

## **AUTOMATIC FRUIT THINNING: PERSPECTIVES AND CHALLENGES**

MARCO LOPES<sup>1</sup>, PEDRO DINIS GASPAR<sup>2</sup>, FERNANDO SANTOS<sup>3</sup>, MARIA PAULA SIMÕES<sup>4</sup>

<sup>1,2,3</sup> Universidade da Beira Interior, Departamento de Engenharia Eletromecânica, Rua Marquês d'Ávila e Bolama, 6201-001, Covilhã, Portugal

<sup>4</sup> Escola Superior Agrária - Instituto Politécnico de Castelo Branco, Quinta da Senhora de Mércules, 6000-909 Castelo Branco

### **Resumo**

**A monda manual permanece ainda como sendo a técnica predominante na monda de frutos. As soluções alternativas encontradas na literatura baseiam-se num de dois conceitos: veio rotativo com elementos de impacto flexíveis e dispositivo vibratório, apresentando ambos um carácter não seletivo. Este artigo faz uma breve descrição dessas soluções, assim como das técnicas de sensorização de produtos hortofrutícolas investigadas e aplicadas até à data no campo e em ambiente industrial. Com base nos problemas, possibilidades observadas e o suporte de literatura adicional, sugerem-se possíveis linhas de desenvolvimento de sistemas e configurações de atuação e sensorização, evidenciando as vantagens e os desafios das respetivas implementações.**

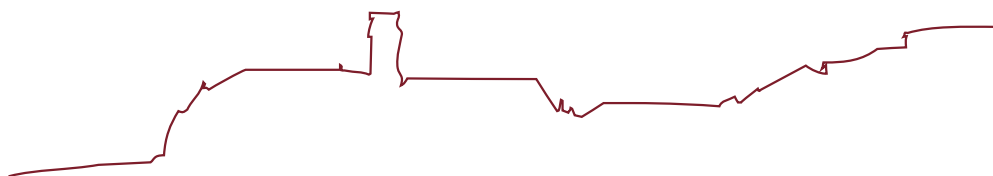
Palavras-chave: Monda de frutos, Hortofrutícolas, Sensorização, Atuação, Automatização



## **ABSTRACT**

**Manual thinning remains as the predominant technique in fruit thinning. Alternative solutions found in the literature are based on two distinct concepts: a rotating shaft with flexible impact elements, or a vibration device, presenting both a non-selective basis. This paper includes a brief description of these solutions, as well as the sensing techniques of horticultural products investigated and implemented to date in the field and industrial environments. Based on the problems, observed possibilities and additional literature support, possible lines for the development of systems and sensing and acting configurations are suggested, highlighting the advantages and challenges of their respective implementations.**

Keywords: Fruit thinning, Horticultural, Sensing, Acting, Automation



## 1. Introdução

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. Caso a poda seja pouco severa para que garanta uma maior produção, e o vingamento dos frutos (transformação das flores em frutos) for elevado, obtém-se um excesso de carga caso se verifiquem condições climáticas favoráveis. Nesta condição, resta 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 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 menores dimensões 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. Este procedimento terá que ter em consideração as condições locais, particularmente no que respeita à versatilidade que é necessária de acordo com a heterogeneidade das plantas, resultante também da heterogeneidade das parcelas e do solo. Neste artigo descrevem-se e discutem-se possíveis topologias de sensorização e atuação para dispositivos automáticos e semiautomáticos de monda seletiva de frutos. Inicialmente são definidas as especificações que definem quais as condições que um dispositivo de monda de frutos deve satisfazer para que demonstre interesse comercial. De seguida, realiza-se uma breve descrição dos pomares e árvores de fruto como meio de operação para dispositivos automáticos, evidenciando as condicionantes envolvidas na passagem da definição de especificações para a formulação de modelos conceptuais e para a adoção de soluções para os diferentes elementos constituintes. São brevemente analisadas as topologias mais comuns de sensorização e atuação implementadas na investigação de sistemas autónomos de colheita de frutos. São também descritas possibilidades alternativas de mecanismos de atuação. Por último, é sugerido um modelo conceptual para um dispositivo semiautomático para a monda seletiva de fruto.



