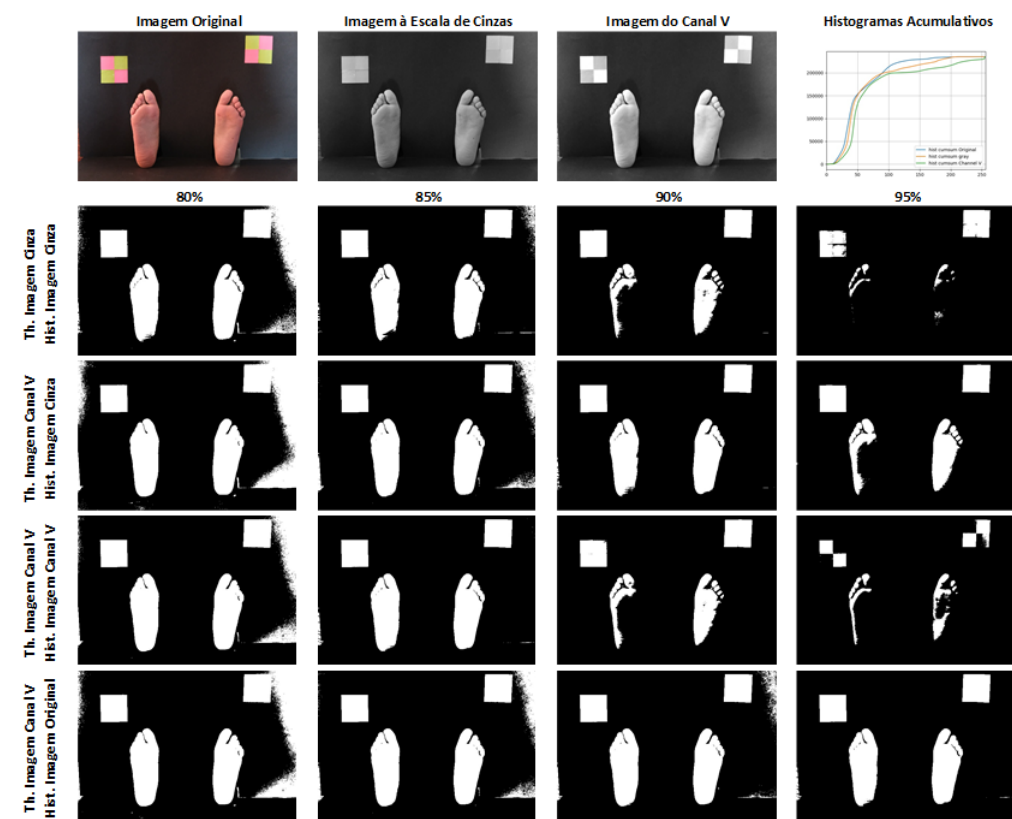


Figura 6.8: Amostra de resultados do estudo realizado para determinar a porcentagem de pixels a considerar como pertencendo ao cenário de fundo na análise do histograma acumulativo

Apesar da abordagem adotada, outras técnicas e métodos foram estudados e analisados. Salienta-se a atenção dada ao método de Otsu, que determina um valor de limite global ideal a partir do histograma da imagem de modo automático, valor esse que irá corresponder a um valor entre dois picos do histograma. Para esta análise considerou-se a utilização da imagem original à escala de cinza, com e sem a aplicação de um filtro gaussiano. A função de filtro Gaussiano consiste na eliminação de ruído das imagens através do desfoque das mesmas, tendo um comportamento semelhante ao que se apresenta na Figura 6.9.

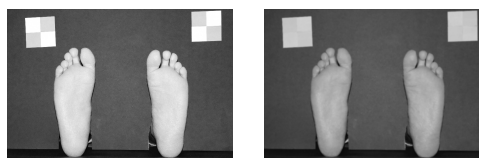


Figura 6.9: Comportamento de um filtro Gaussiano: à esquerda a imagem à escala de cinza e à direita a imagem após aplicação do filtro

No entanto, para a finalidade em causa este método falha, tal como se pode visualizar pela análise da Figura 6.10, onde se apresentam quatro das imagens estudadas.

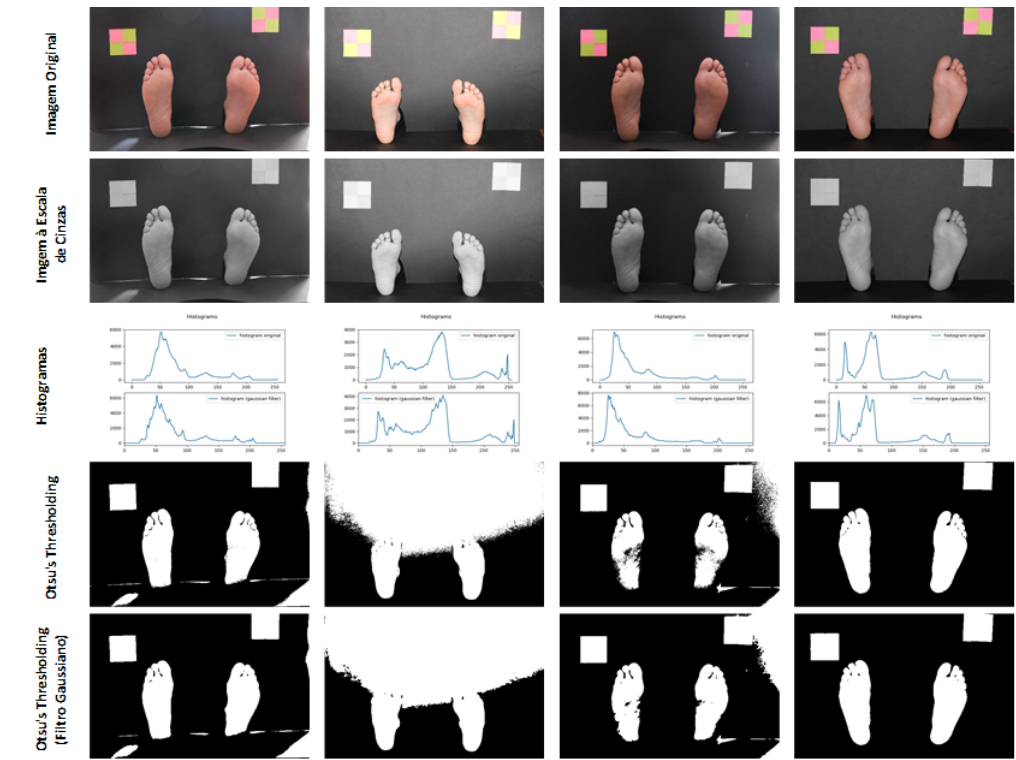


Figura 6.10: Amostra de resultados do estudo para determinar valor limite de *threshold* pelo método de Otsu

### 6.3.2 Segmentação por Deteção de Contorno - Operador de Canny

O operador de Canny permite uma segmentação de imagens por deteção de borda. Para isso, recorreu-se à função *cv.Canny* disponível na biblioteca de funções da OpenCV, onde o primeiro argumento corresponde à imagem de entrada, e o segundo e terceiro argumentos são valores mínimos e máximos de gradiente de intensidade. Qualquer valor superior ao definido como máximo ou inferior ao definido como mínimo é considerado aresta, e qualquer valor entre o intervalo de valores definido é considerado borda [67].

Em relação à imagem utilizada no primeiro argumento, esta surge como resultado da aplicação de um conjunto de técnicas de pré-processamento que se manifestaram vantajosas aquando do estudo e análise dos resultados.

Numa primeira fase foi necessário entender se se manifestava vantajoso aplicar à entrada a imagem à escala de cinza, a imagem resultando do canal V, ou

a imagem binarizada pelo método de *thresholding*. Após a realização de um conjunto de testes, foi possível concluir que o melhor resultado surge ao utilizar a imagem binarizada com filtro gaussiano e um valor de limite determinado pela análise do histograma da imagem à escala de cinza, tal como se pode analisar pela amostra de resultados apresentados na Figura 6.11.

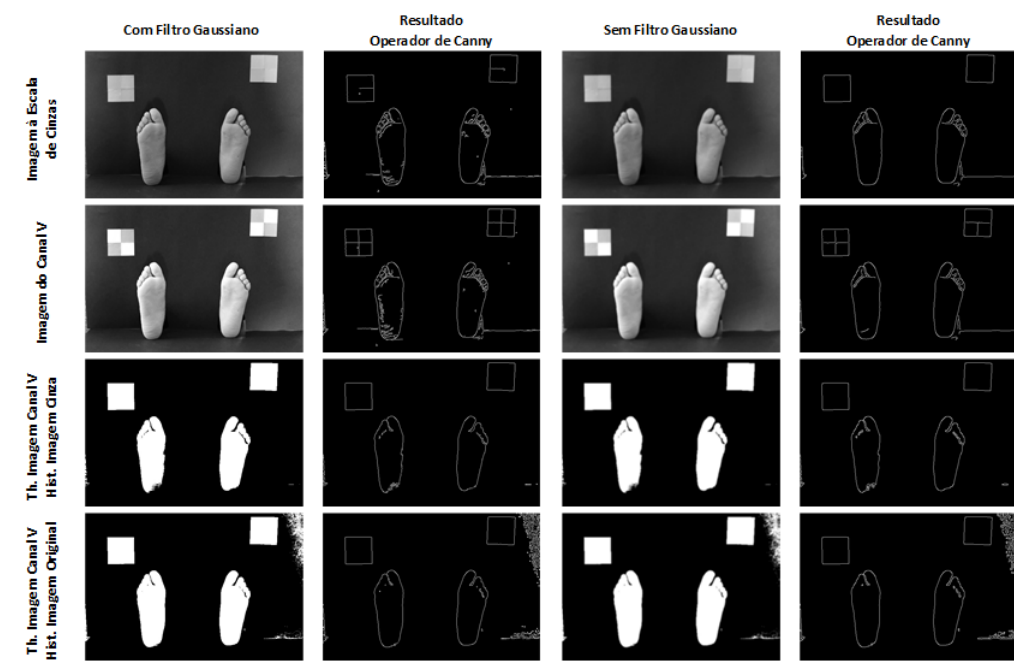


Figura 6.11: Amostra de resultados do estudo inicial do comportamento da aplicação do método de Canny. Foram estudadas imagens à escala de cinza, do canal V e binarizadas, com ou sem filtro gaussiano

Foram igualmente exploradas as técnicas de erosão e dilatação por forma a melhorar o resultado dos contornos obtidos, recorrendo para o efeito às funções *cv.erode* e *cv.dilate* disponíveis na biblioteca de funções da OpenCV. Ambas esperam como primeiro argumento a imagem de entrada e como segundo argumento o número de iterações. Tal como os próprios nomes sugerem, a função de erosão permite reduzir uma determinada área, ao passo que a dilatação realiza o processo inverso. A Figura 6.12 permite entender o comportamento de ambas [68].

Após alguns testes, entendeu-se que a melhor abordagem passaria pela obtenção da imagem binarizada, seguida de duas iterações de erosão para eliminar o ruído da imagem possível, uma iteração de dilatação para aumentar novamente as regiões, um filtro gaussiano e aplicação do método de Canny. Por fim, optou-se pela aplicação de duas novas iterações de dilatação com o intuito de realçar os contornos. A Figura 6.13 apresenta uma amostra dos resultados obtidos.

Como a imagem utilizada à entrada do operador de Canny corresponde a uma imagem binarizada, o gradiente de intensidade já foi encontrado para a primeira segmentação. Assim, definiu-se que os valores limites variam entre mais 5 e menos 5, face ao valor limite determinado para o método de *threshold*.



Figura 6.12: Comportamento das funções de erosão e dilatação da biblioteca OpenCV: à esquerda a imagem original, ao centro a imagem após uma erosão e à direita a imagem após uma dilatação [68]

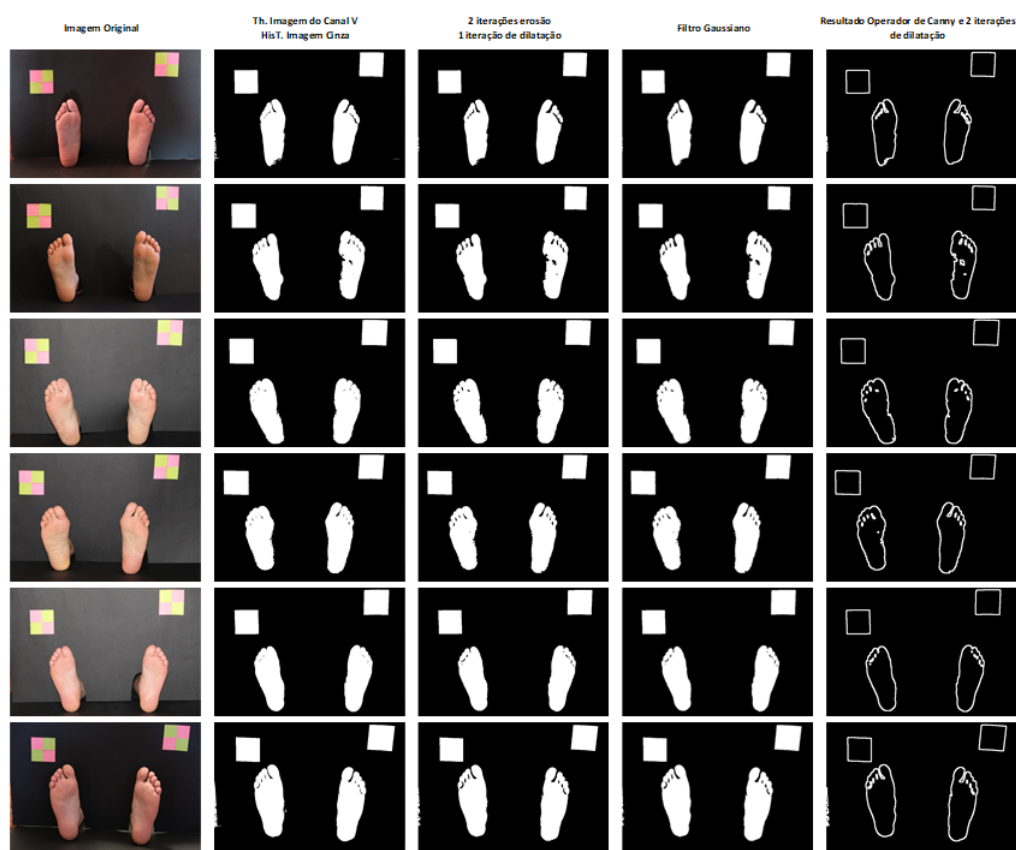


Figura 6.13: Amostra de resultados da aplicação do método de Canny, após utilização de técnicas de erosão e dilatação de regiões plantares

### 6.3.3 Detecção de Contornos e Validação de Áreas

Para a tarefa de detetar contornos numa imagem recorreu-se a uma função disponível na biblioteca de funções da OpenCV denominada *cv.findContours*. O primeiro argumento corresponde à imagem de origem, o segundo é o modo de recuperação de contorno e o terceiro é o método de aproximação de contorno, sendo o valor de retorno uma lista de todos os contornos da imagem, onde cada um é representado na forma matricial de coordenadas  $(x, y)$  dos pontos de fronteira do objeto.

Seguidamente, por forma a validar se os objetos detetados correspondem a pés, foi realizado um ciclo onde se verificam todas as áreas detetadas. São armazenadas numa variável as que respeitam o critério definido, que as valida se estas forem superiores à área em pixels do objeto de dimensões conhecidas.

A Figura 6.14 apresenta uma amostra de resultados obtidos ao utilizar a abordagem de processamento de imagem descrita até ao momento.

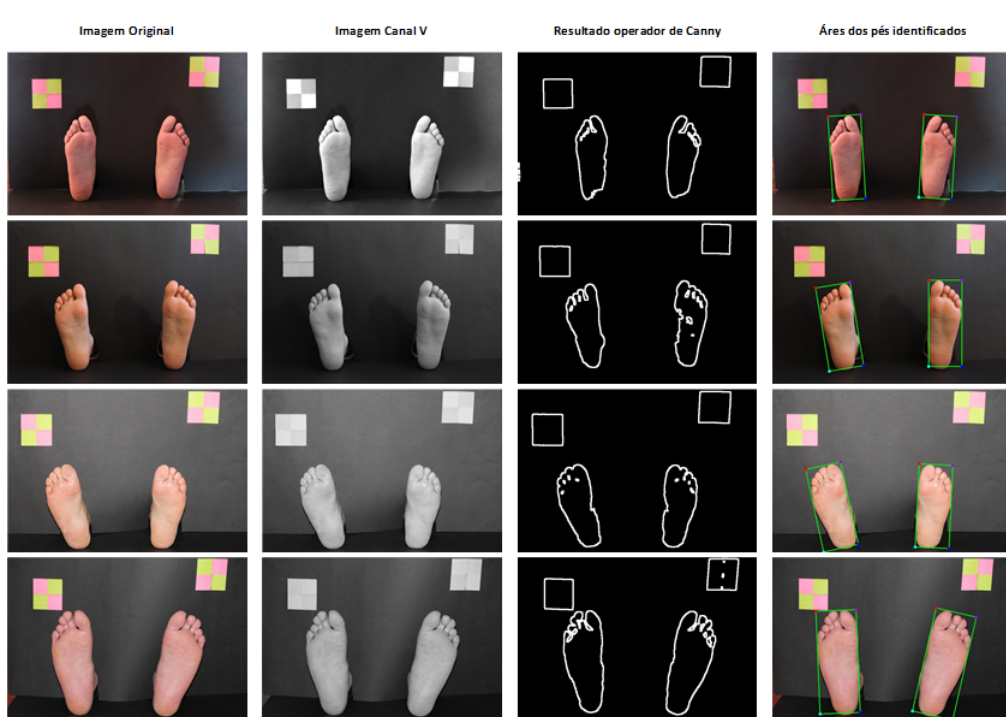


Figura 6.14: Amostra de resultados após a deteção de contorno e validação das áreas dos pés

A Figura 6.15 apresenta uma amostra de resultados obtido na tarefa de detetar contornos, onde a utilização das funções de erosão e dilatação não foram parametrizadas da melhor forma.

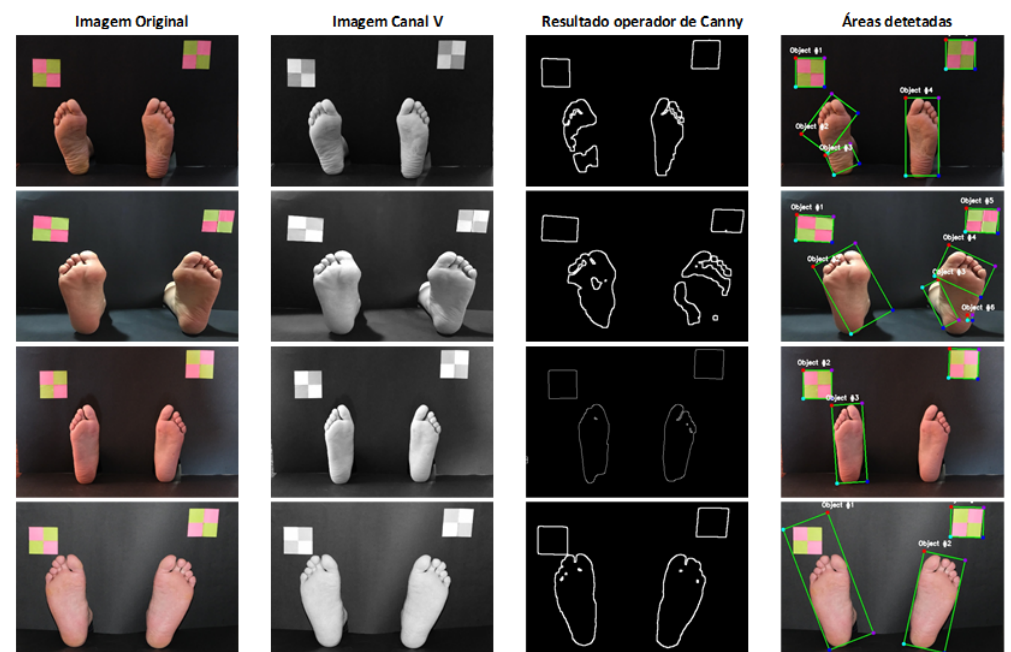


Figura 6.15: Amostra de resultados de deteção de contornos com falhas resultantes da aplicação incorreta das técnicas de erosão e dilatação nas imagens

No Anexo A encontram-se amostras de resultados das diversas técnicas exploradas para dar resposta à tarefa exposta nesta secção, onde se pretende a segmentação de imagens e isolamento das áreas de cada pé.

## 6.4 Identificação do dedo Hálux

Para identificar o dedo grande, denominado hálux, optou-se pela análise do contorno superior dos pés de modo a detetar picos que pudessem corresponder a dedos.

Uma vez isoladas as áreas que correspondem aos pés, o passo seguinte consistiu no recorte de cada uma dessas áreas da imagem original, e criação de novas, de maneira a serem processadas de acordo com o que se pretende analisar. Esta tarefa manifesta utilidade uma vez que quanto menos informação indesejada compuser uma imagem a processar, melhor se torna a análise e identificação do conteúdo pretendido.

O diagrama que se apresenta na Figura 6.16 descreve as tarefas delineadas para implementar a função desejada.

