



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Electromecânica

Dispositivo portátil semi-automatizado de monda de frutos

Marco António Sousa Lopes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinis Gaspar

Covilhã, Junho de 2017

Agradecimentos

Gostaria de agradecer profundamente a todos aqueles que se envolveram de forma direta ou indireta no desenvolvimento deste projeto e dissertação.

Ao Professor Doutor Pedro Dinis Gaspar, por me permitir embarcar no maior desafio de engenharia em que tive oportunidade participar até à data, assim como pela confiança depositada nas minhas capacidades e decisões.

À Professora Doutora Paula Simões e restantes membros da equipa do projeto +Pêssego, do qual o trabalho desenvolvido nesta dissertação faz parte, por me terem proporcionado uma excelente experiência interdisciplinar, sempre repleta de otimismo e boa disposição.

À minha família, pelo apoio incondicional das minhas escolhas e por me permitirem ter um acesso de forma facilitada à maior riqueza do mundo, o conhecimento, através da experiência académica cujo culminar assenta nesta dissertação.

A todos os meus amigos, por fazerem questão de me lembrarem frequentemente de que a vida não consiste apenas em trabalhar, por se demonstrarem disponíveis para me ouvir e fornecerem diferentes perspetivas sobre os problemas a resolver. Em particular ao Daniel Cruz, por fomentar o meu interesse pela eletrónica e ter despendido do seu tempo para me auxiliar.

Resumo

A qualidade dos frutos está muito dependente da carga de uma árvore. Se a poda for menos severa para garantir maior produção e o vingamento dos frutos se revelar elevado pela ocorrência de condições climáticas favoráveis, resultará num excesso de carga de frutos na árvore, restando aos produtores fazer o correto ajustamento da carga através da monda dos frutos. A monda manual é o método mais utilizado mas, requer elevada disponibilidade de mão-de-obra, fator muitas vezes limitante, e por ser moroso torna-se bastante dispendioso. As soluções alternativas mecanizadas ou automatizadas encontradas na literatura não demonstraram ainda ser economicamente viáveis. Isto deriva do facto de essas soluções apresentarem uma operação em malha aberta, sem qualquer tipo de sensorização e com formatos de atuação que não permitem exercer a seletividade de remoção de frutos necessária para que a realização da monda mecanizada ou automatizada resulte num impacto positivo consistente. Com a presente dissertação de mestrado, pretende-se contribuir para o desenvolvimento e investigação de soluções para a mecanização e automatização de processos agrícolas que requeiram técnicas avançadas e inovadoras de sensorização e atuação, tendo como objetivo último o desenvolvimento de um dispositivo portátil para a automatização da monda de frutos.

O dispositivo desenvolvido tem por base a utilização de um conjunto de transdutores ultrassónicos dispostos radialmente para a deteção e avaliação de frutos, e um conjunto de atuadores lineares, também estes dispostos radialmente, responsáveis pela remoção dos frutos pela execução de uma força de impacto. É apresentado o dimensionamento do hardware envolvido nestes sistemas, descrito o software de controlo implementado no formato de sistema embutido, assim como a investigação realizada em torno da aplicação de processamento de sinal e algoritmos de aprendizagem de máquina aos sinais adquiridos pelos transdutores ultrassónicos. O funcionamento atual do protótipo do dispositivo de monda ainda não é satisfatório, requerendo a utilização de dispositivos de sensorização e atuação mais avançados tecnologicamente, o que se configura inatingível no momento pela especificação de baixo custo que norteou todo o desenvolvimento do projeto.

Palavras-chave

Monda de frutos, hortofrutícolas, sensorização, atuação, automatização, aprendizagem de máquina.

Abstract

The quality of fruits is highly dependent on the load of the fruit trees. If the pruning process is not severe, as a way to ensure a high production level and the fruit setting rate turns out to be high as well, due to favourable climate conditions, it will result in a excessive fruit-load. In this case, the producers have to adjust the fruit-load by performing fruit thinning. Manual thinning is the most commonly used technique in fruit thinning, although it requires a high availability of labour force, which is frequently a limiting factor, and as it is a time-consuming activity it also becomes quite onerous. The alternative mechanized and automated solutions found in literature have not yet shown to be economically viable. This results from that fact that those solutions operate as open-loop systems, without any kind of sensor and with actuation strategies that do not enable to remove the fruits with the level of selectivity required for achieving a consistent positive economic impact. This master's dissertation aims to contribute to the research and development of automated solutions of agricultural processes that require advanced and innovative sensing and actuation technologies and techniques, having as its ultimate purpose the development of a hand-held automatic fruit thinning device.

The device is based upon the use of an array of radially arranged ultrasonic transducers, for the detection and evaluation and a set of linear actuators, also radially disposed, for the removal of the fruits. The design of these systems' hardware is presented, the corresponding software which was implemented as an embedded system is then described, as well as the research that was performed involving the application of signal processing and machine learning algorithms to signals acquired by the ultrasonic transducers.

The resulting prototype, in its current state, does not yet present an adequate level of functionality, requiring the use of more advanced sensors and actuators, which as of this moment is not attainable due to the low budget specification that led over the development of this project.

Keywords

Fruit thinning, sensing, actuation, automation, machine learning,

Índice

| | |
|---|-----------|
| Agradecimentos | i |
| Resumo | iii |
| Abstract | v |
| Índice | vii |
| Lista de Figuras..... | xi |
| Lista de Tabelas | xv |
| Nomenclatura..... | xvii |
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Enquadramento | 1 |
| 1.2. O problema em estudo e a sua relevância | 1 |
| 1.3. Objetivos e contribuição da dissertação | 2 |
| 1.4. Visão geral e organização da dissertação | 2 |
| 2. Estado da Arte | 5 |
| 2.1. Equipamentos de monda mecanizada..... | 5 |
| 2.1.1. Agitadores de troncos e ramos | 5 |
| 2.1.2. Dispositivos acoplados a tratores..... | 6 |
| 2.1.3. Dispositivos portáteis..... | 10 |
| 2.1.4. Monda seletiva..... | 14 |
| 2.1.5. Patentes de dispositivos portáteis | 15 |
| 2.1.6. Nota Conclusiva | 18 |
| 2.2. Sensorização de produtos hortofrutícolas | 19 |
| 2.2.1. Extração de propriedades no campo | 19 |
| 2.2.2. Extração de propriedades em ambiente industrial..... | 24 |
| 2.3. Nota conclusiva | 30 |
| 3. Design Conceptual | 33 |
| 3.1. Introdução | 33 |
| 3.2. Especificações iniciais | 33 |
| 3.3. Caracterização, variabilidade e condicionamento do meio de operação..... | 34 |
| 3.4. Manipulador móvel autónomo | 36 |
| 3.5. Topologias de atuação consideradas na definição do sistema..... | 38 |
| 3.5.1. Atuação por contacto direto | 38 |
| 3.5.2. Jato de fluido pressurizado | 39 |

| | |
|---|------------|
| 3.5.3. Vibração | 40 |
| 3.6. Estrutura radial com múltiplos sensores e atuadores | 40 |
| 3.7. Constituição geral e modo de operação do conceito adotado..... | 42 |
| 4. Sistema de Sensorização de Frutos | 47 |
| 4.1. Introdução | 47 |
| 4.2. Seleção de métodos de sensorização | 48 |
| 4.2.1. Ultrassom | 49 |
| 4.2.2. NIR | 56 |
| 4.2.3. Análise comparativa e seleção..... | 60 |
| 4.3. Topologia e dimensionamento do sistema de sensorização por ultrassons..... | 62 |
| 4.3.1. Introdução | 62 |
| 4.3.2. Multiplexagem | 63 |
| 4.3.3. Amortecimento dos transdutores | 64 |
| 4.3.4. Aquisição de sinal | 66 |
| 4.3.5. Circuito de transmissão | 69 |
| 4.3.6. Circuito equivalente e adaptação de impedância | 71 |
| 5. Análise de Frequência e Reconhecimento de Padrões | 77 |
| 5.1. Fundamento para a utilização dos algoritmos..... | 77 |
| 5.2. Recolha de dados | 79 |
| 5.3. Processamento de sinal e visualização de dados..... | 80 |
| 5.4. Preparação dos dados e extração de atributos..... | 81 |
| 5.5. Redução dimensional | 83 |
| 5.5.1. Análise de componentes principais e independentes..... | 84 |
| 5.5.2. RELIEFF e seleção sequencial de atributos | 86 |
| 5.6. Classificadores | 88 |
| 5.6.1. Máquina de vetores de suporte linear | 88 |
| 5.6.2. K vizinhos mais próximos | 89 |
| 5.6.3. Árvores de decisão | 89 |
| 5.6.4. Análise discriminante linear e quadrática | 91 |
| 5.7. Avaliação da adequação do ajuste e generalização dos modelos | 92 |
| 5.7.1. Matriz de confusão..... | 92 |
| 5.7.2. Pontuação de Brier e pontuação quadrática | 95 |
| 5.7.3. Área sob a curva ROC e Coeficiente de Gini | 96 |
| 5.7.4. Coeficiente de correlação de Matthews | 98 |
| 5.7.5. Validação cruzada..... | 100 |
| 6. Sistema de Atuação por Impacto e Elementos Estruturais | 105 |
| 6.1. Seleção do tipo de atuador linear | 105 |
| 6.2. Dimensionamento dos órgãos de máquina | 110 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6.2.1. | Valores de partida | 110 |
| 6.2.2. | Mola de compressão | 111 |
| 6.2.3. | Cremalheira e pinhão | 114 |
| 6.2.4. | Roda de lingueta e lingueta | 117 |
| 6.2.5. | Desenho de conjunto | 121 |
| 7. | Controlo, Regulação e Comando..... | 123 |
| 7.1. | Introdução | 123 |
| 7.2. | Software de controlo..... | 123 |
| 7.2.1. | Microcontrolador TM4C123 | 123 |
| 7.2.2. | Estrutura para o caso ideal..... | 124 |
| 7.2.3. | Estrutura implementada | 126 |
| 7.3. | Bateria e circuito de alimentação | 130 |
| 7.3.1. | Dimensionamento da bateria | 130 |
| 7.3.2. | Circuito de alimentação | 130 |
| 7.4. | Nota conclusiva | 131 |
| 8. | Análise e Discussão de Resultados | 133 |
| 8.1. | Introdução | 133 |
| 8.2. | Desempenho do sistema de sensorização | 133 |
| 8.2.1. | Coeficiente de reflexão e target strength..... | 133 |
| 8.2.2. | Desempenho dos circuitos condução e recepção..... | 137 |
| 8.2.3. | Desempenho do algoritmo de deteção de frutos | 138 |
| 8.3. | Prototipagem da estrutura e desempenho do sistema atuador | 145 |
| 9. | Conclusões..... | 149 |
| 9.1. | Conclusões gerais | 149 |
| 9.2. | Conclusões específicas..... | 149 |
| 9.2.1. | Sistema de sensorização | 149 |
| 9.2.2. | Sistema de atuação por impacto | 151 |
| 9.3. | Sugestões de trabalhos futuros..... | 153 |
| | Referências Bibliográficas | 155 |
| | Anexo I | 167 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1-Equipamento de monda por agitação de ramos..... | 6 |
| Figura.2.2- Máquina de monda da flor de pessegueiro, Phil Brown (www.philbrownwelding.com/peach-blossom-thinner). | 7 |
| Figura 2.3 - Equipamentos para a monda mecânica da flor e do fruto, respetivamente, acoplados a tratores (http://www.fruit-tec.com ; http://ucanr.edu/). | 8 |
| Figura 2.4 - Equipamentos para a monda mecânica do fruto [5]..... | 10 |
| Figura 2.5 - Equipamentos para a monda mecânica do fruto [16]. | 12 |
| Figura 2.6 - Solução comercial de equipamento para a monda da flor (http://www.infaco.com/). | 13 |
| Figura 2.7 - Máquina para a monda da flor de pessegueiro Cinch, e o seu inventor (http://fruitgrowersnews.com). | 14 |
| Figura 2.8 - Protótipo de uma garra para a monda da flor [20]. | 15 |
| Figura 2.9 - Device for thinning and harvesting fruit and flowers [21]. | 16 |
| Figura 2.10 - Ultrasonic targeted electric flower and fruit thinning machine [22]. | 17 |
| Figura 2.11 - Fruit defoliating and thinning device for use in fruit trees [23]. | 17 |
| Figura 2.12 - Flower and fruit thinning machine [26]. | 18 |
| Figura 2.13-Dispositivos de medição contínua de diâmetros na árvore | 20 |
| Figura 2.14 - Dispositivos portáteis de extração de propriedades de frutos no campo. | 21 |
| Figura 2.15 - Resultados de um sistema de identificação de maçãs por visão computacional num pomar [49]..... | 23 |
| Figura 2.16 - Sistema LIDAR para o mapeamento e descrição de pomares [50]. | 24 |
| Figura 2.17 - Anel óptico. Fase final do algoritmo nas quais as cordas redundantes foram descartadas [60]. | 26 |
| Figura 2.18 - Sistema de avaliação do calibre de malaguetas [64]. | 27 |
| Figura 2.19 - - Sistema portátil de análise de propriedades internas e externas por ultrassom [89]. | 29 |
| Figura 3.1 -Ensaio de campo de um sistema autónomo de colheita de frutos baseado num manipulador PRRRP [40]. | 38 |
| Figura 3.2 - Desenho preliminar ilustrativo da estrutura com sensores, atuação por definir. ... | 44 |
| Figura 3.3 - Fluxograma das fases de operação do dispositivo. | 45 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.1-Coeficiente de absorção no ar versus a relação da frequência com a pressão atmosférica para várias percentagens de humidade relativa a 20°C [103]. | 51 |
| Figura 4.2 - Sinal recebido, FFT's da primeira e segunda reflexão e curva característica do transdutor. Estudo realizado em frutos com transdutor colocado até 40 mm de distância [110, 111] | 55 |
| Figura 4.3 - Transmissão atmosférica ao longo de 300 m [113]. | 58 |
| Figura 4.4 - Absorvância, transmitância e refletância de folhas de pessegueiro [120]. | 60 |
| Figura 4.5 - Topologia geral do sistema de sensorização | 63 |
| Figura 4.6 - Esquema de multiplexagem com dois SPST. | 64 |
| Figura 4.7-Esquema de amortecimento activo de um transdutor capacitivo [130]. | 65 |
| Figura 4.8-Bloco de condicionamento do sinal recebido pelos transdutores. | 69 |
| Figura 4.9 - Comparação entre condução alternada e pulsatória de transdutores ultrassónicos. A amarelo, a tensão de excitação e a azul, a onda recebida por um segundo transdutor, após amplificação. | 70 |
| Figura 4.10 - Bloco de condução dos transdutores ultrassónicos. | 71 |
| Figura 4.11 - Circuito equivalente de transdutores piezoelétricos, modelo Butterworth-Van Dyke. | 72 |
| Figura 4.12 - Circuito equivalente do transdutor em ressonância, com a rede de adaptação do tipo L e circuito de excitação. | 75 |
| Figura 5.1- Representação esquemática do processo de investigação de algoritmos de aprendizagem de máquina para a deteção de frutos. | 79 |
| Figura 5.2 - Recolhas de ondas ultrassónicas refletidas a partir da periferia de ramos e em frutos e folhas isolados. | 80 |
| Figura 5.3 - Processo de investigação com base em aritmética de sinal. | 81 |
| Figura 5.4 - Vetores de projeção gerados por PCA e ICA para um conjunto de dados bidimensional [141]. | 86 |
| Figura 5.5 - Exemplos de curvas ROC[149]. | 98 |
| Figura 6.1- Cremalheira redonda. | 108 |
| Figura 6.2 - Mola. | 110 |
| Figura 6.3 - Ilustração dos parâmetros envolvidos no dimensionamento à resistencia. | 117 |
| Figura 6.4 - Roda de lingueta e lingueta. | 118 |
| Figura 6.5 - Ensaios de esforços , roda de lingueta e lingueta. | 120 |
| Figura 6.6 - Desenho de conjunto do atuador dimensionado. | 121 |
| Figura 7.1- Estrutura do software de controlo do dispositivo para o caso ideal. | 125 |
| Figura 7.2 - Estrutura geral do programa implementado. | 126 |
| Figura 7.3-Diagrama de fluxo da função <i>scontrolpwm_set()</i> . | 129 |
| Figura 7.4 - Esquema de regulação de tensão. | 131 |
| Figura 8.1 - Medição da velocidade de propagação do ultrassom através de frutos verdes. | 135 |

| | |
|--|-----|
| Figura 8.2 - Operação do circuito aquisição e condicionamento de sinal de ondas ultrassónicas. | 137 |
| Figura 8.3 - Operação do circuito de condução de transdutores ultrassónicos em contínuo.... | 138 |
| Figura 8.4 - Sinais do circuito de amortecimento com ponte RLC em permanencia..... | 138 |
| Figura 8.5 - Peças em ABS produzidas por impressão 3D. | 145 |
| Figura 8.6 - Ensaios de força de atuação , verificação da geometria e ergonomia no campo. . | 147 |
| Figura A.1 - Engrenagem com roda de lingueta. | 167 |
| Figura A.2 - Lingueta. | 169 |
| Figura A.3 - Cremalheira redonda êmbolo. | 171 |
| Figura A.4 - Caixa de atuadores lineares, lado1. | 173 |
| Figura A.5 - Caixa dos atuadores lineares, lado 2. | 175 |
| Figura A.6 - - Estrutura principal do dispositivo, lado 1. O lado 2 é simétrico segundo o plano apresentado na vista central do desenho e segundo o plano transversal a este..... | 177 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Síntese dos critérios de seleção da tecnologia de sensorização a investigar. | 61 |
| Tabela 2 -Parâmetros do circuito equivalente dos transdutores ultrassônicos. | 73 |
| Tabela 3-Indutância a adicionar para adaptação de impedância por indutância em série. | 74 |
| Tabela 4 - Valores dos componentes para adaptação de impedância dos transdutores ultrassônicos com rede do tipo L. | 76 |
| Tabela 5 - Matriz de Confusão. | 94 |
| Tabela 6 - Síntese dos critérios de seleção do tipo de atuador linear a adotar. | 107 |
| Tabela 7 - Especificações dos servomotores Feetech FS90R [167]. | 109 |
| Tabela 8 - Propriedades mecânicas do plástico ABS [157] | 110 |
| Tabela 9 - Massa, volume e massa volúmica de frutos verdes. | 134 |
| Tabela 10- Coeficiente de reflexão do interface ar atmosférico - fruto, atenuação por absorção e <i>target strength</i> | 136 |
| Tabela 11 - Média e variância das métricas de adequação e capacidade de generalização calculadas ao longo dos modelos treinados com as ondas ultrassônicas de cada uma das frequências centrais utilizadas. | 140 |
| Tabela 12 - Média e variância das métricas de adequação e generalização calculadas ao longo dos modelos que utilizam cada tipo de atributo. | 141 |
| Tabela 13 - Média e variância das métricas de adequação e generalização dos modelos calculadas ao longo dos modelos que utilizam cada tipo de técnica de redução dimensional. | 141 |
| Tabela 14 - Média e variância das métricas de adequação e generalização dos modelos calculadas ao longo dos modelos que utilizam cada tipo de técnica de redução dimensional. | 141 |
| Tabela 15 - Média e variância das métricas de adequação e generalização dos modelos com coeficiente de correlação de Matthews superior a 0,65. | 143 |
| Tabela 16 - Média e variância das métricas de adequação e capacidade de generalização dos modelos presentes na tabela 16, após revlaidados com validação cruzada 10-fold repetida 500 vezes. | 144 |

Nomenclatura

Geral:

| | |
|-----------|---|
| <i>A</i> | Área, [m ²]; |
| <i>a</i> | Comprimento da divisão, [m]; |
| <i>B</i> | Distribuição de refletância bidirecional, [sr ⁻¹] |
| <i>b</i> | Largura da divisão, [m]; |
| <i>c</i> | Velocidade de fase, [m·s ⁻¹]; |
| <i>C</i> | Capacidade, [F]; |
| <i>d</i> | Distância, [m]; |
| <i>D</i> | Diâmetro, [m]; |
| <i>e</i> | Espessura, [m]; |
| <i>E</i> | Campo elétrico [F]; |
| <i>g</i> | Aceleração da gravidade, {9,81 m·s ⁻² }; |
| <i>h</i> | Altura, [m]; |
| <i>K</i> | Constante arbitrária; |
| <i>L</i> | Indutância [H]; |
| <i>M</i> | Módulo, [m]; |
| <i>n</i> | Índice refrativo; |
| <i>p</i> | Pressão, [Pa]; |
| <i>P</i> | Potência, [W]; |
| <i>R</i> | Resistência elétrica, [Ω]; |
| <i>R'</i> | Coefficiente de reflexão; |
| <i>r</i> | Raio, [m]; |
| <i>t</i> | Tempo, [s]; |
| <i>T</i> | Temperatura, [K ou °C]; |
| <i>T'</i> | Coefficiente de transmissão; |
| <i>U</i> | Diferença de potencial, [V]; |
| <i>V</i> | Volume, [m ³]; |
| <i>v</i> | Velocidade [m·s ⁻¹]; |

| | |
|----|---|
| y | Fator de forma de Lewis; |
| Z | Impedância Acústica, [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$]; |
| EL | Pressão acústica da onda retrodifundida, [dB]; |
| SL | Pressão acústica da onda emitida, [dB]; |
| EL | Pressão acústica da onda incidente, [dB]; |
| TL | Perdas de transmissão, [dB]; |
| TS | Target strength, [dB]; |
| z | Impedância acústica, [Rayl]; |
| Z | Impedância elétrica, [Ω]; |

Índices inferiores:

| | |
|----|--|
| 0 | Vácuo; |
| p | Relativo a componentes em paralelo; |
| pn | Pinhão; |
| a | Frequência de amostragem; |
| ar | Ar; |
| c | Frequência de corte; |
| cr | Cremalheira; |
| cm | Frequência central do circuito de adaptação de impedância; |
| f | Feedback; |
| fl | Flexão; |
| fr | Fruto; |
| us | Ultrassom em meio sólido; |
| uf | Ultrassom em meio líquido ou gasoso; |
| db | Decibel; |
| np | Neper; |
| r | Lingueta e roda de lingueta; |
| rh | Cubo da roda de lingueta; |
| sp | Esfera; |
| s | Ressonância; |
| sc | Fonte; |
| sn | Superfície Neutra; |
| th | Dentes; |
| bs | Retrodifundido (backscattered); |

| | |
|------|--------------|
| r | Ressonância; |
| rd | Ring-down; |
| varr | Varrimento; |
| act | Actuação; |
| th | Dentes; |

Simbologia grega:

| | |
|------------|---|
| λ | Comprimento de onda, [m]; |
| ρ | Massa específica, [kg·m ⁻³]; |
| δ | Espessura, [mm]; |
| K | Módulo volumétrico, [GPa]; |
| β | Coefficiente de fase, [rad·m ⁻¹]; |
| ν | Viscosidade cinemática do ar; |
| ϵ | Permitividade, [F·m ⁻¹]; |
| μ | Permeabilidade, [H·m ⁻¹]; |
| α | Coefficiente de atenuação [Np·m ⁻¹]; |
| σ | Massa por unidade de área, [kg·m ⁻²]; |
| η | Impedância de onda, [Ω]; |
| ω | Frequência angular, [rad ⁻¹]; |
| Φ | Ângulo auxiliar de construção de roda de lingueta, [rad]; |

Acrónimos:

| | |
|--------------|--|
| <i>USDA</i> | United States Department of Agriculture; |
| <i>UBI</i> | Universidade da Beira Interior; |
| <i>NIR</i> | Near InfraRed; |
| <i>LIDAR</i> | Light Detection And Ranging; |
| <i>GPS</i> | Global Positioning System |
| <i>AGV</i> | Automated Guided Vehicle |
| <i>SNR</i> | Signal to Noise Ratio |
| <i>ADC</i> | Analog-to-digital converter |
| <i>GBW</i> | Gain-Bandwidth Product |
| <i>THD+N</i> | Total Harmonic Distortion + Noise |
| <i>BVD</i> | Butterworth-Van Dyke |
| <i>CSV</i> | Comma Separated Values |

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A alimentação das populações baseia-se no consumo de alimentos, mais ou menos processados. Os alimentos de origem vegetal pela sua riqueza em fibras e vitaminas e, em particular os frutos, pela sua frescura e baixo valor energético relativamente às sobremesas de colher, têm sido ultimamente mais valorizados, especialmente no combate à obesidade que já atinge mais de 50% dos adultos na Europa [1].

No conjunto da produção agrícola a produção de frutos está associada a elevado conhecimento técnico, estando as altas produções unitárias que se atingem atualmente relacionadas não só com consumos elevados de água, como de outros fatores de produção como o uso de pesticidas e fertilizantes, e disponibilidade mão-de-obra. A região Centro, onde se localiza 56% da área frutícola de Portugal, apresenta condições favoráveis para um incremento da atividade, necessitando, contudo, de maior apoio técnico para o aumento da rentabilidade, melhoria do produto final e da sua valorização. Na região da Beira Interior o pessegueiro constitui-se como uma cultura com alguma tradição e com possibilidade de expansão, pelas condições edafo-climáticas e socioeconómicas existentes, conhecimento técnico associado ao seu cultivo e sobretudo pela procura dos frutos.

Com o objetivo de colmatar lacunas de conhecimento, avaliar e propor metodologias inovadoras quer ao nível das técnicas de produção quer ao nível da valorização do produto final, uma equipa liderada pela Professora Doutora Paula Simões do Instituto Politécnico de Castelo Branco, propôs o projeto +Pêssego, um projeto de fileira para a cultura do pessegueiro contendo diversas linhas de trabalho, entre as quais a monda de fruto.

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

A qualidade dos frutos está muito dependente da carga de uma árvore. O calibre do fruto, i.e., a sua dimensão, é um parâmetro de qualidade com valorização económica. Este parâmetro encontra-se intimamente relacionado com o correto ajustamento da carga das árvores de fruto. Caso a poda seja pouco severa para garantir maior produção e o vingamento dos frutos

(transformação das flores em frutos) for elevado e as condições climáticas forem favoráveis, obtém-se um excesso de carga. Nesta condição, resta aos produtores fazer o correto ajustamento da carga através da remoção seletiva de frutos, processo esse que é intitulado d monda dos frutos. A monda manual é o método mais utilizado mas requer elevada disponibilidade de mão-de-obra, facto muitas vezes limitativo, e que por ser moroso torna-se bastante dispendioso. A monda química dos frutos, e em particular do pessegueiro, não é uma prática corrente porque os resultados não têm sido consistentes. As dimensões reduzidas das propriedades e, mais concretamente da área de cada cultivar dentro de uma exploração, podem tornar o uso de equipamentos de grandes dimensões em algo pouco funcional e desajustado. Assim, mostra-se necessária a criação de soluções que permitam a realização da monda de frutos num tempo mais curto e de forma mais económica que a monda manual, tendo em consideração as condições locais, particularmente no que diz respeito à heterogeneidade das plantas, sendo esta por sua vez resultante heterogeneidade das parcelas e do solo.

1.3. Objetivos e contribuição da dissertação

Esta dissertação integra a linha de trabalho do projeto +Pêssego que diz respeito à monda de frutos, e apresenta como objetivo último o desenvolvimento de um dispositivo portátil para a automatização da monda de frutos. Contudo, dado o nível de inovação da solução apresentada, espera-se que possa contribuir para o desenvolvimento e investigação de soluções para a mecanização e automatização de outros processos agrícolas, ou até mesmo de aplicações de outros sectores que requeiram sistemas de atuação e sensorização para quaisquer pequenos objetos localizados num meio de elevada variabilidade e com pouco espaço de manobra.

1.4. Visão geral e organização da dissertação

Esta dissertação encontra-se organizada em nove capítulos.

No presente capítulo procede-se ao enquadramento, apresenta-se a motivação e objetivos que se pretendem atingir e descreve-se a estrutura deste trabalho.

No capítulo 2 é descrita uma análise ao estado da arte não só de dispositivos de monda de fruto e flor, mas também das técnicas de sensorização de produtos hortofrutícolas na indústria e no campo, de forma a se reunir informação para a formulação de conceitos para novos dispositivos.

No capítulo 3 são definidas as especificações que o dispositivo de monda deve de cumprir para se demonstrar vantajoso face ao método manual, procede-se à descrição dos pomares como meios de operação para um dispositivo automatizado e é constituído o design conceptual a

desenvolver, através de considerações exercidas sobre a informação recolhida relativamente ao estado da arte.

No capítulo 4 é apresentada a seleção do hardware e o dimensionamento dos circuitos que constituem o sistema de sensorização do dispositivo.

No capítulo 5 são apresentados os procedimentos e algoritmos de processamento de sinal e aprendizagem de máquina utilizados para a investigação e conceção de uma estratégia para a deteção e avaliação dos frutos.

No capítulo 6 é apresentado o dimensionamento de atuadores lineares responsáveis pela remoção dos frutos, impelindo-lhes uma força de impacto.

No capítulo 7 são apresentadas as componentes de controlo, regulação e comando do dispositivo. Nomeadamente o firmware implementado na forma de sistema embutido, para o controlo motor dos atuadores, a fonte energética que confere portabilidade ao dispositivo e o circuito de regulação dos níveis de tensão de alimentação para os diferentes subsistemas.

No capítulo 8 são apresentados e analisados os resultados decorrentes de todas as atividades de investigação e desenvolvimento realizadas ao longo deste trabalho.

No capítulo 9 apresentam-se todas as conclusões consequentes aos resultados obtidos e apresentam-se sugestões para trabalhos futuros.

2. Estado da Arte

2.1. Equipamentos de monda mecanizada

2.1.1. Agitadores de troncos e ramos

As primeiras experiências a envolverem a monda mecânica de pêssago, centraram-se em agitadores de tronco apresentando um número de frutos a vingar e calibre aceitáveis, sem danificar as árvores, semelhantes àqueles observados através da monda manual, em 13 parcelas comerciais e 17 cultivares [2]. Não foram no entanto apresentados resultados económicos.

Foi realizado um estudo comparativo ao longo de um percurso de dois anos, envolvendo agitadores de tronco, monda manual, monda com um varão e a combinação de monda mecânica com manual. A última prática foi a que apresentou os melhores resultados, com uma redução de tempo da tarefa em cerca de 57% e de custos da monda em 88%, quando comparado com o método puramente manual e produzindo frutos de calibre minimamente aceitável. No entanto, a máquina removeu mais 30% de fruto que o método manual, resultando numa colheita inferior, reduzindo o lucro por árvore [3].

Mais recentemente, mas ainda baseados em máquinas de vibração, foram efetuados estudos que demonstraram que a combinação de monda mecânica com manual poderia reduzir o tempo das operações de monda em cerca de 30% a 41%. Apesar de permitirem a redução de tempo, estas máquinas demonstram claras desvantagens como a remoção excessiva de fruto traduzindo-se numa redução de 6% de fruto a atingir o calibre comercial, um padrão de remoção irregular, uma remoção acentuada dos frutos localizados no topo das árvores, no facto dos frutos de maiores dimensões terem uma maior tendência a cair devido à maior geração de momento [4], na incapacidade de eliminar os aglomerados de fruto [5] e a queda de folhas a um nível tal, que afeta significativamente o desenvolvimento dos frutos que permanecem na árvore [6]. Com vista a evitar as desvantagens da vibração mecânica, mas também a facilitar a automação do processo, foi apresentada e testada uma solução que permite proceder à agitação de ramos individuais a uma frequência reduzida. Esta não requer uma força de aperto, evitando dano adicional aos ramos por torção, baseando-se num atuador linear com uma ponteira em “U”, montado sobre

um veículo com um braço basculante (ver Figura 2.1). Os autores deste trabalho procederam também a um estudo aprofundado dos fenómenos que levavam à queda dos frutos em função dos diferentes tamanhos, posicionamentos, tipos de ramo e a sua frequência natural, de forma a permitir o controlo ou previsão da distribuição de frutos e explicar os resultados obtidos experimentalmente, através de uma análise modal em software de simulação computacional. Foi também realizada uma análise de vídeo de alta velocidade, com o objetivo de correlacionar a frequência de vibração dos frutos enquanto os ramos eram agitados, com a aceleração no momento da queda de cada fruto. No entanto, não foi possível obter uma correlação óbvia. Apesar de promissor, a utilização do agitador sem qualquer processo complementar resultou na remoção excessiva de fruto devido ao maior momento gerado durante a agitação, sobretudo nas zonas superiores da copa dos pessegueiros, onde os frutos terão melhor hipóteses de vingar devido a uma maior exposição solar. No entanto, o estudo demonstrou ser possível prever o número de frutos removidos através da análise de frequência.



Figura 2.1-Equipamento de monda por agitação de ramos.

2.1.2. Dispositivos acoplados a tratores

Um outro princípio que poderia ser considerado é o uso de membros flexíveis de borracha ou corda, montados sobre uma estrutura num trator e sendo arrastados sobre as árvores. Este método frequentemente utilizado para a monda da flor, com resultados positivos demonstrados pela primeira vez em [7], apresenta o potencial de evitar a monda excessiva do fruto observada nos métodos por vibração. É o caso da máquina de monda da flor do pessegueiro, intitulada de Phil Brown que possui uma cortina de cordas flexíveis acoplada a um eixo central movido por um motor, conforme apresentado na Figura 2.2. No entanto, não foram encontrados estudos sobre a aplicação deste tipo de sistema na monda do fruto.

Os estudos mais recentes têm maioritariamente por base atuadores que consistem num conjunto de hastes flexíveis ou fios dispostos ao longo de um veio rotativo. Um estudo comparou o uso de um agitador de troncos e um tambor vibratório rotativo com hastes em árvores conduzidas em “Y”. Concluiu-se que o tambor poderia ser uma melhor opção que o agitador, pois transferia menos energia para as árvores e não necessitava de exercer uma força de aperto sobre os ramos destas. A produção de frutos não variou significativamente entre os métodos estudados [8] e não foram apresentados resultados económicos. Um estudo comparou os resultados obtidos através da utilização de dois dispositivos na monda do pêssago, o Darwin 300 da empresa Alemã Fruit-Tec de hastes rotativas e o tambor vibratório, mencionado no estudo anterior, desenvolvido pelo Departamento de Agricultura do Estados Unidos (*United States Department of Agriculture, USDA*). O primeiro equipamento consiste numa estrutura acoplada a um trator, com um veio vertical de 3 m e hastes plásticas, aplicado durante a fase da floração (ver Figura 2.3a). Este dispositivo foi inicialmente concebido para monda da flor em macieiras. O segundo equipamento, utilizado na monda do fruto verde, consiste num tambor vibratório acoplado também a um trator (Figura 2.3b). Este é composto por 7 conjuntos de hastes de nylon dispostos radialmente em torno de um veio, podendo rodar livremente ou ser sujeitos a uma força de travamento exercida por um atuador hidráulico. O veio e as hastes podem ser configurados para que oscilem no plano horizontal, através de um motor hidráulico, de frequência de oscilação regulável, para que as hastes atinjam melhor as zonas interiores das árvores.



Figura. 2.2- Máquina de monda da flor de pessegueiro, Phil Brown (www.philbrownwelding.com/peach-blossom-thinner).



a) Darwin 300, equipamento de monda de hastes flexíveis.



b) Tambor de hastes vibratórias (USDA).

Figura 2.3 - Equipamentos para a monda mecânica da flor e do fruto, respetivamente, acoplados a tratores (<http://www.fruit-tec.com> ; <http://ucanr.edu/>).

Relativamente à utilização destes equipamentos em árvores conduzidas de forma a adquirir uma configuração colunar em “V”, em conjunto com uma monda manual complementar, demonstrou-se uma redução da colheita em 58% e um aumento do fruto em 9%, quando comparado com a monda manual. O tempo da monda manual foi reduzido entre 54% a 81%. No entanto, os autores destacam o facto de que existe um risco para ocorra uma monda excessiva, sugerindo que estes métodos não devem substituir por completo a monda manual. Evidenciaram também que os métodos explorados realizam uma monda sem seletividade, que há tendência para que os maiores frutos sejam mais frequentemente removidos que os frutos mais pequenos e que além disso estes equipamentos podem danificar as árvores. Contudo, alguns ensaios demonstraram um impacto económico positivo (175\$/ha a 1966\$/ha), quando comparado com o método puramente manual. Estes valores foram apresentados para apenas um dos quatro ensaios. Os autores sugerem que é necessária mais investigação para que se consiga perceber como controlar melhor a carga final de fruto, através da otimização das velocidades de avanço do trator e de rotação dos equipamentos, e que a condução das árvores pode também representar um papel importante, permitindo uma operação mais facilitada, em particular na monda de frutos com o tambor da USDA [9]. Nos anos seguintes, o mesmo grupo de autores, realizaram ensaios adicionais com o mesmo equipamento, no entanto, o tambor do Darwin era posicionado na horizontal, permitindo também ajustar o ângulo de ataque, tendo demonstrado uma maior taxa de remoção de flor e uma melhor capacidade de adaptação às diferentes formas das árvores. O impacto económico foi positivo na maior parte dos ensaios [10]. Foi apresentado um sistema de regulação automática para o posicionamento do tambor do Darwin, sendo constituído por um cilindro de deslocamento lateral, um cilindro de deslocamento angular, válvulas de controlo e distribuição de caudal, e uma interface com um botão de emergência, um *joystick* para controlo manual dos cilindros, um interruptor para alternar entre o modo manual e automático e um botão de arranque. O controlo

manual podia ser realizado a partir da cabine do condutor do trator ou através de um cabo de extensão, ou podia ser realizado por uma pessoa que seguia a pé, atrás do trator, enquanto o condutor do trator se focava em manter uma rota retilínea. O modo automático fazia uso de sensores ultrassónicos, posicionados ao longo de um mastro, para a deteção da linha das copas das árvores e assim regular o eixo do tambor de forma a que este se mantivesse paralelo ao “V” das árvores conduzidas. O trator carregava também equipamento de medição de distâncias por laser (*Light Detection and Ranging - LIDAR*) e um módulo GPS (*Global Positioning System*), permitindo realizar uma reconstituição e mapeamento 3D dos pomares [11].

A condução das árvores de fruto demonstra permitir uma optimização de resultados obtidos com equipamentos como o Darwin [12], no entanto, foi demonstrado que a escolha do período de tempo para a execução da monda apresenta uma maior correlação com os resultados obtidos [4].

Realizou-se um outro estudo de dois anos, envolvendo a monda da flor e de frutos, com o Darwin e duas versões modificadas do tambor da USDA. Numa versão foi removido um dos tambores, na segunda versão foram reduzidas as dimensões do tambor de forma a que se obtivesse uma maior manobrabilidade. Este estudo confirmou que a monda excessiva é de facto um problema associado a este tipo de soluções mecanizadas. Um dos cinco ensaios não continha dados relativos à produção de frutos, um segundo ensaio não continha um método de controlo (monda manual). Estes factos prejudicam a qualidade de qualquer conclusão que se possa extrair dos resultados obtidos. Dos restantes três ensaios, a monda manual apresentou consistentemente uma maior produção de frutos de elevado calibre. Contudo, os custos da monda manual complementar aos métodos mecanizados, foram reduzidos em 27% e o tempo requerido para as operações de monda foi também significativamente reduzidos, o que resultou num impacto económico positivo em 14 dos 20 casos, ao longo dos cinco ensaios. Os autores concluíram que serão necessários estudos adicionais para que se consigam obter resultados mais consistentes, especialmente no que toca à monda dos frutos com os tambores de hastes vibratórias [13].

Na Universidade de Bonn foi desenvolvido um dispositivo para a monda de flor constituído por três rotores com hastes flexíveis. Cada rotor poderia posicionado de forma a não entrar em contacto com as árvores, caso não interessasse que a secção correspondente fosse mondada. Realizaram-se ensaios de campo com este equipamento ao longo de 3 anos, variando a rigidez das hastes, a velocidade de rotação dos rotores e a variação de velocidade de avanço do trator, numa variedade de cultivares de maçã. Demonstrou-se que permitia ser regulado de forma a remover até 33% das flores existentes nas árvores. A sua operação à potência máxima danificou 8% das folhas. Os custos associados à sua utilização aproximaram-se aos custos da redução de mão-de-obra [14], mas não foram apresentados cálculos do impacto económico.

2.1.3. Dispositivos portáteis

Martin-Gorriz *et al.* [5] realizaram um estudo acerca dos resultados obtidos por duas máquinas portáteis aplicadas à monda do pêsego para a indústria dos enlatados (calibre alvo > 56 mm). O primeiro dispositivo, modelo Giulivo da empresa italiana Volpi S.p.A, consiste num cabo de 2,5 m, com um peso de 2 kg, em que uma das extremidades possui uma cabeça rotativa com seis dedos ou hastes (ver Figura 2.4a). É movido por um motor elétrico de 12 V que permite operar a 2 velocidades distintas. O motor é alimentado por uma bateria de automóvel de 12 V, 75 A/h, colocada no chão e transferindo a energia através de um cabo elétrico com 15 m de extensão. O operador procede à monda do fruto percorrendo os ramos em torno da árvore, de forma a que as hastes entrem em contacto com os frutos e provoquem a sua queda, deslocando a bateria a cada 3-4 árvores permitindo que se mova com a maior liberdade possível. O segundo dispositivo consiste num agitador pneumático de ramos portátil (ver Figura 2.4b), fabricado pela Campagnola P.E.S, Itália. Este equipamento possui um peso de 1,9 kg, sendo alimentado por um compressor de ar a operar com pressões entre 1,0 Mpa e 1,2 Mpa. A sua mobilidade mostra-se algo limitada, devido sobretudo à presença da mangueira flexível de alimentação do ar.



a) Dispositivo elétrico com cabeça rotativa e hastes axiais com ângulo regulável.



b) Máquina pneumática para a agitação de ramos.

Figura 2.4 - Equipamentos para a monda mecânica do fruto [5].

Foram testadas no campo quatro técnicas de monda, combinando o uso dos dispositivos com mondas manuais complementares. A monda manual por si só foi utilizada como método de controlo. De forma a otimizar o processo, durante as mondas manuais complementares, os trabalhadores focaram-se apenas nos aglomerados de frutos. Os ensaios de 2008 demonstraram que o uso do agitador pneumático com uma monda manual complementar permite reduzir o tempo de execução das operações em 28%, quando comparado com os 25 a 30 minutos por árvore requeridos pela monda puramente manual. No entanto, não removeu uma quantidade satisfatória de frutos, 499 face aos 1261 do método de controlo. O uso do dispositivo elétrico com uma monda

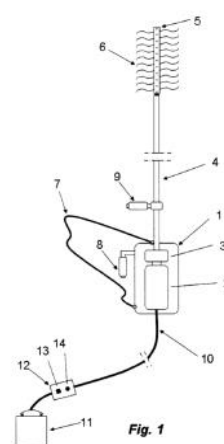
manual complementar, permite reduzir o tempo despendido em 46% face ao método manual e a quantidade de frutos removidos observada mostrou-se muito mais próxima da condição de controlo, com 988 frutos removidos. Estes factos traduziram-se num impacto económico positivo nos ensaios de 2008, mas o mesmo não se verificou nos ensaios de 2009, nos quais o uso do dispositivo pneumático foi descartado e a ausência de monda foi inserida como condição de controlo. Nestes últimos ensaios, o uso do dispositivo eléctrico com monda manual complementar resultou num lucro por árvore inferior à monda puramente manual e à ausência de monda [5]. Além desta discrepância entre resultados económicos de anos consecutivos, o facto de alguns valores observados em ensaios com os dispositivos sem monda manual complementar se aproximarem mais da condição de controlo do que aqueles com monda manual complementar, destaca ainda mais a inconsistência dos resultados obtidos com estas técnicas.

Martin-Gorriz *et al.* [15] realizaram um outro estudo, de quatro anos, incluindo os resultados do estudo mencionado anteriormente, centrado no uso da máquina de seis hastes rotativas, representada na Figura 2.4. A ausência de monda foi utilizada como método de controlo e os resultados foram comparados com os obtidos através da monda manual, monda mecanizada com o dispositivo eléctrico e monda com o dispositivo seguida de uma monda manual complementar. A ausência de monda demonstrou o maior lucro por árvore, mas este facto poderá ter a ver com os preços considerados corresponderem aos da indústria de enlatados, em que todos os frutos com calibre acima dos 55 mm são pagos ao mesmo preço. O diâmetro médio no caso da ausência de monda foi de 60 mm enquanto a média dos casos com monda foi de 66 mm, o que poderia acrescentar valor económico, caso os frutos fossem direccionados para o mercado de produtos frescos. Nos ensaios de 2009, a monda manual demonstrou um lucro por árvore superior ao obtido com métodos mecanizados. Nos ensaios restantes, os resultados obtidos com os métodos mecanizados foram superiores. Em alguns ensaios, a monda manual complementar aos métodos mecanizados aumentou o lucro por árvore enquanto noutros diminuiu. A diferença de resultados económicos com os métodos estudados foi considerada insignificante e os autores concluíram portanto, que a escolha do método para esta cultivar era indiferente, apesar de permitir atuar num período de tempo mais curto, o que por si só se pode demonstrar como uma vantagem para os produtores.

Martin-Gorriz *et al.*[17] foram ainda responsáveis pelo projeto de uma máquina de monda do pêssago (ver Figura 2.5), cuja principal inovação era a capacidade de trocar facilmente os filamentos e permitir variar a velocidade, para que com um único equipamento se pudesse proceder à monda da flor e do fruto.



Dispositivo elétrico com cabeça rotativa e hastes axiais com ângulo regulável.



Máquina pneumática para a agitação de ramos.

Figura 2.5 - Equipamentos para a monda mecânica do fruto [16].

Esta máquina apresentava uma configuração semelhante à utilizada pelo autor nos anteriores estudos, sendo que o veio rotativo era acionado por um motor elétrico de 12 V controlado através de um variador eletrónico de velocidade, alimentado por um gerador a gasolina com um cabo elétrico de 15 m. O motor e o variador eletrónico de velocidade encontravam-se posicionados numa mochila com uma base metálica e uma cobertura retrátil. Concluiu que para a monda da flor deveriam ser utilizadas hastes de um material com maior flexibilidade e uma velocidade superior àquela indicada para a monda do fruto, processo esse que obteve melhores resultados com hastes mais rígidas. Com isto, ocorreu uma redução de tempo necessário para a monda da flor em 93% e em 82% para a monda do fruto, e dos respetivos custos em 92% e 80%, face aos processos manuais. No entanto, o impacto económico não foi avaliado. A monda manual removeu mais frutos do que a monda mecanizada, levando a que houvessem 16% mais de frutos na classe de calibre superior a 55 mm, mas simultaneamente 12% menos de produção total [16].

Existem já soluções semelhantes disponíveis para venda ao público, são no entanto dirigidas à monda da flor, não existindo no mercado até à data, dispositivos portáteis dirigidos à monda de frutos. É o caso do Electro'flor, modelo da empresa francesa Infaco, existindo já estudos na literatura acerca da sua utilização [17]. O Electro'flor consiste num veio com fios rotativos na extremidade superior e um punho com controlos na extremidade inferior (Figura 2.6a), com a ligação à fonte de alimentação, um LED indicador de estado, um selecionador de velocidade e um botão on/off. Com um toque rápido neste botão, a máquina arranca e opera até que ocorra um novo toque. Caso se pressione durante algum tempo, a máquina entra em modo de funcionamento contínuo, parando assim que se larga o botão. A sua fonte de alimentação é uma

bateria de 48 V, com um peso de 2,4 kg, colocada num colete a ser vestido pelo operador (Figura 2.6b).



Actuador do dispositivo portátil para a monda da flor,
Electro'flor.



(b) Colete com fonte de alimentação Infaco.

Figura 2.6 - Solução comercial de equipamento para a monda da flor (<http://www.infaco.com/>).

Outra solução semelhante dá pelo nome de Cinch (Figura 2.7), inventada pelo Norte-Americano Phill Miller, que consiste num veio compatível com os acoplamentos de berbequins convencionais, elétricos e pneumáticos, estando disponível em 3 tamanhos diferentes 3, 4 e 5 polegadas.



Figura 2.7 - Máquina para a monda da flor de pessegueiro Cinch, e o seu inventor (<http://fruitgrowersnews.com>).

O Saflow, tem o mesmo princípio de atuação das duas soluções anteriores, no entanto, destaca-se pelo facto de ter um comprimento bastante reduzido (37 cm incluindo o punho de manuseamento). Existem disponíveis versões elétricas e pneumáticas. Pesa cerca de 0,45 kg. A sua utilização e resultados já foi estudada para a monda da flor de pessegueiro e cerejeira [18, 19]. É semelhante à patente descrita na *secção 2.1.5.1*, apresentada abaixo (ver Figura 2.9).

2.1.4. Monda seletiva

Encontrou-se um único estudo que incluía uma referência à integração de tecnologia de sensorização e mecanismos de atuação, com o objetivo de concretizar um equipamento de monda (de flor) seletiva. Nielsen *et al.* [20], desenvolveram um sensor e algoritmos para o mapeamento tridimensional (3D) da estrutura de pessegueiros durante a floração, com a capacidade de identificar as flores. O sistema proposto consiste no uso de três câmaras de 10 megapixel com iluminação para a aquisição de imagem durante o horário noturno e na aplicação de um algoritmo de visão stereo baseado em correlação. Os resultados mostraram-se promissores, uma vez que a maior parte das flores não ocluídas foram localizadas com uma precisão média correspondente a meia flor (1 cm). Contudo, ocorreram identificações incorretas, com ens entre 20 mm e 50 mm, que não puderam ser corrigidos pelas métricas de validação. A iluminação artificial apresenta-se como uma possível solução a estes problemas. Um outro aspeto que põe em causa a aplicabilidade do sistema, em particular a aplicação do algoritmo em tempo-real, é o tempo de processamento, que com o equipamento do estudo se mostrou ser da ordem dos 60 a 80 segundos, por cada par binocular, cerca de metade caso não se realizasse validação cruzada de oclusões. É sugerido que, caso estes dois aspetos fossem solucionados, atingindo-se assim um mapeamento da flor com boa qualidade e em tempo-real, estes dados poderiam ser utilizados como input para um algoritmo que indicaria quais as flores que deveriam ser removidas e cujo output seria utilizado no controlo automático do posicionamento e regulação de velocidade de um atuador como aquele representado na Figura 2.8.



Figura 2.8 - Protótipo de uma garra para a monda da flor [20].

2.1.5. Patentes de dispositivos portáteis

2.1.5.1. *Device for thinning and harvesting fruit and flowers*

Esta invenção [21] diz respeito a um equipamento para a monda da flor e fruto de árvores de fruto ou bagas em arbustos. É constituída por um veio (2) de 250 mm, no qual é fixo uma pluralidade de filamentos de aproximadamente 3 mm de espessura e 80 mm de comprimento. A patente prevê dois possíveis meios de ativação, elétrico e pneumático, cujos motores seriam alimentados por uma bateria. Na Figura 2.9 ilustra-se a versão pneumática. Uma válvula de controlo (4) é acoplada ao veio (2) através de um elemento encapsulado (5). Esta invenção destaca-se pelo comprimento do veio ser muito mais curto que as máquinas de monda da flor mais comuns, com o objetivo de reduzir a fadiga do operador, induzida pela vibração associada a um veio mais longo. É semelhante ao Saflowens mencionado anteriormente.

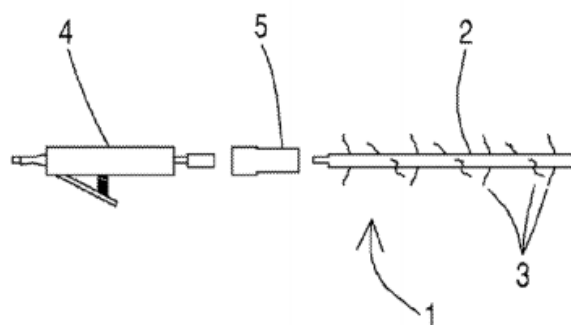


Figura 2.9 - Device for thinning and harvesting fruit and flowers [21].