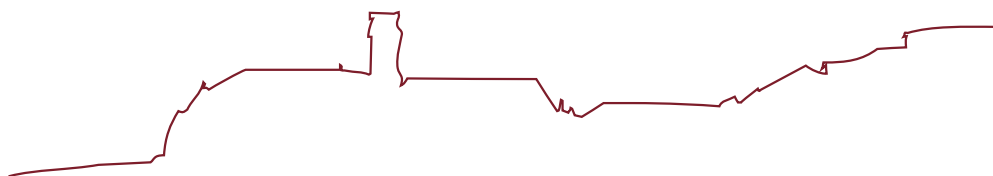
## **2. Estado da arte**

### **2.1. Dispositivos de monda**

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 presentes na literatura técnica e 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. Os dispositivos encontrados na literatura podem ser agrupados em dois conceitos: veio rotativo com hastes flexíveis (Martin-Gorriz *et al.*; 2012; Miller *et al.*, 2011) e agitadores de ramos e troncos (Berlage e Langmo, 1982; Martin *et al.*, 2010; Rosa *et al.*, 2008).

### **2.2. Sensorização de frutos e vegetais**

Existem vários estudos de revisão que abordam a sensorização de frutos e vegetais, quer para a extração de propriedades externas como de propriedades internas, no campo e em meio industrial (Du e Sun, 2006). O foco atual da investigação, para aplicações no campo e árvores de frutos, é a visão computacional baseada em câmaras que operam no espectro visível, ou câmaras hiperspetrais (Jimenez *et al.*, 2000). Contudo, a oclusão dos frutos por parte das folhas e ramos faz com que o grau de deteção seja muitas vezes insuficiente, e na época de monda este facto é ainda acentuado pela pigmentação e pelas pequenas dimensões dos frutos, assim como pela alta densidade de folhagem presente em diversas espécies e cultivares. Assim, para que seja possível conceber dispositivos capazes de exercer uma monda seletiva, é necessário desenvolver sensores que permitam distinguir os diferentes tipos de objetos. As tecnologias de espectroscopia eletromagnética e ultrassónica são as que mais se aproximam de satisfazer essa necessidade, contudo não são por norma aplicadas em contextos que requeiram uma rápida operação em tempo-real.



### 3. Especificações

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:

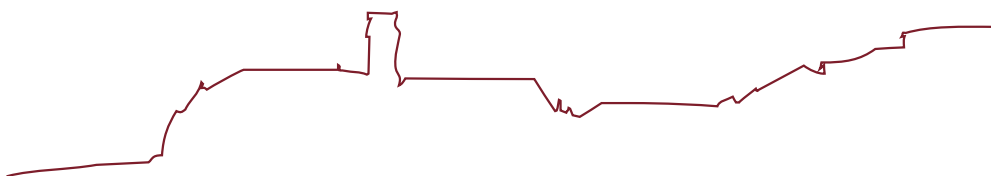
1. Agilizar significativamente o processo face ao método manual, que apresenta uma duração de 15 a 20 minutos por árvore por trabalhador. Além da óbvia redução de mão-de-obra necessária, a redução do período de tempo da execução dos diferentes processos frutícolas é por si só um fator extremamente valioso para os produtores, de um ponto de vista de gestão de recursos e da 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 impactos económicos positivos 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 uma possibilidade de infligir danos significativos, a pessoas ou às árvores.

