

**DANIEL IMAI
LUCIANO CARLOS FERREIRA MANSONARI**

**PROJETO DE EFETUADOR ROBÓTICO
AUTOMÁTICO PARA RECONHECIMENTO E
COLHEITA DE LARANJAS**

Orientador:

Prof. Dr. Oswaldo Horikawa

São Paulo
2021

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Prof. Dr. Oswaldo Horikawa pelo apoio dado e por ter liberado o acesso do grupo ao Laboratório de Sistemas Mecatrônicos de Precisão para realizar a fabricação e os testes do protótipo apresentado nesse trabalho. Também para os nossos colegas e familiares que nos apoiaram e nos aconselharam sobre o presente trabalho.

*“Nunca ande por trilhas, pois assim só
irá até onde outros já foram”*

-- Alexander Graham Bell

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto e a construção de um efetuador automático para a colheita de laranjas em pomares, a fim de reduzir a dependência na colheita manual. O dispositivo é um atuador linear projetado para ser movimentado por uma estrutura externa. Ao realizar a varredura da copa da laranjeira, o efetuador utiliza visão computacional para reconhecer a fruta madura, e então dispara para realizar a colheita, com velocidade comparável à de um catador humano. Os comparativos de velocidade de colheita são feitos com a colheita feita por pessoas, desconsiderando reduções da taxa de colheita por tempo de serviço e condições climáticas adversas. O efetuador produzido possui um baixo custo de produção (considerando apenas o material necessário para produzir uma unidade de forma manual), e possui um tempo médio de colheita de 2,1 segundos após o acionamento, e é capaz de reconhecer laranjas em um tempo médio de 788ms.

Palavras-Chave – Colheita robótica, agricultura de precisão, visão computacional em agricultura.

ABSTRACT

This paper presents the design and construction of an automatic effector for harvesting oranges in orchards to reduce reliance on manual harvesting. The device is a linear actuator designed to be moved by an external structure. When scanning the canopy of the orange tree, the effector uses computer vision to recognize the ripe fruit, and then triggers to perform the harvest, with speed comparable to that of a human picker. The harvest speed comparisons are made with the harvest done by people, disregarding reductions in the harvest rate due to service time and adverse weather conditions. The harvester produced has a low production cost (considering only the material needed to produce one unit manually), and has an average harvest time of 2.1 seconds after actuation, and is able to recognize oranges in an average time of 788ms.

Keywords – Robotic harvesting, precision agriculture, computer vision in agriculture.

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	O valor econômico e estado do cultivo de laranja em São Paulo	1
1.2	Os problemas da colheita de frutas em pomares	3
1.3	Problema abordado	3
1.4	Objetivo	4
2	O estado da colheita no Brasil	5
3	Soluções atuais para a substituição de apanhadores humanos	7
3.1	Colheitadeiras mecânicas	7
3.2	Apanhadores robóticos	8
3.2.1	Laranja	9
3.2.2	Maçã	11
3.2.3	Kiwi	12
3.2.4	Morango	13
3.3	Soluções em desenvolvimento (patentes/artigos)	14
3.3.1	Projeto do efetuador	14
3.3.2	Sensoriamento	15
3.3.3	Controle de trajetória	15
3.3.4	Projeto completo para outras frutas	16
4	Metodologia	17
4.1	Escopo do projeto	17
4.2	Definições	18
4.3	Metodologia de projeto	18

4.3.1	Método para a definição de requisitos	19
4.3.2	Elaboração de conceitos	20
4.3.3	Prototipagem	20
4.3.4	Avaliação da solução	20
5	Definição de requisitos	21
5.1	Requisitos não-funcionais	22
5.1.1	Custo total e taxa de eficiência de colheita	22
5.1.2	Massa do efetuador	24
5.1.3	Consumo elétrico e pneumático do efetuador	24
5.2	Requisitos funcionais	25
5.2.1	Eficiência de identificação e coleta de laranjas e taxa de laranjas danificadas durante a coleta	25
5.2.2	Raio de coleta de laranja	26
5.2.3	Velocidade de coleta de laranja	26
5.2.4	Tolerância a movimento durante a colheita	26
5.2.5	Período máximo de identificação de laranjas	27
5.2.6	Reconhecimento de características da laranja	27
6	Desenvolvimento	28
6.1	Projeto mecânico	28
6.1.1	Concepção do mecanismo de destacamento	29
6.1.1.1	Conceito inicial	29
6.1.1.2	Outros conceitos de solução	33
6.1.2	Desenvolvimento do protótipo	35
6.1.2.1	Projeto com acionamento pneumático	35
6.1.2.2	Projeto da estrutura de suporte da garra	37
6.1.3	Projeto Pneumático	38

6.2	Sensoriamento e detecção de laranja	39
6.2.1	Tipos de sensores usados na detecção de Frutas	39
6.2.1.1	Sensores Tácteis	40
6.2.1.2	Sensores de Proximidade	40
6.2.1.3	Sensores de Visão	40
6.2.2	Escolha do Conjunto de Sensores	41
6.2.2.1	Sensores usados no protótipo final	42
6.2.3	Estratégia de Visão Computacional	44
6.2.3.1	Hardware Utilizado	46
6.2.3.2	Visão Geral do Algoritmo	47
6.2.3.3	Segmentação por Cor	48
6.2.3.4	Separação em Componentes e Filtro por Tamanho	50
6.2.3.5	Extração de Perímetros	51
6.2.3.6	Detecção de Círculos	52
6.2.3.7	Critério de Decisão	54
6.2.4	Projeto Eletrônico	57
6.3	Controle do efetuator	59
6.3.1	Arquitetura de Controle Escolhida	59
7	Resultados	61
8	Discussão final e conclusão	64
9	Próximos passos	66
	Apêndice A – Diagrama Elétrico	68
	Apêndice B – Desenhos de fabricação das peças principais	69
	Apêndice C – Desenho de conjunto do efetuator final	80

Apêndice D – Lista de Materiais	82
Referências	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 O valor econômico e estado do cultivo de laranja em São Paulo

Desde o nascimento do país, o setor agropecuário é um dos principais motores e econômicos e geradores de emprego do Brasil. Desde 2015, o agronegócio possui uma participação que gira em torno de 20% do Produto Interno Bruto brasileiro. Destes, aproximadamente 15% provém do setor agrícola, composto pelo cultivo, processamento e serviços relacionados a produtos vegetais [1]. Segundo o IBGE, 15 milhões de pessoas ocupavam estabelecimentos agropecuários em 2017 [2].

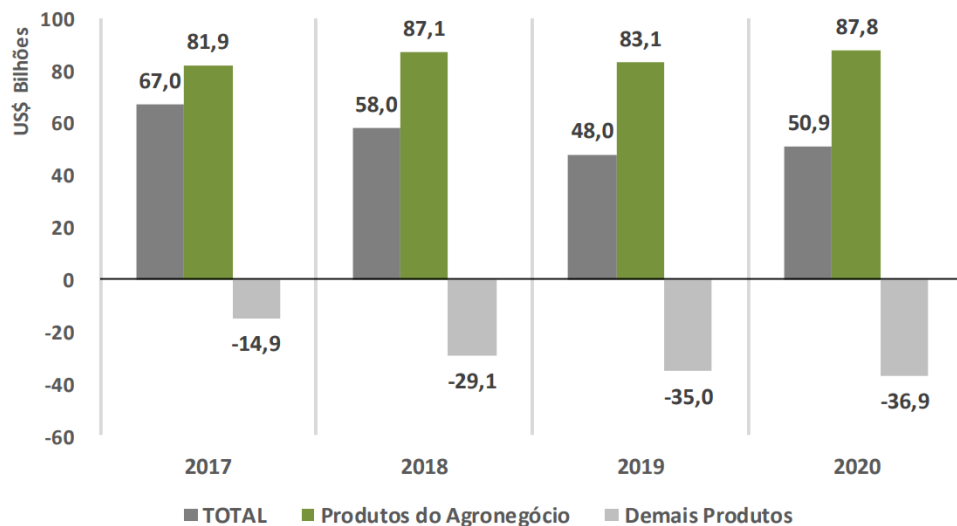


Figura 1: Evolução do Saldo da Balança Comercial Brasileira (em US\$ bilhões). Extraído de CNA Brasil[3].

O agronegócio também é responsável pela maior parte das exportações do país, sendo o Brasil o produtor com maior participação no comércio internacional de diversos produtos. Um produto notável, que em 2009 movimentou cerca de US\$ 2,19bi [4], é a laranja. O Brasil é o maior produtor de laranja no mundo, sendo a maior parte da produção voltada para o mercado internacional na forma de suco de laranja, onde, também no ano de 2009,

o país produziu três em cada cinco copos de suco consumido no mundo [4]. Em números absolutos, a exportação de suco de laranja totalizou em torno de \$ 1,4bi em 2020. Mesmo com queda significativa em relação ao ano anterior, isso se traduz em mais de 1% das exportações totais do agronegócio [3].

A laranja é um dos produtos agrícolas mais presentes no consumo interno e nas exportações brasileiras. Embora propriedades de cultivo estejam presentes em quase todos os estados brasileiros, a maior produção é advinda do estado de São Paulo com quase 80% da produção nacional no ano de 2017 (10,77 milhões de toneladas) [5], e para este ano de 2020 a projeção da produção do principal cinturão de produção de laranja(SP e MG), figura 1, é de uma colheita de um total de 11,554 milhões de toneladas em uma área equivalente a aproximadamente a 400 mil hectares(uma área superior a 2,5 a área da cidade de São Paulo) [4][6].

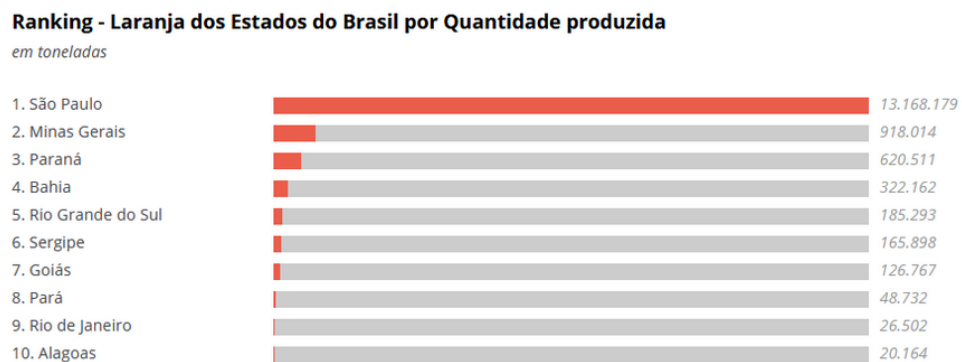


Figura 2: Total produzido nos 10 principais estados produtores de laranja no Brasil em 2017 [2].

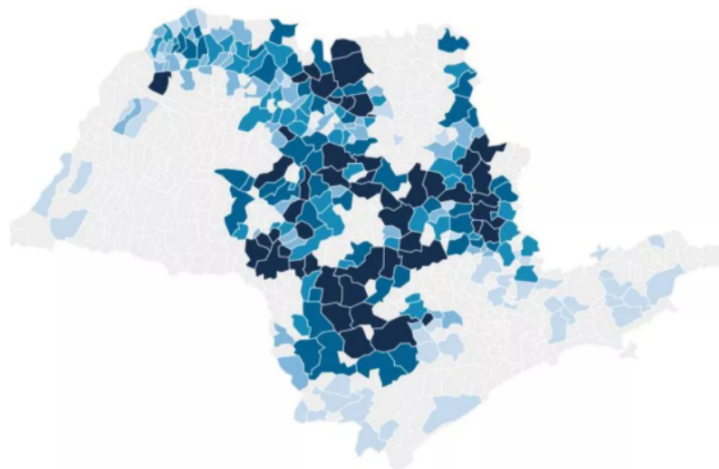


Figura 3: Municípios com pomares com mais de 50 pés de laranja em São Paulo [2].

1.2 Os problemas da colheita de frutas em pomares

Uma das principais fontes de despesas para os produtores de laranja é a mão-de-obra, sendo a maior parte deste custo destinado à colheita [4]. Mesmo sendo líder mundial na produção de laranjas, as colheitas feitas no Brasil utilizam pouca automação, com a vasta maioria das propriedades realizando a colheita manual. Cada uma das centenas de milhões de árvores laranjeiras do estado de São Paulo é colhida por mãos humanas.

Segundo o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEPEA ESALQ USP), em dois modelos de produção de citrícola projetados com base nas práticas adotadas pela citrocultura paulista dos últimos anos, o preço da mão-de-obra variou entre 18 a 24% do custo total da produção de laranja por hectare, dependendo do adensamento da produção e da idade da árvore [7]. Devido ao aumento do salário mínimo, também é o custo que mais cresceu nas últimas décadas, tendo um aumento percentual de 628% no período de 1994 a 2010, enquanto o preço médio da caixa de laranja aumentou apenas 253% [6].

Para o produtor, depender do trabalho humano é inconveniente, já que a colheita só pode ser feita durante o dia, durante intervalos de tempo bem definidos para cada pomar [8]. A mecanização total da colheita possibilita que este processo seja realizado à noite.

1.3 Problema abordado

Este trabalho de fim de curso irá abordar o problema da defasagem tecnológica existente na agricultura brasileira atual, especificamente a dependência do trabalho manual durante o processo de colheita em citrocultura. Em diversos ramos da indústria a automação de processos manuais foi uma decorrência do aumento do custo de mão-de-obra e da oferta de manipuladores robóticos ou outros tipos de maquinário automatizado. No ramo agrícola há uma defasagem no uso de mecanização em determinadas culturas. Há máquinas que realizam a colheita de grãos, algodão e soja, possibilitando a redução dos custos e um melhor funcionamento do processo de colheita. Porém, para o caso dos cítricos, a colheita ainda é baseada no trabalho manual.

No Brasil, a forma de mecanização mais utilizada na colheita de cítricos atualmente são as "Facilitadoras de Colheita", máquinas usadas para auxiliar no processo de colheita manual, e mesmo assim estas máquinas não estão presentes em todas as propriedades. Atualmente, não há solução bem aceita pelo mercado que possibilite a colheita totalmente mecanizada na citrocultura. Este assunto será tratado mais a fundo no capítulo 2.

A dependência da colheita manual já é um problema em muitos países devido à falta de trabalhadores e o encarecimento de mão-de-obra. Trata-se de um emprego temporário que apresenta condições insalubres, tais como a presença de animais peçonhentos e exposição ao sol ou chuva durante todo o período trabalhado. É um trabalho que gera muito desgaste físico ao recolher frutos em galhos de árvore ou no chão e carregar sacos pesados com o produto colhido ao longo de um período extenso de trabalho. O trabalhador realiza, em grande velocidade, uma série de movimentos repetitivos que podem prejudicar a sua saúde a longo prazo, sem receber o treinamento adequado [8].

Estes fatores são agravados pelas as grandes extensões de terra utilizadas nesse tipo de cultivo, a exemplo do principal cinturão de produção do país, que engloba uma área equivalente a mais de 2,5 cidades de São Paulo [2].

1.4 Objetivo

Diante do que foi exposto acima, o objetivo deste trabalho é a elaboração do projeto de um sistema robótico específico para a colheita de laranjas, composto por um efetuador, uma plataforma robótica para sua movimentação e um algoritmo de controle baseado em visão computacional. A estrutura projetada será acoplada a um veículo motorizado ou outra plataforma móvel, cujo projeto está fora do escopo deste trabalho.

2 O ESTADO DA COLHEITA NO BRASIL



Figura 4: Colheita manual de laranjas no Brasil [9].

Em termos de uso máquinas na agricultura, há três modalidades de colheita que podem ser realizadas em uma determinada safra: manual, semi-mecanizada e mecanizada. A colheita manual utiliza apenas a mão-de-obra humana, a semi-mecanizada em conjunto com trabalhadores humanos para automatizar ou facilitar determinadas partes do processo, e a mecanizada é onde apenas as máquinas interagem com os frutos da safra, independente se necessitam de um operador humano ou são completamente automatizadas.

Até o ano de 2020, no Brasil, a colheita de laranjas é feita em sua vasta maioria de forma manual ou semi-mecanizada. Os colhedores utilizam bolsas, carriolas e até a própria camiseta para carregar os frutos até uma bolsa principal, e dependendo da altura da altura

em que estão os frutos utilizam escadas comuns, na colheita manual, ou facilitadores de colheita semi-mecanizada (Figura 2)

As facilitadoras de colheita são maquinários que auxiliam o trabalho dos colhedores ao permitir o seu alcance a parte superior do pomar de uma forma mecanizada, e podem contar com esteiras que transportam as laranjas para um cesto de colheita, o que permite que o colhedor não precise carregar bolsas pesadas. O controle para o posicionamento do cesto é acionado pelos pés dos colhedores, assim conseguem utilizar as 2 mãos para colher.



(a) Facilitadora de colheita LUMASP [10]



(b) Facilitadora de colheita Schuler [11]

Figura 5: Exemplos de facilitadoras de colheita em comercialização atualmente.

É notável que mesmo a segunda máquina tendo uma maior capacidade de carga (Figura 3), podendo erguer 6 pessoas no total, ambas as máquinas possuem uma potência próxima de 80 cavalos. Ambos os dispositivos têm velocidade de deslocamento ao longo das fileiras do pomar de até 10km/h e atingem a altura máxima de 5m. Não há até agora uma solução bem aceita pelo mercado brasileiro que substitua os catadores de laranja humanos para tornar a colheita completamente mecanizada e com desempenho semelhante à colheita manual. Exploraremos algumas soluções disponíveis atualmente na sessão 3, assim como soluções robóticas ainda em desenvolvimento na sessão 4.

3 SOLUÇÕES ATUAIS PARA A SUBSTITUIÇÃO DE APANHADORES HUMANOS

3.1 Colheitadeiras mecânicas

Em 2008 a empresa Jacto [12] apresentou na principal feira agrícola nacional, a AgriShow, uma colheitadeira mecanizada de laranjas que utilizava uma série de hastes flexíveis que rotacionam e atingiam os frutos forçando a sua queda realizando uma colheita sem seleção (Figura 4). Além da colheita sem seleção, outro ponto negativo observado foi a quebra de muitos galhos causados pelo movimento das hastes.

Por não haver informações sobre esse modelo no site da fabricante e por maquinários dessa finalidade, concluímos que o produto foi descontinuado. O modelo foi o único exemplar de colheitadeira mecânica produzido nacionalmente até o momento.



Figura 6: Colheitadeira K5000 [12].

O segundo país com maior produção de laranja é os EUA, onde o cultivo se encontra majoritariamente no estado da Flórida. Devido ao preço mais elevado de mão-de-obra, há um interesse maior na mecanização da colheita no país, onde uma parcela significativa

das propriedades já emprega o uso de colheitadeiras mecânicas. Tais colheitadeiras são classificadas entre “chacoalhadoras de copa” e derrigadeiras, que chacoalham o tronco das árvores.

Embora as colheitadeiras mecânicas gerem grandes esforços mecânicos nas árvores, os estudos de Moseley Lisa A. House[13] e outros autores indicam que os danos causados não impactam significativamente no rendimento das safras seguintes, tanto a curto quanto a longo prazo. Porém podem danificar as frutas colhidas, o que resulta em perda de parte da safra ao ser derrubada no solo ou esmagada pelo equipamento. O alto custo do equipamento e de importação, aliado à necessidade de mão-de-obra especializada e adequação do pomar, representam barreiras à adoção do maquinário pelo mercado brasileiro, que já possui custos menores que o do estadunidense[13].

3.2 Apanhadores robóticos

Em outros países foi observado uma maior busca por automatização e flexibilização na colheita, a fim de permitir a colheita individual de frutos no melhor momento possível. Além da citricultura e de outros frutos que crescem em árvores, como maçãs e kiwis, esta demanda também existe para frutos pequenos e delicados, que requerem mão-de-obra especializada para a sua colheita, tais como morango, tomate cereja e framboesa.

As motivações para a mecanização da colheita através da agricultura de precisão são: escassez de mão-de-obra para realizar a colheita manual, busca por melhor qualidade de fruto colhido, menor dano causado à planta e ao fruto ao realizar a colheita, diminuição do tempo e custo da colheita e diminuição da incidência de frutos desperdiçados.