2.1.5.2. *Ultrasonic targeted electric flower and fruit thinning machine*

Esta patente descreve uma máquina portátil de monda seletiva do fruto e flor. Conforme indicado na Figura 2.10, é constituída por uma estrutura, um veio rotativo com um conjunto de fitas adesivas (16), um motor elétrico (14), um sensor ultrassónico (6), um mecanismo de ajuste do ângulo de ataque, um cabo telescópico com um mecanismo de controlo e uma pega, numa extremidade, e um acoplamento à estrutura do atuador na outra. A alimentação realiza-se através de um cabo condutor posicionado junto à pega (7) [22]. Ainda que este dispositivo seja descrito como sendo capaz de executar monda seletiva, note-se que é posicionado manualmente e que ainda que faça uma regulação automática do ângulo de ataque, devido à área abrangida pelos elementos de impacto, não consegue identificar nem atuar sobre frutos ou flores individuais sem remover de forma não propositada outros frutos ou flores nas imediações.

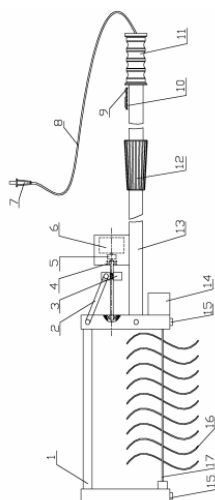


Figura 2.10 - Ultrasonic targeted electric flower and fruit thinning machine [22].

2.1.5.3. Fruit defoliating and thinning device for use in fruit trees

Este dispositivo destina-se à monda da flor e do fruto, não sendo especificado de que espécies. Conforme apresentado na Figura 2.11, consiste num atuador (10) com lâminas rotativas (16) com um invólucro para o veio (31). Possui um motor (50) e uma bateria (60) junto à pega circular (40), onde se situa um botão (41) que permite ao operador controlar a rotação da lâmina. Permite realizar as operações entre 1 a 3 m de distância [23].

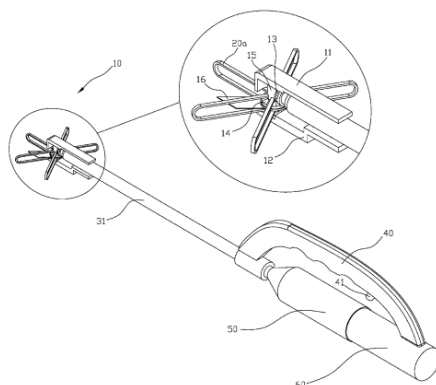


Figura 2.11 - Fruit defoliating and thinning device for use in fruit trees [23].

2.1.5.4. Flower and fruit thinning machine

Este dispositivo [24] destina-se à monda da flor e do fruto. Compreende um cabo (1), um motor e uma lâmina (3), em que o motor está ligado ao cabo (1) e move a lâmina (3). Destaca-se pelo

facto de o cabo (1) ter um formato de “L”, uma estrutura simples e que permite uma fácil utilização.

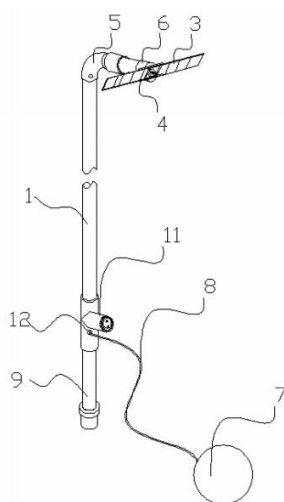


Figura 2.12 - Flower and fruit thinning machine [26].

2.1.6. Nota Conclusiva

Apesar da investigação relativa à mecanização de monda de frutos e flores se ter iniciado há décadas, a sua implementação permanece como algo pouco comum, sobretudo devido à inconsistência de resultados económicos que têm vindo a ser apresentados na literatura científica da especialidade, ainda que na maioria dos casos se observe de facto um impacto económico positivo quando comparado com a monda manual. Esta inconsistência de resultados deve-se provavelmente ao facto de todos os ensaios presentes na literatura fazerem uso de técnicas de monda não seletiva, caracterizada por uma remoção aleatória de flores ou frutos, e em que os parâmetros de regulação são ajustados heurísticamente. A aleatoriedade dos mecanismos não seletivos é ainda reforçada pela variabilidade natural dos fatores ambientais e biológicos que afetam as árvores de fruto. Através de análise modal, demonstrou-se possível prever os resultados obtidos através de agitadores de troncos ou ramos, devido ao facto da remoção de frutos ser proporcional ao deslocamento dos ramos durante o seu agitação. A condução das árvores de fruto e a capacidade de ajuste do ângulo de ataque permite melhorar os resultados com os equipamentos de hastes flexíveis acoplados a tratores, mas não garantem ainda nenhuma seletividade. Os mecanismos correspondentes, podem ser classificados como pertencendo a uma de duas categorias: veio rotativo como elementos flexíveis; ou dispositivo vibratório. Apenas um grupo de autores investigou a utilização de dispositivos portáteis para a monda de frutos e flores. Os dispositivos portáteis podem ser úteis em pomares de menores dimensões e menos estruturados, onde os equipamentos acoplados a tratores se mostrem desajustados, assim como para produtores com uma menor capacidade investimento, permitindo pelo menos que se

executem as operações de monda num menor período de tempo e com uma necessidade reduzida de mão-de-obra. Apenas um grupo de autores mencionava a conjugação de sensores e atuadores com o objetivo de se concretizarem dispositivos de monda de flor seletiva automatizada. Não foi encontrado nenhum estudo que abordasse esta perspectiva direcionada à monda de frutos.

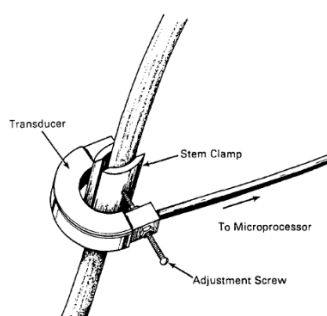
2.2. Sensorização de produtos hortofrutícolas

A monda seletiva, num sentido determinístico, só pode ser atingida com a utilização de sensores inteligentes, capazes de detetar os frutos, determinar a sua posição e avaliar as suas dimensões, apesar de toda a variabilidade que caracteriza o ambiente típico em que as operações de monda se realizam. Independentemente da posição e orientação dos sensores, existe uma elevada probabilidade de que algum obstáculo se encontre na linha entre os elementos de sensorização e os frutos. Além disso, o vento faz com que os ramos se movam, e as condições de iluminação variam constantemente, tornando uma árvore de fruto num sistema dinâmico e com elevado ruído.

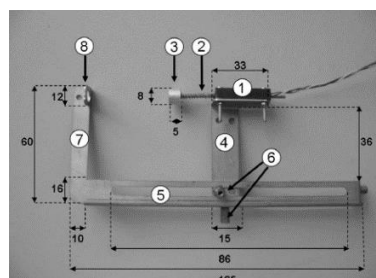
2.2.1. Extração de propriedades no campo

2.2.1.1. Medição Contínua

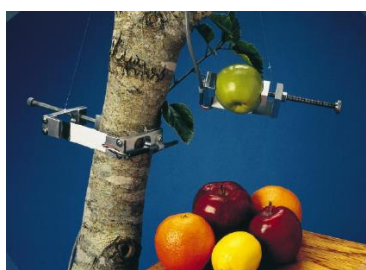
Foram já desenvolvidas diversas soluções de monitorização ou medição contínua do diâmetro de frutos e plantas no campo. Por exemplo, recorrendo a transdutores de deslocamento linear, tais como transformadores diferenciais variáveis lineares (*Linear Variable Differential Transformers* - LVDT's) [25], sendo os trabalhos associados motivados pelo interesse em estudar não só as dinâmicas do crescimento dos frutos, mas também em correlacionar as variações de tamanho dos frutos como forma de resposta a fatores como a variação do conteúdo de água ao longo de cada dia ou a variação de condições ambientais [26, 27]. Outras soluções recorriam ao uso de extensómetros dispostos em pontes de Wheatstone, de forma a detetar as variações de resistência do transdutor e fornecendo uma tensão linearmente proporcional ao deslocamento (ver Figura 2.13a) [28].



a) Diâmetro do caule de frutos [28].



b) Diâmetro de frutos [29].



c) Ilustração de dispositivos na árvore [30].

Figura 2.13-Dispositivos de medição contínua de diâmetros na árvore

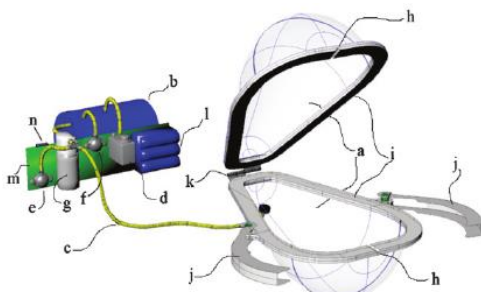
Foi apresentada e testada uma alteração deste sistema que substituiu o encapsulamento do sensor por material menos rígido (ver Figura 2.13c), evitando a necessidade de se proceder a um reajuste do zero, caso ocorressem deslocamentos superiores a 1 mm [30]. Existem soluções comerciais para este efeito, no entanto, devido o seu elevado preço não possibilita a proliferação da sua utilização, até porque tanto para fins de investigação como para a gestão de pomares, é necessário adquirir um elevado número de unidades [29]. Nesse estudo foi descrito um sistema de baixo custo (cerca de 60€) com base num potenciômetro linear, ilustrado na Figura 2.13b. Sendo que se trata de um simples divisor de tensão resistivo, a sua curva característica é também linear.

2.2.1.2. Dispositivos Portáteis

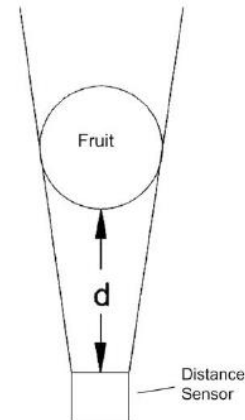
Iraguen *et al.* [31] apresentaram o desenvolvimento de um dispositivo portátil para a medição de cachos de uva nas videiras (ver Figura 2.14a) através do deslocamento de ar. O dispositivo era essencialmente constituído por uma câmara selada de volume constante onde era posicionado o

cacho a medir, formada por duas tampas de acrílico e contendo um orifício para o pedúnculo do cacho, uma segunda câmara a uma pressão de referência, 2 sensores de pressão piezoresistivos, um sensor de temperatura, uma válvula solenóide que liga as duas câmaras e uma bomba de vácuo. Através do controlo do ar extraído pela bomba, pela lei de Boyle-Mariotte foi possível determinar o volume do cacho, com um coeficiente de determinação de 95,4% e um erro médio quadrático de $19,3 \text{ cm}^3$ (9,8%).

Numa outra perspetiva, foi desenvolvido um aparelho para a obtenção de uma rápida estimativa do calibre de um fruto no campo, constituído por 3 hastes com ângulo fixo entre si, formando um tripé invertido, e por um sensor ultrassónico de distância colocado na base do tripé, ilustrado na Figura 2.14b. Colocando-se o tripé de forma a posicionar o fruto no seu interior e deslizando-se o tripé até que o fruto fique totalmente assente nas hastes de tal forma a que não seja possível aproximá-lo mais da base do tripé, verifica-se que a distância a que o fruto bloqueia, depende do seu diâmetro. Conhecendo a geometria do tripé e a distância ao fruto é possível estimar o seu diâmetro. Foram realizadas várias medições em limões, registando um erro médio quadrático de 2%. No entanto, a medição de cada fruto demorava 10 segundos [31, 32]. Hoje em dia, o problema do longo tempo de medição poderia ser resolvido, dado que se devia provavelmente a uma limitação de capacidade computacional.



a) Picnómetro. [33]



b) Diâmetro de frutos.[32] redesenhado a partir de [31].

Figura 2.14 - Dispositivos portáteis de extração de propriedades de frutos no campo.

2.2.1.3. Dispositivos de visão computacional

As técnicas de visão computacional têm vindo a ganhar um grande interesse e a serem exploradas para o reconhecimento e extração de propriedades de frutos no campo. Inclusivamente já se

realizaram algumas tentativas de concepção de sistemas de colheita automatizada de frutos baseados na recolha de imagens [34-41].

O único artigo de revisão encontrado dedicado à detecção de frutos na árvore incluía apenas as técnicas de visão computacional [42]. Existem também sistemas de medição contínua de diâmetro baseados nesta tecnologia, apesar de não ser o interesse mais predominante nos estudos encontrados, tal como aquele apresentado em [43], com o objetivo de permitir que se tracem curvas de crescimento dos frutos. Zhao *et al.* [44] desenvolveram um algoritmo para a localização de maçãs nas árvores, através de imagens RGB (*Red-Green-Blue color mode*) de 24-bit, com objetivo de apoiar o projeto de sistemas de colheita robotizados. As imagens capturadas são convertidas para uma escala de vermelhos, são submetidas a uma segmentação com base num limite de percentagem de vermelho e das áreas dos contornos definidos pelas fronteiras das segmentações. Os contornos em aberto são eliminados. Os frutos são então reconhecidos através da aplicação de um limite de valor de textura aos contornos que restam. Por fim, procede a um ajuste de curvas dos círculos de forma a determinar os centros dos frutos e a atribuir-lhes uma localização. A aplicação de filtros Laplacianos demonstrou reduzir o número de falsos positivos. Na imagem apresentada como exemplo (ver Figura 2.15), o sistema permitiu identificar 18 em 20 frutos da árvore alvo.

Zeng *et al.* [44] descrevem um método para a medição de uvas nas videiras, com recurso a uma câmara com sensor CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*), uma fonte de iluminação artificial e um computador, demonstrando uma elevada precisão, na ordem dos 7 μm de erro absoluto. Foi realizado um pré-processamento que permite modificar o valor de alguns píxeis de forma a reduzir o ruído e destacar as fronteiras, através de um filtro passa-baixo Gaussiano. As bagas foram identificadas pelo método de segmentação de Ostu [45] para remover o fundo e identificando cada objeto remanescente. Surgiu ainda algum ruído na forma de pequenos objetos, sendo estes removidos por uma segmentação por limite de área, atendendo ao reduzido número de píxeis que os caracterizava. Determinaram-se os diâmetros superiores e inferiores de cada fruto, permitindo atribuir-lhes uma localização e proceder à sua avaliação. A orientação de cada fruto é determinada e o diâmetro é medido ao longo da direção do eixo horizontal do fruto. Têm sido desenvolvidos métodos de segmentação específicos para a eliminação de folhas e ramos das imagens, por forma a isolar de forma mais eficiente os frutos para posterior avaliação de características [46-48]. Têm vindo a surgir tecnologias mais avançadas, que envolvem por exemplo imagens hiperespetrais, combinando informação espacial recolhida através de câmaras comuns, com informação espectral obtida através de técnicas de espectroscopia.



(a) Imagem Original.

(b) Imagem Gerada.

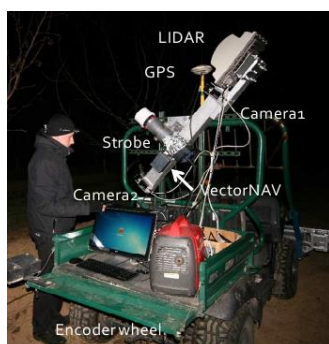
Figura 2.15 - Resultados de um sistema de identificação de maçãs por visão computacional num pomar [49].

Em [50] foi apresentado o desenvolvimento de uma plataforma móvel para a avaliação de citrinos, sendo composta por uma câmara RGB e um espectrómetro NIR (*Near InfraRed*) que combinada com um localizador GPS (*Global Positioning System*) permitia através da colheita manual de frutos para amostragem, analisá-los no campo, mapeando as propriedades externas como o calibre e propriedades internas como o conteúdo de sólidos solúveis, ao longo do pomar.

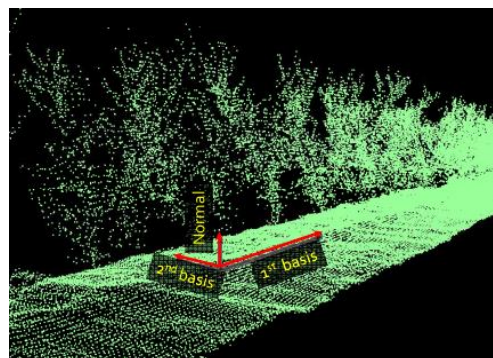
Aasted *et al.* [51] utilizaram um sistema de LIDAR, como sensor para um sistema de ajuste automático do ângulo de ataque do tambor um equipamento de monda da flor (Darwin), desenvolvido em [11], com o objetivo de aumentarem a eficiência da monda e reduzir o cansaço do operador associado à realização do controlo manual do equipamento de monda através de um *joystick*, em simultâneo com a condução do trator. Esta solução permitiu então que o condutor se focasse em manter uma trajetória retilínea, paralela à linha das árvores de fruto, enquanto o tambor do equipamento de monda ajusta automaticamente a sua orientação para manter um grau desejado de contacto das hastes do tambor com os ramos das árvores. A estratégia de controlo do ângulo baseia-se numa metodologia de controlo ótimo, envolvendo a definição de uma função de custo que representa o grau de contacto do tambor com os ramos e o risco de colisão, dada a posição atual do tambor e a imagem capturada pelo LIDAR. A função é periodicamente minimizada através de ajustes sequenciais do ângulo do tambor. O sistema transita sequencialmente entre estados de controlo adjacentes, com direção ao estado que minimiza a função em cada instante.

Nielsen *et al.* [50, 51] apresentaram um outro sistema compreendido por um módulo GPS, acelerómetros, dispositivos LIDAR e um par de câmaras stereo, que permite obter a reconstrução de um pomar, representado através de uma nuvem de pontos. O estudo foi também motivado pela necessidade de otimização da mecanização da monda de pêssegos e flor de pessegueiro. No entanto, os autores mencionam que poderá servir outros propósitos relacionados com a gestão

dos pomares, como a estimativa de produção ou a aplicação variável de pesticidas, sendo que existe a possibilidade de a cada ponto da nuvem se associar informação como a cor e textura, através da fusão de sensores.



(a) Equipamento.



(b) Imagem Gerada.

Figura 2.16 - Sistema LIDAR para o mapeamento e descrição de pomares [50].

2.2.2. Extração de propriedades em ambiente industrial

Moreda *et al.* [33] procedeu a uma revisão de literatura relativa aos diferentes métodos não-destrutivos para a determinação do calibre de produtos hortícolas através de equipamentos eletrónicos, justificando que estes sistemas são de extrema importância quer nas operações precedentes quer nas operações posteriores à colheita. No primeiro caso permite, por exemplo, fornecer indicadores de maturidade dos produtos, o que por sua vez possibilita a previsão do tempo ideal para se proceder à sua colheita [52]. Em ambiente industrial, estas tecnologias permitem, por exemplo, a separação do fruto colhido por calibre em sistemas *on-line*, ou operações mais complexas como a separação por conteúdo de sólidos solúveis ou de amido, dada a sua relação com a massa específica dos frutos [53, 54], o que requer avaliar o peso e volume dos mesmos. Apesar de esta revisão abarcar um elevado número de estudos de desenvolvimento de equipamentos e possíveis soluções, e de não ser explícita a intenção de incluir apenas sistemas para operações pós-colheita, somente dois sistemas são apresentados como tendo portabilidade e conseqüente aplicabilidade no campo. Outros artigos de revisão abrangem um conjunto de características mais alargadas, sendo que a maioria das técnicas abordadas diz respeito à avaliação de propriedades internas dos produtos [55-58]. Em [59] foi analisada a combinação de sensores ópticos e mecânicos para a avaliação das propriedades de qualidade externa e interna do pêsego. Moreda *et al.* [33] propusera um sistema de classificação para este tipo de tecnologias com base no seu princípio de funcionamento:

- Sistemas baseados na mediação do volume da folga entre o fruto e o equipamento de medição.
- Sistemas que calculam o tamanho do fruto através da medição da distância entre uma fonte de radiação e o contorno do fruto, sendo a distância calculada através do “tempo de voo” das ondas emitidas.
- Sistemas com base na obstrução da luz.
- Sistemas de visão computacional 2D.
- Sistemas de visão computacional 3D.
- Outros sistemas. Categoria na qual se incluem os sistemas de captura de imagem interna, como as tomografias computadorizadas ou a imagem por ressonância magnética.

2.2.2.1. Medição de Folga

Gall [60] descreveu um algoritmo base e a matemática subjacente para a utilização de um sensor de anel ótico (Figura 2.17). Os emissores e recetores apresentam uma resposta angular Lambertiana, ou seja, a intensidade do sinal foi considerada independente da posição do observador. Os emissores são disparados sequencialmente em torno do anel. Se não existir nenhum objeto a intercepar os feixes, estes são detetados pelo recetor correspondente. Se for introduzido um objeto, um ou mais recetores ficam “cegos” ao feixe do emissor correspondente. Cada dois feixes (ou cordas) seguidos, não interrompidos, podem ser utilizados para descrever as curvaturas de um objeto. O sistema de coordenadas utilizado tem como origem cada um dos transmissores. Os seus parâmetros são os ângulos entre transmissores adjacentes, entre o transmissor e correspondente recetor, o número de transmissores e o raio do anel. A informação foi codificada numa matriz cuja dimensão bidimensional é igual ao número de transmissores. Para cada transmissor n , é armazenada a posição relativa do correspondente recetor na forma vetorial $m[n]$. Foram impostas condições de funcionamento, como o facto de nunca poder coexistir mais do que um objeto no anel, ou a configuração de como devem ser dispostos os transmissores e recetores. Foi aplicado um algoritmo que permite eliminar cordas redundantes e obter as distâncias das cordas até às interceções com os objectos. A obtenção de uma reconstituição 3D seria simples dada uma velocidade de deslocamento constante, a que corresponderia uma distância igualmente constante entre capturas de imagem. Foi afirmado que este sistema possibilita uma aplicação com praticabilidade em tempo real, dada a necessidade de uma reduzida potência computacional que resulta do uso de vectores em vez da mais frequentemente utilizada pixelização. A área de secção do fruto pode ser calculada pela subtração da soma dos triângulos e segmentos de círculo que formam a folga entre o anel e o fruto, à área total do círculo formado pela periferia interna do anel. Além disso, é possível ainda calcular o volume de um objecto, através da reconstituição 3D, assim como a medição e determinação de eixos. Moreda *et al.* [63] procedeu à determinação das condições óptimas de

funcionamento do sensor óptico de Gall como sistema *on-line* de calibração de frutos, construindo o sensor com LED's de Arsenieto de Gálio (*Gallium arsenide* - GaAs) como emissores e fototransistores NPN como receptores. Concluíram que a velocidade óptima para a medição de dimensões longitudinais era de 2 m/s. Os mesmos autores realizaram ainda um estudo acerca dos efeitos da orientação dos frutos neste sensor, concluindo que na ocorrência de oscilações dos frutos durante as medições, as medições de eixos deixavam de apresentar resultados razoáveis, mas a medição de volume permanecia com um coeficiente de determinação elevado (95%) [61].

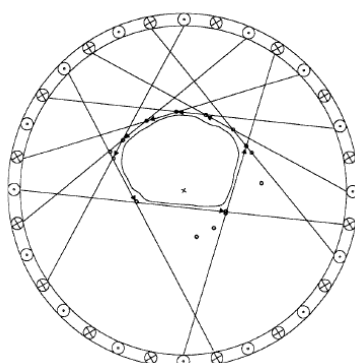


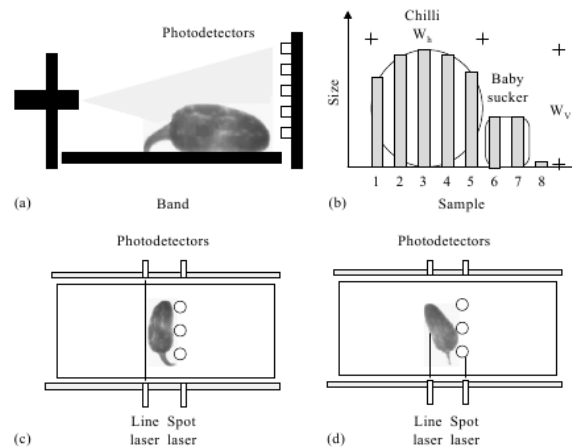
Figura 2.17 - Anel óptico. Fase final do algoritmo nas quais as cordas redundantes foram descartadas [60]. Também inserido nesta primeira categoria, foi apresentado um sistema com base no fenómeno da ressonância de Helmholtz que apesar de permitir uma elevada precisão de volumes, não permite a distinção do que ocupa esse mesmo volume e além disso requer uma velocidade de avanço extremamente lenta, tendo sido testado com um máximo de 45 mm/s [62].

Kato [66] desenvolveu um sensor capacitivo para a estimativa do conteúdo de sólidos solúveis de melancias, em que a tensão de um medidor de capacidade variava com o volume dos frutos, obtendo uma precisão superior à do equipamento de ressonância de Helmholtz e permitindo uma operação a maiores velocidades. Em contrapartida, exigia um posicionamento mais rigoroso dos frutos.

2.2.2.2. Obstrução de luz

O sistema apresentado em [63], ilustrado na Figura 2.18, permite proceder à avaliação do calibre de malaguetas. Este sistema consiste em geradores de linha por díodos laser e barras de fotodetetores posicionadas verticalmente, no lado oposto de um tapete transportador. Enquanto os frutos são transportados pelo tapete transportador a velocidade constante, a barra de fotodetetores faz uma leitura da linha laser a cada 20 ms, permitindo assim estimar tanto as dimensões verticais como as dimensões horizontais. Um segundo conjunto de fotodetetores é

utilizado especificamente para detetar os dedos de borracha que auxiliam o correto posicionamento dos frutos. A dimensão vertical atribuída corresponde à altura do emissor mais elevado a ter o seu feixe bloqueado. A dimensão horizontal é dada pelo número amostragens até que algum feixe se mantenha bloqueado, sendo o número de amostragens contado a partir do momento em que os dedos de borracha são detetados. Este tipo de sistemas é utilizado há década [64].



Laser line generator (laser stripe) and photodetectors; (b) sampling measurements taken with the photodetectors; (c) well-aligned chilli; (d) badly aligned chilli; W_h , chilli horizontal width; W_v , chilli vertical width

Figura 2.18 - Sistema de avaliação do calibre de malaguetas [64].

2.2.2.3. Visão Computacional

Hoje em dia a maior parte das instalações de empacotamento possui sistemas de visão computacional 2D nos seus separadores óticos. Além do tamanho e forma, são utilizados para classificar os produtos de acordo com a cor de superfície e defeitos externos. Geralmente, estes sistemas são apropriados para qualquer tipo de produto. A única limitação da sua aplicabilidade à inspeção de produtos hortícolas é a ocorrência de reflexões que tendem a saturar os sensores CCD (*charge-coupled device*) e CMOS das câmaras. Este problema é normalmente evitado com a utilização de iluminação indireta, pela aplicação de filtros às câmaras ou pela utilização de sensores CID (*Charge Injection Device*) [32]. Tipicamente, os frutos são transportados num tapete e são observados a partir de uma vista superior por uma ou mais câmaras. Por vezes, são adicionados espelhos laterais para aumentar os pontos de vista. Estas técnicas divergem sobretudo nos algoritmos utilizados para a extração de propriedades, existindo um grande número de investigações para a conceção destes, inclusive artigos de revisão que se focam em aspetos externos como a geometria ou a deteção de defeitos superficiais destrutivos [46, 49, 65-67, 67-76, 76, 77] ou a medição da firmeza dos frutos através de métodos não-destrutivos [78]. Tem vindo a crescer também em ambiente industrial, a introdução de tecnologia de imagens multiespectrais e hiperespectrais, para extração de propriedades internas [56, 79-84]. A visão

computacional 3D tem vindo a ser introduzida na indústria por permitir obter estimativas de volume mais precisas. As técnicas de visão computacional 3D podem-se dividir em ativas e passivas, conforme a existência ou não de uma fonte luminosa artificial a incidir sobre o objeto a analisar. Estas baseiam-se na utilização de pistas como o movimento, imagem stereo, sombras ou silhuetas para que se proceda a uma tentativa de estimar a forma da superfície, ou a orientação da superfície em cada ponto. Estes métodos, à exceção do stereo, não permitem um cálculo direto de profundidade e requerem assumir como verdade certas regularidades [32]. Uma outra forma de fazer uma reconstrução 3D de um objeto passa pela utilização de sensores de alcance por tempo de voo. Assim torna-se possível obter verdadeiras leituras topográficas. Estes sensores podem ser diretamente utilizados para a determinação da forma e caracterização de texturas [56], ou em conjunto com câmaras comuns [32].

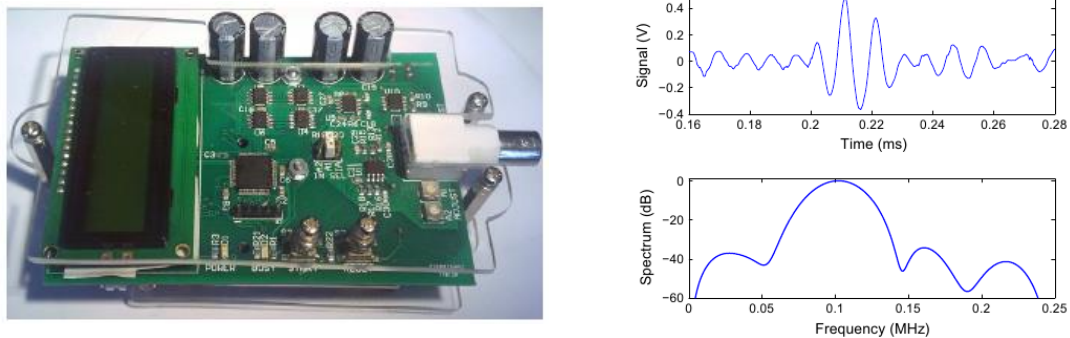
2.2.2.4. *Tempo de Voo*

Existe um extenso trabalho desenvolvido sobre a implementação de sensores ultrassónicos na engenharia alimentar, descrevendo a teoria e os princípios que poderão ter utilidade, assim como a sua possível aplicação [85-87]. Os sensores desta categoria permitem determinar propriedades internas e externas dos frutos, uma vez que ao se aplicar um impulso acústico no fruto, a sua resposta depende de parâmetros como a sua elasticidade, dimensões ou massa específica. As frequências inferiores a 200 kHz e elevadas amplitudes têm demonstrado os melhores resultados para a extração de características [58, 88, 89]. Todavia, tem sido observado em diversos produtos hortícolas um alto coeficiente de atenuação para frequências entre os 0,5 MHz e 1 MHz, frequências tipicamente utilizadas na medicina e outras indústrias [88]. Lee & Sho [94] investigaram a viabilidade da utilização de técnicas de medição por ultrassom sem contacto direto, para a estimativa da firmeza de frutos. Recorreram a transdutores de 500 kHz para emitir ondas contra as amostras de maçã e pêssigo, e realizaram a transformada rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*) dos sinais refletidos. Com base nos espetros obtidos, desenvolveram múltiplos modelos através de regressão linear, utilizando fatores de correção de distância para prever a resistência e o módulo elástico dos frutos, tendo atingido fatores de determinação de 0,82 para as estimativas em ambos os frutos. Na ausência de perturbações do ar, a razão entre a amplitude da segunda reflexão e a divisão entre os tempos de voo da primeira e segunda reflexão são constantes, independentemente da distância entre o transdutor e a amostra. Os métodos que utilizam dois transdutores requerem um posicionamento muito preciso destes, o que dificulta a sua aplicação em ambientes não controlados.

Morrison & Abeyratne [93] projetaram um sistema com um único transdutor de 100 kHz (Figura 2.20) com o objetivo de permitir a avaliação de vários parâmetros de laranjas, como o conteúdo

de água ou a firmeza, afirmando, que pode ser facilmente utilizado para a automação de processos, ou no campo, sendo alimentado por 2 pilhas de 9 V. O sinal recebido era captado por um amplificador de instrumentação de alta sensibilidade através de um conversor analógico-digital (ADC - *Analog to Digital Converter*) de 12 bits a 3 milhões de amostragens por segundo (MSPS). Esse sinal era processado por técnicas de processamento de sinal digital (DSP - *Digital Signal Processing*), ao invés de ser utilizado processamento por hardware, permitindo assim uma maior versatilidade. Um microcontrolador ARM foi utilizado para gerar as formas de onda que acionavam o transdutor, para amostrar e processar os sinais refletidos.

Figura 2.19 - - Sistema portátil de análise de propriedades internas e externas por ultrassom [89].



(a) Equipamento.

(b) Sinais obtidos.

2.2.2.5. Outras técnicas

Na última categoria definida por [32] incluem-se técnicas que recorrem a micro-ondas, raio-Xx, ou à produção de imagem por ressonância magnética, sendo que esta última tem vindo a ser frequentemente estudada quanto à sua viabilidade para sistemas on-line de deteção de defeitos e avaliação de qualidades internas. As imagens obtidas fornecem uma distribuição da densidade de prótons ou núcleos de hidrogénio, que entram em ressonância com o campo magnético gerado pelo equipamento [90]. A maioria dos estudos relativos à utilização desta técnica na indústria alimentar têm sido realizados com equipamento médico, que opera com campos magnéticos de alta intensidade (acima de 2 T), com hardware dispendioso e que requerem um elevado investimento, mostrando-se difíceis de implementar mesmo em ambiente industrial [56] e não parecendo justificar economicamente a sua aplicação para a simples determinação de dimensões [32]. Uma outra técnica que tem sido bastante investigada para a avaliação de propriedades internas é a espectroscopia NIR, com ondas eletromagnéticas entre os 780 nm e os 2500 nm. Na espectroscopia, os produtos são irradiados e a radiação refletida ou transmitida é medida. Ao penetrar no produto, as características espectrais são alteradas devido à dispersão e a processos de absorção, de acordo com a composição química do produto e a sua microestrutura [91]. É

previsível que num futuro próximo ocorra a miniaturização desta tecnologia, permitindo a sua utilização no campo [92]. Uma outra região do espectro eletromagnético que tem vindo a ganhar interesse é a chamada radiação terahertz que se situa entre a zona milimétrica do infravermelho e as micro-ondas (100 GHz a 4 THz), ao qual as substâncias demonstram uma opacidade significativamente diferente dos espectros mais próximos, com a vantagem de ser não-ionizante [58], tendo sido já aplicada na avaliação de propriedades de frutos, como por exemplo para a deteção de resíduos de pesticidas [93].

2.3. Nota conclusiva

Os dispositivos de medição contínua são inerentemente estáticos e requerem um posicionamento manual do produto a avaliar, para que possa fornecer informação sobre o diâmetro de frutos ou pedúnculos. Assim, servem necessidades relacionadas com a gestão e monitorização, mas não para aplicações dinâmicas em tempo-real. Os sistemas portáteis apresentados, apesar da sua portabilidade, requerem ainda um posicionamento manual do produto a ser avaliado. Ainda que exista um número significativo de estudos relacionados com a deteção e extração de propriedades no campo através de visão computacional, e apesar da maior tendência de literatura relativa à sensorização no campo, os autores afirmam que o intuito é apoiar o desenvolvimento de técnicas e dispositivos para a automatização de processo agrícolas [42], não existem de facto muitas tentativas de integrar estas tecnologias nalgum tipo de dispositivo ou equipamento. Adicionalmente, as tentativas que surgem não aparentam fornecer uma vantagem significativa sobre os métodos manuais equivalentes, sendo normalmente mais limitadas pelos mecanismos de atuação do que pelas tecnologias de sensorização, ainda que no que diz respeito à deteção de frutos nas árvores, é necessário desenvolver algum trabalho adicional no sentido de melhorar as percentagens de deteção. Além disso, a visão computacional pode não se apresentar como a melhor solução para a deteção de frutos nas árvores já que independentemente do ponto de vista a partir do qual se capturem imagens no espectro visível, uma grande parte dos frutos encontra-se ocluso por folhas e ramos. As soluções com base na medição de folga podem apresentar interesse para aplicações neste âmbito, já que os sensores ao serem colocados numa estrutura móvel, podem fornecer um ponto de vista radial dinâmico, permitindo recolher informação a partir dos interstícios das árvores. Os sensores de tempo de voo podem mitigar alguns dos problemas que afetam a visão computacional, tal como o surgimento de sombras ou a confusão entre regiões com propriedades óticas semelhantes, ainda que se aplicados sem processamento adicional sofrem também do problema da oclusão, caso não haja uma linha direta entre os sensores e aquilo que se pretende detetar. Conclui-se então que para tornar a deteção de frutos em algo viável, é necessária investigação adicional no sentido de resolver o problema da oclusão. Possivelmente a solução passa pelo uso de sensores não

tradicionais, que façam uso das propriedades de absorção ou reflexão dos frutos, folhas e ramos, para possibilitar uma diferenciação entre estes. Esta abordagem teria a capacidade de gerar imagens ou gráficos que representassem informação espacial relativa aos frutos, e tornar invisíveis ou transparentes as folhas e ramos, permitindo assim tornar o processo de detecção dos frutos em algo simples, após esse processamento [42]. No entanto, estas propriedades não são fáceis de obter uma vez que, seja através do uso de ondas mecânicas ou eletromagnéticas, a não ser que se recorra a equipamento de alta potência, a atenuação através do ar torna qualquer propriedade diferenciadora em algo difícil de capturar e isolar, ainda que os ultrassons e NIR tenham já sido utilizados como fonte de excitação para técnicas de espectroscopia em frutos e vegetais. Os algoritmos de aprendizagem de máquina, particularmente de aprendizagem supervisionada, sejam eles implementados no dispositivo final e executados durante a operação no campo, ou utilizados de forma off-line como uma ferramenta de investigação na detecção de padrões, podem ser úteis na resolução destes problemas, já que permitem identificar padrões na ausência de formalismos capazes de os determinar [94].

3. Design Conceptual

3.1. Introdução

Neste capítulo descrevem-se e discutem-se as topologias de sensorização e atuação, consideradas e adotadas, tendo como objetivo último maximizar a capacidade do dispositivo exercer seletividade na remoção dos frutos. Em primeiro lugar são definidas as especificações que definem quais as condições que um dispositivo de monda de frutos deve satisfazer para que demonstre aplicabilidade prática e conseqüentemente interesse comercial. De seguida, realiza-se uma breve descrição dos pomares e árvores de fruto como meio de operação para dispositivos automatizados, evidenciando as condicionantes envolvidas na passagem da definição de especificações para a formulação de conceitos e para a adoção de soluções para os diferentes elementos constituintes. É brevemente analisada a topologia mais comum de sensorização e atuação implementada na investigação de sistemas autónomos de colheita de frutos. Em relação à sensorização, foi já concluído e evidenciado por outros autores que para possibilitar o desenvolvimento de soluções automatizadas com sucesso, relacionadas com árvores de fruto, é necessário desenvolver novas técnicas e tecnologias que possibilitem a diferenciação entre objetos. Já as soluções de atuação observadas no estado da arte demonstram-se desajustadas para um dispositivo de monda seletiva de frutos, e dado que não existe ainda literatura relativa a esta componente em específico, é-lhe dada especial atenção. A definição da geometria do dispositivo resulta da solução de atuação adotada e das características do meio de operação.

3.2. Especificações iniciais

Para que um dispositivo de monda automatizada ou semi-automatizada apresente uma vantagem económica incontestável para os produtores de diferentes patamares de produção, devem-se satisfazer os seguintes aspetos:

1. Agilizar significativamente o processo, face ao método manual que apresenta uma duração de 15 a 20 minutos por árvore, por trabalhador [16]. Além da óbvia redução de mão-de-obra necessária, a redução do período de tempo da execução dos diferentes processos agrícolas é por si só um fator extremamente valioso para os produtores, de um

ponto de vista de gestão de recursos e capacidade de resposta aos inúmeros fatores de grande imprevisibilidade característicos do setor, tal como as condições atmosféricas ou o aparecimento de variados tipos de pragas e doenças.

2. Não comprometer a seletividade conseguida pelos trabalhadores durante o processo manual, ou seja, deve garantir um número ótimo de frutos por ramo e uma distribuição uniforme dos mesmos ao longo dos ramos. A seletividade regula diretamente a relação entre o volume de produção e o calibre final dos frutos, pelo que, em conjunto com os custos das operações e os fatores ambientais não controlados, determina se a aplicação da monda de frutos resulta num impacto económico positivo, neutro ou negativo. Assim, um dispositivo de monda ideal deve apresentar um elevado nível de seletividade com parâmetros reguláveis, para que possa otimizar os resultados para diferentes árvores de fruto, cultivares e condições ambientais, obtendo resultados com uma elevada repetibilidade, que motivem uma larga adoção dos dispositivos pela demonstração de um impacto económico positivo consistente.
3. Reduzido período de retorno. De forma a permitir a aquisição de dispositivos por parte de produtores pertencentes a diferentes escalões económicos. Este fator dependerá dos custos de aquisição, utilização e manutenção do dispositivo, assim como dos resultados alcançados pela sua utilização e conseqüente impacto económico.
4. Conforto, simplicidade e segurança de utilização. O dispositivo deve permitir que um trabalhador, se necessário, o opere ou monitorize ao longo de um dia com 8 horas de trabalho. A interface deve ser tão simples quanto possível, sem no entanto excluir a possibilidade de conter parâmetros reguláveis, caso estes mostrem o potencial para colmatar a variabilidade associada aos diferentes tipos de árvore de fruto, cultivares e condições ambientais sobre os quais se pretende atuar. Não deve apresentar a possibilidade de infligir qualquer dano ao utilizador e danos significativos às árvores.

3.3. Caracterização, variabilidade e condicionamento do meio de operação

Os ambientes agrícolas são, de forma geral, cenários altamente complexos e destrutturados [94]. Uma árvore de fruto como meio de operação de um dispositivo automatizado, possui três principais fontes de variabilidade: objetos, ambiente e espécies [95]. Os objetos presentes e constituintes de uma dada árvore tais como frutos, ramos e folhas variam significativamente de posição relativa, tamanho, forma e propriedades óticas. Não existem até à data modelos que permitam prever a posição onde existem ou existirão frutos a vindar, pelo que os dispositivos

destinados à colheita ou para a monda têm de possuir a capacidade de os localizar. Esta variabilidade surge de forma acentuada mesmo entre árvores de uma mesma cultivar em condições semelhantes, não só devido a diferenças genéticas, mas também a fatores como a idade de cada árvore, a ocorrência de pestes, doenças ou dos tratamentos aplicados pelos produtores. Além disso, a vida útil de cada cultivar no mercado tem vindo a diminuir, devido ao facto das empresas produzirem continuamente novas cultivares no sentido de melhorarem a produção ou responder às necessidades do mercado. Os frutos de uma mesma árvore, podem variar significativamente de cor, forma e dimensões [95]. No entanto, esta variação é minimizada na monda, tanto mais quanto mais próximo da plena floração se realizar a intervenção. Contudo, não deixam de existir fenómenos imprevisíveis como o surgimento de aglomerados de frutos, em que a acessibilidade por parte de um qualquer atuador sobre cada um dos frutos, sem afetar os restantes, é dificultada, assim como a capacidade dos sensores discernirem entre os diferentes frutos no aglomerado. Os restantes objetos, ramos e folhas, não devem sofrer qualquer tipo de dano, como tal, os sistemas autónomos têm de ser capazes de os identificar para que os possam evitar durante as fases de posicionamento e atuação, podendo também estes variar significativamente no que diz respeito à sua geometria, localização e propriedades óticas. Estes objetos, além de representarem obstáculos no deslocamento das estruturas dos dispositivos, são responsáveis pela oclusão dos frutos.

A segunda fonte de variabilidade diz respeito aos diferentes ambientes e sistemas de cultivo: pomares, estufa, indoor e campo aberto. É de destacar que em estufa e em indoor, os frutos apresentam significativamente menos variabilidade de posição, forma, dimensões e cor, uma vez que se recorre a estruturas para a condução das plantas e parâmetros tais como a iluminação, temperatura, humidade e dióxido de carbono podem ser controlados. Estes factos fazem com que os processos nesses sistemas sejam mais facilmente automatizados. Contudo, o foco do trabalho apresentado nesta dissertação é a monda em árvores de fruto, cultivadas em pomar, onde a acessibilidade dos frutos é reduzida pela densidade de obstáculos que necessitam de ser evitados e que simultaneamente diminuem a visibilidade dos frutos. Adicionalmente, na época imediatamente após plena floração, em que a monda dos frutos é idealmente realizada, os frutos apresentam pigmentação predominantemente verde e pequenas dimensões e a densidade de folhagem em várias cultivares é elevada. A condução e poda das árvores são componentes integrantes de um sistema de cultivo e apresentam especial relevo para o condicionamento da visibilidade e acessibilidade dos frutos, já que permitem simplificar e normalizar a geometria das árvores. Nos pomares devem ser tidos em consideração como distúrbios adicionais, a ocorrência de ventos que agitam os ramos e chuvas que podem danificar os dispositivos. O controlo das condições de iluminação durante o horário diurno só é possível no sistema indoor. Como se viu no capítulo anterior, já se realizaram experiências com iluminação artificial e estruturada para aplicações em pomares implementadas durante a noite.

A terceira fonte de variabilidade relaciona-se com a existência de diferentes cultivares e espécies num mesmo meio de operação. Os pontos anteriores destacam o facto de existir uma grande variabilidade intracultivar. Então, na presença de diferentes cultivares ou espécies, a variabilidade do meio torna-se muito mais acentuada. Posto isto, torna-se óbvia a complexidade de conceber dispositivos com suficiente versatilidade para atuar sobre pomares multiculturais, uma vez que cada cultivar e espécie apresenta desafios técnicos diferentes. Foi sugerido que em trabalhos futuros os investigadores devem-se focar apenas numa espécie e analisarem o mais detalhadamente possível, para que consigam atingir soluções funcionais [95].

3.4. Manipulador móvel autónomo

Um sistema de monda seletiva totalmente automatizado necessita de estruturas articuladas que lhe confirmem um número suficiente de graus de liberdade, que permitam o posicionamento e orientação dos atuadores de forma favorável à remoção dos frutos alvo, sem danificar a árvore ou os frutos que deverão permanecer na árvore. Necessita ainda que essa estrutura se possa movimentar em torno de cada árvore para maximizar o seu alcance, e consiga transitar entre as diferentes árvores. A solução mais óbvia para satisfazer estas necessidades, atendendo ao modelo humano, seria implementar um sistema com base num manipulador robótico com pelo menos 6 graus de liberdade, equipado com uma garra, montado numa plataforma móvel, frequentemente chamadas de AGV's (*Automated Guided Vehicle*) (ver Figura 3.1), ou em tratores com condução autónoma, em conjunto com tecnologia de visão computacional. Esta solução foi já sugerida para a automação da monda da flor [96] e tem sido a base da maior parte da investigação relativa a sistemas de colheita de frutos automatizada, onde os investigadores baseiam os seus sistemas maioritariamente em manipuladores de 3 graus de liberdade e câmaras que operam no espectro visível ou com câmaras multiespetrais [95]. Uma solução alternativa para o movimento de translação seria a implementação de carris ou calhas guia, no solo ou aéreas. A utilização de carris ou calhas poderia facilitar o desenvolvimento do sistema, já que dispensaria a necessidade de recorrer a sistemas e algoritmos complexos de navegação, apesar de poder eventualmente limitar adicionalmente o alcance dos atuadores e resultar em custos elevados de construção, dependendo das dimensões das explorações. Um exemplo da implementação de carris, em conjunto com um manipulador robótico, para a colheita de pepinos em estufa é apresentado em [97]. No caso de um sistema com translação baseada em carris aéreas, poder-se-ia ainda considerar a utilização de robôs de configuração delta, ou semelhantes.

Contudo, o ciclo de trabalho (deteção e atuação) deste tipo de sistemas pode atingir várias dezenas de segundos. Além disso, a implementação com sucesso de algoritmos de navegação de robôs móveis em ambientes como o dos pomares apresenta ainda inúmeras dificuldades, necessitando de algoritmos complexos e fusão de sensores. O caso de maior sucesso até à data é

um sistema autónomo de colheita de kiwis, com navegação e deteção de frutos baseados em visão computacional, contendo 4 braços articulados com uma garra customizada, que atinge ciclos de apenas 1 segundo. É no entanto de notar, que neste caso os kiwis se encontram em latada, suspensos no ar e sem um número significativo de obstáculos na periferia [35].

Devido às dimensões típicas dos manipuladores e ao espaço disponível nos interstícios das árvores, demonstram uma grande tendência para danificar as árvores e frutos, além de apresentarem uma grande dificuldade em alcançar todos os pontos de interesse, independentemente do número de graus de liberdade que possuem. Além dos aspetos relacionados com a geometria e atuação, a aplicação das técnicas de visão computacional em aplicações relacionadas com árvores de fruto, tal como concluído no capítulo anterior, tem como principal dificuldade a oclusão dos frutos por parte das folhas e ramos, o que é particularmente relevante em árvores como o pessegueiro durante a época ótima para a realização da monda. Uma apropriada condução das árvores, como mencionado anteriormente, pode facilitar a implementação e melhorar a performance deste tipo de sistemas, apresentando o potencial para minimizar o número de graus de liberdade necessários, o número de obstáculos na trajetória dos manipuladores e a distância que é necessária percorrer até aos frutos. Esta topologia tem de facto demonstrado falta de eficiência e praticabilidade aquando implementada num ambiente não-controlado e dinâmico, como um pomar. De acordo com as mais recentes revisões de literatura relacionada como robôs de colheita seletiva de frutos, o desempenho destes não tem demonstrado melhorias significativas nas últimas três décadas e nenhum dos sistemas presentes na literatura atingiu o mercado [94, 95]. Bac *et al.* [100] enuncia cinco principais causas para o baixo sucesso dos sistemas autónomos de colheita de frutos: a variabilidade do meio; a falta de tentativas para simplificar a tarefa através da modificação do meio; a não utilização de metodologias de projeto, especialmente o pouco rigor na definição de requerimentos; a não divulgação dos requerimentos, condições de teste e indicadores de desempenho por parte dos investigadores, o que dificulta avaliar que técnicas, dispositivos ou algoritmos apresentaram sucesso e o que necessita de ser melhorado; uma descrição do hardware e software limitada, faz com que os investigadores tenham de reinventar de raiz as técnicas, dispositivos e algoritmos a implementar no seu trabalho.



Figura 3.1 -Ensaio de campo de um sistema autónomo de colheita de frutos baseado num manipulador PRRRP [40].