### **3.1. Caracterização, variabilidade e condicionamento do meio de operação**

Os ambientes agrícolas são, de forma geral, cenários altamente complexos e destrutturados (Kapach *et al.*, 2012). Uma árvore de fruto como meio de operação de um dispositivo automatizado possui três principais fontes de variabilidade: objetos, ambiente e espécies (Bac *et al.*, 2014). Os objetos presentes e constituintes de uma dada árvore tais como frutos, ramos e folhas variam significativamente a sua posição relativa, tamanho, forma e propriedades óticas. Não existem até à data modelos que permitam prever a posição onde existem ou existirão frutos a vingar, pelo que os dispositivos, seja para a colheita ou para a monda seletiva, 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 de melhoramento de plantas (viveiristas) produzirem continuamente novas cultivares no sentido de melhorar a produção ou responder às necessidades do mercado. Os frutos de uma mesma árvore podem variar significativamente de cor, forma e dimensões (Bac *et al.*, 2014). No entanto, esta variação é minimizada na monda, tanto mais quanto mais próxima da plena floração se realizar a intervenção. Contudo, não deixam de existir fenómenos imprevisíveis como o surgimento de frutos em posição colateral, em que o acesso por parte de um qualquer atuador a cada um dos frutos, sem afetar os restantes, é dificultado, 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, pelo que, os sistemas automatizados 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 produção: pomares, estufa, *indoor farming* 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 e níveis de CO<sub>2</sub> podem ser controlados. Os processos nesses sistemas de produção, de condições controladas, são, portanto, mais facilmente automatizáveis. Contudo, o foco do trabalho apresentado neste artigo 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.

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 acrescida de conceber dispositivos com suficiente versatilidade para atuar sobre pomares que contenham múltiplas cultivares e espécies, 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 a mesma o mais detalhadamente possível, para que consigam atingir soluções funcionais (Bac *et al.*, 2014).



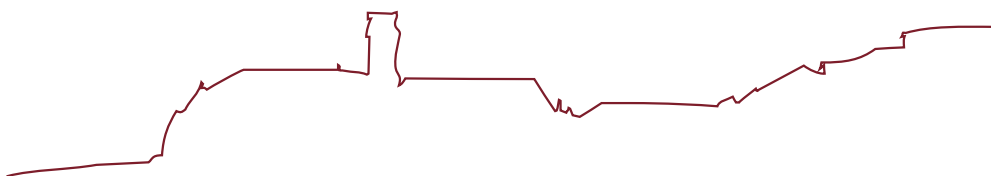
### 3.2. Manipulador móvel autónomo

Um sistema de monda seletiva totalmente automatizado necessita de estruturas articuladas que lhe confirmam um número suficiente de graus de liberdade, permitindo o posicionamento e orientação dos atuadores 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 equipado com uma garra, montado numa plataforma móvel, frequentemente denominada AGV (*Automated Guided Vehicle*), exemplificada na Figura 1, ou em tratores com condução autónoma, em conjunto com tecnologia de visão computacional. Esta solução 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 operaram no espectro visível, ou em câmaras multiespectrais (Bac *et al.*, 2014).



Figura 1 – Ensaios de campo de um sistema autónomo de colheita de frutos baseado num manipulador PRRRP (De-An *et al.*, 2011).

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 Van Henten *et al.* (2003). No caso de um sistema com translação baseada em carris aéreos, poder-se-ia ainda considerar a utilização de robôs de configuração delta (manipuladores paralelos), ou semelhantes.

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. Contém quatro braços articulados com uma garra customizada e atinge ciclos de operação de apenas 1 segundo. No entanto, é de notar que os kiwis se encontram em latada, suspensos no ar e sem um número significativo de obstáculos na periferia (Scarfe *et al.*, 2009).

Devido às dimensões típicas dos manipuladores e ao espaço disponível nos interstícios das árvores, os sistemas autónomos de colheita 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 indicado, 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 pode facilitar a implementação e melhorar o desempenho 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 relacionadas com robôs de colheita

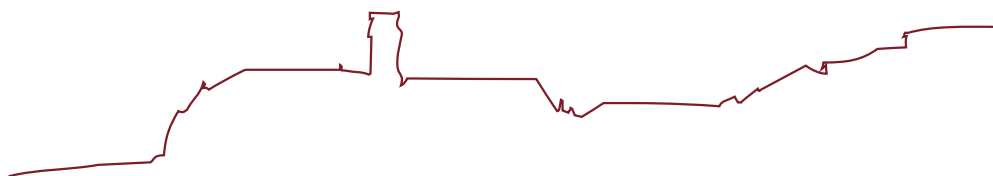


seletiva de frutos, o desempenho destes não tem demonstrado melhorias significativas nas últimas três décadas e nenhum dos sistemas presentes na literatura atingiu o mercado. Bac *et al.*, (2014) e Kapach *et al.* (2012) enunciam cinco principais causas para o baixo sucesso dos sistemas autónomos de 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.