O cenário motivou o surgimento de Startups e linhas de pesquisa em colheita autônoma, parte da agricultura de precisão. Tais iniciativas buscam soluções voltadas para a colheita autônoma, individual e sem interferência humana dos produtos agrícolas.

Wouter et al.[14] realizou uma detalhada avaliação do estado da arte da colheita robótica de produtos agrícolas, avaliando 50 projetos de pesquisa distintos publicados entre 1982 e 2012, entre eles 6 projetados para a colheita de laranja. Há um aumento significativo no número de projetos publicados nas últimas 3 décadas, onde o número passou de 7 projetos distintos publicados no período entre 1984 a 1992 para 26 publicados entre 2002 a 2012.

Embora nem todos os autores informem números descrevendo o desempenho de seus sistemas em testes a campo ou em laboratório, na média a taxa de sucesso para a lo-

calização dos cultivos era foi de 85%, sucesso na retirada da planta foi de 75%, sucesso no processo completo de colheita foi de 66%, a taxa de frutas danificadas no processo de colheita foi de 5% e o período do ciclo de colheita foi de 33s.

Estes números variam significativamente de projeto para projeto, porém nenhum projeto apresentou taxa de sucesso no processo total de colheita superior a 86%, sendo que os projetos com alta taxa de sucesso apresentavam limitações como ciclo de colheita muito demorado ou volume de trabalho limitado. Segue alguns exemplos notáveis, ainda em desenvolvimento.

3.2.1 Laranja

Embora tenha sido pioneira nos esforços de pesquisa para a colheita robótica, o interesse no desenvolvimento de uma solução robótica para a colheita de laranja tem diminuído, em favor de frutas com maior valor unitário. Uma empresa com protótipo de demonstração divulgado e com início de operação prevista para 2021 é a australiana Ripe Robotics[15], cuja plataforma de colheita move um tubo de sucção pneumático capaz de apanhar maçãs e laranjas.



Figura 7: Apanhador robótico de frutas da Ripe Robotics[15].

O funcionamento do apanhador se dá em 4 etapas:

1. O robô identifica os centros das frutas, a partir de visão computacional;
2. O ângulo de ataque e posição adequada para a coleta de uma fruta são encontrados;
3. O efetuador aproxima-se da fruta, com a sucção ativada;
4. O limitador de silicone envolve da fruta e volta para a distância original da árvore, retirando a fruta do galho.



(a) Reconhecimento dos frutos



(b) Movimentação do apanhador



(c) Aproximação da ventosa de sucção



(d) Sucção do fruto

Figura 8: Etapas 1 a 4 do funcionamento do robô, sentido anti-horário, de cima para baixo. O processo de colheita é o mesmo para laranjas e maçãs. Fotos extraídas de Ripe Robotics[15].

Embora as frutas sejam colhidas por meio de sucção, a movimentação do efetuador é feita por motores elétricos. Após apanhada, a fruta é transportada pelo tubo de vácuo até um armazenador interno. Segundo a empresa, cada máquina é capaz de substituir um apanhador humano, sendo necessárias múltiplas para realizar a colheita. A plataforma

robótica têm 4 metros de altura e 1 metro de espessura e largura. Outras abordagens para a colheita de laranjas, em estágios mais precoces de desenvolvimento, são exploradas em sessões futuras.

3.2.2 Maçã

A colheita de Maçãs possui diversas características em comum com a de laranjas, devido à semelhanças no tamanho, rigidez da fruta e posição de crescimento na árvore. Destacamos o protótipo da empresa FF Robotics[16], da Nova Zelândia, que realiza a colheita do fruto por meio de um efetuator em formato de garra, com capacidade de rotação.

Este apanhador também baseia-se visão computacional e guias lineares acionadas por motores elétricos para movimentar o efetuator. A garra então captura a maçã e gira em torno do eixo de avanço para desprendê-la do galho. A fruta então é levada para um coletor próximo da base do robô, que abre a garra a fim de liberá-la e preparar-se para coletar a próxima fruta.



Figura 9: Efetuator da colheitadeira robótica de maçã da empresa FF Robotics[16].

Nota-se também o projeto da empresa Abundant Robotics[17], dos Estados Unidos da América, que opera com sistema de sucção, semelhante ao visto anteriormente, porém com plataforma e efetuator de menor porte, projetado para uma plantação com árvores menores, e que requerindo uma adequação na organização do pomar. A principal vantagem destes dois sistemas é o tamanho menor de sua estrutura e efetuator, sendo possível

colocar mais de um efetuador em um mesmo veículo.



(a) Equipamento completo de colheita



(b) Apanhador

Figura 10: Apanhador robótico de maçã da empresa Abundant Robotics[17].

3.2.3 Kiwi

O kiwi é um fruto que cresce em trepadeiras lenhosas que precisam de estruturas de suporte para crescer. Assim é possível moldar o pomar mais facilmente para otimizar a colheita, que costuma espalhar as trepadeiras em uma cama horizontal de forma que os frutos possam ser colhidos de baixo para cima. Porém, sua casca costuma ser mais frágil que a da laranja ou maçã.

O apanhador robótico da empresa Robotics Plus[18], da Nova Zelândia, se aproveita das características do fruto no projeto de seu efetuador. Trata-se de uma garra plástica com rotação no sentido perpendicular ao avanço. A fruta sempre está orientada com o talo na parte superior e este tem menos flexibilidade devido ao ramo se afixar a uma estrutura metálica. Após segurar a fruta com a garra, o movimento de rotação puxa a fruta para baixo e a desprende do ramo. A garra é rotacionada para a posição original, onde a fruta é solta e escorrega por dentro do efetuador até um tubo coletor, portanto não é necessário o reposicionamento do braço robótico para a coleta do kiwi.

A fruta então desce o tubo coletor para o compartimento de coleta, sem a necessidade de sucção, diferente das plantações verticais.

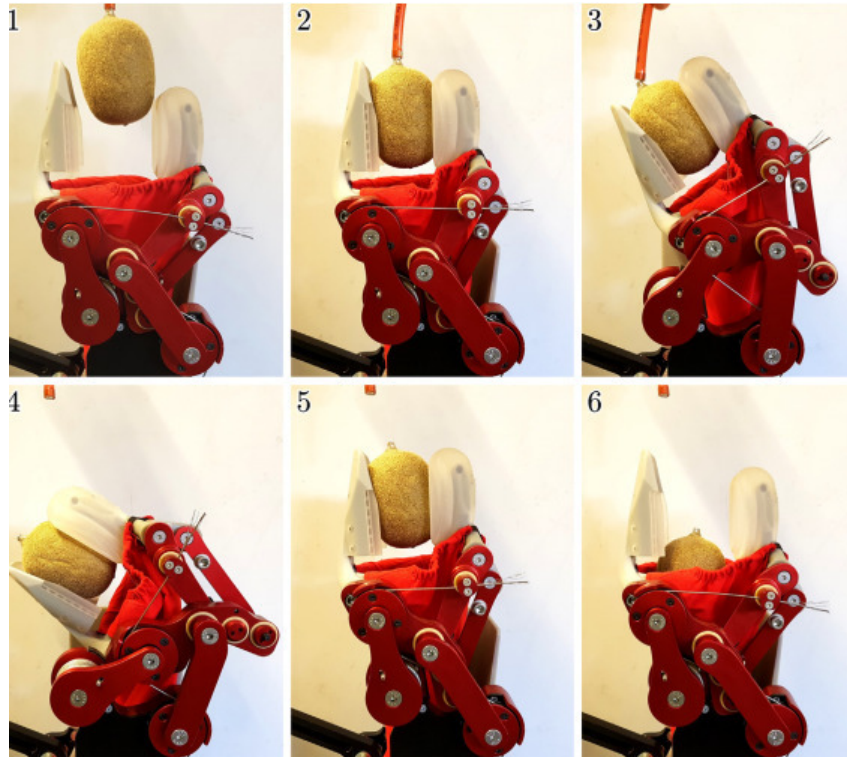


Figura 11: Efetuador de colheita robótica de kiwi da empresa Robotic Plus. Extraído de Williams et al.[19].

O desempenho do projeto em testes a campo foi documentado no artigo de Williams et al.[19]. O robô foi capaz de colher, em média, 51% das frutas cultivadas, com um período médio de colheita de 5,5s por fruta. Das 49% frutas não colhidas com sucesso, 24,5% foram danificadas durante o processo de colheita e 24,5% foram não detectadas ou não podem ser alcançadas pelos braços robóticos.

3.2.4 Morango

O morango é uma das principais frutas delicadas colhidas em larga escala e diversas empresas produzem soluções robóticas para sua colheita. As vistas buscam apanhar o morango pelo talo, em vez de pela fruta, devido à sua fragilidade. Os efetuadores são projetados para apanhar o talo e cortá-lo do ramo em um único movimento.



(a) Aproximação do apanhador

(b) Colheita

Figura 12: Efetuação da colheita Tortuga Agtech[20].

3.3 Soluções em desenvolvimento (patentes/artigos)

É possível encontrar linhas de pesquisa recente para cada um dos aspectos principais do problema, sendo eles sensoriameto focado no reconhecimento das frutas, controle de trajetória do apanhador e o projeto mecânico do efetuador em si.

3.3.1 Projeto do efetuador

Flood[21] realiza o processo de desenvolvimento e teste de um efetuador para a colheita de cítricos, a partir da revisão de uma série de artigos e patentes abordando o mesmo problema. A revisão passa por 24 efetuadores projetados entre 1971 e 2005.

Wang et al.[22] trata do desenvolvimento de outro efetuador de sucção para laranjas, capaz de cortar o talo que prende a fruta a um galho por meio de guilhotina em formato de mordedor.

Zhang et al.[23] apresenta uma revisão do estado da arte de efetuadores pegadores para diversas aplicações robóticas na agricultura, além de técnicas de controle associadas a cada um.

3.3.2 Sensoriamento

Um dos principais desafios da colheita robótica é a detecção dos frutos no ambiente de cultivo, assim como a determinação de características como tamanho e ponto de maturação. As abordagens mais bem sucedidas para ambas as tarefas são baseadas em visão computacional, onde imagens da plantação são coletadas a partir de câmeras e processadas por diversos algoritmos de aprendizado de máquina.

Gongal et al.[24] realizou uma revisão cobrindo sensores e sistemas utilizados para a detecção e localização de frutas in natura, para sistemas detectores de laranjas ou maçãs, onde a acurácia da detecção de frutas variou entre 70-92% entre os diversos artigos analisados. Os sistemas com maior sucesso utilizavam técnicas de aprendizado de máquina voltada à classificação de imagens, baseando-se em múltiplas características das plantas.

Tang et al.[25] compôs uma revisão voltada para os métodos de reconhecimento e localização de frutas baseados em visão computacional para robôs de colheita. Esta revisão inclui, quando informados pelos autores dos artigos, resultados para a acurácia e tempo de reconhecimento das frutas. A revisão . Os sistemas apresentados reportam acurácia variando entre 55% e 100% e tempo de reconhecimento variando entre 0,19 e 43,2 segundos.

Zhuang et al.[26] propôs um sistema robusto de detecção de laranjas em pomares utilizando um sistema de visão computacional monocular, a fim de compensar os efeitos de diferentes condições climáticas. O sistema utilizou mapas cromáticos em dois canais de cores, gerados a partir de imagens com diferenças de iluminação compensadas, e obteve precisão de 96% e taxa de recall de 86%.

Yang et al.[27] utilizou o método de redes neurais convolucionais e a arquitetura Mask R-CNN, este método propiciou um melhor reconhecimento das estruturas dos galhos e troncos se comparado a utilizar apenas o reconhecimento de cores.

3.3.3 Controle de trajetória

Zhao et al.[28] apresentou uma revisão de métodos empregados para controle de efetadores baseado em visão para robôs de colheita, apresentando algoritmos para a coordenação motora e observando uma diferença grande entre as abordagens de cadeia fechada e aberta.

Mehta e Burks[29] descreve o desenvolvimento de um sistema de estimativa de profun-

didade e controle baseado em visão de um manipulador robótico para a colheita de frutas cítricas. O controlador em malha fechada também passa por análise de estabilidade e de performance transiente, sendo possível determinar o tempo teórico do ciclo de colheita.

Em um trabalho seguinte Mehta et al.[30] explora uma abordagem para o desenvolvimento de controladores para o controle visual de servos, para aplicação em robô apanhador de frutas. O objetivo era evitar controladores de alto ganho para o uso em condições de movimento desconhecido da fruta, que resultava em ruído na leitura visual, porém não chegou a ser usado em campo.

3.3.4 Projeto completo para outras frutas

Baeten et al.[31] e De-An et al.[32] propuseram e realizaram a construção de dois sistemas diferentes para a colheita de maçãs, baseados em visão computacional. Cada um usa um efetuator diferente, porém os dois utilizaram braços robóticos com 5 e 6 graus de liberdade, respectivamente, montados em uma plataforma móvel.

Williams et al.[19] publicaram um artigo descrevendo o desenvolvimento da plataforma de colheita robótica para kiwis da Robotics Plus. O projeto de seu efetuator foi descrito em detalhes no artigo de De-An et al.[32].

4 METODOLOGIA

4.1 Escopo do projeto

O foco do trabalho abordado nesta monografia é o projeto, construção de protótipo funcional e avaliação do funcionamento de um efetuador automático para a colheita de laranjas e frutas com características botânicas e físicas semelhantes à laranja. Tal efetuador será deslocado pelo pormar a partir de um sistema robótico móvel, cujo projeto está fora do escopo deste trabalho.

O efetuador que apanha o fruto terá movimento linear suficiente para colher frutos individualmente, com velocidade de colheita comparável a de um coletor humano, e deverá reconhecer quanto é posicionado em frente a uma fruta e iniciar a coleta da laranja de forma autônoma.

A estrutura mecânica utilizará um atuador pneumático para fazer a movimentação linear da garra que realizará a colheita. A garra poderá realizar movimentos auxiliares para destacar a laranja do pedúnculo, a fim de exigir um menor curso e força do atuador pneumático enquanto procura não danificar o fruto colhido. Para tais movimentos, poderão ser utilizados atuadores não-pneumáticos

O efetuador deverá ser capaz de reconhecer e colher a fruta de forma autônoma, a partir de sensores que detectam a presença de uma laranja madura em sua linha de ação. Os sensores precisam determinar a posição dos frutos em relação ao efetuador, possivelmente identificando outras características da fruta, como ponto de amadurecimento. Também podem ser usados sensores para detectar a captura bem sucedida da laranja pela garra.

Após a coleta da laranja, o dispositivo armazena os frutos colhidos em um compartimento específico, por meio de um coletor fixo localizado perto de seu volume de trabalho, cujo projeto também está fora de nosso escopo.

4.2 Definições

Nesta seção serão comentados alguns conceitos, abreviaturas e termos que serão utilizados ao longo do trabalho em seguida.

- Pedúnculo: A estrutura que realiza a conexão entre o fruto e o galho, apelidado popularmente por "cabinho".
- Endocarpo: A região do fruto que envolve as sementes a fim de protegê-las, no caso dos citros é popularmente apelidada de gomos.

4.3 Metodologia de projeto

Nos baseamos em metodologias sistemáticas e bem consolidadas para projetos de engenharia a fim de definir qual a melhor abordagem para nosso projeto. Particularmente, Pahl et al.[33] desmembra o processo de projetar um produto nas etapas de:

1. Planejamento do Produto
2. Busca por Solução
3. Seleção e Avaliação da Solução

A etapa de planejamento é simplificada pela definição do escopo de nosso projeto, já que o produto a ser produzido já foi definido. Da etapa 1, resta apenas a definição exata da tarefa a ser realizada e a determinação dos requisitos para a solução.

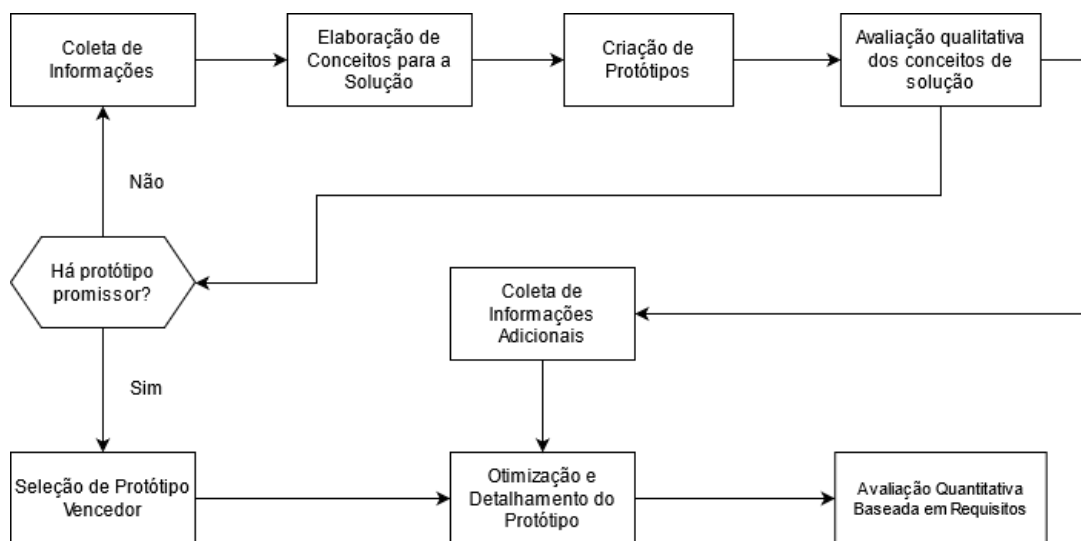


Figura 13: Diagrama descrevendo a metodologia de projeto escolhida. Autoria própria. Inspirado por metodologias encontradas em Pahl et al.[33]

O desenvolvimento do projeto se dará majoritariamente nas etapas 2 e 3. A abordagem escolhida para suprir estas etapas é descrita pelo fluxograma presente na figura 13. Primeiro é realizada a coleta de informações relacionadas ao problema e soluções atuais, considerando tanto soluções naturais, como a colheita manual, e artificiais, como falcitadoras e colheitadeiras.

A partir destas informações, da definição da tarefa e dos requisitos definidos, é feita a elaboração de conceitos com base em métodos intuitivos. Alguns destes conceitos são escolhidos e modelados a partir de protótipos físicos ou digitais, cujo comportamento experimental é usado para avaliar os conceitos qualitativamente. O desempenho dos modelos é usado para nortear as próximas buscas por informações, a fim de preencher lacunas no conhecimento técnico relacionado à tarefa.

Caso não haja protótipo promissor, o processo é repetido. Se não, é escolhido o protótipo com melhor desempenho e uma solução detalhada e otimizada é desenvolvida, com base nas melhores características de todos os protótipos e com maior ênfase em cumprir os requisitos. Esta é prototipada e verificamos seu atendimento aos requisitos.

Este processo é realizado de maneira independente para cada uma das subáreas da solução, que serão:

- Projeto Mecânico do Efetuador
- Detecção de Laranjas
- Controle Automático do Efetuador

Esta abordagem foi escolhida devido à dificuldade de se obter modelos teóricos para a colheita de frutas, dada a complexidade e variação natural das condições do problema.

4.3.1 Método para a definição de requisitos

Os requisitos serão definidos a partir da descrição da exata tarefa a ser realizada e determinarão de grandezas quantitativas definindo propriedades da solução final.

Tais propriedades são classificadas como requisitos funcionais, que determinam como deve ser o comportamento da solução ao realizar a tarefa, e requisitos não-funcionais, que determinam parâmetros não funcionais da solução, como o custo monetário e massa total do efetuador.

Quando possível, os requisitos serão definidos com base em conclusões e resultados obtidos por produções acadêmicas já realizadas no campo da colheita robótica, que compõem o atual estado da arte. Requisitos econômicos serão baseados nas condições atuais do cultivo de laranjas no estado de São Paulo.

Não serão levados em conta requisitos relacionados ao processo de fabricação ou aumento da vida-útil do projeto, que deverão ser levados em conta em futuras iterações do projeto.

4.3.2 Elaboração de conceitos

Os conceitos para a solução serão elaborados de forma sistemática a partir de processos intuitivos, como o *brainstorming*, partindo de constatações levantadas na revisão bibliográfica. Serão descritos na monografia apenas os conceitos relevantes para a solução final.

4.3.3 Prototipagem

Todas as etapas do desenvolvimento são realizadas com foco na prototipagem rápida e rápida iteração pelos conceitos de solução.