3.5. Topologias de atuação consideradas na definição do sistema

3.5.1. Atuação por contacto direto

Os manipuladores robóticos industriais usam classicamente algum tipo de garra para a manipulação de objetos. São essas as ferramentas de eleição nos sistemas autónomos de colheita de frutos e é também o tipo de ferramenta sugerido em [96] para a monda seletiva automatizada de frutos, sendo inspirado pelo modelo humano. Com a utilização deste tipo de ferramenta, esta tem de ser cuidadosamente posicionada para que dada a geometria e orientação dos frutos e dos elementos articulados da garra sejam estes dedos, armações ou cúpulas, articuladas ou de sucção, não se permita o rolamento e queda do fruto após o fecho. O fecho tem de ser realizado com uma força reduzida ou a ferramenta terá de ser dotada de sensores de pressão, para que não se inflitam danos aos frutos. Além disso, após o fecho da garra, o fruto encontra-se ainda ligado à árvore através do pedúnculo, pelo que é necessário: exercer uma força de tração sobre o fruto, o que pode resultar em danos à árvore ou a frutos no mesmo ramo, devido ao momento considerável que é necessário para remover um fruto desta forma; exercer um momento torsor sobre o pedúnculo, o que é possível através da rotação da garra se esta constringir o fruto de tal forma que não permita a rotação do mesmo relativamente à garra; conter um mecanismo de corte, ou garantir que as extremidades da garra durante o fecho exercem uma suficiente força de esmagamento sobre o pedúnculo para o separar do fruto. No entanto, ao contrário do que acontece na colheita de frutos, o fruto sobre o qual se pretende atuar na monda, não tem de ser manipulado cuidadosamente, já que vai ser descartado. Este facto dispensa a necessidade de envolver ou fornecer algum tipo de apoio ao fruto. O único propósito de um atuador para um

dispositivo de monda é separar o fruto alvo do pedúnculo (ou o pedúnculo do ramo), evitando danos à árvore e a outros frutos. Assim, além de uma força de tração, torção e corte, pode-se considerar a possibilidade de se recorrer a uma força de impacto. A tração e a torção são evidentemente desvantajosas face às restantes hipóteses, uma vez que requerem que o fruto seja constringido pela ferramenta, o que implica a abertura e fecho de elementos articulados, o que na presença de frutos em posição colateral dificilmente seria implementado sem existir contacto com esses outros frutos. Além disso, adiciona tempo ao ciclo de operação, por requerer movimentos adicionais face às alternativas. O uso de uma força de impacto apresenta a vantagem de poder ser exercida diretamente sobre os frutos, sem necessidade de os constringir, resultando na separação entre o fruto e o pedúnculo ou mesmo entre o pedúnculo e o ramo. Adicionalmente, uma força de impacto, se exercida ao longo de uma trajetória retilínea no plano transversal ao segmento do ramo sobre o qual se pretende operar, apresenta a maior capacidade e precisão para agir sobre frutos individuais evitando danos a frutos que não o fruto alvo, já que por norma os frutos em posição colateral surgem no sentido longitudinal dos ramos. A remoção dos frutos através de um mecanismo de corte pode permitir minimizar a força necessária através da utilização de lâminas, no entanto, a sua utilização só faz sentido se estas agirem sobre os pedúnculos, não sobre os frutos, o que dificulta a remoção de frutos individuais na presença de frutos em posição colateral, particularmente se os pedúnculos apresentarem um baixo comprimento, apresentando uma acessibilidade reduzida. Ainda, recorrendo a lâminas comuns em que a aresta cortante se localiza no sentido longitudinal, é difícil conceber uma trajetória ótima que evite o contacto com outros frutos e ramos. Qualquer linha de ação curvilínea apresenta geralmente uma probabilidade superior de ocorrência de contactos não desejados.

3.5.2. Jato de fluido pressurizado

A remoção dos frutos através da projeção de um jato de fluido pressurizado (ar ou água), ao invés da utilização de qualquer tipo de atuador que requeira um posicionamento próximo dos frutos a remover, apresenta-se como uma potencial abordagem para reduzir os danos associados ao posicionamento dos manipuladores nos interstícios das árvores, uma vez que permite uma extensão do seu alcance além dos limites da estrutura sólida dos mesmos. A área de secção de um jato de fluido pode ser controlada mecanicamente, o que pode conferir a este tipo de solução uma reduzida área de impacto, que por sua vez possibilita atingir frutos nas regiões mais interiores da árvore a partir de uma distância significativa (regulada pela pressão do fluido), sem danificar a árvore ou outros frutos. Contudo, para que isso seja possível é sempre necessário existir uma trajetória sem obstáculos entre o bocal emissor do jato e o fruto a remover, o que seria facilmente conseguido através de um manipulador robótico comum, mas que provavelmente resultaria num tempo de ciclo de trabalho alargado, já que após a identificação e localização de

cada fruto, dado o número de possíveis trajetórias, com diferentes distâncias ao fruto, e a variabilidade da geometria das árvores, a escolha da trajetória e posicionamento a adotar resultaria num problema computacional complexo. Além disso, este tipo de sistema faz uso de um consumível, no caso de utilizar água, e tenderia a apresentar um elevado consumo energético, devido a requerer o uso de uma bomba ou compressor de potência considerável, dependendo efetivamente do alcance com que se pretendesse projetar sistema, o que o lhe associa um alto custo de operação. Este conceito foi já testado para a colheita de citrinos [98], mas de forma não seletiva, sendo implementado com ventiladores axiais de grandes dimensões, acabando por resultar num efeito semelhante exercido pelos agitadores de ramos e troncos.

3.5.3. Vibração

Dizema & Rosa [6] demonstraram que para alguns ramos de pessegueiro, de geometria simples, existe uma correlação significativa, entre o integral dos espectros das vibrações dos ramos nas proximidades da frequência de excitação induzida por um agitador, e a massa de frutos removida. Caso seja encontrado um método válido para todo o tipo de geometria de ramos, a remoção de frutos por vibração de ramos pode-se tornar de facto num método de monda seletiva. Apesar não conseguir controlar a distribuição espacial dos frutos, conseguiria controlar a carga final. Do ponto de vista da atuação, este método seria ótimo para soluções autónomas baseadas em manipuladores robóticos, já que os ramos podem ser agitados a partir da parte mais externa da árvore, evitando assim os problemas mencionados com a mobilidade dos manipuladores nos interstícios das árvores. Este efeito poderia ser conseguido com um manipulador que em vez de possuir uma garra comum possuiria um motor linear com uma ponteira em “U”, tal como aquela demonstrada na Figura 2.1. Contudo, para que este método permita seletividade, requer o posicionamento de acelerómetros ao longo dos ramos. No estudo de Dizema & Rosa [6] foram utilizados dois acelerómetros, demonstrando que permitiam uma melhor correlação com a carga de frutos removida do que utilizando apenas um sensor. Seria então necessário desenvolver um mecanismo para a colocação destes sensores de forma rápida e autónoma, podendo ser este o principal entrave à sua aplicabilidade, uma vez desenvolvidos e validados os modelos numéricos de previsão da carga.

3.6. Estrutura radial com múltiplos sensores e atuadores

Grande parte do ciclo de trabalho das soluções completamente automatizadas descritas anteriormente, é dedicado à identificação dos frutos e frequentemente, esta etapa é subdividida em duas partes. Na primeira parte, são identificados tantos frutos quanto possível a partir de imagens recolhidas a partir de uma distância considerável da árvore. Posteriormente é executado

um algoritmo de decisão que aloca um fruto alvo. Numa segunda fase, a ferramenta é deslocada até às proximidades do fruto alvo, utilizando câmaras, sensores de tempo de voo, ou uma fusão dos dois, numa perspetiva *eyes-in-hand*, ou seja, com sensores montados junto ao atuador, para que proceda a um deslocamento mais preciso até ao posicionamento final para atuação sobre o fruto alvo, evitando obstáculos. Esta abordagem facilita transformação de coordenadas entre a imagem, o robô e atuadores, permitindo adotar uma classe de técnicas de controlo de movimento de manipuladores, chamada de *Image Based Visual Servoing*, em que a trajetória é ajustada continuamente através de uma malha fechada que recebe *feedback* por parte dos sensores [37]. Seguir a mesma estratégia para hipotéticos sistemas autónomos de monda de frutos, demonstraria dificuldades acrescidas, já que durante a época ótima para a realização do processo, as árvores de fruto tendem a apresentar uma alta densidade de folhagem, além dos frutos possuírem pequenas dimensões e uma pigmentação predominantemente verde. Assim, seria extremamente difícil obter uma percentagem razoável de deteção através de visão computacional baseada exclusivamente no espectro visível, recolhidas a partir de um ponto de vista exterior à árvore. No entanto, ao contrário da colheita de frutos que se realiza à medida que estes atingem um ponto ótimo de maturação, com múltiplas intervenções, a adoção da estratégia descrita anteriormente justifica-se por permitir que o manipulador transporte a ferramenta apenas para onde esta for estritamente necessária em cada intervenção. Já as operações de monda de frutos são realizadas numa única intervenção e são raros os ramos sob os quais não é necessário atuar. Estes factos permitem explorar uma estratégia mais simples e célere. A estratégia que aqui se propõe é também constituída por duas fases. Numa primeira fase são também recolhidas imagens no espectro visível a partir de um ponto de vista exterior à árvore, mas ao invés de se proceder ao reconhecimento de frutos, procede-se ao reconhecimento dos ramos das árvores, localizando em particular as suas extremidades. Uma vez identificados os ramos, a ferramenta do manipulador é deslocada até à extremidade de qualquer um dos ramos localizados. Na segunda fase, adota-se também uma perspetiva *eye-in-hand*. A ferramenta e um ou mais sensores são deslocados ao longo do ramo selecionado na fase anterior, em direção ao tronco, e através da deteção, da avaliação dos frutos e outros parâmetros de otimização, é tomada a decisão se cada fruto deve ser removido ou permanecer na árvore. Caso um fruto deva ser removido, é desencadeado um comando de atuação da ferramenta, para que proceda à remoção do fruto, evitando infligir danos à árvore e a outros frutos, além daquele que se pretende remover num dado instante. Para que este tipo de atuação seja conseguido, qualquer uma das topologias de atuação descritas em 3.4.1. é adequada. No entanto, dependendo da posição do fruto a remover, seria necessário proceder constantemente a ajustes da posição do manipulador para que a ferramenta possuísse suficiente espaço sem obstáculos e uma orientação propícia à execução da operação pretendida. Esta condição destaca de novo a difícil mobilidade de um manipulador robótico nos interstícios de uma árvore de fruto. Uma possível solução para minimizar ou eliminar a necessidade de ajustes do manipulador ao longo de um ramo, seria a

ferramenta possuir mais do que um atuador com controlo independente. Dado que os frutos podem surgir em toda a periferia dos ramos, a disposição radial desses múltiplos atuadores, e sensores, surge de forma autoevidente. Dependendo da geometria da estrutura de alojamento, e dos sensores e atuadores adotados, tal solução pode no entanto apresentar-se como um constrangimento adicional à mobilidade de um manipulador. Contudo, esta topologia abre também a possibilidade de realização de um sistema semi-automatizado. Bac *et al.* [100] sugeriu para o desenvolvimento futuro de dispositivos autónomos de colheita de frutos, que dado o baixo grau de sucesso até à data, a colaboração humano-robô pode levar à melhoria significativa do desempenho destes sistemas. Isto permite juntar às capacidades perceptivas das pessoas, à precisão e consistência dos robôs, o que além da potencial melhoria de desempenho, pode também significar uma simplificação dos dispositivos. No caso de um dispositivo de monda baseado na topologia anteriormente descrita, um operador humano, para o qual a identificação e localização dos ramos, assim como o posicionamento, deslocamento e correções na orientação da ferramenta de forma a permitir uma rápida cobertura de um ramo através de um movimento de varrimento, se apresentam como tarefas triviais, pode substituir o papel do manipulador, mantendo no entanto a ferramenta. Caso tal sistema permita satisfazer os requisitos estabelecidos no início deste capítulo, apresentar-se-ia como uma solução vantajosa face ao método manual, capaz de exercer seletividade, de construção mais simples e de mais baixo custo que as possíveis soluções completamente automatizadas.

3.7. Constituição geral e modo de operação do conceito adotado

Atendendo às considerações e observações enunciadas nas secções e capítulos anteriores, podem-se retirar as seguintes conclusões:

- A mobilidade dos manipuladores robóticos nos interstícios das árvores é limitada e resulta numa alta tendência para danificar ramos e frutos.
- A principal dificuldade de implementação com sucesso de técnicas de visão computacional para a deteção e avaliação de frutos nas árvores, é a oclusão dos frutos por parte dos ramos e folhas. Este problema é particularmente acentuado durante a época de monda, em que os frutos apresentam pequenas dimensões e pigmentação verde e não existe na literatura nenhuma alternativa que surja como uma solução óbvia para este problema. Há necessidade de se desenvolverem sensores não tradicionais, especificamente para estas funções, apresentando a capacidade de diferenciarem entre frutos e folhas. As técnicas de imagem hiperespectral e espectroscopia baseadas em ondas eletromagnéticas ou ultrassónicas, são as que mais se aproximam do efeito pretendido.

Os algoritmos de aprendizagem de máquina, em particular de aprendizagem supervisionada podem fornecer soluções na ausência de formalismos úteis.

- A solução para a remoção dos frutos que apresenta uma maior exequibilidade, com precisão e mais fácil coordenação com um sistema de sensorização radial, para atuar sobre frutos individuais, evitando danificar a árvore ou frutos em posição colateral, é a utilização de atuadores lineares com uma linha de ação perpendicular ou oblíqua ao segmento do ramo sobre o qual se pretende atuar e uma área de impacto reduzida, exercendo uma força de impacto sobre o fruto alvo.
- A utilização de múltiplos sensores e atuadores dispostos numa estrutura radial, que abraça total ou parcialmente os ramos das árvores de fruto, apresenta potencial para a realização de um equipamento semi-automatizado, resolvendo grande parte dos problemas associados aos manipuladores robóticos, enquanto capaz de demonstrar uma vantagem económica face ao método puramente manual.

Assim estabeleceu-se que o dispositivo a desenvolver deve remover os frutos através de um simples e rápido movimento de varrimento executado pelo operador, ao longo de cada ramo, não requerendo que o operador se preocupe com um posicionamento preciso para cada fruto, ou conjunto de frutos. O dispositivo é fundamentalmente composto por uma estrutura toroidal, que abraça os ramos, com uma pequena abertura para permitir o seu posicionamento, conforme exposto na Figura 3.2.

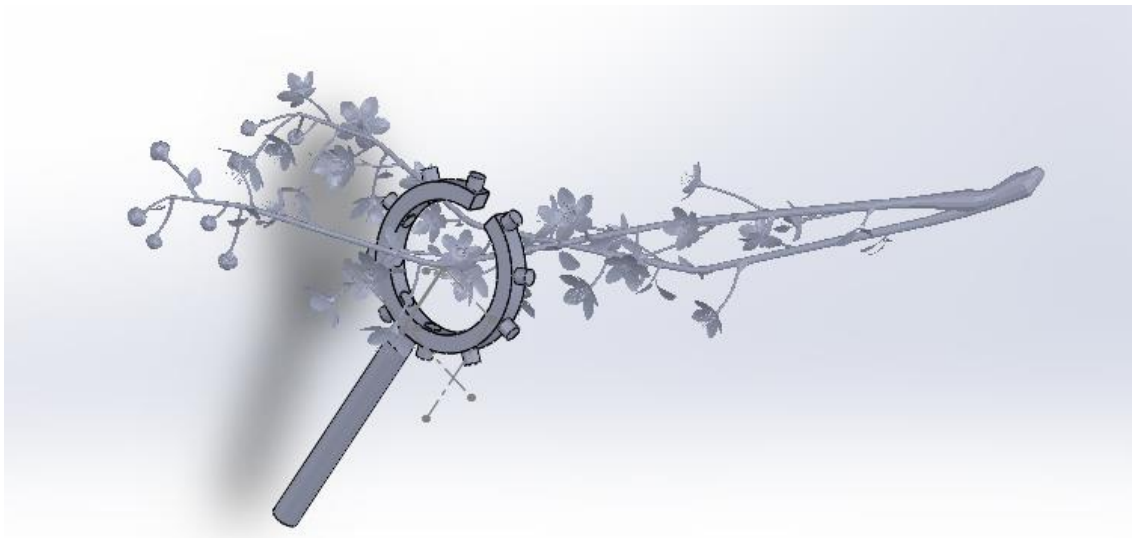


Figura 3.2 - Desenho preliminar ilustrativo da estrutura com sensores, atuação por definir.

Nesta estrutura encontram-se posicionados um conjunto de atuadores lineares com uma reduzida área de impacto e um conjunto de sensores, ambos dispostos radialmente. Durante cada varrimento, os sensores realizam continuamente a deteção e avaliação dos frutos. A posição dos frutos pode ser determinada pelo cruzamento das deteções dos vários sensores. Um algoritmo de decisão implementado numa unidade de processamento, com parâmetros reguláveis, processa os dados recebidos pelos sensores e dita se cada fruto deve ser removido ou não. Quando um fruto é assinalado para remoção, é gerada uma ordem de disparo do atuador linear mais indicado. Uma vez conseguida uma deteção em pleno dos frutos, ou sendo apurada uma percentagem de deteção com baixa variabilidade, e se demonstre possível proceder à remoção de todos eles sem afetar frutos em posição colateral, então pode-se afirmar que a seletividade do processo é razoavelmente regulável. Os processos de sensorização e de atuação ocorrem de forma sequencial e mutuamente exclusiva, por uma questão de simplicidade de construção, no entanto, em desenvolvimentos futuros será benéfico tornar o seu processamento em algo paralelo, recorrendo a unidades de processamento independentes. Dados os desafios que se opõem à obtenção dos dados pretendidos através dos sensores, seja qual for a sua topologia, foi também considerada uma versão do dispositivo com controlo em malha aberta, limitando-se a reproduzir sequências de acionamentos dos atuadores, podendo ser reguladas heurísticamente de forma a otimizar os resultados em termos estatísticos. O fluxograma da Figura 3.3 ilustra a estrutura lógica das principais fases de operação do dispositivo. Na Figura 3.3 pode-se observar um desenho preliminar que ilustra a estrutura e atuação do conceito adotado. Construíram-se modelos da estrutura toroidal com vários diâmetros internos e espessuras, de forma a apurar as dimensões que permitiam correr os ramos principais sem que as ramificações secundárias dificultassem significativamente a execução do movimento por parte do operador. Através de construções gráficas, verificou-se que seis atuadores lineares aparentam ser suficientes para atingir frutos em toda a periferia dos ramos, mesmo quando em posição colateral, sem danificar outros frutos que não o fruto alvo. O número de sensores surge por consequência da geometria definida após integração dos atuadores em desenhos de detalhe e realizada a escolha da tecnologia a implementar, procurando-se ter o maior número possível, de forma a maximizar a precisão e grau de deteção dos frutos.

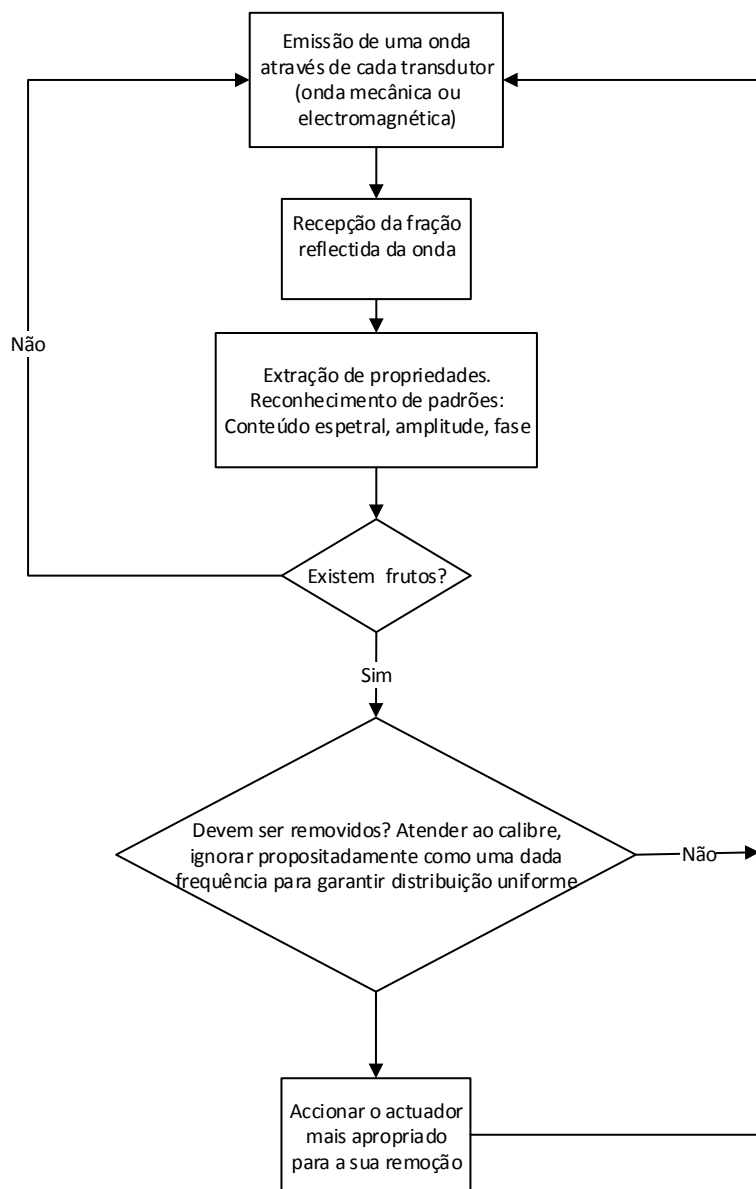


Figura 3.3 - Fluxograma das fases de operação do dispositivo.

4. Sistema de Sensorização de Frutos

4.1. Introdução

Através da análise do estado da arte das tecnologias e técnicas de sensorização de frutos e vegetais, concluiu-se que não se encontra presente na literatura uma qualquer solução que permita proceder à deteção e avaliação de frutos nas árvores, com uma rapidez e grau de sucesso suficientemente razoáveis para a sua integração na conceção de um dispositivo de monda seletiva de frutos. Além disso, a monda de frutos apresenta desafios adicionais, no que diz respeito à sensorização, face à operação de colheita. Durante a época em que se realiza a monda dos frutos, os frutos apresentam uma pigmentação predominantemente verde e dimensões reduzidas, pelo que caso se atenda apenas ao espectro de luz visível, a sua diferenciação face à folhagem é reduzida. Verifica-se que as tecnologias e técnicas de espectroscopia, sejam elas baseadas em ondas mecânicas ou eletromagnéticas, apresentam a capacidade para a avaliar propriedades internas e externas de produtos hortofrutícolas através da correlação dessas propriedades com o respetivo espectro de reflexão ou absorção, o que por sua vez poderá permitir detetar e diferenciar os objetos presentes em árvores de frutos. Além disso, a espectroscopia de reflexão permite também recolher informação espacial através da medição do tempo de voo das ondas, o que poderá possibilitar a localização e avaliação geométrica dos frutos. Note-se que mesmo que apenas se mostre possível proceder à deteção e não à inferência de métricas geométricas, a posição dos frutos pode ser estimada através do cruzamento das deteções assinaladas por múltiplos sensores. Assim, decidiu-se investigar a possibilidade de implementação de transdutores ultrassónicos ou de pares emissor-recetor NIR, como meio de deteção e diferenciação entre frutos, folhas e ramos. Uma vez selecionado o tipo de sensor, é necessário conceber um circuito que permita articular as fases de operação, de emissão e receção, assim como condicionar os sinais recebidos para posterior digitalização. A informação disponível relativa às propriedades de absorção, reflexão, transmissão e atenuação das folhas e frutos, seja do espectro acústico como eletromagnético é muito limitada. Assim, torna-se necessária a execução de um trabalho de investigação experimental, com o objetivo de identificar características na sua resposta em frequência que os permita diferenciar, e detetar, na presença de obstáculos, sem que para isso seja necessário produzir uma onda ou feixe de

uma potência de tal ordem que seja incomportável para o tipo de sistema que se pretende conceber. Não sendo encontrada uma solução de sensorização válida, o sistema perde a capacidade de exercer seletividade de forma determinística. No entanto, a configuração de atuação conceptualizada não perderia todo o seu interesse. O simples facto de que ao longo de sucessivas atuações, as linhas de trajetória dos elementos responsáveis pela remoção dos frutos apresentem uma menor variância face aos ramos, quando comparadas com as dos sistemas baseados em elementos flexíveis dispostos ao longo de um veio rotativo, implica à partida uma maior repetibilidade de resultados. Testando-se diferentes sequências de acionamento dos diferentes atuadores, poder-se-ia proceder a um processo de otimização iterativo.

4.2. Seleção de métodos de sensorização

Existem diversas dificuldades que se opõem à conceção e implementação de técnicas de espectroscopia como método de reconhecimento e avaliação de objetos de uma árvore de frutos em tempo real: O desconhecimento da localização no espectro de características diferenciadoras; A rápida atenuação das ondas, acentuada pela existência de obstáculos, e uma baixa sensibilidade de receção dos sensores, poderão levar a que, mesmo existindo características diferenciadoras na banda útil, o respetivo conteúdo espectral não possa ser identificado. Este problema poderia ser mitigado pela emissão de ondas com uma alta amplitude, contudo isso implicaria também o aumento do consumo energético; Além da atenuação, para que a perda de informação seja minimizada, a cadeia de aquisição deve apresentar um elevado SNR (*Signal to Noise Ratio*), evitando que o ruído possa também tornar impercetível o conteúdo espectral útil; O período do ciclo de sensorização deverá ser bastante reduzido para permitir a operação do dispositivo com uma velocidade suficiente, para que demonstre uma vantagem face ao método manual. A duração do ciclo de sensorização depende do número de sensores, do *hardware* de interface, da quantidade de informação que é necessária recolher para que se possa proceder à deteção e avaliação dos objetos, e da conseqüente complexidade do *software* que procede ao processamento dessa informação. Adicionalmente, a geometria e custos dos sensores são fatores de relevância no condicionamento da escolha das soluções a investigar. Neste subcapítulo, procede-se à apresentação das propriedades fundamentais de cada tipo de onda e a uma análise comparativa, tendo como suporte literatura que fornece pistas sobre regiões do espectro com interesse para a diferenciação entre folhas e frutos. Com base nessa análise é decidido o tipo de sensor a adotar para o prosseguimento do processo de investigação.

4.2.1. Ultrassom

4.2.1.1. Propagação, impedância acústica e atenuação

Uma onda acústica corresponde à propagação de uma perturbação mecânica através de um dado meio, seja este sólido, líquido ou gasoso. O termo ultrassom refere-se ao espectro das ondas acústicas com frequências superiores àquelas que o ouvido do ser humano é capaz de perceber, sendo 20 kHz a frequência normalmente considerada como esse limiar.

A velocidade de uma onda ultrassônica num meio sólido com um módulo volumétrico K , um módulo de rigidez G e uma massa específica ρ é dada por [87]:

$$c_{us} = \sqrt{\frac{K + \frac{4G}{3}}{\rho}} \quad (1)$$

Uma vez que os fluidos não apresentam rigidez, em líquidos e meios gasosos a velocidade vem:

$$c_{uf} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2)$$

Assim, todos os mecanismos associados à propagação destas ondas dependem fortemente das propriedades mecânicas do meio, que por sua vez variam com o estado termodinâmico do mesmo. Para o caso particular do ar atmosférico a uma temperatura T (em graus Celsius), a velocidade de propagação de ondas acústicas pode ser estimada pela seguinte expressão [99]:

$$c_{ar} = 331,45 + 0,607 \times T \quad (3)$$

Para uma onda planar que se propaga num meio com um coeficiente de absorção diferente de zero, a amplitude da onda diminui à medida que esta se propaga. Para contabilizar este efeito, a onda pode ser descrita pela Equação 4, que contém um termo responsável pelo decaimento exponencial da amplitude ao longo do tempo [100]:

$$p(x,t) = Ae^{j(kx - \omega t)}e^{-\alpha x} \quad (4)$$

Sendo que α é o coeficiente de atenuação do meio. Após viajar uma distância de $x = 1/\alpha$, a amplitude da onda planar diminui até $1/e \approx 0,37$ da sua amplitude original. Esta

propriedade pode surgir com diferentes unidades, incluindo cm^{-1} ou Nepers/cm. Por vezes surge também como redução em decibel, sendo a conversão dada por:

$$\alpha_{dB} \approx 8,69\alpha_{Np} \quad (5)$$

Esta atenuação deve-se à absorção e dispersão por parte das moléculas que constituem o meio de propagação. Na Figura 4.1 pode-se observar a relação entre a frequência de uma onda acústica e a atenuação atmosférica a 20 °C, para vários valores de humidade relativa e atendendo à sua dependência com a pressão.

As razões entre amplitudes das diferentes frações da onda permitem definir os coeficientes de reflexão (R) e de transmissão (T), da seguinte forma [101]:

$$R'_{us} = \frac{A_r}{A_i} \quad (6)$$

$$T'_{us} = \frac{A_t}{A_i} \quad (7)$$

A impedância acústica característica específica define-se como o produto entre a massa volúmica de um meio e a velocidade de uma partícula numa onda planar que se propaga através do mesmo. A impedância acústica tem como unidade o $\text{Rayl} = \text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ e pode ser calculada como[102]:

$$z_{us} = \rho c \quad (8)$$

Pode-se demonstrar que ambos os coeficientes se relacionam com as impedâncias acústicas dos meios que constituem uma fronteira[102]:

$$R'_{us} = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (9)$$

$$T'_{us} = 2 \frac{\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} = \frac{2z_2}{z_2 + z_1} \quad (10)$$

Onde ρ corresponde às massas volúmicas, c às velocidades de propagação e Z às impedâncias acústicas, de cada meio. Assim, a transmissão é maximizada quando as impedâncias dos dois meios são semelhantes e a reflexão aumenta com a diferença de impedâncias acústicas.

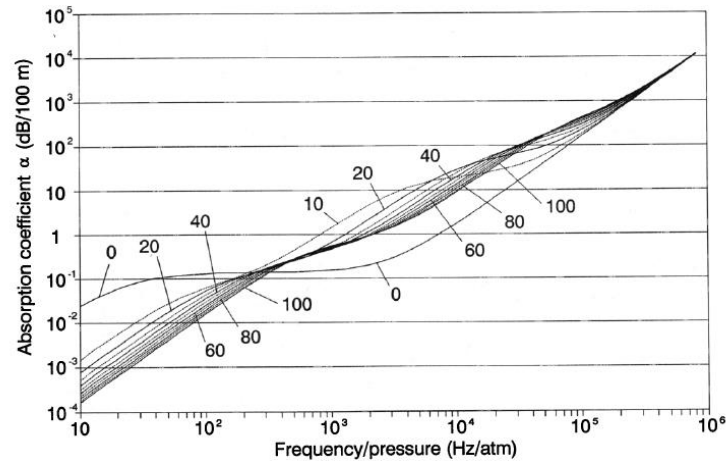


Figura 4.1-Coeficiente de absorção no ar versus a relação da frequência com a pressão atmosférica para várias percentagens de humidade relativa a 20°C [103].

Estas grandezas permitem compreender as consequências das propriedades mecânicas dos materiais sobre a propagação das ondas. Contudo, a queda de amplitude da pressão acústica detetável por um dado conjunto de transdutores depende também da geometria, do sistema, do meio envolvente e dos alvos a detetar. Alvos de dimensões relativamente reduzidas podem não intercepar o feixe de som na sua totalidade. Além disso, com geometrias mais irregulares, as ondas tendem a sofrer dispersão, não só devido à reflexão especular, obedecendo à lei da reflexão após difração, mas devendo-se também à reflexão difusa resultante da rugosidade das superfícies[102]. Assim, mesmo na presença de uma interface com um coeficiente de reflexão elevado, dependendo da sua geometria, a amplitude da frente de onda que se propaga de volta em direção à fonte, após reflexão, pode ser significativamente reduzida. No âmbito dos sistemas de sonar é comum definir-se uma propriedade chamada de *target strength*, TS , dada pela Equação 11, que expressa a razão entre a intensidade acústica incidente num alvo e a intensidade da fração da onda que é refletida em direção à fonte após propagação de um metro. Neste contexto recorre-se ao termo *backscattering*, ou retrodifusão, para se referir à fração da onda que retorna à fonte.

$$TS = 10 \log \left(\frac{I_{bs}}{I_i} \right) \quad (11)$$

Assim a intensidade do eco recebido por um sistema sonar é dada por [104]:

$$EL = SL - 2TL + TS = SL - 40 \log(d) - 2\alpha d + TS \quad (12)$$

Onde SL é a intensidade da onda emitida pela fonte, TL as perdas de transmissão, contabilizada duas vezes dado que se trata de uma emissão e reflexão, incluindo os efeitos da lei do inverso do quadrado e da atenuação do meio, TS é a *target strength* do alvo em questão, α o coeficiente de atenuação do meio de propagação e d a distância entre a fonte e o alvo. É possível calcular a *target strength* de formas geométricas simples. Para uma esfera, caso se verifique que o produto do número de onda com o raio (r) seja superior à unidade e à distância entre a fonte e objeto seja superior ao raio, a *target strength*, sendo independente do ângulo de incidência é dada por:

$$TS_{sp} = 10 \log \left(\frac{r^2}{4} \right) \quad (13)$$

4.2.1.2. Janelas de oportunidade ótimas

É necessário isolar uma frequência ou banda de operação que além de conter características diferenciadoras entre frutos e obstáculos, maximize a transmissão através da atmosfera e dos obstáculos, e simultaneamente a reflexão na superfície dos frutos, de forma a otimizar a captura de informação. A maior parte dos estudos relacionados com o comportamento acústico das folhas envolveu frequências da ordem dos MHz [105]. Contudo, foi estudado e validado um modelo de atenuação acústica em árvores, com base na Equação 14, que expressa que o coeficiente de atenuação é proporcional à frequência das ondas incidentes com uma constante k dependente do tipo de árvore, resultando numa aproximação razoável [106].

$$\alpha = k \cdot f^{1/2} \quad (14)$$

Um outro estudo descreve um modelo para a previsão do coeficiente de reflexão em amostras circulares de tecidos de folhas como indicado na Equação 15, demonstrando que a reflexão aumenta também com a frequência, assim como com a massa por unidade de área (σ) da amostra de folha [107].

$$R_{us}^i = 1 - \frac{k}{\sigma^2 f^2} \quad (15)$$

Por conseguinte a transmissão tende a diminuir com o aumento da frequência [108]. Shibayama *et al.* [114] realizaram experiências com impulsos ultrassónicos de 20Khz, 40 kHz e 60 kHz, e pressões sonoras entre 80 e 90 dB em campos de milho, sorgo, arroz e soja. Observaram que as ondas de menor frequência atingiam, com uma maior amplitude, as folhas localizadas nas zonas mais interiores da vegetação. Além disso, constataram que raramente se observaram reflexões provenientes de ramos, apesar do facto de constituírem uma parte significativa da massa da vegetação. Em [109] foi estudada a atenuação de ultrassons em 111 folhas de diferentes espécies, com espessuras entre 0,17 e 0,93 mm e larguras superiores a 4mm. Aplicando 200 V a um transdutor de banda larga (de 3,3 MHz), com as folhas suspensas entre dois transdutores, a atenuação foi estudada para frequências entre 1 e 2 MHz. Foi realizada uma análise de Fourier para a determinação das principais frequências e fases. Os sinais recebidos, correspondentes ao eco, apresentavam amplitudes entre -0,8 V e 0,8 V. Os resultados demonstraram que todas as espécies apresentam uma atenuação superior à da água e um menor conteúdo espectral de reflexão para frequências elevadas. Este facto sugere que as folhas agem como um filtro passa-baixo. Foi observado que o coeficiente de atenuação diminui de forma exponencial com o aumento da espessura das folhas. O comportamento acústico das folhas aproxima-se ao de um conjunto de polímeros de elevada viscoelasticidade. Os coeficientes observados, definidos como o logaritmo neperiano entre a amplitude da onda emitida e a amplitude da onda recebida variaram entre 0,29 e 1,29 Np, o que corresponde a 2,52 e 11,2 dB de atenuação. É no entanto de notar que as frequências utilizadas foram relativamente elevadas e os coeficientes observados neste estudo não têm em consideração a energia que se propagaria na direção do transdutor devido à difração, uma vez que as envolturas das folhas se encontravam isoladas.

Martens *et al.* [116] realizaram uma série de ensaios com o objetivo de aprofundar o conhecimento relativo aos mecanismos de absorção de energia acústica por parte das folhas de várias plantas, através da excitação com ondas sinusoidais puras e ruído branco, e da utilização de interferometria laser para a medição das velocidades de deslocamento das folhas sujeitas a esses estímulos. Foi observado que as folhas se comportam como placas com diferentes modos de vibração. Estes modos de vibração são extremamente complexos, variam com a orientação das folhas face à fonte acústica e ao longo da superfície de uma dada folha. Contudo, independentemente da frequência do estímulo, as folhas apresentam uma resposta linear em amplitude, ou seja, as amplitudes das componentes espectrais das vibrações mecânicas são proporcionais à amplitude do campo acústico, ainda que com

diferentes constantes de proporcionalidade ao longo do espectro. A resposta às diferentes frequências depende de fatores como as suas propriedades mecânicas internas ou o amortecimento introduzido pelas estruturas às quais se encontram ligadas. Quando estimuladas com ondas sinusoidais puras, verifica-se que as folhas não induzem transformações de frequências significativas, ou seja, a sua frequência de vibração corresponde à frequência de excitação. Apesar de se poderem observar estes fenómenos relativamente à vibração mecânica das folhas, responsável pela absorção de energia mecânica através da sua conversão em energia térmica, apenas uma pequena parte da energia total incidente é dirigida para este mecanismo, sendo isto evidenciado pelo facto da amplitude das vibrações ser reduzida face à amplitude dos estímulos. A energia restante é refletida e difratada em torno das folhas. Não só devido a este facto, mas também pelas diferentes fases das linhas nodais ao longo das superfícies das folhas se tenderem a anular, a transmissão através das folhas é extremamente reduzida, o que explica os valores de atenuação observados em [109].

Lee & Sho [94] demonstraram ser possível avaliar a firmeza de maçãs e pêssegos, através da sua correlação com a amplitude das reflexões das ondas. Recorreram a um único transdutor ultrassónico de frequência central de 500 kHz, sem contacto, colocado até 40 mm de distância do fruto a avaliar. A fração de energia que é refletida durante a incidência de uma onda ultrassónica na direção normal a uma superfície de um dado material, depende do coeficiente de restituição do mesmo. Quanto mais rígido o material, maior a amplitude da onda resultante da reflexão. Como as ondas ultrassónicas são significativamente atenuadas ao longo da sua propagação através do ar, se a distância entre um transdutor ultrassónico e a superfície refletora variar, então, para uma dada amplitude da onda emitida, a amplitude da onda refletida varia também. Devido a este facto, para que fosse possível criar modelos preditivos independentes do posicionamento relativo do transdutor, foram sugeridos fatores corretivos. Esses fatores foram constituídos com base na premissa de que apesar da amplitude da onda refletida ser dependente da distância entre o transdutor e a superfície refletora, a razão entre a amplitude das sucessivas reflexões, quando dividida pela razão entre os respetivos tempos de voo, mantém-se constante. Esta premissa foi verificada, tendo sido observados desvios pouco significativos, devendo-se a variações das propriedades do ar como temperatura e humidade. Além das amplitudes dos sinais no domínio do tempo, observaram que ambos os sinais continham duas componentes predominantes (ver Figura 4.2) no domínio da frequência. A razão entre amplitude destes picos, assim como a razão entre as densidades espectrais das duas primeiras reflexões, foram também consideradas como possíveis indicadores de firmeza.

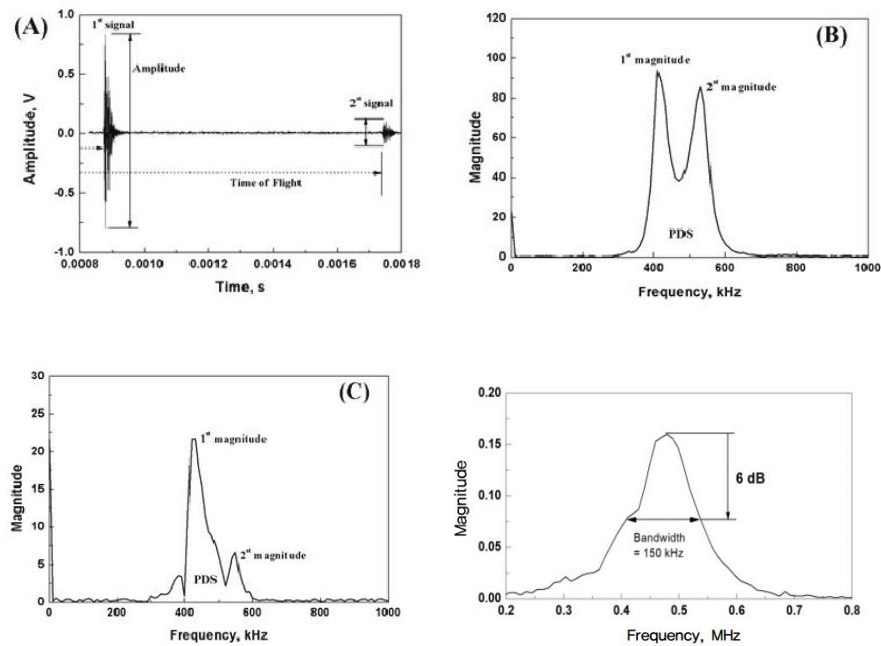


Figura 4.2 - Sinal recebido, FFT's da primeira e segunda reflexão e curva característica do transdutor. Estudo realizado em frutos com transdutor colocado até 40 mm de distância [110, 111] .

Em suma, verifica-se que ondas de menor frequência são atenuadas menos rapidamente, apresentam coeficientes de reflexão inferiores, e uma maior capacidade de transmissão através das folhas e difração em torno das mesmas, reduzindo a incidência de interferência destrutiva. A difração é um fenómeno com uma elevada complexidade, de difícil quantificação e descrição. No que diz respeito aos frutos, durante a fase de monda, estes possuem uma rigidez relativamente elevada e uma estrutura interna sólida, o que à partida lhes confere uma impedância acústica muito superior à do ar, resultando assim na reflexão da maior parte da energia das ondas incidentes. Assim, pode-se concluir que as hipóteses de se minimizar a potência requerida pelo equipamento e a perda de informação espectral útil, poderão ser otimizadas pela utilização de frequências tão baixas quanto possível, não desprezando o facto de que com o aumento do comprimento de onda se perde precisão espacial.

4.2.2. NIR

4.2.2.1. Propagação e atenuação

A velocidade de propagação de uma onda eletromagnética num dado meio depende das suas propriedades elétricas e magnéticas. Para um meio homogéneo, estas propriedades podem variar significativamente com a frequência dos campos aplicados, com a temperatura, humidade e outros parâmetros. Para um meio de permeabilidade μ e permitividade ε , a velocidade de fase é dada por [112]:

$$c_{em} = \frac{1}{\sqrt{\mu \varepsilon}} \quad (16)$$

A velocidade da luz no vácuo é uma constante de grande importância na física.

$$c_0 = \mathbf{299792458} \text{ m/s} \quad (17)$$

É comum relacionar-se a velocidade de fase de uma onda eletromagnética num qualquer meio com a velocidade da luz no vácuo, através de uma propriedade intitulada de índice de refração, definida como:

$$n = \frac{c_0}{c_{em}} \quad (18)$$

Quando uma onda eletromagnética se propaga através de um dado meio, a sua amplitude sofre uma atenuação proporcional à distância percorrida devido à absorção e dispersão por parte das moléculas desse meio. A amplitude ao longo do percurso percorrido pode ser calculada como:

$$A(x) = A(0)e^{-\gamma x} \quad (19)$$

Onde $A(0)$ é a potência da onda na fonte, $A(x)$ é a potência num ponto arbitrário e γ a constante de propagação. A constante de propagação toma valores complexos, relacionando-se não só com a mudança de amplitude da onda, mas também da sua fase. A parte real é chamada de coeficiente de atenuação, ou coeficiente de extinção e a parte imaginária a constante de fase.

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (20)$$

O coeficiente de atenuação α é medido em $\text{Np}\cdot\text{m}^{-1}$, mas frequentemente apresentado em $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$, sendo a relação entre as duas unidades dada pela Equação 5.

Para o estudo do caso mais simples de interface entre meios de propagação, i.e., a incidência de uma onda na direção normal a uma interface plana, é útil que se defina a impedância de uma onda num dado meio de propagação (η), que relaciona a intensidade dos campos elétrico e magnético. Esta propriedade também pode ser exprimida através do índice de refração:

$$\eta = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \frac{\eta_0}{n} \quad (21)$$

Recorrendo a estas propriedades, é possível definir um coeficiente de reflexão que indica a fração do campo elétrico original que corresponde à onda que é refletida:

$$R'_{em} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (22)$$

Tipicamente recorre-se a um ρ para expressar este coeficiente, no entanto para que não se confunda com a massa específica, mantém-se a mesma notação utilizada na subsecção anterior, relativamente aos ultrassons, distinguindo-se entre os dois casos através do índice inferior. A fração do campo correspondente à onda que é transmitida através do segundo meio da interface é dada por:

$$T'_{em} = \frac{E_t}{E_i} = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1} = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \quad (23)$$

Para meios homogêneos, o quadrado destas duas últimas grandezas, é chamado de refletância e transmitância, respetivamente, relacionando-se não com o campo elétrico, mas com o fluxo radiante.

Ao contrário do que acontece com os ultrassons, não existe uma relação óbvia entre a frequência de uma onda eletromagnética e a atenuação atmosférica (ver Figura 4.3), sendo errado assumir algum tipo de coeficiente de absorção médio para uma dada banda. Tanto as leis que regem a absorção atmosférica, como o consequente espetro de absorção, apresentam uma elevada complexidade e não linearidade. No entanto é de notar, que nos

infravermelhos, a atenuação não seletiva deve-se principalmente à absorção contínua por parte do vapor de água [113].

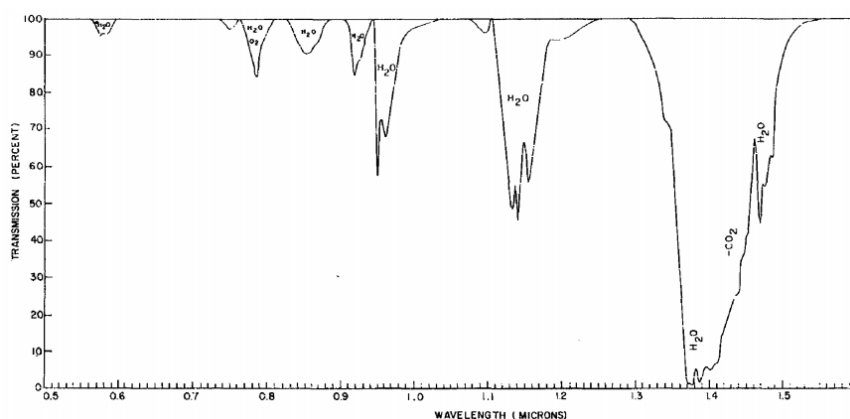


Figura 4.3 - Transmissão atmosférica ao longo de 300 m [113].

Observa-se que o ar atmosférico sem nevoeiro ou precipitação, é praticamente transparente a esta região do espectro eletromagnético. Para comprimentos de onda na região do NIR, entre 0,7 e 1,67 μm , o coeficiente de extinção ao nível do mar varia entre $9,81 \times 10^{-2}$ e $1,39 \times 10^{-1}$ por quilómetro (aprox. 0,85 a 1,21 dB/km), tendendo a diminuir com a altitude assim como com o comprimento de onda [114].

Em sistemas de sensorização baseados em radiação, é importante avaliar não só os efeitos da atenuação atmosférica e das perdas que ocorrem nas interfaces entre meios de propagação, mas também os efeitos que a geometria dos objetos que se pretendem detetar tem sobre a retrodifusão. Para aplicações de LIDAR, em que se recorre a laser para medição de distâncias e avaliação de propriedades físicas e químicas, desprezando a fase e o efeito de Doppler, e considerando um sistema mono-estático, pode-se recorrer à seguinte expressão[115]:

$$P_r = \eta_{sist} I_{sc} \sigma \frac{A_r}{4\pi d^4} T_{atm}^2 \quad (24)$$

Onde η_{sist} é o rendimento do sistema de sensorização (emissor e recetor), I_x a intensidade radiante na fonte do feixe, T_{atm} a transmissão atmosférica em cada sentido, A_r a área de secção do elemento recetor, d a distância entre o sensor e o alvo e σ a chamada área de

secção de radar do alvo. A área de secção do alvo consiste no integral de funções que representam a distribuição espacial e temporal do feixe projetado na superfície do alvo. Considerando um período de tempo fixo, passando a operar-se com energia em vez potência, pode-se escrever que a área de secção é dada por:

$$\sigma = 4\pi B A_{alvo} \cos(\theta) \quad (25)$$

Em que B é o valor da função de distribuição de dispersão. Esta função expressa a fração entre a radiância e a irradiância por unidade de área, com os ângulos entre os raios de incidência e reflexão, e a normal à superfície em cada ponto elementar da superfície do alvo, sendo a sua unidade sr^{-1} . Cada um dos raios, de incidência e reflexão, é caracterizado por um ângulo de azimute e um ângulo de zénite, pelo que a função compreende quatro parâmetros. A função de distribuição é então multiplicada por, $A_{alvo} \cos(\theta)$, a área projetada do alvo na direção do feixe incidente, de forma a se obter um valor absoluto.

Quando $2\pi r > 10\lambda$, sendo esse o caso aproximando os frutos a esferas e atendendo à região NIR, considera-se tratar de um caso de dispersão ótica e a área de secção corresponde à secção projetada do alvo, sendo independente da frequência e do ângulo de incidência [116]:

$$\sigma_{sp} = \pi r^2 \quad (26)$$

4.2.2.2. Janelas de oportunidade ótimas

A maior parte dos estudos realizados relativamente à extração de propriedades internas em frutos e vegetais envolveram ondas do espectro visível e infravermelho. No que diz respeito à atenuação nas folhas, as bandas de maior relevância em torno do infravermelho são: o pico de refletância do verde (550 nm); a banda de absorção da clorofila (650 nm); o pico da refletância de infravermelho (850 nm); as bandas de absorção da água (1450 e 1950 nm) e os picos de refletância que seguem as bandas de absorção da água (1650 e 2200 nm). Observou-se que para várias espécies, incluindo o pessegueiro, a soma dos coeficientes de absorção e dispersão das folhas, ou seja, o seu coeficiente de atenuação, é mínimo para um comprimento de onda de 850 nm e máximo para 650 nm [117]. Verificou-se também que para um grande número de espécies, a absorvância diminui acentuadamente com o aumento do comprimento de onda a partir dos 700 nm, sendo que a refletância e a transmitância aumentam até estabilizarem em valores de aproximadamente 50% cada e mantendo-se aproximadamente constantes até aos 1400 nm [118, 119]. Este perfil espectral verifica-se também nas folhas de pessegueiro (ver Figura 4.4).

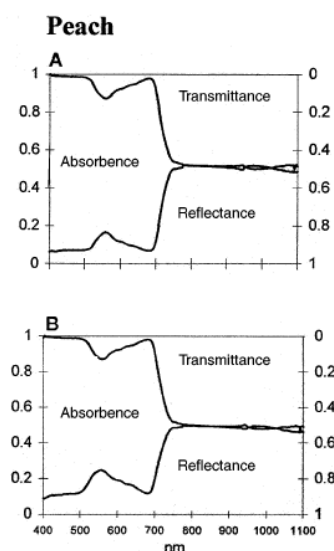


Figura 4.4 - Absorvância, transmitância e refletância de folhas de pessegueiro [120].

Vários frutos, incluindo os pêsegos, apresentam uma refletância inferior a 10% no espectro visível, no entanto, observa-se uma queda da absorvância e conseqüente aumento da refletância entre os 700 e 900 nm. Nesta região, a refletância é geralmente superior a 50%, atingindo valores acima de 80%. Esta região é precedida pelo pico de absorção da clorofila (650 nm) e seguida do pico de absorção da água (950 nm) [59, 91, 121-124]. A refletância varia de forma pouco significativa com o processo de maturação dos frutos [123]. Assim, conclui-se que para que se otimize a transmissão de uma onda eletromagnética através das folhas que se apresentam como um obstáculo, assim como a sua reflexão ao atingir os frutos, dever-se-á optar por comprimentos de onda entre 700 e 900 nm.