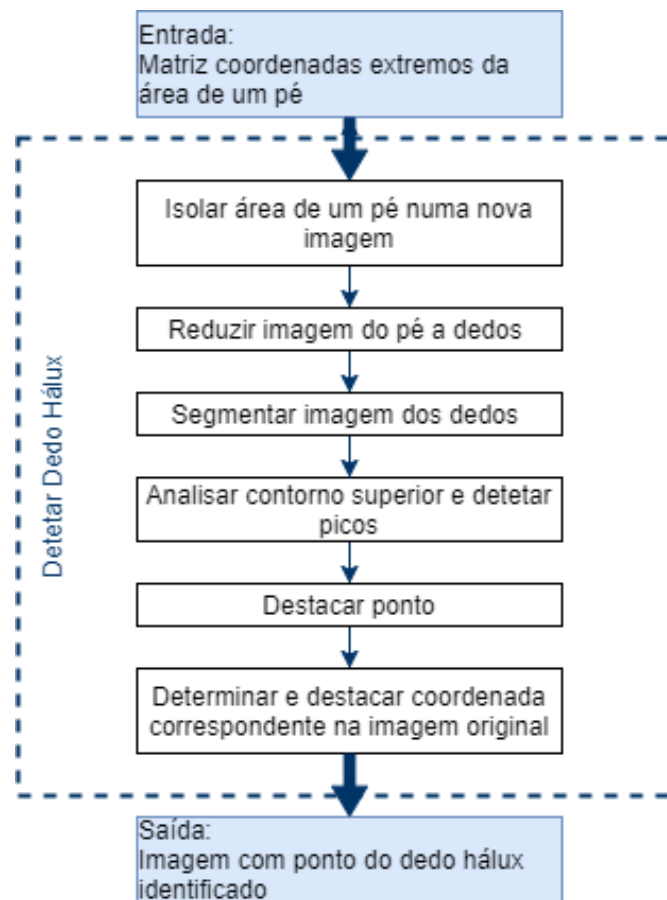


Figura 6.16: Diagrama de exposição da seqüência de tarefas inerentes à tarefa de identificação do dedo hálux

#### 6.4.1 Segmentação da Região de Interesse

Para isolar a região de interesse e reduzi-la apenas à informação necessária, foram criadas novas imagens, a partir da original, com base nas coordenadas das respectivas regiões de interesse devolvidas pela função de procura de contornos, utilizada na segmentação das imagens dos pés. De seguida, a partir de cada uma das novas imagens, foram criadas outras que permitiram isolar apenas as regiões correspondentes aos dedos grandes que se pretendem identificar.

Em cada uma dessas regiões foram aplicadas novamente técnicas de segmentação por corte - *threshold* -, seguida de erosão, dilatação e filtro para redução de ruído, e segmentação por deteção de contorno - *Canny*. A Figura 6.17 ilustra alguns resultados obtidos até ao processamento descrito, onde foram aplicados os mesmos parâmetros estudados na fase de segmentação da imagem do pé.

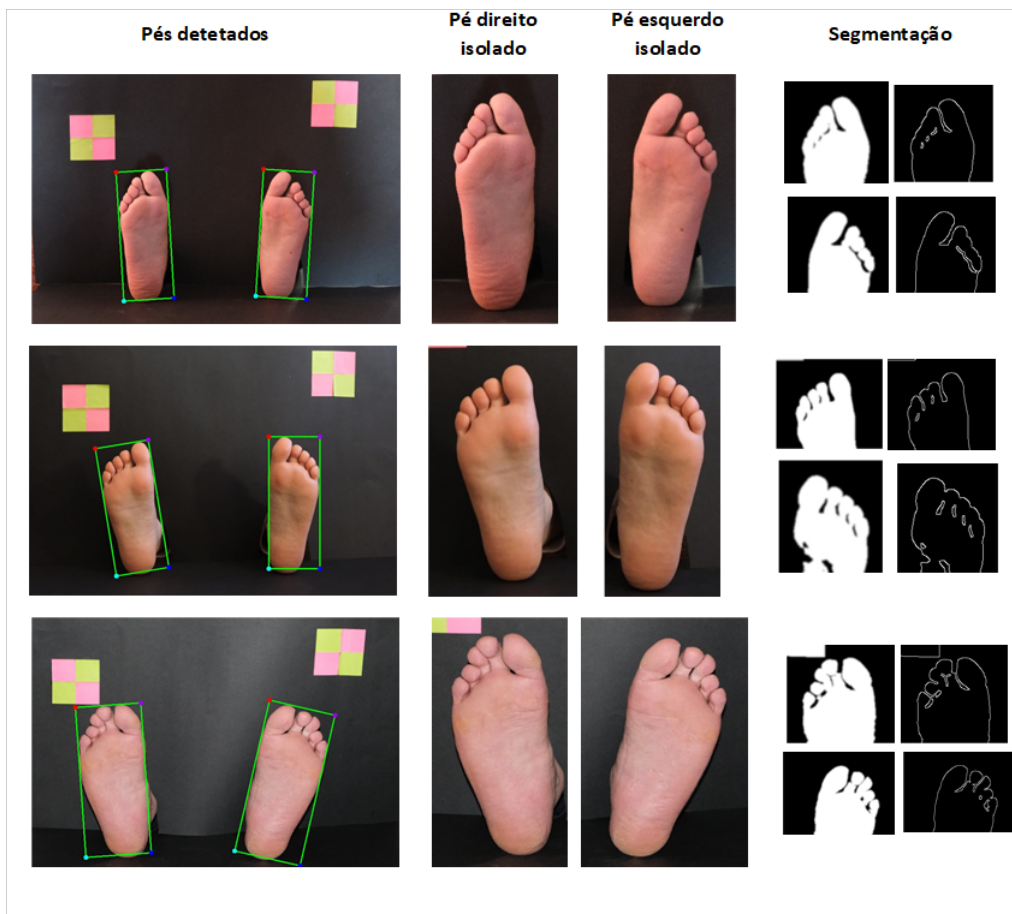


Figura 6.17: Amostra de resultados obtidos pelo isolamento e processamento da região de interesse referente ao dedo hálux

#### 6.4.2 Landmarks Anátomo-Morfológicos

Tendo o resultado do contorno da região de interesse pelo operador de Canny, seguiu-se uma análise gráfica do comportamento do mesmo na parte superior do pé. Para traçar o gráfico pretendido, foi necessário percorrer cada imagem no sentido de cima para baixo e da esquerda para a direita, de maneira a analisar a intensidade da cor de cada um dos pixels até se detetar uma transição de preto para branco, transição essa que representa o momento onde se atinge o contorno de pé.

Pela análise do gráfico é possível visualizar um pico na zona correspondente ao dedo grande. Assim, recorreu-se a uma função disponível na linguagem de programação Python para detetar picos e procedeu-se à marcação do respetivo pico devolvido na imagem analisada, com uma deslocação em  $x$  e em  $y$ , por forma a validar se corresponde ao centro aproximado do dedo hálux. Pode afirmar-se

que o resultado atingido corresponde ao ponto de interesse, tal como se verifica na amostra de resultados da Figura 6.18.

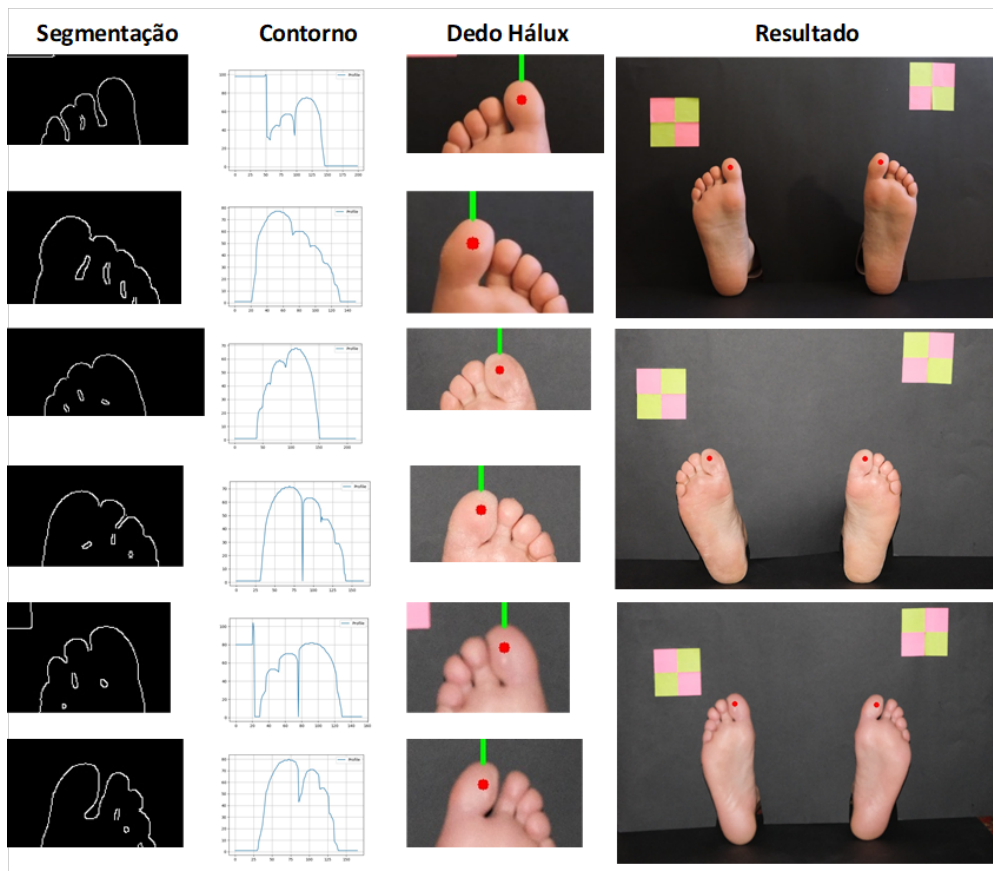


Figura 6.18: Amostra de resultados obtidos na deteção do dedo hálux pelo isolamento, processamento das regiões de interesse e estudo do comportamento do contorno do pé

Após identificados os pontos de interesse nas imagens criadas a partir das áreas de cada pé, tornou-se necessário realizar a respetiva transformação para as coordenadas correspondentes na imagem original. Considerando que se armazena a coordenada  $(x_1, y_1)$  do canto superior direito, onde se inicia o corte de uma nova imagem gerada a partir da original, para um dado ponto identificado na mesma  $(x_2, y_2)$  irá corresponder uma coordenada  $(x_3, y_3)$  na original, sendo  $x_3$  resultado da soma de  $x_2$  com  $x_1$  e  $y_3$  resultado da soma de  $y_2$  com  $y_1$ . A Figura 6.19 ilustra a lógica envolvida nesta tarefa.

No Anexo B encontram-se amostras de resultados das diversas técnicas exploradas com o intuito de dar resposta à tarefa exposta nesta secção, onde se pretende a identificação do dedo hálux.

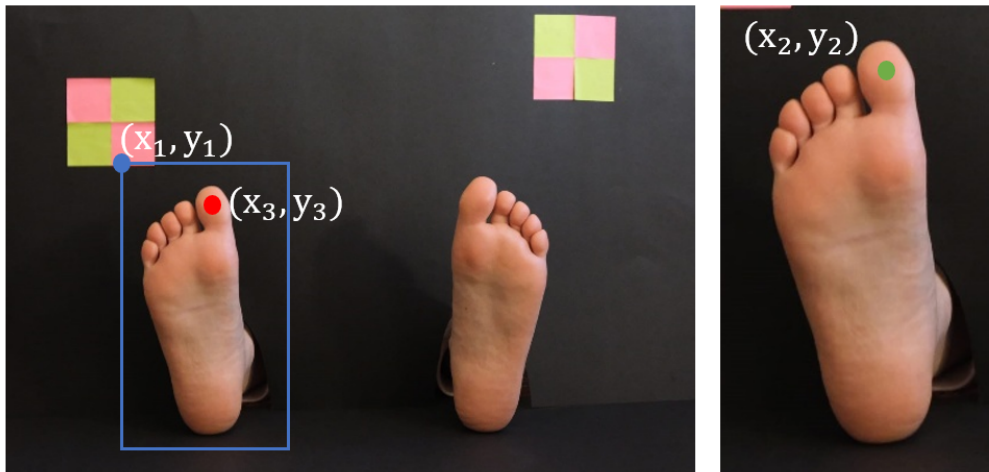


Figura 6.19: Correspondência de coordenadas de pontos identificados numa imagem processada face à imagem original:  $x_3 = x_1 + x_2$  e  $y_3 = y_1 + y_2$

## 6.5 Identificação dos Pontos na Região Plantar

Para a identificação dos seis pontos da região plantar foram exploradas diversas abordagens e realizados inúmeros testes que, após analisados e aprimorados, permitiram desenhar um padrão entre os diversos pés testados.

A Figura 6.20 expõe a metodologia implementada. A imagem à esquerda ilustra a necessidade de se determinar a orientação do pé por detecção de transição de intensidade dos pixels, conforme sinalizado com os pontos a azul, obtidos pela análise da imagem binária no seguimento das linhas orientadoras representadas a vermelho. Obtidos os quatro pontos torna-se possível determinar o centro do pé e conseqüentemente a orientação desejada, conforme sinalizado a verde. Com os dois pontos sinalizados a amarelo é possível estimar a posição de quatro pontos desejados.

A linha orientadora vermelha superior foi traçada a 40% de  $dx$  e a inferior a 80% de  $dx$ . Sendo  $w$  a distância entre cada dois pontos azuis com o mesmo valor em  $dx$ , cada ponto verde representa uma distância de  $\frac{w}{2}$ . Para os pontos sinalizados a amarelo considera-se o mais à esquerda com uma distância de  $\frac{w}{4}$  e o mais à direita com uma distância de  $\frac{3}{4}w$ , sendo nesta situação o valor de  $w$  obtido pelos dois pontos azuis sinalizados sobre a linha vermelha superior.

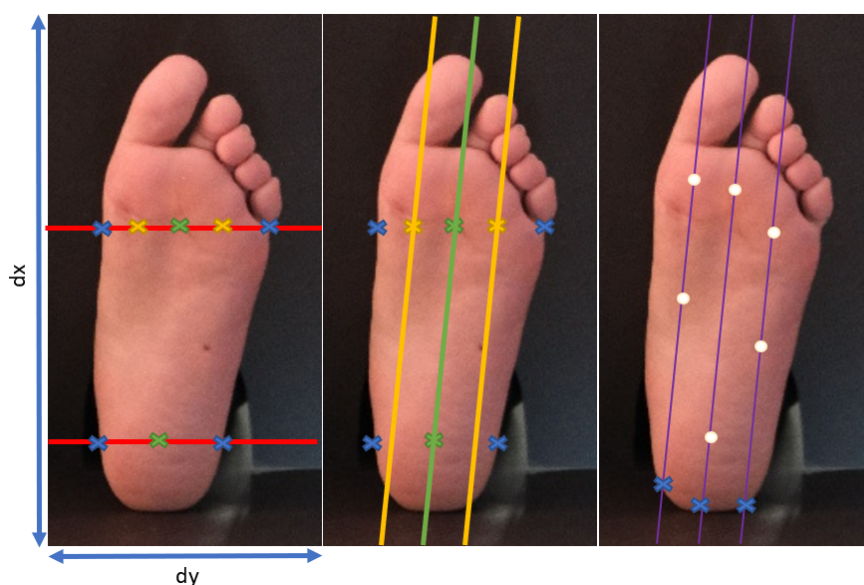


Figura 6.20: Abordagem desenvolvida e implementada para determinar pontos de interesse na superfície plantar. A imagem à direita representa a análise aplicada à imagem binária de modo a detetar transições nas extremidades laterais do pé, e por conseguinte a orientação do mesmo. A imagem ao centro representa as linhas orientadoras desenhadas com base nos pontos determinados na primeira imagem. A imagem à esquerda sinaliza os pontos detetados pela respetiva análise da intensidade dos pixels sobre as linhas orientadoras

Tendo as retas de orientação amarelas e verde traçadas, ao analisar de baixo para cima, sobre as mesmas, o equivalente da imagem em formato binário, é possível detetar a transição de preto para branco. Cada ponto branco corresponde a um deslocamento sobre a sua respetiva reta orientadora a partir da transição detetada, deslocamento esse determinado de forma empírica.

Apresentada a metodologia implementada, segue a exposição dos desenvolvimentos requeridos pela mesma. A Figura 6.21 apresenta um diagrama com as várias tarefas que se encadearam por forma a alcançar o resultado esperado.

Para a tarefa de orientação e identificação de pontos plantares, foi necessário realizar uma nova extração da área de cada pé e posterior binarização da mesma. A partir da imagem binarizada do pé, procedeu-se à recolha de uma linha da matriz que a representa, a 40% da sua altura. Obtidos esses valores, realizou-se uma derivada dos mesmos de maneira a detetar as duas transições de intensidade de pixels, valores esses que delimitam a largura do pé. Além disso, determinou-se ainda o ponto médio entre os dois extremos de modo a identificar a área ao centro do pé. De seguida, realizou-se a mesma análise para uma linha da matriz

representativa da imagem binarizada a 80%, de modo a encontrar outras duas extremidades laterais, assim como o seu centro.

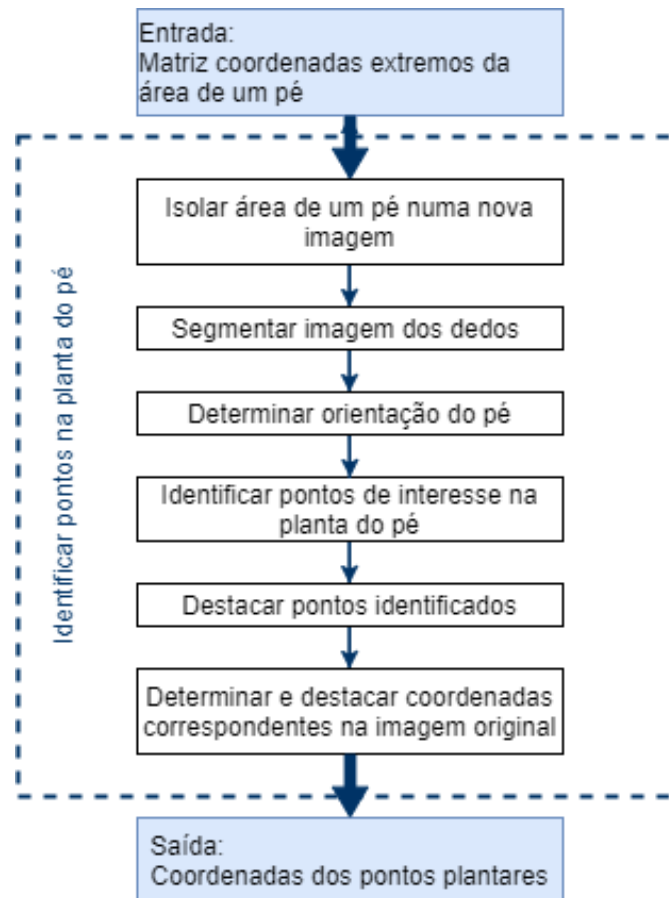


Figura 6.21: Diagrama de exposição da sequência de tarefas inerentes à tarefa de identificação dos pontos plantares de interesse

Depois de obtidos os seis pontos de orientação, foram traçados três segmentos de reta que correspondem às duas extremidades laterais e ao centro do pé. Através do segmento de reta encontrado ao centro, é possível recolher todos os dados necessários para que se determine o ângulo de orientação do pé, assim como a repetitiva equação da reta.

Tal como descrito anteriormente na exposição da metodologia a implementar, outros dois pontos foram determinados na linha orientadora superior do pé. Obtidos esses dois pontos, e com base no declive da reta detetada ao centro do pé, foi possível traçar duas novas retas que foram utilizadas como auxiliares na identificação dos pontos desejados. Para isso, cada reta foi projetada na imagem binarizada do pé correspondente, por forma a detetar uma nova transição

de intensidades de pixels no sentido de baixo para cima. Detetado o ponto de transição é conhecido o início do calcanhar. Ao deslocar sobre cada reta valores em altura foi possível estimar os pontos de interesse.

Para a marcação dos pontos, o deslocamento sobre as retas associado a cada um foi determinado de modo empírico, sendo que os melhores resultados obtidos foram estimados a partir de proporções criadas com base na altura das áreas de cada contorno, tal como se pode visualizar na Figura 6.22.

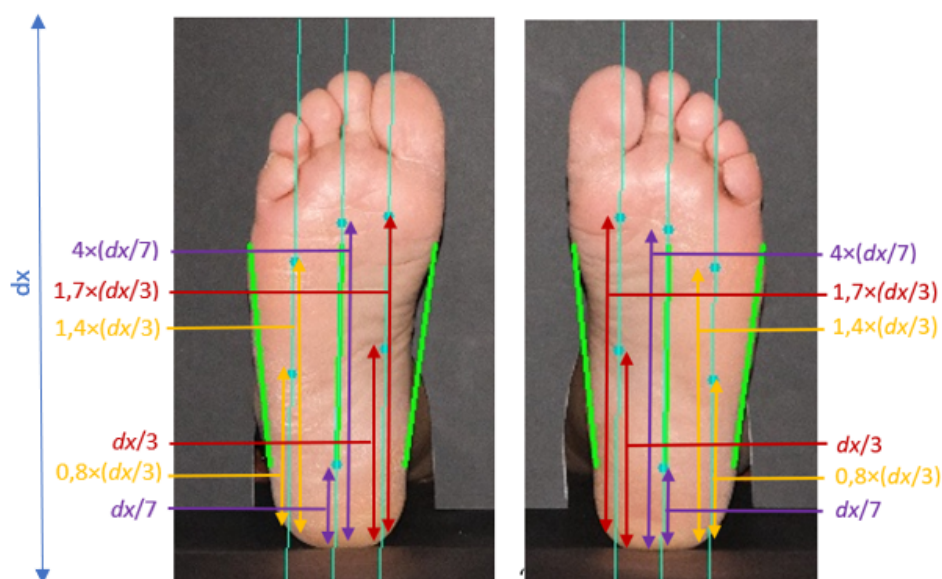


Figura 6.22: Deslocamentos sobre as retas de orientação traçadas para identificar os pontos de interesse na planta do pé

A Figura 6.23 apresenta uma amostra dos resultados obtidos onde é possível corroborar a metodologia idealizada, uma vez que os pontos correspondem ao previsto.