A construção de estruturas mecânicas é feita com auxílio de uma impressora 3D FDM em conjunto com peças comerciais, tais como parafusos, motores, rolamentos e molas. Também serão utilizadas técnicas de fabricação manual para peças metálicas.

4.3.4 Avaliação da solução

A avaliação da solução é a realização de uma bateria de ensaios com o protótipo final a fim de verificar o atendimento aos requisitos funcionais. Tais ensaios serão feitos em ambiente de laboratório controlado.

5 DEFINIÇÃO DE REQUISITOS

Em sua revisão do estado da arte, Wouter et al.[14] levanta pontos pouco trabalhados nos artigos anteriores que podem ser utilizados para melhorar o desempenho de projetos futuros. Os autores frizam que embora haja um grande aumento no número de projetos de colheita robótica nas últimas décadas, não foi observada uma melhora significativa no desempenho médio dos robôs de colheita ao longo do período analisado, no que se refere ao sucesso da colheita.

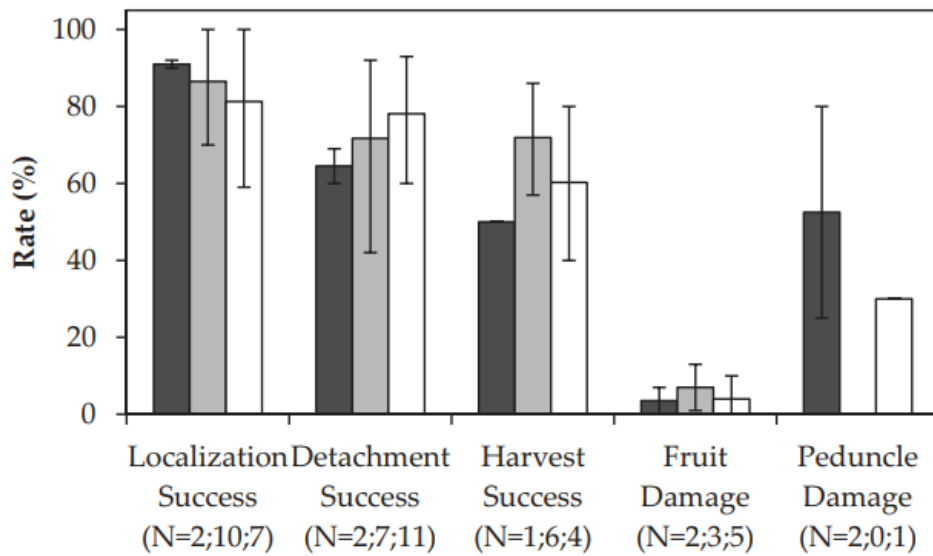


Figura 14: Indicadores de sucesso de robôs de colheita ao longo de três décadas: 1984-1992(■; 7 projetos), 1993-2002 (■; 17 projetos), 2003-2012 (□ ; 17 projetos). Estão representados a média e amplitude total das taxas de *Sucesso em Localização*, *Sucesso em Destacamento*, *Sucesso em Colheita*, *Proporção de Frutas Danificadas* e *Proporção de Pedúnculos Danificados* dos projetos que reportaram tais estatísticas. *N* indica o número instâncias reportadas do indicador de performance em cada década. Extraído de Wouter et al.[14].

Os autores atribuem isso a, entre outros fatores, a ausência de uma definição clara de requisitos para o projeto e metodologias de projeto foram raramente usadas, resultando em sistemas pouco otimizados. Os autores também recomendam a definição de requisitos econômicos claros antes do início do projeto, a fim de tornar mais provável a produção

de uma solução comercialmente viável.

Deve-se também levar em conta que a variação natural das condições presentes nos ambientes de colheita tornam o a colheita uma tarefa fundamentalmente difícil. Desta forma, deve-se simplificar a tarefa o máximo possível antes do começo do projeto, idealmente com modificações na configuração e poda dos pomares. Assim, partiremos de hipóteses simplificadoras para o posicionamento do efetuador em relação ao fruto colhido, que podem ser relaxadas posteriormente em futuras iterações do projeto.

5.1 Requisitos não-funcionais

5.1.1 Custo total e taxa de eficiência de colheita

O principal requisito a ser estabelecido para o sistema é a sua viabilidade econômica se comparada à colheita manual. Harrel[34] realizou uma análise econômica detalhada da viabilidade da utilização de robôs de colheita para a Flórida nos anos 80. Tal análise requer que sejam estimados 19 parâmetros de colheita, sendo alguns muito específicos da região local, como imposto anual sob o equipamento, número de frutas por hectare e custo energético. A vantagem é que esta análise possibilita a determinação exata do preço do produto final.

Essa análise de viabilidade econômica detalhada requer um contato mais próximo com os produtores locais e está fora do escopo adotado para o desenvolvimento deste trabalho. Baseando-se no que foi apresentado por Harrel[34], iniciaremos uma projeção de viabilidade econômica simplificada com dados nacionais. Segundo os autores, os fatores que mais afetam o custo final do produto são:

- O custo total do sistema robótico. (P_i).
- A expectativa de tempo de vida útil do sistema robótico, ou seja, quantas colheitas esperamos conseguir realizar com o robô. (N_c).
- A eficiência do processo de colheita (E_c).
- O tempo de operação total durante o processo de colheita, ou seja, quantas horas o robô trabalha durante a colheita (N_h).
- O tempo médio necessário para colher uma fruta, chamado de período do ciclo de colheita (T_c).

De forma muito simplificada, mas suficiente para nossos propósitos, podemos estimar o custo de colheita por laranja (P_L) a partir destes parâmetros, utilizando a seguinte fórmula:

$$P_L = \frac{P_i}{N_c} \left(\frac{E_c \cdot 3600 \cdot N_h}{T_c} \right)^{-1} \quad (5.1)$$

A equação 5.1 pode ser entendida como o produto entre a desvalorização do sistema por colheita, definida pelo termo $\frac{P_i}{N_c}$, e inverso do número de laranjas colhidas pelo sistema durante a colheita. O número de laranjas colhidas é dado pelo termo $\frac{E_c \cdot 3600 \cdot N_h}{T_c}$, que é o produto da eficiência de colheita e o número de segundos que o robô passa colhendo, dividido pelo tempo necessário para a colheita de uma única laranja em segundos. Teremos assim o custo de utilizar o sistema robótico para realizar a colheita de uma única laranja. Este valor pode ser comparado com o valor demandado pela mão-de-obra humana.

Pode-se estimar o custo de mão de obra por laranja colhida a partir da análise dos custos de produção da Hortifruti/CEPEA[7], realizada a partir de dois modelos de produção de laranja-pêra. Considerando o peso médio de uma laranja-pêra como 137g [35], em uma caixa-padrão de laranja de 40,8kg há aproximadamente 177 laranjas por caixa. Assim, utilizando os dados obtidos pela análise supracitada, obteremos o seguinte resultado:

-	PROJETO 1	PROJETO 2	Média
Custo de mão-de-obra da colheita (R\$/hec)	4.592,15	6.225,19	5.408,67
Produtividade (caixas/hec)	895	1.187	1041
Custo de mão-de-obra por caixa (40,8kg/caixa)	5,13	5,24	5,20
Custo de mão-de-obra por laranja (R\$)	0,0290	0,0296	0,0293

Tabela 1: Cálculo de custos de mão de obra segundo os modelos apresentados na análise dos custos de produção de 2020 de Hortifruti/CEPEA[7].

Assim, para ser competitivo com a colheita manual, o custo de colheita por laranja do robô deve ser $P_L \leq 0,029$ reais. Definindo a vida útil do robô em 5 anos, ao realizar uma colheita por ano, teremos em $N_c = 5$. O número de horas trabalhadas em uma colheita de uma colheita é estimado por:

$$N_h = h_{\text{dia}} \cdot N_d \quad (5.2)$$

Segundo CITRUSBR[6], a duração média da temporada anual de colheita é 4 meses, portanto $N_d = 120$ dias. Um dos motivos da utilização de um robô autônomo é a ob-

tenção de uma grande jornada de trabalho por dia, possivelmente ininterrupta, porém um requisito de mais horas de trabalho por dia implica em um sistema mais robusto e com menos tempo para manutenção, diminuindo sua vida útil. Como valor inicial usaremos uma jornada de $h_{\text{dia}} = 12$ horas de trabalho por dia, resultando em $Nh = 1440$ horas de trabalho por colheita.

Retornando para a equação 4.1, ainda precisamos definir a eficiência de colheita E_c e o período do ciclo de colheita T_c . Levando em consideração a revisão do estado da colheita robótica até o momento [14], adotaremos $E_f = 70\%$ e $T_c = 1\text{s}$. A eficiência total de 70% é plausível, considerando a média atual de 66%, e o tempo de ciclo baixo pode ser atingido por meio da utilização de vários efetadores independentes em um único sistema. A definição de T_c é abordada mais a fundo na seção 5.2.3.

Desta forma, chegamos que o investimento inicial, e portanto custo total do sistema de colheita deve ser $P_i \leq \text{R\$}526.176,00$. Adotaremos um custo de $\text{R\$}525.000,00$. Como há muitas partes envolvidas no projeto além do efetador, impõe-se que o seu custo não possa corresponder a mais de 5% do valor total da solução.

Assim o custo total máximo do efetador é $\text{R\$}2.500,00$.

5.1.2 Massa do efetador

Para o protótipo inicial foi estipulado uma massa máxima de 10kg, a fim de facilitar a instalação de um maior número de efetadores em conjunto e aumentar a velocidade de colheita do sistema.

5.1.3 Consumo elétrico e pneumático do efetador

Visto que o avanço do efetador será executado por um atuador pneumático, o consumo elétrico total do efetador será composto pela soma do sistema eletrônico embarcado e por quaisquer motores elétricos utilizados para movimentos adicionais necessários para o processo de colheita. Dessa forma estipulamos um consumo máximo de 75W. A alimentação do sistema pneumático será definida a partir dos outros requisitos.

5.2 Requisitos funcionais

5.2.1 Eficiência de identificação e coleta de laranjas e taxa de laranjas danificadas durante a coleta

A eficiência total do processo de colheita é definida como:

$$E_t = E_l \cdot E_m \cdot E_c \quad (5.3)$$

E_t é um requisito de que deve ser definido a partir do propósito do robô no processo de colheita, e corresponde à porcentagem de frutos colhidos de forma bem sucedida em relação ao total de frutos que poderiam ser colhidos. Esta taxa será menor se a colheita robótica é usada em conjunto à colheita humana

E_l é a eficiência de localização de frutas do sistema, e corresponde à sua capacidade de localizar frutos maduros no ambiente de colheita. E_m é a eficiência de movimentação do sistema, e corresponde à sua capacidade de alcançar os frutos identificados. A combinação de E_l e E_m , junto a outros requisitos, pode ser usada para definir o volume de trabalho do robô.

E_c é a eficiência de colheita, e é a taxa colheitas bem sucedidas em relação ao número total vezes que o sistema tentou colher uma fruta. Para o projeto do efetuador, apenas E_c é relevante, e, no contexto da solução proposta, define-se E_c como:

$$E_c = t_l \cdot t_{col} \cdot t_d \quad (5.4)$$

A partir da seção anterior, define-se $E_c = 70\%$

t_l é a taxa de laranjas identificadas corretamente pelos sensores na linha de ação do efetuador. t_{col} é a taxa de coletas bem sucedidas realizadas pelo efetuador após a identificação da fruta. t_d é a taxa de frutas coletadas que não foram danificadas pela coleta.

Segundo Wouter et al.[14], em média, 5% das frutas colhidas por sistemas robóticos são danificadas durante o processo de colheita. Portanto define-se $t_d = 95\%$.

Determinar t_{col} é mais difícil, já que não há correspondência deste valor na revisão de estado da arte ou na grande maioria dos artigos pesquisados. Dentre os exemplos encontrados na literatura, o efetuador para coleta de laranja de Wang et al.[22] atingiu uma eficácia em testes de laboratório de 89%, e o efetuador projetado para colheita

de kiwis de De-An et al.[32] atingiu eficácia superior a 96%, também em laboratório. Pensando nestes valores, definimos $t_{col} = 90\%$.

Assim, a partir da equação 4.4, acurácia mínima de identificação de laranjas se torna então 81,87% e adotaremos $t_i = 82\%$

5.2.2 Raio de coleta de laranja

O raio de coleta de laranja r_c define o diâmetro máximo que pode ser capturado pelo efetuador. Deve que englobar o diâmetro da laranja a ser colhida, além do apresentar tolerância a desvios no posicionamento do centro da laranja e o centro da linha de ação do efetuador. Inicialmente adotamos que o raio de coleta deve ser 25% maior que o raio médio da espécie de laranja para o qual o efetuador foi projetado.

5.2.3 Velocidade de coleta de laranja

Ferreira et al.[36] determinou de forma experimental que a velocidade média da colheita manual de laranjas é de 0,41 kg/s. Considerando um peso médio de uma laranja valencia de 230g [37], variação estudada no artigo, tal quantidade equivale à coleta de 1,78 laranjas/s. Segundo os autores, o uso de plataformas facilitadoras não implicou em uma variação no número médio de laranjas colhidas.

Através de um experimento caseiro efetuado pela dupla foi estimada uma velocidade média de 2 laranjas/s. A análise de vídeos de colheitadores de laranja também foi estimada em 2 laranjas/s para colheita sem o uso de facilitadora,

Desta forma, o período de colheita de um catador humano é de aproximadamente 0,5 segundos. Para que seja comparável a um coletor humano, impomos que nosso efetuador deve ser capaz de coletar laranjas a uma taxa de 1 laranja por segundo.

5.2.4 Tolerância a movimento durante a colheita

Para a maior robustez durante o processo de colheita, o efetuador deve que ser capaz de realizar a colheita em velocidade constante de translação.

Em sua comparação da colheita manual à colheita assistida por facilitadora Ferreira et al.[36] constatou que a velocidade média do deslocamento dos catadores pelo pomar durante a colheita manual é de 0,1 m/s. Com o uso de facilitadora, esta velocidade variou entre 0,39 e 0,48 m/s.

Iremos definir que o processo de colheita deve acomodar uma velocidade de translação em relação à fruta de $0,3\text{m/s}$. Este valor é mais que o dobro da média humana e comparável ao valor da colheita com o uso de facilitadora. Esta robustez também acomoda variações na posição da laranja devido ao vento, e possibilita menores desacelerações no sistema que movimentará o efetuador.

5.2.5 Período máximo de identificação de laranjas

O reconhecimento de uma laranja deverá ser feito em até 100 milissegundos, ou 10% do tempo de ciclo total. Desta forma, a um deslocamento constante de $0,3\text{m/s}$, uma laranja se movimentará 3cm em relação ao efetuador.

5.2.6 Reconhecimento de características da laranja

O efetuador deve ser capaz de distinguir em alguma medida as características da laranja em termos de estado de amadurecimento e tamanho do fruto.

6 DESENVOLVIMENTO

6.1 Projeto mecânico

Para determinar a abordagem a ser usada no projeto mecânico do efetuator, precisamos definir as principais estratégias que podem ser utilizadas para a colheita da fruta. Na prática, não é viável produzir um efetuator que colha a fruta apenas com o esforço de tração em relação ao pedúnculo, proporcionado pelo retorno puro do efetuator. A elasticidade dos galhos de uma árvore de cítricos torna o esforço e deslocamentos exigidos para o desprendimento da fruta incompatíveis com os requisitos elaborados no capítulo 5. Desta forma, procuramos soluções com 2 esforços de atuação.

Segundo Azevêdo[38], os citros podem ser colhidos através de 2 métodos: torção do pedúnculo e arranquio e através do corte do pedúnculo(similar ao método de colheita da Tortuga Agtech[20] exposto anteriormente). O artigo comenta que o benefício da técnica de corte remete-se a uma maior proteção da região peduncular no fruto contra a perda de água e uma maior barreira à entrada de patógenos, pois ao se realizar o arranquio pode-se arrancar a base do pedunculo da casca do fruto expondo o endocarpo do ambiente.

A técnica do corte apresenta dificuldades em reconhecer o pedúnculo em meio a possíveis posições distintas da fruta e em relação a presença de folhas e galhos que podem prejudicar o reconhecimento de imagem, a atuação do sistema de corte pode apresentar um menor rendimento devido a presença de galhos entre o pedúnculo e a tesoura de corte, além de uma maior mobilidade do efetuator exigida a fim de posicionar a tesoura na melhor posição de corte.

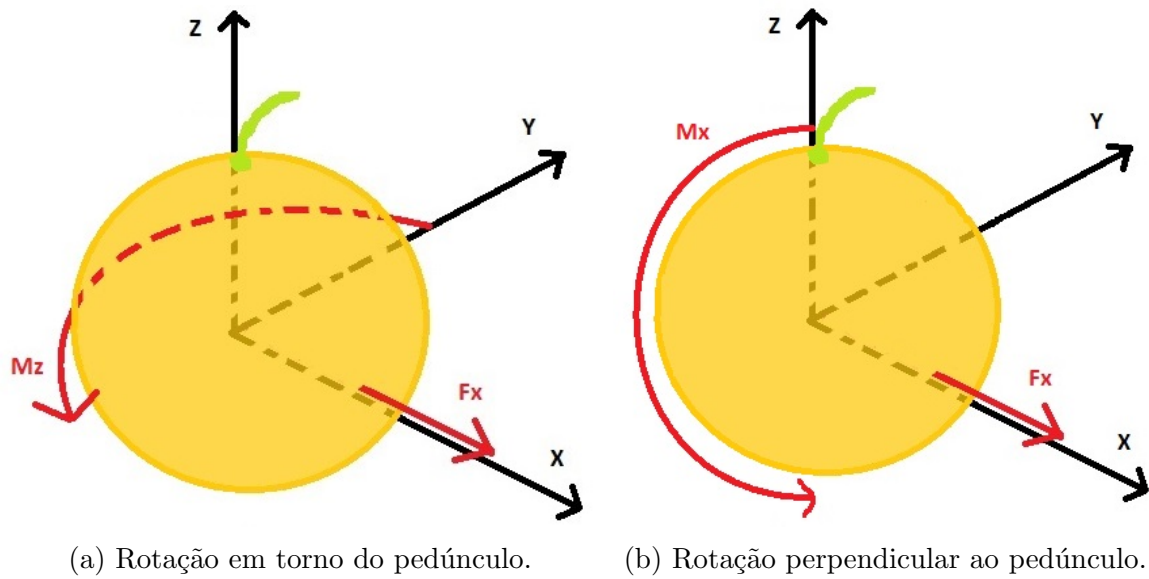


Figura 15: Métodos de colheita possíveis utilizando um grau de translação e um de rotação em relação à origem. A força F_x é o esforço imposto pelo retorno do atuador. A rotação em torno de Y é análoga à rotação em X, em termos dos esforços aplicados no pedúnculo

A técnica da torção e arranquio exige uma maior mobilidade do efetuador e um maior número de ensaios para encontrar a dinâmica com maior rendimento de colheita entre os movimento de torcer o pedúnculo e arrancá-lo. A torção nesse método é aplicada na direção perpendicular ao comprimento do pedúnculo, a fim de minimizar o esforço aplicado no fruto. Esta técnica corresponde ao esquema representado na figura 15b.

A primeira abordagem foi testar uma simplificação das estratégias de colheita apresentadas em Azevêdo[38], que é a de somente torcer a fruta em torno do pedúnculo, onde o eixo de rotação corresponde à linha central do pedúnculo. Essa estratégia de atuação visa um menor volume necessário para a colheita e uma menor a complexidade do sistema mecânico do efetuador. Esta estratégia está representada na figura 15a.

6.1.1 Concepção do mecanismo de destacamento

6.1.1.1 Conceito inicial

Como não foram encontrados artigos que descrevessem as cargas necessárias para essa estratégia de colheita, foi construído um protótipo preliminar a fim de verificar a aplicabilidade desse método, juntamente com a determinação dos esforços envolvidos. Nessa prototipagem ainda não foram implementados o reconhecimento de fruto pelo efetuador ou o controle da força aplicada na laranja.