4.2.3. Análise comparativa e seleção

Entre as soluções observadas, é necessário selecionar aquela que minimize a atenuação ao longo da propagação da respetiva onda ou feixe, traduzindo-se num melhor SNR. Além disso, é necessário atender aos fatores relativos à integração do elemento sensor no projeto do dispositivo, geometria e custo. Os critérios de decisão tidos em consideração e os respetivos parâmetros de cada solução encontram-se resumidos na Tabela 1, sendo que os valores aí representados foram calculados recorrendo às equações e gráficos apresentados em 4.2.1.1 e 4.2.2.1.

Tabela 1 - Síntese dos critérios de seleção da tecnologia de sensorização a investigar.

| Critério | Ultrassom | NIR |
|---|--|--|
| Baixa atenuação atmosférica | Para 40 kHz (valor típico de transdutores de baixo custo) a 20°C, 80% de humidade relativa, atenuação de cerca de 1 dB/m. Aumenta exponencialmente com a frequência. | Atenuação não seletiva de 0,085 a 0,121 dB/m, nos extremos do NIR, ao nível do mar. Tende a diminuir com a altitude. Contudo, dependendo do comprimento de onda selecionado, a atenuação seletiva pode levar à extinção total da transmissão (ver Figura 4.3). |
| Elevada transmissão através das folhas | Atenuação entre 2,52 e 11,2 dB por folha. A ocorrência de difração pode diminuir esta atenuação. | Atenuação de aproximadamente 6 dB. |
| Elevado coeficiente de reflexão no interface ar-fruto | Coeficiente de reflexão de aproximadamente 100%. | Refletância de 50 a 80%, ou seja, atenuação de 6 a 14 dB. |
| Elevada direccionalidade | Transdutor pode atuar como transceiver. O padrão dos transdutores inclui por norma um feixe principal e dois lóbulos laterais. A posição angular onde a sensibilidade relativa de um recetor ou a pressão de um transmissor é reduzida a metade (-3dB) pode ser estimada por $\sin^{-1}(0,51\lambda/D)$. -3dB entre 7 a 50°, para transdutores de 40 a 175 kHz de frequência central. [125, 126]. | Normalmente implementados com um LED emissor e fotodíodo ou fototransístor recetor (configuração bi-estática). Usar LED como fotodíodo é uma prática pouco comum. Emissores apresentam cerca de 10° de dispersão a -3dB, segundo o eixo paralelo à junção, 25° segundo o eixo perpendicular. [127, 128]. |
| Elevada banda | 1 a 10 kHz, para transdutores de 40 a 175 kHz de frequência central. | Cerca de 5 nm [127, 128]. |
| Baixo Custo | >4€ por transdutor [129]. | >25€ por díodo laser e fotodíodo ou fototransístor [129]. |

A propagação de uma onda mecânica apresenta uma maior previsibilidade comparativamente à das ondas eletromagnéticas. Enquanto a atenuação atmosférica do ultrassom varia de forma aproximadamente exponencial com a frequência e a reflexão com a rigidez da interface, no NIR existem janelas do espectro de elevada transmissão, e zonas opacas dependentes da composição dos meios de propagação. Devido aos elementos construtivos em que assentam a construção dos díodos laser NIR, é possível obter um feixe de baixo diâmetro e com menos dispersão, com uma geometria geralmente mais compacta do que a de um transdutor ultrassónico. Contudo, os sistemas baseados em NIR são

normalmente implementados recorrendo a um elemento emissor e a um elemento recetor (configuração bi-estática), o que poderá implicar um maior volume. O uso de um LED NIR como fotodíodo, possibilitaria a concretização de uma configuração mono-estática, sendo no entanto uma prática pouco recorrente. Dentro de cada tipo de soluções é benéfico optar pelas alternativas com maiores larguras de banda, já que permitem capturar uma maior quantidade de informação de possível utilidade. No entanto, dado que não se conhecem as bandas de interesse para cada tipo de onda, é difícil avaliar qual a solução mais apropriada em relação a este aspeto. Apesar das ondas no espetro do NIR apresentarem potencialmente uma maior transmissão através das folhas, face ao ultrassom, sofrem uma atenuação muito superior aquando da reflexão no interface ar-fruto. Adicionalmente, devido aos respetivos comprimentos de ondas, as ondas ultrassom apresentam uma capacidade para difratar em torno de obstáculos muito superior à das ondas na região do NIR. Os transdutores ultrassónicos, mesmo que se considerando uma configuração bi-estática, apresentam um custo inferior aos pares emissor-recetor NIR. Assim, decidiu-se seguir a investigação com transdutores ultrassónicos de baixa frequência de forma a facilitar a sua transmissão através dos obstáculos, mas não tão baixa que se sacrifique precisão, ou um coeficiente de reflexão razoável. Adquiriram-se transdutores com elevada disponibilidade comercial, de banda estreita, com frequências centrais de 40, 58 e 175 kHz, aos quais correspondem comprimentos de onda e conseqüentemente precisões espaciais de aproximadamente 8,6, 5,9 e 2 mm, respetivamente.

4.3. Topologia e dimensionamento do sistema de sensorização por ultrassons

4.3.1. Introdução

Neste subcapítulo procede-se à descrição do desenvolvimento do *hardware* necessário para conduzir os transdutores ultrassónicos e receber os sinais das ondas refletidas. A topologia funcional do sistema de sensorização encontra-se ilustrada na Figura 4.5, na forma de um esquema de blocos funcionais. O microcontrolador é o elemento central do sistema, sendo responsável pela emissão de um sinal PWM (*Pulse-Width Modulation*) para conduzir os transdutores, receber e processar o sinal das ondas refletidas, assim como controlar a multiplexagem que liga os vários transdutores aos canais dos diferentes blocos funcionais: o canal de transmissão (TX), por onde é enviado o PWM após ser amplificado, para excitar os transdutores; o canal de amortecimento, responsável por reduzir o tempo de *ringing* dos

transdutores; e o canal de receção (RX), por onde o sinal das ondas refletidas é digitalizado após o condicionamento do mesmo.

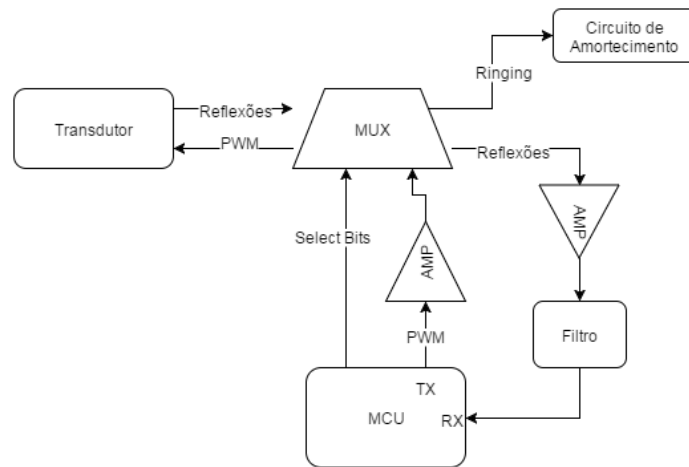


Figura 4.5 - Topologia geral do sistema de sensorização

4.3.2. Multiplexagem

Dada a necessidade de se conduzir e realizar a aquisição do sinal de vários transdutores, e para que não se tenha de replicar cada bloco funcional para cada transdutor, faz-se uso de multiplexagem. Neste caso é necessário recorrer a *multiplexers* analógicos, que permitam a comutação com controlo digital, não só de sinais, mas de corrente elétrica, sendo isto particularmente importante para o bloco de amortecimento dos transdutores. Este bloco requer também que o canal através do qual é comutado entre transdutores apresente uma resistência extremamente reduzida, caso contrário dificultaria a redução do *ring* (oscilações). As especificações mais importantes para a escolha do *multiplexer* a implementar são a resistência entre os terminais de entrada e saída e a duração do período de comutação. Para que se fizesse uso de apenas um circuito integrado para este efeito, dado que se pretende usar cinco transdutores e comutar entre três blocos funcionais diferentes, a configuração mais comum que melhor satisfaria as necessidades de comutação seria um *multiplexer* 8:3. Através de uma pesquisa do mercado, observou-se que geralmente os chamados *switches* analógicos apresentam uma resistência entre canais inferior à dos *multiplexers* analógicos, contudo apresentam configurações de entradas e saídas menos práticas para esta situação. Decidiu-se recorrer a dois MAX4662, em que cada um contém quatro interruptores simples (SPST) normalmente abertos, sendo cada interruptor controlado através de um bit. Quando o terminal de controlo de cada interruptor (IN) recebe um sinal de nível alto, é estabelecida a ligação entre os dois terminais do interruptor (NO e

COM). Quando o sinal de controlo se encontra a nível baixo, não existe ligação, ambos os terminais são colocados em alta impedância. Entre cada terminal NO e COM, quando o respetivo canal se encontra ativo, este *chip* apresenta uma resistência máxima de 2,5 Ω e os períodos de comutação duram um máximo de 400 ns, o que os torna apropriados para esta aplicação. Para que se permita a ligação de todos os transdutores a todos os blocos funcionais, estabeleceu-se um *bus* que liga os terminais COM de ambos os circuitos integrados. Na Figura 4.6 encontra-se ilustrada o esquema de multiplexagem com dois SPST.

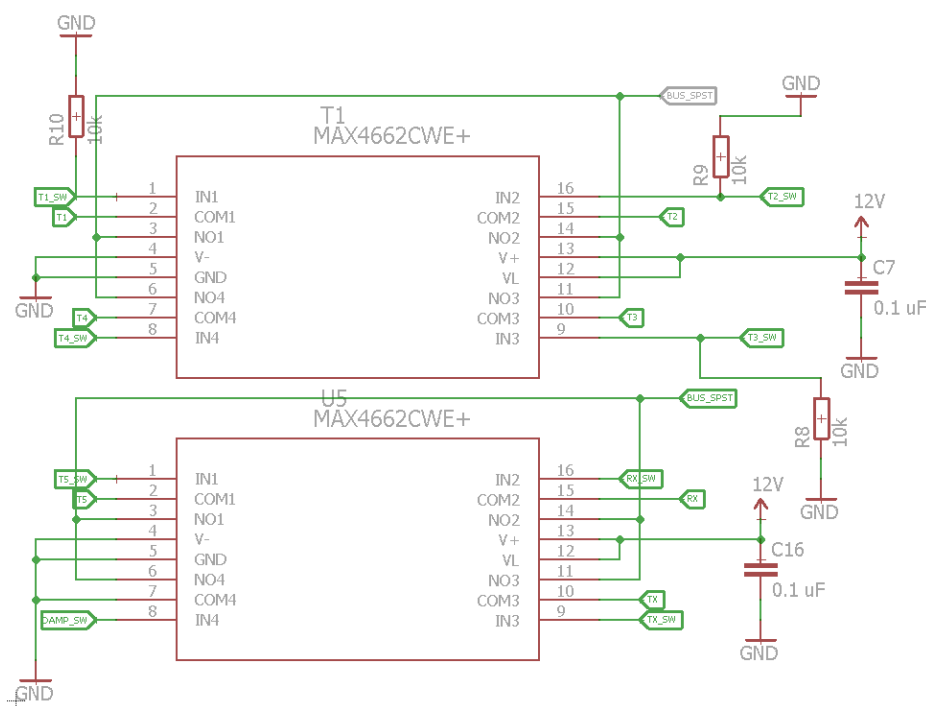


Figura 4.6 - Esquema de multiplexagem com dois SPST.

4.3.3. Amortecimento dos transdutores

Após de cada transdutor ultrassónico ser conduzido para a emissão de uma onda, através da aplicação de uma tensão variável aos seus terminais, na forma de uma série de impulsos ou de uma onda sinusoidal de uma dada duração, o diafragma deste tende a continuar a oscilar devido ao facto de apresentar inércia e ter sido colocado em ressonância mecânica durante a condução. Por sua vez, estas oscilações induzem uma tensão nos terminais do transdutor, cujo sinal pode ser erradamente entendido como sendo o de uma onda recebida. Este fenómeno, frequentemente chamado de *ringing* [87] reduz efetivamente a distância mínima mensurável, uma vez que a medição de distâncias recorrendo ao uso dos ultrassons têm por base a seguinte equação:

$$d = \frac{t_{rd} \times c_{us}}{2} \quad (27)$$

Onde t_{rd} é o período de tempo decorrido entre a emissão do sinal de excitação do transdutor e a receção de onda refletidas, frequentemente chamado de tempo de voo, e c_{us} a velocidade do som para o meio em questão. Dada a geometria da estrutura definida para o dispositivo de monda e a geometria das árvores de fruto, com os transdutores dispostos na face interior da estrutura, verifica-se ser necessário proceder à avaliação de frutos a um mínimo de 3 cm de distância, considerando-se 2 cm, para que se tenha alguma margem de segurança. Pretende-se operar os transdutores numa configuração mono-estática, ou seja, cada transdutor age como emissor e recetor. Considerando a velocidade do som de 343 m/s, atendendo à Equação 27, podem-se definir como especificações de projeto esta distância mínima, com um fator de segurança, e o conseqüente *ring-down* máximo:

$$d_{\min} = 2 \text{ cm} \Rightarrow t_{ring \max} = 117 \mu s \quad (28)$$

Contudo, o *ring-down* observado nos transdutores adquiridos, quando excitados com 8 impulsos de 12 V, variaram de 580 μs , para o transdutor de 175 kHz, até períodos superiores a 2 ms, para os transdutores de 40 e 58 kHz. Assim, torna-se necessário introduzir algum mecanismo de amortecimento. A solução mais simples passaria pela introdução de um elemento de amortecimento passivo, seja mecânico ou elétrico, através do aumento do atrito viscoso do diafragma, pela adição de uma placa de amortecimento na parte traseira do transdutor, ou ligando uma resistência entre os terminais. Contudo, o amortecimento passivo leva à introdução de ruído térmico, proporcional ao amortecimento exercido, afetando negativamente o SNR. Uma forma de contornar este problema consiste na utilização de um esquema de amortecimento ativo (ver Figura 4.77), em que o circuito de amortecimento é comutado apenas durante o período de tempo suficiente para levar o transdutor ao estado de repouso após emissão, sendo depois removido para que a receção não seja afetada pelo mesmo.

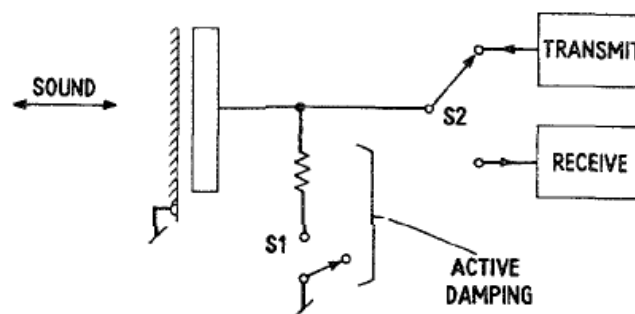


Figura 4.7-Esquema de amortecimento activo de um transdutor capacitivo [130].

O único artigo que foi encontrado em relação a este assunto focava-se na questão de como introduzir o amortecimento neste tipo de esquema evitando transientes ou ruído, sugerindo a sua concretização com um amplificador operacional de transcondutância, para obter uma impedância de amortecimento sem ruído, fontes de corrente e díodos para a comutação [130]. No entanto, dada a ausência de outras soluções na literatura, optou-se por investigar a possibilidade de conseguir este efeito com configurações mais simples. Uma vez que se iria fazer uso de multiplexagem para alternar entre os canais de transmissão e receção, decidiu-se integrar o amortecimento como um canal adicional nos *multiplexers*, não requerendo assim transístores ou outros elementos de comutação adicionais. Além disso, não se conhecendo o quão relevante é o ruído térmico apontado pelo autor referido anteriormente, optou-se por fazer uso de elementos de atenuação menos complexos, nomeadamente: curto-circuito entre os terminais dos transdutores e um circuito RLC série, configuração do tipo corta-banda, em regime criticamente amortecido, o que representa a característica de dissipação energética mais rápida possível de se obter com um circuito de segunda ordem. A frequência de ressonância de um circuito RLC série é dada por:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (29)$$

Para se obter um regime criticamente amortecido, deve-se dimensionar o circuito para um fator de qualidade de 0,5. Por sua vez, para que obtenha esse facto deve-se verificar a seguinte relação entre componentes:

$$R_{crit} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (30)$$

Partindo do valor de indutância com maior disponibilidade no laboratório, calculando a capacidade através da Equação 29, para 40 kHz, e a resistência através da Equação 30, obteve-se:

$$L = 6 \text{ mH} , C = 2,64 \text{ nF} , R = 3,02 \text{ k}\Omega$$

4.3.4. Aquisição de sinal

Este bloco é responsável pelo condicionamento dos sinais recebidos pelos transdutores após a emissão de ondas e o amortecimento do *ringing*. O sinal condicionado é digitalizado através de um módulo do conversor analógico-digital (*Analog-to-Digital Converter*, ADC) do microcontrolador. O transdutor de 40 kHz é aquele mais propenso a produzir sinais de maior

amplitude, não só pelo facto das ondas de menor frequência sofrerem menos atenuação ao longo da sua propagação, mas também por este transdutor apresentar uma maior sensibilidade, atendendo ao padrão do feixe apresentado nos *datasheets*. Assim, de forma a evitar saturação no *output* deste bloco, garantindo no entanto o máximo aproveitamento da gama dinâmica do ADC do microcontrolador (0 a 3,3 V), baseou-se o seu projeto nos sinais observados na emissão de ondas com uma excitação de um transdutor de 40 kHz com impulsos de 12 V e reflexão numa placa rígida colocada a 10 cm de distância, de forma a se observar a amplitude máxima registada. Os *outputs* observados aos terminais dos transdutores, quando funcionam como recetores, são ondas sinusoidais de frequência aproximadamente igual à frequência central especificada. Nas condições enunciadas, o *output* máximo observado apresentou uma amplitude de 25 mV, pelo que se calcula um ganho de 66. Além da amplificação introduz-se uma tensão de *offset* para deslocar as tensões de saída, uma vez que o sinal produzido pelo transdutor assume tensões negativas e se pretende utilizar uma única fonte de alimentação para o sistema. Para que o sinal tenha uma componente DC correspondente ao centro da gama dinâmica do ADC, deriva-se uma tensão de referência de 1,65 V com um divisor de tensão resistivo e um seguidor de tensão, a partir de um regulador de tensão LDO (*Low-DropOut*) de 3,3 V. Baseando este circuito em amplificadores inversores com acoplamento AC, tem-se que para cada estágio a tensão de saída é dada por:

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_i}\right)V_i + V_b \quad (31)$$

Onde R_f é a resistência de feedback do amplificador operacional, R_i a resistência colocada entre o nó de entrada do sinal e a entrada inversora do amplificador, V_i a tensão do sinal de entrada e V_b a tensão de polarização. A razão entre os valores das resistências corresponde então ao ganho diferencial. Decidiu-se projetar um estágio com um ganho de 11 e um segundo com ganho de 6. Tendo em consideração a Equação 31 e o ganho definido para cada estágio, calcularam-se as respetivas razões entre resistências e arbitraram-se os seguintes valores, de forma a satisfazer essas razões:

$$R_{i1} = 1\text{k}\Omega, R_{f1} = 11\text{k}\Omega, R_{i2} = 20\text{k}\Omega, R_{f2} = 120\text{k}\Omega$$

Para uma maior versatilidade, caso se demonstre benéfico ter um ganho superior, colocou-se um potenciómetro de 200 k Ω no segundo estágio, em vez do valor fixo estipulado para R_{f2} . Para um ADC de N bits, a operar a uma frequência de amostragem de f_a e sendo a banda útil do sinal a amostrar f_h , o SNR do conversor é dado por:

$$SNR = 6,02N + 1,76 + 10\log_{10}\left(\frac{f_a}{2f_h}\right) \quad (32)$$

Assim, para o ADC do microcontrolador em que se decidiu basear o projeto, de 12 bits com uma frequência de amostragem máxima de 1 MHz e considerando uma banda de 200 kHz para se permitir a utilização dos 3 transdutores ultrassônicos, obtém-se um SNR de 78 dB. Então, para que se garanta o cumprimento do critério de Nyquist e se evite o dobramento de ruído com componentes de altas frequências para a banda útil, seria necessário atenuar no mínimo 78 dB no espaço de um quarto de década. Verifica-se, portanto, ser difícil projetar um filtro anti-imagem que garanta a imunidade a ruído de altas frequências, teria de ter uma ordem muito elevada, o que o torna impraticável. Contudo, os próprios transdutores agem como filtros passa-banda, pelo que é comum os circuitos para este tipo de aplicação não verificarem o critério de Nyquist na amostragem. Apesar disto, os condensadores utilizados para fazer acoplamento AC formam um filtro passa-alto com a resistência de *input*, em torno dos 1,5 kHz, e a custo de apenas 2 elementos passivos adicionais decidiu-se incluir filtros passa-baixo, integrados na realimentação dos amplificadores, com uma frequência de corte de 200 kHz. A frequência de corte de cada um dos filtros, relaciona-se com o valor dos elementos passivos da seguinte forma:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (33)$$

Atendendo à Equação 33 e aos valores das resistências previamente estipulados, para 200 KHz calculam-se as seguintes capacidades:

$$C_{f1} = 30\text{pF} ; C_{f2} = 2,65\text{pF}$$

De forma a se atenuar qualquer flutuação e ruído devido a transientes que possam decorrer das comutações existentes no circuito em que este bloco se irá inserir, todos os pinos de alimentação dos circuitos integrados possuem desacoplamento com condensadores cerâmicos e a bateria que alimenta o circuito e LDO's, possuem condensadores eletrolíticos de *bypass*.

Os amplificadores operacionais selecionados para a implementação deste circuito foram os OPA4743 da Texas Instruments. Cada circuito integrado contém quatro amplificadores. Tratam-se de amplificadores *rail-to-rail*, que permitem operar em *single-supply* até 12 V, de baixo consumo (1,1 mA quiescente), estável com ganho unitário e ideal para altas frequências, com elevados GBW (7 MHz) e *slew-rate* (10 V/ μ s), baixa distorção harmónica e

ruído (0,0008% THD+N). Na Figura 4.8 apresenta-se o esquema do bloco de condicionamento do sinal recebido pelos transdutores.

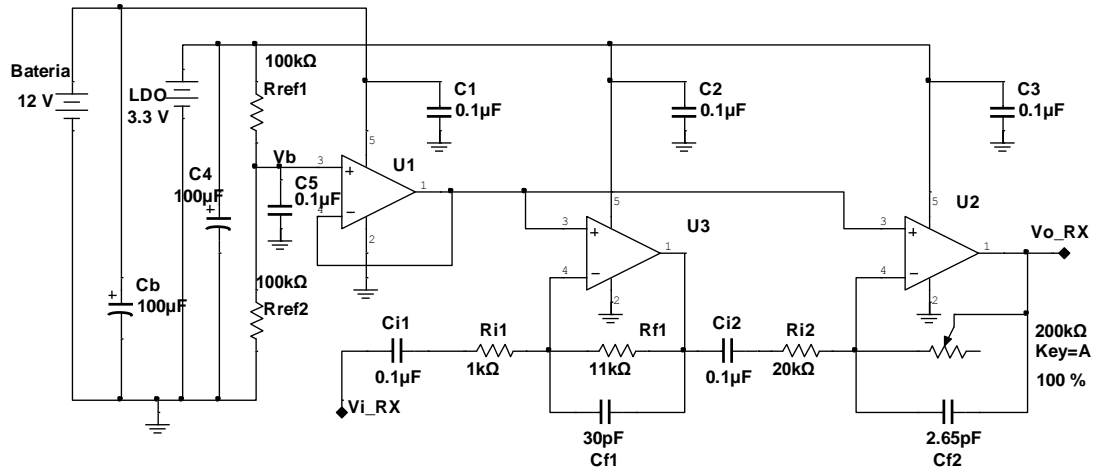
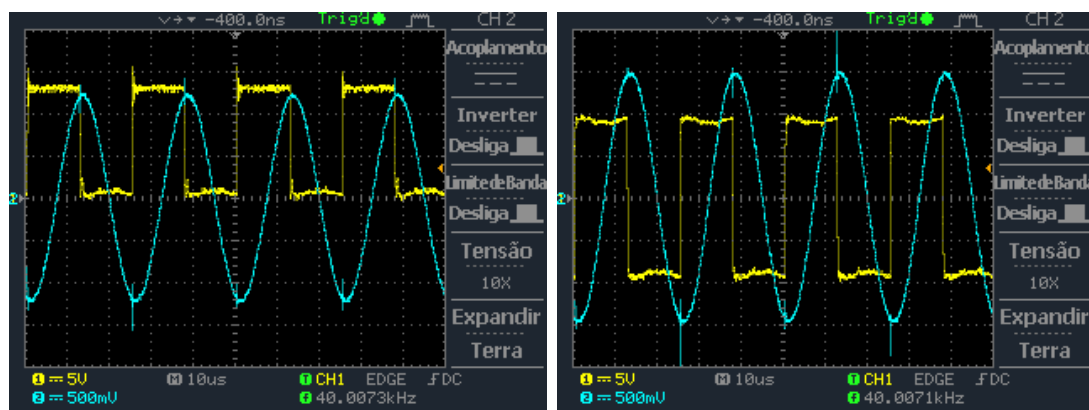


Figura 4.8-Bloco de condicionamento do sinal recebido pelos transdutores.

4.3.5. Circuito de transmissão

Os transdutores ultrassónicos podem ser conduzidos através de uma onda sinusoidal ou de impulsos. Uma vez que estes agem como um filtro passa banda, respondendo mecanicamente a excitações elétricas apenas de uma banda estreita de frequência, se excitados com ondas quadradas com uma frequência fundamental igual à sua frequência de ressonância, o efeito obtido é semelhante a ser conduzido por uma onda sinusoidal. Pode-se colocar a questão se será benéfica ou não uma condução diferencial, alternada, face a uma condução pulsatória. Para se esclarecer essa questão, procedeu-se a um pequeno ensaio recorrendo a um gerador de impulsos programável Philips PM5781, conduzindo um transdutor posicionado em frente a um outro que se encontrava ligado a um amplificador operacional com alimentação dupla, de forma a observar-se de que forma os dois tipos de condução afetam a potência da onda emitida. Na Figura 4.9 pode-se observar os resultados desse ensaio, de onde se conclui que a diferença não é significativa. Assim, decidiu-se implementar uma condução pulsatória, já que a condução alternada implicaria elementos de *hardware* adicionais.



a) Condução pulsatória.

b) Condução alternada.

Figura 4.9 - Comparação entre condução alternada e pulsatória de transdutores ultrassônicos. A amarelo, a tensão de excitação e a azul, a onda recebida por um segundo transdutor, após amplificação.

De forma a maximizar a potência transmitida, é necessário conduzir os transdutores a partir de uma fonte de baixa impedância, sendo comum utilizar-se um *buffer* para o efeito. Além disso, procura-se utilizar a maior tensão possível, correspondendo neste sistema à fonte de alimentação, uma bateria de 12 V. Para que não se introduzam elementos adicionais, para gerar o sinal de condução recorre-se a um módulo PWM do microcontrolador. Contudo, o sinal gerado é de apenas 3,3 V e o *output* de corrente é limitado. Assim, decidiu-se fazer uso de um dos amplificadores operacionais alimentados a 12 V, disponível nos circuitos integrados utilizados no bloco de aquisição de dados, assim como da referência de 1,65 V, para que com uma configuração comparadora, se amplifique o sinal de PWM e se confira uma baixa impedância de *output*. Na Figura 4.10 é apresentado o esquema do bloco de condução dos transdutores ultrassônicos.

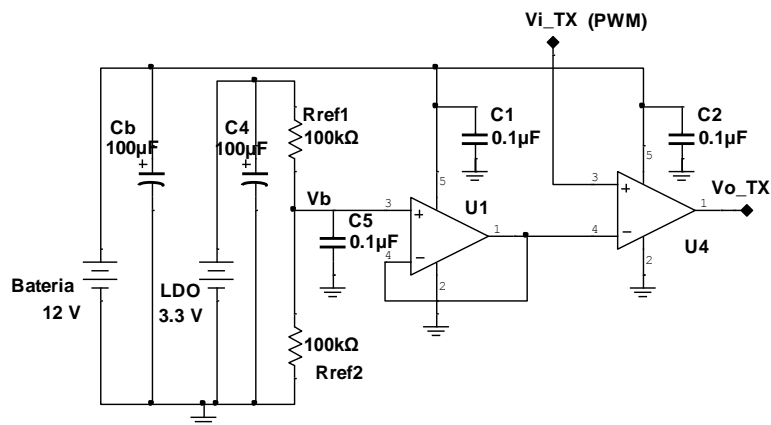


Figura 4.10 - Bloco de condução dos transdutores ultrassônicos.

4.3.6. Circuito equivalente e adaptação de impedância

As redes de adaptação de impedância permitem melhorar a transferência de potência entre a fonte de tensão de excitação e os transdutores ultrassônicos, atendendo ao teorema da máxima potência transferida, além de possibilitarem ainda manipular a sua curva de sensibilidade [131, 132]. Conseqüentemente, permitem aumentar a quantidade de informação que é possível obter através da análise de frequência dos sinais refletidos, de duas formas distintas: ao conferir uma maior amplitude às ondas emitidas, faz com que se minimize a informação perdida devido à atenuação exercida ao longo do percurso da onda; a capacidade de se alterar a curva de sensibilidade com componentes eletrônicas, confere a possibilidade de se explorar uma região mais ampla do espectro ultrassônico em busca de atributos diferenciadores com um número limitado de transdutores, de diferentes frequências centrais. Assim sendo, decidiu-se investigar se existem redes adaptação simples que possam trazer benefícios significativos ao projeto do dispositivo.

Para que se proceda à adaptação de impedâncias é necessário conhecer a impedância da fonte, assim como a impedância da carga. Existem vários modelos de circuitos equivalentes que permitem, estimar a impedância complexa e simular o comportamento elétrico de transdutores piezoelétricos, tais como os modelos de Redwood, Mason e KLM [133, 134]. Contudo, estes envolvem parâmetros relacionados com os materiais e geometria de construção dos transdutores. Para frequências próximas da frequência de ressonância, o modelo de Butterworth-Van Dyke (BVD) pode ser utilizado, resultando numa boa aproximação ao comportamento real, sendo mais simples que os anteriormente mencionados, uma vez que os parâmetros que podem ser determinados a partir de ensaios experimentais de fácil exequibilidade. Este modelo é constituído por um ramo RLC que representa as propriedades oscilatórias associadas ao comportamento mecânico do

transdutor, e um segundo ramo em paralelo que representa a sua componente dielétrica fixa (ver Figura 4.11) [135].

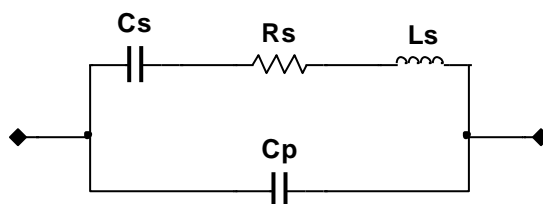


Figura 4.11 - Circuito equivalente de transdutores piezoelétricos, modelo Butterworth-Van Dyke.

A curva de ganho dos transdutores ultrassónicos é caracterizada por duas frequências principais, a frequência de ressonância (ω_s) em que a sua impedância se aproxima do valor mínimo que o transdutor pode assumir e a frequência de antirressonância (ω_p) em que o transdutor se aproxima do seu valor máximo de impedância. Atendendo ao modelo de BVD, é possível escrever as seguintes expressões em relação a cada um dos componentes constituintes [136]:

$$C_p = \sqrt{\frac{(Z_{os})^2(\omega_p^2 - \omega_s^2) + \sqrt{(2\omega_p^2 Z_{os} Z_{op})^2 + (Z_{os})^4(\omega_p^2 - \omega_s^2)^2}}{(2\omega_p^2 Z_{os} Z_{op})^2}} \quad (34)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{(Z_{os})^2}{1 - (C_p \omega_s Z_{os})^2}} C_p R_s \quad (35)$$

$$C_s = C_p \left[\left(\frac{\omega_p}{\omega_s} \right)^2 - 1 \right] \quad (36)$$

$$L_s = \frac{1}{C_s \omega_s^2} \quad (37)$$

Tendo em conta estas relações, torna-se evidente que, conhecendo apenas as frequências de ressonância e antirressonância, e os correspondentes módulos da impedância de um transdutor, se torna possível calcular todos os elementos constituintes do circuito equivalente. Após se traçar a característica de impedância de um transdutor, torna-se

possível não só projetar de forma ótima, mas também simular, redes de adaptação de impedância.

De forma a traçar-se a curva de impedância dos transdutores, não se tendo acesso a um analisador de impedância, colocou-se uma resistência em série com o transdutor a avaliar, com um valor muito superior ao que seria espectável para a impedância do transdutor (100 kΩ), de forma a garantir que a corrente é imposta pela resistência e não pela impedância do transdutor. Assim, com a variação da impedância em função da frequência, a corrente mantém-se aproximadamente constante, e uma vez que se verifique esta condição tem-se pela lei de Ohm que a impedância do transdutor é dada por:

$$|Z_t| = \frac{U_t}{U_g} R_g \quad (38)$$

Onde U_t é a tensão medida entre os terminais do transdutor e U_g a tensão aplicada, entre um terminal da resistência R_g e o terminal do transdutor na referência de tensão. Injetou-se neste circuito uma onda sinusoidal de frequência variável de forma contínua ao longo de um período de 100 ms, com amplitude constante de 10 V e registou-se a tensão U_t . Os dados foram importados para o Matlab, extraiu-se o envelope das formas de onda, aplicou-se a equação 38, converteu-se o eixo horizontal de tempo para frequência, obtendo-se a curva pretendida. O processo foi repetido para os três transdutores tendo-se obtido os resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 -Parâmetros do circuito equivalente dos transdutores ultrassónicos.

| | 40 kHz | 58 kHz | 175 kHz |
|----------------------------|--------|--------|---------|
| F_s (kHz) | 40,14 | 58,75 | 177,8 |
| Z_s (Ω) | 525,5 | 591,7 | 150,5 |
| F_p (kHz) | 42,31 | 60,54 | 181,2 |
| Z_p (Ω) | 6107 | 2867 | 1195 |
| C_p (pF) | 2104 | 2024 | 2073 |
| R_s (Ω) | 547,2 | 659,7 | 160,6 |
| C_s (pF) | 233,4 | 125,2 | 78,82 |
| L_s (mH) | 673,4 | 586,3 | 101,6 |

A adição de uma indutância em série com os transdutores emissores e em paralelo com transdutores recetores introduzem na resposta em frequência dos mesmos um novo pico. A

localização de ambos os picos pode ser controlada pelo valor da indutância. Se se desejar reduzir a amplitude dos picos pode-se fazê-lo adicionando ainda uma resistência, também ela em série [137]. O centro dos dois picos de sensibilidade pode ser posicionado de forma aproximada, tendo em conta a frequência de ressonância do oscilador formado pela indutância adicionada e a componente capacitiva estática do transdutor, ou seja:

$$L_m = \frac{1}{\omega_{cm}^2 C_p} \quad (39)$$

Contudo, se os picos forem colocados a uma frequência muito distante da frequência central original do transdutor, estes sofrem naturalmente uma atenuação, assim de forma a se obter o maior ganho e largura de banda possível, calcularam-se a partir da equação 39, os valores das indutâncias a adicionar expostas na Tabela 3, para que a frequência central coincida com a frequência natural de cada transdutor:

Tabela 3-Indutância a adicionar para adaptação de impedância por indutância em série.

| | 40 kHz | 58 kHz | 175 kHz |
|------------|--------|--------|---------|
| L_m (mH) | 7,5 | 3,6 | 0,4 |

Em [138] foram avaliados 6 tipos de redes de adaptação de impedância aplicados a transdutores ultrassónicos, e foi demonstrado que as redes LC, frequentemente chamadas simplesmente de redes L, constituídas por dois elementos reativos, demonstraram atingir o máximo de aumento de eficiência de transmissão de potência. Estas redes destacam-se pelo facto de que com elementos puramente reativos permitem proceder à adaptação de ambas as componentes da impedância do transdutor, real e imaginária. Desta forma, não se introduzem componentes resistivas dissipativas. Em [131] é sugerido que para o projeto deste tipo de rede se reduza o circuito segundo o modelo BVD para apenas a resistência R_s em paralelo com a componente dielétrica fixa C_p e se transforme no seu equivalente em série, resultando na configuração ilustrada na Figura 4.12.

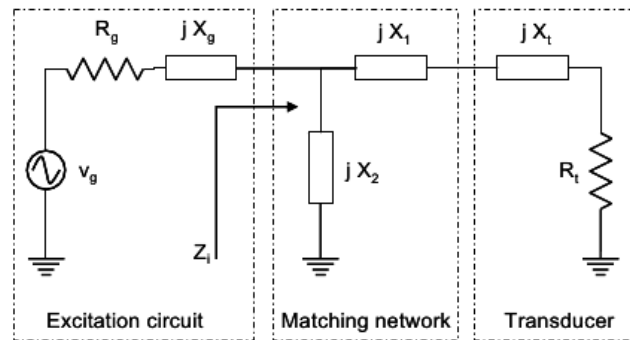


Figura 4.12 - Circuito equivalente do transdutor em ressonância, com a rede de adaptação do tipo L e circuito de excitação.

Definindo-se Q como:

$$Q = \pm \sqrt{\frac{R_g \left[1 + \left(\frac{X_g}{R_g} \right)^2 \right]}{R_g} - 1} \quad (40)$$

Os elementos X_1 e X_2 podem ser calculados com as seguintes expressões:

$$X_1 = QR_t \pm X_t \quad (41)$$

$$X_2 = \frac{-(R_g^2 \mp X_g^2)}{QR_g - X_g} \quad (42)$$

Note-se que existem duas soluções possíveis, as quais se podem verificar corresponderem a versões passa-baixo da rede, para valores de Q positivos e passa-alto para soluções de Q negativas. Procedeu-se ao cálculo de todas as soluções, inclusive, foi realizada a devida conversão de impedâncias para indutâncias e capacidades, à frequência de ressonância. Na Tabela 4 encontram-se expostos os valores dos componentes para adaptação de impedância dos transdutores ultrassónicos com rede do tipo L

Tabela 4 - Valores dos componentes para adaptação de impedância dos transdutores ultrassônicos com rede do tipo L.

| | 40 kHz | 58 kHz | 175 kHz |
|----------------------|--------|--------|---------|
| Passa - baixo | | | |
| C (nF) | 172,0 | 108,8 | 73,62 |
| L (μH) | 92,99 | 70,43 | 11,49 |
| Passa - alto | | | |
| L(μH) | 94,33 | 71,90 | 11,91 |
| C(nF) | 170,2 | 106,9 | 71,99 |

5. Análise de Frequência e Reconhecimento de Padrões

5.1. Fundamento para a utilização dos algoritmos

Os mecanismos de propagação de ondas ultrassônicas: absorção, transmissão e reflexão, apresentam dependência das propriedades do meio e obstáculos. Pretende-se com base nesta premissa, investigar a possibilidade de concretização de uma solução para o problema da detecção de frutos nas árvores, através da análise de frequência de reflexões de ondas ultrassônicas emitidas na direção radial dos ramos, com recurso a técnicas de processamento de sinal e de reconhecimento de padrões. Os algoritmos de reconhecimentos de padrões são parte integrante de uma área de conhecimento que pode adotar diversas nomenclaturas consoante a área de aplicação: aprendizagem de máquina, aprendizagem estatística, inteligência artificial ou prospeção de dados. Estes algoritmos inferem funções, ou modelos matemáticos, de classificação ou regressão, a partir de conjuntos de dados de treino rotulados *à priori* [139]. Os dados de treino, os *inputs* dos algoritmos de aprendizagem de máquina, são chamados de atributos, variáveis independentes ou descritores. Após decorrido o treino de onde resulta um modelo de classificação ou regressão, torna-se possível rotular dados nunca antes vistos pelo sistema. Nos problemas de classificação, os *outputs* destes algoritmos, tomam valores discretos. Nos problemas de regressão, assumem valores contínuos. A detecção de frutos constitui neste âmbito um problema de classificação binária: fornecido o perfil espectral de uma onda ultrassônica refletida, atribuir-lhe um rótulo “Existe fruto” ou “Não existe fruto”. De forma a se simplificar a nomenclatura recorre-se classicamente aos rótulos “Positivo” e “Negativo”, ou ainda a “1” e “0”, respetivamente. Aplicando este tipo de algoritmos à análise espectral, os atributos correspondem então às amplitudes de cada componente de frequência. Estes algoritmos procuram essencialmente criar funções que maximizam os valores de métricas de distância inter-classe, e que minimizam as métricas de distância intra-classe. Por esta razão, apresentam o potencial para detetar qualquer padrão que possa emergir no espectro de frequência, que dependa do facto das ondas analisadas terem refletido ou não, total ou parcialmente, sobre a superfície de frutos, por muito pouco pronunciados que esses padrões sejam no contexto da totalidade do espectro. A implementação de alguns algoritmos deste tipo requer uma disponibilidade de

memória e capacidade computacional consideráveis, pelo que mesmo que se demonstrasse ser possível recorrer a estes para o efeito pretendido, a sua implementação num sistema embutido poderia não ser viável, atendendo à rapidez que é necessária para o uso do dispositivo mostrar vantagens face ao método manual. Contudo, caso se verifique ser possível obter um desempenho de classificação satisfatório com este tipo de algoritmos, sugerindo que existe efetivamente uma assinatura espectral diferenciadora dos casos em questão, pode-se proceder a uma investigação mais detalhada para isolar os atributos, ou seja as frequências, de maior importância para a diferenciação. Identificada a banda, ou um conjunto de bandas de frequência que permitem proceder à distinção pretendida, o sistema de classificação poderia no limite ser substituído por um simples filtro analógico passa-banda cujo *output* seria monitorizado pelo microcontrolador, e a distinção entre casos realizada através do estabelecimento de um valor limite de amplitude, constituindo uma simples fronteira de decisão. Neste capítulo explicam-se brevemente os diferentes algoritmos investigados. Não se recorreu à sua construção e representação matemática, pois o objetivo é fundamentar de forma intuitiva a sua utilização, sendo que as suas implementações podem ser facilmente encontradas na literatura, e se encontram prontas para utilizar em inúmeros pacotes de *software*. Alguns exemplos são: a *Statistics and Machine Learning Toolbox no Matlab*, o programa *Weka* que permite realizar procedimentos de aprendizagem de máquina de forma simples com base numa interface gráfica, a biblioteca para *Python* intitulada de *scikit-learn* e repositórios para língua *R* como é o caso do *CRAN* que possui milhares de pacotes para aprendizagem estatística. Excetuando quando explicitado em contrário, a escrita deste capítulo baseou-se nas seguintes obras:[139, 140]. A Figura 5.1. descreve esquematicamente os processos e algoritmos envolvidos na investigação de uma solução para a deteção de frutos.

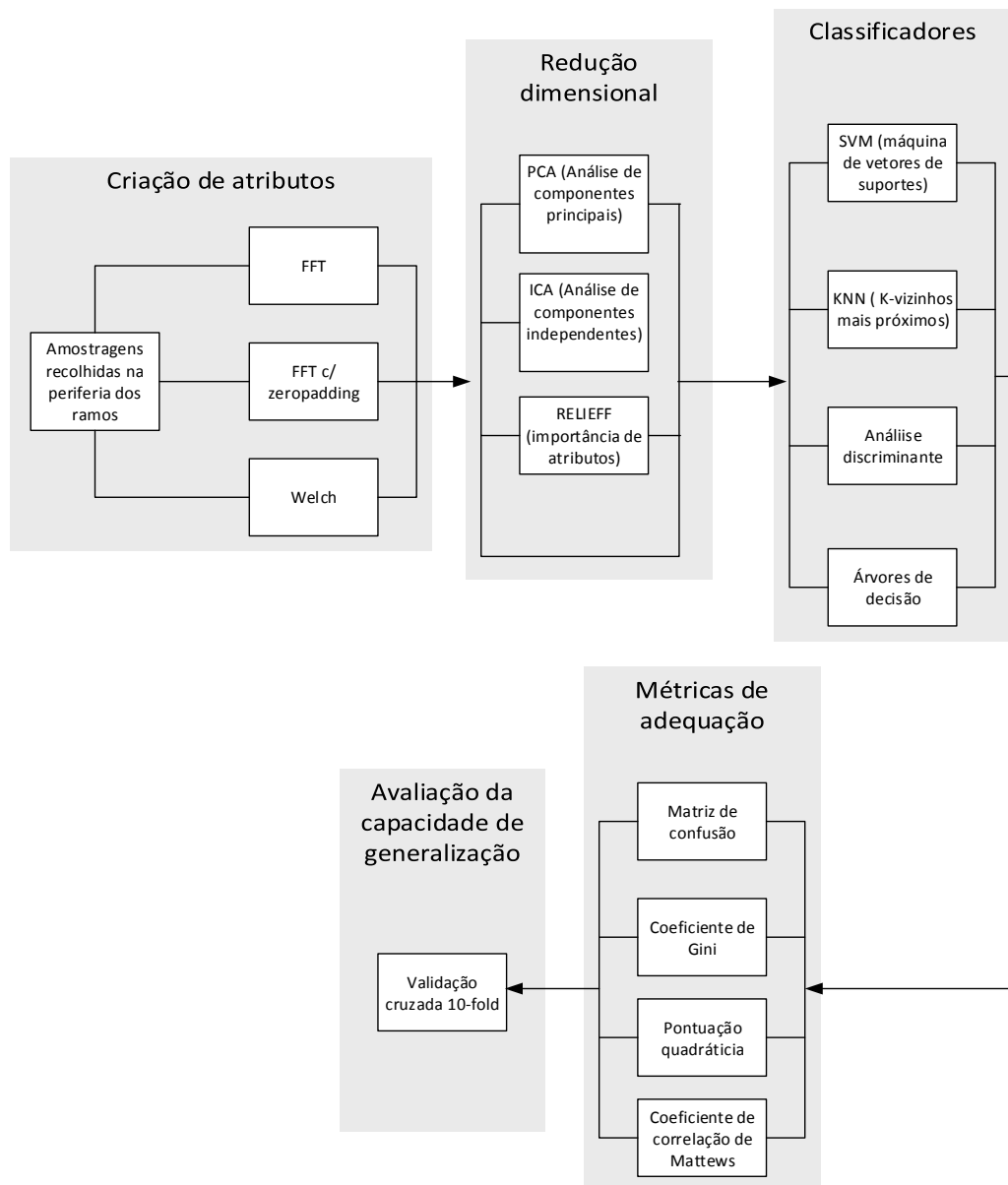


Figura 5.1- Representação esquemática do processo de investigação de algoritmos de aprendizagem de máquina para a detecção de frutos.

5.2. Recolha de dados

Não se tendo encontrado na literatura evidências significativas relativas às assinaturas espectrais características dos frutos, e tendo-se como objetivo a conceção de um protótipo funcional, decidiu-se proceder à investigação com sensores de banda estreita, o que se traduz em dimensões físicas reduzidas, com três valores de frequência central com elevada disponibilidade no mercado: 40, 58 e 175 kHz. Não se tendo obtido sucesso com os ensaios do bloco funcional de amortecimento dos transdutores descrito anteriormente, o que

permitiria a utilização dos transdutores ultrassônicos numa configuração mono-estática, os ensaios realizaram-se com uma configuração bi-estática, com os blocos de transmissão e aquisição de sinal apresentados anteriormente. Os sinais foram digitalizados com um osciloscópio Isotech IDS6072A-U. Com cada par de transdutores posicionados a cerca de 4 cm e orientados na direção radial de ramos de pessegueiros fixos com grampos no topo de uma bancada de trabalho, procedeu-se a sucessivas emissões de 8 impulsos através dos transdutores, e à recolha dos sinais das respetivas reflexões. Foram recolhidas cerca de 25 amostragens em regiões dos ramos que continham frutos e 25 amostragens em posições do ramo sem frutos, com cada um dos pares de transdutores de diferentes frequências centrais. Adicionalmente, recolheram-se sinais de frutos e folhas isoladas, também estes posicionados a cerca de 4 cm da face dos transdutores. Note-se que as amostragens foram recolhidas sem qualquer condicionamento acústico, pois o intuito seria replicar o mais aproximadamente as condições em que o dispositivo operaria num pomar. A Figura 5.1 representa de forma esquemática os processos e algoritmos incluídos na investigação de algoritmos de aprendizagem de máquina para a deteção de frutos nas árvores.



Figura 5.2 - Recolhas de ondas ultrassónicas refletidas a partir da periferia de ramos e em frutos e folhas isolados.

5.3. Processamento de sinal e visualização de dados

Devido à curva de sensibilidade que caracteriza os transdutores ultrassônicos de banda estreita e à existência de ruído, mesmo existindo uma dependência diferenciadora não linear com a frequência, da reflexão das ondas sobre as superfícies das folhas e frutos, dificilmente seriam detetadas por simples visualização dos perfis espectrais, sem qualquer tipo de processamento adicional. A tendência será para que todos os espectros das amostragens capturadas, uma vez normalizados, se assemelhem à curva característica de

cada transdutor. Não obstante, para uma primeira investigação menos automatizada, mas com maior interpretação, face aos algoritmos de aprendizagem de máquina, procurou-se evidenciar visualmente as diferenças entre espectros das duas classes, com operações simples de aritmética de sinal. Para tal começou-se por proceder ao cálculo da média do espectro de cada classe. Posteriormente subtraiu-se uma média à outra e também o espectro de cada observação a ambas as médias. Os resultados foram elevados ao quadrado de forma a evidenciar os picos das diferenças. Calcularam-se também as correlações cruzadas entre todos os espectros, de forma a avaliar numericamente a similaridade entre espectros da mesma classe e entre espectros de classes distintas. A Figura 5.3. apresenta de forma sucinta o processo de investigação com base em aritmética de sinal.

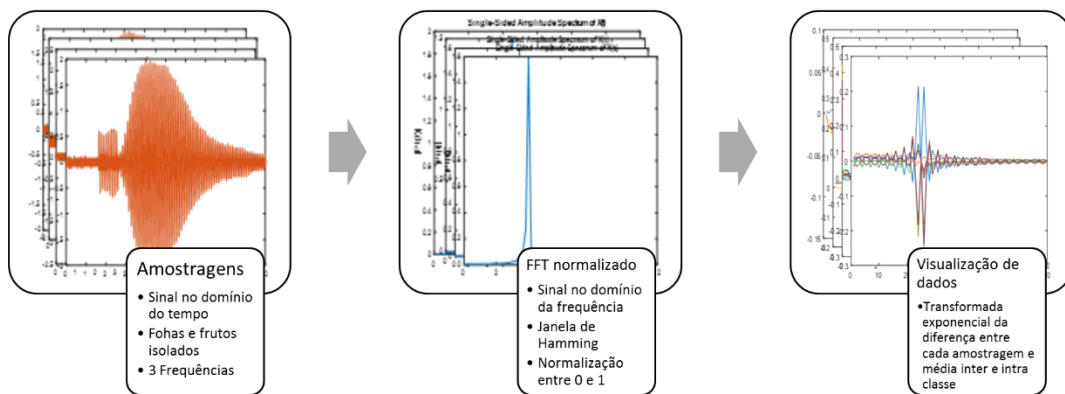


Figura 5.3 - Processo de investigação com base em aritmética de sinal.