No Anexo B encontram-se amostras de resultados das diversas técnicas exploradas com o intuito de dar resposta à tarefa exposta nesta secção, onde se pretende a identificação de seis pontos em cada região plantar.

## 6.6 Identificação dos Dedos Pequenos

Diversas técnicas foram estudadas com o intuito de identificar os dois dedos pequenos. No entanto, com nenhuma se obteve um grau de satisfação equiparado

às metodologias implementadas para identificar os restantes pontos de interesse. Seguidamente serão apresentadas as diversas técnicas exploradas.

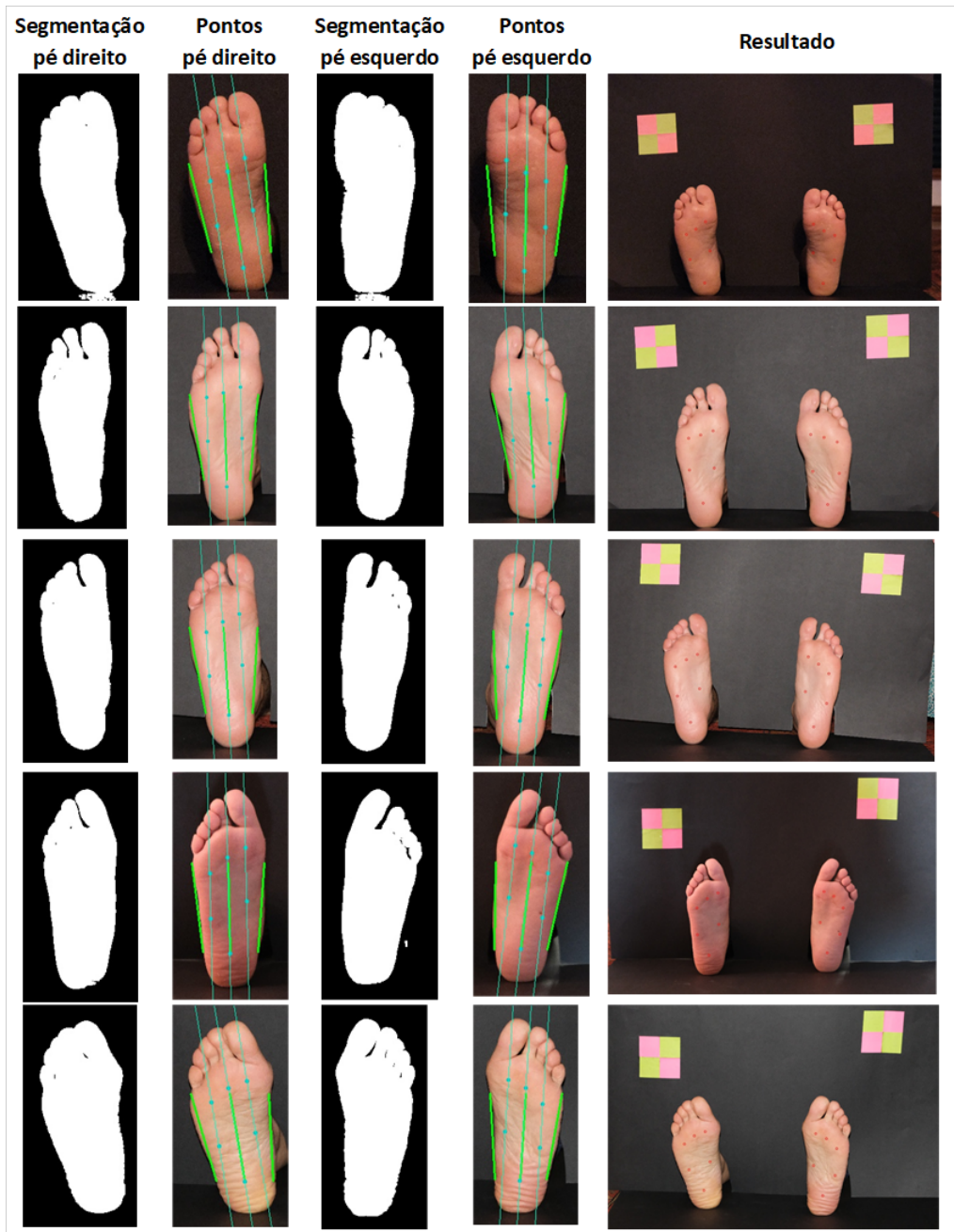


Figura 6.23: Amostra de resultados da implementação da metodologia desenvolvida para identificar pontos plantares

### 6.6.1 Transformada de Hough

A transformada de Hough é uma técnica matemática que realiza a detecção de formas geométricas em imagens digitais, podendo estas ser retas, círculos ou elipses. Uma vez que visualmente é possível afirmar que os dedos dos pés se aproximam a círculos, optou-se por estudar a possibilidade de recorrer a esta transformada com o intuito de identificar os mesmos na imagem de cada pé.

Assim, recorreu-se à função *cv.HoughCircles*, disponível na biblioteca da OpenCV. Como argumentos de entrada esta espera um total de nove, sendo estes:

- Primeiro argumento: a imagem de origem à escala de cinza.
- Segundo argumento: um vetor que armazena conjuntos de 3 valores:  $x_c$ ,  $y_c$ ,  $r$  para cada círculo detetado.
- Terceiro argumento: o parâmetro `HOUGH_GRADIENT` que define o método de deteção.
- Quarto argumento: a razão inversa de resolução.
- Quinto argumento: distância mínima entre os centros detetados.
- Sexto argumento: limite superior para o detetor interno de contorno do método de Canny.
- Sétimo argumento: limiar para deteção do centro.
- Oitavo argumento: raio mínimo a ser detetado.
- Nono argumento: raio máximo a ser detetado.

Diversos valores de entrada foram estudados e testados de modo a analisar o resultado da aplicação da transformada. No entanto, os parâmetros utilizados na chamada à função não se manifestam da mesma forma em cada imagem de origem. Por esse motivo, esta transformada não foi considerada a melhor abordagem uma vez que, apesar de ter apresentado um resultado razoável em grande parte da amostra de dados testada, se torna complicado garantir a identificação dos dedos.

Foi considerada a hipótese de desenvolver um algoritmo capaz de alterar os valores dos parâmetros utilizados até que os 5 dedos fossem detetados. No entanto, esta foi descartada uma vez que outras metodologias teriam de ser também definidas e estudadas de maneira a ser possível garantir que as circunferências detetadas correspondessem verdadeiramente a dedos e não a ruído da imagem.

A Figura 6.24 apresenta o resultado de duas imagens onde determinados parâmetros se manifestaram aceitáveis para a primeira imagem, mas que falham na segunda.



Figura 6.24: Amostra de resultados da aplicação do método de Hough para detetar dedos dos pés

### 6.6.2 Método de Blobs

A função *cv.SimpleBlobDetector*, disponível na biblioteca OpenCV, permite extrair *blobs* de uma imagem binária. Assim, para testar este método foi necessário proceder novamente à segmentação desejada da imagem a analisar.

Esta abordagem foi a que se manifestou menos relevante. Isto acontece uma vez que se torna difícil alcançar a imagem binarizada de tal modo que cada dedo se encontre isolado dos restantes, permitindo assim ser considerado um *blob*. A Figura 6.25 apresenta um resultado obtido a título de exemplo.

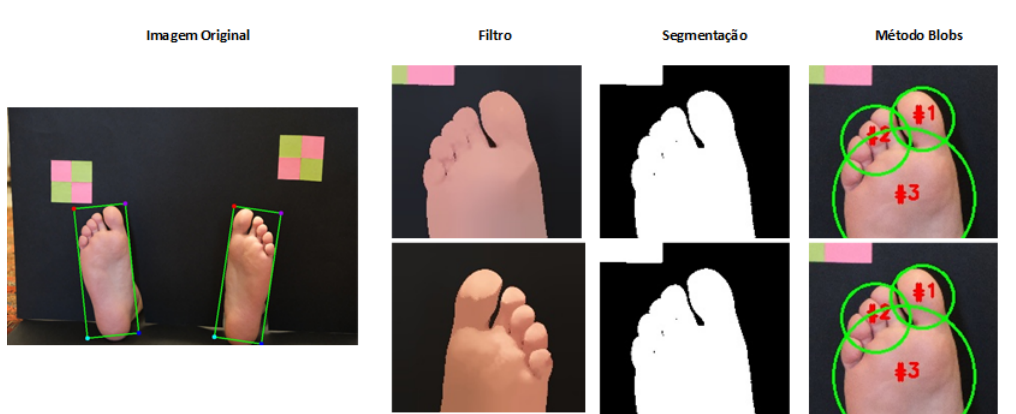


Figura 6.25: Resultados exemplo da aplicação do método de *blobs* para detetar dedos dos pés

### 6.6.3 Método Watershed

Outra abordagem explorada baseou-se no estudo da imagem com recurso às funções *cv.distanceTransform* e *cv.watershed*. A função *cv.distanceTransform* calcula a distância aproximada ou precisa de cada pixel de uma imagem binária até ao pixel zero mais próximo e a função *cv.watershed* implementa uma das variantes do algoritmo de segmentação baseado em marcadores não paramétricos de bacias hidrográfica, sendo que se torna necessário delinear as regiões desejadas com marcadores de imagem, como são exemplo o *cv.findContours* e o *cv.drawContours*, anteriormente estudados [69].

Também esta abordagem exigiu que a imagem fosse processada de modo a isolar a área de cada pé. Tendo a área de um pé isolada numa nova imagem, foi aplicado um método que permite uma transformação de distâncias, com o intuito de obter os dedos como zonas separadas, com base nas sombras existentes entre os mesmos. Para isso, procedeu-se inicialmente a uma binarização da imagem.

Depois de aplicado o método da transformação de distâncias foi necessária uma nova binarização da imagem, seguida de técnicas como erosão e dilatação para melhorar as áreas a identificar, pelo mesmo motivo descrito na segmentação da imagem do pé. Uma vez obtida a imagem, como resultado de todos os passos descritos, foi aplicada a função que permite detetar contornos, seguida da aplicação do método *watershed* para colorir, e assim distinguir, os contornos detetados.

A Figura 6.26 apresenta uma amostra de resultados obtidos, onde é possível visualizar que esta abordagem também não se manifestou a melhor aposta para solucionar o problema.

### 6.6.4 Análise do Contorno do Pé

Foram exploradas diferentes abordagens com o intuito de estudar o contorno do pé, a fim de identificar os dedos de interesse no mesmo.

#### 6.6.4.1 Detecção de Picos no Contorno do Pé

Com base no resultado obtido na metodologia implementada para detetar o dedo hálux, uma outra abordagem partiu da análise dos restantes picos correspondentes ao gráfico do contorno do pé de modo a perceber se se torna possível detetar os restantes dedos.

Assim, a mesma lógica voltou a ser implementada no que respeita a análise do gráfico e determinação dos seus picos. Seguidamente, todos os valores de pico detetados foram identificados na imagem, permitindo assim visualmente concluir se os mesmos correspondem, respetivamente, a cada um dos dedos do pé. Após a análise dos resultados, entendeu-se que esta abordagem também falha, uma vez

que nem sempre se consegue garantir o resultado requerido, tal como se pode visualizar na amostra da Figura 6.27.

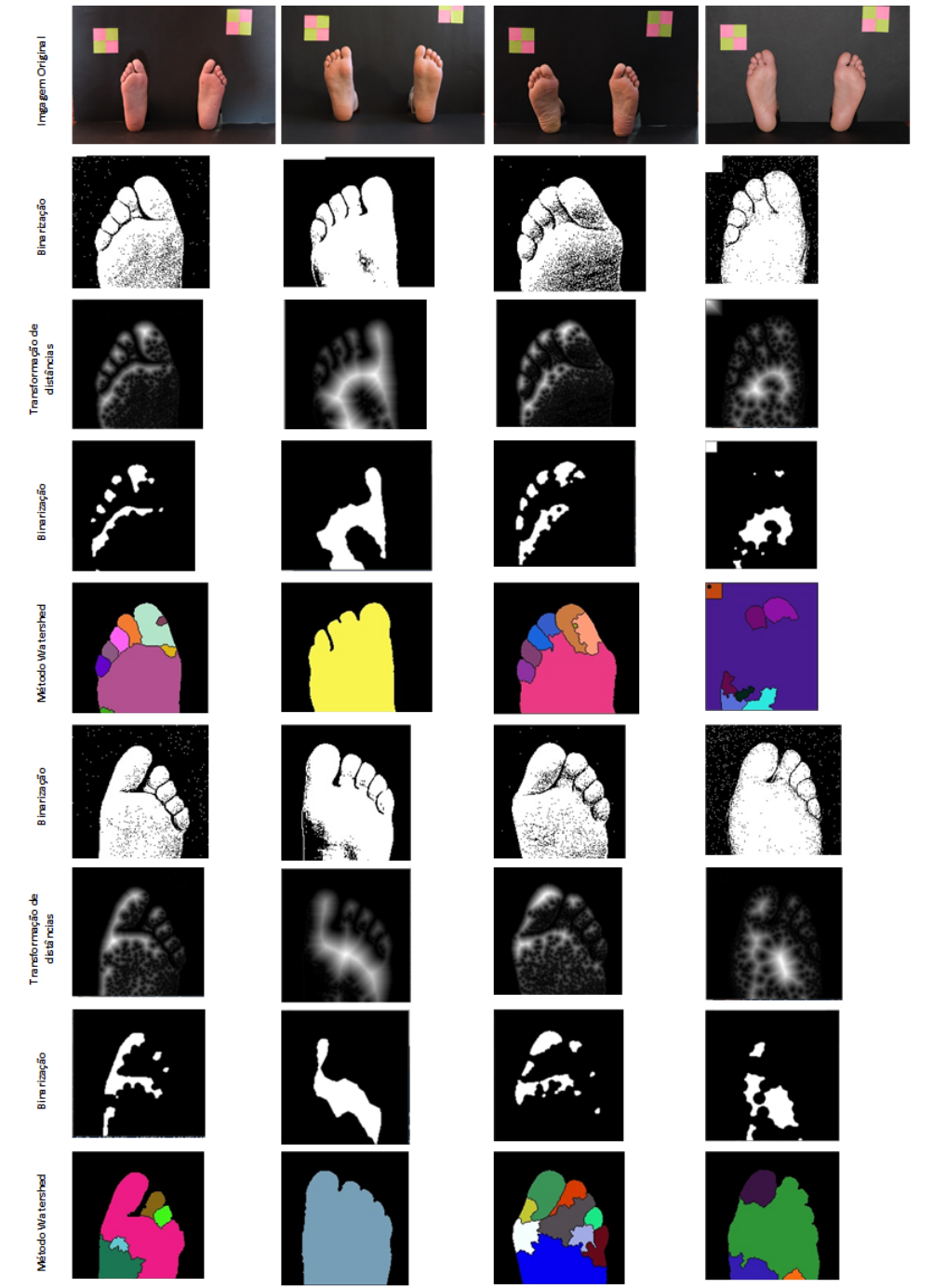


Figura 6.26: Amostra de resultados da aplicação dos métodos de transformação de distâncias e *watershed* para detetar dedos dos pés

Apesar do resultado pouco satisfatório, foram implementadas outras alterações à metodologia descrita com o intuito de a tentar melhor e dela retirar valor. Assim, optou-se pela análise da derivada do gráfico do contorno com o intuito de melhor identificar os picos como correspondência a dedos. Tal como se pode visualizar na Figura 6.28, esta abordagem também não se manifesta ideal.

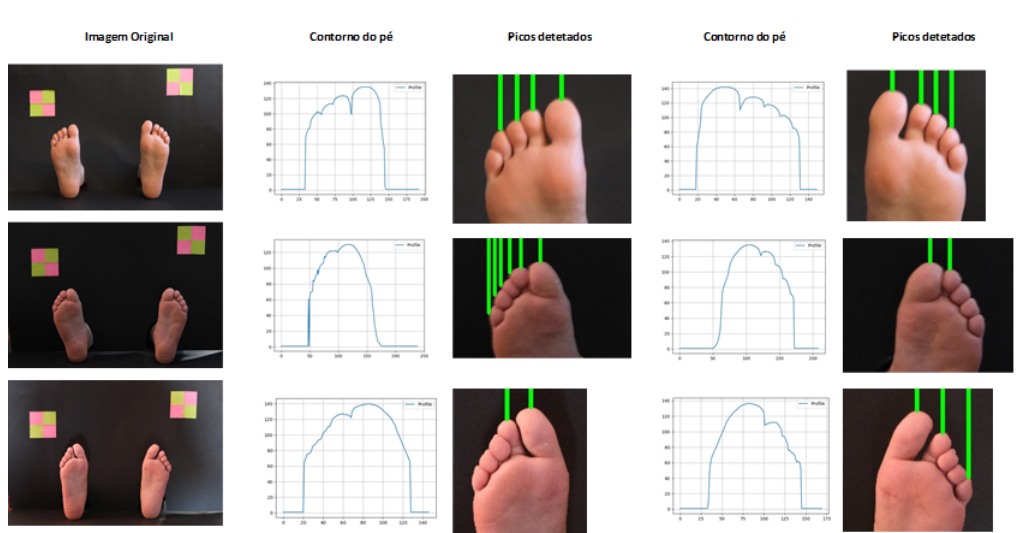


Figura 6.27: [Amostra de resultados da análise do contorno do pé para detetar os dedos

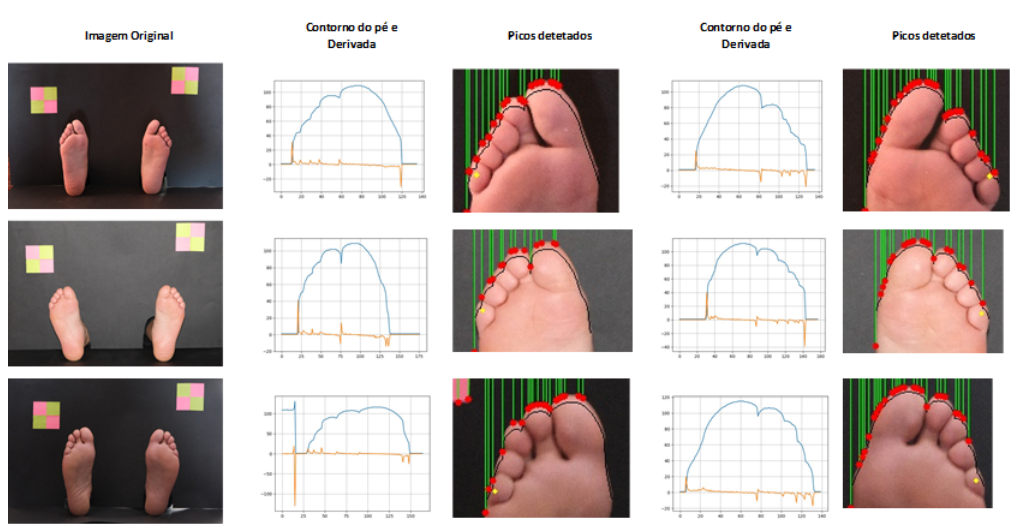


Figura 6.28: Amostra de resultados da análise da primeira derivada do contorno do pé para detetar os dedos

Estudou-se ainda a possibilidade de melhorar os resultados obtidos no estudo dos picos do contorno do pé, garantindo que na aquisição das imagens plantares os dedos se encontram suficientemente separados. No entanto, este método não se manifestou a melhor abordagem dada a dificuldade em manter o paciente nas condições requeridas. A Figura 6.29 ilustra uma amostra dos resultados obtidos.

#### 6.6.4.2 Detecção de Transições de Intensidade de pixels no Contorno do Pé

Optou-se também estudar a hipótese de detetar as transições de intensidade dos pixels sobre o contorno do pé. Ao detetar essas transições de intensidade, é possível identificar a passagem entre os dedos, uma vez que a separação entre os mesmos apresenta uma tonalidade mais escura do que a tonalidade dos centros de cada dedo.

Para isso, o contorno do pé foi deslocado sobre a imagem, prosseguindo-se um armazenamento da intensidade dos respetivos pixels que compõem esse dado contorno e posterior análise do mesmo através de uma derivada. No entanto, também esta abordagem apresenta falhas, tal como se pode comprovar pela análise da amostra apresentada na Figura 6.30.