### 3.3. Topologias e mecanismos de atuação

#### 3.3.1. 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, sendo inspirados no 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 se envolver ou fornecer algum tipo de apoio ao fruto, já que 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, que por sua vez, na presença de frutos em posição colateral dificilmente seria implementado sem existir contacto com os restantes frutos. Além disso, esses mecanismos adicionam tempo ao ciclo de operação por requererem 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. Além disso, 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 individualmente sobre cada fruto alvo, evitando danos aos restantes, 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, e conseqüentemente uma acessibilidade reduzida. Adicionalmente, 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.

### **3.3.2. *Jato de fluido pressurizado***

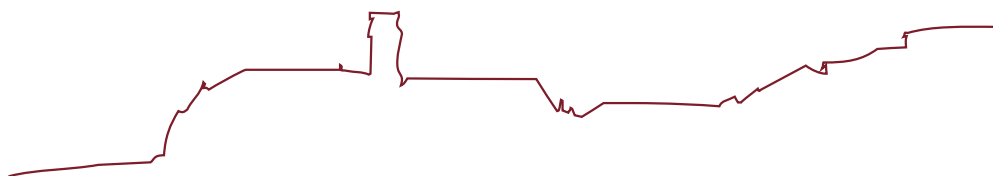
A remoção de frutos através da projeção de um jato de fluido pressurizado (ar ou água), ao invés da utilização de qualquer tipo de atuador que requeira um posicionamento próximo dos frutos a remover, apresenta-se como uma potencial abordagem para reduzir os danos associados ao posicionamento dos manipuladores 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 lhe associa um alto custo de operação. Este conceito foi já testado para a colheita de citrinos (Jutras e Coppock, 1963; Whitney e Patterson, 1972), mas de forma não seletiva, sendo implementado com ventiladores axiais de grandes dimensões, acabando por resultar num efeito semelhante ao obtido através agitadores de ramos e troncos. Existe também um estudo científico que descreve a utilização de jatos de água pressurizada para a monda de pêssegos (Byers, 1990).

### 3.3.3. *Vibração*

Diezma e Rosa (2005) 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 agitação 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



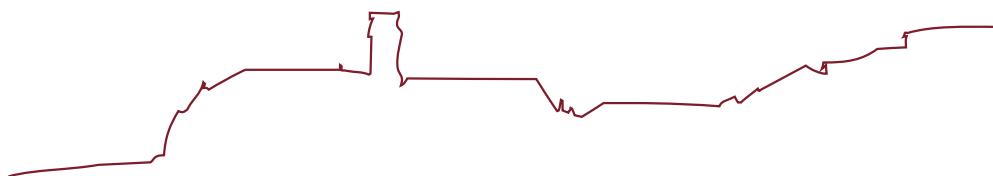
problemas mencionados com a mobilidade dos manipuladores nos interstícios das árvores. Este efeito poderia ser conseguido com um manipulador que em vez de possuir uma garra comum possuiria um motor linear com uma ponteira em “U”. Contudo para que este método permita seletividade, é necessário que proceda de algum modo ao posicionamento de acelerómetros ao longo dos ramos. No estudo de Diezma e Rosa (2005) 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.

### 3.4. Estrutura radial com múltiplos sensores e atuadores

Grande parte do ciclo de trabalho das soluções completamente automatizadas descritas anteriormente é dedicada à identificação dos frutos e frequentemente, esta etapa é subdividida em duas partes. Na primeira parte, são identificados tantos frutos quanto possível com base em 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 a 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 um sistema de malha fechada que recebe *feedback* por parte dos sensores (Baeten *et al.*, 2008). 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. Adicionalmente, os frutos possuem pequenas dimensões e uma pigmentação predominantemente verde. Posto isto, 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, mostrar-se-