5.4. Preparação dos dados e extração de atributos

Os dados resultantes dos ensaios, em formato CSV (*comma separated values*), foram importados para o Matlab. Procedeu-se ao traçar das ondas de forma a se visualizar a que índices correspondiam as janelas temporais de interesse, ou seja, onde se localizavam as oscilações correspondentes à receção das ondas refletidas no domínio do tempo. Uma vez que a distância entre os sensores e os ramos foi mantida aproximadamente constante, verificou-se ser razoável isolar a mesma janela temporal de todas as amostragens. Todos os processos descritos deste ponto em diante neste capítulo foram realizados através de *scripts* de Matlab. Interessava então passar os sinais para o domínio da frequência de forma a se obter atributos discretos capazes de descrever os mesmos. O algoritmo mais frequentemente utilizado para o fazer é a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier*

Transform, FFT). Com estes algoritmos, a resolução de frequência é dada pela razão entre o número de pontos que constitui o sinal no domínio do tempo e a frequência de amostragem com que este foi digitalizado. Para que se atingisse uma resolução de cerca de 100 Hz, estenderam-se os vetores dos sinais com elementos nulos, um processo chamado de *zero padding*. De facto, apontou-se para que a dimensão do vetor fosse a potência de 2 mais próxima da dimensão que daria os 100 Hz de resolução, já que assim a velocidade do cálculo é significativamente superior. Ainda que de um ponto de vista puramente lógico faça sentido desejar-se uma resolução tão elevada quanto possível, permitindo apontar bandas de frequências estreitas, caso se detete algum padrão, isto pode não se revelar positivo quando se trata de aplicar algoritmos de aprendizagem de máquina. Um dos aspetos mais fulcrais dos sistemas de classificação com algoritmos de aprendizagem de máquina, é que estes apresentem capacidade de generalização, ou seja, que quando utilizados para avaliar dados nunca antes vistos, demonstrem uma tendência para reproduzir resultados semelhantes aos observados com os dados de treino, tidos em consideração para avaliar o seu desempenho aquando da sua construção.

Com o aumento da complexidade e flexibilidade dos modelos preditivos, a sua capacidade de generalização tende a diminuir, uma vez que estes passam a seguir com demasiada proximidade todos os detalhes observados durante a fase de treino, incluindo ruído e possíveis anomalias, em vez de seguirem características realmente diferenciadoras entre os casos que se pretende distinguir. Se um modelo complexo, flexível, for treinado em diferentes conjuntos de treino, o seu desempenho sobre dados nunca antes vistos tende a variar significativamente, o que não é desejado. Por outro lado, com a diminuição da flexibilidade, o enviesamento, i.e., a diferença entre os *outputs* produzidos e os valores reais tende a aumentar, pois, uma vez que a relação entre o *output* ideal e os atributos tende a ser pouco linear, um modelo simples tende a ser pouco representativo das relações que se pretendem capturar. No caso da classificação binária, o enviesamento pode ser entendido a partir de uma perspetiva bayesiana, com base nas probabilidades posteriores atribuídas. Corresponde ao módulo da diferença entre a probabilidade posterior atribuída, e 1 no caso da observação pertencer ao caso positivo, ou 0 caso pertença ao caso negativo. A partir do ponto em que o aumento de complexidade leva a que os valores das métricas de desempenho observadas sobre o conjunto dos dados de treino novos se comecem a afastar dos valores observados sobre dados de teste, em vez de se aproximar, diz-se que ocorreu *overfitting* (sobreajuste). Na escolha entre modelos de classificação existe então um compromisso entre enviesamento e variância. O ideal é encontrar um modelo que minimize simultaneamente ambas as grandezas, pelo que normalmente se procede à avaliação de modelos de diferentes níveis de complexidade.

Obviamente, um dos fatores que contribui para a complexidade do modelo é o número de atributos com o qual é treinado. Assim, uma maior resolução na passagem dos sinais ao domínio da frequência tem por consequência um aumento da complexidade e flexibilidade dos modelos resultantes. Tendo isto em consideração, todo o processo de construção e investigação de algoritmos foi realizado com os dados originais e em paralelo com os dados com *zero padding*, para que se possa posteriormente proceder a uma avaliação comparativa. Decidiu-se ainda gerar os atributos através do método de Welch, um método de cálculo de densidade espectral de potência, o qual apresenta uma resolução geralmente superior à da FFT, mesmo sem *zero padding*, igual à dimensão do vetor do sinal a avaliar. No limite, tende a diminuir o efeito do ruído e da dispersão espectral, contudo a complexidade dos modelos classificadores resultantes vem mais uma vez acrescida. Os métodos de estimativa de densidade espectral tratam de potência, apresentando as correspondentes amplitudes uma ordem acima das do conteúdo espectral calculadas pela FFT, pelo que apresentam potencial para acentuar mais as ténues divergências entre casos com e sem fruto, e assim facilitar o seu reconhecimento por parte dos algoritmos de classificação. Para que se reduza a dispersão espectral e o consequente surgimento de lóbulos laterais em ambos os métodos, aplica-se uma janela de Hamming a cada amostragem antes do cálculo da transformada. Para esta primeira abordagem considerou-se apenas investigar a possibilidade de deteção de frutos, e não a extração de uma estimativa da distância radial a que os mesmos se localizam, o que à partida representaria um desafio adicional. Assim, de forma a uniformizar as amostragens e tornar os resultados independentes de amplitude dos sinais, dependendo sim exclusivamente do seu conteúdo espectral em termos proporcionais, procedeu-se à normalização de 0 a 1 de ambos os tipos de espetro.

5.5. Redução dimensional

De forma a se reduzir a complexidade dos classificadores e consequentemente o risco de *overfitting*, é comum fazer-se uso de processos de redução de dimensionalidade, diminuindo o número de atributos utilizados para classificação. Estes podem-se dividir em métodos de extração de atributos e em métodos de seleção de atributos. No primeiro caso, procede-se à transformação dos atributos originais para subespaços de dimensão mais reduzida, consistindo normalmente em projeções que procuram maximizar ou minimizar certas métricas estatísticas, inter-classe, intra-classe, ou ambas. O facto de os atributos sofrerem transformações dificulta a sua interpretação. No segundo caso seleciona-se simplesmente um subconjunto ótimo dos atributos originais através da avaliação iterativa de diferentes subconjuntos face a um determinado critério. Testaram-se quatro procedimentos de redução dimensional, dois de extração de atributos e dois de seleção de atributos.

5.5.1. Análise de componentes principais e independentes

A análise de componentes principais (*Principal Component Analysis* - PCA) é o processo de redução dimensional mais frequentemente utilizado. Consiste num procedimento estatístico que utiliza transformações ortogonais para converter um conjunto de observações com variáveis possivelmente correlacionadas, num conjunto de dimensões utilizadas para projeção linear, chamadas de componentes principais. As componentes principais correspondem aos vetores próprios da matriz de covariância dos dados originais, após centralização e normalização de cada atributo. O número de componentes é igual ou inferior ao número de variáveis originais, mas estas explicam no seu conjunto toda a variância dos dados originais. As componentes principais surgem ordenadas de acordo com a variância explicada por cada uma, sendo proporcional ao valor próprio correspondente, ou seja, a primeira componente principal é a que explica a maior porção da variância dos dados originais, seguida da segunda e por aí em diante. As componentes sucessivas são mutuamente ortogonais. Os dados, uma vez projetados numa componente principal, passam a apresentar um coeficiente de correlação nulo. A motivação para a utilização deste procedimento, assenta no facto de que conjuntos de dados com baixa variância, alta correlação entre atributos, apresentam atributos possivelmente redundantes. Então, representando os dados num sub-espço de menor dimensão, mas garantindo a retenção da variabilidade, resultará à partida numa representação aceitável da informação contida, com um menor número de variáveis. Este processo foi utilizado da seguinte forma no contexto do problema de classificação: Para as amostragens dos transdutores de cada frequência e para cada tipo de atributo, calcularam-se as componentes principais num subconjunto de dados de treino estratificado, reservando-se as N primeiras componentes principais que permitiam reter mais de 80% da variância dos dados originais. Procedeu-se ao treino e avaliação dos classificadores com a projeção dos atributos originais sobre as componentes principais seleccionadas, o que se traduz no produto interno entre a transposta da matriz contendo as componentes seleccionadas e as matrizes de atributos.

A análise de componentes independentes (*Independent Component Analysis* - ICA) é um procedimento semelhante ao PCA, no entanto, em vez de identificar representações lineares que maximizam apenas a variância, procura maximizar a independência ou não gaussianidade. Ou seja, enquanto o PCA atende a estatísticas de até ordem 2, o ICA procura atender a momentos de ordem superior, como a assimetria e a curtose[141]. A sua formulação é significativamente mais complexa que a do PCA. De facto, o PCA é uma das etapas realizadas como pré-processamento para o ICA. Existem vários algoritmos para a sua implementação, mas um dos mais populares, e aquele utilizado neste trabalho, foi o

FastICA[142]. Este procedimento é mais frequentemente utilizado para a separação de sinais, considerando que os dados constituem uma combinação linear de fontes independentes (*blind source separation*). Contudo, atendendo ao teorema do limite central, o ruído tende a apresentar distribuições normais. Assim sendo, este procedimento poderá também ser útil para colmatar a influência sobre a classificação da existência de atributos que não possuem informação relevante, aumentando a dimensionalidade desnecessariamente. Além disso, as componentes independentes não são necessariamente ortogonais entre si, o que lhe confere uma maior flexibilidade para a representação dos dados em subespaços reduzidos face ao PCA (ver Figura 5.4). Contudo, o resultado do ICA não atribui nenhuma ordem de relevância das componentes encontradas e o número de componentes calculados é variável. Um critério frequentemente utilizado para a atribuição de significância às componentes independentes calculadas, é atender à curtose dos dados projetados sobre cada componente, sendo interpretado como um indicador de independência, uma vez que a curtose se aproxima de zero para distribuições gaussianas [143]. Contudo, ao contrário da variância, a curtose não é cumulativa. Assim, para que se procedesse a uma comparação com maior validade entre os dois métodos de redução dimensional transformativos, decidiu-se proceder ao treino e classificação com os dados projetados sobre as N componentes independentes de maior curtose, o mesmo número de componentes principais extraídos do PCA.

Apesar de este tipo de algoritmos permitir melhorar significativamente os resultados obtidos pelos classificadores, é de notar que os atributos do nosso problema de classificação deixam de corresponder a uma componente de frequência dos sinais observados. Caso estes produzam efetivamente bons resultados, e não se deseje conduzir investigação adicional e se pretendesse implementar um classificador neles baseados no dispositivo de monda, requeria que no campo se procedesse à digitalização dos sinais, passagem ao domínio da frequência e projeção nas componentes apuradas neste estudo. Por outro lado, a obtenção de bons resultados com estes procedimentos, poderia ser entendida como um indicador para a existência de efetiva de padrões distintivos entre a presença ou não de frutos, e indicar informação importante relativamente à variância e independência dos dados.

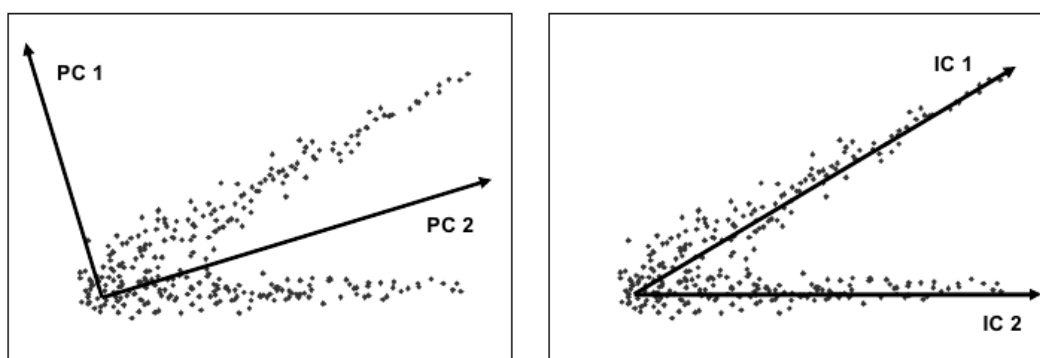


Figura 5.4 - Vetores de projeção gerados por PCA e ICA para um conjunto de dados bidimensional [141].

5.5.2. RELIEFF e seleção sequencial de atributos

A seleção de atributos é geralmente preferível à extração transformativa de atributos, uma vez que preserva o seu significado físico, consistindo na simples seleção de um subconjunto dos atributos originais. Existem vários algoritmos que automatizam este processo, procurando minimizar algum tipo de critério, podendo-se dividir em duas classes distintas: filtro e *wrapper*. No primeiro tipo de abordagem atende-se apenas às propriedades dos atributos e aos rótulos, de um conjunto de treino, para classificar os atributos como significantes ou não, não se tendo em consideração o desempenho dos classificadores que irão ser utilizados. Os subconjuntos de atributos são avaliados com base em propriedades como distâncias inter-classe, independência estatística ou métricas da teoria da informação. Na segunda abordagem, *wrapper*, o desempenho dos classificadores é considerado para a seleção dos atributos. Estes métodos realizam de forma iterativa, com diferentes subconjuntos de atributos, o treino e teste de um dado classificador e avaliam os diferentes subconjuntos de acordo com uma métrica de desempenho da classificação de cada iteração. Pelo facto de se utilizarem os classificadores como parte do pré-processamento para um problema de classificação, é introduzido enviesamento. Contudo, estes métodos incluem por norma algum mecanismo de defesa contra a perda de generalização. Tipicamente recorrem à validação cruzada, sendo que o valor da métrica de avaliação atribuída a cada atributo ou conjunto de atributos não decorre de um único teste, corresponde sim à média dos vários testes realizados no processo de validação. A validação cruzada é explicada com maior detalhe numa subsecção adiante. Note-se que além de aumentarem o risco de *overfit*, estes métodos tendem a ser computacionalmente exigentes.

O RELIEFF [144] é um dos métodos de seleção de atributos do tipo filtro mais frequentemente utilizado em problemas de classificação binária. A sua formulação assenta na avaliação de cada atributo de acordo com a sua relevância na diferenciação entre

observações semelhantes. É criado um vetor W com zeros, de dimensão igual ao número de atributos das observações no conjunto de treino, onde será armazenado o peso, ou importância, correspondente. Depois, iterativamente, seleciona uma observação do conjunto de treino e calcula quais as K observações mais próximas entre as restantes observações de cada classe, atendendo à distância de Manhattan. As observações mais próximas da mesma classe são chamadas de *nearest-hits*, enquanto que as observações mais próximas de classe diferente são chamadas de *nearest-misses*. Em cada passo da validação, para cada atributo, o peso é atualizado subtraindo ao valor atual no vetor dos pesos, a diferença entre o valor do atributo da observação da iteração atual, ao valor médio desse atributo entre os K *nearest-hits* e somando a diferença com o valor médio dos K *nearest-misses*. As diferenças são divididas pelo número de iterações, igual ao número de atributos, para que o peso final seja a média do processo iterativo. Assim, o peso de cada atributo traduz-se numa métrica de qualidade, refletindo o facto de que um bom atributo deve ter um valor semelhante para observações da mesma classe e diferenciar-se tanto quanto possível do valor das observações pertencentes a uma classe diferente. Quanto maior o valor do peso, maior a significância de um atributo, pois reflete uma curta distância intra-classe e uma grande distância inter-classe. No final os pesos são normalizados para valores entre 0 e 1.

Este algoritmo consiste numa excelente oportunidade para, de forma não supervisionada, se tentar identificar um pequeno número de intervalos do espectro que possam conter informação relevante à deteção de frutos. Assim, este método foi aplicado num subconjunto de treino, como pré-processamento, avaliando-se a significância dos atributos, com K igual a 10, o valor sugerido pela literatura original, procedendo-se ao treino de classificadores com os 3 atributos de maior peso.

A seleção sequencial de atributos [145], numa abordagem do tipo wrapper, procede iterativamente ao treino e avaliação de desempenho de um dado classificador. Existem duas variantes deste método, diferindo no sentido em que se executa a seleção, para a frente ou para trás. No primeiro caso, parte-se de um conjunto vazio, e em cada iteração vai sendo adicionado um novo atributo não selecionado anteriormente até que a adição de atributos não melhore o desempenho do classificador. No segundo caso, inicia-se o processo com todos os atributos e em cada iteração vai-se removendo um atributo. Em cada iteração, o classificador é avaliado face a um critério de perda, sendo que o mais frequentemente utilizado é o número de classificações erradas num conjunto de observações de teste, a taxa de erro. A implementação do Matlab permite selecionar o sentido da seleção sequencial, e definir de forma completamente arbitrária a função de perda, incorporando ainda a validação cruzada de 10 subconjuntos. É possível especificar o número de atributos a manter, contudo se este não for especificado, o algoritmo termina a execução quando

detetar um mínimo local do critério. Assim sendo, optou-se por esta última opção. Os atributos mantidos pelo algoritmo foram então utilizados para treinar e testar os classificadores com o conjunto de observações completo.

5.6. Classificadores

5.6.1. Máquina de vetores de suporte linear

A máquina de vetores de suporte é uma generalização de um outro classificador bastante simples e intuitivo, os classificadores de margem máxima. Estes classificadores procuram um hiperplano, a que no caso bidimensional corresponde a uma linha, que melhor separe as observações das diferentes classes, dividindo um espaço de qualquer dimensão superior a 1 em duas regiões. Um hiperplano pode-se definir facilmente, igualando a zero uma equação linear, com um coeficiente ponderativo para cada dimensão. Para qualquer ponto localizado nesse espaço multidimensional, torna-se fácil verificar em qual das regiões se localiza, basta substituir os valores das respetivas coordenadas e fatores, e averiguar se o valor resultante é superior ou inferior a zero. Além disso, é possível estimar um grau de confiança atendendo à distância entre a observação a classificar e o hiperplano, i.e., quanto mais distanciada do hiperplano, maior a confiança com que se pode afirmar pertencer à classe da região correspondente [140].

Surge então a questão de qual o critério adotar para escolha de um hiperplano que satisfaça uma separação ótima dos dados. Uma escolha óbvia é o hiperplano de margem máxima, ou seja, o hiperplano separador que maximiza a distância entre o próprio hiperplano e as observações mais próximas de cada classe. Por definição, a margem é inversamente proporcional aos fatores ponderativos de cada dimensão. Então, minimizando os fatores ponderativos, maximiza-se a margem. Assim, o treino deste classificador consiste num problema de otimização não-linear, tipicamente resolvido através das condições de Karush-Kuhn-Tucker utilizando multiplicadores de Lagrange [139].

Contudo, em problemas reais de classificação são raros os casos em que é possível encontrar um hiperplano separador, seja pela existência de ruído ou pela não linearidade dos dados. Nos casos em que os dados não são linearmente separáveis, pode-se adaptar o conceito do classificador de margem máxima, adotando uma “margem suave”, tolerando a presença de algumas observações de uma dada classe na região associada à classe oposta. A máquina de vetores de suporte, podendo-se chamar de classificador de margem suave, adota exatamente este conceito. Os vetores de suporte correspondem às observações mais

próximas da fronteira de decisão, influenciando diretamente a sua localização. O problema de otimização é resolvido da mesma forma que para um classificador de margem máxima, no entanto, além de se procurar maximizar distância entre o hiperplano e as observações, penaliza-se a violação da margem com uma variável de folga. A variável de folga de cada observação indica o quão longe esta se encontra da margem ou do hiperplano, no caso de estar localizada no lado errado da fronteira. Além disso, define-se um valor máximo para a soma das variáveis de folga, podendo-se controlar o quão tolerante a violações é a margem.

5.6.2. K vizinhos mais próximos

Dado um número inteiro positivo K e uma observação de teste, um classificador K vizinhos mais próximos (*K-Nearest Neighbors - KNN*), começa por calcular a distância entre a observação de teste e cada uma das observações do conjunto de treino, podendo-se recorrer a diferentes distâncias. De seguida, isola as K observações mais próximas e atribui a classe mais prevalente nesse conjunto de observações, à observação de teste. Apesar de constituir uma abordagem simples, produz frequentemente resultados de grande qualidade. Contudo, apresenta também alguns aspetos negativos bastante evidentes. Desde logo é um modelo paramétrico, requer que se defina o parâmetro K , não existindo nenhuma forma expedita de encontrar um valor ótimo. À medida que o parâmetro aumenta, tende-se a produzir um classificador de menor variância, mas com maior enviesamento. Além disso, uma vez que a classificação se realiza por voto de maioria, caso a distribuição de classes no conjunto de treino não seja uniforme, é uma vez mais introduzido enviesamento, reduzindo-se a capacidade de generalização. Adicionalmente, a sua implementação não é do ponto de vista computacional das mais eficientes, pois implica que se tenha sempre disponível em memória o conjunto de dados de treino e a cada pedido de classificação seja determinada uma nova fronteira de decisão. Os classificadores que recorrem a este tipo de estratégias são frequentemente denominados de *lazy learners*. Neste trabalho, foram treinados classificadores com validação cruzada de K igual a 1, 3, 5 e 10 e com 2 métricas de distância: euclidiana e de Manhattan.

5.6.3. Árvores de decisão

As árvores de decisão, ou CART (*Classification And Regression Trees*) são constituídas por um conjunto de regras ou condições, geralmente de inferioridade ou superioridade em relação a um dado valor, que conduzem a uma determinada decisão ou *output*. A representação destes algoritmos é constituída por nós, sendo que cada nó representa um ponto de divergência associado a cada variável, ou atributo. O primeiro nó é chamado de

raiz. Nas extremidades de cada sequência de nós encontram-se as folhas, correspondendo aos *outputs*, ou classes no contexto dos problemas de classificação. Uma árvore de decisão poderia ser escrita no âmbito da programação clássica, como uma série de *if's*, de número igual ao número de folhas, cada um contendo como condição a operação booleana AND entre as condições dos nós atravessados ao longo de um possível percurso entre a raiz e uma folha. Veja-se que por esta razão apresenta uma elevada interpretação de resultados. O treino destes classificadores consiste numa abordagem chamada de ramificação binária recursiva. No primeiro passo, o espaço de atributos é dividido em dois, selecionando-se um atributo e um ponto de corte, de tal forma que a resposta média das observações do conjunto de treino contidas em cada uma das duas regiões criadas, caracterizadas por o valor do atributo selecionado ser inferior, ou superior ou igual ao ponto de corte, minimizem uma dada métrica de erro. Nos passos seguintes, ocorrem sucessivas subdivisões, para cada uma das regiões resultantes. Este processo continua até que se atinja um critério de paragem, como por exemplo, o número de observações contido em cada região. Regra geral, este procedimento permite obter resultados muito bons para classificações no conjunto de treino. Contudo, existe uma alta tendência para ocorrer *overfit*, já que facilmente se obtém árvores bastante complexas, em espaços de atributos de dimensionalidade elevada. Uma possível estratégia para diminuir a sua complexidade seria adotar o critério de que uma divisão de nó só ocorreria se a média da métrica escolhida diminuir no mínimo um valor pré-determinado. Contudo, esta abordagem é muito limitada, pois uma dada subdivisão que não resulta numa melhoria significativa, pode dar origem a divisões subsequentes bastante relevantes. Assim, a estratégia mais frequentemente adotada é construir árvores complexas e depois proceder à remoção de nós, criando uma subárvore atendendo a uma função de custo representativa da relação entre a complexidade e a qualidade de adequação modelo, que possui um parâmetro de regulação que controla o balanço pretendido entre essas duas propriedades. Para cada valor deste parâmetro resulta uma subárvore diferente, que minimiza a função. Quanto maior o valor do parâmetro, menor a extensão da melhor subárvore. Esta técnica é chamada de poda do elo mais fraco. O valor do parâmetro é geralmente escolhido através da realização do treino e avaliação da taxa de erro em esquema de validação cruzada, para vários valores do parâmetro, escolhendo-se aquele que apresenta uma taxa de erro média inferior.

A implementação utilizada para quando: se atinge a pureza de um nó, ou seja, só contém observações de uma classe; quando se atinge um número especificável mínimo de observações contidas no nó, por defeito 1; ou quando se atinge um número máximo especificável de divisões, por defeito igual ao número de observações subtraído de 1. A métrica utilizada foi o índice de diversidade de Gini, um indicador da variância de classes

das observações presentes num nó, que toma um valor nulo quando todas as observações presentes na região pertencem à mesma classe.

5.6.4. Análise discriminante linear e quadrática

As abordagens de análise discriminante procedem à modelação de cada classe assumindo que estas apresentam uma distribuição normal multivariada, ou seja, que constituem uma mistura gaussiana, e classificam novos dados através do cálculo da probabilidade posterior, atendendo a esses mesmos modelos. Existem duas variantes frequentemente utilizadas. Na análise discriminante linear, assume-se que a variância de cada atributo é independente da classe, que apenas a média dos valores muda com a classe. Assim, o treino de um classificador de análise discriminante linear (*Linear Discriminant Analysis* - LDA) consiste em determinar a média de cada classe, assim como as suas probabilidades à priori (probabilidade bayesiana), correspondente ao número de observações de cada classe dividido pelo número total de observações de treino. Por último, é calculada uma única matriz de covariância a partir de todos os dados de treino, após centrados, ou seja, subtraindo-lhes em primeiro lugar a média da classe correspondente. O nome linear deve-se à equação utilizada para o cálculo da probabilidade posterior de uma observação. Esta resulta da substituição da função de densidade Gaussiana no teorema de Bayes. A fronteira de decisão corresponde portanto ao conjunto de valores em que as funções de probabilidade posterior de diferentes classes tomam o mesmo valor, no caso bidimensional, para o LDA a fronteira corresponde a uma linha.

Já no método da análise discriminante quadrática (*Quadratic discriminant analysis* - QDA), assume-se que o que diferencia as classes não é apenas a média dos valores dos atributos, mas também a sua variância. O treino com este classificador passa por calcular também a média e probabilidade à priori de cada classe. Contudo, em vez de se calcular apenas uma matriz de covariância, calculam-se duas, uma para as observações de treino de cada classe, após serem centradas. Para a QDA, a fronteira de decisão no caso bidimensional, corresponde a uma secção cónica.

O procedimento de classificação para ambos os métodos consiste no simples cálculo de probabilidade posterior com a observação a classificar, para cada classe, através da equação determinada na fase de treino. A classe atribuída à observação de teste é aquela que apresentar uma probabilidade posterior correspondente superior. Geralmente, como a fronteira de decisão da LDA é menos flexível, esta abordagem tende a produzir resultados com menor variância, mas maior enviesamento, face à QDA. Este facto sugere que a LDA tende a produzir melhores resultados quando o conjunto de treino é constituído por um

número reduzido de observações, uma vez que nesse caso, se torna essencial reduzir a variância. Contudo, uma vez que não se possui à partida conhecimento sobre que tipo de propriedade contém informação diferenciadora relevante procedeu-se ao teste de ambos os classificadores.

5.7. Avaliação da adequação do ajuste e generalização dos modelos

5.7.1. Matriz de confusão

A razão pela qual se procuram tantas alternativas diferentes para a formulação de modelos preditivos deve-se a um princípio conhecido como “*no free lunch theorem*”, que reflete o facto de nenhum método ou modelo em particular, dominar sobre todos os outros para todos os possíveis conjuntos de dados de *input*. De forma a se avaliar o desempenho, ou qualidade de adequação de um modelo de aprendizagem estatística para um dado conjunto de dados, e proceder à escolha do melhor classificador entre um conjunto pré-determinado, é necessário definir alguma forma de medir o quanto a sua capacidade de previsão se ajusta de facto às observações. A métrica mais expedita e mais frequentemente utilizada para esse efeito, em problemas de classificação é a taxa de acertos, ou seja, a fração ou percentagem de observações corretamente classificadas. Contudo, a taxa de acertos não fornece normalmente informação suficiente para se decidir qual o modelo a adotar. Por exemplo, para uma amostragem de observações cuja metade pertence ao caso positivo e metade ao caso negativo, e tendo um classificador que classifica sempre como negativo e um outro que classifica sempre como positivo, ambos obtêm uma taxa de acerto de 50%, quando o comportamento é claramente diferente. Como um exemplo que caracteriza mais proximamente o tipo de problemas reais que surgem em aplicações de classificação binária, considere-se um conjunto de amostragens decorrentes do varrimento do dispositivo de monda em diversos ramos, a uma frequência de amostragem dos sensores e deslocação do dispositivo tais, que resulta em que as regiões onde existiam frutos correspondam a 5% das observações. Se se proceder à classificação de tais amostragens com um classificador que atribua sempre a classificação negativa, “Não existe fruto”, então a taxa de acerto observada seria de 95%, o que representa aparentemente um ótimo desempenho, contudo todos os frutos seriam ignorados. Uma variante da taxa de acerto que representaria claramente uma melhor opção no caso de se valorizar igualmente as classificações positivas e negativas, seria a média entre as taxas de acerto de cada classe. Esta métrica é conhecida como taxa de acerto equilibrada (*balanced accuracy*). Ou seja, sendo P o número total de

observações positivas, TP (*true positive*) os casos positivos corretamente classificados, N o número total de observações da classe negativa e TN (*true negative*) o número de casos negativos corretamente classificados:

$$Bacc = \frac{\frac{TP}{P} + \frac{TN}{N}}{2} \quad (43)$$

Para o último exemplo apresentado, esta métrica resultaria num valor de 50%, face aos 95% da taxa de acerto simples, o que evidencia mais fielmente a fraca qualidade do classificador. Contudo, apesar de esta métrica atribuir importância a ambas as classes não permite a sua diferenciação.

Uma forma clara e inequívoca de atender a este problema de representação de dados consiste em se proceder à construção da matriz de confusão de cada classificador, ilustrada na Tabela 5, com as consequências que representam no contexto do dispositivo de monda. Esta matriz apresenta o número de observações positivas corretamente classificadas (TP), as observações incorretamente classificadas como positivas (*false positive - FP*), o número de observações negativas corretamente classificadas (TN) e as observações incorretamente classificadas como negativas (*false negative - FN*).

Partindo desta matriz, podem-se definir métricas mais interessantes, que ao contrário das anteriores são independentes da prevalência da população em questão. A sensibilidade ou *true positive rate (tpr)* mede a capacidade de um classificador rotular corretamente as observações do caso positivo de uma população, ou seja, evitar ocorrências de FN , independentemente da distribuição de classes. A especificidade é o homólogo para o caso negativo, penalizando as ocorrências de FP .

$$\text{Sensibilidade} = tpr = \frac{TP}{TP + FN} \quad (44)$$

$$\text{Especificidade} = \frac{TN}{TN + FP} \quad (45)$$

Dependendo da aplicação, o fator mais crítico pode residir nos casos positivos ou negativos. Por exemplo, para um sistema de classificação aplicado a rastreios médicos de doenças graves, o objetivo último seria, à partida, garantir que os utentes doentes são tratados. Então, optar-se-ia por um classificador que maximizasse a sensibilidade, minimizando o número de casos de pessoas classificadas como saudáveis que na verdade apresentam indícios de alguma patologia, com o objetivo de não se deixar pessoas doentes por tratar.

Contudo, muito provavelmente com este critério, o classificador apresentaria à partida, em geral, uma maior tendência a atribuir o rótulo positivo e a especificidade tenderia a diminuir, ou seja, o número de falsos alarmes, pessoas saudáveis que recebem a indicação de poderem estar doentes não estando, tenderia a aumentar. Esta estratégia poderia acarretar custos desnecessários com a alocação de recursos para prosseguir com procedimentos de diagnóstico ou tratamento desnecessários, mas o objetivo último seria salvaguardado. O ideal seria obviamente um classificador com, simultaneamente, uma elevada alta especificidade e sensibilidade, mas geralmente nos problemas reais que se procuram resolver com este tipo de algoritmos é sempre necessário ceder a algum tipo de compromisso. Neste caso, realizar-se-iam testes com um elevado número de classificadores e caso se obtivessem vários comportamentos razoáveis, com base nestas métricas, estabelecer-se-ia o critério de optar por aquele com maior sensibilidade.

Tabela 5 - Matriz de Confusão.

| | Classe verdadeira: Positivo | Classe verdadeira: Negativo |
|---------------------------------------|---|---|
| Classe atribuída: Positivo | <i>TP</i> - Existe fruto e é detetado. | <i>FP</i> - Não existe fruto, mas pode ocorrer o disparo de um atuador. |
| Classe atribuída: Negativo | <i>FN</i> - Existe fruto, mas não é detetado. | <i>TN</i> - Não existe fruto e nenhum atuador é disparado. |

No caso do dispositivo de monda, o critério a definir não é tão claro como no exemplo anterior. A taxa de acerto não é um fator significativo, já que a distribuição de classes das observações no campo poder variar significativamente, com a distribuição dos frutos, com as propriedades dos sistemas de sensorização e de atuação. Dependendo da duração do ciclo de operação do dispositivo, sensorização, processamento e atuação, uma vez que se pretende que o operador execute um movimento contínuo de varrimento ao longo de cada ramo com a maior rapidez possível, caso o ciclo de operação seja relativamente longo, no caso da ocorrência de um *FP*, os atuadores podem não se encontrar prontos para disparo quando seria realmente necessário dispararem para remover frutos. Adicionalmente, neste caso, pode ocorrer a remoção ou dano de frutos que devem permanecer na árvore. Na ocorrência de um *FN*, os frutos simplesmente não são detetados e portanto, caso devam ser

removidos, não o são. Ou seja, ambos os tipos de confusão debilitam significativamente a operação com sucesso do dispositivo. Assim, caso surgissem classificadores com desempenhos semelhantes mas diferentes equilíbrios entre sensibilidade e especificidade, não seria claro qual beneficiar. Apesar disto, fez-se questão de se calcular para consulta os valores de especificidade e sensibilidade. Contudo, existem várias métricas que procuram representar esse equilíbrio através de um único valor, tornando o processo de seleção em algo mais trivial.

5.7.2. Pontuação de Brier e pontuação quadrática

Entre algumas das métricas mais frequentemente utilizadas para a avaliação da adequação de modelos de previsão encontra-se a família de pontuações beta, constituída pelas pontuações logarítmicas, esférica e de Brier. Entre estas, um possível critério para a seleção da variante ótima é atender ao custo relativo entre classificações incorretas. Para um custo relativo igual, para os casos positivos e negativos, a métrica que melhor se adequa é a pontuação de Brier [146]. A pontuação de Brier (*Brier Score*), quando calculada com base em probabilidades posteriores, corresponde ao cálculo do erro quadrático médio, face àquilo que seriam as probabilidades posteriores ideais de um ponto de vista bayesiano, i.e., 1 para os casos positivos e 0 para os casos negativos. Esta métrica fornece então uma ideia geral do desempenho do classificador, sobre o conjunto de dados de treino, de uma perspectiva bayesiana. Para N observações, e com $o(i) = 1$ para amostragens pertencentes ao caso positivo e $o(i) = 0$ para amostragens pertencentes ao caso negativo, a pontuação de Brier pode-se calcular para um dado conjunto como:

$$BS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p(i) - o(i))^2 \quad (46)$$

Esta métrica resulta num valor nulo, caso a todas as observações seja atribuído o extremo correto da probabilidade posterior e um valor de 1, caso seja atribuído o valor extremo incorreto. Dado que é um erro quadrático, tende a valorizar de forma exponencial uma proximidade à condição ideal. Para que seja comparável com as restantes métricas, procedeu-se à sua inversão, subtraindo o valor resultante a 1. Esta métrica corresponde à chamada pontuação quadrática [147].

$$QS = 1 - BS \quad (47)$$

Esta métrica foi calculada para cada classificador construído.

5.7.3. Área sob a curva ROC e Coeficiente de Gini

Um classificador bayesiano binário classifica as observações com base no cálculo da probabilidade posterior do caso positivo, rotulando a amostra como positiva se esse valor se encontrar acima de uma determinada fronteira de decisão, e negativo caso se encontre abaixo. Todos os algoritmos explorados nesta dissertação podem ser implementados com esta perspectiva. Um aspeto interessante de tal implementação é que se torna possível proceder a uma regulação do desempenho, para um mesmo treino de um mesmo classificador, com base na modificação da fronteira de decisão. Note-se que um classificador que consiga uma separação perfeita das classes, nunca atribui uma mesma probabilidade posterior a observações de treino de classes diferentes. É possível definir uma fronteira de decisão até à qual todas as operações de treino se verificam pertencer ao caso negativo e a partir da qual todas as observações de treino verificam pertencer ao caso positivo. Contudo, isto não se costuma verificar em problemas reais.

A curva característica de operação do recetor (*Receiver Operating Characteristic - ROC*) é uma ferramenta útil para a escolha otimizada de uma fronteira de decisão de um sistema de classificação binária, assim como para avaliar a sua capacidade de discriminação. A curva ROC representa a relação entre a sensibilidade e a taxa de falsos positivos (*fpr*), ou seja, dos casos negativos qual a fração incorretamente classificada, com a variação da fronteira de decisão de probabilidade posterior entre 0 e 1.

$$fpr = 1 - \text{Especificidade} \quad (48)$$

Para qualquer sistema de classificação, com uma fronteira de probabilidade posterior localizada em 0, todas as observações são classificadas como positivas, o que resulta numa sensibilidade, assim como *fpr* de 1, correspondendo ao canto superior direito do plano da curva ROC. Já para uma fronteira de classificação de probabilidade posterior localizada em 1, para qualquer classificador, todas as observações são classificadas como negativas o que resulta numa sensibilidade e taxa de falsos positivos nulas, localizando-se esse caso no canto inferior esquerdo do plano da curva ROC. O conjunto de pontos intermédios entre estes extremos fornece uma indicação da capacidade de discriminação de um dado classificador. Para o caso de separação perfeita descrito anteriormente, a curva ROC descreve um ângulo reto, com um vértice no canto superior esquerdo. Isto deve-se ao facto de que no caso de haver uma separação completa das classes, à medida que se desloca a fronteira de decisão partindo de 0, e se ultrapassa o valor mínimo de probabilidade posterior atribuído a observações negativas, algumas observações destes casos passam a ser corretamente classificadas. Esta condição faz com que a taxa de falsos positivos decresça, sem no entanto afetar a sensibilidade, correspondendo a um deslocamento paralelo ao eixo horizontal.

Quando a fronteira de decisão atinge o valor de probabilidade posterior máximo atribuído a observações do caso negativo, então obtém-se uma taxa de falsos positivos nulos e uma sensibilidade de 1. Continuando a aumentar o valor limite a partir do ponto a que corresponde a probabilidade posterior mínima atribuída aos casos positivos, implica que alguns casos positivos sejam incorretamente classificados. Esta condição leva por sua vez à diminuição da sensibilidade, mas não da taxa de falsos positivos, correspondendo assim ao deslizamento ao longo do eixo vertical [148]. Mas, tal como referido anteriormente, este caso raramente se verifica. Então, geralmente um classificador apresenta uma curva entre os cantos inferior esquerdo e superior direito, com uma inflexão em direção ao canto superior esquerdo. Já para um classificador aleatório, a ROC descreve uma reta entre os cantos opostos do plano. Assim, além de estas curvas permitirem selecionar o equilíbrio desejado entre sensibilidade e *fpr*, ou analogamente a especificidade, torna possível avaliar a capacidade de discriminação de um dado classificador, através da observação do quanto este se aproxima do caso ideal de separabilidade, i.e., do quanto o ponto de inflexão se aproxima do canto superior esquerdo. Nos casos ilustrados na Figura 5.55, pode-se concluir que o classificador a que corresponde a curva traçada com traço contínuo apresenta uma maior capacidade de discriminação do que aquele corresponde à linha de traço interrompido. Adicionalmente, observe-se que com a aproximação à curva ideal, a área abaixo desta aumenta, aproximando-se da unidade. Assim, é possível extrair uma métrica simples, que quantifica a capacidade de discriminação de um classificador, a área abaixo da curva ROC (*Area under the ROC curve* - AUROCC ou AUC). Um classificador aleatório, com baixa capacidade de discriminação apresenta um AUROCC de 0,5. Um classificador com capacidade de separação perfeita apresenta um AUROCC de 1. Uma forma mais intuitiva de interpretar este valor, é como sendo a probabilidade do classificador atribuir uma probabilidade posterior ou pontuação, mais elevada a um caso positivo do que a um caso negativo, sendo também chamado de probabilidade de concordância ou índice-c. Contudo, o facto de o pior caso assumir um valor 0,5 não é muito prático para comparação com outras métricas. Então, é comum recorrer-se ao coeficiente de Gini, uma transformação linear da AUROCC, para o qual um classificador aleatório resulta num valor nulo, e um classificador que consegue uma separação perfeita das classes obtém um coeficiente unitário. Contudo, esta métrica perde a fácil interpretação anteriormente descrita.

$$G = 2 \times AUROCC - 1 \quad (49)$$

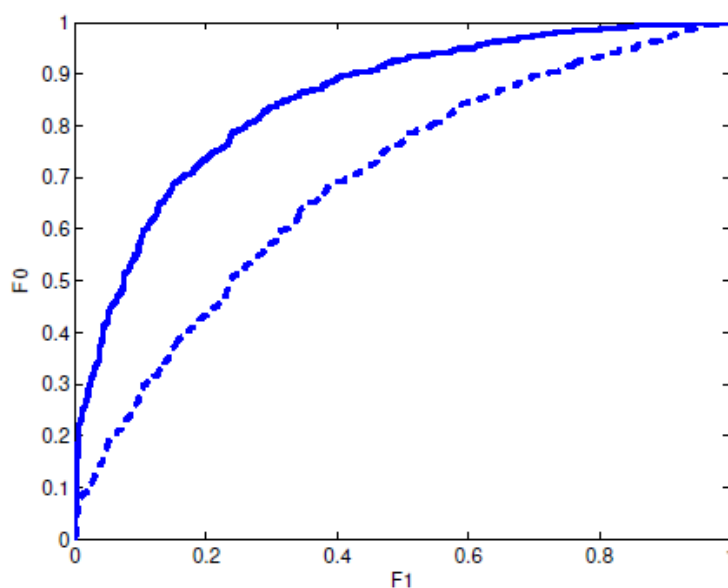


Figura 5.5 - Exemplos de curvas ROC[149].

Uma outra métrica, frequentemente chamada de pontuação $F1$, representa a mesma ideia que a $AUROCC$, mas adota como eixo horizontal uma métrica chamada precisão, a que corresponde a fração das observações classificadas como positivas que são realmente positivas. Contudo, esta métrica depende da prevalência das classes na população das observações de treino. Se o número de observações de treino do caso negativo for reduzido face ao número de observações da classe oposta, a precisão tenderá a ser elevada pois não é tido em conta o número de casos da classe em questão. Assim torna-se útil apenas em casos em que a prevalência das classes no contexto da aplicação é conhecida, e nesses casos tende de facto a evidenciar melhor as diferenças de performance entre classificadores. Como neste trabalho a distribuição de classe real é desconhecida, adotou-se o uso do coeficiente de Gini.

5.7.4. Coeficiente de correlação de Matthews

O coeficiente de correlação de Matthews (*Matthews correlation coefficient* - MCC) procura descrever a matriz de confusão com um único número, conferindo igual relevância a ambas as classes[150]. Corresponde à média geométrica de duas métricas provenientes da teoria da recuperação de informação: *Informedness*, correspondente à fração de observações de

treino do caso positivo corretamente classificadas (sensibilidade, subtraída da fração dos casos negativos que foram incorretamente classificados, correspondendo no plano da curva ROC à distância entre o ponto de funcionamento atual e a reta definida por um classificador aleatório; *Markedness*, corresponde à fração de observações classificadas como pertencentes ao caso positivo que pertencem realmente ao caso positivo (*true positive accuracy - tpa*), subtraída da fração de classificações negativas que foram incorretamente atribuídas (*false negative accuracy - fna*) [150].

$$tpa = \frac{TP}{TP + FP} \quad (50)$$

$$fna = \frac{FN}{TN + FN} \quad (51)$$

Ou seja, fornece um resultado que procura avaliar o classificador face ao seu desempenho a partir dos pontos de vista do classificador face às observações e vice-versa, de forma independente da prevalência das classes nas observações de treino. Pode ainda ser calculado a partir da raiz do teste de qui-quadrado, para a matriz de confusão, a dividir pelo número de observações. O teste de qui-quadrado procura testar a hipótese de que uma determinada amostra aleatória tenha sido extraída de uma população com uma distribuição multinomial, comparando os valores esperados para essa distribuição, com aqueles observados. Para tal, é calculada uma nova matriz, em que se redistribui o total de previsões de cada classe, i.e., a soma de cada coluna, de forma proporcional à prevalência de cada classe no conjunto de observações de treino. De seguida, calcula-se a fração entre o módulo da distância entre cada elemento da nova matriz e o elemento correspondente da matriz original. O qui-quadrado total é a soma destes valores. Através da consulta das tabelas da distribuição é possível obter num nível de confiança dos valores serem os mesmos ou mais extremos do que aqueles observados, distanciando-se de uma distribuição com grande dependência da prevalência de classes.

$$Informedness = tpr - fpr \quad (52)$$

$$Markedness = tpa - fna \quad (53)$$

$$MCC = \sqrt{\text{Informedness} \times \text{Markedness}} = \sqrt{\frac{\chi^2}{N}} \quad (54)$$
$$MCC = \frac{TP \times TN - FP \times FN}{\sqrt{(TP + FP)(TP + FN)(TN + FP)(TN + FN)}}$$

Para classificadores, que rotulem sempre como positivo ou sempre como negativo, o *MCC* é nulo. Para um classificador perfeito, que classifique corretamente todas as observações de treino, de ambas as classes, o *MCC* é igual a 1. Para um classificador que erre todas as classificações o *MCC* é igual a -1. Esta métrica foi calculada para todos os modelos construídos.

5.7.5. Validação cruzada

O objetivo último da escolha de um classificador deve assentar no facto de este apresentar um bom desempenho em dados nunca antes vistos, i.e., na sua capacidade de generalização, e não simplesmente no seu desempenho sobre o conjunto de observações de treino. No contexto desta dissertação, o que se pretende com a aplicação deste tipo de algoritmos é obter um mecanismo de deteção dos frutos nas árvores, pelo que o processo de seleção não deve atender apenas ao desempenho sobre as observações recolhidas em laboratório, num número limitado de ramos. Contudo, os procedimentos de treino dos classificadores procuram reduzir métricas de erro observadas para o próprio conjunto de treino, pelo que não existe qualquer garantia de que o classificador que apresenta os melhores valores das métricas de avaliação escolhidas para as observações de treino, seja o mesmo que apresentaria os melhores valores para novas observações. Para procurar resolver este problema, em contextos em que se disponha de uma grande quantidade de observações, pode-se dividir o conjunto total de observações em subconjuntos. Um conjunto de treino, é utilizado para proceder ao treino e otimizações dos classificadores, e um conjunto de validação é utilizado para efetivamente avaliar o seu desempenho, calculando-se a média das métricas de adequação de ajuste entre as observações deste conjunto. Por fim, procede-se à seleção do modelo a implementar, optando pelo classificador que apresentar em média a melhor combinação dessas métricas. Este método é chamado de particionamento de dados, ou validação *hold-out*. É frequente a utilização das razões de uma proporção de 70% das observações disponíveis, para treino, e 30% para teste. Por vezes, o subconjunto de treino é ainda subdividido num conjunto efetivamente utilizado para o treino dos classificadores, e um segundo subconjunto, chamado conjunto de validação, que se utiliza para a avaliação do desempenho dos classificadores, durante o processo iterativo de

otimização dos seus parâmetros. O conjunto de testes é então utilizado apenas após a decisão sobre qual será o modelo final, não se realizando posteriormente qualquer tipo de otimização. Assim, caso os classificadores aprendam a reconhecer as características aleatórias particulares do conjunto de treino, em vez de características que verdadeiramente diferenciem as classes a atribuir (*overfitting*), as métricas de adequação tendem a sugerir um bom desempenho sobre o conjunto de treino, ou de validação, mas quando avaliadas sobre o conjunto de teste evidenciam contraditoriamente uma fraca adequação. Repare-se que apesar de ocorrer *overfitting* ou não, as métricas avaliadas sobre conjuntos envolvidos, seja no processo de treino, ou de otimização dos classificadores, tenderão sempre a fornecer uma perspectiva otimista do seu desempenho, introduzindo enviesamento. Assim, o simples particionamento dos dados disponíveis pode resultar num mecanismo eficaz para a avaliação da capacidade de generalização dos classificadores. Apesar da sua simplicidade, existem dois aspetos que podem por em causa a sua utilidade: dependendo das observações contidas em cada particionamento criado, os valores das métricas de adequação podem variar significativamente; apenas o subconjunto de dados é efetivamente utilizado para o ajuste do modelo.

Frequentemente, tal como no trabalho realizado no âmbito desta dissertação, o número de observações disponíveis é limitado. O curso mais óbvio seria treinar e avaliar os classificadores sobre todo o conjunto de dados disponíveis, procurando um maior aproveitamento possível dos dados, a custo de se ficar sem um conjunto significativo de observações nunca antes vista pelo sistema, para avaliar de forma ótima o seu desempenho. O método *leave-one-out* procura colmatar ao máximo os problemas da estratégia de particionamento de dados, garantindo que todas as observações são utilizadas, de forma iterativa e sequencial, tanto para o processo de treino como para validação. Este método divide também os dados em dois conjuntos, contudo em vez de terem ambos tamanhos significativos, um grupo contém apenas uma observação, e o outro grupo todas as restantes. Sendo que em cada iteração a observação isolada é utilizada para validação e o grupo das observações restantes para treino. Este processo repete-se sequencialmente alternando a observação isolada para validação, até que todas tenham ocupado esse papel. Assim obtém-se uma classificação não enviesada para cada observação disponível. Além do enviesamento reduzido, esta técnica produz sempre o mesmo resultado, o que não acontece com os métodos de particionamento. Se o modelo treinado capturar perfeitamente as características do processo subjacente e não existir ruído nos dados, então o ajuste do modelo ao conjunto de treino e à observação isolada tenderá a aproximar-se. Normalmente, o ajuste à observação isolada verifica-se ser pior. A quantificação do quão pior é, fornece uma medida do *overfitting* do modelo, ou antagonicamente da sua capacidade de generalização.

Contudo, caso se disponha de um grande conjunto de dados, esta técnica pode custar em termos de consumo de tempo, uma vez que procede ao treino e validação tantas vezes quanto o número de observações. O método de validação cruzada *k-fold* segue o mesmo procedimento, mas para grupos de validação com mais do que uma observação, reduzindo o custo computacional. O conjunto de observações disponíveis é dividido em *k* subconjuntos (*folds*) do mesmo tamanho. Em cada iteração, um subconjunto é utilizado para a validação e os restantes para treino. Ou seja, o método *leave-one-out* corresponde ao caso particular do *k-fold* em que *k* é igual ao número de observações. Veja-se no entanto, que para qualquer *k* inferior ao número de observações, uma das desvantagens do método de particionamento, continua-se a verificar, uma vez que cada *fold* pode ser formado com diferentes combinações de observações. Este facto introduz variância ao longo de múltiplas reamostragens e enviesamento nas métricas resultantes das respetivas validações, sendo que com o aumento de *k* se tende a aumentar a variância e com a sua diminuição, tende-se a aumentar o enviesamento, aproximando-se da situação que se pretendia evitar em primeiro lugar. Isto deve-se ao facto de que para valores de *k* elevados os conjuntos de treino das diferentes iterações são semelhantes, e portanto as estimativas nelas baseadas apresentam uma elevada correlação. Por definição, as quantidades altamente correlacionadas tendem a apresentar uma média com variância também ela elevada, ao longo de múltiplas reamostragens. Assim, o *leave-one-out* tende a produzir os resultados com menor enviesamento possível, mas com a maior variância entre os métodos *k-fold*. A estratégia mais adotada para o processo de construção dos *folds* é fazer com que este seja realizado de forma tão aleatória quanto possível. De forma a adicionar uma maior robustez ao método, minimizando os efeitos da variância que se sabe existir, alguns investigadores repetem todo o processo de validação cruzada um dado número de vezes, para promover a precisamente a formação de *folds* com diferentes combinações de observações. Existem ainda investigadores que optam por recorrer a um algoritmo de *clustering*, em que se agrupam de forma não supervisionada observações semelhantes, e depois constrói-se cada *fold* com o maior equilíbrio possível de observações dos diferentes *clusters*, definindo assim um critério que elimina a possibilidade de construção de diferentes *folds*, mesmo para valores altos de *k* [140]..