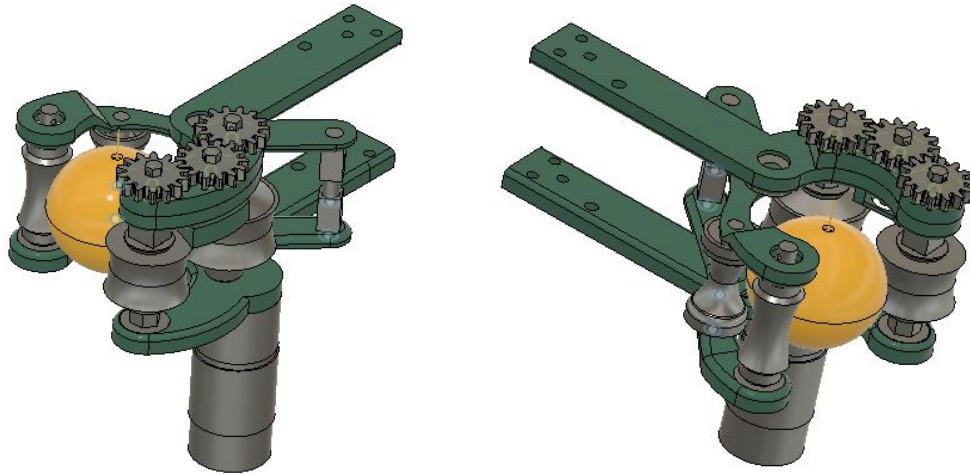


Figura 16: CAD protótipo preliminar de torção pura do pedúnculo

O modelo CAD do protótipo preliminar produzido com base no método de colheita esquematizado na figura 15a está apresentado na figura 16.

Esse protótipo utiliza 2 roletes motores para rotacionar a laranja em torno do eixo do pedúnculo, e 2 roles movidos para apoiar o fruto e evitar que ele escape dos roletes motores. Os roletes motores são acionados por um motor DC de 24V 15W, que conta com redução que lhe fornece torque máximo de 6kgf.cm e rotação máxima de 350RPM. Utilizou-se uma engrenagem inversora para transmitir a da rotação do motor entre os 2 roletes motores, preservando o sentido de rotação.

Após a construção do protótipo, foram feitos testes de colheita em uma árvore de limão bravo presente na casa de um dos membros da dupla de autores deste trabalho, uma fruta com tamanho e características botânicas comparáveis a espécies de laranja de tamanho pequeno. Os limões colhidos apresentavam forma de esferóide, com diâmetro maior médio de 6cm e diâmetro menor médio de 5,5cm.

Estes testes visavam apenas comprovar o princípio de funcionamento do protótipo, e verificar se a colheita apenas com a torção do pedúnculo é viável para o projeto do efetuator. Com o primeiro teste, notou-se a falta de atrito existente entre os roletes e a casca do limão testado, dessa forma foi optado por acrescentar pequenos cravos de silicone a fim de garantir a aderência da fruta ao rolete, conforme a figura 17.



(a) Cravos de silicone utilizados para aumento da aderência (b) Limão colhido com o protótipo preliminar

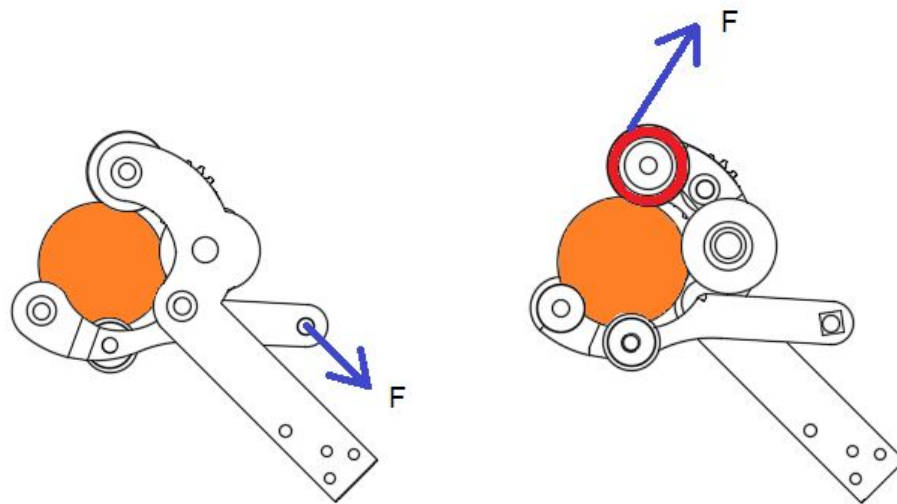
Figura 17: Protótipo preliminar construído.

Com este protótipo, a atuação necessário para o desprendimento do fruto do galho demorou em torno de 2 segundos. Foi observado que o rompimento do pedúnculo era feito em um ponto distante da sua base na fruta, conforme figura 17b, o que mostra que este método atendeu aos benefícios do método de corte proposto por Azevêdo[38], visto que não houve rompimento da casca e exposição dos gomos da fruta e o rompimento foi puramente no pedúnculo.

Além desse teste preliminar, foram realizadas medições a fim de estimar os esforços de atuação envolvidos a fim de se reproduzir a colheita em laboratório e evitar testes em árvores reais, onde há limitação no número de testes possíveis dada pelo crescimento de frutas nas árvores utilizadas para teste. Tais medições também serão utilizadas no projeto da solução final.

As medições visaram reconhecer as principais cargas atuantes nesse método de colheita, que são:

- A força aplicada no mecanismo para segurar a laranja e garantir a transmissão de rotação entre os roletes motores e o fruto;
- O torque exigido pelo motor para realizar a torção do fruto.



(a) Medição da força de captura compatível com a colheita. (b) Medição do torque mínimo exigido pelo motor

Figura 18: Representação das forças medidas durante ensaio dos esforços de colheita.

Para a medição da força mínima aplicada para pressionar o fruto foi utilizado um dinamômetro que mensurou a força aplicada no braço móvel do alicate durante uma colheita, que resultou em uma leitura de aproximadamente 20N para força de fechamento da garra.

O ensaio de medição do torque exigido pelo motor para realizar a colheita necessitou que fossem feitas algumas alterações no protótipo.

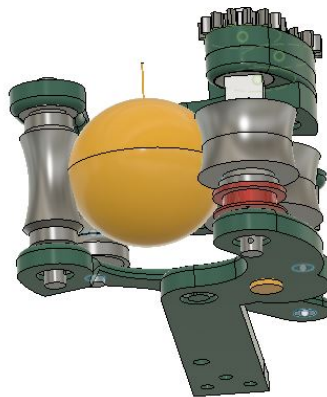


Figura 19: Protótipo com modificado para realização do ensaio.

A figura 19 demonstra que foi feita a remoção do motor para a realização deste ensaio, e, em seu lugar, foi inserido um eixo (o cilindro amarelo da figura) que possui a mesma geometria do eixo do motor e se conecta com o braço fixo do alicate em um mancal de deslizamento. Este eixo é apresentado na figura 20a.

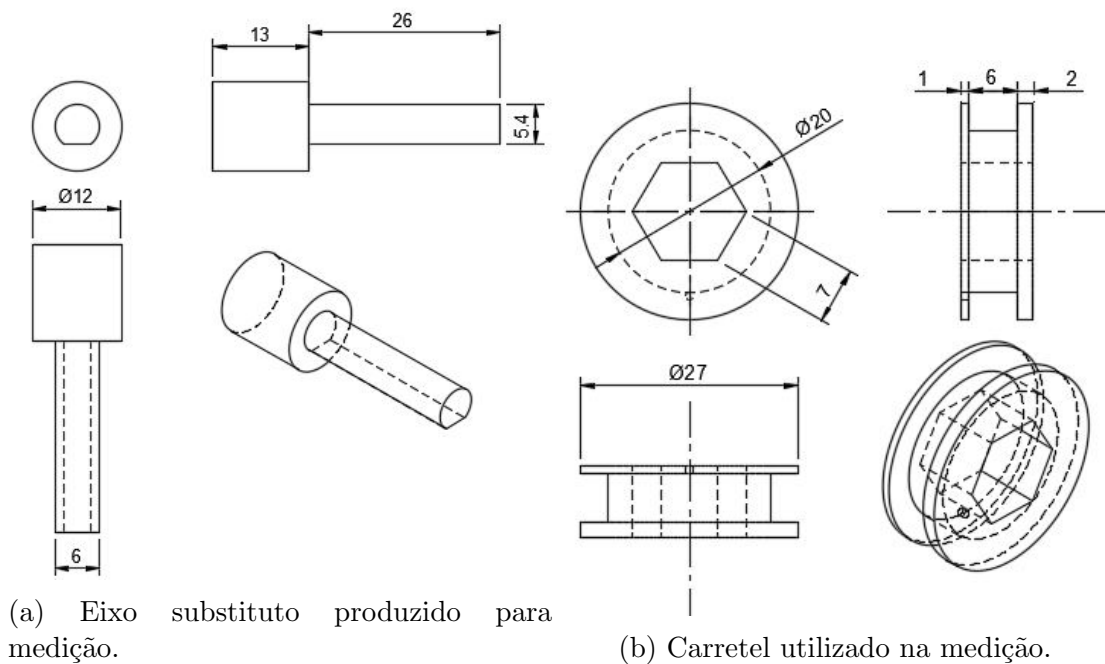


Figura 20: Desenho técnico de fabricação das peças adicionais utilizadas durante o ensaio de esforços de colheita, cotado em mm.

Além do eixo, também foi inserida um carretel, peça vermelha na figura 19, este carretel contém uma linha que foi usada para se transmitir o esforço medido pelo dinamômetro ao carretel, e devido a medida do raio do carretel, igual a 10mm, é aplicado um torque nos roletes motores que equivale ao aplicado pelo motor. O carretel possui as medidas representadas abaixo.

Com a montagem destes dois elementos, a medição do torque foi feita conforme a figura 18b, a força medida pelo dinamômetro possui sentido e direção representada pela seta azul presente na figura 18b, e o carretel está representado como sendo o anel vermelho. A medição trouxe como resultado um valor constante de torque de 2kgf.cm.

6.1.1.2 Outros conceitos de solução

Além da elaboração do protótipo mencionado na seção 6.1.2, foram conceitualizados e modelados protótipos para outros conceitos de solução, baseados na rotação perpendicular ao pedúnculo. As figuras 21 e 22 ilustram o CAD de dois outros protótipos elaborados na fase de concepção.

Devido à mecânica mais complexa e ao cronograma de fabricação do modelo citado anteriormente, estes não puderam ser produzidos ou testados no tempo previsto, e priorizou-se o desenvolvimento do sistema de visão.

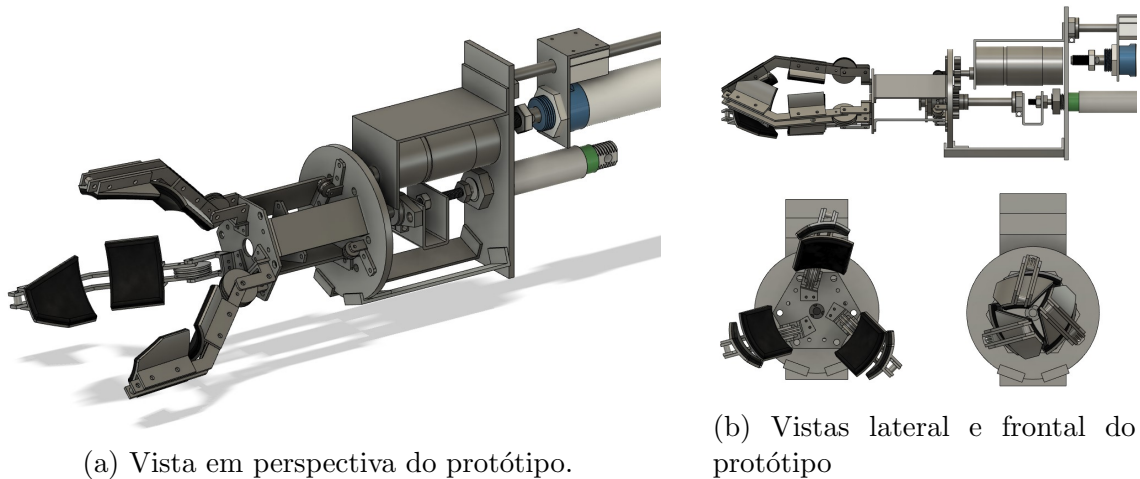


Figura 21: Modelo CAD do protótipo que utiliza uma garra para segurar a laranja.

O protótipo ilustrado na figura 21 utiliza uma garra de 3 dedos para segurar as laranjas, e as destaca da árvore por meio de uma rotação em torno do pulso promovida por um motor elétrico. Os dedos são acionados por meio de um pistão pneumático que movimenta um carro ligado aos dedos por meio de um sistema de cabos e polias.

O sistema de transmissão é projetado de tal forma que ambos os movimentos de avanço e retorno geram tracionam os cabos em um sentido e comprimem em outro, rotacionando as polias ligadas aos dedos em ambos os sentidos, sem a necessidade de molas.

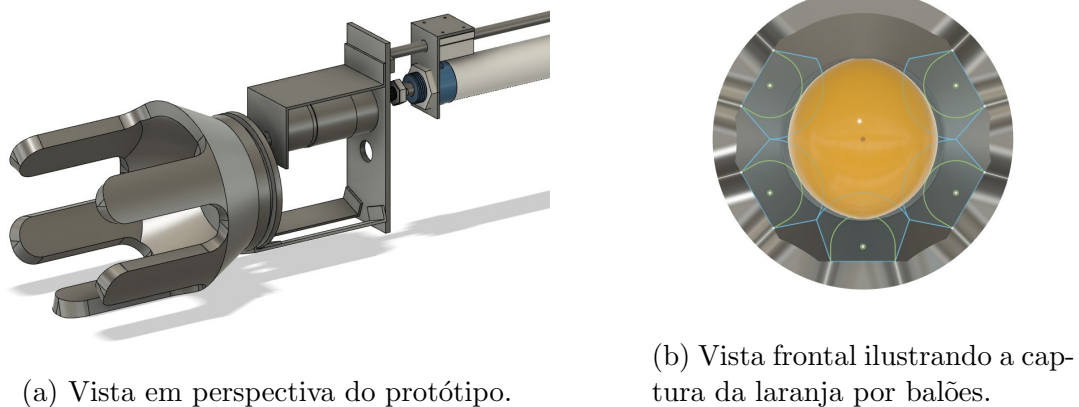


Figura 22: Modelo CAD do protótipo que utiliza balões emborrachados para segurar a laranja. (b) ilustra os balões presentes em cada dedo da estrutura. Inicialmente são flácidos e aproximados pelo contorno amarelo. Ao serem acionados pela linha de pressão, os balões inflam e envolvem a fruta, semelhante ao representado pelo contorno azul.

O protótipo ilustrado na figura 22 é semelhante ao da figura anterior, evita usar uma garra para a segurar a laranja, eliminando partes móveis. Como alternativa, há uma estrutura sólida que envolve a laranja e dá suporte a bexigas elásticas com superfície

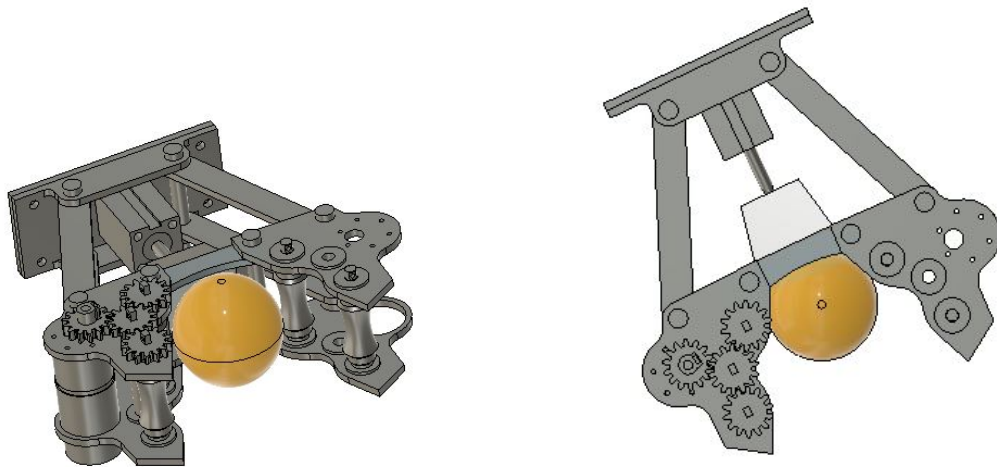
emborrachada que expandem para capturar a laranja, representadas na figura 22b. Após o recuo do efetuator, o ar das bexigas é liberado e retorna à posição inicial. Tais bexigas são acionadas pela mesma linha de ar comprimido que alimenta o pistão de avanço.

Os motores elétricos que rotacionam os pulsos dos dois protótipos poderiam ser substituídos por atuadores pneumáticos rotativos, após a determinação do torque e número de voltas necessárias para o correto desprendimento da fruta.

6.1.2 Desenvolvimento do protótipo

6.1.2.1 Projeto com acionamento pneumático

De posse dos esforços necessários para realizar a colheita, obtidos na seção 6.1.1.1, foi possível adaptar o protótipo para ser acionado com a utilização de um atuador pneumático a fim de utilizar um atuador de baixo custo, rápida velocidade de atuação e com controle da força aplicada mais simples, se comparado ao caso de acionamento elétrico.



(a) Vista em perspectiva do protótipo de (b) Vista de topo do protótipo de torção
torção com acionamento pneumático para com acionamento pneumático para o
o avanço. avanço.

Figura 23: Modelo CAD do protótipo com acionamento pneumático.

Houve uma mudança da estrutura de acionamento manual na forma de alicate para um mecanismo composto por 2 quadriláteros articulados que atuam em simetria. Nesse mecanismo a abertura do efetuator é feito com o avanço do atuador pneumático, e o fechamento para executar a colheita é feito com a retração do êmbolo do atuador. Pela construção do atuador pneumático é conhecido que nesse sentido será possível exercer uma menor força comparada ao avanço, mas pelos ensaios de cargas presentes na colheita

mensurados anteriormente, foi calculado que para o recuo seria necessária a aplicação de uma pressão de 3,4 bar no retorno do êmbolo para executar a colheita, valor compatível com a pressão máxima de operação deste equipamento.

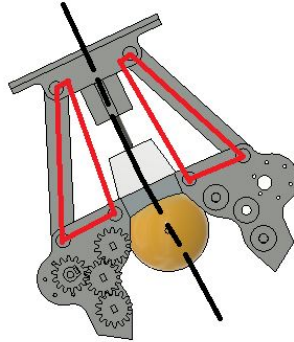
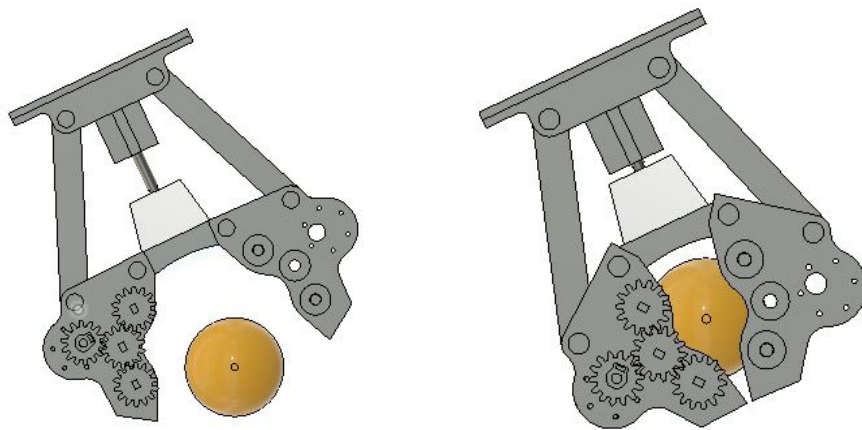


Figura 24: Quadriláteros articulados presentes no novo protótipo

Para a construção foi utilizado um cilindro pneumático compacto SDA 20x25mm que possui um avanço de 25mm, conferindo ao mecanismo uma abertura total de 135mm. Como utilizamos 70mm como diâmetro médio de uma laranja, temos uma margem linear de captura de laranjas equivalente a 1,92 laranjas, permitindo a colheita de laranjas com diâmetros entre 58mm e 86mm. O motor DC e as distâncias entre roletes motores e movidos foram mantidas, a fim de ainda atender as condições de teste feitas anteriormente para fazer o levantamento do esforço necessário para colheita.