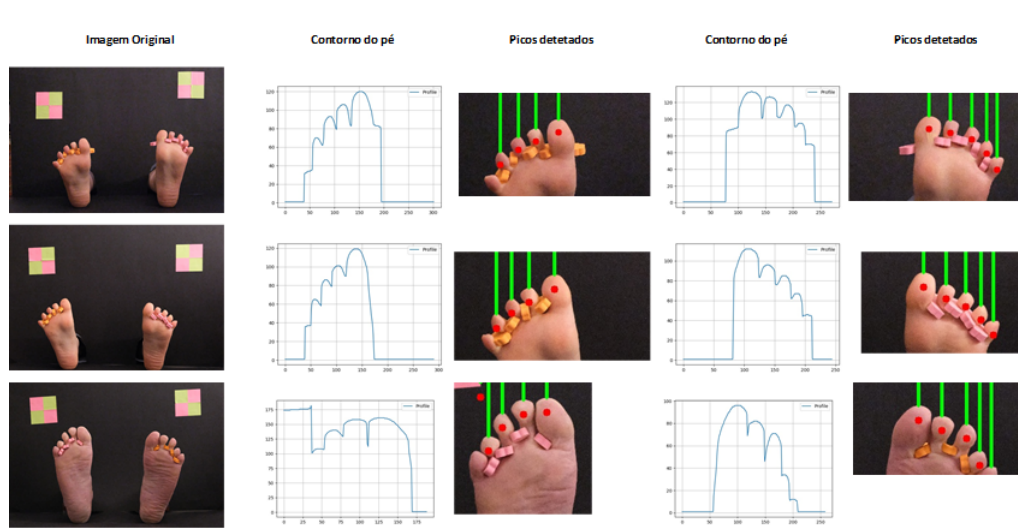


Figura 6.29: Amostra de resultados da análise do contorno do pé para detetar os dedos, em imagens adquiridas onde se garante uma separação física entre dedos

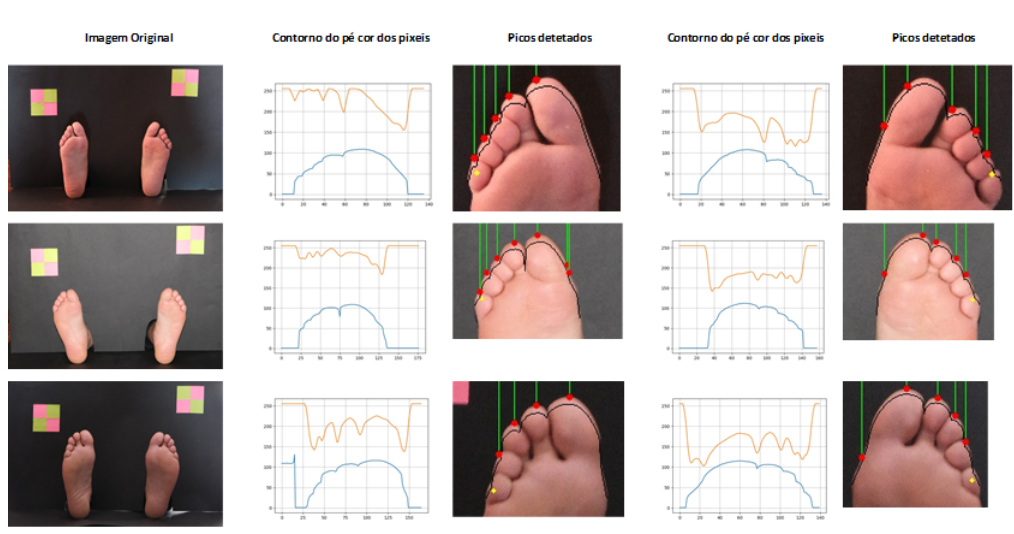


Figura 6.30: Amostra de resultados da análise da intensidade dos pixels sobre o contorno do pé para detetar os dedos pelas transições de cor detetadas

### 6.6.5 Relações de Proporção

Uma última abordagem foi explorada de modo a tentar solucionar o problema, tendo esta por base o desenvolvimento de um padrão entre as imagens, à semelhança do que se aplicou na tarefa de identificar os pontos desejados na planta do pé.

Deste modo, a partir da informação anteriormente recolhida referente ao processo de orientação do pé, sobre a linha orientadora vermelha superior foram sinalizados dois novos pontos de orientação, respetivamente a  $\frac{k}{4}$  e  $\frac{3}{4}k$ , sendo  $k$  a distância entre dois pontos identificados na linha orientadora. No caso do pé direito, este valor representa a distância entre o primeiro ponto de transição de intensidade de pixels na linha orientadora e o ponto detetado ao centro do pé sobre a mesma. No caso do pé esquerdo, este valor representa a distância entre o ponto do ao centro do pé determinado na linha orientadora e o último ponto de transição de intensidade de pixels sobre a mesma.

Tendo as retas de orientação amarelas traçadas sobre os pontos de orientação identificados, e com base nos ângulos dos segmentos de reta referentes à primeira lateral - no caso do pé direito - e à segunda lateral - no caso do pé esquerdo -, ao analisar de cima para baixo sobre as mesmas o equivalente da imagem em formato binário, é possível detetar a transição de preto para branco. Cada ponto branco corresponde a um deslocamento sobre a sua respetiva reta orientadora a partir da transição detetada. Este deslocamento foi também determinado de forma

empírica, à semelhança do processo anterior. A Figura 6.31 ilustra a metodologia descrita.

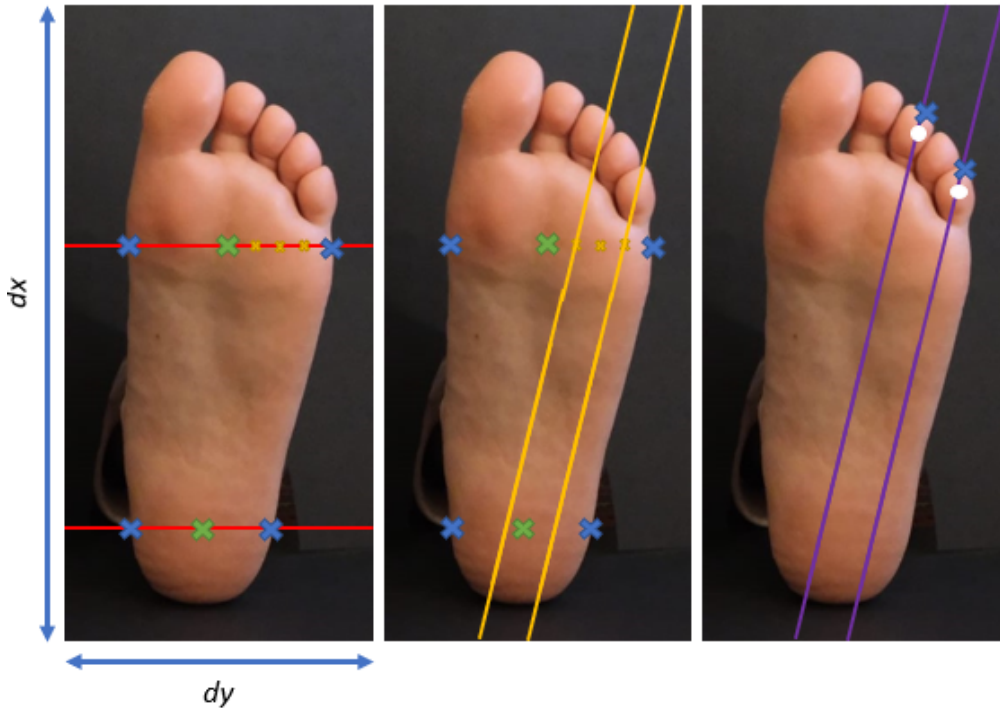


Figura 6.31: Abordagem desenvolvida e implementada para determinar pontos dos dedos pequenos de interesse. A imagem à direita representa a análise aplicada à imagem binária de modo a detetar transições nas extremidades laterais do pé, e por conseguinte a orientação do mesmo. A imagem ao centro representa as linhas orientadoras desenhadas com base nos pontos determinados na primeira imagem. A imagem à esquerda sinaliza os pontos detetados pela respetiva análise da intensidade dos pixels sobre as linhas orientadoras

A implementação desta metodologia é em tudo equiparada ao que se apresentou na tarefa de identificação dos pontos sobre a planta do pé, pelo que se dispensa uma exposição detalhada da mesma.

Relativamente aos resultados alcançados, é possível afirmar que esta abordagem é a que melhor se aproxima do desejado. No entanto, ainda não se manifesta ideal, uma vez que não é possível detetar em toda a amostra testada os pontos desejados. A Figura 6.32 apresenta alguns dos resultados obtidos.

No Anexo C encontram-se amostras de resultados das diversas técnicas exploradas com o intuito de dar resposta à tarefa exposta nesta secção, onde se pretende a identificação dos dedos pequenos em cada pé.

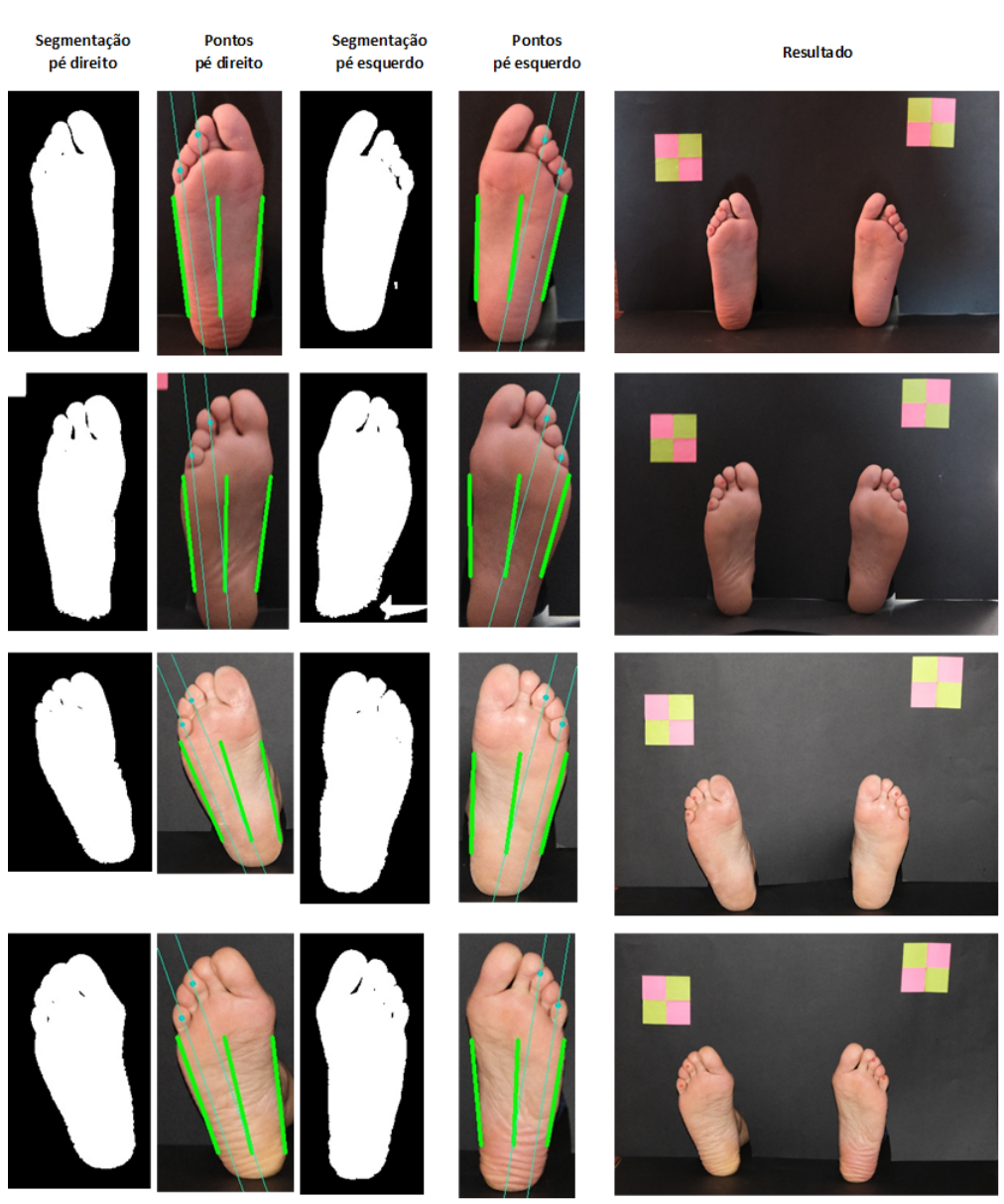


Figura 6.32: Amostra de resultados da análise da intensidade dos pixels sobre o contorno do pé para detetar os dedos pelas transições de cor detetadas

## 6.7 Sumário

Este capítulo procurou a exposição de toda a implementação inerente à fase de desenvolvimento do *software* do sistema de visão projetado. Neste encontram-se detalhadas todas as abordagens estudadas e testadas, quais as técnicas utilizadas e que resultados intermédios foram analisados de modo procurar solucionar o

problema apresentado a cada tarefa.

Assim, é possível entender que metodologia foi implementada para identificar cada um dos nove pontos da planta do pé envolvidos no teste do MSW, assim como todo o trabalho de pesquisa e desenvolvimento envolvidos, tanto de abordagens bem sucedidas como de abordagem que fracassaram, mas que permitiram atingir o resultado final.

## Capítulo 7

---

# Testes e Resultados

---

*Neste capítulo serão apresentados os resultados alcançados através do desenvolvimento do software de visão, permitindo assim analisar se cada metodologia implementada para detetar cada um dos pontos necessários à realização do teste do MSW cumpre com a necessidade observada. Além do mais, serão igualmente expostas as condições consideradas ideais para o correto funcionamento do sistema, tendo por base a análise e discussão dos diversos fatores observados na amostra testada, influenciados pelo momento de aquisição das imagens plantares.*

### 7.1 Resultados da Segmentação da Imagem do Pé

No que diz respeito à tarefa de segmentação da imagem do pé, é possível afirmar que esta foi bem sucedida uma vez que, das noventa imagens de amostra testadas, em apenas uma se verifica que a segmentação não foi a esperada e que, por conseguinte, a identificação das duas áreas desejadas - uma de cada pé - não se verifica. Assim, de um total de cento e oitenta pés considerados foram detetados um total de cento e setenta e nove, apresentado desse modo uma percentagem de sucesso de 99,44%.

No que respeita à implementação idealizada para detetar os nove pontos de interesse para a realização do teste do MSW, será apresentado o somatório de resultados positivos associado a cada um dos pontos identificados com sucesso. A Figura 7.1 apresenta a legenda utilizada para distinguir cada um dos pontos na apresentação dos resultados alcançados.

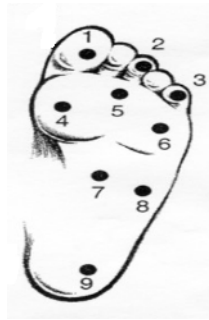


Figura 7.1: Legenda dos pontos de interesse para a realização do teste do MSW utilizada para a exposição dos resultados do sistema de visão implementado [2]

A amostra utilizada para a realização dos testes ao algoritmo desenvolvido é constituída por noventa imagens de quinze pessoas diferentes. Destas distinguem-se nove pessoas do sexo feminino, que representam um total de quarenta e três imagens plantares, e seis pessoas do sexo masculino, que representam um total de quarenta e sete imagens plantares. De cada pessoa foram recolhidas diversas imagens, permitindo assim estudar o comportamento de factores como a inclinação dos pés, a incidência de luz, e a distância entre os objetos de dimensões conhecidas e os pés.

## 7.2 Resultados da Identificação dos Pontos de Interesse

A Tabela 7.1 apresenta os resultados associados a cada ponto de interesse estudado. Nesta é possível analisar em quantas imagens o algoritmo falha na identificação correta de cada um dos pontos, em pelo menos um dos pés. Para além disso, é apresentado o total de pontos identificados corretamente, assim como a taxa de sucesso associada.

Tabela 7.1: Resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido para identificação de cada um dos pontos de interesse para o rastreio do MSW

| Ponto | Número Imagens Falha | Número Pontos Sucesso | Taxa Sucesso |
|-------|----------------------|-----------------------|--------------|
| 1     | 1                    | 179                   | 99,44%       |
| 2     | 66                   | 64                    | 35,55%       |
| 3     | 56                   | 104                   | 57,77%       |
| 4     | 14                   | 170                   | 88,88%       |
| 5     | 17                   | 154                   | 85,88%       |
| 6     | 16                   | 155                   | 86,11%       |
| 7     | 1                    | 179                   | 99,44%       |
| 8     | 3                    | 177                   | 98,33%       |
| 9     | 2                    | 177                   | 98,33%       |

### 7.2.1 Resultados da Identificação dos Pontos de Interesse com Distinção do Pé Feminino e do Pé Masculino

Na análise realizada ao conjunto de resultados obtidos na amostra testada, fazendo distinção entre o pé masculino do pé feminino, outros valores se apresentam. A Tabela 7.2 e a Tabela 7.3 apresentam os resultados obtidos, repetivamente, na análise da amostra do pé masculino e do pé feminino, para cada ponto. Sabe-se ainda que foram considerados noventa e quatro valores para cada ponto no que respeita o pé masculino, e oitenta e seis valores para cada ponto no que respeita o pé feminino.

Tabela 7.2: Resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido para identificação de cada um dos pontos de interesse para o rastreo do MSW, considerando a amostra de pés masculinos

| Ponto    | Número Imagens Falha | Número Pontos Sucesso | Taxa Sucesso |
|----------|----------------------|-----------------------|--------------|
| <b>1</b> | 0                    | 94                    | 100%         |
| <b>2</b> | 33                   | 46                    | 19,15%       |
| <b>3</b> | 27                   | 53                    | 56,38%       |
| <b>4</b> | 4                    | 91                    | 96,81%       |
| <b>5</b> | 4                    | 90                    | 95,74%       |
| <b>6</b> | 3                    | 91                    | 96,81%       |
| <b>7</b> | 0                    | 94                    | 100%         |
| <b>8</b> | 0                    | 94                    | 100%         |
| <b>9</b> | 0                    | 94                    | 100%         |

Tabela 7.3: Resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido para identificação de cada um dos pontos de interesse para o rastreo do MSW, considerando a amostra de pés femininos

| Ponto    | Número Imagens Falha | Número Pontos Sucesso | Taxa Sucesso |
|----------|----------------------|-----------------------|--------------|
| <b>1</b> | 1                    | 85                    | 98,84%       |
| <b>2</b> | 42                   | 18                    | 53,49%       |
| <b>3</b> | 30                   | 51                    | 59,30%       |
| <b>4</b> | 11                   | 51                    | 80,23%       |
| <b>5</b> | 23                   | 64                    | 74,42%       |
| <b>6</b> | 14                   | 64                    | 74,42%       |
| <b>7</b> | 1                    | 85                    | 98,84%       |
| <b>8</b> | 3                    | 83                    | 96,51%       |
| <b>9</b> | 2                    | 83                    | 96,51%       |

Pela análise da amostra testada é possível visualizar que se obteve melhores resultados no pé masculino do que no pé feminino. No entanto, na amostra de imagens plantares femininas, é possível identificar uma maior incidência de características na aquisição das imagens que resultam na falha do algoritmo.

### 7.2.2 Resultados da Identificação dos Pontos de Interesse com Distinção do Pé Direito e do Pé Esquerdo

Outra visão e análise dos resultados adquiridos consistiu na divisão da amostra entre o pé direito e o pé esquerdo, tal como se pode visualizar respetivamente na Tabela 7.4 e Tabela 7.5

Tabela 7.4: Resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido para identificação de cada um dos pontos de interesse para o rastreio do MSW, considerando o pé direito

| Ponto | Número Imagens Falha | Número Pontos Sucesso | Taxa Sucesso |
|-------|----------------------|-----------------------|--------------|
| 1     | 0                    | 90                    | 100%         |
| 2     | 59                   | 31                    | 34,44%       |
| 3     | 42                   | 48                    | 53,33%       |
| 4     | 10                   | 82                    | 91,11%       |
| 5     | 10                   | 80                    | 88,88%       |
| 6     | 10                   | 80                    | 88,88%       |
| 7     | 0                    | 90                    | 100%         |
| 8     | 1                    | 89                    | 98,88%       |
| 9     | 1                    | 89                    | 98,88%       |

Tabela 7.5: Resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido para identificação de cada um dos pontos de interesse para o rastreio do MSW, considerando o pé esquerdo

| Ponto | Número Imagens Falha | Número Pontos Sucesso | Taxa Sucesso |
|-------|----------------------|-----------------------|--------------|
| 1     | 1                    | 89                    | 98,88%       |
| 2     | 56                   | 33                    | 36,67%       |
| 3     | 34                   | 56                    | 62,22%       |
| 4     | 12                   | 78                    | 86,66%       |
| 5     | 16                   | 74                    | 82,22%       |
| 6     | 15                   | 75                    | 83,33%       |
| 7     | 1                    | 89                    | 98,88%       |
| 8     | 2                    | 88                    | 97,77%       |
| 9     | 2                    | 88                    | 97,77%       |

Pela análise dos resultados obtidos, é possível afirmar que se obteve um resultado equiparado, tanto na análise do pé direito como na análise do pé esquerdo.