Após a execução do ciclo de *k* validações, pode-se proceder à construção da matriz de confusão com as classificações resultantes ao cálculo da média das métricas de adequação em cada *fold*, assim como da sua variância ou desvio padrão. Por fim, procede-se à escolha do modelo cujas métricas sugerem o melhor ajuste aos dados. Note-se que essa avaliação é realizada sobre o que na verdade é uma média do desempenho de *k* classificadores distintos, que possuem os mesmos parâmetros de modelação, mas que são ajustados com base em conjuntos diferentes de dados. Assim, uma vez selecionado o modelo que apresenta a

melhor adequação, o classificador a ser efetivamente implementado é treinado com todas as observações disponíveis.

Existem outros métodos que procuram especificamente minimizar esta variância, mas tendem a apresentar um maior enviesamento, produzindo resultados geralmente mais pessimistas. Entre estes, o *bootstrap* é o mais popular. Este método produz consecutivas reamostragens com substituição com a dimensão igual à original, i.e., cria um novo conjunto através da seleção aleatória de N observações, a partir do conjunto original. No limite, pode gerar um conjunto constituído por N vezes a mesma observação. Contudo, as implementações mais comuns tendem a provocar que cerca de dois terços das observações disponíveis surja em cada reamostragem. Geralmente, os conjuntos gerados desta forma são utilizados para treino, e a validação é realizada sobre todas as observações do conjunto original que não se encontram em cada novo conjunto de treino gerado. Frequentemente, este processo é repetido N vezes, mas pode ser repetido tantas vezes quanto desejado. Por fim, calcula-se a média das métricas de adequação para se proceder à seleção do modelo com melhor ajuste.

Optou-se por se implementar a estratégia mais frequentemente utilizada, uma validação cruzada *10-fold*, com o cálculo da média e variância de cada métrica de avaliação da adequação de ajuste. Este processo foi aplicado a cada tipo de classificador. De forma a se produzir as avaliações com o menor enviesamento possível, seria necessário incluir os procedimentos de redução dimensional no ciclo da validação cruzada, ou seja, executar um *PCA* e *RELIEFF* para cada *fold* de cada classificador. Contudo, este procedimento aumentaria significativamente o tempo de execução do *script* responsável por construir e analisar os modelos de classificação. Assim, decidiu-se realizar estes procedimentos sobre o conjunto inteiro de dados. Caso a sua aplicação resulte em estimativas de adequação significativamente mais otimistas do que as dos casos sem redução dimensional, então proceder-se-á a uma revalidação mais extensiva dos modelos em questão.

6. Sistema de Atuação por Impacto e Elementos Estruturais

6.1. Seleção do tipo de atuador linear

A análise comparativa para a seleção do tipo de atuador a adotar incidiu sobre cinco fatores: geometria, força, curso, velocidade e custo. Para que se definissem constrangimentos geométricos, produziram-se modelos em cartão da estrutura toroidal, com base nos desenhos preliminares, com diferentes diâmetros internos (ver Figura 3.2). Esses modelos foram levados até a um pomar de pessegueiros, onde se testou e apurou qual o diâmetro interno que permitia executar o movimento de varrimento pretendido, ao longo dos ramos, com uma maior fluidez, i.e. sem que outros ramos ou os frutos se apresentassem como um obstáculo a esse movimento. Da estrutura toroidal resultante e da disposição de atuadores escolhida, verificou-se ser conveniente, para que não se tivesse de aumentar o volume do dispositivo, que a geometria de cada atuador não ultrapasse significativamente os 75 mm segundo a dimensão perpendicular ao eixo de atuação e 40 mm segundo a direção longitudinal. Adicionalmente, realizou-se a monda manual de pêssegos, o que permitiu estimar uma carga dinâmica equivalente necessária para a remoção dos frutos de cerca de 1 kgf (9,81 N).

$$F_{act} > 9,81 N$$

Apurou-se uma duração para operação de monda de cerca de 20 minutos por árvore por pessoa, correspondendo com os valores encontrados na literatura mencionados nas especificações definidas anteriormente. Considerando um pessegueiro com um total de 55 ramos mistos, obtém-se um tempo de aproximadamente 22 segundos por ramo. A maior parte dos ramos apresenta um comprimento entre 30 a 70 cm, ou seja, 50 cm de média, pelo que se pode calcular que a velocidade de varrimento que o dispositivo de monda tem de vencer para apresentar vantagem face ao método manual é de 2,27 cm/s. Arbitrando um coeficiente de segurança de 1,25, obtém-se aproximadamente:

$$v_{\text{varr}} > 2,85 \text{ cm/s}$$

Os pessegueiros apresentam em média 4,3 flores por cada 10 cm de ramo. Considerando uma taxa de vingamento de 70%, aproximadamente a média das taxas observadas em [151], resultam cerca de 3 frutos por cada 10 cm de ramo. Considerando uma distribuição uniforme desses frutos, e que numa dada situação se pretende remover 2 frutos seguidos com o mesmo atuador, obtém-se uma distância de 5 cm entre centróides dos frutos, o ponto de impacto ideal. Assim, atendendo à velocidade de varrimento anteriormente definida, para que o atuador esteja pronto a disparar entre dois frutos, pode-se calcular um período de ciclo de atuação máximo de:

$$t_{\text{act}} < 1,75 \text{ s}$$

Dada a geometria da estrutura do dispositivo e o seu posicionamento face aos frutos, tem-se que cada actuador deve apresentar no máximo um curso de:

$$d_{\text{act}} < 40 \text{ mm}$$

Então a velocidade linear mínima do atuador vem:

$$v_{\text{act}} > 4,57 \text{ cm/s}$$

Como se pode observar na Tabela 6, as soluções encontradas apresentam-se como sendo sobredimensionadas face aos requerimentos do dispositivo de monda, e conseqüentemente demasiado volumosas e onerosas. No caso dos atuadores eletromecânicos, a maior parte das soluções apresenta uma estrutura demasiado longa e aquelas mais compactas, mas de performance elevada, são demasiado onerosas. Por vezes, estes requerem ainda a aquisição de um controlador específico, o que acresceria ainda ao seu custo. Existem soluções mais compactas e menos onerosas, mas falham em cumprir simultaneamente os requerimentos de força e velocidade. Geralmente apresentam uma força elevada, mas uma velocidade reduzida por se basearem em motores de passo. No que diz respeito aos solenóides comuns, sejam tubulares ou *open frame*, para o curso pretendido, apresentam também um comprimento demasiado elevado, e o número de fabricantes que produzem solenóides com curso suficiente é limitado. Os solenóides chamados de *linear voice coil*, seriam uma excelente opção, mas o seu preço é proibitivo. Além disso, o diâmetro do veio dos atuadores eletromecânicos e solenóides tende a ser pouco ideal, superior a 1 cm, o que se aproxima ao diâmetro dos frutos. A solução que melhor se adapta ao dispositivo de monda, entre aquelas encontradas no mercado, são os atuadores pneumáticos, pois permitem elevadas

velocidades de atuação e exercem grandes forças de impacto. A carga lateral máxima admissível pode representar um problema, já que para atuadores pneumáticos compactos, os fabricantes recomendam valores inferiores a 1 N. Tendo em consideração a força de impacto que se pretende exercer e a imprevisibilidade da existência de obstáculos no meio de operação, seria impossível garantir tal condição. Além disso, os atuadores pneumáticos apresentam o inconveniente de requerer elementos adicionais, no mínimo, um compressor, unidade de filtragem e regulação, e um bloco de electroválvulas, o que poderia comprometer a eficiência energética, o conforto de utilização e manobrabilidade do dispositivo.

Tabela 6 - Síntese dos critérios de seleção do tipo de atuador linear a adotar.

| | Eletromecânicos [152, 153] | Solenóides [154, 155] | Pneumáticos [156] |
|--------------------|---|--|--|
| Variantes | Actuador de fuso Actuador de esferas | Tubulares <i>Open Frame</i> <i>Linear Voice Coil</i> | - |
| Geometria | 83x41x41 mm | 184x79x73 mm | 79x15x19 mm |
| Força máxima | 800 N | 58 N | 55 N |
| Curso máximo | 50 mm | 38 mm | 40 mm |
| Velocidade máxima | 20 cm·s ⁻¹ | 50 cm·s ⁻¹ | 500 cm·s ⁻¹ |
| Custo unitário | >300€ | >45€ | >35€ + Alimentação e comando >200€ |
| Outras observações | Existem soluções mais compactas e de custo inferior, mas falham em cumprir os requisitos de força ou velocidade. Regra geral, possuem força elevada, mas baixa velocidade. Os de velocidade elevada são demasiado caros. Os comprimentos mínimos encontrados rondam os 20 cm. | Geralmente não são apropriados para ciclos de trabalho curtos. Solenóides <i>open frame</i> apresentam uma melhor relação preço/custo mas são mais volumosos. <i>Linear voice coil</i> são essencialmente um motor linear, mas com preço proibitivo. | Requer compressor, filtro e bloco de válvulas. |

Tendo em conta estas considerações, decidiu-se projetar um atuador linear customizado compacto e de baixo custo, com especificações ajustadas à aplicação em questão. Este atuador é constituído por um servomotor de baixo custo, cujo movimento rotacional é convertido em linear através da transmissão entre um pinhão montado no veio do servo e uma cremalheira redonda, que age como veio do atuador (ver Figura 6.1). No Anexo I encontram-se os desenhos técnicos das diferentes figuras expostas neste capítulo.

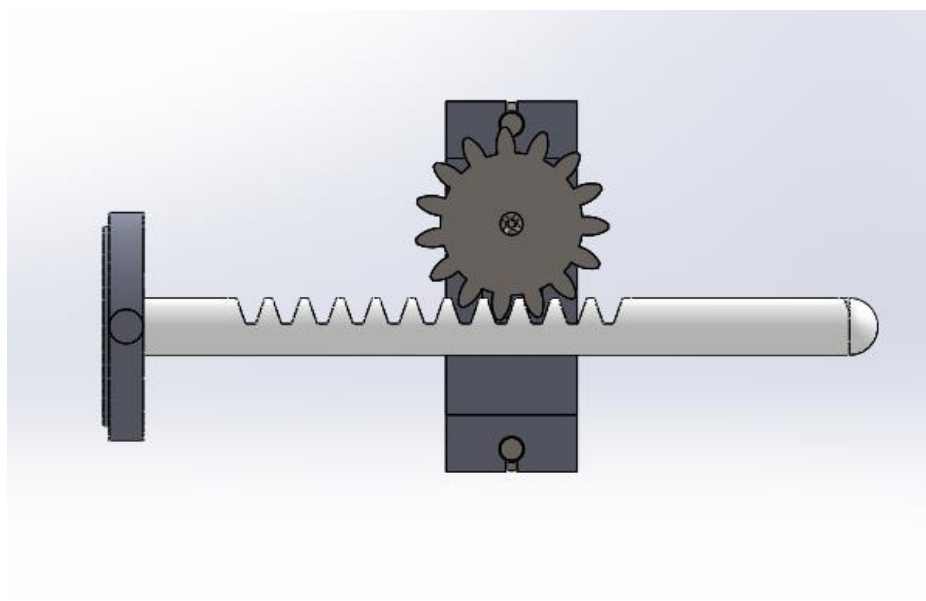


Figura 6.1- Cremalheira redonda.

Esta abordagem também poderia ser concretizada com recurso a motores DC comuns, com caixa redutora, um encoder e controlo PID, contudo tenderia a resultar num maior volume [152]. Poder-se-ia também pensar em recorrer a motores de passo, já que permitem uma grande precisão de controlo de posição. Contudo, estes são também significativamente mais volumosos e tendem a apresentar uma velocidade rotacional baixa. O maior inconveniente da solução que se decidiu adotar é o facto de que geralmente os servomotores de baixo custo não apresentam especificações técnicas de grande relevo, nomeadamente, não é comum ser disponibilizada a curva velocidade-binário, nem uma medida de precisão de controlo de posição radial. Contudo, dada a existência de um sistema de *feedback*, a velocidade tende a manter-se razoavelmente constante para cargas dentro dos valores máximos especificados. Adicionalmente, contêm desde logo integrado um circuito de controlo e devido à caixa redutora que possuem integrada, apresentam uma densidade de potência bastante elevada. Através de uma breve pesquisa, verificou-se a existência de

diversos produtos que apresentavam uma combinação de binário e velocidade máxima significativamente superiores aos requeridos, com uma geometria extremamente compacta, pelo que se decidiu avançar com esta abordagem. As especificações do servomotor adotado seguem na Tabela 7.

Tabela 7 - Especificações dos servomotores Feetech FS90R [167].

| | |
|---|--|
| Dimensões (mm) | 32 x 30 x 12 |
| Binário de bloqueio (N.mm) | 147 (1,5Kg.cm) |
| Velocidade rotacional sem carga (rad/s) | 13,6 (130 RPM) |
| Tensão de Alimentação (V) | 6 |
| Consumo em repouso (mA) | 6 |
| Consumo em bloqueio (mA) | 650 |
| Sinal de controlo PWM (μ s) | Sentido horário: 1500 a 700 Sentido anti-horário: 1500 a 2300 |

Note-se que o binário de bloqueio verifica a condição da carga dinâmica equivalente necessária, para qualquer engrenagem de transmissão com um raio primitivo inferior a 15 mm. Uma velocidade de 130 RPM corresponde a 2,17 ciclos por segundo ou 0,46 segundos por ciclo, pelo que verifica a condição relativa à velocidade de actuação, com um coeficiente de segurança de 3,8, no caso mais crítico, em que se realize uma rotação completa para a extensão do veio de uma rotação para a sua recolha. Após a receção dos motores e um breve ensaio, foi reconhecido um lapso, a velocidade mínima requerida não depende apenas do ciclo de trabalho pretendido, uma vez que o que se pretende é produzir uma força de impacto. Contudo, mesmo sendo conhecidas as dimensões e conseqüente massa do veio, a força de impacto impelida aos frutos, resultante da variação de momento linear do veio, é de difícil estimativa, uma vez que os frutos se encontram fixos às árvores através dos pedúnculos, elementos de grande flexibilidade. Então, introduziu-se uma mola para armazenar energia durante a recolha do veio e libertá-la rapidamente no disparo, procurando-se maximizar a energia cinética conferida ao veio (ver Figura 6.2.)

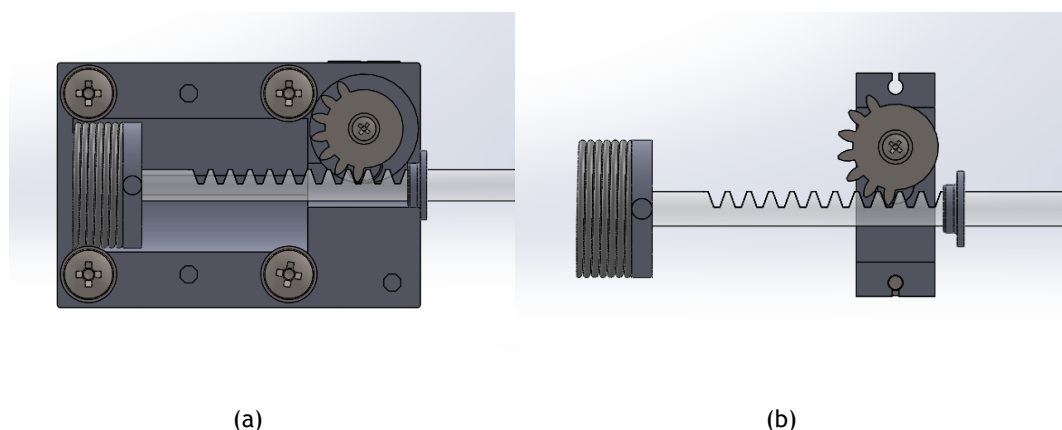


Figura 6.2 - Mola.

Posteriormente, reconheceu-se ainda que a força de atrito da caixa redutora não era suficiente para impedir a rotação do motor uma vez recolhido o veio. Testou-se a hipótese de aplicação de uma tensão constante aos terminais do motor, de forma a se manter um binário mesmo quando cessado o envio de um comando de movimento. Contudo, verificou-se que o aumento do consumo de corrente era demasiado elevado face à capacidade da bateria selecionada, cerca de 10 mA por servomotor. Optou-se então por uma solução mecânica adicionando-se um mecanismo de lingueta e roda de lingueta (ver Figura 6.2).

6.2. Dimensionamento dos órgãos de máquina

6.2.1. Valores de partida

Decidiu-se que a prototipagem do actuador seria baseada em impressão 3D com filamento de ABS, cujas propriedades mecânicas se apresentam na Tabela 8, pelo que para o dimensionamento dos órgãos mecânicos, foram consideradas as seguintes propriedades:

Tabela 8 - Propriedades mecânicas do plástico ABS [157]

| Módulo Elástico (GPa) | Coefficiente de Poisson | Tensão de cedência à tração (MPa) | Tensão de cedência à flexão (MPa) | Coefficiente de atrito |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 2,25 | 0,35 | 42,5 | 60,6 | 0,46 |

É necessário garantir que o momento linear que o servomotor e mola conferem à cremalheira excedem a carga dinâmica equivalente estipulada (F_{act}), ao longo de todo o seu curso útil. Uma vez que o dimensionamento através da simples variação de momento linear requeriria o período de impacto para o cálculo do impulso, período esse que é desconhecido e de difícil estimativa, o critério adotado focou-se em garantir que as tensões no órgão mecânico que exerce a força de impacto, a cremalheira, são conhecidas e correspondentes à de carga dinâmica equivalente estipulada.

Os métodos energéticos, permitem relacionar a energia cinética de um corpo com as tensões desenvolvidas pela aplicação de uma carga dinâmica sobre este [158]. Resolvendo a equação das tensões desenvolvidas numa peça submetida a esforço axial por impacto, em ordem à velocidade, para a cremalheira vem:

$$v_{cr, fw} > \sqrt{\frac{\sigma_{imp, cr}^2 V_{cr}}{m_{cr} E_{cr}}} \quad (55)$$

$$\sigma_{imp, cr} = \frac{F_{act}}{A_{imp, cr}} \quad (56)$$

Através de desenhos preliminares verificou-se que uma cremalheira em ABS redonda de 5 mm de diâmetro, módulo 1 e cerca de 60 mm de comprimento, satisfaria o curso necessário e permitiria atingir frutos individuais, mesmo aqueles de dimensões mais reduzidas. Esta geometria resulta num volume de 1101 mm³ e massa de 1,178 g. Assumindo uma área de impacto correspondente a uma circunferência de 2 mm de diâmetro, através das equações 53 e 54 determina-se:

$$v_{cr, fw} > 2,01 \text{ m/s}$$

Pelo que se verifica ser muito superior ao requisito de velocidade imposto pelo ciclo de trabalho pretendido, tornando-se este o critério dominante.

6.2.2. Mola de compressão

A especificação mais fundamental para a definição da mola a implementar é a sua constante k , que relaciona a compressão x em relação à posição de equilíbrio, com a força axial que esta exerce. A força produzida pela mola relaciona-se com a aceleração com que a

cremalheira é impelida e por conseguinte com o seu momento linear ao longo do curso útil do atuador.

Arbitrando dimensões para este elemento, de até 20 mm de diâmetro, 2 mm de espessura e 50 mm de comprimento livre, obteve-se um intervalo de valores de k razoáveis entre 100 e 400 N/m e uma massa de cerca de 8,5 g. A compressão da mola tem de ser superior ou igual ao curso pretendido, de 35 mm. Arbitrou-se ainda o critério de que a velocidade mínima para conferir à cremalheira o momento linear necessário para gerar a carga dinamica equivalente pretendida, seja atingida após decorrido 2 mm do curso, uma vez comprimida 35 mm e libertada. Desprezando o atrito, pode-se igualar a energia cinética do sistema mola-cremalheira ao trabalho desenvolvido pela mola. Resolvendo para a constante de mola k , torna-se possível calcular o valor mínimo desta grandeza, para que se garanta o cumprimento do critério acima descrito. Considerando que a origem do referencial do curso se encontra na extremidade da mola, quando esta se encontra sem carregamento, atendendo ao ponto em que a extremidade da cremalheira se localiza após a compressão e um outro correspondente ao deslocamento de 35 mm uma vez libertada, $x_{ml,1}$ e $x_{ml,2}$, respectivamente, para que cumpra a condição de velocidade vem:

$$k_{ml} > v_{ml,2}^2 \times \frac{m_{ml} + m_{cr}}{x_{ml,1}^2 - x_{ml,2}^2} \quad (57)$$

Realizando as substituições necessárias determina-se um valor para a constante da mola de:

$$k_{ml} > 302,4 \text{ N/m}$$

Após uma consulta da oferta de vários fabricantes, selecionou-se uma mola com 40 mm de comprimento livre, 18 mm de diâmetro interno, 20 mm de diâmetro externo e constante de mola de 306 N·m⁻¹. Interessa que se verifique a sua resistência à deformação, encurvadura e fadiga. Uma propriedade importante para a definição das molas é o índice que relaciona o diâmetro médio da mola com o diâmetro do arame [159]:

$$C = \frac{D_{ml,med}}{D_{arame}} \quad (58)$$

A tensão devido ao corte e torção do arame de uma mola à compressão, é dada por:

$$\tau_{ml} = K_{sc} \frac{8FD_{ml,med}}{\pi D_{ml,arame}^3} \quad (59)$$

Onde K_{sc} é um fator de correção de tensões, que atende ao facto de a encurvadura da mola levar a uma tensão acrescida:

$$K_{sc} = \frac{4C + 2}{4C - 3} \quad (60)$$

Para molas de compressão em aço de corda de piano, na gama de diâmetros considerada, a tensão admissível é dada por :

$$\tau_{adm,ml} = 0,45 \times \frac{2211}{D_{ml,arame}^{0,145}} \quad (61)$$

Assim, para a mola escolhida e atendendo à carga dinâmica equivalente dimensionada, através das equações 58, 59, 60 e 61 verifica-se que:

$$\tau_{ml} = 506,9 \text{ MPa} < \tau_{adm,ml} = 2708 \text{ MPa}$$

Pelo que se obtém um factor de segurança superior a 5. Apesar de a mola estar envolvida por uma estrutura tubular com folga reduzida, trata-se de um elemento esbelto, pelo que é conveniente fazer uma verificação de resistência à encurvadura, através da seguinte equação:

$$L_{livre} < 2,63 \frac{D_{ml,med}}{0,5} \quad (62)$$

Neste caso o comprimento livre é de 40 mm. Substituindo-se o diâmetro na equação 62 obtém-se:

$$L_{livre} = 40 < 99,9 \text{ mm}$$

Pelo que se verifica não existir perigo de falha por encurvadura.

Dado que a aplicação em questão sujeita a mola a cargas dinâmicas, torna-se também importante avaliar a sua resistência à fadiga. De acordo com o critério de falha de Sines [159], a vida à fadiga das molas não depende da componente média da carga dinâmica, apenas da sua amplitude. Uma vez que neste caso a mola é carregada entre $F_{act,min}$ e uma

carga nula a amplitude corresponde a metade de $F_{act,min}$. A componente de tensão correspondente pode ser calculada através da equação 59.

$$\tau_{amp,ml} = 253,4MPa$$

Zimmerli realizou ensaios de fadiga com molas e apurou uma componente de amplitude de tensão máxima, para vida infinita, de 241 MPa para molas sem tratamento superficial e 398 MPa para molas com tratamento por grenalhagem [160]. Assim, se possível, deve-se optar por molas com tratamento superficial. Contudo, caso não haja disponibilidade ou o custo de molas com e sem tratamento apresente uma diferença significativa, para efeitos de prototipagem, a diferença entre as duas opções não é crítica, atendendo ao facto de que o valor da componente de amplitude da tensão calculada excede apenas em cerca de 5% a tensão recomendada para molas sem tratamento.

6.2.3. Cremalheira e pinhão

Existem diversos mecanismos de conversão de movimento rotacional em linear, sendo que os mais comuns recorrem a fusos, jugo escocês, cames ou bielhas. Contudo, um dos mecanismos mais simples e mais compactos, sendo também de uso comum, é o mecanismo de cremalheira e pinhão. O movimento rotacional do pinhão, uma engrenagem, induz a translação da cremalheira, uma barra dentada equivalente a uma engrenagem de diâmetro primitivo infinito [160]. O dimensionamento destes elementos teve como foco a minimização do seu volume, pelo que a estratégia adotada, passou pelo arbítrio de dimensões razoáveis e a conseguinte verificação do cumprimento das especificações funcionais e critérios de resistência dos materiais.

A geometria de um pinhão pode ser especificada através de duas grandezas, o diâmetro do círculo primitivo e o módulo. O diâmetro do círculo primitivo permite regular a velocidade linear e força de *output*, face à velocidade angular e binários transmitidos pelo servomotor. O módulo regula a razão de contacto da interação entre duas engrenagens e consequentemente a sua durabilidade, uma vez que estabelece as dimensões e número de dentes, assim como o número médio de dentes que interagem em cada instante.

O raio primitivo máximo pode ser calculado atendendo à força que é necessária para comprimir a mola, e ao binário transmitido pelo servomotor (T_{servo}). Dado que não é conhecida a curva binário-velocidade, inclui-se um fator de 0,7 para que se faça uma estimativa conservadora:

$$r_{prim} < \frac{0,7 \times T_{servo}}{kx} \quad (63)$$

Substituindo os valores obtém-se:

$$r_{prim} < 9,72 \text{ mm}$$

Assim, considerou-se a utilização de uma engrenagem com um ângulo de pressão de 20°, 15 mm de diâmetro primitivo, 5 mm de largura de dente e módulo 1. Sendo o propósito do mecanismo comprimir uma mola até um dado ponto e mantê-la fixa nessa posição até que seja dado um sinal para o disparo do atuador, momento esse em que através de um pequeno deslocamento do motor a mola é libertada, a engrenagem desenhada contém apenas o número de dentes necessário para que o arco do círculo primitivo correspondente se aproxime ao curso pretendido. O diâmetro primitivo define a velocidade linear da cremalheira durante a recolha da mola. Relacionando a velocidade máxima do servomotor (ω_{servo}), afetado por um coeficiente de segurança, a velocidade de recolha vem dada por:

$$v_{cr,bw} = r_{prim} \omega_{servo} \times 0,7 \quad (64)$$

$$v_{cr,bw} = 0,0715 \text{ m/s}$$

A tensão mais crítica para a verificação da resistência de uma engrenagem, surge na raiz dos dentes devido à sua flexão. A metodologia mais adotada passa por considerar cada dente como sendo uma viga encastrada-livre. Esta consideração deu origem à equação da flexão de Lewis[161, 162]. Uma vez que a força máxima é dada pela lei de Hook da mola de compressão, vem:

$$\sigma_{fl,th} = \frac{k(x_{ml,1} - x_{ml,2})}{e_{th} M y} \quad (65)$$

Onde e_{th} é a espessura dos dentes, M o módulo e y o fator de forma de Lewis, que se encontra tabelado em função do número total de dentes (ver Figura 6.3).

Estas considerações desprezam, contudo, a carga de compressão a que os dentes ficam também sujeitos, e o facto de a força transmitida ser suportada em cada instante por mais do que um dente em cada engrenagem. A metodologia AGMA atende a este facto com a

introdução de uma série de fatores. A utilização de apenas o coeficiente de velocidade K_v , permite geralmente uma estimativa suficientemente fiável. Este define-se como a razão entre o carregamento em que ocorre falha num ensaio estático e o carregamento em que ocorre falha num ensaio a uma dada velocidade. Para uma dada velocidade V , pode-se obter estimativa conservadora deste coeficiente recorrendo à seguinte expressão:

$$K_v = \frac{3,05 + v_{cr,bw,max}}{3,05} \quad (66)$$

Este coeficiente entra então como um fator multiplicativo na equação Lewis:

$$\sigma_{fl,th} = \frac{K_v k (x_{ml,1} - x_{ml,2})}{e_{th} M y} \quad (67)$$

O fator de Lewis do pinhão (0,290) faz com que este seja mais crítico do que a cremalheira (0,485) no que diz respeito à resistência, pelo que os cálculos referentes à resistência dos dentes serão baseados no pinhão. Com as equações 66, 67 e 68, para a recolha da cremalheira, obtém-se:

$$K_v = 1,023 ; \sigma_{fl,th} = 7,56MPa$$

Assim, no que diz respeito à resistência dos dentes do pinhão e cremalheira, atendendo-se à tensão de cedência do plástico ABS, verifica-se um fator de segurança de 5,62.

Interessa agora, após o dimensionamento de todos os elementos e conhecida a velocidade de avanço final, verificar a resistência da cremalheira ao impacto. Recorrendo novamente às equações 53,54 e 55 e atendendo à secção de menor área da cremalheira, ou seja, excluindo o volume dos dentes, resulta que a velocidade e tensões máximas a que a cremalheira fica sujeita durante o avanço são:

$$v_{cr,fw,max} = 6,08m/s ; \sigma_{cr,max} = 9,45MPa ;$$

Pelo que a cremalheira verifica um coeficiente de segurança de 4,50 à resistência ao impacto (ver Figura 6.3). O desenho técnico destes elementos encontram-se no anexo I, nas figuras A.1 e A.3.

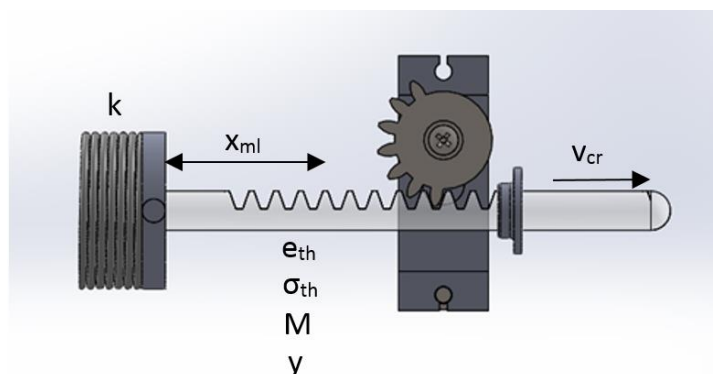


Figura 6.3 - Ilustração dos parâmetros envolvidos no dimensionamento à resistência.

6.2.4. Roda de lingueta e lingueta

Uma vez construído e testado um protótipo do actuador com o servomotor e mola (ver Figuras 6.1 a 6.3), observou-se que a força de atrito do conjunto do motor e caixa redutora que constitui o servomotor, não era suficiente para que, uma vez comprimida a mola, esta se mantivesse nesse estado até que fosse fornecido um sinal para disparo. A estratégia adoptada consistiu em fornecer uma tensão constante directamente aos terminais do motor para que os seus enrolamentos se mantivessem em carga gerando um binário, suficiente para manter a mola comprimida, mas simultâneamente insuficiente para iniciar a rotação do veio do motor. Contudo, verificou-se que para que isso fosse possível, o consumo de corrente, considerando que existem 6 actuadores no dispositivo, iria resultar num aumento significativo face às estimativas preliminares e inviabilizar o uso da bateria seleccionada, para que se conseguisse a autonomia pretendida de 8 horas diárias. Assim, procedeu-se ao dimensionamento de uma solução de travamento mecânico. O mecanismo de roda de lingueta e lingueta (ver Figura 6.4), permite a rotação da engrenagem apenas num único sentido, além de indexar o movimento.

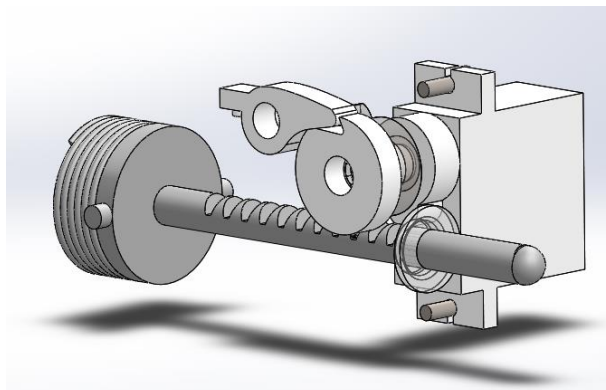


Figura 6.4 - Roda de lingueta e lingueta.

Para que se garanta a fixação da mola à compressão, é necessário que exista um ponto de engrenagem numa posição radial precedente ao ponto de compressão máxima desejada, pois a lingueta necessita de ultrapassar completamente o dente da roda que demarca esse ponto. Ou seja, é necessário existir uma folga, chamada frequentemente em inglês de *backlash* [163]. Assim, uma vez comprimida a mola e deixando de se mover o motor, a mola de compressão tem liberdade para descomprimir, movendo a roda de lingueta ao longo de uma distância igual à folga conferida, até se dar o engreno entre os dois elementos. Este movimento por sua vez, induz uma força de impacto entre a lingueta e a roda. A folga necessária depende do arco percorrido pela extremidade da lingueta na transição entre o estado desengrenado a engrenado. Esse movimento pode ser induzido simplesmente pela força da gravidade, caso a orientação em que o mecanismo é utilizado o permita. Contudo, para que se reduza a folga necessária e os esforços resultantes que tendem a diminuir a vida do mecanismo, é comum introduzir uma mola que carrega a lingueta de forma a forçar o contacto permanente com a roda e agilizar o engreno. Neste caso, uma vez que alguns dos atuadores vão operar em posições opostas face ao sentido da força gravítica, a sua inclusão é essencial.

O desenho do mecanismo deve garantir que ao se traçar uma linha perpendicular à face do dente engrenado da roda de lingueta, esta passe entre os eixos de rotação de ambos os elementos (ver Figura 6.4). Esta linha permite então definir o ângulo dos dentes da roda de lingueta, uma vez arbitradas as posições dos eixos de rotação de ambos os elementos do mecanismo. O mecanismo pode ser desenhado para que a lingueta fique à tracção ou à compressão, puxando ou empurrando a roda, quando esta é carregada de forma a induzir movimento no sentido não permitido. A geometria dos restantes elementos sugeriram ser

mais conveniente que a lingueta ficasse à compressão e motivou também a decisão da posição óptima para o eixo de rotação da mesma. Seguindo a metodologia recomendada, estes constrangimentos permitem determinar o ponto de interceção da lingueta com o dente da roda no ponto de engrenagem. Traçando uma linha perpendicular à face do dente da roda, esta deve passar entre os eixos de rotação dos dois elementos. Além disso, para que o engrenamento seja possível, deve-se garantir que o ângulo das faces que interagem na engrenagem sejam superiores ao ângulo de atrito correspondente ao coeficiente de atrito estático do material (COF)[164], que se determinou experimentalmente ser 0,46. Sendo ϕ o ângulo entre o plano do dente da roda e uma linha que interceta a extremidade do dente no ponto de engrenagem e o eixo de rotação da roda, tem-se:

$$tg(\phi) > COF \quad (68)$$

Atendendo à componente normal da força exercida pela lingueta sobre a face do dente da roda, a tensão do momento fletor que surge no dente é dada por [165]:

$$\sigma_{fl,r} = \frac{6 \times F_r \times h_r}{e_r \times s_r^2} \quad (69)$$

Onde h_r é a altura do dente, e_r a sua espessura e s_r o comprimento da face de contacto da lingueta com a base do dente da roda. A tensão máxima na lingueta calcula-se como:

$$\sigma_{fl,l} = \frac{6 \times F_n \times d_r}{e_r \times s_r^2} + \frac{F_n}{e_r \times s_r} \quad (70)$$

Onde F_n é a componente normal da força transmitida e d_r a distância entre o eixo de rotação da lingueta e a face exterior do dente da roda, segundo a direção normal a esse mesmo plano.

Como condições de partida para o projeto, definiu-se que o diâmetro interno da roda de lingueta deveria ser igual ao do pinhão do mecanismo dimensionado anteriormente, 12,5 mm, e tendo em conta os limites impostos pelo invólucro previamente desenhado, arbitrou-se uma espessura de 3,5 mm e uma altura de dente de 2,5 mm. Procedendo às substituições necessárias nas equações 66, 67 e 68, determina-se:

$$s_r > 5,1 \text{ mm}$$

Dada a baixa especificidade dos métodos de projeto encontrados e o número de dimensões arbitradas, procedeu-se a um ensaio de esforços computacional, recorrendo às capacidades de simulação do Solidworks [166] (ver Figura 6.5), para uma verificação adicional da resistência dos componentes. Este ensaio evidenciou que as tensões na aresta da raiz do dente da roda poderiam ser significativamente reduzidas com um pequeno arredondamento. Verifica-se um factor de segurança superior a 15, face à tensão admissível à flexão. O desenho técnico da roda de lingueta e lingueta, encontram-se no anexo I, figuras A.1 e A.2, respectivamente.

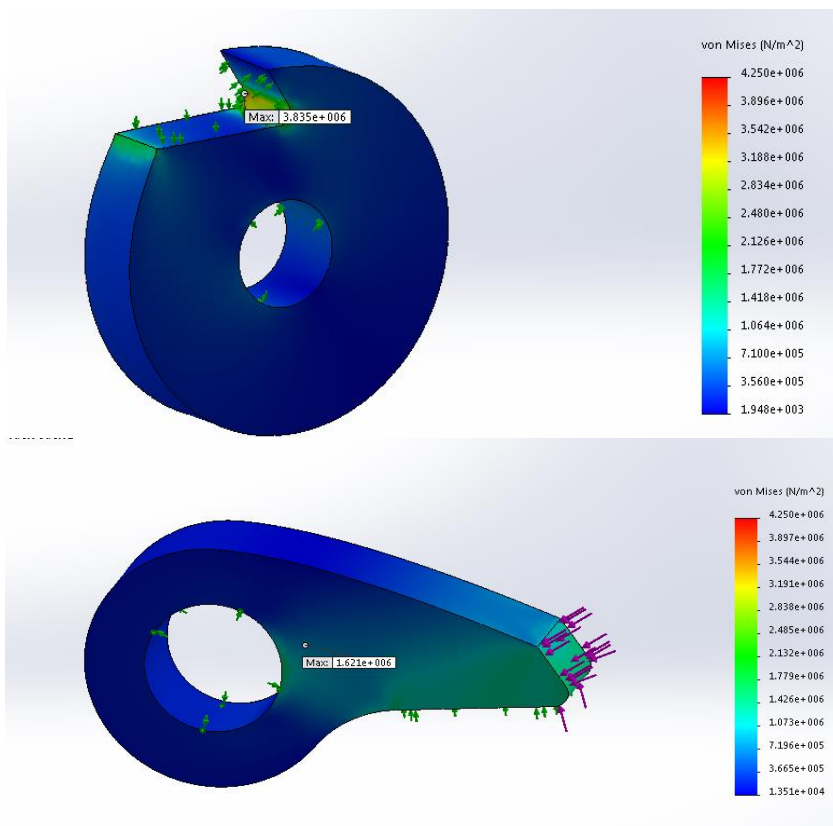


Figura 6.5 - Ensaio de esforços , roda de lingueta e lingueta.

6.2.5. Desenho de conjunto

Na figura 6.6 pode-se observar o conjunto dos elementos dimensionados, montados no interior de uma caixa tornada transparente para permitir a visualização dos mesmos. Adicionalmente no anexo I, podem-se observar desenhos técnicos dos elementos desenhados. Esta caixa permite o encaixe entre atuadores, conferindo modularidade ao design. A figura evidencia o modo de operação do atuador. O servomotor move uma engrenagem com um número de dentes que corresponde ao deslocamento linear necessário para comprimir a mola até ao ponto desejado. Num ponto próximo deste último, a lingueta engrena na roda correspondente (a transparente na face da engrenagem), permitindo manter a posição sem requerer consumo de energia, já que este mecanismo bloqueia a rotação no sentido oposto ao da compressão da mola. Estando o último dente em contacto com a cremalheira e a mola comprimida, ao deslocar a engrenagem para lá desse ponto leva à libertação da mola, que impele na cremalheira a força de impacto responsável pela remoção de frutos, o mecanismo de lingueta mantém-se desengrenado.

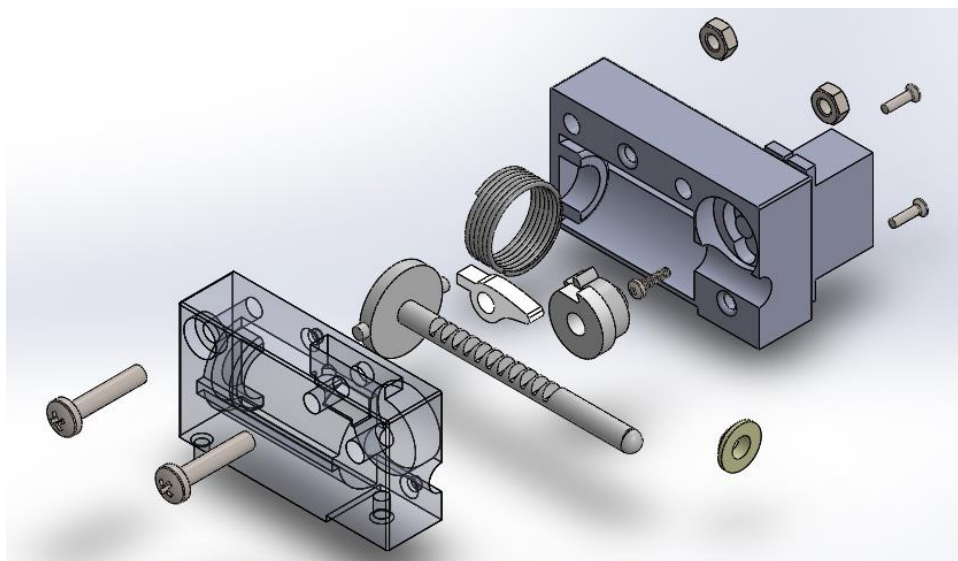


Figura 6.6 - Desenho de conjunto do atuador dimensionado.

7. Controlo, Regulação e Comando

7.1. Introdução

Nos capítulos 4 e 5 descreveram-se e desenvolveram-se as componentes de hardware e investigaram-se algoritmos que poderão permitir caracterizar os frutos e a envolvente de operação do dispositivo. No capítulo 6 procedeu-se ao dimensionamento dos elementos que permitem realizar a remoção mecânica dos frutos. Torna-se então necessário fornecer uma plataforma para a implementação dos algoritmos de aprendizagem de máquina selecionados, e que permita sequenciar essa recolha e processamento de informação com o acionamento dos actuadores, de acordo com uma dada estratégia. Os ensaios durante a fase de desenvolvimento de cada um dos elementos realizaram-se em laboratório recorrendo a fontes de alimentação. Contudo, para que o dispositivo de monda pudesse operar no campo e manter-se ergonómico, decidiu-se que este seria alimentado por uma bateria. Dada a existência de diferentes níveis de tensão nos subsistemas vistos anteriormente, torna-se necessário proceder à sua regulação e distribuição a partir da bateria, recorrendo-se a elementos de electrónica adicionais.

7.2. Software de controlo

7.2.1. Microcontrolador TM4C123

Toda a componente de controlo do dispositivo foi implementada através da programação de um microcontrolador TM4c123GH6PM da *Texas Instruments* [167], que se baseia num processador ARM Cortex-M4 de 32 bit, possui 256 kB de memória flash, SRAM de 32 kB, uma EEPROM de 2kB e opera a uma frequência de até 80 MHz. Este microcontrolador possui vários periféricos de comunicação: 4 módulos de SSI, 4 módulos de I²C, 2 controladores CAN, e periféricos úteis para a integração do sistema, tais como: o μ DMA (Micro Direct Memory Access) que permite a comunicação entre periféricos através de hardware, poupando assim recursos computacionais e um módulo de hibernação, que permite diminuir o consumo energético em fases de operação que não requeiram o uso do microcontrolador, tendo

particular interesse por o dispositivo ser alimentado a bateria. Contudo, os periféricos mais vantajosos para a realização deste trabalho e que mais contribuíram para a escolha deste microcontrolador são os 2 módulos de PWM (*Pulse Width Modulation*), cada um com 4 geradores o que permite o controlo de até 8 servomotores. Os 2 módulos de conversão analógica-digital (ADC - *Analog-to-Digital Converter*) de 12-bit, permitem obter uma frequência de amostragem de 1 MSPS, sendo importante para a digitalização dos sinais dos sensores; além disso possui uma unidade de vírgula flutuante e algumas instruções típicas de um processador digital de sinal (DSP - *Digital Signal Processor*), o que o torna ideal para executar algoritmos de aprendizagem de máquina e as operações de aritmética de sinal necessárias para a deteção e avaliação dos frutos.

7.2.2. Estrutura para o caso ideal

No caso ideal, os sensores ultrassónicos, em conjunto com as técnicas de aprendizagem de máquina descritas no capítulo 5, possibilitariam a deteção e avaliação do calibre dos frutos. Uma vez ligado o dispositivo através do interruptor On/Off, o software começaria por configurar e inicializar os periféricos necessários do microcontrolador. De seguida, entraria no *loop* principal onde em cada ciclo seria emitida uma onda, recebida e analisada a onda reflectida, aplicado um critério de decisão que indicaria se existe algum fruto que deve ser removido e qual o atuador mais apropriado para o remover, e nesse caso disparado o respectivo atuador.

A função da emissão da onda ultrassónica, *pwm_TX()*, comuta as saídas digitais do multiplexer dos sensores para direccionar o sinal para o sensor indicado pela variável de *input* e habilita um canal de PWM por um número de ciclos fixo, imposto por um temporizador. A aquisição da onda refletida, dá-se através da função *adc_RX()*, que habilita um canal de um módulo ADC e espera até que a tensão lida suba acima de um limite pré-determinado, que indica a chegada da onda. A partir desse instante, o valor de cada aquisição é guardado num *array*, por um número de ciclos de aquisição fixo, correspondente à janela temporal utilizada na investigação dos algoritmos de aprendizagem de máquina. A função *signal_proc()* seria responsável por aplicar a fronteira de decisão resultante do algoritmo de aprendizagem de máquina selecionado, responsável por determinar a existência ou não de fruto, assim como quaisquer outras operações de processamento de sinal que permitissem avaliar o fruto, no caso de ter sido detectado. Uma vez terminado o varrimento de todos os sensores, seria aplicado um critério de decisão, implementado na função *dec_crit()*, que ditaria se existe algum fruto que deve ser removido, e qual o atuador mais apropriado para o fazer. Este critério poderia ter fatores como: calibre e estado de maturidade dos frutos, assim como parâmetros de optimização heurísticos, como por exemplo o número de frutos

detetados mas cuja decisão foi não remover, desde que ocorreu a última remoção. Por último, caso resultasse que existe um fruto detectado e que o critério adotado ditasse que deveria de ser removido, a função *act_shoot()*; receberia o número do atuador a ser disparado e procederia ao disparo, através da seleção do canal do multiplexer dos servomotor do actuador correspondente, e habilitando o output de um gerador PWM, em primeiro lugar, com um *duty cycle* correspondente à rotação no sentido de avanço do veio, por um período fixo controlado por um temporizador, e da mesma forma, para recolher o veio após disparo. A estrutura do software de controlo do dispositivo para o caso ideal aqui descrita encontra-se exposta na Figura 7.1 para descrever de forma concisa o funcionamento do algoritmo de controlo.

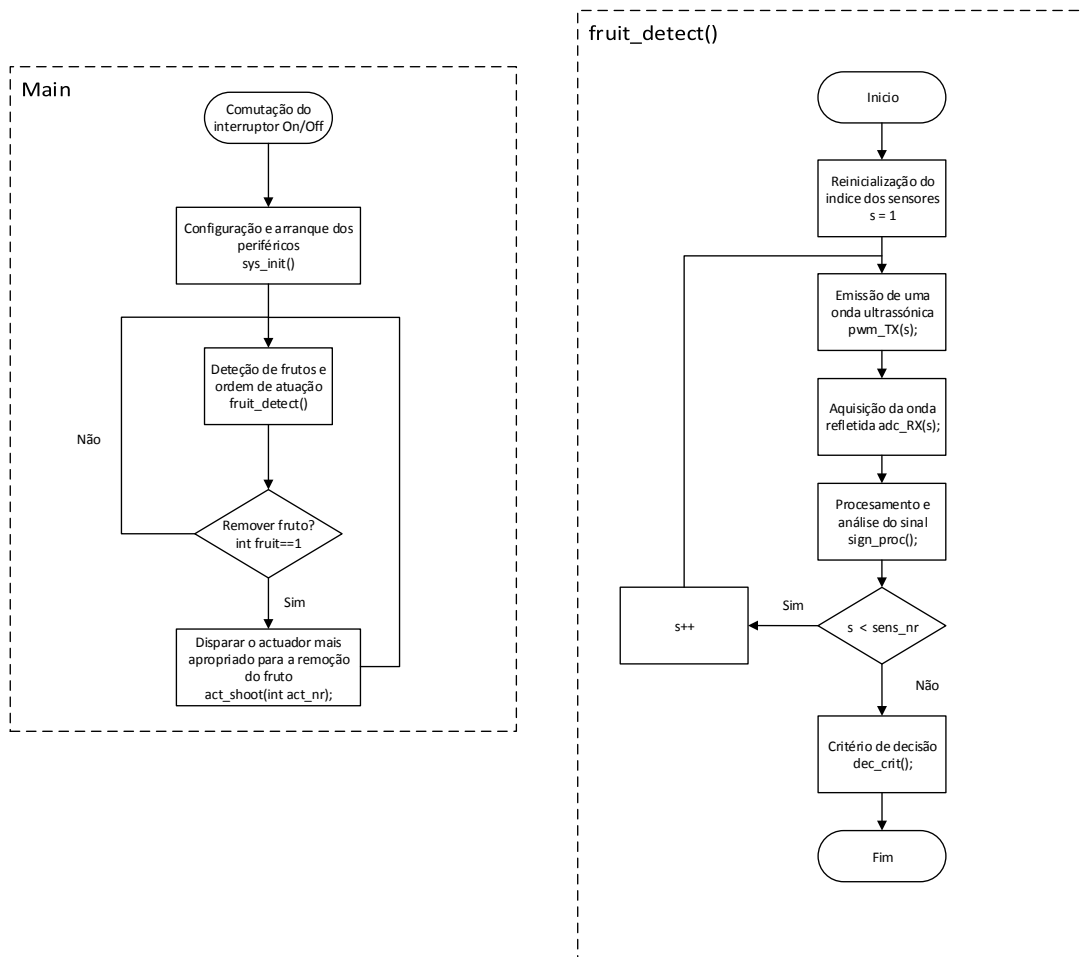


Figura 7.1- Estrutura do software de controlo do dispositivo para o caso ideal.

7.2.3. Estrutura implementada

Uma vez decorrida a investigação dos algoritmos de aprendizagem de máquina com base em sinais de ondas ultrassónicas recolhidas em laboratório, verificou-se não ser possível detetar os frutos com a estratégia adotada. Assim, procurou-se desenvolver um protótipo que executaria apenas uma sequência de actuação dos atuadores, sem sensorização, e de fácil reprogramação, pelo que o software efetivamente desenvolvido inclui apenas rotinas de controlo e sequenciação de accionamento dos servomotores. O fluxograma exposto na Figura 7.2 apresenta a estrutura geral do programa implementado.