(a) Vista de topo do efetuador com o atuador completamente avançado (b) Vista de topo do efetuador com o atuador completamente retraído

Figura 25: Abertura máxima e mínima do efetuador

Com esta geometria o protótipo possui uma melhor estrutura para fixação de sensores e demais componentes adicionais, como fontes luminosas e sopradores de ar usados para diminuir a cobertura da folhagem sobre os frutos.

Ao final da construção do protótipo, mediu-se uma massa total de 1 kilo, valor considerado leve para ser manipulado e movimentado por um braço robótico ou outra estrutura que movimente o efetuator. Os desenhos de fabricação das principais peças do efetuator estão presentes no B.

6.1.2.2 Projeto da estrutura de suporte da garra

A fim de realizar a colheita, o protótipo possui acionamentos que realizam o fechamento da garra, a torção do fruto e o avanço de todo o efetuator para se aproximar do fruto a ser colhido. Dessa forma foi feita uma estrutura que combinasse uma maior facilidade de instalação de todos os componentes pneumáticos e elétricos, provendo maior acesso para alterações e manutenções durante os testes. Essa estrutura conta com rodas a fim de facilitar testes de reconhecimento de frutos em movimento, situação mais próxima de uma situação de um escaneamento feito em uma colheita.



Figura 26: Fotos do protótipo final produzido.

O avanço linear do conjunto do efetuator é feito por um atuador pneumático de dupla-ação com 300mm de curso, conferindo esse mesmo valor de alcance ao efetuator, para aumentar a rigidez estrutural o atuador é fixado a uma placa e esta placa foi presa a duas guias lineares, e para evitar rompimentos de conexões elétricas foram instaladas esteiras porta cabos para regiões que os fios se movimentam e com fixações estáticas nas demais partes para organizar os fios.

6.1.3 Projeto Pneumático

O circuito pneumático utilizado realiza o acionamento de um atuador pneumático de dupla ação 32x300mm(avanço do efetuator) com e um atuador pneumático compacto 20x25mm(fechamento da garra) ambos com êmbolo magnético, para o acionamento foram utilizadas mangueiras pneumáticas de 4mm de diâmetro para o atuador de menor curso e para o atuador de maior curso foi utilizado mangueiras com 8mm de diâmetro a fim de garantir uma maior velocidade de avanço neste atuador, fato observado neste atuador quando comparado a uso de mangueiras de 4mm de diâmetro. A pressão de ar comprimido utilizada para os acionamento foi de 6 bar.

Para realizar o acionamento dos atuadores foram utilizadas duas válvulas 5/3 vias com centro bloqueado pilotadas por solenoide, o comando dessas válvulas foi feito com o uso do microcontrolador ESP32 associado a um circuito de acionamento que será abordado na seção 6.2.4.

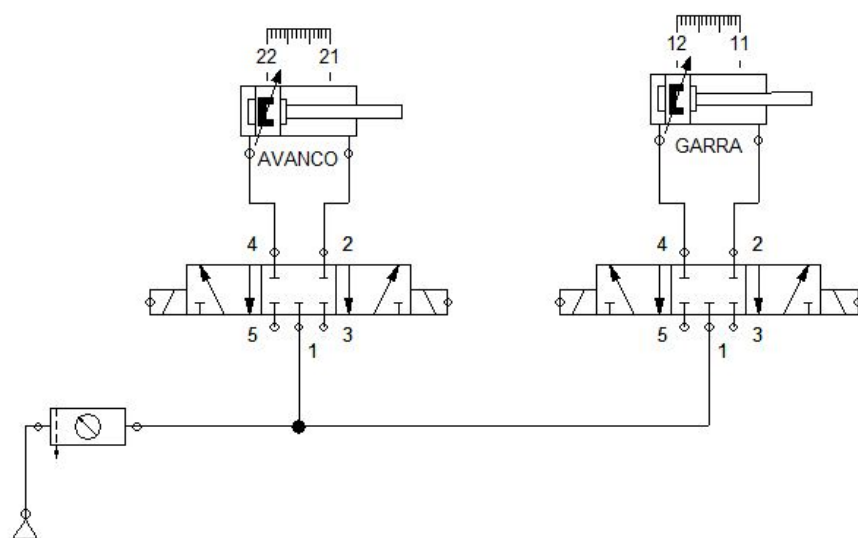


Figura 27: Circuito pneumático utilizado

Inicialmente o projeto foi feito para utilizar ampolas Reed Switch como fins de curso

magnéticos para identificar o estado do pistão. Ao longo dos testes e manuseio do protótipo, além da falta de uma fixação adequada, 3 dos 4 quebraram e substituídas por chaves fim de curso mecânicas através de algumas adaptações na estrutura. Porém o funcionamento ficou inalterado.

6.2 Sensoriamento e detecção de laranja

6.2.1 Tipos de sensores usados na detecção de Frutas

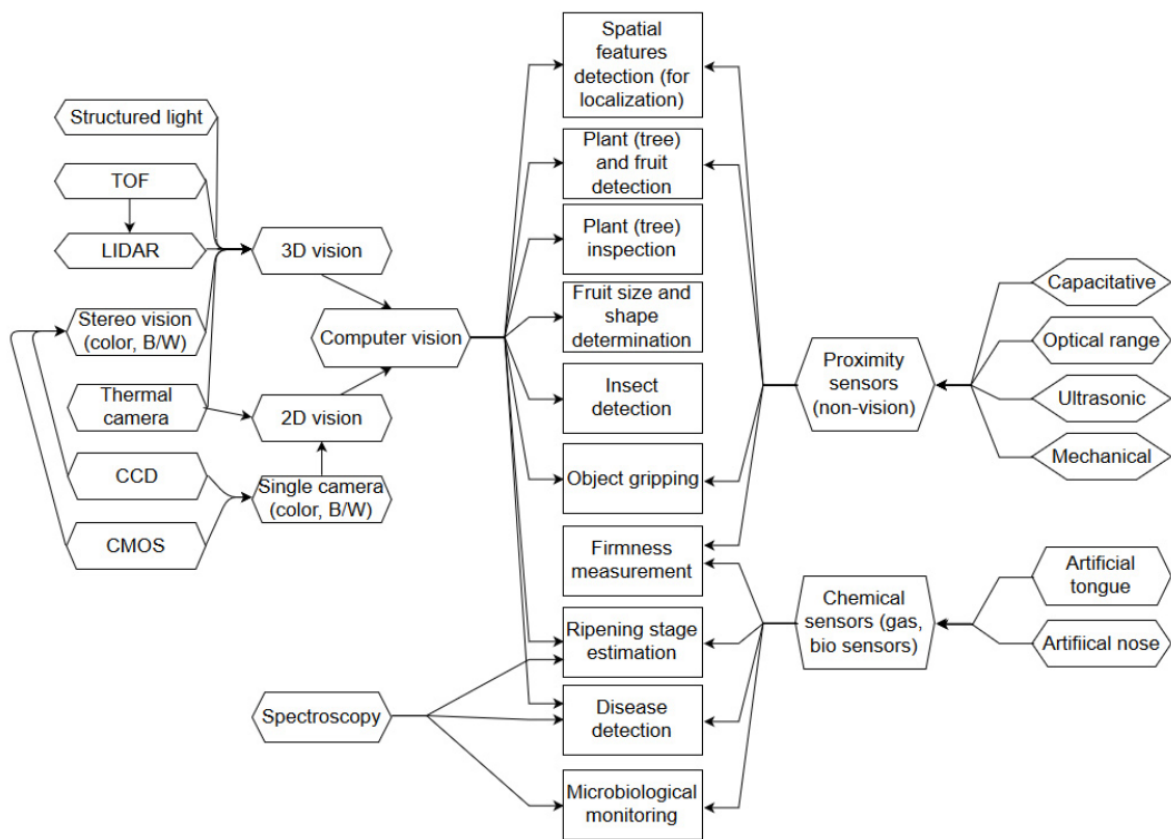


Figura 28: Tecnologias de sensoriamento sem contato e suas aplicações na colheita de frutas. Retirado de Zujevs et al.[39].

Zujevs et al.[39] identificou 4 grupos principais de tecnologias de sensoriamento sem contato usadas em alguma medida na colheita robótica de frutas, sendo elas sensores de visão, sensores de proximidade, sensores químicos e sensores espectroscópicos.

Dentre eles, os que podem ser usados para a localização ou detecção de frutas em árvores são os sensores de visão e proximidade. Há também sensores tácteis, que são usados principalmente para detectar a captura da fruta ou o contato do robô com obstáculos.

6.2.1.1 Sensores Tácteis

Sensores táteis são sensores que precisam de contato físico entre dois corpos para medir alguma informação. São usados para encontrar a localização espacial precisa de uma fruta, assim como sua firmeza, e na determinação da pressão de agarramento de um manipulador.

São essenciais para a manipulação de objetos com destreza, em especial de objetos frágeis como frutas que podem sofrer danos se segurados com muita força. A manipulação adequada de frutas previne o apodrecimento precoce e pode reduzir a necessidade do uso de conservantes.

Abordagens atuais em manipuladores robóticos utilizam múltiplos sensores de contato para a medição de forças estáticas e dinâmicas, além da medição de características do produto manipulado, como a temperatura.

6.2.1.2 Sensores de Proximidade

Sensores de proximidade são usados para a detecção de obstáculos, tanto de maneira discreta, para a detecção da presença de algo no caminho, como contínua, para a medição de distâncias. Há abordagens multi-sensor para a detecção de frutas que usam sensores de proximidade em conjunto com sensores de visão, para posicionar o manipulador de forma a tornar o processamento de imagens para a localização mais efetivo.

6.2.1.3 Sensores de Visão

As abordagens mais bem sucedidas para a detecção de frutas em ambiente de colheita são baseadas em visão computacional. Esta também é a área de pesquisa mais ativa na colheita robótica.

Os dados obtidos pelos sensores de visão são processados através de algoritmos especializados a fim de extrair características (chamadas *features*) da imagem. Diversas características podem ser inferidas a partir da imagem coletada pelo sensor, tais como a cor, geometria e textura de um objeto ou região.

Tais características são usadas como entradas para outros algoritmos projetados especificamente para a realização de tarefas como classificação da imagem, localização de objetos e segmentação da imagem em regiões de interesse. Os algoritmos mais bem sucedidos na realização de tarefas com imagens são baseados em aprendizado de máquina ou

soft computing.

As principais desvantagens do uso de visão computacional, especialmente em conjunto com o aprendizado de máquina, são:

- A necessidade da coleta de um banco de dados variado e bem representativo dos dados a serem encontrados durante a tarefa;
- O uso intenso de recursos computacionais, dificultando o desempenho em tempo real para projetos embarcados;
- A dificuldade na generalização das condições em que a tarefa pode ser realizada. Em outras palavras, a dificuldade produzir um algoritmo robusto a condições de iluminação, perspectiva, obstrução visual e variações nas características dos objetos de interesse.

6.2.2 Escolha do Conjunto de Sensores

A abordagem escolhida pelo grupo para o sensoramento é uso de sensores de visão em combinação com sensores de proximidade para realizar a detecção de laranja em meio à folhagem. A região de detecção é determinada a partir do raio de captura do efetuador, e a profundidade máxima da detecção é dada pelo curso máximo do efetuador.

Para o devido funcionamento do efetuador precisamos de sensores para determinar, no mínimo:

1. A presença de uma laranja na região de captura;
2. A captura da laranja pelo mecanismo;
3. O destacamento da laranja;
4. A presença de uma laranja na linha de ação;
5. A distância entre a laranja e o efetuador;
6. O fim do movimento dos atuadores pneumáticos.

A título de exemplo, no protótipo descrito durante a seção 6.1.1.1, poderia ser empregado:

Função	Sensor	Quantidade	Modelo
1.	Sensor Ultrassônico	2	HC-SR04
2.	Célula de Carga	1	2N-34x34x7.8-50kg-FB
3.	Encoder Rotativo	1	KY-040
4.	Câmera	1	OV2640
5.	Sensor de Distância	2	VL53L0X
6.	Fins de Curso	2	ME-8111

Tabela 2: Conjunto de sensores utilizado no protótipo da seção 6.1.1.1

Na seguinte configuração:

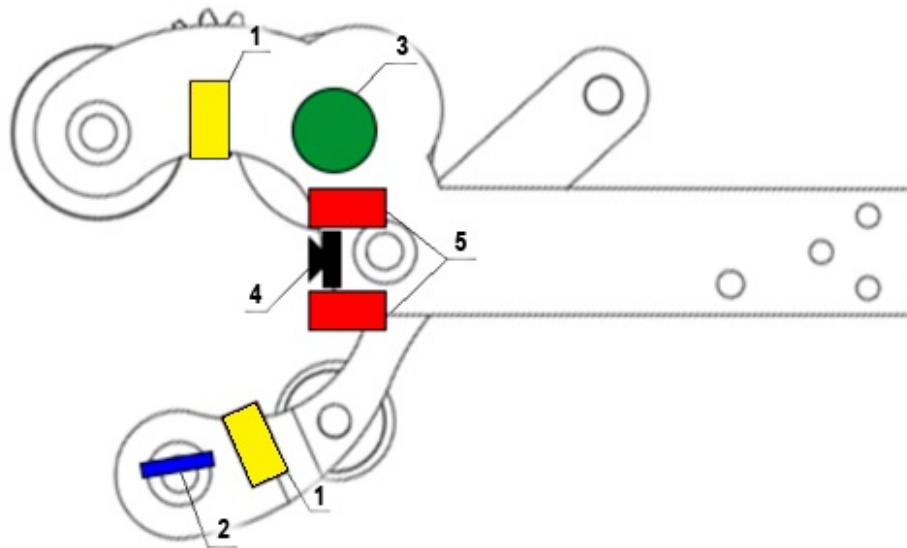


Figura 29: Configuração de sensores escolhida para o protótipo da seção 6.1.1.1, numerados conforme seu propósito correspondente na Tabela 2, coloridos pelo tipo de sensor. (■: Sensores ultrassônicos; ■: Sensores de distância infravermelhos; ■: Encoder rotativo; ■: Célula de carga; ■: Câmera.)

6.2.2.1 Sensores usados no protótipo final

A tabela 3 apresenta os sensores utilizados no protótipo final, separados por sua função no sistema, com elencado anteriormente.

Função	Sensor	Quantidade	Modelo
1.	Sensor Ultrassônico	1	HC-SR04
2. e 3.	Encoder Rotativo	1	KY-040
4.	Câmera	1	OV2640
5.	Sensor de Distância	2	VL53L0X
6.	Fins de Curso	4	Ampola Reed Switch

Tabela 3: Conjunto de sensores utilizado no protótipo final.

O sensor ultrassônico é usado para identificar a presença da laranja na posição de captura, exercendo a função 1.

O encoder rotativo é usado para medir as rotações realizadas pelo rolete motor. Como o rolete só se move de forma consistente se uma fruta foi capturada de forma correta e consegue transmitir o movimento do motor, medir a sua variação de posição em uma determinada janela de tempo em que esperamos ter capturado uma laranja é uma forma eficaz de verificar a captura correta da laranja. Como a rotação da laranja é o que a destaca do pedúnculo, há um determinado número de rotações no encoder que é suficiente para realizar o destacamento correto da fruta. Por isso, este mesmo elemento exerce as funções 2 e 3.

Como já mencionado, o efetuador utiliza visão computacional para detectar laranjas, e por isso uma câmera é utilizada para a função 4. A escolha deste modelo é descrita mais a frente.

Um par de sensores de distância infravermelhos medem a distância entre o efetuador e os objetos observados pela câmera. Tais sensores medem uma distância máxima de 80cm, que é maior que a distância de máxima de atuação do efetuador, sendo suficientes para exercer a função 5.

Por fim, optamos por usar reed switches como fins de acionamento magnético para controlar o movimento dos atuadores pneumáticos, já que ambos possuem hastes magnetizadas. A figura abaixo apresenta a sua posição no pistão de acionamento da garra, onde são fixados por cola. O atuador de avanço não está representado, porém utiliza o mesmo esquema de fixação.

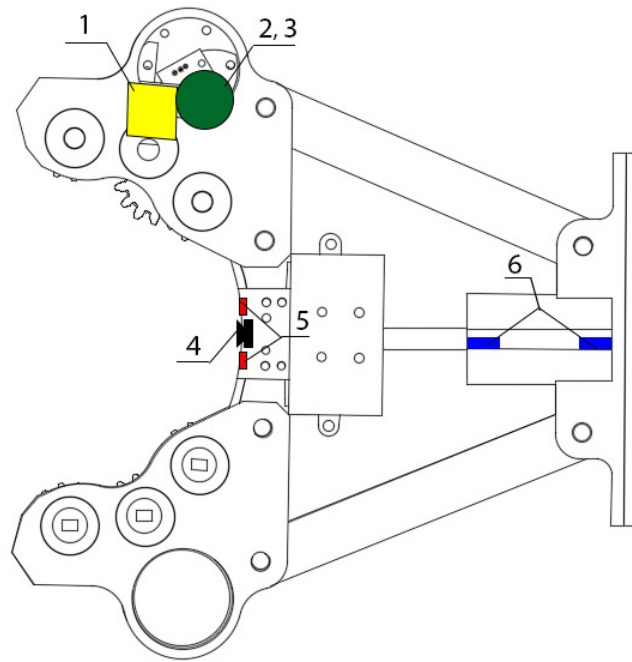


Figura 30: Configuração de sensores escolhida para o protótipo final, numerados conforme sua função correspondente na Tabela 3, coloridos pelo tipo de sensor. (■: Sensor ultrassônico; ■: Sensores de distância infravermelhos; ■: Encoder rotativo; ■: Câmera; ■: Fim de Curso Reed Switch.)

6.2.3 Estratégia de Visão Computacional

A tarefa a ser realizada pelo sistema é mais simples do que as comumente encontradas pela literatura, e pode ser sintetizada em: Dada a imagem do que está a frente do efetuador, identificar se há uma laranja que pode ser colhida. Buscamos estratégias que utilizam sensores monoculares, com foco em menor tempo de execução e redução de falsos positivos.

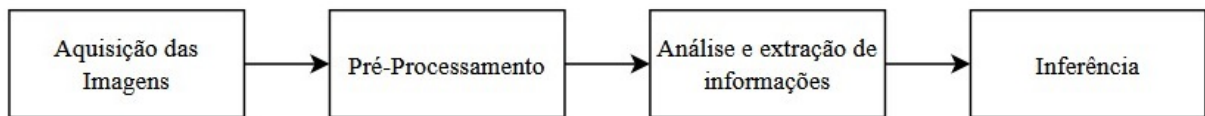


Figura 31: Diagrama de blocos esquematizando as etapas do processo de visão a ser realizado.

A tarefa de visão pode ser entendida como um processo em quatro etapas, como ilustrado na diagrama da figura 31. Estas etapas são:

1. Aquisição das Imagens: Envolve a calibração do sistema de câmeras utilizado, assim

como ajuste de iluminação e exposição.

2. Pré-processamento: As imagens adquiridas são pré processadas a fim de melhorar o desempenho dos algoritmos de análise. Isso inclui normalização do nível de iluminação, redução de ruído, mudança do espaço de cores, entre outros processos.
3. Análise e extração de informações: Nesta etapa são aplicados algoritmos de visão para o processamento das imagens e obtenção de informações úteis, incluindo a determinação de regiões de interesse e detecção de objetos.
4. Inferência: Nesta etapa as informações extraídas das imagens são utilizadas para a realização da tarefa específica. No caso de nosso projeto, decidir se há ou não uma fruta que pode ser colhida. A inferência também pode considerar as leituras de outros sensores além das câmeras para o processo de decisão.

As etapas 1 e 4 são muito específicas à aplicação, portanto pouco discutidas na literatura. A maior parte dos trabalhos e revisões bibliográficas foca em descrever e relatar o desempenho dos algoritmos empregados durante a etapa 3, que inclui operações como segmentação das imagens em regiões de interesse e detecção de objetos.

Kapach et al.[40] realizou uma revisão de diferentes abordagens de visão computacional utilizadas para o projeto de robôs de colheitas de frutas até 2010. Nela, faz uma análise dos resultados obtidos pelo uso de diferentes características visuais das frutas utilizadas, como cor, textura e formato da fruta.