### 7.3 Tempo de Execução do Algoritmo de Identificação dos Pontos de Interesse

De modo a determinar o tempo que o algoritmo desenvolvido necessitou para a identificação dos nove pontos de interesse em cada uma das imagens de amos-

tra testadas, recorreu-se à função *time* disponível na biblioteca de funções para Python. Com esta contabilizou-se e armazenou-se num vetor de dados o tempo de análise de cada uma das imagens testadas e, posteriormente, realizou-se a média dos valores registados. O *script* foi executado três vezes, de maneira a ser realizada uma nova média com os três valores finais alcançados. Assim, obteve-se um tempo médio para identificação dos nove pontos de interesse numa imagem plantar de 2,035 segundos, com um desvio padrão de 0.037, o valor máximo registado foi de 2,078 segundos e o valor mínimo de 2,007 segundos.

## 7.4 Causas das Falhas no Algoritmo

Com base na análise dos resultados adquiridos, é possível apontar que o algoritmo falha quando a inclinação da superfície plantar, no momento de aquisição da imagem, não se encontra na vertical. Isto acontece uma vez que a segmentação da imagem do pé fica condicionada pelo aumento substancial do efeito de sombra, dado que com a inclinação do pé a iluminação não se manifesta uniformemente sobre a região plantar, o que leva a que partes do mesmo apresentem uma maior tonalidade escura que a desejada.

A Figura 7.2 ilustra a falha que se descreve. Ao canto superior esquerdo encontra-se a imagem original, ao canto superior direito encontra-se a imagem após a aplicação de técnicas como binarização, erosão e dilatação, ao canto inferior esquerdo encontra-se a imagem como resultado da aplicação do operador de Canny e ao canto inferior direito encontra-se a imagem original com a marcação das áreas dos pés detetados. Verifica-se este resultado uma vez que, dada a inclinação do pé na aquisição da imagem, existe um aumento de sombra no mesmo, o que leva a uma divisão em dois da sua área aquando da aplicação da segmentação por corte com o valor de limite calculado e utilizado na chamada à função de *threshold*.

Outro fator que influencia negativamente o resultado do algoritmo passa pelas condições de iluminação no momento de aquisição das imagens plantares. Quando existem pontos de luz na área de captura todo o processamento da imagem fica condicionado. Consequentemente, o contorno do pé não é garantido da mesma forma que seria se existisse uma distribuição uniforme da incidência da luz. A Figura 7.3 ilustra a falha descrita, onde é possível visualizar que os pontos estimados não correspondem exatamente ao desejado por influência da iluminação no momento de aquisição da imagem. Ao canto superior esquerdo encontra-se a imagem original, ao canto superior direito encontra-se a imagem após a aplicação de técnicas como binarização, erosão e dilatação, ao canto inferior esquerdo encontra-se a imagem como resultado da aplicação do operador de Canny e ao canto inferior direito encontra-se a imagem original com a marcação dos pontos de interesse identificados para o teste do MSW.

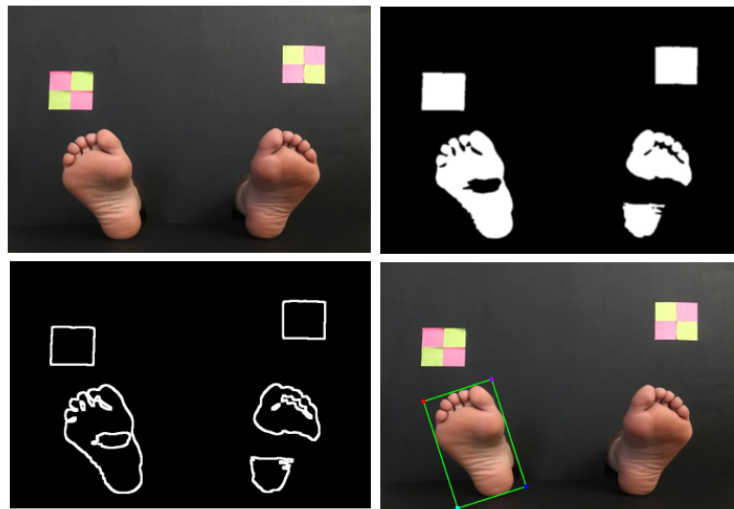


Figura 7.2: Imagem da amostra testada onde se verifica uma falha na segmentação da imagem do pé. Ao canto superior esquerdo a imagem original, ao canto superior direito a imagem após binarização, erosão e dilatação, ao canto inferior esquerdo o resultado da aplicação do operador de Canny e ao canto inferior direito a imagem original com áreas dos pés detetados.

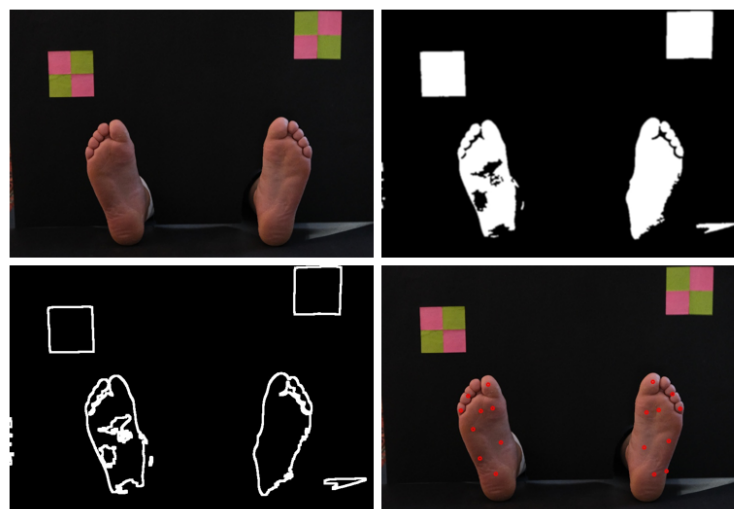


Figura 7.3: Imagem da amostra testada onde se verifica falha devido à influência da iluminação no momento de aquisição da imagem. Ao canto superior esquerdo a imagem original, ao canto superior direito a imagem após binarização, erosão e dilatação, ao canto inferior esquerdo o resultado da aplicação do operador de Canny e ao canto inferior direito a imagem original com os pontos de interesse destacados.

Além disso, verificou-se que em pés de maior dimensão, os objetos de dimensões conhecidas não se encontram na posição ideal. Dada a proximidade com o pé, quando se torna necessário isolá-lo para analisar o seu contorno superior, verifica-se que existe influência do objeto, que acaba por ser parcialmente destacado na imagem que se cria a partir das coordenadas do pé identificado na imagem original. A Figura 7.4 ilustra a falha descrita, onde é possível visualizar que os pontos estimados não correspondem exatamente ao desejado por influência do objeto de dimensões conhecidas. À esquerda encontra-se a imagem do pé isolado, ao centro a mesma imagem binarizada e à direita os pontos de interesse estimados e sinalizados, onde é possível visualizar que, por influência do objeto de dimensões conhecidas na imagem binária, o ponto representado pelo número 3 não se encontra dentro da área do pé.



Figura 7.4: Imagem da amostra testada onde se verifica falha devido à influência do objeto de dimensões conhecidas. À esquerda a imagem do pé isolado, ao centro a imagem binarizada e à direita os pontos de interesse estimados e sinalizados

Também se verifica falha quando a imagem de captura não garante a totalidade das áreas dos pés contemplada na mesma. Isto leva a que a dimensão do pé não seja bem determinada pelo algoritmo, tendo influência direta na identificação dos pontos de interesse sobre a planta do pé que se estimam a partir de relações do tamanho do mesmo. A Figura 7.5 ilustra a falha descrita, onde é possível visualizar que os pontos estimados não correspondem exatamente ao desejado por influência do corte parcial da área dos pés no momento de aquisição da imagem. À esquerda encontra-se a imagem original e à direita os pontos de interesse da planta do pé estimados e sinalizados.

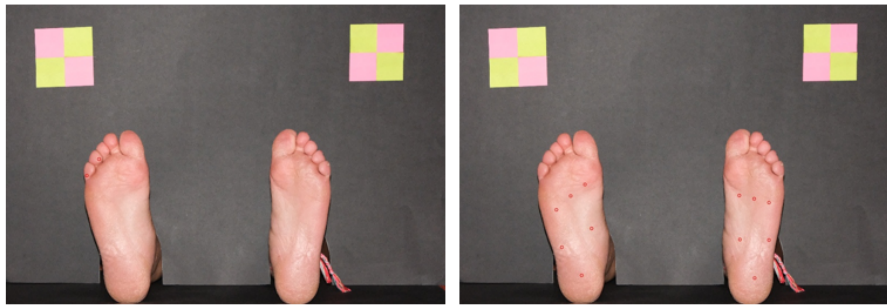


Figura 7.5: Imagem da amostra testada onde se verifica falha devido à influência do corte parcial da área dos pés na aquisição das imagens. À esquerda encontra-se a imagem original e à direita os pontos de interesse da planta do pé estimados e sinalizados.

## 7.5 Análise dos Pontos Fracos e dos Pontos Fortes do Algoritmo

Como pontos fracos do algoritmo desenvolvido, salienta-se o facto de que a identificação dos dois dedos pequenos não foi tão bem conseguida uma vez que a percentagem de sucesso não se revela elevada. No entanto, o caminho a seguir passaria pela evolução do algoritmo numa tentativa de cruzar as diversas abordagens que se exploraram mas falharam em determinadas condições, com o intuito de retirar a informação útil adquirida em cada cenário estudado, tomando assim partido do trabalho de desenvolvimento realizado. Além disso, também a determinação do tamanho de cada pé poderia ser obtida com maior rigor uma vez que todos os pontos da planta do pé se estimam em relação ao mesmo.

Conclui-se então que, com base na análise dos resultados alcançados e de modo a garantir o melhor funcionamento do algoritmo desenvolvido, torna-se necessário garantir um conjunto de condições no momento de aquisição das imagens plantares:

- Deverá ser garantida a distância entre as áreas de cada pé e os objetos de dimensões conhecidas.
- Deverá ser garantida a totalidade das áreas de cada pé contidas na imagem adquirida, evitando o corte parcial dos mesmos.
- Deverá ser garantida uma distribuição o mais uniforme da iluminação sobre a área de captura da imagem plantar, de modo a realçar a diferença de tonalidades entre o fundo de cartolina preta e os pés e objetos de dimensões conhecidas.

- Deverá ser garantida uma orientação o mais vertical possível dos pés.

Para além disso, a utilização de uma câmara 3D também poderia ser considerada uma opção. Esta poderia ajudar na tarefa de identificação das zonas de interesse recorrendo à análise das imagens plantares com base na sua profundidade. Outra possibilidade passaria pelo recurso a técnicas de inteligência artificial como metodologia para identificar os pontos desejados.

Como pontos fortes do algoritmo desenvolvido, é possível afirmar que, garantidas as condições exigidas na aquisição das imagens plantares, pelo menos sete dos nove pontos plantares necessários à realização do teste MSW são alcançados com sucesso. De notar que os resultados percentuais apresentados ao longo da análise realizada aos resultados da amostra testada contemplam não só imagens consideradas ideais, como também amostras mal adquiridas que permitiram tornar o algoritmo o mais robusto quanto possível.

## 7.6 Sumário

Em suma, apesar das abordagens adotadas e implementadas estarem sujeitas a futuros melhoramentos, com base nas percentagens de sucesso alcançadas para cada um dos nove pontos envolvidos no teste do monofilamento que se realça no presente documento, é possível afirmar que os resultados alcançados correspondem, numa visão geral, ao esperado. No entanto, salienta-se o facto de os valores alcançados para determinar os pontos representados a 2 e 3 não terem sido tão satisfatórios, pelo que o ideal seria dar continuidade ao estudo desenvolvido de modo a explorar diferentes abordagens até que os resultados se manifestem mais próximos dos desejados.



## Capítulo 8

---

# Conclusões

---

*Este capítulo visa uma apreciação sobre o trabalho desenvolvido no âmbito da presente dissertação. Serão referidos os principais pontos inerentes ao mesmo, quer positivos como negativos. Para além disso, serão ainda apresentadas sugestões de melhoramento e trabalhos futuros, que permitirão dar seguimento ao desenvolvimento do sistema robótico de apoio à análise clínica da sensibilidade superficial plantar de pacientes diagnosticados com a diabetes.*

### 8.1 Conclusões do Trabalho Realizado

Tendo em conta o que se expõe ao longo desta dissertação conclui-se que o tema da diabetes, nos dias que correm, continua a ser foco de atenção. A amputação de membros continua a ser uma das principais complicações associadas ao diagnóstico do pé diabético, pelo que se salienta a importância da realização de rastreios.

Assim sendo, o desenvolvimento do presente projeto apresenta-se em tudo pertinente uma vez que permitiu abrir caminho para o estudo e desenvolvimento de um sistema robótico, onde a sua principal finalidade passa pelo apoio na realização de um dos rastreios necessários ao atempado diagnóstico de perda de sensibilidade plantar em pacientes diagnosticados com a doença do pé diabético.

De modo a projetar uma possível abordagem com o intuito de solucionar o problema apresentado, foi estudado o tema da diabetes de maneira a recolher os dados a considerar aquando da fase de implementação. bem como quais os principais requisitos envolvidos na realização do rastreio MSW alvo de atenção.

Para além disso, estudou-se que tecnologias se manifestam vantajosas para solucionar o problema. Recolhida e estudada esta informação inicial, o passo

seguinte consistiu no projeto do sistema necessário para dar resposta ao propósito apresentado.

Assim, foram projetados três sistemas: um sistema de visão, um sistema robótico, e um módulo de aquisição e armazenamento de dados do paciente. O sistema de visão tem como finalidade a aquisição e processamento de imagens plantares de modo a que seja possível recolher a informação referente às coordenadas dos pontos envolvidos no rastreio, o sistema robótico destina-se à realização da tarefa de mover o monofilamento para as respetivas coordenadas dos pontos desejados que foram identificadas e enviadas pelo sistema de visão, e o módulo de aquisição e armazenamento de dados destina-se ao registo dos dados relativos a cada paciente, bem como das reações do mesmo face à sensação de toque aquando da realização do rastreio por parte do sistema robótico.

Por uma limitação temporal, apenas o sistema de visão foi alvo de atenção aquando da fase de implementação do projeto.

Com primeiro objetivo estabelecido para a fase de implementação da presente dissertação, definiu-se a necessidade de desenvolver um sistema capaz de adquirir imagens plantares através de um sistema de visão. Conforme expectável, o mesmo foi cumprindo com sucesso com o desenvolvimento de um sistema de visão computacional na linguagem de programação Python e com recurso a funções da biblioteca OpenCV disponibilizada para processamento de imagem.

Seguidamente, definiu-se como objetivo a identificação numa imagem digital da superfície plantar e, dentro desta, a determinação das coordenadas dos pontos previstos para a avaliação do pé, recorrendo para o efeito a técnicas de visão artificial. Também este objetivo foi alcançado positivamente com o estudo e aplicação de técnicas de processamento de imagens. O algoritmo desenvolvido é capaz de identificar a superfície do pé recorrendo à segmentação da imagem através da análise do limiar de cor e deteção de contorno. A identificação das coordenadas correspondentes aos pontos de interesse foi conseguida com a implementação de modelos criados e estudados tendo por base a identificação de relações de proporção do pé humano e características morfológicas, tendo sempre suporte na aplicação e análise de resultados adquiridos com recorrendo a técnicas de processamento de imagem.

A identificação dos dedos pequenos manifestou-se uma tarefa com maior complexidade que o previsto, pelo que os resultados associados à identificação dos mesmos permite afirmar que a abordagem adotada necessita de melhoramentos. Outra possível solução passaria pela utilização de técnicas de inteligência artificial de maneira a estudar e processar as imagens plantares na determinação dos pontos de interesse. Contudo, os resultados alcançados com o desenvolvimento do *software* associado ao sistema de visão são considerados positivos uma vez que garantidas as condições necessárias no momento de aquisição das imagens

plantares, se garante a correta identificação de, pelo menos, sete dos nove pontos desejados para o rastreamento em destaque.

## 8.2 Proposta para Desenvolvimentos Futuros

Como trabalhos futuros salienta-se a necessidade de concluir e melhorar o sistema de visão que se iniciou com o presente projeto, nomeadamente no que respeita a tarefa de corresponder cada ponto identificado na imagem a uma coordenada real. Para isso deverá dar-se uso aos objetos de dimensões conhecidas de modo a criar relações espaciais.

Como sugestão de melhoramento dos resultados alcançados pelo algoritmo de identificação dos pontos de interesse, a utilização de uma câmara 3D poderia ser uma opção a considerar, uma vez que permite a análise das imagens plantares em profundidade, podendo assim ajudar na tarefa que se apresenta. Por outro lado, o recurso a inteligência artificial como metodologia para identificar os pontos desejados também seria uma opção a considerar e explorar.

Para além do sistema de visão, também o sistema robótico requer atenção em trabalhos futuros. Tal como se sugere na apresentação da arquitetura idealizada para dar resposta ao tema exposto, o recurso a um robô colaborativo manifestar-se-ia uma escolha acertada uma vez que se caracteriza pela possibilidade em interagir diretamente com o ser humano, salvaguardando simultaneamente a segurança do mesmo.

Também o módulo de aquisição e armazenamento de dados se apresenta como tarefa para trabalhos futuros, uma vez que se manifesta imprescindível a recolha dos resultados associados ao rastreamento para análise futura por parte do profissional de saúde responsável.

Em suma, é possível afirmar que o trabalho desenvolvido enquadra-se e cumpre com a temática da presente dissertação, manifestando-se fulcral no avanço do estudo e desenvolvimento de sistema robótico de apoio à análise clínica da sensibilidade superficial plantar de pacientes diabéticos. Pode assim ser considerado o primeiro passo a fim de alcançar o resultado proposto, idealizado e projetado para trabalhos futuros.



---

## Referências Bibliográficas

---

- [1] A. M. Aring, D. E. Jones, and J. M. Falko, “Evaluation and Prevention of Diabetic Neuropathy,” *American Family Physician*, vol. 71, pp. 2123–2128, June 2005. [cited on p. 2, 8]
- [2] “Screening of the diabetic foot how to use of a 10g monofilament,” tech. rep., Northern Devon Healthcare, jun 2016. [cited on p. 3, 12, 13, 14, 17, 84]
- [3] “Diagnosis and classification of diabetes mellitus,” tech. rep., American Diabetes Association, January 2005. [cited on p. 7, 8]
- [4] *Diabetes in America*. National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases, 1995. [cited on p. 7, 8]
- [5] T. Almeida and S. C. Cruz, “Neuropatia diabética,” *Dossier. Complicações Da Diabetes. Revista Portuguesa de Clínica Geral*, vol. 23, pp. 605–613, 2007. [cited on p. 8, 9, 10]
- [6] M. Smieja, D. L. Hunt, D. Edelman, E. Etchells, J. Cornuz, and D. L. Simel, “Clinical Examination for the Detection of Protective Sensation in the Feet of Diabetic Patients,” *Journal of General Internal Medicine*, vol. 14, pp. 418–424, July 1999. [cited on p. 9]
- [7] J. Dros, A. Wewerinke, P. J. Bindels, and H. C. Van Weert, “Accuracy of Monofilament Testing to Diagnose Peripheral Neuropathy: A Systematic Review,” *Annals of Family Medicine*, vol. 7, pp. 555–558, Nov. 2009. [cited on p. 9, 11]
- [8] Y. Feng, F. J. Schlösser, and B. E. Sumpio, “The Semmes Weinstein monofilament examination as a screening tool for diabetic peripheral neuropathy,” *Journal of Vascular Surgery*, vol. 50, pp. 675–682.e1, Sept. 2009. [cited on p. 9, 11]

- [9] A. J. Boulton, D. G. Armstrong, S. F. Albert, R. G. Frykberg, R. Hellman, M. S. Kirkman, L. A. Lavery, J. W. LeMaster, J. L. Mills, M. J. Mueller, P. Sheehan, and D. K. Wukich, “Comprehensive foot examination and risk assessment,” *Diabetes Care*, vol. 31, no. 8, pp. 1679–1685, 2008. [cited on p. 9, 10, 11]
- [10] “Monofilamento de semmes weinstein,” tech. rep. Available at [https://www.sanidadambiental.com.mx/podologos/monofilamento-de-semmes-weinstein-\\_95](https://www.sanidadambiental.com.mx/podologos/monofilamento-de-semmes-weinstein-_95),. [cited on p. 9]
- [11] “Center medical - produtos médico-hospitalares.” Available at <https://www.centermedical.com.br/diapasao-com-cursor-stark-c128-hz/p>,. [cited on p. 10]
- [12] L. Fraiwan, M. AlKhodari, J. Ninan, B. Mustafa, A. Saleh, and M. Ghazal, “Diabetic foot ulcer mobile detection system using smart phone thermal camera: a feasibility study,” *BioMedical Engineering OnLine*, vol. 16, p. 117, Oct. 2017. [cited on p. 10, 15]
- [13] C. Liu, J. J. v. Netten, J. G. v. Baal, S. A. Bus, and F. v. d. Heijden, “Automatic detection of diabetic foot complications with infrared thermography by asymmetric analysis,” *Journal of Biomedical Optics*, vol. 20, p. 026003, Feb. 2015. [cited on p. 10, 14, 15]
- [14] A. Filho, A. Silva, and A. Drummond, “Reprodutibilidade inter-avaliador do teste de discriminação de dois pontos na região plantar,” *Revista Eletronica Gestão & Saúde*, vol. 6, p. 2751, July 2015. [cited on p. 10]
- [15] “Touch-Test 2 Point Discriminator.” Available at <https://www.alphasport.com.au/product/touch-test-2-point>,. [cited on p. 11]
- [16] “Monofilament testing for loss of protective sensation of diabetic/neuropathic feet for adults & children,” tech. rep., British Columbia Provincial Nursing Skin and Wound Committee, May 2012. [cited on p. 12, 13]
- [17] C. Wilasrusmee, J. Suthakorn, C. Guerineau, Y. Itsarachaiyot, V. Sa-Ing, N. Proprom, P. Lertsithichai, S. Jirasisrithum, and D. Kittur, “Development of a novel robotic monofilament test for diabetic neuropathy,” tech. rep., october 2010. [cited on p. 14, 16, 17, 18]
- [18] C. Wilasrusmee, J. Suthakorn, C. Guerineau, Y. Itsarachaiyot, V. Sa-Ing, N. Proprom, P. Lertsithichai, S. Jirasisrithum, and D. Kittur, “A Novel Robotic Monofilament Test for Diabetic Neuropathy.” [cited on p. 14, 16]
- [19] N. L. Petrova, A. Whittam, A. MacDonald, S. Ainarkar, A. N. Donaldson, J. Bevans, J. Allen, P. Plassmann, B. Kluwe, F. Ring, L. Rogers, R. Simpson,