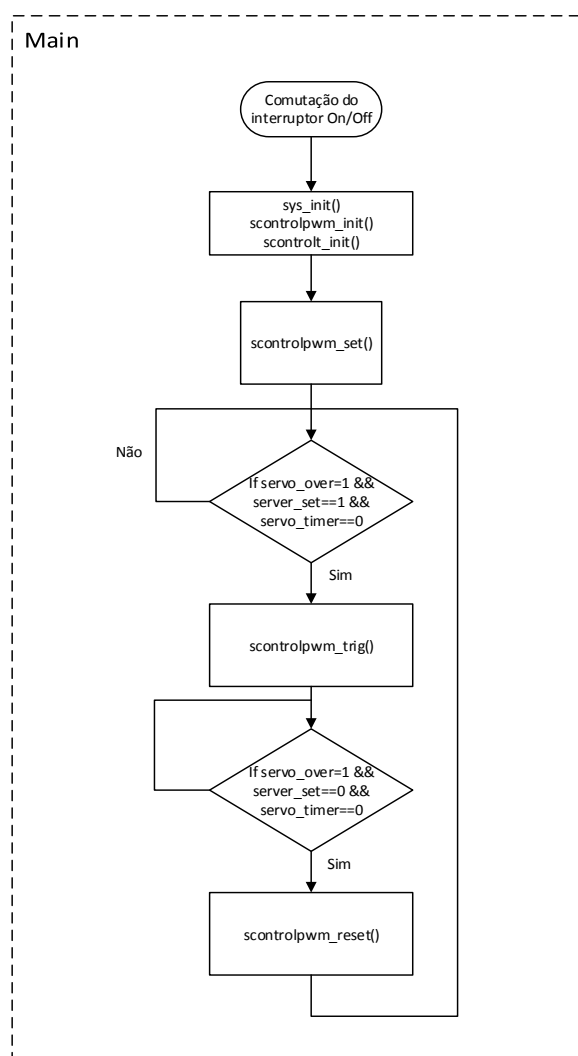


Figura 7.2 - Estrutura geral do programa implementado.

Nesta estrutura, após o arranque do microcontrolador, através da comutação do interruptor de on/off do dispositivo, são configurados e inicializados todos os periféricos necessários. A rotina *sys_init()* procede à configuração do relógio, assim como das entradas e saídas digitais. As rotinas *scontrolpwm_init()* e *scontrolt_init()* gerem a configuração e inicialização dos periféricos relacionados com o controlo dos servomotores, um gerador de PWM e um temporizador, respectivamente. De seguida, é executada a rotina *scontrolpwm_set()* que recolhe o veio de todos os atuadores. O programa entra então num *loop* infinito, onde são executadas, sequencialmente e repetidamente, as rotinas *scontrolpwm_trig()* e *scontrolpwm_reset()*, sendo que a primeira é responsável pelo disparo de cada atuador, um por cada ciclo, e a segunda rotina responsável por recolher o atuador respetivo.

As funções que dizem respeito à configuração e gestão de interrupções do temporizador, são identificadas pelo prefixo *scontrolt*. A sequenciação e prevenção de falhas destas duas funções são conseguidas através de uma intermediação com três variáveis de estado. A variável *servo_over* indica o estado do PWM que conduz os servos. A variável *servo_reset* indica se o veio do último actuador disparado já foi recolhido e a variável *servo_timer*, representa o estado de habilitação do temporizador que controla os períodos de avanço e recuo dos servomotores.

As 3 funções de controlo dos motores apresentam essencialmente a mesma estrutura. A título de exemplo, na Figura 7.3, pode-se observar o diagrama de fluxo da rotina *controlpwm_set()*. Para cada servomotor a rotina começa por atualizar o período do temporizador. De seguida, altera o canal ativo do multiplexer que conduz o sinal PWM até cada servomotor; atualiza as variáveis de estado descritas anteriormente, para indicar que o servomotor ainda não procedeu ao avanço, nem houve recolha do veio do atuador e que a contagem do temporizador vai ser iniciada; habilita o temporizador, dando início à contagem do período de recuo do servomotor; e por fim habilita o gerador de PWM dando início à condução do servomotor. Nesta função, este processo repete-se na forma de um ciclo *for*, sequencialmente para cada servomotor. O que difere entre esta e as restantes funções de controlo motor, são os períodos utilizados para os respetivos movimentos, e o facto de as restantes funções não conterem um ciclo *for*. Todas estas funções são indexadas por duas variáveis globais: *servo_seq* e *seq_step*, que indicam o número de cada sequência com 6 movimentos e o passo de cada sequência que se encontra em execução em cada instante. As sequências são facilmente reprogramáveis, uma vez que a variável *servo_seq* é uma matriz com 6 colunas, na qual cada elemento representa o índice de cada atuador (0 a 5) que é disparado em cada um dos passos da sequência. Para se adicionar uma nova sequência basta que se escreva uma nova linha com a sequência de atuação desejada, e se altere o valor da variável global *num_seqs* para o número de linhas da matriz *servo_seq*. A

primeira linha desta matriz contém a sequência utilizada pela função *scontrolpwm_set()*, pelo que não deve ser alterada. Contudo, as funções *scontrolpwm_trig()* e *scontrolpwm_reset()* não contêm nenhum ciclo. Uma vez terminada a execução da função *scontrolpwm_set()*, os índices *servo_seq* e *seq_step* são colocados a 0 e 1, respetivamente, sendo que a última função de cada ciclo de actuação, *scontrolpwm_reset()*, é responsável pelo incremento e reinicialização desta variáveis globais. É evidente que neste caso não existem quaisquer tipo de processos concorrentes, pelo que as funções *scontrolpwm_trig()* e *scontrolpwm_reset()* poderiam ser agregadas, contudo, a sua separação permite uma maior modularidade e conseqüentemente uma maior facilidade para eventuais desenvolvimentos futuros.

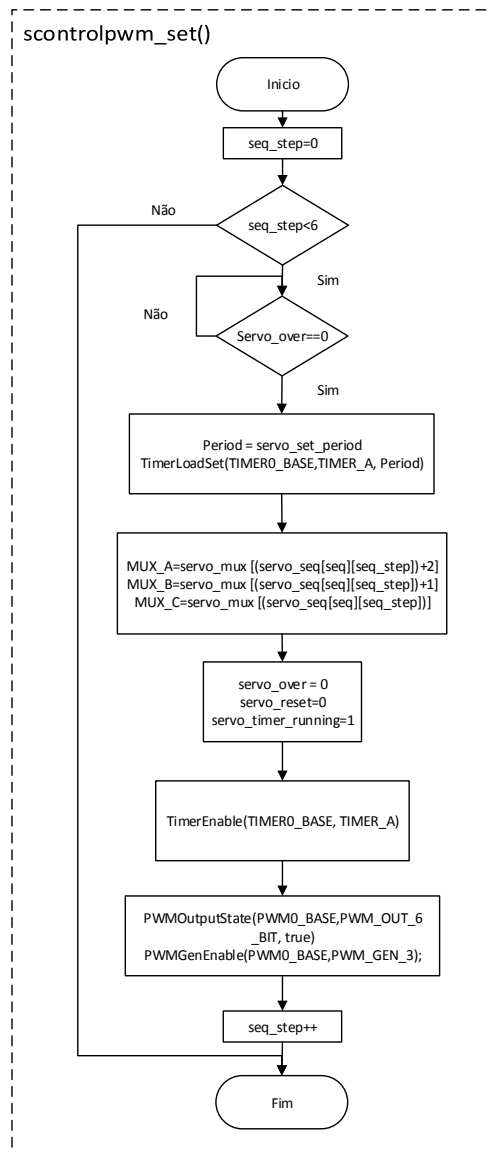


Figura 7.3-Diagrama de fluxo da função *scontrolpwm_set()*.

7.3. Bateria e circuito de alimentação

7.3.1. Dimensionamento da bateria

Uma das especificações definidas para o dispositivo de monda, foi que este deveria possibilitar a operação durante 8 horas diárias entre carregamentos da bateria. Os elementos que mais consomem energia no sistema são os servomotores, pelo que para se obter uma estimativa conservadora, considerou-se que além da corrente consumida em repouso por cada um dos 6 servomotores, em metade do ciclo de trabalho existe um servo a consumir a corrente máxima (ver Tabela 7). Adicionalmente, foram contabilizados os consumos máximos do microcontrolador, dos amplificadores operacionais e multiplexers, mencionados no capítulo 4. A estimativa de consumo resultou na necessidade de uma bateria com uma capacidade superior a 6,4 A.h, pelo que se adquiriu uma bateria de 12V, 7 A.h, com um peso de 2,4 Kg [167]. Uma bateria com estas características apresenta um baixo custo e não afeta significativamente a ergonomia do equipamento.

7.3.2. Circuito de alimentação

O sistema engloba elementos que operam a 3 níveis de tensão diferentes. A bateria, multiplexers e amplificadores operacionais a 12 V, o microcontrolador a 5 V, e para que se faça uso máximo da potência dos servomotores, estes são alimentados a 6 V. Então, torna-se necessário proceder à regulação de tensão, partindo da bateria, para os restantes dois níveis, tendo-se para esse efeito recorrido a dois reguladores LDO (*Low-dropout*). Um BA60BC0FP-E2, com tensão de saída fixa de 6 V, e um MAX8881EUT50+T, com tensão de saída fixa de 5 V. Os aspetos mais relevantes tidos em consideração para a sua seleção foram os respetivos limites de corrente, potência máxima dissipada e corrente quiescente. Inicialmente consideraram-se as configurações recomendadas para os filtros de *input* e *output*, resultando na configuração ilustrada na Figura 7.4.

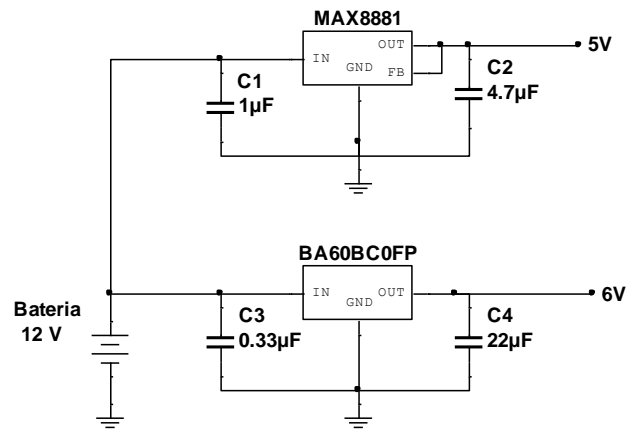


Figura 7.4 - Esquema de regulação de tensão.

7.4. Nota conclusiva

Neste capítulo procedeu-se à descrição da estratégia de controlo ideal, e daquela que realmente foi implementada. Foi também descrita a configuração do circuito de regulação de tensão necessário para a alimentação dos diversos elementos do sistema.

8. Análise e Discussão de Resultados

8.1. Introdução

Nos capítulos anteriores foi descrita toda a pesquisa que levou à formulação de um conceito para o dispositivo de monda, assim como as etapas de projeto de cada um dos elementos constituintes. Neste capítulo procede-se à descrição das observações e resultados decorrentes dos processos realizados com o objetivo de materializarem aquilo que foi anteriormente projetado, e do trabalho de investigação relativo aos algoritmos de aprendizagem de máquina para a deteção de frutos.

8.2. Desempenho do sistema de sensorização

8.2.1. Coeficiente de reflexão e target strength

De forma a confirmar-se a elevada impedância acústica dos frutos verdes, procedeu-se a um ensaio experimental para a estimativa da massa específica e velocidade de propagação do ultrassom através dos mesmos, utilizando-se uma amostragem de 5 frutos. As medições do para o cálculo da massa volúmica realizaram-se recorrendo a uma balança digital ($\pm 0,005$ g), a uma proveta ($\pm 0,25$ ml) e a uma bureta ($\pm 0,05$ ml). Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 9, tendo-se obtido uma massa específica média de 1072 kg/m^3 , sendo aproximadamente mil vezes superior à do ar atmosférico, o que só por si sugere uma impedância acústica muito superior.

Tabela 9 - Massa, volume e massa volúmica de frutos verdes.

| Diâmetro (mm) | m (g) | v (ml) | ρ (kg·m ⁻³) |
|---------------|-------|--------|--|
| 6,5 | 0,410 | 0,500 | 820,0 |
| 10,5 | 1,23 | 1,00 | 1230 |
| 12,5 | 1,27 | 1,25 | 1016 |
| 14 | 1,40 | 1,30 | 1077 |
| 15 | 2,19 | 1,80 | 1217 |
| | | | $\bar{\rho} = 1072 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ |

Para a medição da velocidade de propagação tentou-se inicialmente recorrer a um equipamento de instrumentação tipicamente utilizado para analisar estruturas de cimento e metal (Proceq Tico). Contudo, provavelmente devido ao diâmetro dos transdutores, cerca de 3 vezes superiores ao diâmetro dos frutos, os valores obtidos variavam significativamente, mesmo quando executadas medições consecutivas com um mesmo fruto. Assim, optou-se por fazer uso dos transdutores adquiridos, de 40 kHz, e extrair a velocidade de propagação através da medição do diâmetro dos frutos e da medição do período de tempo decorrente entre a emissão da onda por parte de um transdutor e receção parte do segundo transdutor, tal como ilustrado na Figura 8.1a. Os terminais do transdutor emissor encontravam-se ligados a um gerador de impulsos programável Philips PM5781, configurado de forma a emitir 8 impulsos com 14,5 V de amplitude a 40 kHz, uma vez pressionado um botão de *trigger* manual.

O ganho foi obtido através de um reajuste iterativo, até o sinal do transdutor recetor ser observável. Um osciloscópio digital Isotech IDS6072A-U, iniciava a captura do sinal de ambos os transdutores pela deteção do flanco ascendente do sinal do transdutor emissor. Verificou-se a existência de um acoplamento entre o transdutor emissor e o canal do osciloscópio do transdutor recetor (a azul na Figura 8.1b), devendo-se provavelmente ao elevado ganho do amplificador. Mesmo com o transdutor desconectado de GND e do amplificador, a ponta de prova captava os impulsos do emissor com uma amplitude de cerca de 40 mV. Contudo, pretendia-se apenas obter uma estimativa da ordem de grandeza da impedância acústica dos frutos, para confirmar a premissa de que o coeficiente de reflexão é suficientemente elevado para se desprezarem as perdas associadas à transmissão através do fruto, não

requerendo uma medição precisa da velocidade de propagação. Assim, prosseguiu-se com o ensaio, após se verificar que o sinal associado ao acoplamento se mantinha constante.

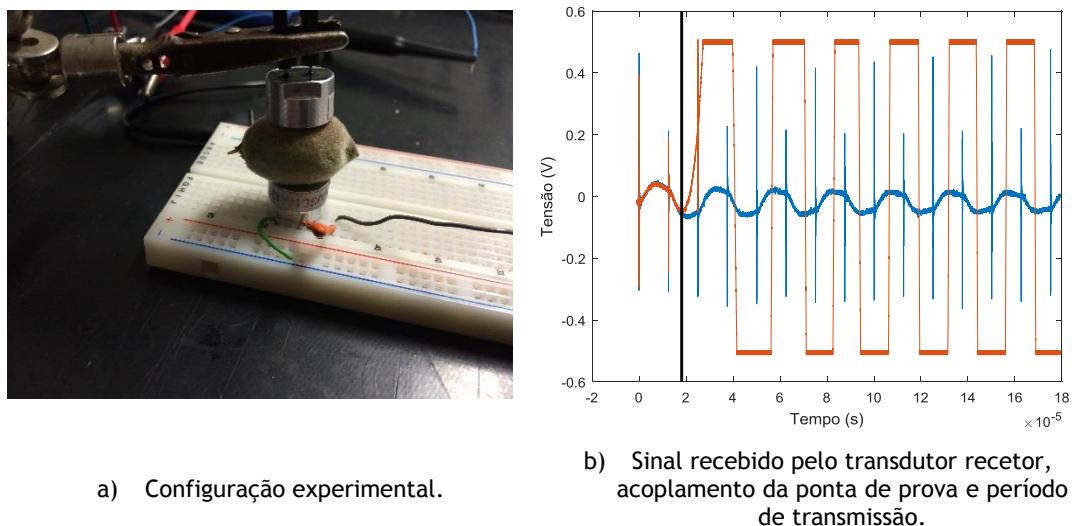


Figura 8.1 - Medição da velocidade de propagação do ultrassom através de frutos verdes.

Os sinais capturados, associados ao acoplamento indesejado e às formas de onda recolhidas da transmissão através de cada fruto, foram importados para o Matlab e após visualização dos mesmos foi isolada a janela temporal de interesse. Foi desenvolvido e executado um *script* que estima os períodos de tempo de transmissão através de cada fruto, calcula as correspondentes velocidades de propagação, as impedâncias acústicas, os coeficientes de reflexão e as respetivas médias entre os 5 frutos. O *script* começa por carregar um ficheiro com os dados mencionados anteriormente. Os diâmetros dos frutos, correspondentes aproximadamente à distância percorrida pelas ondas ultrassónicas, assim como as massas volúmicas apuradas, foram guardados no formato vetorial como constantes. Para cada ponto amostrado, de cada forma de onda, a amplitude do sinal da transmissão é comparado com a amplitude do sinal associado ao acoplamento, calculando-se o módulo da diferença. Quando o módulo da diferença excede um limite heurísticamente definido, é executada uma verificação para evitar falsos positivos associados a ruídos ou outros artefactos, que consiste em observar se instantes após o ponto identificado a diferença de amplitudes se mantém superior ao limite definido. Desta forma é encontrado, aproximadamente, o instante em que o transdutor recetor recebe a onda transmitida através do fruto, ou seja, o período de tempo de propagação da onda através do fruto. Para cada amostragem é traçado um gráfico contendo a forma de onda do sinal transmitido, a forma de onda do sinal de acoplamento e uma linha vertical preta (ver Figura 8.1b), que assinala o instante identificado como o início da receção, permitindo assim uma validação visual dos resultados. Os sinais de transmissão

encontram-se aparentemente saturados, no entanto, isto deve-se apenas à escala selecionada no osciloscópio e ao modo como este exporta as formas de onda. De facto, não ocorreu saturação sendo a amplitude observada muito inferior à alimentação e ao correspondente ponto de saturação dos amplificadores operacionais. Com os valores dos períodos de tempo determinados, são calculadas as restantes propriedades, através das equações 8, 9, 12 e 13. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10- Coeficiente de reflexão do interface ar atmosférico - fruto, atenuação por absorção e *target strength*.

| Diâmetro (mm) | c (m·s ⁻¹) | z _{us} (Rayl) | R' _{us} | -2αd + TS (dB @5cm) |
|---------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 6,5 | 712 | 5,84×10 ⁵ | 0,999 | -55,9 |
| 10,5 | 579 | 5,88×10 ⁵ | 0,999 | -51,8 |
| 12,5 | 648 | 6,98×10 ⁵ | 0,999 | -50,3 |
| 14 | 482 | 5,93×10 ⁵ | 0,999 | -49,3 |
| 15 | 534 | 6,50×10 ⁵ | 0,999 | -48,7 |
| | $\bar{c} = 591$ | $\bar{z}_{us} = 6,23 \times 10^5$ | $\bar{R}'_{us} = 0,999$ | $\overline{-2\alpha d + TS} = -51,2$ |

Verificou-se que os valores de massa específica se aproximaram dos valores mencionados anteriormente, apresentados em [168]. Já no que diz respeito à velocidade, apresentaram-se como sendo significativamente inferiores. Contudo, e tal como esperado, o coeficiente refletivo do interface ar-fruto apresenta-se como sendo extremamente elevado, aproximando-se à unidade. Além disso, aproximando os frutos a esferas e atendendo à absorção por parte do ar atmosférico, para um fruto a 5 cm de distância, na ausência de obstáculos, um transdutor observaria uma atenuação de cerca de 51,2 dB, do sinal recebido após reflexão face ao sinal emitido, o que representa uma perda pouco significativa atendendo aos ganhos típicos das cadeias de aquisição em sensorização. Assim, verificou-se de facto que o principal elemento de atenuação no ambiente de operação são as folhas, sendo a sua atenuação, incluindo a refração, de difícil quantificação e altamente dependente do ângulo de incidência das ondas.

8.2.2. Desempenho dos circuitos condução e recepção

O circuito de recepção e condicionamento de sinal de ondas ultrassônicas, ilustrado na figura 4.10, demonstrou o comportamento desejado, tal como se pode observar a título de exemplo na Figura 8.2, para uma onda próxima dos 40 kHz. A amarelo pode-se observar a onda recebida por um transdutor, e a azul a saída do bloco de condicionamento, apresentando um ganho e *offset*, muito próximos dos valores para os quais o circuito foi dimensionado, 66 e 1,65 V respetivamente.

O circuito de condução de transdutores funcionou como pretendido, à excepção do bloco de amortecimento. Como se pode verificar na Figura 8.3, a condução dos transdutores, quando realizada de forma contínua, funciona de forma aceitável, mesmo para os transdutores de frequência central superior, apesar de o efeito do *rise time* limitado ser notável nos flancos. Contudo, seria essencial possuir a capacidade de realizar medições de tempo de voo a distâncias tão reduzidas quanto 2 cm, o que impõe um limite de *ringing time* de 117 μs , tal como indicado no capítulo 4. Contudo, não foi possível verificar um amortecimento tão intenso quanto necessário, para que se obtivesse esse efeito. Apesar de a componente do controlo operar correctamente, como se verifica na Figura 8.4, para os transdutores de 40 kHz, o *ringing time* é superior a 250 μs , com amplitude na ordem dos sinais recebidos, o que impossibilita a recepção de reflexões até aquele ponto no tempo, que por sua vez estabelece uma distancia minima mensurável superior à pretendida. Além disso, quando realizadas sucessivas comutações, verificou-se que o comportamento tornava-se instável devido aos transientes. Foram realizadas várias experiências, com ajustes do valor dos componentes da ponte RLC, e como comutação para *ground*, mas sem sucesso.

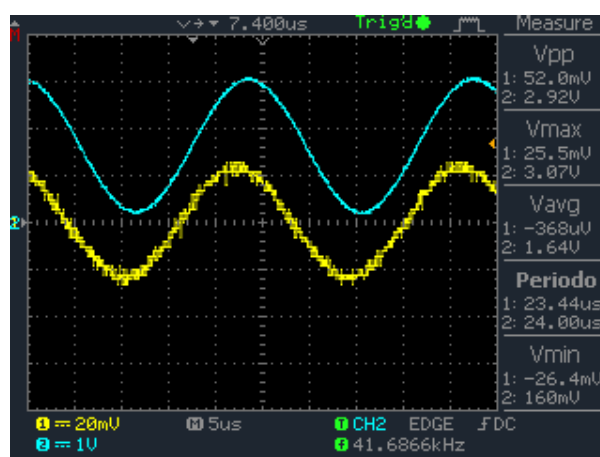


Figura 8.2 - Operação do circuito aquisição e condicionamento de sinal de ondas ultrassônicas.

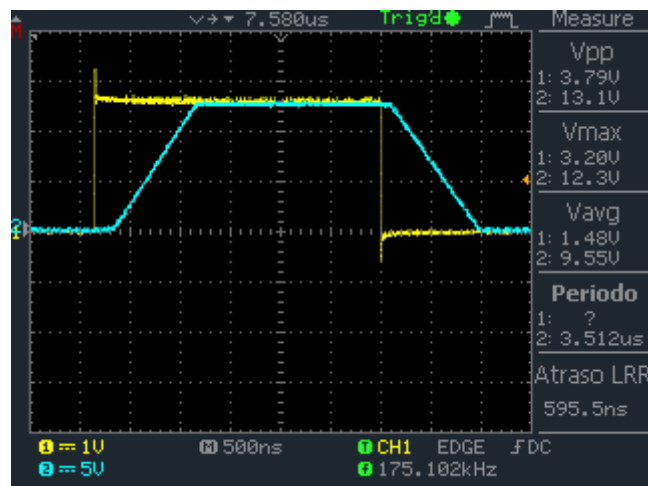
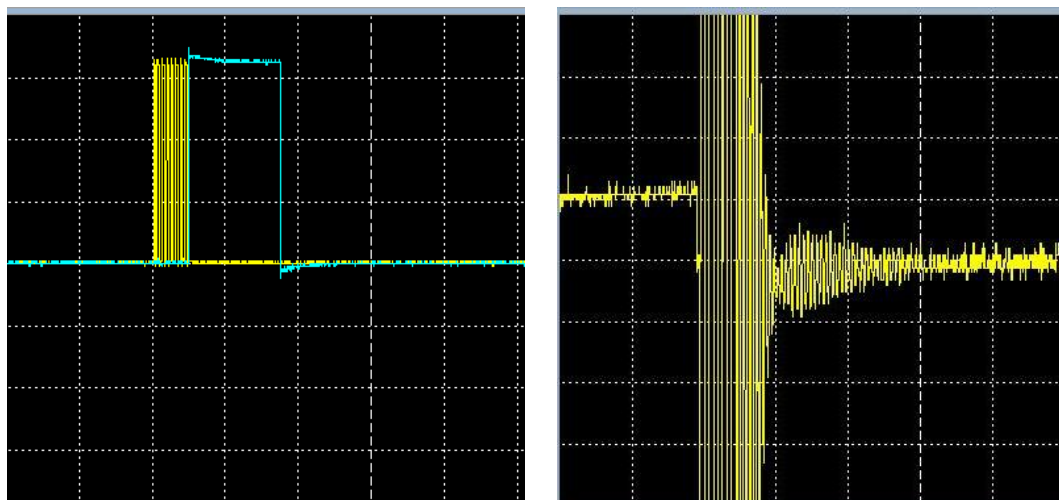


Figura 8.3 - Operação do circuito de condução de transdutores ultrassônicos em contínuo.



a) Impulsos de condução do transdutor e sinal de comutação entre blocos de condução e amortecimento.

b) Tensão no terminal de um transdutor durante e após transmissão, 20 mV e 250 μ s por quadricula.

Figura 8.4 - Sinais do circuito de amortecimento com ponte RLC em permanencia.

8.2.3. Desempenho do algoritmo de detecção de frutos

Seguindo o procedimento descrito no capítulo 5, foram gerados um total de 432 modelos com validação cruzada, resultado da combinação de diferentes tipos de atributo: FFT com *zero padding* e método de Welch, com e sem *zero padding*; diferentes técnicas de pré-processamento param redução dimensional: análise de componentes principais, análise de componentes independentes, e um algoritmo de seleção de atributos (RELIEFF); e 13

classificadores binários pontuação de probabilidade posterior: SVM, KNN com 3 tipos de distância e 3 valores de k distintos, árvore de decisão, análise discriminante linear e quadrática. O algoritmo de seleção sequencial de atributos foi excluído da fase de pré-processamento devido a aumentar excessivamente o tempo de treino dos modelos.

De forma a avaliar o processo de construção dos modelos e os resultados obtidos, começou-se por observar a média e variância das métricas de adequação e capacidade de generalização ao longo de cada uma das variáveis mencionadas anteriormente, procurando-se entender qual a influência de cada uma destas sobre os resultados. Por fim, avaliaram-se quais foram os melhores modelos obtidos e verificou-se a sua robustez.

8.2.3.1. Efeito da frequência, atributos, redução dimensional e tipo de modelo

Geralmente, o desempenho de um modelo pode-se considerar razoavelmente satisfatória, motivando afinações posteriores através do reajuste de hiperparâmetros, quando se verifica um coeficiente de correlação de Matthews superior a 0,65. Após o cálculo da média e variância das métricas de adequação e capacidade de generalização, ao longo de todos os modelos que têm por base os sinais de cada uma das 3 frequências centrais utilizadas (ver Tabela 11), ao longo de todos os modelos que foram construídos com base no mesmo tipo de atributo (ver

Tabela 12), dos modelos que que integraram a mesma técnica de pré-processamento (ver Tabela 13), assim como ao longo dos modelos baseados no mesmo tipo de classificador (ver Tabela 14), é possível observar que a maior parte dos modelos demonstrou uma adequação insatisfatória. O valor médio mais elevado foi de 0,427, tendo sido observado para os modelos baseados num classificador de árvore decisão. Este facto é reforçado pelos valores de pontuação quadrática. Um modelo que atribua sempre uma probabilidade posterior de 50%, resulta numa pontuação quadrática de aproximadamente 0,75. Como se pode verificar, todos os valores médios calculados são inferiores a esse valor de referência, tendo sido o mais elevado de 0,72, para os modelos baseados num classificador de análise discriminante.

As médias dos valores de coeficiente de Gini, demonstram que desde logo, os modelos apresentam uma fraca separabilidade das classes. Este coeficiente é um indicador da probabilidade à priori de uma instância do caso positivo, escolhida aleatoriamente apresentar uma pontuação mais elevada, do que uma instância também esta aleatoriamente selecionada, do caso negativo, sendo 0,5 o valor correspondente a um classificador

aleatório. Foi a única métrica a revelar um valor superior ao valor de referência, apresentando uma média de 0,513 para os modelos baseados num classificador SVM.

Posto isto, conclui-se que através de cálculos de valores médios das métricas não é possível isolar nenhum aspeto que se demonstre particularmente vantajoso para a construção de um modelo de classificação binária para resolver o problema em mãos. Os resultados relativos à frequência dos sinais ultrassónicos são de particular importância, pois estes representam um indicador de três possíveis condições de grande importância: a não existência de atributos diferenciadores nas regiões do espectro utilizadas, a existência da mesma quantidade de informação diferenciadora em todos os espectros com falha do reconhecimento da mesma por parte dos modelos gerados, ou simplesmente a fraca adequação do modelo, não sendo capaz de diferenciar entre dados que possuem e que não possuem informação diferenciadora. Colocada esta questão, realizou-se ainda um estudo de valores médios das métricas semelhantes ao anterior, mas desta vez segmentado por frequência. Ou seja, calcularam-se os valores médios ao longo de todos os modelos baseados em ondas de 40 kHz que integram cada tipo de atributo, cada tipo de técnica de redução dimensional e de classificador, e repetiu-se o mesmo processo para as restantes duas frequências centrais. No entanto, os valores resultantes foram semelhantes àqueles observados na análise descrita anteriormente.

É de notar que em grande parte dos casos expostos nestas tabelas, os valores de variância são elevados, sendo o mínimo observado de 0,079 a que corresponde um desvio padrão de 0,281. Este facto indica a existência de um número considerável de modelos cujos valores das métricas se afastam bastante dos valores médios indicados nestas. Assim sendo, torna-se relevante listar os classificadores por ordem de adequação decrescente de forma a se verificar se os melhores modelos atingem valores de métricas de adequação e capacidade de generalização satisfatórios.

Tabela 11 - Média e variância das métricas de adequação e capacidade de generalização calculadas ao longo dos modelos treinados com as ondas ultrassónicas de cada uma das frequências centrais utilizadas.

| | | Pontuação Quadrática | Coefficiente de Gini | Coefficiente de correlação de Matthews |
|---------|-----------|----------------------|----------------------|--|
| 40 kHz | Média | 0,563 | 0,393 | 0,317 |
| | Variância | 0,034 | 0,021 | 0,096 |
| 58 kHz | Média | 0,573 | 0,344 | 0,286 |
| | Variância | 0,204 | 0,020 | 0,085 |
| 175 kHz | Média | 0,610 | 0,393 | 0,326 |
| | Variância | 0,037 | 0,022 | 0,084 |

Tabela 12 - Média e variância das métricas de adequação e generalização calculadas ao longo dos modelos que utilizam cada tipo de atributo.

| | | Pontuação Quadrática | Coefficiente de Gini | Coefficiente de correlação de Matthews |
|------------------------|-----------|----------------------|----------------------|--|
| FFT | Média | 0,600 | 0,363 | 0,303 |
| | Variância | 0,034 | 0,021 | 0,093 |
| Welch | Média | 0,563 | 0,398 | 0,324 |
| | Variância | 0,027 | 0,021 | 0,094 |
| Welch com zero padding | Média | 0,583 | 0,370 | 0,302 |
| | Variância | 0,031 | 0,021 | 0,079 |

Tabela 13 - Média e variância das métricas de adequação e generalização dos modelos calculadas ao longo dos modelos que utilizam cada tipo de técnica de redução dimensional.

| | | Pontuação Quadrática | Coefficiente de Gini | Coefficiente de correlação de Matthews |
|-----------------------|-----------|----------------------|----------------------|--|
| Sem pré-processamento | Média | 0,638 | 0,397 | 0,323 |
| | Variância | 0,019 | 0,020 | 0,081 |
| RELIEFF | Média | 0,603 | 0,421 | 0,350 |
| | Variância | 0,045 | 0,024 | 0,100 |
| PCA | Média | 0,611 | 0,357 | 0,303 |
| | Variância | 0,031 | 0,021 | 0,094 |
| ICA | Média | 0,474 | 0,333 | 0,263 |
| | Variância | 0,054 | 0,019 | 0,080 |

Tabela 14 - Média e variância das métricas de adequação e generalização dos modelos calculadas ao longo dos modelos que utilizam cada tipo de técnica de redução dimensional.

| | | Pontuação Quadrática | Coefficiente de Gini | Coefficiente de correlação de Matthews |
|-----|-----------|----------------------|----------------------|--|
| SVM | Média | 0,380 | 0,513 | 0,210 |
| | Variância | 0,024 | 0,031 | 0,072 |
| DT | Média | 0,644 | 0,450 | 0,427 |
| | Variância | 0,033 | 0,026 | 0,111 |
| DA | Média | 0,722 | 0,490 | 0,320 |
| | Variância | 0,012 | 0,033 | 0,147 |
| KNN | Média | 0,628 | 0,341 | 0,307 |
| | Variância | 0,018 | 0,018 | 0,082 |

8.2.3.2. Modelos com adequação satisfatória

Na Tabela 14 pode-se observar que de facto, entre os 432 modelos gerados, 12 atingiram um coeficiente de Matthews superior a 0,65. Além disso, é possível constatar que todos os modelos que demonstraram uma adequação satisfatória, utilizam apenas 2 das 3 frequências centrais utilizadas, 175 kHz e 40 kHz, sendo os modelos com base nas ondas de 175 kHz prevalentes. Adicionalmente, apenas 2 dos modelos que integram esta tabela utilizam atributos extraídos com FFT, o que indica que a técnica de Welch, tal como esperado, tende a destacar os desvios mais subtis dos espectros, em relação ao espectro médio, e com isso, aumentar a capacidade de diferenciação entre casos positivos e casos negativos, amostragens com e sem fruto. A introdução das técnicas de redução dimensional também aparenta ter uma influência positiva na construção dos modelos, uma vez que apenas 2 dos 12 modelos com adequação satisfatória não continham esta componente. Entre as técnicas de redução dimensional, a análise de componentes independentes (ICA) é a menos prevalente, o que indica que possivelmente a gaussianidade capturada pela análise de componentes principais (PCA) pode ser mais relevante para o problema em causa do que momentos de ordem superior. No que diz respeito ao tipo de classificador, os KNN predominam, contudo há que atender ao facto de estes se encontrarem em maior número face aos restantes, já que na verdade incluem 9 classificadores diferentes, com diferente valor de K e métrica de distância. Como se pode comprovar, existe uma forte correlação entre as 3 métricas observadas. Em todos os casos cuja adequação avaliada pelo coeficiente de correlação de Matthews se demonstra satisfatória, à exceção do primeiro, também o coeficiente de Gini e pontuação quadrática apresentam valores superiores aos que seriam esperados para modelos de classificação aleatória.

Tabela 15 - Média e variância das métricas de adequação e generalização dos modelos com coeficiente de correlação de Matthews superior a 0,65.

| Frequência | Atributo | Pré-Processamentn | Modelo | Pontuação Quadrática | | Coeficiente de Gini | | Coeficiente de correlação de Matthews | |
|------------|----------------|-------------------|--------|----------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------------------------|-----------|
| | | | | Média | Variância | Média | Variância | Média | Variância |
| 175 kHz | Unpadded Welch | PCA | SVM | 0,066 | 0,351 | 0,767 | 0,037 | 0,755 | 0,074 |
| 40 kHz | Padded FFT | ICA | KNN2 | 0,770 | 0,048 | 0,617 | 0,026 | 0,723 | 0,049 |
| 40 kHz | Padded Welch | SPCA | KNN2 | 0,815 | 0,031 | 0,683 | 0,015 | 0,721 | 0,043 |
| 40 kHz | Padded FFT | PCA | KNN7 | 0,788 | 0,022 | 0,850 | 0,028 | 0,706 | 0,146 |
| 40 kHz | Unpadded Welch | PCA | KNN8 | 0,776 | 0,020 | 0,725 | 0,025 | 0,690 | 0,075 |
| 175 kHz | Padded Welch | REL | KNN5 | 0,859 | 0,028 | 0,833 | 0,022 | 0,686 | 0,067 |
| 175 kHz | Unpadded Welch | REL | DA | 0,827 | 0,015 | 0,733 | 0,028 | 0,686 | 0,087 |
| 175 kHz | Padded Welch | REL | KNN7 | 0,842 | 0,002 | 0,767 | 0,017 | 0,666 | 0,017 |
| 175 kHz | Padded Welch | PCA | KNN2 | 0,725 | 0,066 | 0,550 | 0,031 | 0,665 | 0,083 |
| 175 kHz | Unpadded Welch | SPCA | KNN2 | 0,784 | 0,025 | 0,692 | 0,029 | 0,664 | 0,040 |
| 175 kHz | Padded Welch | REL | DA | 0,856 | 0,003 | 0,750 | 0,033 | 0,657 | 0,016 |
| 40 kHz | Unpadded Welch | REL | DA | 0,833 | 0,010 | 0,633 | 0,040 | 0,646 | 0,204 |

Assim, de forma a esclarecer a segunda hipótese, procurando-se reduzir a variância, repetiu-se a validação cruzada 10-fold 500 vezes para cada modelo que apresentou um coeficiente de Matthews médio superior a 0,65 e calculou-se a média e variância ao longo das repetições. O ideal seria esgotar-se todas as combinações possíveis, de 48 elementos, 4 a 4, que podem surgir como fold durante a validação cruzada. Contudo, isso resulta em 194580 combinações diferentes, o que tornaria o processo de revalidação desnecessariamente longo. Os resultados deste processo encontram-se na Tabela 16. Pode-se verificar que, tal como esperado, a validação cruzada repetida reduziu significativamente variância. Contudo,

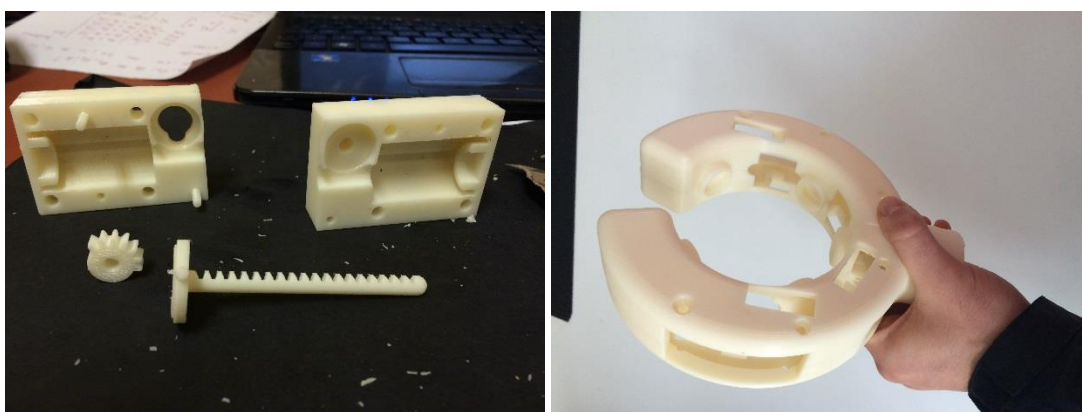
este processo revelou que quando se procura generalizar o desempenho dos modelos da Tabela 15, a sua adequação falha em manter-se satisfatória.

Tabela 16 - Média e variância das métricas de adequação e capacidade de generalização dos modelos presentes na tabela 16, após revlaidadados com validação cruzada 10-fold repetida 500 vezes.

| Frequência | Atributo | Pré-Processamento | Modelo | Pontuação Quadrática | | Coeficiente de Gini | | Coeficiente de correlação de Matthews | |
|------------|----------------|-------------------|--------|----------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------------------------|-----------|
| | | | | Média | Variância | Média | Variância | Média | Variância |
| 175 Khz | Unpadded Welch | PCA | SVM | 0,240 | 0,008 | 0,615 | 0,007 | 0,405 | 0,014 |
| 40 Khz | Padded FFT | ICA | KNN | 0,579 | 0,001 | 0,374 | 0,006 | 0,442 | 0,007 |
| 40 Khz | Padded Welch | SPCA | KNN | 0,765 | 0,001 | 0,568 | 0,004 | 0,620 | 0,003 |
| 40 Khz | Padded FFT | PCA | KNN | 0,788 | 0,000 | 0,600 | 0,006 | 0,483 | 0,009 |
| 40 Khz | Unpadded Welch | PCA | KNN | 0,785 | 0,000 | 0,588 | 0,006 | 0,450 | 0,009 |
| 175 Khz | Padded Welch | REL | KNN | 0,852 | 0,000 | 0,775 | 0,002 | 0,616 | 0,003 |
| 175 Khz | Unpadded Welch | REL | DA | 0,830 | 0,000 | 0,705 | 0,006 | 0,642 | 0,003 |
| 175 Khz | Padded Welch | REL | KNN | 0,844 | 0,000 | 0,774 | 0,002 | 0,630 | 0,003 |
| 175 Khz | Padded Welch | PCA | KNN | 0,742 | 0,000 | 0,525 | 0,004 | 0,594 | 0,004 |
| 175 Khz | Unpadded Welch | SPCA | KNN | 0,587 | 0,001 | 0,361 | 0,007 | 0,448 | 0,008 |
| 175 Khz | Padded Welch | REL | DA | 0,850 | 0,000 | 0,779 | 0,003 | 0,633 | 0,003 |
| 40 Khz | Unpadded Welch | REL | DA | 0,828 | 0,000 | 0,700 | 0,005 | 0,637 | 0,003 |

8.3. Prototipagem da estrutura e desempenho do sistema atuador

Todos os elementos da estrutura e atuadores foram produzidos com sucesso por impressão 3D em ABS (ver Figura 8.5). Contudo, a concretização de um sistema de atuação operacional não se demonstrou possível, devido a dois grandes fatores: a insuficiente precisão de posicionamento dos servomotores utilizados e o desgaste acelerado dos elementos móveis durante os ensaios e procedimentos de afinação do controlo.



a) Elementos do design inicial dos atuadores.

b) Estrutura toroidal, para fixação dos atuadores e transdutores ultrassónicos.

Figura 8.5 - Peças em ABS produzidas por impressão 3D.

Relativamente ao primeiro ponto, verificou-se que, com os diferentes servomotores posicionados numa posição radial semelhante, uma vez fornecido um sinal de PWM com a mesma frequência e duração no input de controlo de cada um destes, a posição radial final variava significativamente entre os diferentes servomotores. Numa tentativa de se corrigir este problema, procurou-se afinar o controlo individual de cada servomotor, regulando o ponto neutro do sinal PWM através do pontenciómetro que estes possuem, contudo a variabilidade entre motores manteve-se. Procurou-se então conferir sinais de diferente período para cada servomotor. Esta segunda solução aparentava funcionar, uma vez terminado o reajuste para cada servomotor, contudo, passados alguns ciclos de ensaio, era notável existir um erro cumulativo, sendo que a partir de certo ponto deixava ser possível obter o funcionamento coordenado desejado. Com o decorrer de um grande número de ensaios para corrigir este problema, emergiu um outro. Os dentes das engrenagens e cremalheiras, assim como o veio do motor começaram a apresentar desgaste, o que implicou o surgimento de escorregamento entre elementos e por sua vez uma descoordenação entre motores ainda maior. Posto isto, fabricaram-se engrenagens e cremalheiras em alumínio e

adquiriram-se servomotores com um veio mais robusto. Contudo, no que diz respeito ao controlo, estes segundos servomotores mostraram um comportamento ainda menos desejável, pois não respondiam a sinais de movimento de período suficientemente reduzido, necessários para a recolha da mola.

Com a aproximação à época da monda, de forma a se ter condições de realizar ensaios de campo caso se atingisse um funcionamento aceitável do sistema atuador, e tendo-se até então já verificado a inviabilidade do sistema de sensorização, procedeu-se à construção de uma placa que permite tornar o dispositivo portátil, contendo apenas os blocos essenciais para o funcionamento deste sistema. Porém, não se observando progresso significativo, e tendo passada grande parte da época de monda, decidiu-se levar o dispositivo para o campo, para validação da força de impacto dos atuadores, assim como observar aspetos relacionados com geometria de disposição dos atuadores e da ergonomia do dispositivo (ver Figura 8.6). Posicionando-se manualmente um atuador numa linha de atuação coincidente com um fruto e disparado o atuador, cerca de 50% dos frutos foram removidos com um disparo, 20% requereram um segundo disparo e 30% não foram removidos mesmo após 3 disparos. Este ensaio foi realizado para 20 frutos aleatoriamente escolhidos, em diferentes árvores. De forma a se observar a eficiência da geometria de disposição dos atuadores, colocaram-se todos os atuadores com o veio em extensão e percorreu-se individualmente um ramo aleatoriamente selecionado de 10 árvores distintas, procurando-se centrar a estrutura em torno de cada ramo mas sem uma grande precisão, de forma a simular o funcionamento em pleno do dispositivo. Observou-se que em média 87,6% dos frutos entraram em contacto com o veio de um dos atuadores, sendo que as maiores causas para a falha foram a localização dos frutos em ramos secundários. Em relação à ergonomia do dispositivo, verificou-se ser conveniente o aumento do comprimento do cabo de manipulação, uma vez que no pomar em questão existiam ramos que se aproximavam dos 3 metros de altura, assim como a diminuição do seu diâmetro, dado que o diâmetro utilizado aparentou levar a um cansaço desnecessariamente acelerado da mão do operador.



Figura 8.6 - Ensaio de força de atuação , verificação da geometria e ergonomia no campo.

9. Conclusões

9.1. Conclusões gerais

O objetivo desta dissertação consistia no desenvolvimento de um dispositivo portátil de monda de frutos, não existindo inicialmente qualquer tipo de conceito ou linhas orientadoras pré-definidas. Sendo a monda de frutos uma operação complexa do ponto de vista sensorial e mecânico, dada a envolvente de elevada variabilidade, e não existindo até à data nenhum dispositivo que permitisse a sua realização de forma mecanizada ou automatizada garantindo um nível de seletividade razoável, foi necessário conceber um conceito inovador de raiz.

Foi definido um conceito e realizada investigação, prototipagem e ensaios de cada uma das partes constituintes do mesmo: sensorização, com componentes de hardware e algoritmos que não foram utilizados até à data para sensorização de hortofrutícolas; atuação, cuja limitação do volume face à potência necessária e os fundos disponíveis requereu o desenvolvimento de uma solução customizada com motores de baixo custo.

Como se pôde verificar pela análise de resultados no capítulo anterior, não foi possível atingir um nível de funcionalidade satisfatória de nenhuma das duas componentes.

9.2. Conclusões específicas

9.2.1. Sistema de sensorização

O sistema de sensorização compreende o hardware responsável pela condução e aquisição de sinal de transdutores ultrassónicos e software que implementa um algoritmo de deteção de frutos com base em processamento dos sinais adquiridos correspondentes a ondas ultrassónicas refletidas pela envolvente do dispositivo. Através da análise do estado da arte dos dispositivos de monda, concluiu-se que as soluções presentes na literatura não foram ainda adotadas pelos produtores devido à inconsistência do impacto económico resultante da sua utilização. Essa inconsistência deve-se sobretudo ao facto de os sistemas explorados

até à data operarem em malha aberta, sem sensorização que permita identificar a presença e localização de cada fruto. A solução investigada nesta dissertação foi selecionada com base na premissa de que o espectro de reflexão de uma qualquer onda depende do corpo e superfície de reflexão, seja pelas suas propriedades mecânicas ou pela sua composição química. Este princípio é frequentemente utilizado em laboratório para caracterizar materiais ou avaliar características como a maturidade ou grau brix de frutos, nunca tendo sido utilizado para constituir um método de deteção de frutos nas árvores. O principal entrave a esta aplicação é a elevada absorção do ar atmosférico, que faz com que para transmitir e receber ondas refletidas, minimizando a perda de informação espectral, torna-se necessário maximizar a potência dos emissores. Através da literatura, foi isolado uma banda do espectro electromagnético (NIR) em que se verificava o caso ideal para esta aplicação, em que tanto a reflexão dos frutos como a transmissão através de folhas é maximizada. Contudo, a perda de energia ao longo da transmissão de uma onda electromagnética nesse espectro é em muitas ordens superior face a ondas ultrassónicas cujo comprimento onda se mostra suficientemente preciso para a estimativa de distâncias em que o dispositivo de monda, tal como desenhado, operaria. Além disso, os emissores e receptores NIR são volumosos, muito mais onerosos do que os transdutores ultrassónicos comuns. A literatura revelou alguns exemplos de estudos que recorreram a ultrassons na ordem dos MHz revelando um espectro com picos e vales acentuados, pelo que seria expectável que o mesmo ocorra para outras gamas frequência. Assim, decidiu-se recorrer ao uso de transdutores com algumas das frequências centrais com maior disponibilidade no mercado, entre os 40 kHz e os 200 kHz. Minimizando a frequência, aumenta-se a propagação das ondas, diminuindo a absorção e aumentando a capacidade de difração, o que num meio de operação com aquele envolvido neste trabalho se mostra extremamente relevante. Ainda assim, cada um destes transdutores apresenta uma característica de sensibilidade em torno de uma frequência central com um elevado decaimento em ambos os sentidos, o que significa que a banda do espectro que pode ser testada mostra-se limitada, e que qualquer componente de frequência que se afaste da frequência central apresenta uma baixa amplitude. Então, mesmo na existência de uma assinatura espectral na banda capturada, os picos e vales serão muito reduzidos, tornando difícil a sua análise por simples observação de dados. De forma a procurar detetar essas assinaturas espectrais pouco perceptíveis, decidiu-se então implementar algoritmos de aprendizagem de máquina, que ao adotarem uma perspectiva estatística de um conjunto de amostras recolhidas em ramos de pessegueiro em ambiente laboratorial, de casos em que existe frutos ou não nas imediações do transdutor, com uma estratégia de aprendizagem supervisionada para classificação binária, poderiam conduzir a um algoritmo indicaria a presença ou não de frutos, quando executado sobre amostragens nunca antes vistas pelo sistema, e idealmente no campo. Uma vez verificado

tal funcionamento, seria possível expandir o conceito e procurar avaliar não só a presença mas também características mecânicas do fruto, tais como calibre e rigidez.

A electrónica requerida para conduzir e receber sinais dos transdutores ultrassónicos foi desenvolvida e testada, sendo que apenas o bloco de amortecimento não apresentou o comportamento desejado. Este é responsável por permitir capturar sinais refletidos de superfícies inferiores àquela imposta naturalmente pelo transdutor. Contudo, este aspeto não inviabilizaria por completo a funcionalidade do sistema de sensorização.

O firmware implementado num microcontrolador para a condução dos transdutores demonstrou operar como desejado, permitindo gerar sinais de PWM de duty cycle facilmente programável, assim como a comutação de canal de um multiplexer para que se possa emitir e receber a onda dos diferentes transdutores.

Já no que diz respeito aos algoritmos responsáveis pela deteção dos frutos, seja devido à inexistência de atributos diferenciadores, ao insuficiente número de amostragens recolhidas para a investigação conduzida, ou a uma escolha inadequada do processo de construção do modelo, a análise dos dados de validação aponta para que nenhum dos 432 modelos gerados apresente uma adequação e capacidade de generalização satisfatórias.