ia como um grande desafio. No entanto, ao contrário da colheita de frutos, frequentemente colheita escalonada, 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 espetro 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 através da localização das 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 por contacto poderia ser utilizada. No entanto, dependendo da posição do fruto a remover, seria necessário proceder constantemente a ajustes da posição do manipulador para que a ferramenta possuísse um 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 que a ferramenta possuísse 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.* (2014) sugeriu que para o desenvolvimento futuro de dispositivos autônomos de colheita de frutos, dado o baixo grau de sucesso até à data, a colaboração humano-robô (robô colaborativo) pode levar à melhoria significativa do desempenho destes sistemas. Esta colaboração permite juntar às capacidades preceptivas das pessoas a precisão e a consistência dos robôs, o que além da potencial melhoria do desempenho, pode também significar uma simplificação dos dispositivos. No caso de um dispositivo de monda semi-automatizada, que recorre a este tipo de colaboração, 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-se, no entanto, o mesmo tipo ferramenta, contendo sensores e atuadores. Caso tal sistema permita satisfazer as especificações estabelecidas anteriormente, apresentar-se-ia como uma solução vantajosa face ao método manual, capaz de exercer seletividade, de construção mais simples e de mais baixo custo do que as possíveis soluções completamente automatizadas.

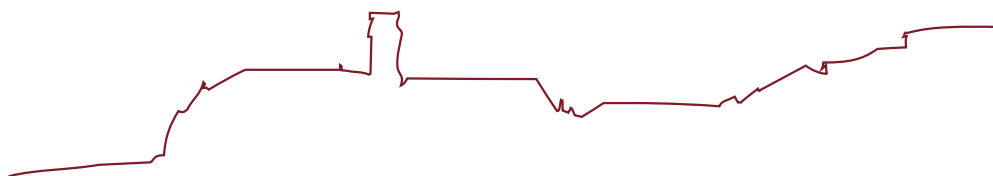
### 3.5. Sugestão de modelo conceptual

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. Existe necessidade de se desenvolverem sensores não tradicionais, dirigidos especificamente a 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, uma vez que permitem avaliar propriedades internas e externas, mecânicas e químicas, dos frutos e folhas (Alfatni *et al.*, 2013; Awad *et al.*, 2012; Lu e Peng, 2006; Merzlyak *et al.*, 2002). 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 e capacidade e precisão 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, para a execução de uma força de impacto sobre o fruto alvo. A utilização de múltiplos sensores e atuadores dispostos numa estrutura radial, que envolve total ou parcialmente os ramos das árvores de fruto, apresenta potencial para permitir a concretização de um dispositivo semi-automático, resolvendo grande parte dos problemas associados aos manipuladores robóticos, enquanto capaz de demonstrar uma vantagem económica face ao método puramente manual.

Assim, sugere-se que um dispositivo semi-automático de monda 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 aglomerados de frutos. O dispositivo é fundamentalmente composto por uma estrutura toroidal, que envolve os ramos, com uma pequena abertura para permitir o seu posicionamento. 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. Um algoritmo de decisão implementado numa unidade de processamento, com parâmetros reguláveis, processa os dados provenientes dos 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 (face à sua posição relativa). Uma vez conseguida uma deteção em pleno dos frutos, ou sendo apurada uma percentagem de deteção com baixa variância, 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 natureza, 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. O fluxograma da Figura 2 ilustra a estrutura lógica das principais fases de operação do dispositivo. Na Figura 3 apresenta-se um desenho que ilustra a estrutura e atuação do conceito sugerido.