- G. Machin, and M. E. Edmonds, “Reliability of a novel thermal imaging system for temperature assessment of healthy feet,” *Journal of Foot and Ankle Research*, vol. 11, p. 22, May 2018. [cited on p. 15]
- [20] H. Maldonado, R. Bayareh, I. Torres, A. Vera, J. Gutiérrez, and L. Leija, “Automatic detection of risk zones in diabetic foot soles by processing thermographic images taken in an uncontrolled environment,” *Infrared Physics Technology*, vol. 105, p. 103187, 2020. [cited on p. 15]
- [21] G. Bradski and A. Kaebler, *Learning OpenCV. Computer Vision with the OpenCV Library*. Gravenstein Highway North, Sebastopol: O’Reilly Media, 2008. [cited on p. 19, 27]
- [22] G. D. Silva, “Desenvolvimento de um sistema de visão computacional para o estudo do comportamento de animais experimentais,” 2008. [cited on p. 19, 20, 22]
- [23] V. Z. M. GALLO, “Desenvolvimento de um sistema de reconhecimento de caracteres para calibração de trenas a laser,” 2019. [cited on p. 19, 20]
- [24] “3d smart sensors for factory automation,” tech. rep., LMI Technologies, 2019. [cited on p. 20, 21]
- [25] S. Germany, “Visor product overview - vision sensors for factory automation,” tech. rep., march 2019. [cited on p. 21]
- [26] “Opencv ai competition.” Available at <https://opencv.org/opencv-ai-competition-2021/>. [cited on p. 22]
- [27] K. S. Satya Mallick, “Camera calibration using opencv,” february 2020. [cited on p. 22, 23]
- [28] “Free imagesn.” Available at <https://www.freeimages.com/pt/search/trees>. [cited on p. 23]
- [29] D. S. Maurício Marengoni, “Introdução à visão computacional usando opencv,” 2009. [cited on p. 24, 25, 26, 27]
- [30] scikit-image development team, “Scikit-image - image processing in python,” tech. rep., Northern Devon Healthcare, december 2020. [cited on p. 27]
- [31] “About opencv.” Available at <https://opencv.org/about/>. [cited on p. 27, 28]
- [32] J. M. de Souza Júnior, “Sistema de captura de movimentos para comandar equipamentos eletrônicos,” Master’s thesis, 2010. [cited on p. 28]
- [33] “Imagens de família em HD - Fotos de pais, filhos, avós.” Available at <https://www.shopify.com.br/burst/familia>. [cited on p. 28]

- [34] L. K. e. J.-C. L. Dan Halperin, “Robotic,” *Handbook of Discrete and Computational Geometry, in Press*, 1997. [cited on p. 31]
- [35] F. M. Mordechai Ben-Ari, *Elements of Robotics*. Springer Open, 2018. [cited on p. 31]
- [36] F. Lamb, *Industrial Automation - Hands-On*. MC Graw Hill Education, 2013. [cited on p. 31, 32]
- [37] J. J. Craig, *Introduction to Robotics Mechanics and Control*. Pearson Education International, 2005. [cited on p. 31]
- [38] “Fig 9: Joints and Links of Robot.” [cited on p. 32]
- [39] “Industrial robots - definition and classification,” tech. rep. Available at [https://ifr.org/img/office/Industrial\\_Robots\\_2016\\_Chapter\\_1\\_2.pdf](https://ifr.org/img/office/Industrial_Robots_2016_Chapter_1_2.pdf). [cited on p. 32]
- [40] “Cartesian motion systems cmswith indramotion control,” tech. rep., Bosch Rexroth AG, nov 2006. [cited on p. 33]
- [41] “Small type SCARA robots YK-XG - Industrial robots,” *Yamaha Motor Co., Ltd*. Available at <https://global.yamaha-motor.com/business/robot/lineup/ykxg/small/>. [cited on p. 33]
- [42] “Soluções robóticas turnkey acessíveis para impulsionar a produtividade da sua empresa,” *Spin Robotics*. Available at <https://www.roboscolaborativos.com/>. [cited on p. 33]
- [43] “Collaborative robotics and user applications,” tech. rep., Robotic Industries Association. Available at [https://ip.festo-didactic.com/DigitalEducation/EITManufacturing/CPPS101/FDRenderer/CMSNuggets/MediaUser/Collaborative-Robotics-End-User-Applications\\_78e422fa3d560ba54f5e18a81cf80cc1.pdf](https://ip.festo-didactic.com/DigitalEducation/EITManufacturing/CPPS101/FDRenderer/CMSNuggets/MediaUser/Collaborative-Robotics-End-User-Applications_78e422fa3d560ba54f5e18a81cf80cc1.pdf). [cited on p. 32, 34, 35]
- [44] M. Davids, “How to Perform a Risk Assessment for Collaborative Robots.” [cited on p. 33, 34]
- [45] “Porque investir em robótica colaborativa em tempo de pandemia?,” *Robótica: Automação, controlo e instrumentação*, pp. 36–38, July 2020. Available at <https://www.booki.pt/loja/prod/robotica-n-120/rob120/>. [cited on p. 33, 34]
- [46] “Safety standards collaborative robots,” tech. rep., Equinotec – Soluções de Engenharia, Lda, 2020. [cited on p. 33, 35]

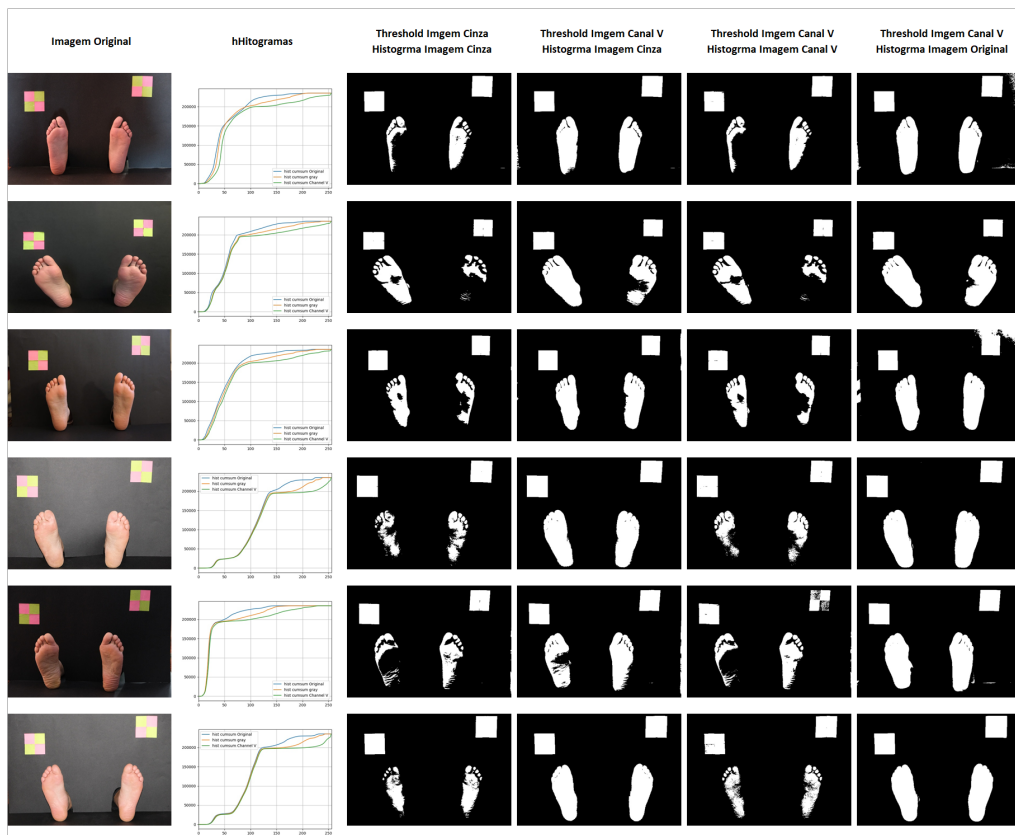
- [47] F. Platbrood, “Safe robotics – a segurança em sistemas robóticos colaborativos,” june 2018. [cited on p. 34, 35]
- [48] “Always easier than before.” Available at [https://www.equinotec.com/web/galeria/family/pdf/159257347773043\\_ROBOTS\\_-\\_Robots\\_Specifications\\_-\\_EN.pdf](https://www.equinotec.com/web/galeria/family/pdf/159257347773043_ROBOTS_-_Robots_Specifications_-_EN.pdf). [cited on p. 36, 37]
- [49] “Elite robot user manual,” tech. rep., Suzhou Elite Technology Co.Ltd, May 2020. [cited on p. 36, 37]
- [50] “Elite robot technical documents - elite cobot jbi script manual,” tech. rep., Suzhou Elite Technology Co.Ltd, May 2020. [cited on p. 36]
- [51] “Elite robot technical documents - lua script manual,” tech. rep., Suzhou Elite Technology Co.Ltd, May 2020. [cited on p. 37]
- [52] S. Won, N. Lee, M. Kim, M. K. Kim, M.-L. Kim, Y. W. Jung, B. S. Yun, and S. J. Seong, “Comparison of operative time between robotic and laparoscopic myomectomy for removal of numerous myomas,” *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 16, no. 6, p. e2132, 2020. [cited on p. 37, 38]
- [53] A. Aktas, E. Aytac, M. Bas, O. Gunes, S. H. Tarcan, E. Esen, C. Gokler, A. Aghayeva, U. Uylas, V. Ozben, A. Zengin, F. Sumer, B. Baca, I. Hamzaoglu, C. Kayaalp, and T. Karahasanoglu, “Totally minimally invasive radical gastrectomy with the da Vinci Xi® robotic system versus straight laparoscopy for gastric adenocarcinoma,” *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 16, no. 6, p. e2146, 2020. [cited on p. 38]
- [54] F. Tunca, A. C. Dural, N. A. Sahbaz, C. Akarsu, I. C. Sormaz, N. S. Emir, D. Guzey, and Y. G. Senyurek, “Pure transoral robotic thyroidectomy; institutional adaptation and early results from a tertiary endocrine surgery centre,” *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 16, no. 6, p. e2151, 2020. [cited on p. 38]
- [55] “Your life. your treatment.,” *CyberKnife*. Available at <https://cyberknife.com/>. [cited on p. 38, 39]
- [56] A. C. Pishvaian, B. Collins, G. Gagnon, S. Ahlawat, and N. G. Haddad, “Eus-guided fiducial placement for cyberknife radiotherapy of mediastinal and abdominal malignancies.” [cited on p. 38]
- [57] “CyberKnife Robotic Radiosurgery System,” *Brown Neurosurgery*. Available at <https://brownneurosurgery.com/portfolio/cyberknife-robotic-radiosurgery-system/>. [cited on p. 39]

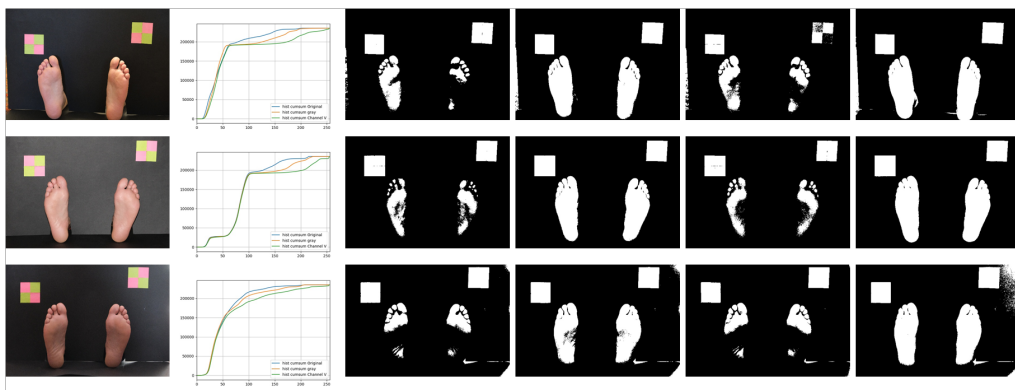
- [58] T. Mukai, S. Hirano, H. Nakashima, Y. Kato, Y. Sakaida, S. Guo, and H. Shigeyuki, “Development of a nursing-care assistant robot RIBA that can lift a human in its arms,” Nov. 2010. [cited on p. 39]
- [59] “Concept world’s first robot that can lift up a human in its arms,” *RIKEN-TRI Collaboration Center for Human-Interactive Robot Research*. Available at <http://rtc.nagoya.riken.jp/RIBA/index-e.html>. [cited on p. 39, 40]
- [60] “Habilitating human gait - marsi bionics.” Available at <https://www.marsibionics.com/en/>. [cited on p. 40, 41]
- [61] “Paralysed man moves in mind-reading exoskeleton,” *BBC News*, Oct. 2019. Available at <https://www.bbc.com/news/health-49907356>. [cited on p. 41]
- [62] C. Ribeiro, “Dispositivo mecatrónico de apoio à fisioterapia - Universidade do Minho.” [cited on p. 42]
- [63] J. Vieira, “Mobilização articular precoce da pessoa submetida a ventilação mecânica invasiva - Universidade de Évora.” [cited on p. 42]
- [64] “Collaborative Robots vs. Covid-19 - Universal Robots.” Available at <https://www.universal-robots.com/blog/cobots-vs-covid-19/>. [cited on p. 43]
- [65] Open Source Computer Vision, “Image Thresholding.” [https://docs.opencv.org/4.5.2/d7/d4d/tutorial\\_py\\_thresholding.html](https://docs.opencv.org/4.5.2/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html), april 2021. [cited on p. 53, 54]
- [66] Open Source Computer Vision, “Thresholding Operations using inRange.” [https://docs.opencv.org/3.4/da/d97/tutorial\\_threshold\\_inRange.html](https://docs.opencv.org/3.4/da/d97/tutorial_threshold_inRange.html), june 2021. [cited on p. 55]
- [67] Open Source Computer Vision, “Canny Edge Detection.” [https://docs.opencv.org/3.4/da/d22/tutorial\\_py\\_canny.html](https://docs.opencv.org/3.4/da/d22/tutorial_py_canny.html), june 2021. [cited on p. 60]
- [68] Open Source Computer Vision, “Eroding and Dilating.” [https://docs.opencv.org/3.4/db/df6/tutorial\\_erosion\\_dilatation.html](https://docs.opencv.org/3.4/db/df6/tutorial_erosion_dilatation.html), june 2021. [cited on p. 61, 62]
- [69] Open Source Computer Vision, “Miscellaneous Image Transformations.” [https://docs.opencv.org/3.4/d7/d1b/group\\_imgproc\\_misc.html#ga3267243e4d3f95165d55a618c65ac6e1](https://docs.opencv.org/3.4/d7/d1b/group_imgproc_misc.html#ga3267243e4d3f95165d55a618c65ac6e1), june 2021. [cited on p. 75]

## Anexo A

# Segmentação do pé

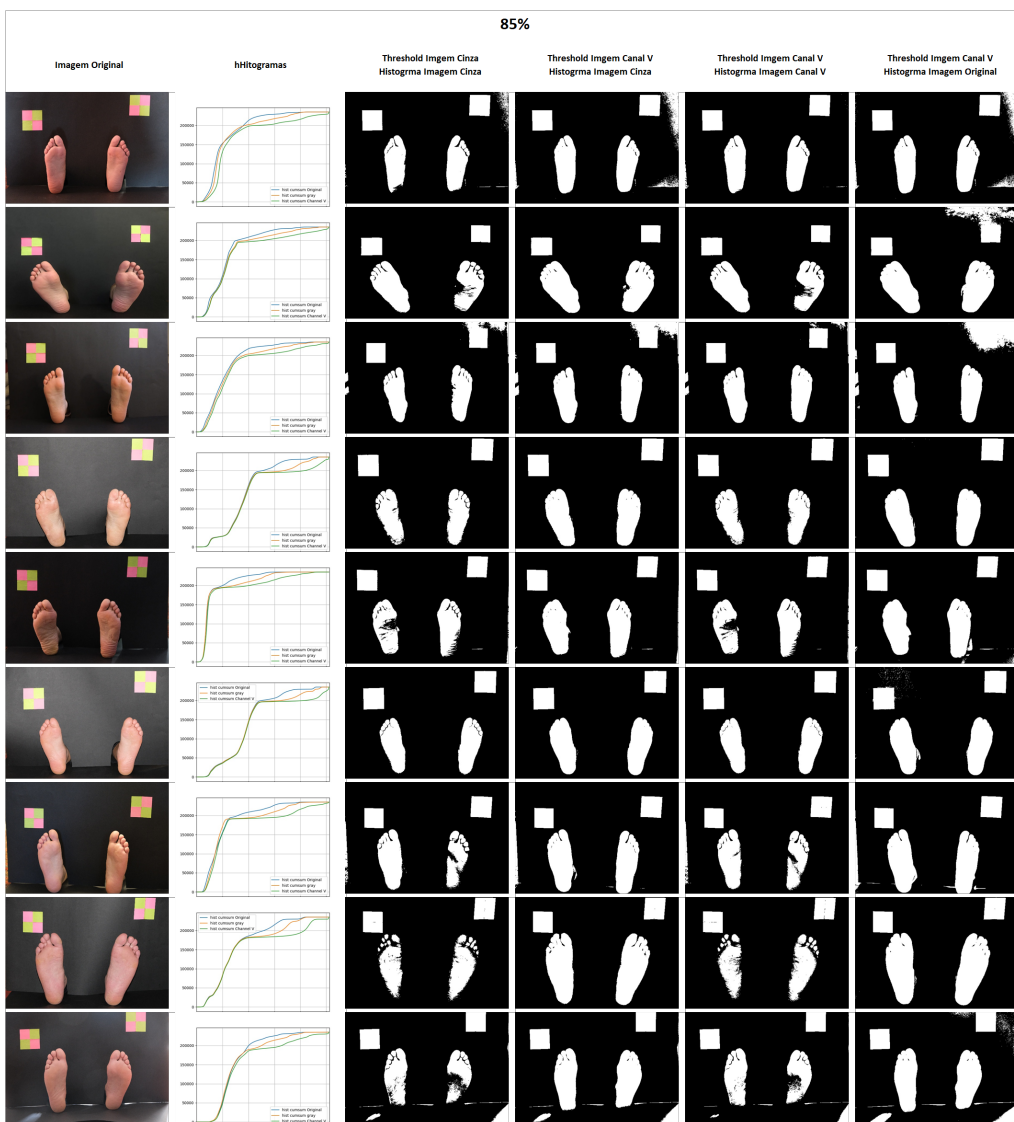
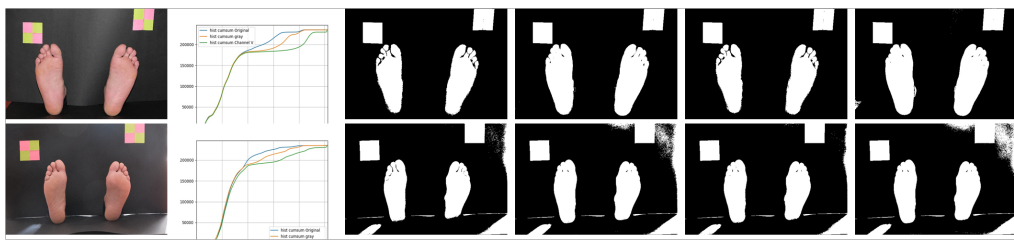
Amostra de resultados da aplicação do método de *threshold* para uma binarização com percentagem de pixels considerada cartolina de 90% no cálculo do valor de limite utilizado.





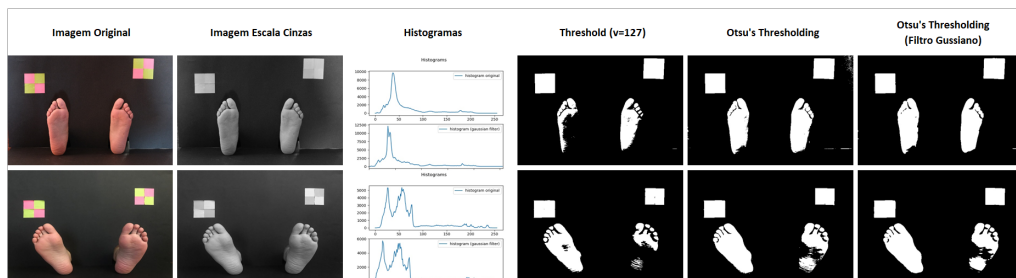
Amostra de resultados do estudo da porcentagem de pixels a considerar fundo para a determinação do valor de limite a utilizar na aplicação do método de *threshold*.