9.2.2. Sistema de atuação por impacto

O sistema de atuação, constituído por um conjunto de atuadores lineares, é responsável pela remoção dos frutos através da execução de uma força de impacto. Da análise do estado da arte, foi observado que os dispositivos de monda desenvolvidos e investigados até à data, assentam em elementos flexíveis dispostos num veio rotativo ou em vibração. Estas formas de atuação permitem apenas uma regulação heurística da intensidade, dado que abrangem uma grande área da árvore de forma pouco controlada, sendo este facto agravado pela elevada variabilidade do meio de operação. Assim, procurou-se desenvolver um conceito de atuação que em conjunto com a informação fornecida pelo sistema de sensorização, permitisse a atuação sobre frutos individuais, ao ser constituída por elementos de reduzida área de abrangência, e com uma trajetória de atuação bem definida. Pela simplicidade de construção e versatilidade, optou-se por recorrer a um conjunto de atuadores lineares disposto radialmente numa estrutura toroidal, intercalados com os sensores, com uma geometria e curso que permite atuar a em toda a periferia do ramo, onde os frutos se podem localizar. Tendo em conta a verba disponível e o estudo de soluções de mercado realizado, concluiu-se que não existiam actuadores com uma densidade de potência que permitisse conceber um design suficientemente compacto, pelo que se tornou necessário proceder ao desenvolvimento de atuadores customizados. Decidiu-se utilizar pequenos servomotores como elemento motriz, e procedeu-se ao desenho de uma engrenagem com dentes apenas

numa porção da sua circunferência e com uma roda de lingueta, de uma lingueta e de uma cremalheira redonda com êmbolo que aja como veio. Em conjunto com uma mola de compressão, este mecanismo permite a recolha do veio e compressão da mola até a um ponto pré-definido, que uma vez atingido é acionada a lingueta, bloqueando o veio em posição e permitindo rotação apenas no sentido de rotação que leva à libertação de uma mola, conferindo ao veio uma força de impacto suficientemente elevada para remover os frutos que se encontrarem na sua trajetória.

Assim, foram desenvolvidos 6 actuadores, pela aquisição dos servomotores e mola, e produção por impressão 3D em ABS, da cremalheira, engrenagem e mecanismo de lingueta, assim como a caixa de cada actuator e a estrutura do dispositivo, que aloja os actuadores e sensores. Os desenhos técnicos destes elementos encontram-se no anexo I.

Após se ter verificado a não funcionalidade do sistema de sensores, foi desenvolvida uma placa que permite a portabilidade do dispositivo com a operacionalidade do sistema de atuação. Sendo constituída pela placa de desenvolvimento de um microcontrolador, pelos elementos responsáveis por gerar o PWM de controlo dos servomotores, por um esquema de multiplexagem que permite direccionar esse sinal para os múltiplos atuadores e pelos elementos de alimentação e regulação, que a partir de uma bateria de 12 V permitem obter três diferentes níveis de tensão requeridos pelos diferentes componentes. Esta placa demonstrou-se funcional, sem se ter observado qualquer problema

Os atuadores demonstraram ser mecanicamente funcionais, sendo que cada actuator individual opera como entendido uma vez ajustado o sinal de controlo respetivo. Contudo, devido à falta de precisão e variabilidade imposta pelos circuitos incluídos nos motores adquiridos, não foi possível obter um funcionamento devidamente coordenado e programável, com os 6 atuadores a operar em conjunto. Dado o grande número de ensaios realizados com o objetivo de obter o funcionamento coordenado desejado, que frequentemente resultava em forças superiores aquelas para quais os elementos foram desenhados, como consequência do funcionamento indevido, observou-se um desgaste acelerado da cremalheira, dentes da engrenagem e veio plástico do motor. Nesse sentido, reproduziram-se essas peças em alumínio e adquiriram-se servomotores com uma construção mais robusta. Contudo, estes últimos apresentavam um controlo ainda mais insatisfatório, não respondendo sequer a sinais de PWM tão curtos quanto necessário.

Ainda assim, é de salientar que caso o custo moderado da solução final não fosse uma especificação de projeto, ter-se-ia desenvolvido um protótipo com um sistema de atuação por impacto responsivo e preciso, sobre o qual poderia à posteriori serem estudos novos

modelos com adequação e capacidade de generalização adequadas, proporcionando um protótipo de dispositivo de monda semiautomática com a sensibilidade desejada.

9.3. Sugestões de trabalhos futuros

Dadas as conclusões anteriores sugere-se o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

- Estudo do espectro de reflexão ultrassônica de frutos e folhas com um maior rigor e em maior número. Em câmara anecoica de forma a minimizar perturbações externas, e com um transdutor de som de banda larga a alta potência, de forma a se poder observar e identificar atributos diferenciadores sem requerer o uso de algoritmos de aprendizagem de máquina.
- Estudo do espectro eletromagnético de reflexão de frutos e folhas na banda NIR. Este tipo de ondas pode revelar mais ou melhores atributos quando comparadas com os ultrassons, contudo a dissipação de potência ao longo da sua transmissão é superior.
- Investigar a correlação dos atributos utilizados para a deteção de frutos, com o calibre dos mesmos.
- Investigação de esquemas de adaptação de impedância, circuitos de malha fechada, ou uso de técnicas de emissão e transmissão simultânea para a redução da distância mínima mensurável e aumento da banda útil de transdutores ultrassônicos.
- Estudar a viabilidade e estratégias de otimização para a implementação de processamento e algoritmos de aprendizagem de máquina em sistemas embutidos.
- Selecionar ou desenvolver atuadores que garantam o correto posicionamento durante cada fase de operação, de construção robusta, e capazes de produzir forças de impacto superiores a 20 N. Um motor linear customizado ou o uso de motores DC comuns com controladores PID poderiam ser boas soluções.

Referências Bibliográficas

- [1] Akdag, R., Danzon, M., European charter on countering obesity, WHO European Ministerial conference on counteracting obesity, 2006.
- [2] Powell, A., Hancock, B., Puls Jr, E., Helmers, S., Brown Jr, M., Utilizing mechanical fruit thinning in commercial peach orchards, HortScience, 1975, 10(2),142.
- [3] Berlage, A., Langmo, R., Machine-vs hand-thinning of peaches, Transactions of the ASAE [American Society of Agricultural Engineers], 1982.
- [4] Glozer, K., Hasey, J., Mechanical thinning in cling peach, HortScience, 2006, 41(4) 995-995.
- [5] Martin, B., Torregrosa, A., Brunton, J.G., Post-bloom thinning of peaches for canning with hand-held mechanical devices, Scientia horticulturae, 2010, 125(4), 658-665.
- [6] Diezma, B., Rosa, U., Monitoring of fruit removal for mechanical thinning of peaches, Frutic, 2005, 5, 12-16.
- [7] Baugher, T.A., Elliott, K.C., Leach, D.W., Horton, B., Miller, S.S., Improved methods of mechanically thinning peaches at full bloom, Journal of the American Society for Horticultural Science, 1991, 116(5), 766-769.
- [8] Glenn, D.M., Peterson, D.L., Giovannini, D., Faust, M., Mechanical thinning of peaches is effective postbloom, HortScience, 1994, 29(8), 850-853.
- [9] Schupp, J., Baugher, T.A., Miller, S., Harsh, R., Lesser, K., Mechanical thinning of peach and apple trees reduces labor input and increases fruit size, HortTechnology, 2008, 18(4), 660-670.
- [10] Baugher, T.A., Schupp, J., Lesser, K., Hess-Reichard, K., Horizontal string blossom thinner reduces labor input and increases fruit size in peach trees trained to open-center systems, HortTechnology, 2009, 19(4), 755-761.
- [11] Dise R., Automated String Thinner Positioning, Mid Atlantic Fruit and Vegetable Convention, 2011.
- [12] Johnson, R.S., Phene, B., Slaughter, D., DeJong, T., Day, K.,Duncan, R., Norton, M., Hasey, J., Mechanical Blossom Thinning Using a Darwin String Thinner, CTFA Annual Research Report, 2010,.
- [13] Miller, S.S., Schupp, J.R., Baugher, T.A., Wolford, S.D., Performance of mechanical thinners for bloom or green fruit thinning in peaches, HortScience, 2011, 46(1) ,43-51.
- [14] Blanke, M., Damerow, L.A., A novel device for precise and selective thinning in fruit crops to improve fruit quality. [International Symposium on Application of Precision Agriculture for Fruits and Vegetables 824], 275-280.

- [15] Martin-Gorriz, B., Torregrosa, A., Brunton, J.G., Post-bloom mechanical thinning for can peaches using a hand-held electrical device, *Scientia Horticulturae*, 2012, 144, 179-186.
- [16] Martin-Gorriz, B., Mira, A.T., Brunton, J.G., Pallares, R.A., A Hand-held Mechanical Blossom and Post-bloom Thinning Device for Peach Trees. [Power and Machinery. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012: agriculture and engineering for a healthier life, Valencia, Spain, 8-12 July 2012], P-0154.
- [17] Simões, M.P., Vuleta, I., Belusic, N., Monda mecânica de flores com equipamento electro flor em pessegueiros da cultivar Rich Lady, *Revista de Ciências Agrárias*, 2013, 36(3), 297-302.
- [18] Wang, M., Zhang, Q., Lewis, K.M., Parametric study of hand-held mechanical bloom thinner in cherry orchards., *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2013, 131591841.
- [19] Simões, M., + Pêssego: Inovação e desenvolvimento na cultura do pêssego na Beira Interior, *Revista do Instituto Politécnico de Castelo Branco*, 2015, 5, 16-23.
- [20] Nielsen, M., Slaughter, D.C., Gliever, C., Vision-based 3D peach tree reconstruction for automated blossom thinning, *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 2012, 8(1), 188-196.
- [21] Patent US2013312322 (A1), Device for Thinning and Harvesting Fruit and Flowers, 28 Nov. 2013.
- [22] Patent CN102217493 (A), Ultrasonic targeted electric flower and fruit thinning machine, Oct 19, 2011.
- [23] Patent KR101336350 (B1), Fruit defoliating and thinning device for use in fruit trees, 4 Dec. 2013.
- [24] Patent CN203327599 (U), Flower and fruit thinning machine, 11 Dec 2013.
- [25] Tukey, L., A linear electric device for continuous measurement and recording of fruit enlargement and contraction, *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 1964, 84, 653-660.
- [26] Klepper, B., Browning, V.D., Taylor, H.M., Stem diameter in relation to plant water status, *Plant Physiology*, 1971, 48(6), 683-685.
- [27] Higgs, K., Jones, H., A microcomputer-based system for continuous measurement and recording fruit diameter in relation to environmental factors, *Journal of Experimental Botany*, 1984, 35(11), 1646-1655.
- [28] Beedlow, P.A., Daly, D.S., Thiede, M.E., A new device for measuring fluctuations in plant stem diameter: Implications for monitoring plant responses: Note., *Environmental monitoring and assessment*, 1986, 6(3), 277-82.
- [29] Morandi, B., Manfrini, L., Zibordi, M., Noferini, M., Fiori, G., Grappadelli, L.C., A low-cost device for accurate and continuous measurements of fruit diameter, *HortScience*, 2007, 42(6), 1380-1382.

- [30] Link, S., Thiede, M., Van Bavel, M., An improved strain-gauge device for continuous field measurement of stem and fruit diameter, *Journal of Experimental Botany*, 1998, 49(326), 1583-1587.
- [31] Laing, A., Smit, Q., Mortimer, B., Tapson, J., Ultrasonic fruit sizing device, *Journal of the South African Acoustics Institute*, 1995, 6, 60-65.
- [32] Moreda, G., Ortiz-Cañavate, J., Garcia-Ramos, F.J., Ruiz-Altisent, M., Non-destructive technologies for fruit and vegetable size determination-a review, *Journal of Food Engineering*, 2009, 92(2), 119-136.
- [33] Iraguen, V., Guesalaga, A., Agosin, E., A portable non-destructive volume meter for wine grape clusters, *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(12), 92.
- [34] Jiménez, A.R., Jain, A.K., Ceres, R., Pons, J., Automatic fruit recognition: a survey and new results using range/attenuation images, *Pattern recognition*, 1999, 32(10), 1719-1736.
- [35] Scarfe, A.J., Flemmer, R.C., Bakker, H., Flemmer, C.L., Development of an autonomous kiwifruit picking robot. [Autonomous Robots and Agents, 2009. ICARA 2009. 4th International Conference on], 380-384.
- [36] Ceres, R., Pons, J., Jimenez, A., Martin, J., Calderon, L., Design and implementation of an aided fruit-harvesting robot (Agribot), *Industrial Robot: An International Journal*, 1998, 25(5), 337-346.
- [37] Baeten, J., Donné, K., Boedrij, S., Beckers, W., Claesen, E., Autonomous fruit picking machine: A robotic apple harvester. [Field and Service Robotics], 531-539.
- [38] Li, P., Lee, S., Hsu, H.-Y., Review on fruit harvesting method for potential use of automatic fruit harvesting systems, *Procedia Engineering*, 2011, 23, 351-366.
- [39] Edan, Y., Design of an autonomous agricultural robot, *Applied Intelligence*, 1995, 5(1), 41-50.
- [40] De-An, Z., Jidong, L., Wei, J., Ying, Z., Yu, C., Design and control of an apple harvesting robot, *Biosystems engineering*, 2011, 110(2), 112-122.
- [41] CROPS Project - Intelligent sensing and manipulation for sustainable production and harvesting of high value crops.
- [42] Jimenez, A., Ceres, R., Pons, J., others, A survey of computer vision methods for locating fruit on trees, *Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers*, 2000, 43(6), 1911-1920.
- [43] Pereira, C.A.P., Utilización de imágenes digitales para medición del diámetro de frutos de Mandarina (*Citrus reticulata*) en crecimiento., *Revista Ciencia y Tecnología*, 2013, 6(1), 1-9.
- [44] Zeng, Q., Liu, C., Miao, Y., Fei, S., Wang, S.A machine vision system for continuous field measurement of grape fruit diameter. [Intelligent Information Technology Application, 2008. IITA'08. Second International Symposium on], 1064-1068.
- [45] Vala, M.H.J., Baxi, A., A review on Otsu image segmentation algorithm, *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, 2013, 2(2), pp-387.

- [46] Yang, L., Dickinson, J., Wu, Q., Lang, S. A fruit recognition method for automatic harvesting. [Mechatronics and Machine Vision in Practice, 2007. M2VIP 2007. 14th International Conference on], 152-157.
- [47] Patel, H., Jain, R., Joshi, M., Automatic segmentation and yield measurement of fruit using shape analysis, International Journal of Computer Applications, 2012, 45(7), 19-24.
- [48] Bulanon, D., Kataoka, T., Ota, Y., Hiroma, T., AE—automation and emerging technologies: a segmentation algorithm for the automatic recognition of Fuji apples at harvest, Biosystems Engineering, 2002, 83(4), 405-412.
- [49] Zhao, J., Tow, J., Katupitiya, J. On-tree fruit recognition using texture properties and color data. [IROS 2005], 263-268.
- [50] Nielsen, M., Slaughter, D.C., Gliever, C., Upadhyaya, S. Orchard and tree mapping and description using stereo vision and lidar. [International Conference of Agricultural Engineering].
- [51] Nielsen, M., Slaughter, D., Gliever, C. Stereo vision blossom mapping for automated thinning in peach. [Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on], 499-504.
- [52] Hahn, F., Sanchez, S., Carrot volume evaluation using imaging algorithms, Journal of agricultural engineering research, 2000, 75(3), 243-249.
- [53] Hoffmann, T., Wormanns, G., Füll, C., Poller, J., A system for determining starch in potatoes online, 2005.
- [54] Jordan, R.B., Clark, C.J., Sorting of kiwifruit for quality using drop velocity in water, Transactions of the ASAE, 2004, 47(6), 1991-1998.
- [55] Alfatni, M.S.M., Shariff, A.R.M., Abdullah, M.Z., Marhaban, M.H.B., Saeed, O.M.B., The application of internal grading system technologies for agricultural products—Review, Journal of Food Engineering, 2013, 116(3), 703-725.
- [56] Ruiz-Altisent, M., Ruiz-Garcia, L., Moreda, G., Lu, R., Hernandez-Sanchez, N., Correa, E., Diezma, B., Nicolai, B., Garcia-Ramos, J., Sensors for product characterization and quality of specialty crops—A review, Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 74(2), 176-194.
- [57] Opara, U.L., Pathare, P.B., Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce—A review, Postharvest Biology and Technology, 2014, 91, 9-24.
- [58] Butz, P., Hofmann, C., Tauscher, B., Recent developments in noninvasive techniques for fresh fruit and vegetable internal quality analysis, Journal of Food Science, 2005, 70(9), R131-R141.
- [59] Ruiz-Altisent, M., Lleó, L., Riquelme, F., Instrumental quality assessment of peaches: fusion of optical and mechanical parameters, Journal of Food Engineering, 2006, 74(4), 490-499.

- [60] Gall, H., A ring sensor system using a modified polar coordinate system to describe the shape of irregular objects, *Measurement Science and Technology*, 1997, 8(11), 1228.
- [61] Moreda, G., Ortiz-Cañavate, J., García-Ramos, F., Ruiz-Altisent, M., Effect of orientation on the fruit on-line size determination performed by an optical ring sensor, *Journal of food engineering*, 2007, 81(2), 388-398.
- [62] Nishizu, T., Ikeda, Y., Torikata, Y., Manmoto, S., Umehara, T., Mizukami, T., Automatic, continuous food volume measurement with a Helmholtz resonator, 2001.
- [63] Hahn, F., PH–Postharvest Technology: Automatic Jalapeño Chilli Grading by Width, *Biosystems engineering*, 2002, 83(4), 433-440.
- [64] Hwamoto, M., Chuma, Y., Recent studies on development in automated citrus packinghouse facility in Japan. [Proceedings of the International Society of Citriculture [International Citrus Congress, 9-12 November, 1981, Tokyo, Japan].
- [65] Blasco, J. Aleixos, N., Moltó, E., Machine vision system for automatic quality grading of fruit, *Biosystems Engineering*, 2003, 85(4), 415-423.
- [66] Afrisal, H., Faris, M., Utomo, P., Grezelda, L., Soesanti, I., Andri, F., others Portable smart sorting and grading machine for fruits using computer vision. [Computer, Control, Informatics and Its Applications (IC3INA), 2013 International Conference on], 71-75.
- [67] Zhang, B., Huang, W., Li, J., Zhao, C., Fan, S., Wu, J., Liu, C., Principles, developments and applications of computer vision for external quality inspection of fruits and vegetables: A review, *Food Research International*, 2014, 62, 326-343.
- [68] Ninomiya, K., Kondo, N., Chong, V., Monta, M., Machine vision systems of eggplant grading system. [Automation Technology for Off-Road Equipment, Proceedings of the 7-8 October 2004 Conference, Kyoto, Japan].
- [69] Brosnan, T., Sun, D.-W., Improving quality inspection of food products by computer vision--a review, *Journal of Food Engineering*, 2004, 61(1), 3-16.
- [70] Vaidya, A., Pujari, D., Desai, H., Borse, K., Patel, S., Leaf Recognition-A Technical Review, *International Journal for Research in Emerging Science and Technology*, 2015, 2(1), 46-51.
- [71] Ji, B., Zhu, W., Liu, B., Ma, C., Li, X., Review of recent machine-vision technologies in agriculture. [Knowledge Acquisition and Modeling, 2009. KAM'09. Second International Symposium on], 330-334.
- [72] Dang, H., Song, J., Guo, Q., A Fruit Size Detecting and Grading System Based on Image Processing. [Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC), 2010 2nd International Conference on], 83-86.
- [73] Studman, C., Computers and electronics in postharvest technology—a review, *Computers and electronics in Agriculture*, 2001, 30(1), 109-124.
- [74] Mustafa, N., Gandi, S., Sharif, Z., Ahmed, S., Real-time implementation of a fuzzy inference system for banana grading using DSP TMS320C6713 platform. [Research and Development (SCORed), 2010 IEEE Student Conference on], 324-328.
- [75] Wulfsohn, D., Gundersen, H.J.G., Vedel Jensen, E.B., Nyengaard, J.R., Volume estimation from projections., *Journal of microscopy*, 2004, 215, Pt 2, 111-20.

- [76] Menguito, B.P., Nagata, M., Qixin, C., others, Study on sorting system for strawberry using machine vision, *Journal of JSAM*, 2000, 62(1), 100-110.
- [77] Nagata, M., Cao, Q., Bato, P., Shrestha, B., Kinoshita, O., Basic study on strawberry sorting system in Japan. [1997 ASAE Annual International Meeting Technical Papers, Paper], 49085-9659.
- [78] Garcia-Ramos, F.J., Valero, C., Homer, I., Ortiz-Cañavate, J., Ruiz-Altisent, M., Non-destructive fruit firmness sensors: a review, *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2005, 3(1), 61-73.
- [79] Lorente, D., Aleixos, N., Gómez-Sanchis, J., Cubero, S., Garcia-Navarrete, O.L., Blasco, J., Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment, *Food and Bioprocess Technology*, 2012, 5(4), 1121-1142.
- [80] Burger, J., Hyperspectral NIR image analysis. ,Ph.D. thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, Sweden, 2006.
- [81] Aleixos, N., Blasco, J., Navarrón, F., Moltó, E., Multispectral inspection of citrus in real-time using machine vision and digital signal processors, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 33(2), 121-137.
- [82] Blasco, J., Aleixos, N., Gómez-Sanchis, J., Moltó, E., Recognition and classification of external skin damage in citrus fruits using multispectral data and morphological features, *Biosystems Engineering*, 2009, 103(2), 137-145.
- [83] Lathuiliere, A., Mansouri, A., Voisin, Y., Marzani, F., Gouton, P., Stereoscopic system for 3D reconstruction using multispectral camera and LCD projector, *The Imaging Science Journal*, 2006, 54(1), 19-28.
- [84] Wang, N.-N., Sun, D.-W., Yang, Y.-C., Pu, H., Zhu, Z., Recent Advances in the Application of Hyperspectral Imaging for Evaluating Fruit Quality, *Food Analytical Methods*, 2015, 1-14.
- [85] Povey, M.J., Ultrasonics of food, *Contemporary Physics*, 1998, 39(6), 467-478.
- [86] Povey, M., Ultrasonics in food engineering Part II: Applications, *Journal of Food Engineering*, 1989, 9(1), 1-20.
- [87] Povey, M., McClements, D., Ultrasonics in food engineering. Part I: Introduction and experimental methods, *Journal of Food Engineering*, 1988, 8(4), 217-245.
- [88] Mizrach, A., Ultrasonic technology for quality evaluation of fresh fruit and vegetables in pre-and postharvest processes, *Postharvest biology and technology*, 2008, 48(3), 315-330.
- [89] Morrison, D., Abeyratne, U., Ultrasonic technique for non-destructive quality evaluation of oranges, *Journal of Food Engineering*, 2014, 141, 107-112.
- [90] Patel, K.K., Khan, M.A., Kar, A., Recent developments in applications of MRI techniques for foods and agricultural produce—an overview, *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(1), 1-26.

- [91] Nicolai, B.M., Beullens, K., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K.I., Lammertyn, J., Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review, *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 46(2), 99-118.
- [92] Walsh, K.B., Commercial adoption of technologies for fruit grading, with emphasis on NIRS, *Information and technology for sustainable fruit and vegetable production*, FRUTIC, 2005, 5.
- [93] Ma, Y., Wang, Q., Wang, X., Wang, H., Research of pesticide residues on fruit by terahertz spectroscopy technology. [International Conference on Optical Instruments and Technology (OIT2011)], 820125-820125.
- [94] Kapach, K., Barnea, E., Mairon, R., Edan, Y., Ben-Shahar, O., Computer vision for fruit harvesting robots-state of the art and challenges ahead, *International Journal of Computational Vision and Robotics*, 2012, 3(1-2), 4-34.
- [95] Bac, C.W., Henten, E.J., Hemming, J., Edan, Y., Harvesting Robots for High-value Crops: State-of-the-art Review and Challenges Ahead, *Journal of Field Robotics*, 2014, 31(6), 888-911.
- [96] Heinemann, P., Baugher, T., Advanced Technologies for Thinning of Tree Fruit, Engineering Solutions Workshop, Carnegie Mellon University, Nov. 2012, http://www.cs.cmu.edu/~casc/specialty_crops_workshop_2012/04a-AutomatedThinning.pdf.
- [97] Van Henten, E., Van Tuijl, B., van Hemming, J., Kornet, J., Bontsema, J., Van Os, E., Field test of an autonomous cucumber picking robot, *Biosystems Engineering*, 2003, 86(3), 305-313.
- [98] Jutras, P., Coppock, G., Harvesting citrus fruit with an oscillating air blast, *Transactions of the ASAE*, 1963, 6(3), 192-0194.
- [99] Terzic, J., Terzic, E., Nagarajah, R., Alamgir, M., Ultrasonic Fluid Quantity Measurement in Dynamic Vehicular Applications. A Support Vector Machine Approach. Chapter 2 - Ultrasonic Sensing Technology. Springer International Publishing, 2013.
- [100] Kuttruff, H. *Ultrasonics: Fundamentals and applications*. Springer Science & Business Media, 1991.
- [101] Laugier, P., Haiat, G. Introduction to the Physics of Ultrasound. In *Bone Quantitative Ultrasound* (Editors: Pascal Laugier, Guillaume Haiat), Springer Netherlands.
- [102] Cox, B., *Acoustics for Ultrasound Imaging, Lecture Notes*, University College London, 2012.
- [103] Bass, H., Sutherland, L., Zuckerwar, A., Atmospheric absorption of sound: Update, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1990, 88(4), 2019-2021.
- [104] Lurton, X. *An introduction to underwater acoustics: principles and applications*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [105] Saito, M., Morita, S., Ultrasonic and spectroscopic studies on photoactivation of euglena, *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(11), 114701.

- [106] Watanabe, T., Yamada, S., Sound attenuation through absorption by vegetation., *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 1996, 17(4), 175-182.
- [107] Martens, M., Severens, P., Van Wissen, H., Van Der Heijden, L., Acoustic reflection characteristics of deciduous plant leaves, *Environmental and experimental botany*, 1985, 25(3), 285-292.
- [108] Farias, M., Álvarez-Arenas, T.G., Sancho-Knapik, D., Peguero-Pina, J.J., Gil-Pelegrin, E., Shear waves in plant leaves at ultrasonic frequencies: shear properties of vegetal tissues. [Ultrasonics Symposium (IUS), 2012 IEEE International], 1513-1516.
- [109] Fukuhara, M., Acoustic characteristics of botanical leaves using ultrasonic transmission waves, *Plant Science*, 2002, 162(4), 521-528.
- [110] Lee, S., Cho, B.-K. Evaluation of the firmness measurement of fruit by using a non-contact ultrasonic technique. [Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013 8th IEEE Conference on], 1331-1336.
- [111] Lee, S., Ha, T.H., Kim, K.B., Kim, M.S. Study on non-contact ultrasonic transducer for measurement of fruit firmness, *Journal of Biosystems Engineering*, 2010, 35(3), 189-196.
- [112] Orfanidis, S.J. *Electromagnetic waves and antennas*, Rutgers University New Brunswick New Jersey, 2002, 227-250.
- [113] Yates, H., Taylor, J., *Infrared transmission of the atmosphere*, Naval Research Lab, Washington DC, NRL 5453, 1960.
- [114] Elterman, L., *UV, Visible, and IR Attenuation for Altitudes to 50 km*, Air Force Cambridge Research Labs Hanscom Air Force Base, Massachusetts, 1968.
- [115] Steinvall, O., Effects of target shape and reflection on laser radar cross sections, *Applied Optics*, 2000, 39(24), 4381-4391.
- [116] Shirley, L.G., Ariel, E.D., Hallerman, G.R., Payson, H.C., Vivilecchia, J.R., *Advanced techniques for target discrimination using laser speckle*, 1992,
- [117] Gausman, H., Allen, W., *Optical parameters of leaves of 30 plant species*, *Plant Physiology*, 1973, 52(1), 57-62.
- [118] Gates, D.M., Keegan, H.J., Schleter, J.C., Weidner, V.R., *Spectral properties of plants*, *Applied Optics*, 1965, 4(1), 11-20.
- [119] Billings, W., Morris, R.J., *Reflection of visible and infrared radiation from leaves of different ecological groups*, *American Journal of Botany*, 1951, 327-331.
- [120] Baldini, E., Facini, O., Nerozzi, F., Rossi, F., Rotondi, A., *Leaf characteristics and optical properties of different woody species*, *Trees*, 1997, 12(2), 73-81.
- [121] Qin, J., Lu, R., *Measurement of the optical properties of fruits and vegetables using spatially resolved hyperspectral diffuse reflectance imaging technique*, *Postharvest Biology and Technology*, 2008, 49(3), 355-365.

- [122] Jia, H.-J., Araki, A., Okamoto, G., Influence of fruit bagging on aroma volatiles and skin coloration of “Hakuho”peach (*Prunus persica* Batsch), *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 35(1), 61-68.
- [123] Lleó, L., Roger, J.-M., Herrero-Langreo, A., Diezma-Iglesias, B., Barreiro, P., Comparison of multispectral indexes extracted from hyperspectral images for the assessment of fruit ripening, *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(4), 612-620.
- [124] Shao, Y., Bao, Y., He, Y., Visible near-infrared spectra for linear and nonlinear calibrations: a case to predict soluble solids contents and pH value in peach, *Food and bioprocess technology*, 2011, 4(8), 1376-1383.
- [125] Prowave, Application Note -AP050830, 2005, www.prowave.com.tw
- [126] Senscomp , Inc. , www.senscomp.com/
- [127] Excelitas Technologies Corp., <http://www.excelitas.com/>
- [128] Brolis Semiconductors Ltd., <http://brolis-semicon.com/>
- [129] Premier Farnell Ltd., <http://www.farnell.com/>
- [130] Miller, G., Boie, R., Sibilía, M., Active damping of ultrasonic transducers for robotic applications. [Robotics and Automation. Proceedings. 1984 IEEE International Conference on], 379-384.
- [131] Garcia-Rodriguez, M., Garcia-Alvarez, J., Yanez, Y., et al, Low Cost Matching Network for Ultrasonic Transducers, *Physics Procedia*, 2010, 3(1), 1025-1031.
- [132] An, J., Song, K., Zhang, S., Yang, J., Cao, P., Design of a Broadband Electrical Impedance Matching Network for Piezoelectric Ultrasound Transducers Based on a Genetic Algorithm, *Sensors*, 2014, 14(4), 6828-6843.
- [133] Krimholtz, R., Leedom, D.A., Matthaei, G.L., New equivalent circuits for elementary piezoelectric transducers, *Electronics Letters*, 1970, 13(6), 398-399.
- [134] Redwood, M., Transient performance of a piezoelectric transducer, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1961, 33(4), 527-536.
- [135] Lucklum, R., Soares, D., Kanazawa, K. *Piezoelectric Transducers and Applications*. Antonio Arnau Vives (Ed.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [136] Queirós, R., Girão, P., Serra, A., Single-Mode Piezoelectric Ultrasonic Transducer Equivalent Circuit Parameter Calculations and Optimization Using Experimental Data, *IMEKO TC4 International Symposium on New Technologies in Measurement and Instrumentation*. 2, 2005.
- [137] Hernandez, J.R.G., Bleakley, C.J., Low-cost, wideband ultrasonic transmitter and receiver for array signal processing applications, *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(5), 1284-1292.
- [138] Svilainis, L., Dumbrava, V., Evaluation of the ultrasonic transducer electrical matching performance, *Ultrasound*, 2007, 62(4), 16-21.
- [139] Hastie, T., Tibshirami, R., Friedman, J., *The Elements of Statistical Learning* Springer, New York, 2001.

- [140] Casella, G., Fienberg, S., Olkin, I., Springer Texts in Statistics, New York, 2010.
- [141] Ahn, H., Choi, E., Han, I., Extracting underlying meaningful features and canceling noise using independent component analysis for direct marketing, *Expert Systems with Applications*, 2007, 33(1), 181-191.
- [142] Hyvärinen, A., Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis., *IEEE transactions on neural networks / a publication of the IEEE Neural Networks Council*, 1999, 10(3), 626-34.
- [143] Ozawa, S., Kotani, M., A study of feature extraction and selection using independent component analysis, Graduate School of Science and Technology of Kobe University, 2000.
- [144] Kononenko, I., Simec, E., Robnik-Sikonja, M., Overcoming the myopia of inductive learning algorithms with RELIEFF, *Applied Intelligence*, 1997, 7(1), 39-55.
- [145] Kohavi, R., John, G.H., Wrappers for feature subset selection, *Artificial intelligence*, 1997, 97(1), 273-324.
- [146] Merkle, E.C., Steyvers, M., Choosing a strictly proper scoring rule, *Decision Analysis*, 2013, 10(4), 292-304.
- [147] Selten, R., Axiomatic Characterization of the Quadratic Scoring Rule, *Experimental Economics*, 1998, 1(1), 43-61.
- [148] Fawcett, T., ROC graphs: Notes and practical considerations for researchers, *Machine learning*, 2004, 31(1), 1-38.
- [149] Parker, C. An analysis of performance measures for binary classifiers. [2011 IEEE 11th International Conference on Data Mining], 517-526.
- [150] Powers, D.M., Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation, 2011.
- [151] Ferreira, D.I.R., Monda mecânica de Flores em Pessegueiro, MSc. Dissertation , Instituto Politécnico de Castelo Branco. 2016.
- [152] RS Components, Electrocomponents plc, pt.rs-online.com
- [153] Parker Hannifin Corporation, www.parker.com/
- [154] Isliker Magnete AG, www.islikermagnete.ch/
- [155] Murphy, Enovation Controls LLC, www.fwmurphy.com
- [156] SMC Corporation, <https://www.smc.eu>
- [157] Coble, S., *Materials Data Book*, Cambridge: Cambridge University Engineering Department, 2003.
- [158] Branco, C.M., *Mecânica dos materiais*, Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.
- [159] Beer, F.P., Johnston, R., Dewolf, J., Mazurek, D., *Mechanics of Materials*, McGraw-Hill, New York, 1981.

- [160] Sclater, N., Chironis, N.P., Mechanisms and mechanical devices sourcebook, McGraw-Hill, New York, 2001.
- [161] Shigley, J.E., Mischke, C.R., Budynas, R.G, Mechanical engineering design, McGraw-Hill, New York, 2004.
- [162] General Electric, A Guide to Plastic Gearing, http://kbam.geampod.com/kbam/reflection/assets/thumbnail/7106_8.pdf
- [163] Almacinha, J., Seabra, J., Aplicação de sistemas de precisão normalizados na especificação da folga entre dentes de rodas cilíndricas de engrenagens exteriores. O controlo dimensional da espessura dos dentes, Universidade do Porto, 1992.
- [164] Tipler, P.A., Mosca, G., Física para cientistas e engenheiros: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica, Gen-LTC, 2000.
- [165] Solidworks, Dassault Systèmes, www.solidworks.com/
- [166] Lingaiah, K. Machine design databook. McGraw-Hill, 2003
- [167] Texas Instruments Incorporated, <https://www.ti.com/>
- [168] Mouser Electronics Incorporated, <https://www.mouser.com>
- [169] R.C Chivers, H.R., Anson, L.W., Ultrasonic studies of preserved peaches, Ultrasonics, 1994, 33(1), 75-77.

Anexo I

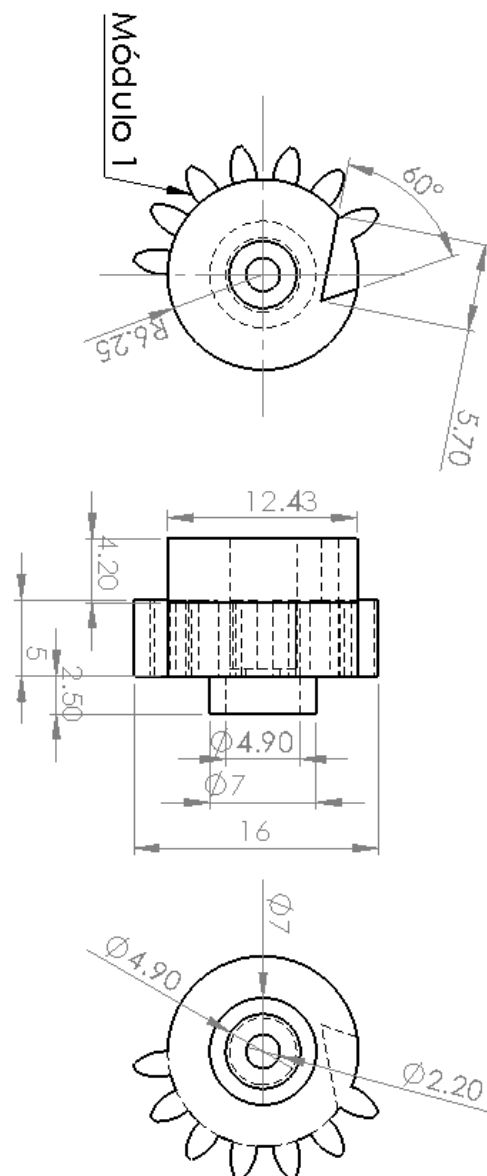


Figura A.1 - Engrenagem com roda de lingueta

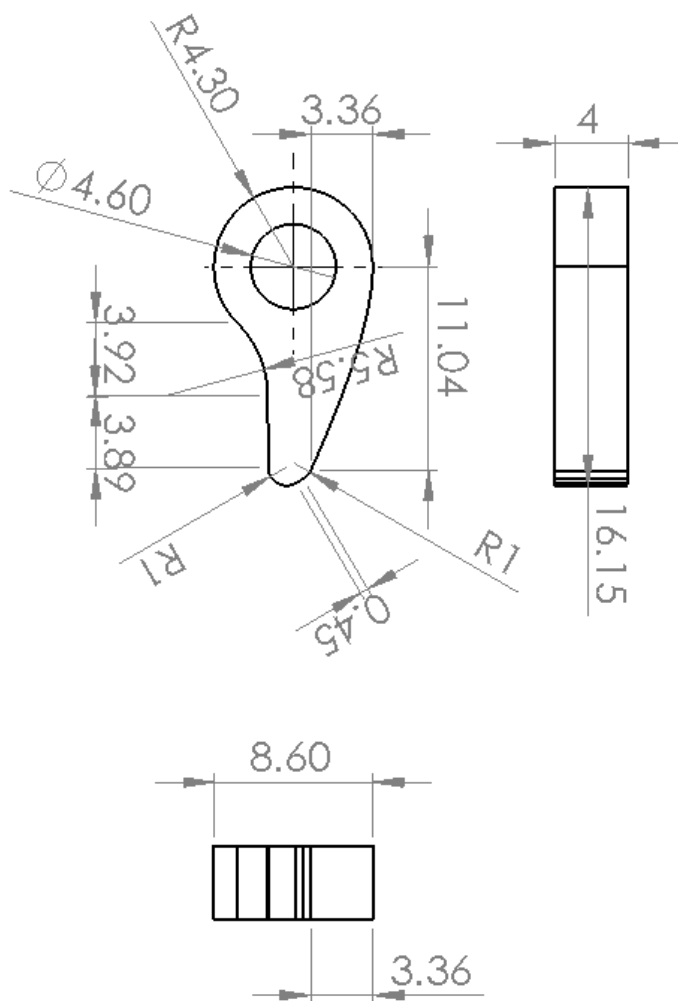


Figura A.2 - Lingueta.

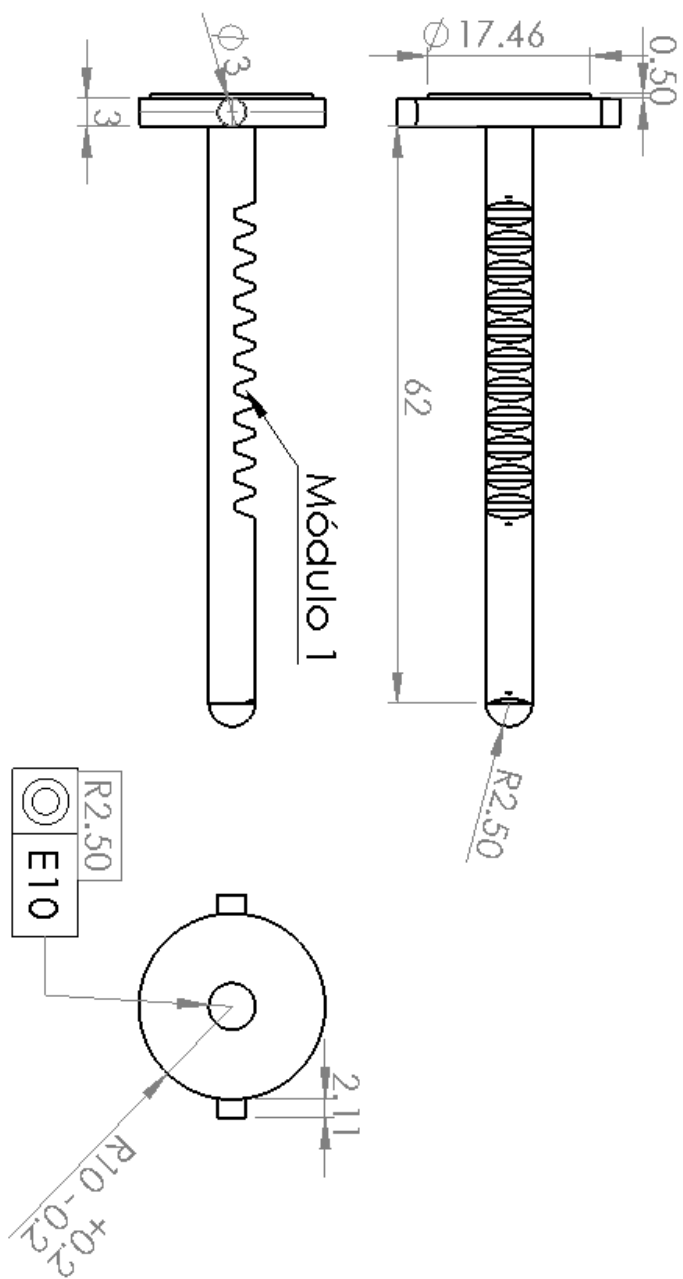


Figura A.3 - Cremalheira redonda êmbolo.

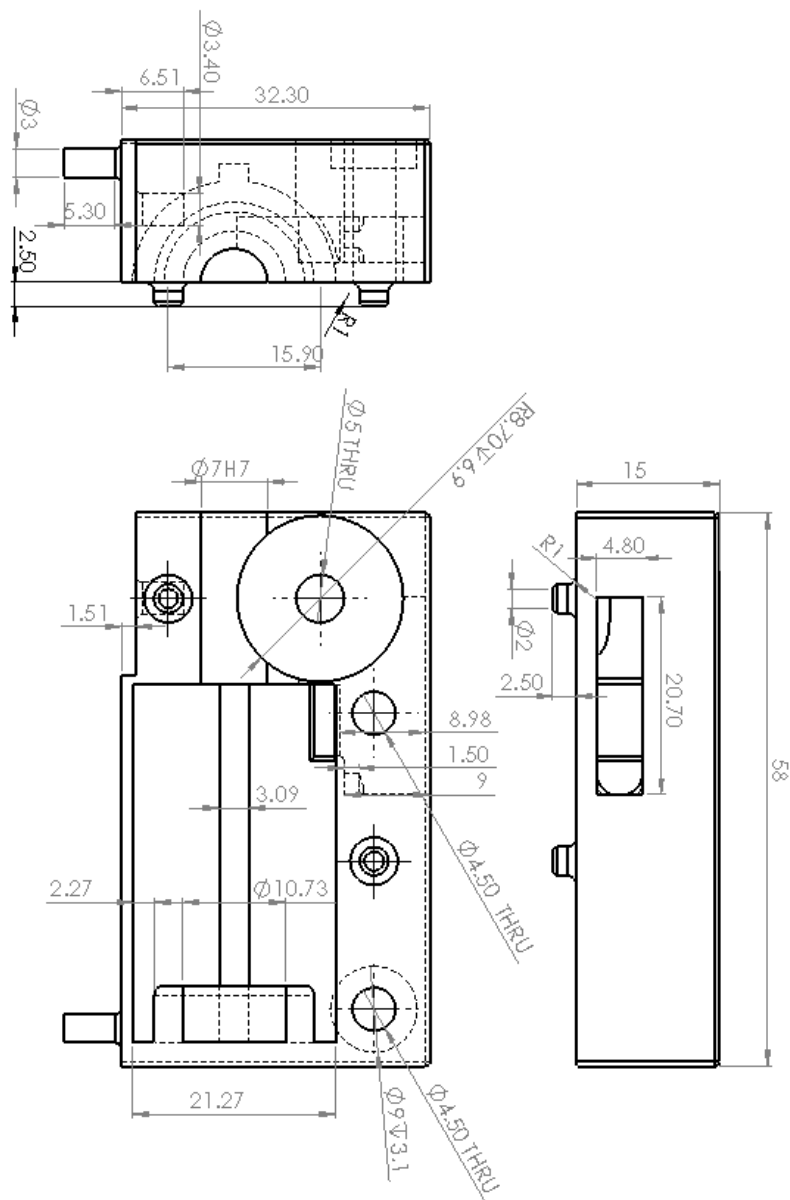


Figura A.4 - Caixa dos atuadores lineares, lado 1.

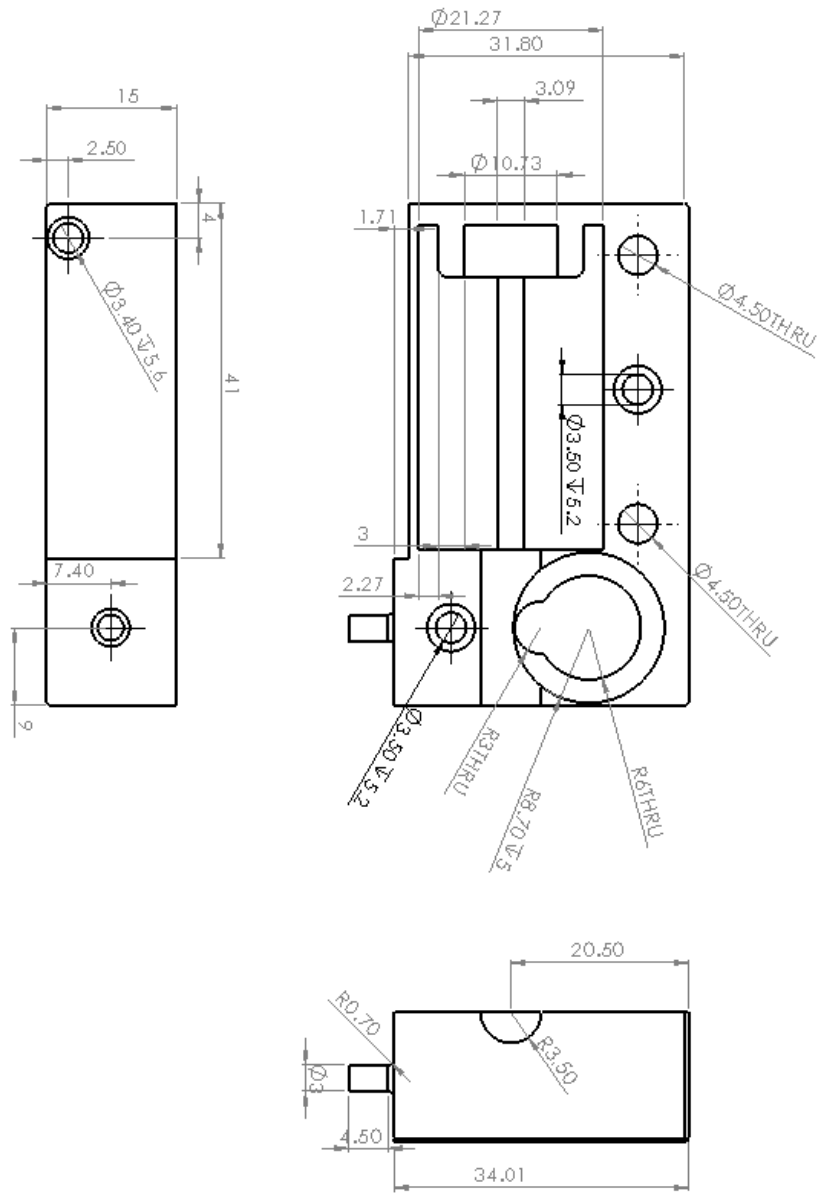


Figura A.5 - Caixa dos atuadores lineares, lado 2.

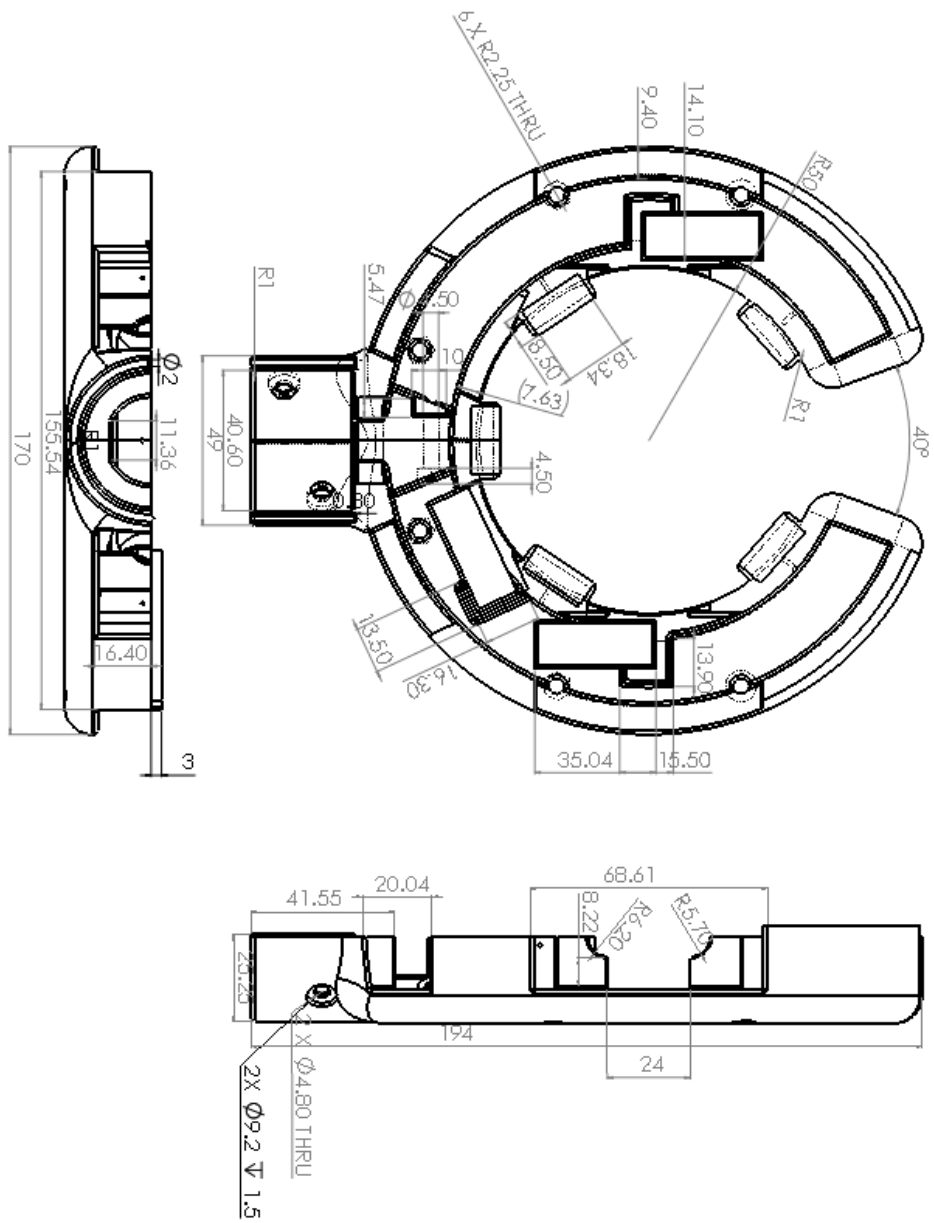


Figura A.6 - Estrutura principal do dispositivo, lado 1. O lado 2 é simétrico segundo o plano apresentado na vista central do desenho e segundo o plano transversal a este.