A abordagem mais simples e explorada na literatura para a identificação de frutas maduras é a segmentação das imagens em frutas ou plano de fundo, a partir das cores da imagem. Trata-se de um método intuitivo e de fácil implementação onde os canais das imagens de entrada, tipicamente em formato RGB, são pré-processados a fim de controlar condições de iluminação ou outras condições adversas e uma análise é realizada a pixel a pixel a fim de determinar se tem a cor desejada ou não. No caso de laranjas, analisa-se o nível de vermelho do pixel em questão.

Porém, basear-se apenas em cores é um método limitado e o desempenho varia muito dependendo das condições de iluminação, além de não poder ser usado caso as frutas e o plano de fundo tenham aparência parecida.[24, 25, 40]. Desta forma, autores buscam complementar o uso de cores com outras dicas visuais, como textura e formato. Porém extrair tais características da imagem envolve um processamento mais envolvido.

Na mesma revisão, Kapach et al.[40] discute os métodos de segmentação explorados pela literatura, que variam desde a segmentação global baseado em algum parâmetro

calculado pixel a pixel, métodos de clusterização, a comparação de porções da imagem com um modelo que representa a fruta (*template matching*) e até a segmentação utilizando métodos de aprendizado de máquina, sendo comum o uso de SVM's ou Redes Neurais.

O desempenho de cada método de segmentação depende muito da qualidade das *features* extraídas em etapas anteriores do processo de visão, sendo que não há um método que se sobressai em todas as situações. Desta forma, autores com os melhores resultados utilizam um processo de segmentação em várias etapas, vezes combinando múltiplos métodos, incluindo a combinação de técnicas de aprendizado de máquina com técnicas tradicionais.

O uso de aprendizado de máquina supervisionado, embora seja o estado da arte, não se mostra estritamente necessário, já que muitos algoritmos atingem um desempenho comparável usando técnicas analíticas [24]. Aliando-se a necessidade da obtenção de dados adequados e o aumento da complexidade do sistema, a adoção destas abordagens no processo de prototipagem é difícil.

6.2.3.1 Hardware Utilizado

Buscamos desenvolver um sistema embarcado de captura e processamento de imagens que será parte de cada efetuador. Assim utilizaremos uma câmera junto de um microprocessador dedicado a realizar o processamento da imagem, extrair as informações relevantes e comunicá-las ao controlador principal. Tal microprocessador também terá acesso à leitura de outros sensores relevantes ao sistema de visão, como os que medem a distância do efetuador até a copa.

O sensor e microprocessador escolhidos para este subsistema são o sensor OV2640, de 2MP e resolução máxima de 1600x1200 pixels, e o microcontrolador ESP32-S, um dispositivo voltado para IOT com 2 cores, velocidade de processamento 240MHz, 500KB de memória RAM e 4MB de memória Flash embutida. Este processador também será usado como o controlador principal do sistema, como descrito na seção capítulo 6.2.4.



(a) Foto do conjunto com módulo e câmera. Autoria própria.



(b) Desenho do módulo baseado no micro-processador ESP32-S. Retirado do datasheet [41]

Figura 32: Módulo ESP32-CAM, no desenvolvimento do sistema embarcado de visão.

Ambos os dispositivos podem ser obtidos facilmente para a prototipagem na forma de um módulo conhecido como ESP32-CAM, produzido pela empresa AI-Thinker, apresentado na figura 32. Este módulo também conta com LED embutido para flash, entrada para cartão SD e 4MB de memória RAM externa, na formato de um chip PSRAM endereçável por interface serial.

6.2.3.2 Visão Geral do Algoritmo

O desenvolvimento de nosso algoritmo de visão é baseado em técnicas tradicionais que serão posteriormente complementadas com técnicas de aprendizado de máquina que possam ser integradas ao sistema já desenvolvido.

Buscamos replicar os resultados obtidos por Hannan et al.[42] em seu sistema de detecção de laranjas maduras em tempo real. Tal sistema combina a análise do nível relativo de vermelho das imagens de laranjeiras e a detecção de círculos nas máscaras obtidas pela segmentação por cor para a determinação da posição, tamanho e número de laranjas maduras na imagem. Os autores reportam obter uma taxa de sucesso de detecção de 93% e uma taxa de falsa detecção de 4%, em um teste com 110 imagens coletadas pelos própria equipe.

O algoritmo segue o diagrama de blocos abaixo, e cada uma das etapas será explicada em detalhes a seguir.

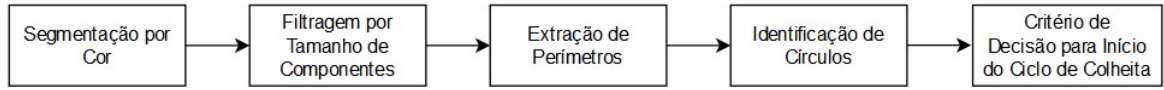


Figura 33: Diagrama de blocos esquematizando as etapas do algoritmo de visão desenvolvido.

6.2.3.3 Segmentação por Cor

A segmentação por cor é baseada em na coordenada de cromaticidade *r-chroma* obtida a partir da representação RGB da imagem. Esta coordenada representa o nível relativo de vermelho em um pixel, e é calculada da seguinte forma:

$$r = 255 * \frac{R}{R + G + B} \quad (6.1)$$

Onde R, G, B são os níveis de vermelho, verde e azul do pixel RGB. Observa-se na figura que frutas laranjas apresentam um valor maior de *r-chroma* que a vegetação.

O método proposto por Hannan et al.[42] segmenta a imagem em laranjas ou plano de fundo utilizando um valor de corte T para *r-chroma*. A análise do desempenho de *r-chroma* como um classificador de pixels de laranjas maduras foi feita a partir de uma curva ROC, cujo parâmetro de controle é o nível de corte para a segmentação, reproduzido na figura.

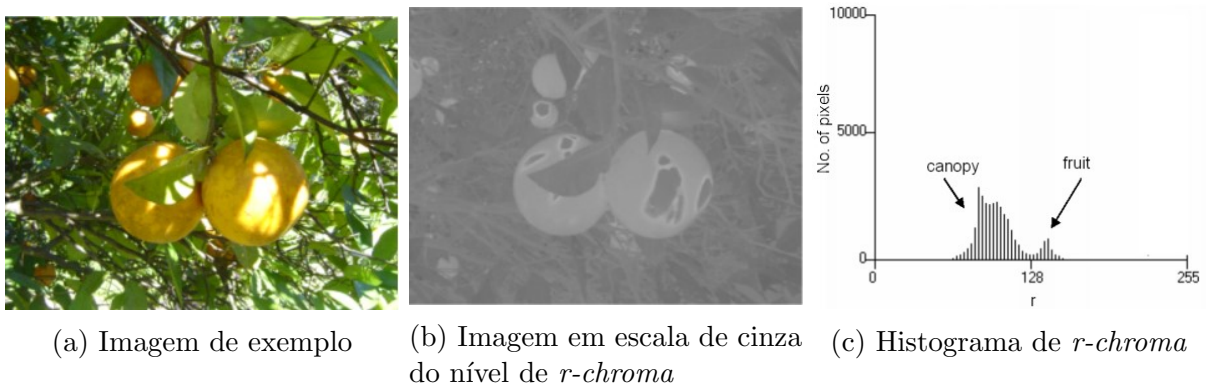


Figura 34: Coordenada de cromaticidade *r-chroma* como parâmetro de identificação de pixels pertencentes à uma laranja madura. O histograma é mostra que o nível de *r-chroma* em uma fruta é parte de uma distribuição diferente do resto da vegetação. Adaptado de Hannan et al.[42]

A partir desta análise, um critério para a determinação do valor de corte T foi desenvolvido considerando considerando a distribuição de *r-chroma* na imagem, dado pela

equação 6.2, onde μ_r e σ_r são a média e desvio padrão do nível de *r-chroma* na imagem.

$$T = \mu_r + c * \sigma_r, \quad \text{onde } c = \begin{cases} 1 & \text{se } \mu_r \leq 90 \\ 1.3 & \text{se } \mu_r > 90 \end{cases} \quad (6.2)$$

Segundo os autores, este se mostrou um método robusto a variações na iluminação, sendo que a distribuição de *r-chroma* e o valor de corte T mudam pouco para a foto obtida com diferentes níveis de luz.

Este método de segmentação foi testado a partir de um script em python, utilizando imagens do pé de limões-bravo utilizados para o teste do protótipo descrito na seção 6.1.2. Tais frutas também apresentam a cor amarela-alaranjada quando maduros, e são bons modelos para laranjas. A figura 35 apresenta os resultados de segmentação obtidos para diferentes valores de T .

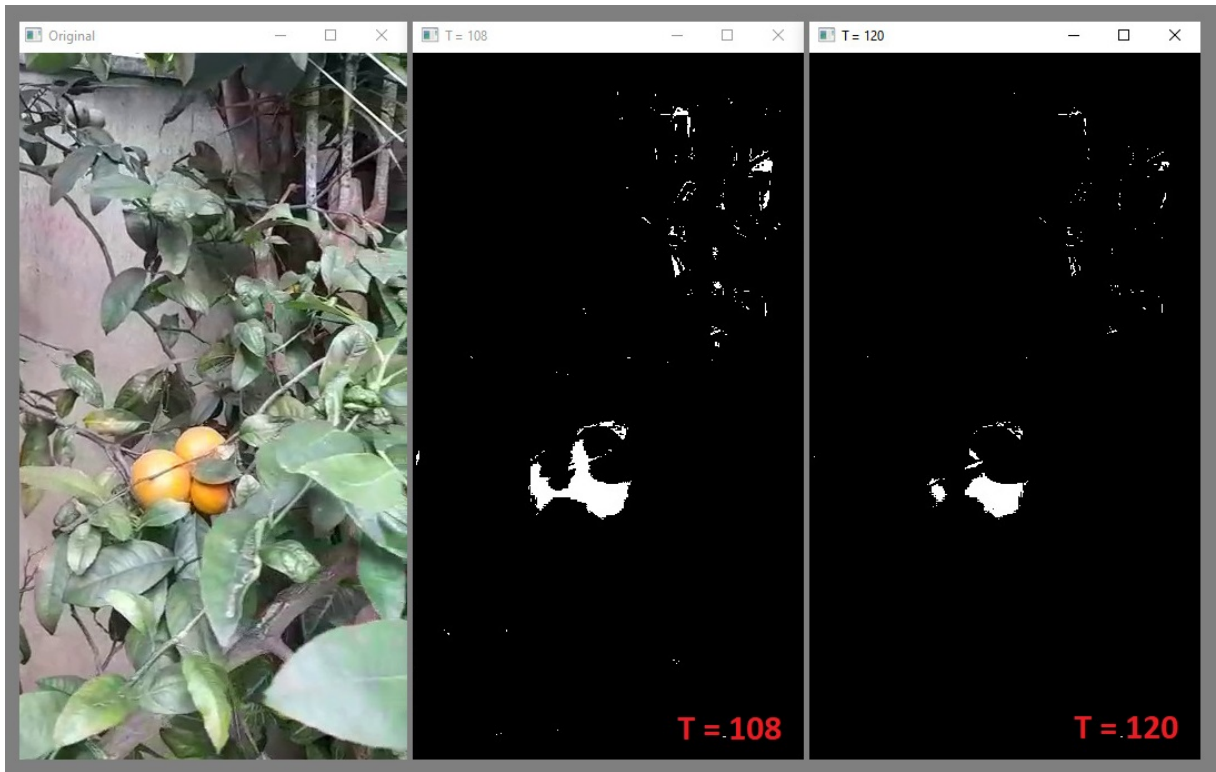


Figura 35: Teste do filtro de cores implementado, utilizando diferentes níveis de T para a segmentação. Nota-se que o uso de um valor de corte maior diminui o número de falsos positivos, porém torna o reconhecimento de laranjas mais difícil.

Após esta verificação, a segmentação por cor foi testada no módulo ESP32-CAM. A calibração da câmera foi feita a partir de uma interface web desenvolvida usando o próprio módulo, capaz de realizar a configuração da câmera e transmitir as imagens obtidas em

tempo real, também desenvolvida pela dupla a partir de códigos de exemplo. Notou-se que o desempenho é sensível ao nível de saturação e tempo de exposição na captura imagem.

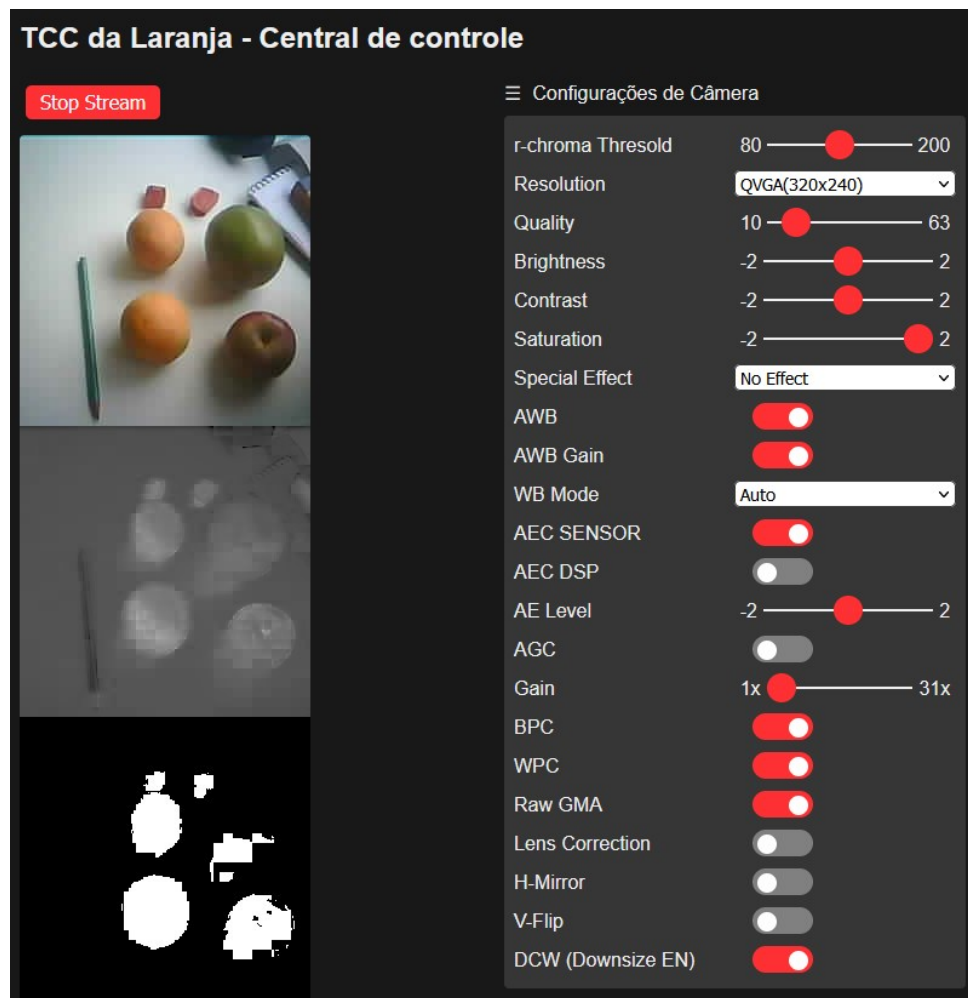


Figura 36: Interface web desenvolvida para o ajuste dos parâmetros da câmera e inspeção dos resultados de segmentação.

Foi verificado que uma implementação contendo apenas a aquisição da imagem em uma resolução de 96x96 pixels e a aplicação da segmentação por *r-chroma* é capaz de ser executada em aproximadamente 20ms, resultando em uma taxa de quadros real de 50 quadros por segundo. O fator limitante para o desempenho da segmentação neste caso é a velocidade de aquisição de dados e transferência das imagens da câmera para a memória interna do processador, e não o processamento posterior.

6.2.3.4 Separação em Componentes e Filtro por Tamanho

A etapa seguinte do algoritmo de Hannan et al.[42] é a identificação e anotação de componentes contínuos a partir da imagem segmentada, um procedimento conhecido como

Connected-Component Labelling, ou CCL. Esta é uma etapa comum em arquiteturas de visão computacional, já que a separação em componentes pode ser usada para a extração de diversas informações úteis, como a área de objetos de interesse.

O algoritmo original utiliza esta etapa para determinar o tamanho em pixels dos componentes, e remover as regiões que apresentam objetos grandes ou pequenos demais para serem laranjas, sendo particularmente útil para a redução de ruído. Porém, embora relatem os valores de corte utilizados para descartar objetos grandes ou pequenos demais em diferentes situações, os autores não relataram qual o algoritmo de CCL utilizado.

Por seu vasto número de aplicações, a literatura possui um grande número de algoritmos de CCL, porém as restrições de memória e processamento que nosso sistema apresenta torna a escolha não trivial. Optou-se por utilizar uma versão modificada de algoritmo recursivo implementado por Nielsen[43].

6.2.3.5 Extração de Perímetros

Após a remoção de componentes com tamanho inadequado, a próxima etapa é a extração do perímetro dos objetos detectados. Um pixel do objeto segmentado é considerado um pixel de perímetro quando um de seus 4 vizinhos é um pixel de *background*:

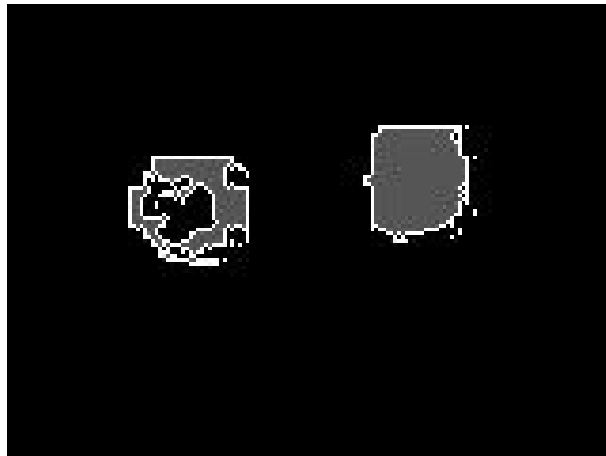


Figura 37: Exemplo de imagem segmentada com contornos demarcados. Autoria própria.

Esta etapa é realizada iterando uma vez por todos os pixels da imagem e demarcando pixels segmentados como pixels de perímetro, após verificados os seus vizinhos.

6.2.3.6 Detecção de Círculos

A detecção de círculos de Hannan et al.[42] é baseada no trabalho de Pla[44], onde segmentos de círculos de contorno são usados para interpolar círculos que são candidatos aos círculos reais que geram o objeto correspondente. Assim cada contorno gera múltiplos círculos, que são agrupados baseados em uma métrica escolhida, a fim de obter os círculos originais que geram o contorno obtido. Desta forma podemos separar as laranjas que estão sobrepostas na imagem, ou obter laranjas cuja segmentação foi parcialmente obstruída por folhas, galhos ou outros objetos.

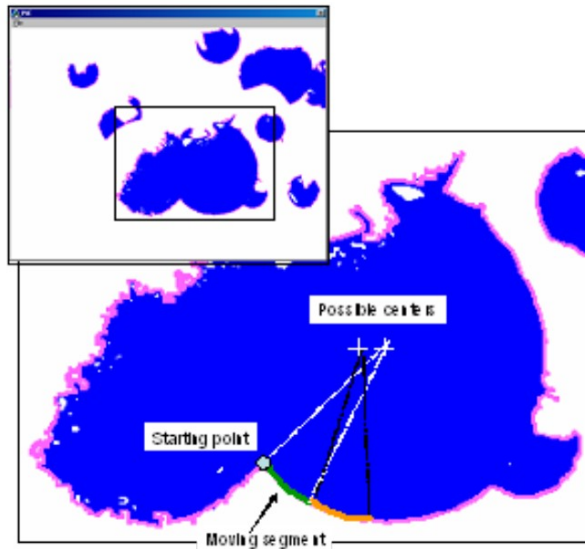


Figura 38: Exemplo detecção de círculos baseado em janelas contínuas de pontos de contorno. Retirado de Hannan et al.[42]

Utilizamos o método dos mínimos quadrados para interpolar o ponto correspondente ao centro do círculo (x_c, y_c) e seu raio r a partir dos pontos do perímetro (x_i, y_i) . A equação a ser interpolada é a equação característica de um círculo no plano xy:

$$(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 = r^2 \quad (6.3)$$

Esta equação é linearizada definindo $\alpha = x_c^2 + y_c^2 - r^2$, o que resulta em:

$$2x_i x_c + 2y_i y_c - \alpha = x_i^2 + y_i^2 \quad (6.4)$$

E assim teremos o sistema de equações sobre-determinado:

$$\begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & -1 \\ 2x_2 & 2y_2 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2x_n & 2y_n & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

Que pode ser solucionado utilizando um método numérico a escolha. Optou-se pelo método das equações normais, porque este se mostrou suficientemente estável e é muito veloz ao ser aplicado em matrizes com número de linhas significativamente maior que o de colunas.

$$(A^T A)X = A^T Y$$

$$\text{Onde } A = \begin{bmatrix} 2x_1 & 2y_1 & -1 \\ 2x_2 & 2y_2 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 2x_n & 2y_n & -1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ \alpha \end{bmatrix} \quad \text{e } Y = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 \\ \vdots \\ x_n^2 + y_n^2 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

O sistema 3x3 resultante é resolvido usando a decomposição $(A^T A) = LDL^T$.