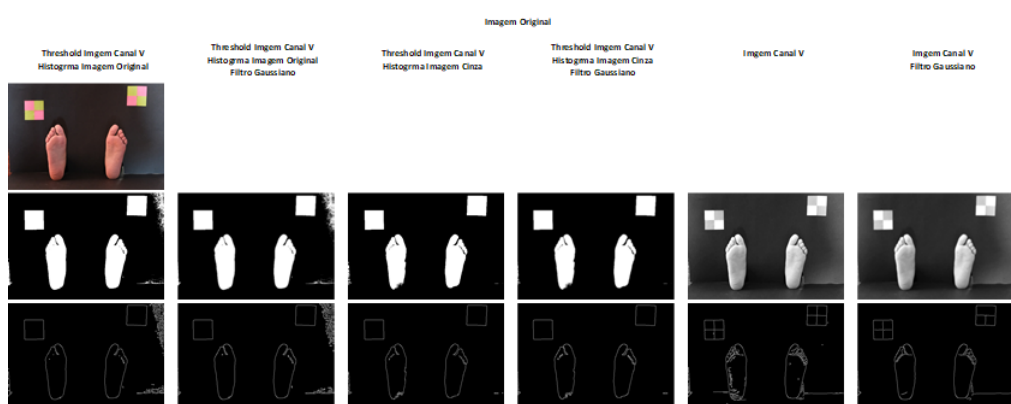


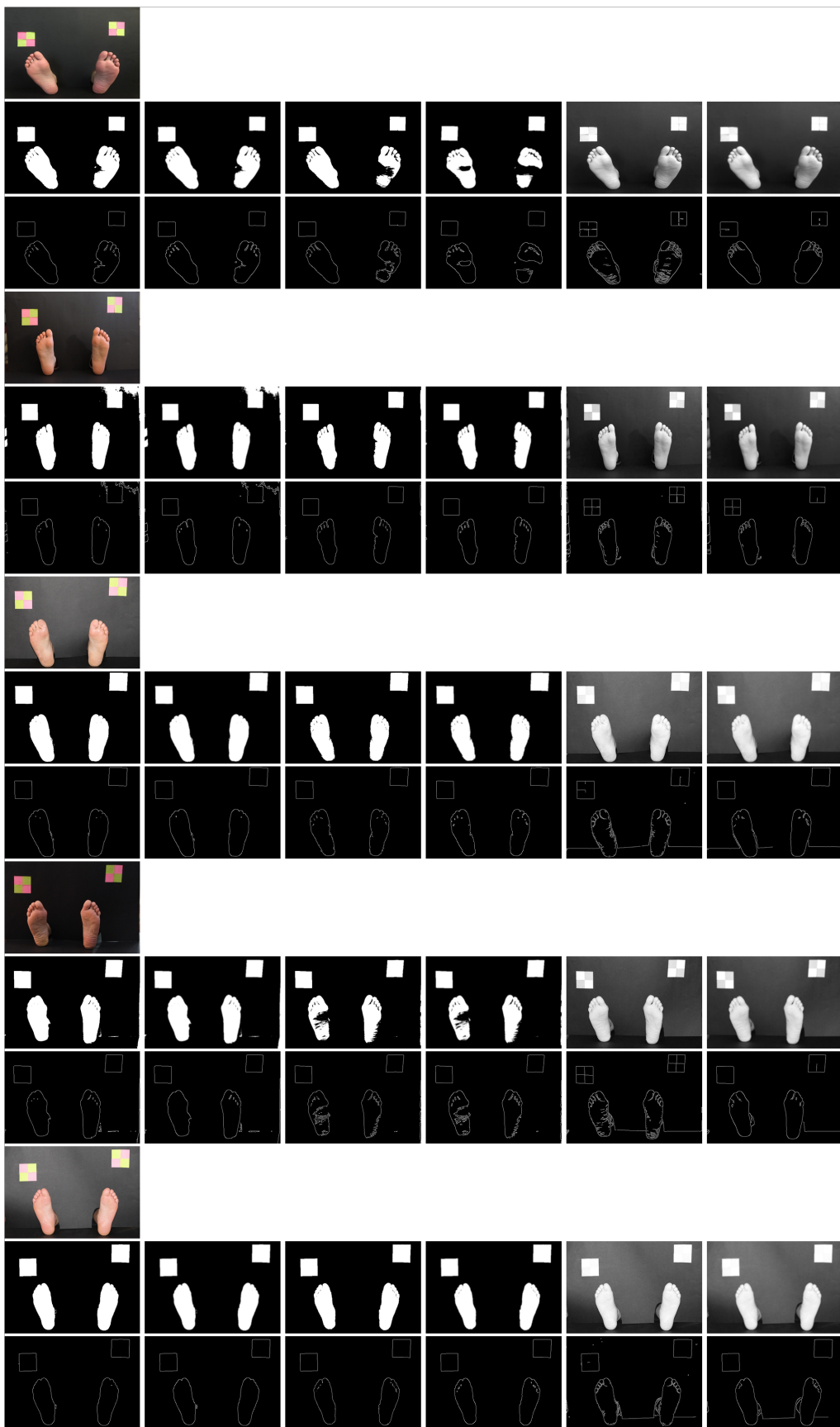
Amostra de resultados do estudo da aplicação do método de Otsu para binarização da imagem.

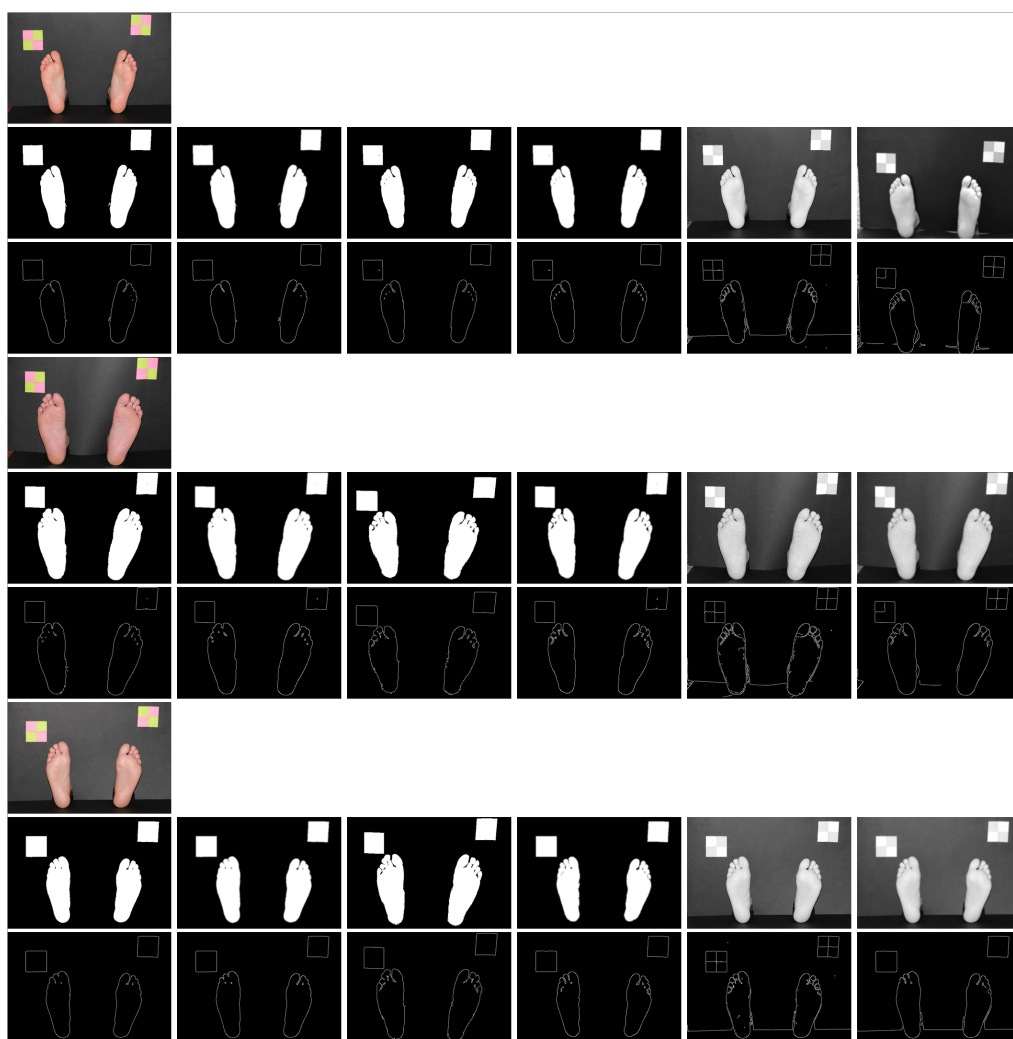




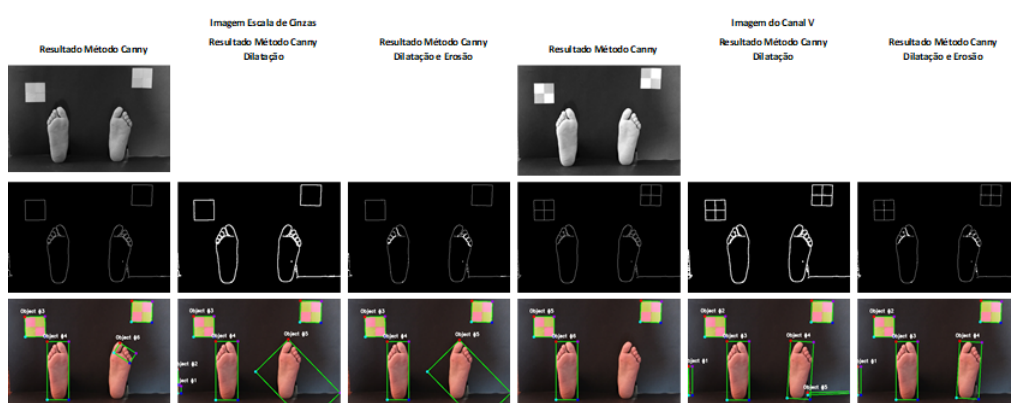
Amostra de resultados do estudo da aplicação do operador de Canny.

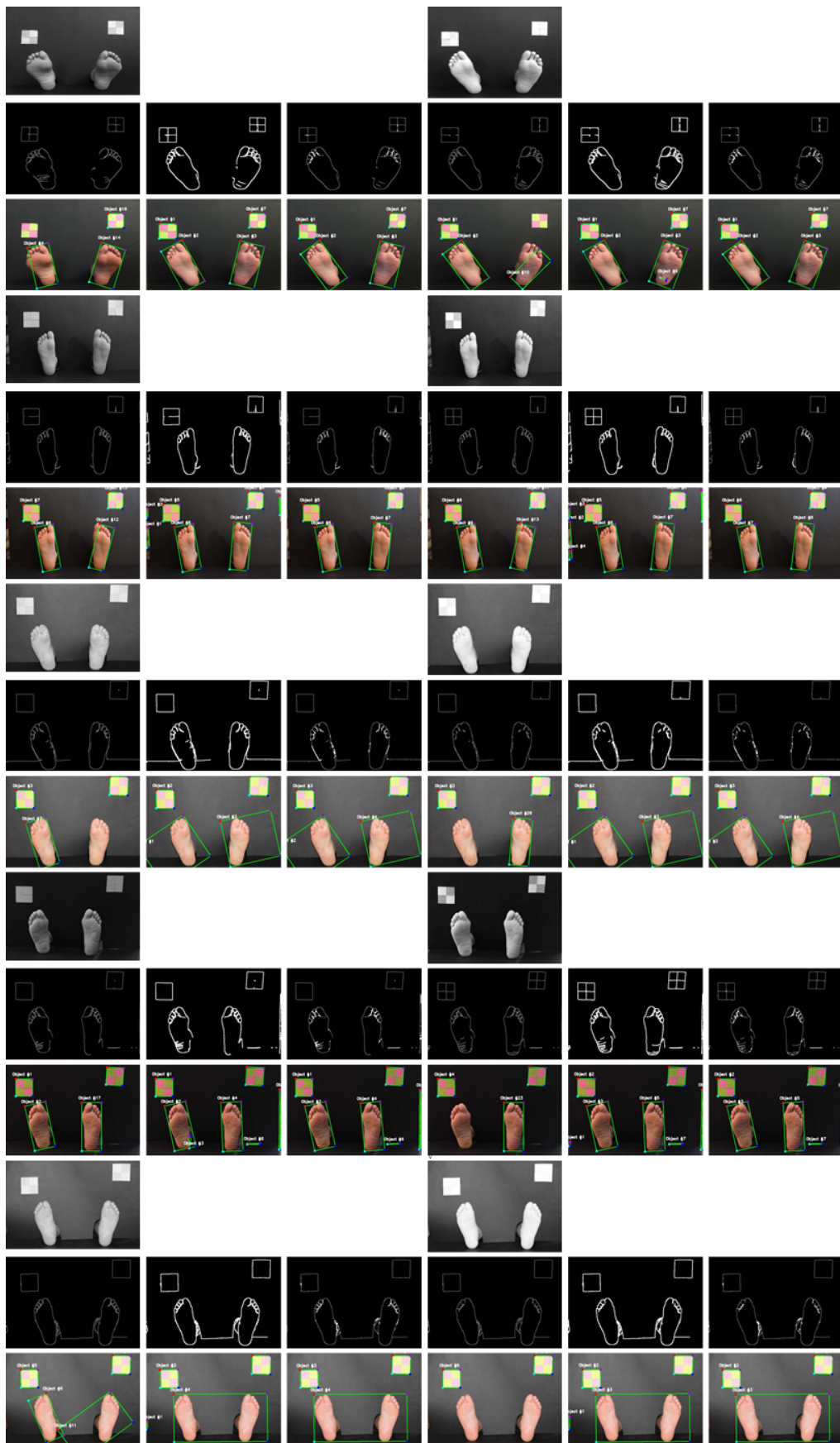






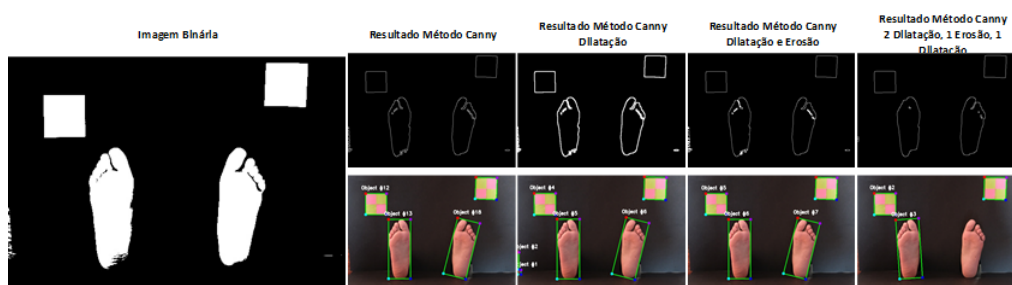
Amostra de resultados do estudo da função de detecção de contornos consoante o processamento realizado a imagens à escala de cinza e do canal V.

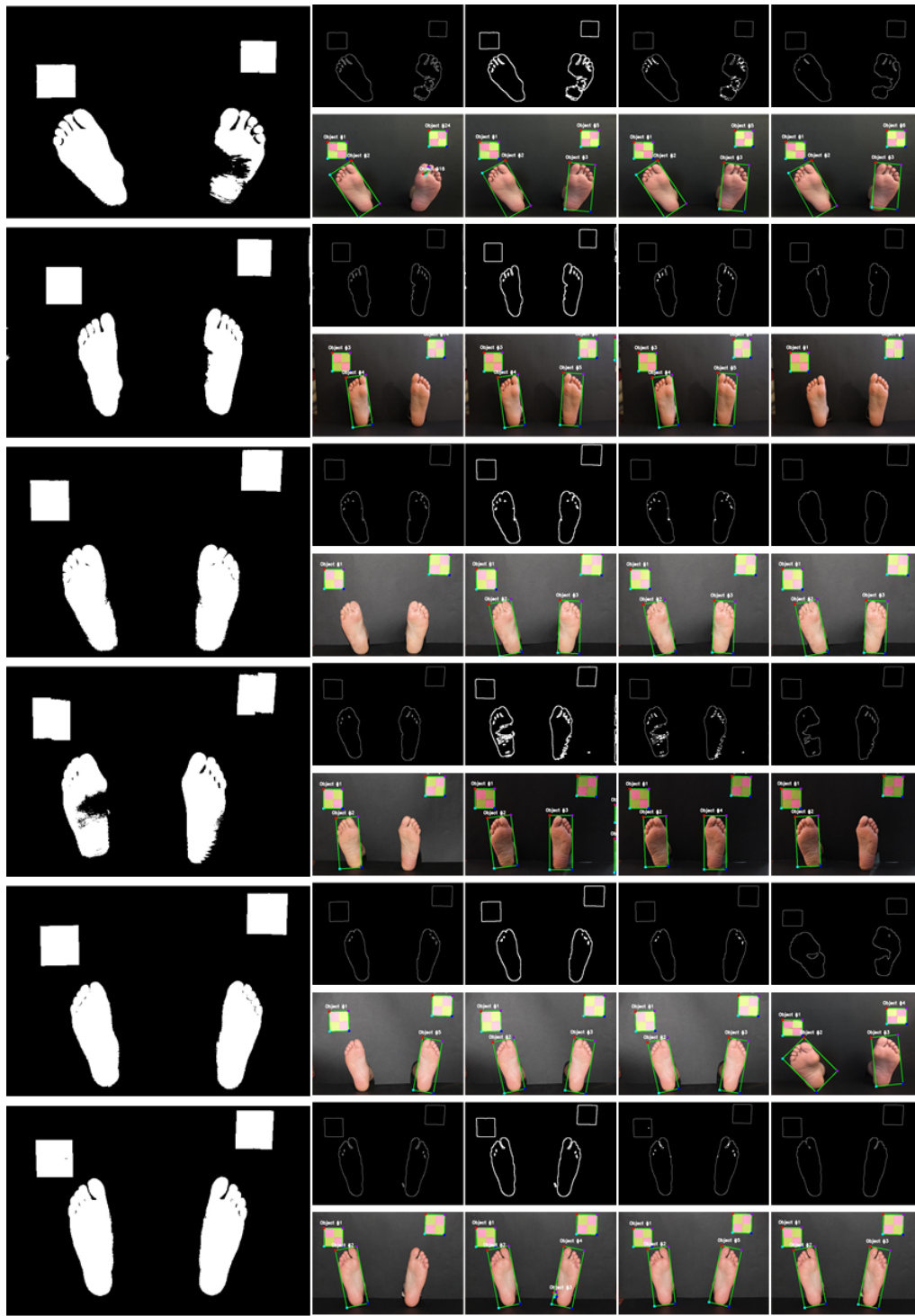


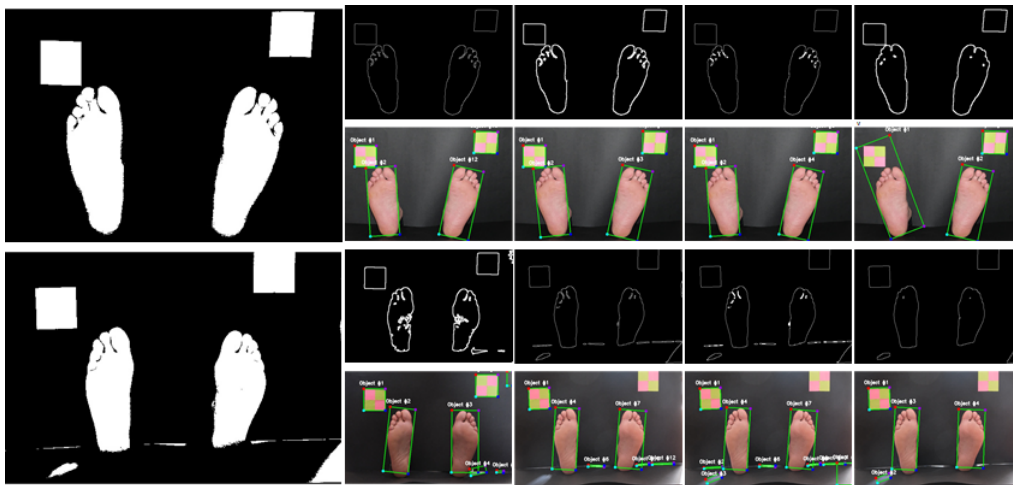




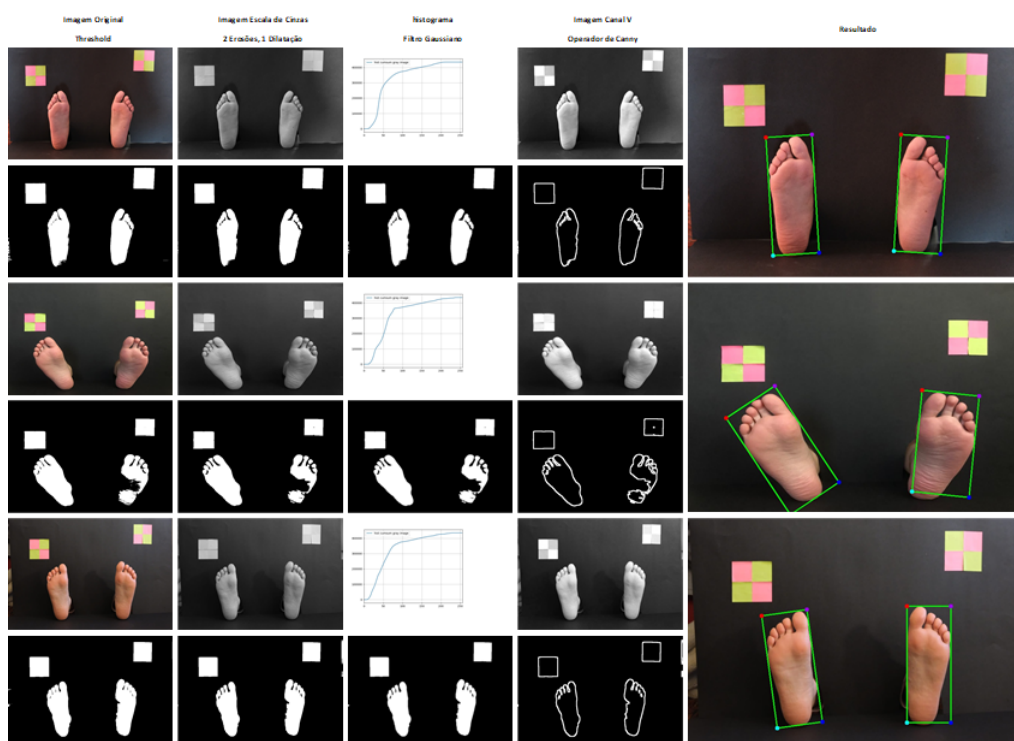
Amostra de resultados do estudo da função de detecção de contornos consoante o processamento realizado a imagens binarizadas.