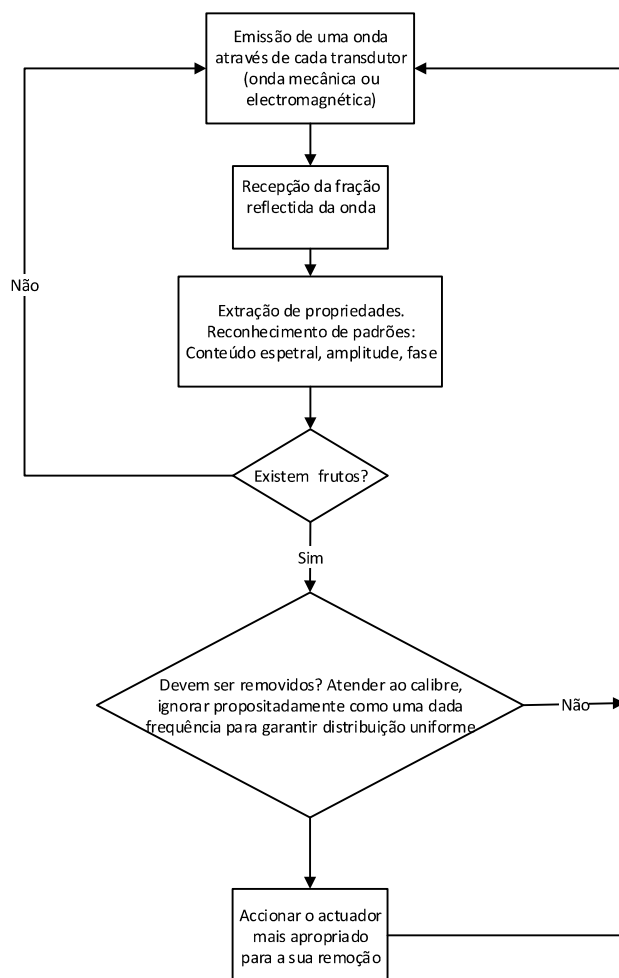


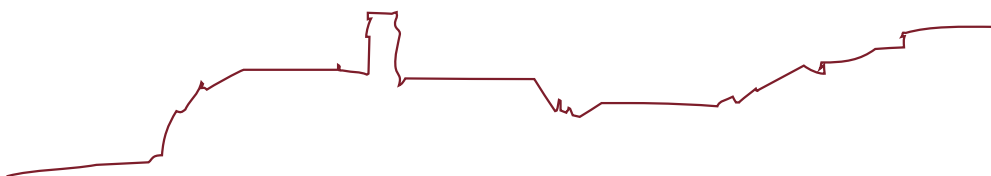
Figura 2 – Fluxograma das fases de operação do dispositivo.



Figura 3 - Desenho ilustrativo do modelo conceptual sugerido.

#### 4. Conclusões

A monda manual de frutos permanece como sendo o método mais frequentemente adotado pelos produtores, devendo-se sobretudo à inconsistência de resultados económicos que se tem vindo a observar em métodos alternativos. Essa inconsistência resulta sobretudo do fato das soluções investigadas até à data serem de cariz não seletivo. Para que seja possível um dispositivo executar a monda seletiva de frutos é necessário que em primeiro lugar se desenvolvam sensores capazes de detetar e diferenciar os diferentes objetos existentes nas copas das árvores de fruto. A colaboração homem-máquina pode melhorar significativamente o desempenho de dispositivos para a automatização de processos relacionados com árvores de fruto. Com base nestas premissas, foi sugerido um modelo conceptual para um dispositivo semi-automático para a monda de frutos. A solução técnica e tecnológica consiste numa estrutura toroidal na qual se encontram posicionados um conjunto de atuadores lineares com uma reduzida área de impacto e um conjunto de sensores, ambos dispostos radialmente. Durante cada varrimento do ramo realizado pelo utilizador no sentido tronco-extremidade, um algoritmo processa os dados de deteção e avaliação dos frutos adquiridos a uma elevada frequência pelos sensores, e decide, pela atuação de um dos atuadores lineares (aquele



cuja posição relativa seja mais favorável à remoção), que gera uma força de impacto no fruto, se um fruto em particular deve ser removido. Este novo conceito enquadra-se numa perspectiva de robótica colaborativa e face ao preenchimento de todos os requisitos que têm ditado o insucesso de outras estratégias, prevê-se como sendo o único que efetivamente seja capaz de melhorar a monda de frutos, pela possibilidade de redução do tempo de ciclo, assegurando a seletividade necessária do processo.