Os perímetros são percorridos de maneira horária utilizando o algoritmo de Theo Pavlidis [45], e cada ponto é utilizado no máximo uma vez, na ordem em que é encontrado.

O número de pontos do perímetro a ser utilizado é um parâmetro do algoritmo, e dependerá o tamanho da imagem. Segmentos do perímetro onde o número de pontos é menor que o determinado são descartados. Experimentalmente, observou-se que o uso de uma janela de 30 pontos oferece um bom equilíbrio entre a obtenção de bons candidatos e um bom desempenho do algoritmo.

Após a interpolação dos círculos candidatos, descartamos aqueles que consideramos absurdos, definidos como:

- Círculos cujo centro não pertencem à imagem;
- Círculos cujo raio é maior que a metade da largura ou altura da imagem.

Os candidatos não descartados são agrupados com base em sua proximidade. Novamente, Hannan et al.[42] não entram em detalhes sobre o critério utilizado para o agrupamento de círculos. Adotou-se a seguinte regra:

- Seja d a distância euclidiana entre $(x_c, y_c)_{\text{grupo}}$ de um conjunto de círculos já agrupado e $(x_c, y_c)_{\text{candidato}}$ de um candidato.
- Sendo r_{grupo} a média dos raios de todos os círculos já agrupados, n o número de círculos agrupados, e $r_{\text{candidato}}$ o raio do círculo candidato, o círculo candidato será incluído ao grupo se:

$$d \leq \left(\frac{r_{\text{grupo}}}{n+1} + \frac{r_{\text{candidato}}}{n+1} \right) / K \quad (6.7)$$

Experimentalmente, adotou-se $K = 5$.

- Após adicionado um novo candidato ao grupo, incrementa-se n e $(x_c, y_c)_{\text{grupo}}$ e r_{grupo} serão definidos como a nova média simples dos elementos do grupo.

Se o candidato não foi adicionado a nenhum grupo existente, este se torna o primeiro membro de um novo grupo. Cada grupo é considerado como uma laranja de raio centro $(x_c, y_c)_{\text{grupo}}$ e raio r_{grupo} que pode ser colhida.

6.2.3.7 Critério de Decisão

De posse das laranjas extraídas da imagem, é preciso verificar quais de fato podem ser colhidas. Neste caso são utilizadas as características de projeto do efetuador, sendo elas:

- Os raios máximo e mínimo que podem ser colhidos com sucesso;
- A distância máxima de colheita;
- A distância máxima entre o centro da laranja e o centro da linha de ação do efetuador que ainda pode ser colhida.

Estas características já foram discutidas na seção 6.1.2. É utilizado um sensor de distância ótico para medir a distância entre os objetos fotografados à frente da linha de ação do efetuador e a lente da câmera. A partir desta distância, podemos converter entre as coordenadas intrínsecas da câmera e as coordenadas reais, em milímetros.

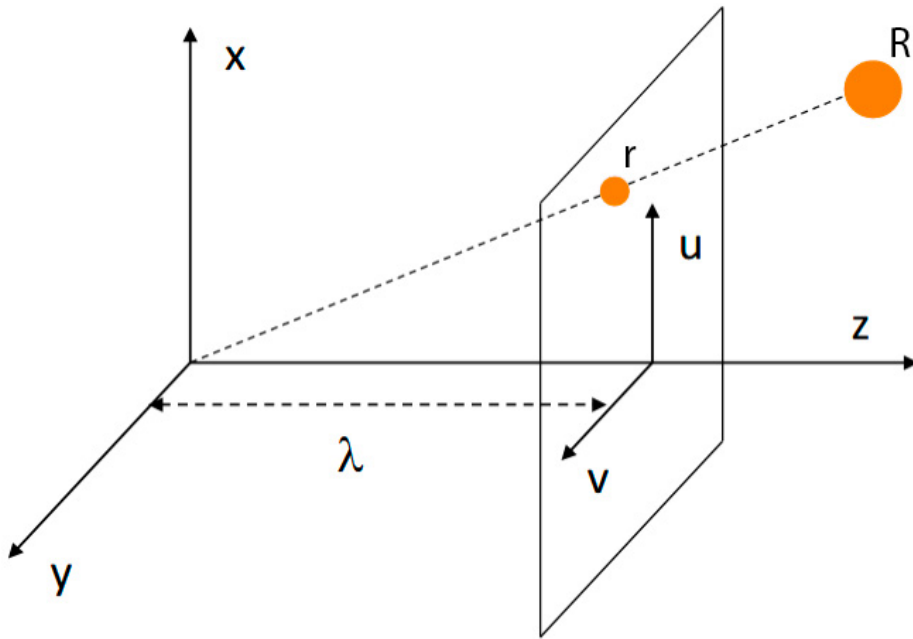


Figura 39: Modelo de câmera "furo de alfinete" para a conversão de coordenadas intrínsecas em coordenadas reais.

A figura 39 ilustra o modelo utilizado para a obtenção de medidas reais. Por semelhança de triângulos, obtemos as relações:

$$X = u \frac{Z}{\lambda}, \quad Y = v \frac{Z}{\lambda}, \quad R = r \frac{Z}{\lambda} \quad (6.8)$$

Onde (X, Y) são as coordenadas reais do centro da laranja, R é seu raio real em milímetros. Z é a distância da câmera até a laranja, como medida pelos sensores de distância, e λ é a distância focal da câmera, que depende do modelo, lente e distância entre a matriz de sensores da câmera e a lente.

Obtivemos experimentalmente a distância focal a partir de fotos de um objeto com características reais conhecidas retiradas a diferentes distâncias da lente, como mostra a figura 40. O objeto usado é um arranjo de quadrados azuis de 10mm de lado desenhados e em uma folha de papel, e posicionado de forma perpendicular à câmera.

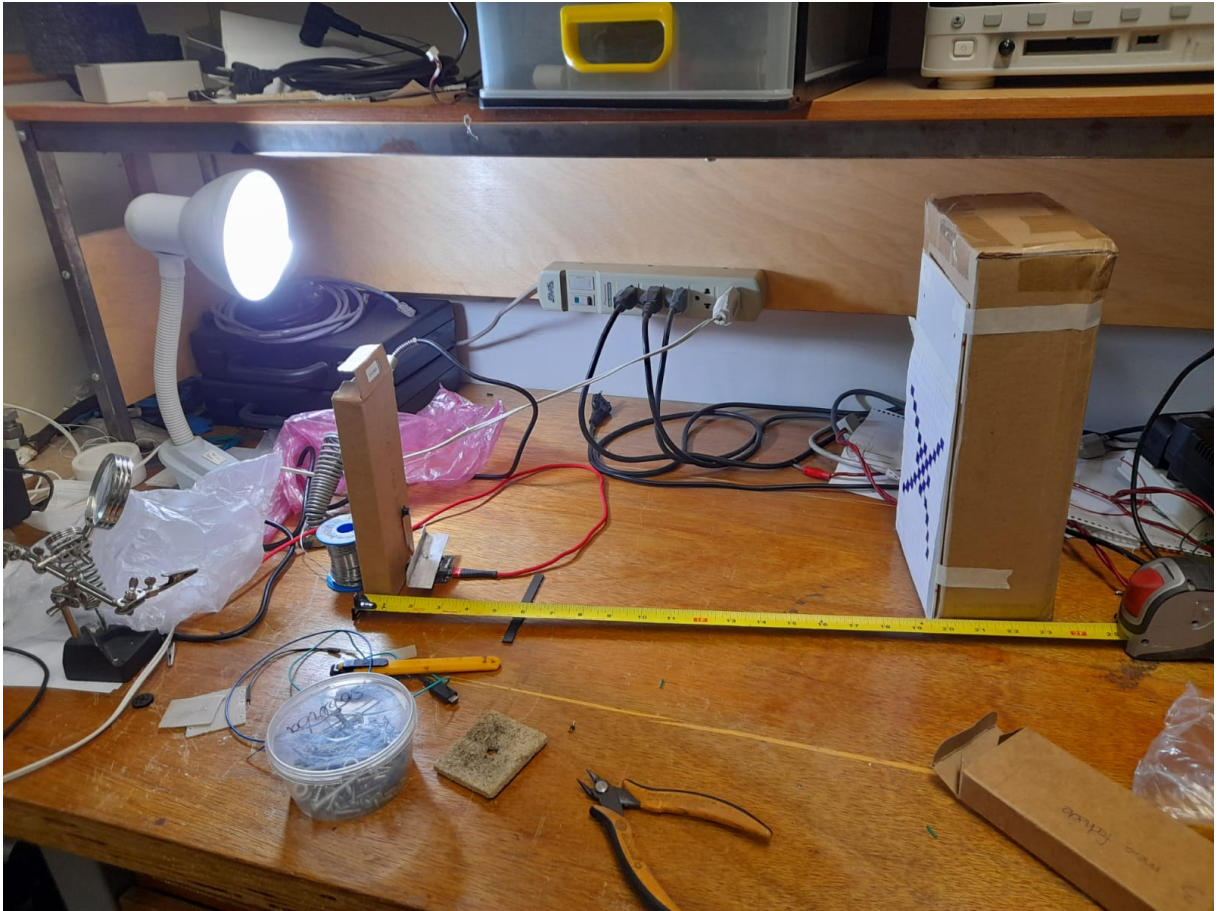
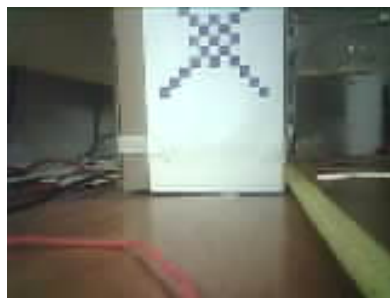


Figura 40: Levantamento da distância focal do sensor OV2640

Foram retiradas 8 fotos com resolução 160x120px, cujas distâncias da lente e número médio de pixels das arestas dos quadrados estão reproduzidas na tabela 4.



(a) Distância de 300mm



(b) Distância de 400mm



(c) Distância de 500mm

Figura 41: Exemplos de fotos utilizadas para a medição da distância focal.

Distância do objeto (mm)	Tamanho médio das arestas na imagem (pixels)
150	11
250	8
300	7
350	5,5
400	5
443	4,5
450	4
500	3,5

Tabela 4: Medições coletadas durante o levantamento da distância focal.

Foi realizada a regressão linear das medidas obtidas para estimar a distância focal usando a equação $u = \lambda \frac{X}{Z}$, onde X é fixo e igual a 10mm. A regressão resultou em $\lambda = 167,6\text{mm}$, com $R^2 = 0.9986$.

Finalmente, consideramos que uma laranja pode ser capturada quando:

1. A distância até a laranja Z é menor que curso do efetuador somada à distância da câmera até o centro de captura do efetuador.
2. O raio real da laranja $R = r_{\text{grupo}} \frac{Z}{\lambda}$ está entre o raio mínimo e máximo que pode ser capturado.
3. A distância real $D = d_{\text{grupo}} \frac{Z}{\lambda}$ entre o centro da laranja e o centro da imagem é menor que o raio da região de captura. d é a distância euclidiana entre $(x_c, y_c)_{\text{grupo}}$ e o centro da imagem.

Quando as 3 condições são satisfeitas por algum dos agrupamentos de candidatos obtidos a partir da interpolação descrita na seção 6.2.3.6, o sinal de detecção de laranja é enviado ao controlador principal.

6.2.4 Projeto Eletrônico

O projeto eletrônico do efetuador está esquematizado pelo diagrama de blocos na figura 42. O esquemático detalhado para o sistema eletrônico do Protótipo 1 se encontra no apêndice A.

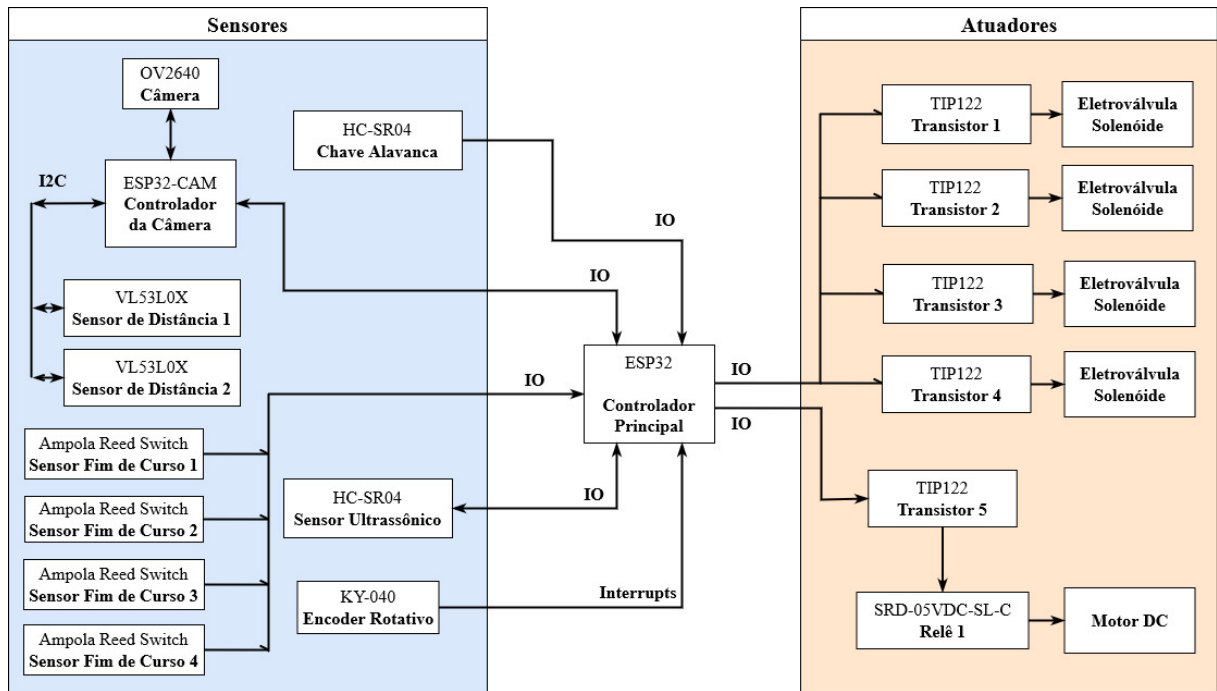


Figura 42: Diagrama de blocos sintetizando o projeto eletrônico detalhado no apêndice A

Por conveniência, sistema foi alimentado por uma fonte ATX de 250W, embora o consumo elétrico total do sistema seja muito menor que a potência nominal.

Os únicos componentes ainda não mencionados são pertencentes aos sistemas de atuação. Os solenoides que comutam as válvulas 5/3 vias são acionados por transistores darlington NPN do tipo TIP122.

Já o motor DC que gira os roletes é acionado por um relé, que propicia a separação total entre o seu acionamento e o circuito de controle. Optou-se por este acionamento devido ao fato de o motor ser alimentado por tensões simétricas de +12 e -12 volts, já que a fonte utilizada não possui saída de 24V. Desta forma evita-se problemas com a tensão do polo negativo do motor ser diferente da referência usada como 0V no resto do sistema.

Além disso, o motor funciona sempre em velocidade máxima e em um único sentido, o que dispensa a necessidade do uso de acionamentos mais complexos como pontes-H. O relé que aciona o motor é ligado ao controlador por meio de outro TIP122.

Adicionalmente, foram utilizados dois capacitores de filtro de 0.1uF entre o terra e os pinos de leitura do encoder KY-040, para atenuar o ruído de *bouncing* causado pela comutação das chaves mecânicas.

O circuito foi montado à mão com o auxílio de uma placa perfurada e preso ao corpo do protótipo.

6.3 Controle do efetuador

6.3.1 Arquitetura de Controle Escolhida

Todos os subsistemas do efetuador são controlados em cadeia aberta, já que não há necessidade do controle preciso de nenhum dos atuadores. Desta forma, o dispositivo pode ser modelado como um sistema a eventos discretos, e controlado a partir de uma máquina de estados.

A máquina de estados utilizada para o controle do efetuador está apresentada na figura 43.

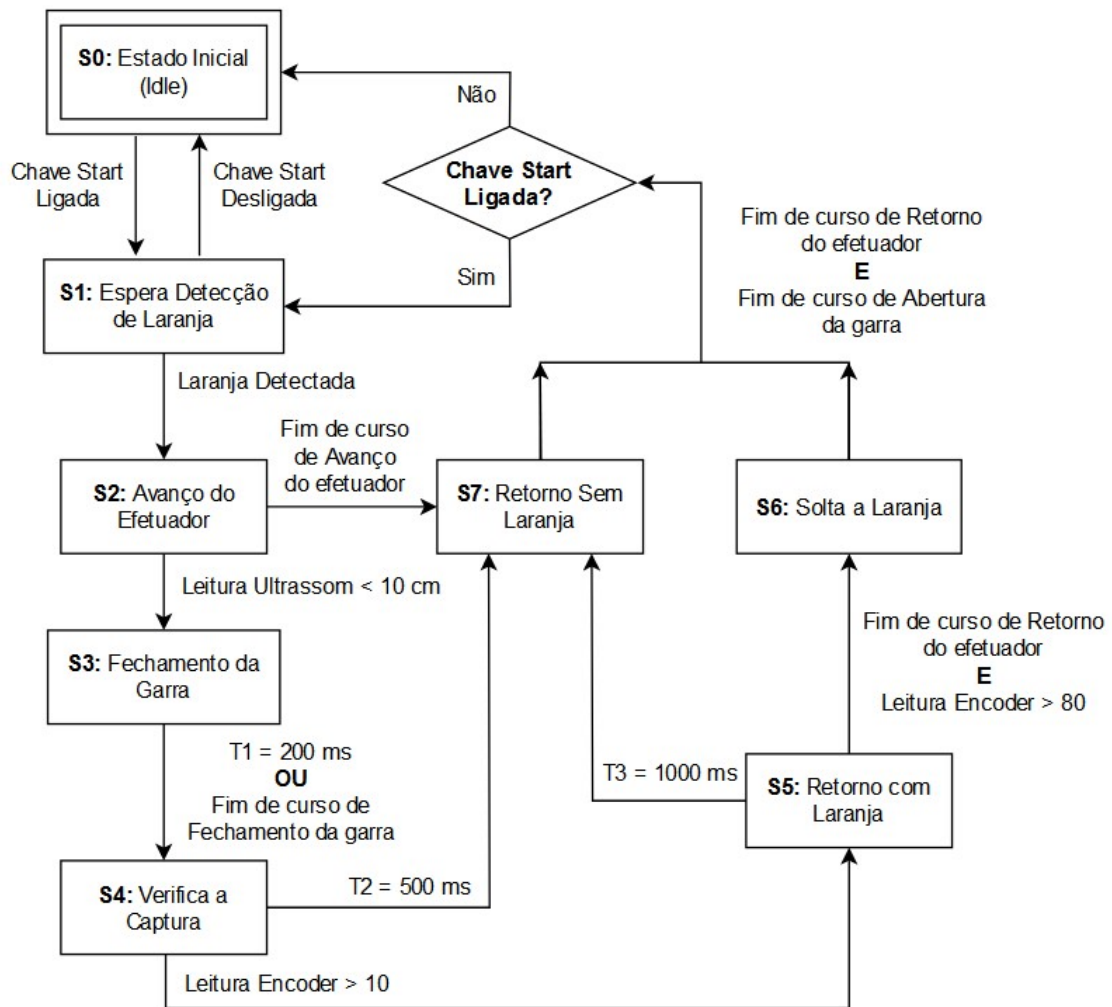


Figura 43: Máquina de estados que ilustra o funcionamento do controlador principal. T1, T2 e T3 são temporizadores disparam a sua respectiva transição de estado, e são iniciados assim que houve a transição para os estados S3, S4 e S5, respectivamente.