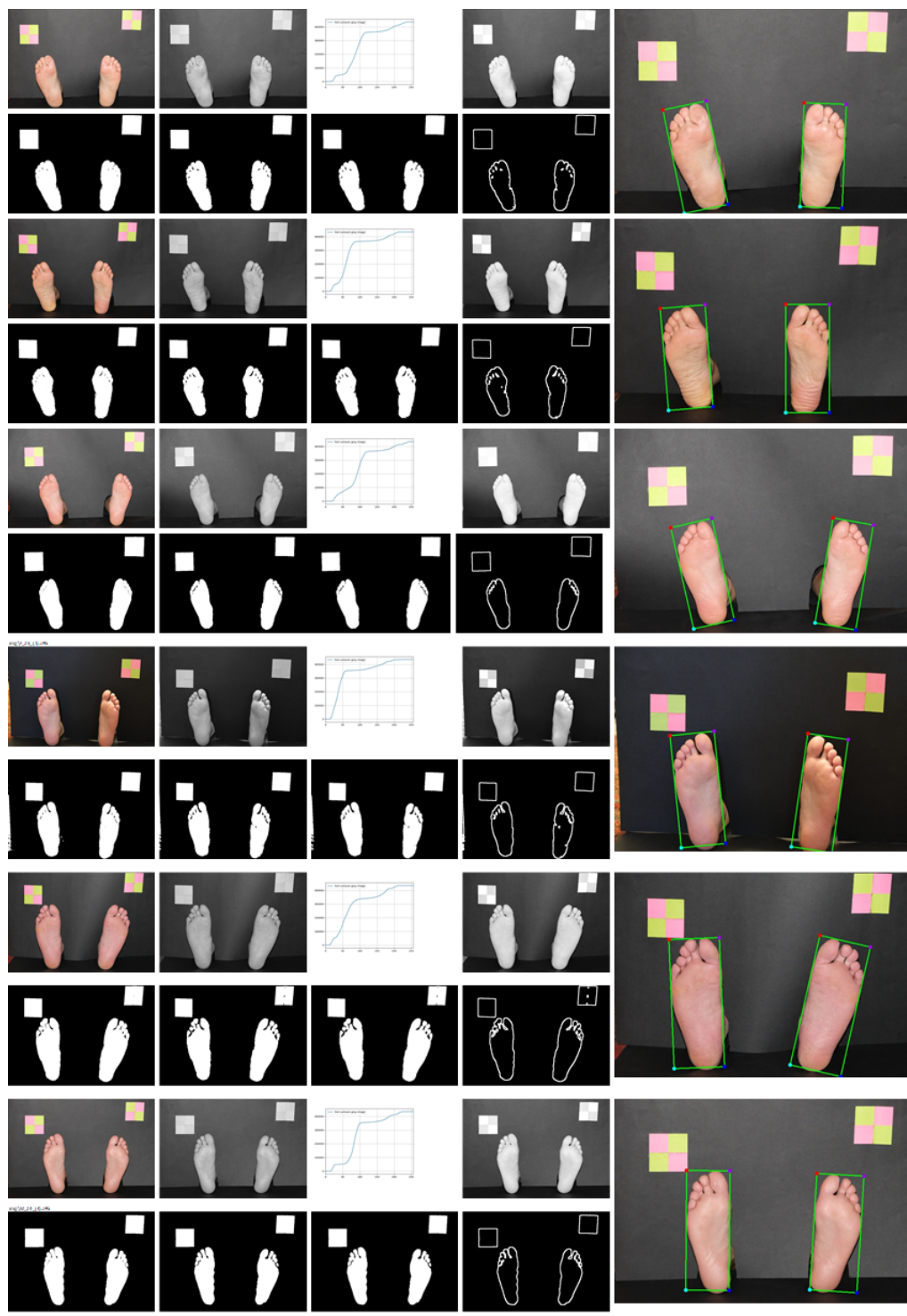






Amostra de resultados da metodologia final implementada na tarefa de segmentação dos pés.



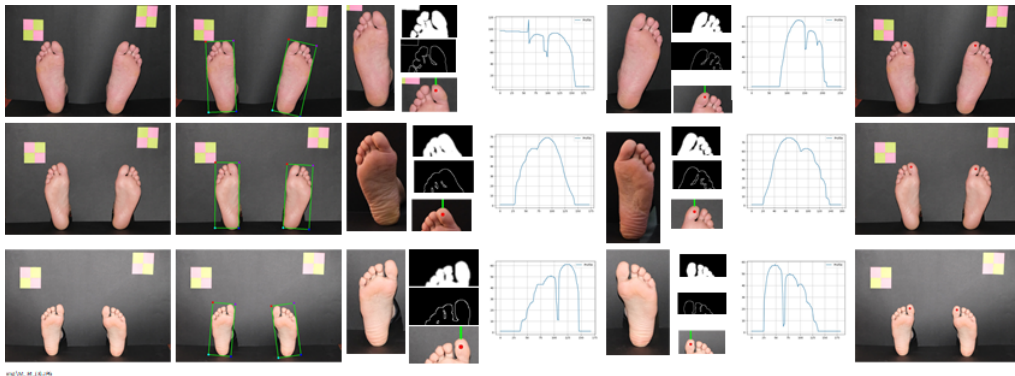


## Anexo B

# Identificação do dedo hálux e dos pontos na planta do pé

Amostra de resultados da aplicação do método desenvolvido e implementado para a identificação do dedo hálux.





Amostra de resultados da aplicação do método desenvolvido e implementado para a identificação dos pontos na planta do pé.



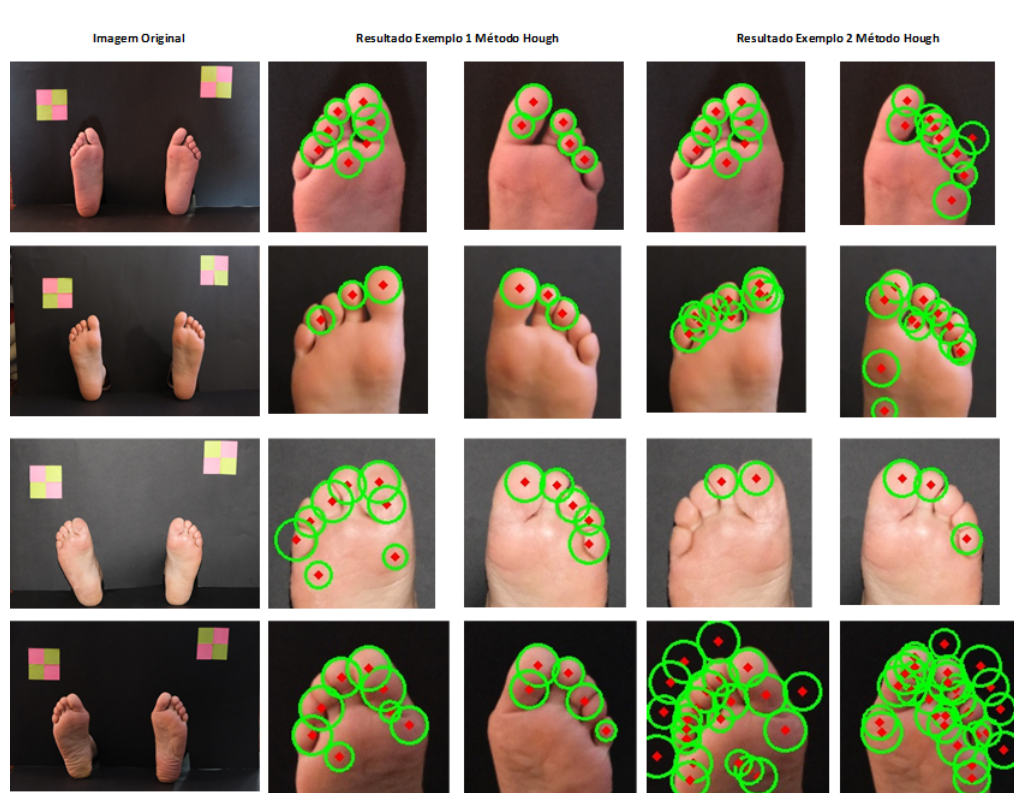




## Anexo C

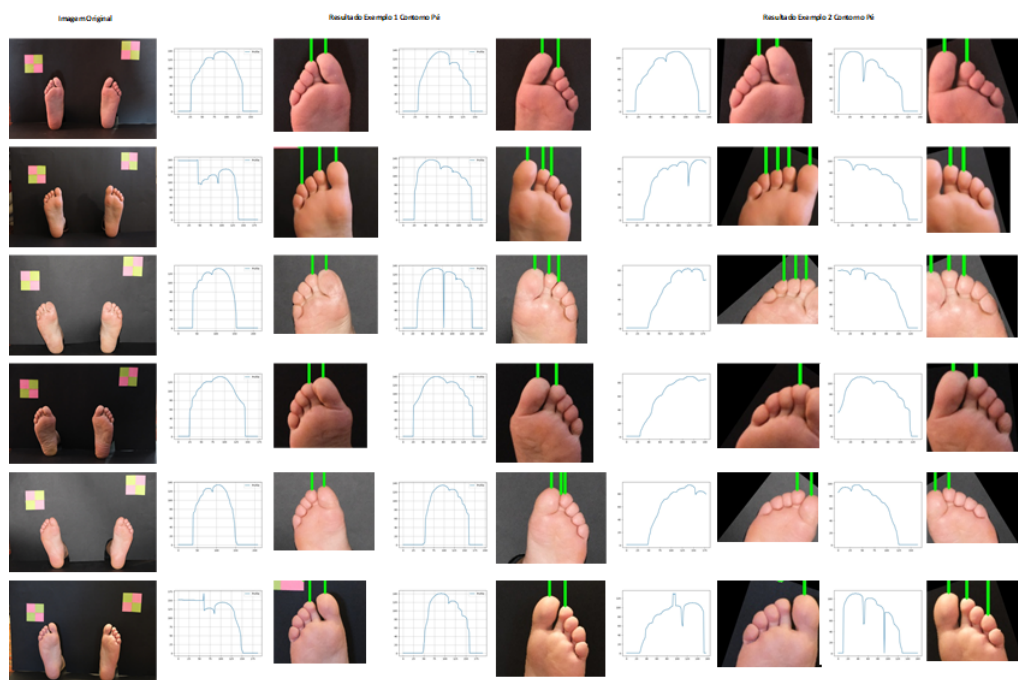
# Identificação dos dedos pequenos

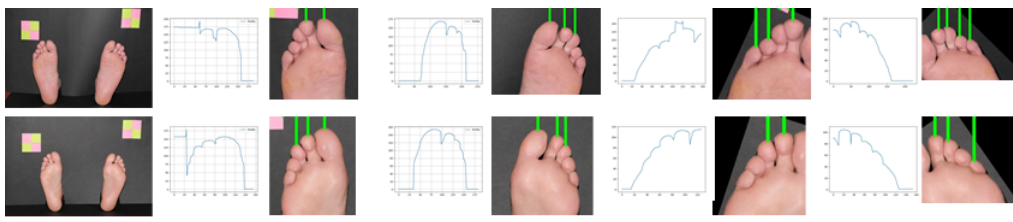
Amostra de resultados da aplicação do método de Hough para a identificação dos dedos dos pés.



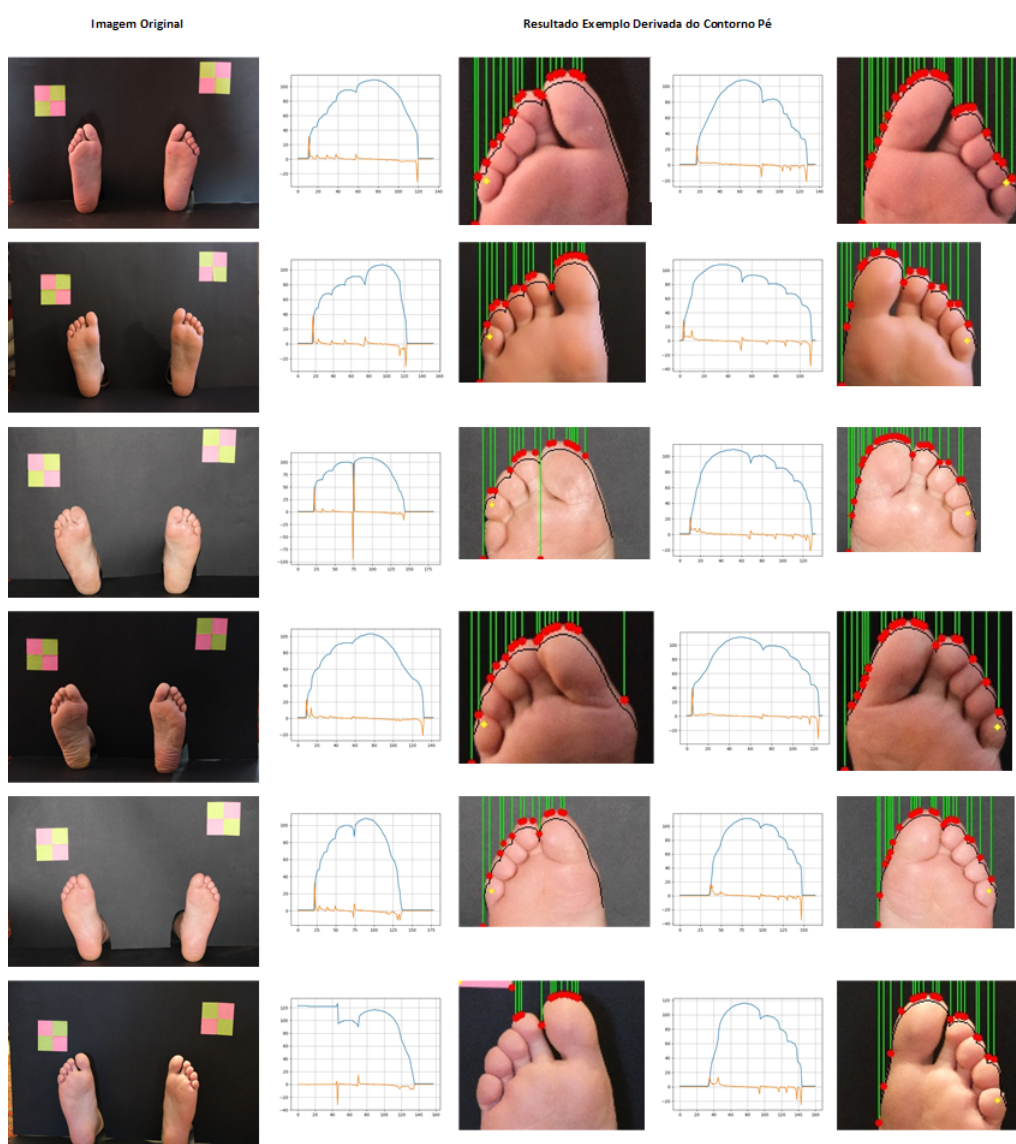


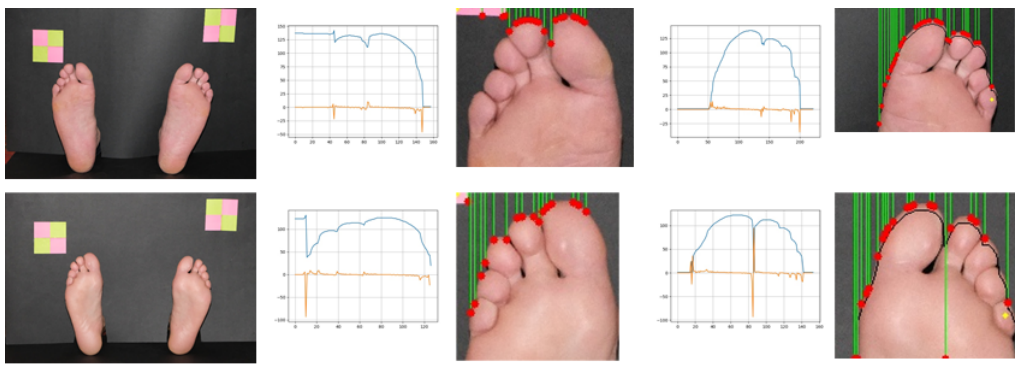
Amostra de resultados do estudo do contorno do pé para a identificação dos dedos.



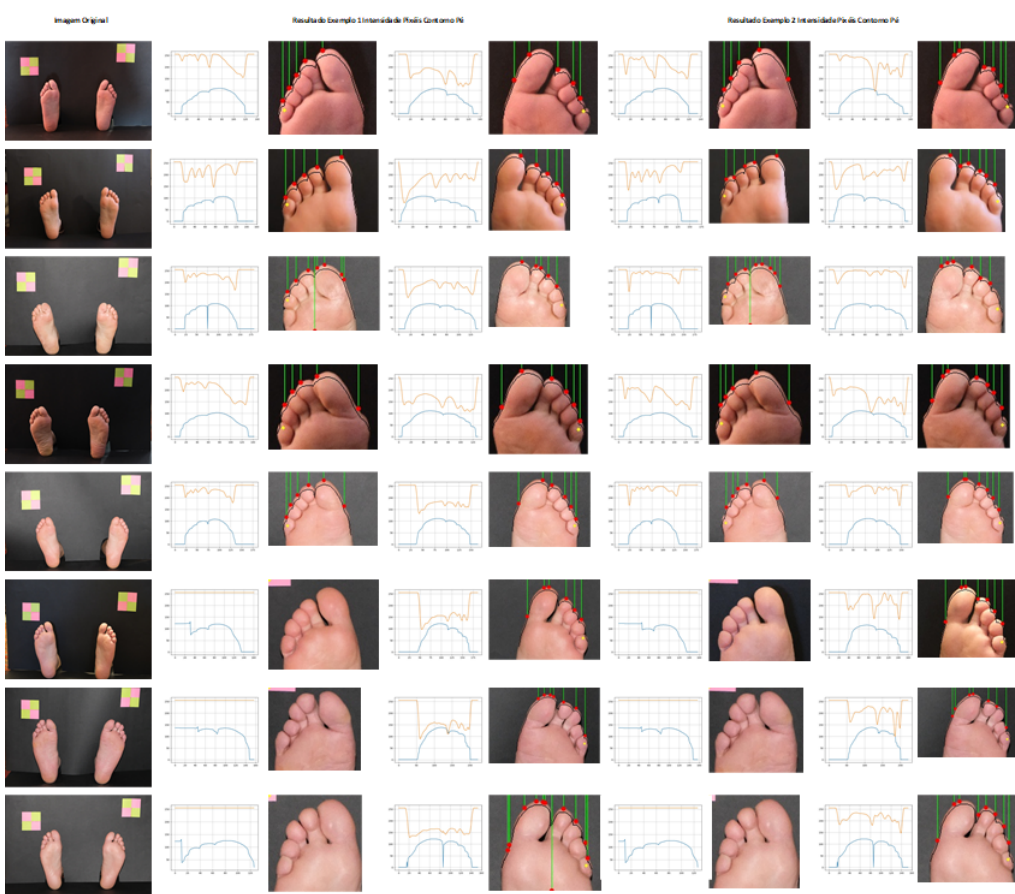


Amostra de resultados do estudo da derivada do contorno do pé para a identificação dos dedos.





Amostra de resultados do estudo da intensidade de pixels no contorno do pé para a identificação dos dedos.



Amostra de resultados do estudo das proporções do pé para a identificação dos dedos.