## Referências

- Alfatni, M.S.M., Shariff, A.R.M., Abdullah, M.Z., Marhaban, M.H.B. e Saaed, O.M.B. (2013). The application of internal grading system technologies for agricultural products-Review. *Journal of Food Engineering*, 116(3), 703–725.
- Awad, T., Moharram, H., Shaltout, O., Asker, D. e Youssef, M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*, 48(2), 410–427.
- Bac, C.W., Henten, E.J., Hemming, J. e Edan, Y. (2014). Harvesting Robots for High-value Crops: State-of-the-art Review and Challenges Ahead. *Journal of Field Robotics*, 31(6), 888–911.
- Baeten, J., Donné, K., Boedrij, S., Beckers, W. e Claesen, E. (2008). Autonomous fruit picking machine: A robotic apple harvester. *In Field and Service Robotics*, 531–539.
- Berlage, A. e Langmo, R. (1982). Machine-vs hand-thinning of peaches. *Transactions of the ASAE*, 25(3), 538-543.
- Byers, R. (1990). Thin peaches with water. *Amer. Fruit Grower*, 110(1), 20–21.
- De-An, Z., Jidong, L., Wei, J., Ying, Z. e Yu, C. (2011). Design and control of an apple harvesting robot. *Biosystems Engineering*, 110(2), 112–122.
- Diezma, B. e Rosa, U. (2005). Monitoring of fruit removal for mechanical thinning of peaches. *Frutic*, 5, 12–16.
- Du, C.-J. e Sun, D.-W. (2006). Learning techniques used in computer vision for food quality evaluation: a review. *Journal of Food Engineering*, 72(1), 39–55.
- Jimenez, A., Ceres, R., Pons, J. (2000). A survey of computer vision methods for locating fruit on trees. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1911–1920.
- Jutras, P. e Coppock, G. (1963). Harvesting citrus fruit with an oscillating air blast. *Transactions of the ASAE*, 6(3), 192–0194.



- Kapach, K., Barnea, E., Mairon, R., Edan, Y. e Ben-Shahar, O. (2012). Computer vision for fruit harvesting robots-state of the art and challenges ahead. *International Journal of Computational Vision and Robotics*, 3(1-2), 4–34.
- Lu, R. e Peng, Y. (2006). Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness. *Biosystems Engineering*, 93(2), 161–171.
- Martin, B., Torregrosa, A. e Brunton, J.G. (2010). Post-bloom thinning of peaches for canning with hand-held mechanical devices. *Scientia Horticulturae*, 125(4), 658–665.
- Martin-Gorriz, B., Torregrosa, A. e Brunton, J.G. (2012). Post-bloom mechanical thinning for can peaches using a hand-held electrical device. *Scientia Horticulturae*, 144, 179–186.
- Merzlyak, M.N., Chivkunova, O.B., Melø, T. e Naqvi, K.R. (2002). Does a leaf absorb radiation in the near infrared (780-900 nm) region? A new approach to quantifying optical reflection, absorption and transmission of leaves. *Photosynthesis Research*, 72(3), 263–270.
- Miller, S.S., Schupp, J.R., Baugher, T.A. & Wolford, S.D. (2011). Performance of mechanical thinners for bloom or green fruit thinning in peaches. *HortScience*, 46(1), 43–51.
- Nielsen, M., Slaughter, D.C. e Gliever, C. (2012). Vision-based 3D peach tree reconstruction for automated blossom thinning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8(1), 188–196.
- Scarfe, A.J., Flemmer, R.C., Bakker, H. e Flemmer, C.L. (2009). *Development of an autonomous kiwifruit picking robot*. In *Autonomous Robots and Agents, 2009. ICARA 2009*, 380–384.
- Schupp, J., Baugher, T.A., Miller, S., Harsh, R. e Lesser, K. (2008). Mechanical thinning of peach and apple trees reduces labor input and increases fruit size. *HortTechnology*, 18(4), 660–670.
- Van Henten, E., Van Tuijl, B. van, Hemming, J., Kornet, J., Bontsema, J. e Van Os, E. (2003). Field test of an autonomous cucumber picking robot. *Biosystems Engineering*, 86(3), 305–313.
- Whitney, J. e Patterson, J. (1972). Development of a citrus removal device using oscillating forced air. *Transactions of the ASAE*, 15(5), 849–0855.