O fluxo normal de uma colheita bem sucedida consiste no percurso de S1 até S6. Há

três fluxos alternativos em que o controlador é capaz de determinar que uma laranja não será colhida e realiza o retorno imediato para o estado **S1**, passando pelo estado **S7**.

Tais fluxos ocorrem quando o avanço do efetuador termina antes de chegar na laranja, ou quando o fechamento da garra resulta em uma interface ruim com a laranja não possibilitando seu giro adequado, ou ausência da fruta na devido a um falso positivo. Estes fluxos alternativos possibilitam o reinício do ciclo de colheita independente das leituras dos sensores externos, apenas com base nos fins de curso.

O temporizador na transição entre **S3** e **S4** serve para quando o objeto agarrado pelo efetuador é grande demais e impede o fechamento completo da garra e o acionamento do fim de curso.

As constantes de tempo para os temporizadores e valores numéricos para as transições baseadas na leitura do ultrassom e encoder presentes na figura 43 foram as utilizadas experimentalmente, porém não são valores ótimos e sua alteração pode contribuir para um melhor funcionamento do sistema.

7 RESULTADOS

Até o presente momento o custo total de elaboração do protótipo final proposto foi de aproximadamente R\$1990,88. Este preço é estimado com valores referentes a 2021, já que alguns materiais que foram comprados para este trabalho por terem sido disponibilizados pelo laboratório do professor orientador, ou serem pertences pessoais da dupla e adquiridos anteriormente. A lista detalhada com os materiais usados e o custo de cada um está presente no Apêndice D.

Através de medições em vídeo de três colheitas bem sucedidas, observou-se que o ciclo de colheita realizado pelo controlador principal após o seu acionamento por vídeo ou botão, composto pelas passagens pelos estados **S2**, **S3**, **S4**, **S5** e **S6** até retornar a **S1** demora em média 2,11 segundos. Dividindo o fenômeno em etapas correspondentes a cada um dos estados:

1. Tempo médio de avanço do efetuador: 350 ms
2. Tempo médio entre avanço do efetuador e fechamento da garra: 200 ms
3. Tempo médio entre fechamento da garra e início do retorno: 500 ms
4. Tempo médio de retorno do efetuador: 320 ms
5. Tempo médio do retorno até a soltura da laranja: 480 ms

É esperado que a média das etapas seja diferente da média do ciclo total. Nota-se que as etapas 3 e 5 são as que mais tomaram tempo, e estão relacionadas ao funcionamento do motor DC, encoder e do sistema de captura e destacamento da laranja.

Nota-se que o tempo médio de avanço e retorno do efetuador ficou próximo, mesmo este tendo velocidades de avanço e retorno diferentes. Isso ocorre devido ao amortecimento interno do pistão, aliado à posição do fim de curso, que só é acionado depois da ação do amortecimento, e por isso o tempo de retorno aparenta ser maior. O fim de curso de

avanzo é acionado ligeiramente antes do amortecimento, assim o atraso no tempo de avanço devido ao amortecimento é minimizado.

Em relação ao funcionamento do algoritmo de visão, escolhemos utilizar imagens na resolução 160x120px, pois proporcionam um aumento de campo de visão em relação à menor resolução possível ainda é possível processá-las na memória disponível no módulo ESP32-CAM.

Temos que o tempo médio para o processamento de um quadro em que houve a detecção de uma laranja capturável foi de 1680ms. O tempo médio aproximado para cada uma das etapas foi:

1. Captura da imagem, descompressão e segmentação baseada em cor: 80 ms
2. Aplicação de CCL e remoção de componentes baseado em tamanho: 1200 ms
3. Extração de perímetros: 40 ms
4. Identificação de círculos: 280 ms
5. Aplicação do critério de decisão: 20 ms

Nota-se que a etapa 2 é onde a maior parte do tempo de processamento é gasta, tornando o uso do algoritmo inviável. Removendo esta etapa do processo e realizando o processamento sem a filtragem por tamanho, o tempo médio de detecção cai para 788ms, e o tempo médio de cada etapa se torna:

1. Captura da imagem, descompressão e segmentação baseada em cor: 80 ms
2. Extração de perímetros: 60 ms
3. Identificação de círculos: 580 ms
4. Aplicação do critério de decisão: 30 ms

Percebe-se que há um aumento significativo no tempo de execução da etapa de identificação de círculos, já que sem a filtragem por tamanho, o número de pixels de contorno a serem processados e interpolados aumenta muito devido ao ruído.

A eficácia de detecção de laranjas varia muito dependendo das condições ambientes, sendo necessário recalibrar a câmera dependendo das condições de luminosidade. Além

disso, o nível de ruído e qualidade de captura varia muito entre diferentes exemplares do OV2460, o que dificulta o desenvolvimento de um sistema robusto. O par de sensores de distância VL53L0X também apresentou comportamentos erráticos ao tentar utilizar 2 sensores no mesmo bus I2C, o que levou a dupla desabilitar um deles durante os testes. Ainda assim, foi realizar alguns acionamentos com o sistema de visão e realizar uma colheita bem sucedida.

Não houve tempo suficiente para realizar testes comprovando a taxa de acertos do algoritmo de visão, mas qualitativamente notou-se que é bem inferior ao descrito por Hannan et al.[42], possivelmente devido ao uso de hardware inferior e de *bugs* não descobertos no software implementado. Todo o código implementado está disponível para a conferência no GitHub [46].

Outro resultado observado ao longo dos testes é o uso de 6 bar para a pressão de fechamento da garra causou danos à casca da laranja que levaram à oxidação prematura e mudança de cor após alguns dias, e portanto esta pressão de fechamento é inadequada para a colheita de frutas de mesa. Devem ser realizados testes para determinar se estes danos ocorrem também em pressões menores e com o uso de roletes emborrachados.

8 DISCUSSÃO FINAL E CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos durante os testes qualitativos do protótipo final, podemos observar uma série de gargalos que precisam ser remediados antes do desenvolvimento de um produto com bom desempenho.

Primeiramente, o tempo de ciclo de colheita precisa cair para a metade antes de atender aos requisitos funcionais. O uso de um motor mais rápido para giro dos roletes, um encoder rotativo mais preciso, melhor processamento dos dados do encoder e do ultrassom, e ajuste das constantes de tempo das transições temporizadas podem ajudar a reduzir o tempo médio atual.

O segundo gargalo é o baixo desempenho atual do algoritmo de visão, e é mais relevante já que não pode ser amenizado pelo uso simultâneo de vários atuadores. O tempo de detecção de 788ms é completamente inviável para a aplicação atual. Porém, o código implementado é altamente ineficiente, e pode ser otimizado de diversas maneiras. Primeiramente o uso de outro algoritmo de CCL após uma revisão do estado da arte, o que reduziria o tempo de execução de outras partes do algoritmo. Além disso também podemos combinar diferentes passos em um mesmo algoritmo, como a detecção de contornos e a identificação de componentes.

Além disso, não há necessidade de processar a imagem inteira. De posse da leitura de profundidade obtida pelo sensor time of flight, podemos ajustar uma janela de tamanho adequado antes de iniciar o processamento da imagem. Por fim, podemos considerar o uso de hardware mais potente para a realização desta tarefa.

Ainda assim, os resultados são promissores. Após o desenvolvimento feito até essa etapa do trabalho é possível afirmar que é possível realizar a colheita de frutos cítricos ou similares de maneira rápida e comparável com a velocidade de um ser humano. Uma análise econômica comparativa mais concreta ainda é necessária para determinar se a colheita robótica de fato é viável, e para isso serão necessários testes do desempenho em luminosidades distintas e em situações mais próximas a de uma fazenda real, além de

um contato mais próximo com agricultores para que não se convirja para uma solução destoante da necessidade real dos pomares.

9 PRÓXIMOS PASSOS

Até o momento da elaboração deste trabalho já é possível elencar a necessidade da realização de mais ensaios em condições de testes mais próximas de uma colheita real, contando com todas as possíveis dificuldades encontradas em uma situação real, tais como presença de galhos e folhas bloqueando parte da área de atuação dos sensores, levantamento da acurácia do algoritmo implementado e funcionamento do sistema atual de reconhecimento em luminosidades diferentes, e levantamento do desempenho em situação noturna com iluminação artificial.

Do ponto de vista de estratégia de colheita, também propomos a construção dos demais protótipos citados na seção 6.1.1.2 e a comparação das velocidades de colheita, custo total de construção do protótipo e de facilidade de construção de montagem e fabricação de cada um dos protótipos para definir a melhor estratégia de colheita.

É importante também realizar um estudo específico de cada um dos gargalos no desempenho do efetuator, que neste caso estão relacionados principalmente aos sensores adotados e com o sistema de visão computacional. Ainda há bastante folga no orçamento proposto nos requisitos para que mais recursos sejam alocados para sensores de mais qualidade, além da otimização do projeto mecânico.

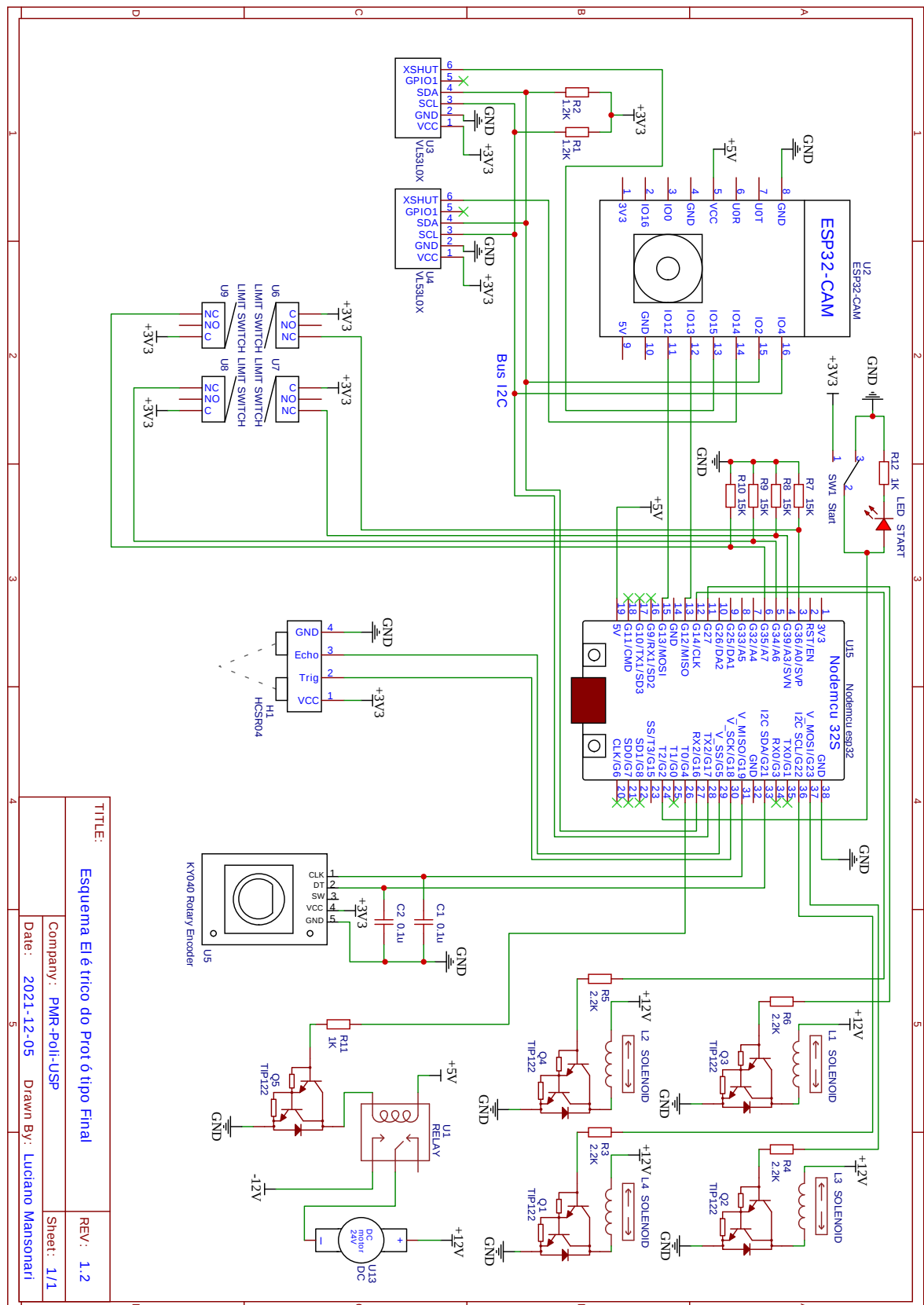
Do ponto de vista de construção da estrutura, os próximos passos seriam voltados principalmente para tornar a montagem de todos os componentes elétricos mais compacta e com uma maior robustez contra dificuldades presentes no meio agrícola como intemperismo, sujidades, choques mecânicos contra galhos e troncos e vibrações causadas pela movimentação. Dentre as possíveis soluções elencamos o projeto mais aprimorado de um chicote elétrico para o efetuator, que conte com conectores com trava e isolamento apropriado contra as sujidades e intemperismo. Além do ponto de vista elétrico também deverá ser feito um estudo focado em escolher o melhor material para compor a estrutura que realiza o avanço e quantos agrupamentos de efetutores de colheita ela suportaria.

Como não temos posse dos dados de desempenho da operação deste efetuator em

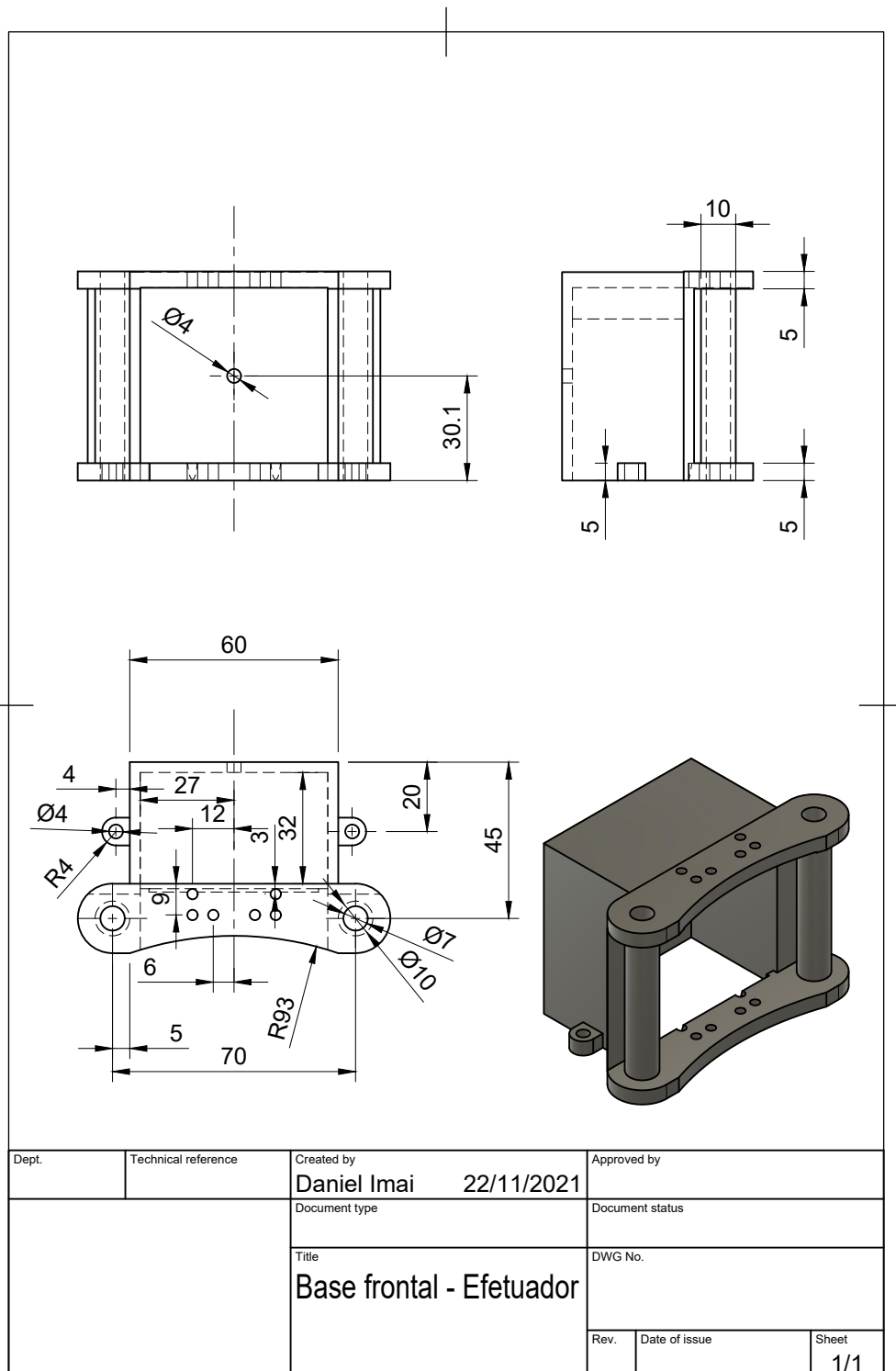
situações mais próximas as de uma fazenda, pensando em termos de operação com obstáculos ao fruto ou então de luminosidade, já elenca-se a possibilidade de se acoplar fontes luminosas ao protótipo para permitir a colheita em períodos noturnos, e de uma saída de ar comprimido em frente à região de atuação do protótipo para remover folhas que possam estar tampando a leitura dos sensores de visão.

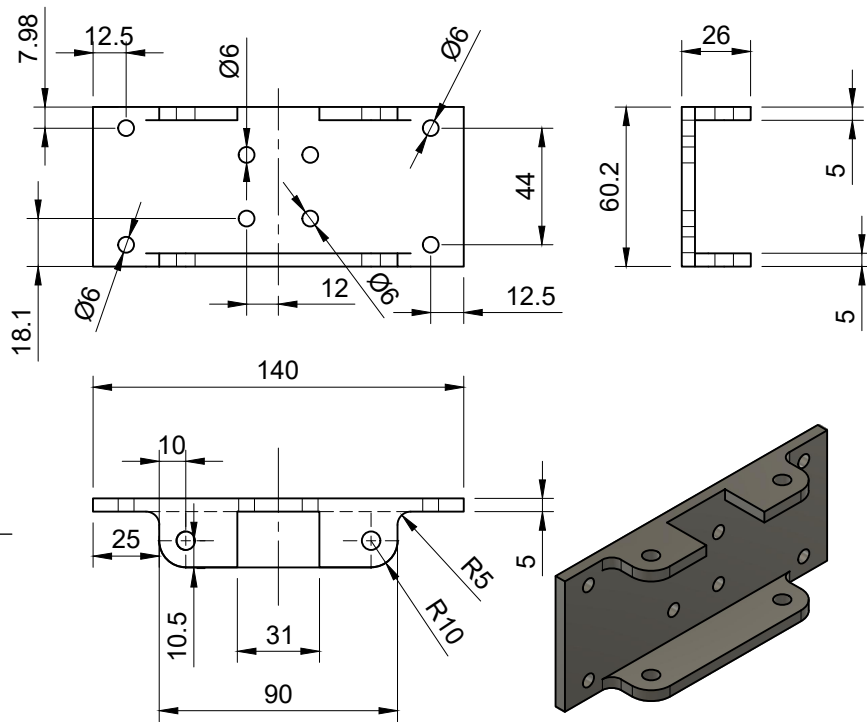
O efetuador até esse momento não apresenta uma solução definitiva para fazer o recolhimentos dos frutos colhidos para serem encaminhados para algum reservatório após a colheita, é reconhecido pelo grupo que essa nova estrutura deverá ser compacta, podendo até exigindo mais um grau de liberdade de movimentação do efetuador a fim de evitar choques mecânicos dessa nova estrutura com demais frutos, galhos e flores.

Outra alteração de projeto que é proposta para melhorar o efetuador é a de trocar os roletes feitos em impressão 3d com gotas de silicone na superfície para aumentar o atrito para roletes feitos de alguma material emborrachado, a fim de reduzir danos causados nos frutos citados na seção 7, além de facilitar a fabricação destes componentes.

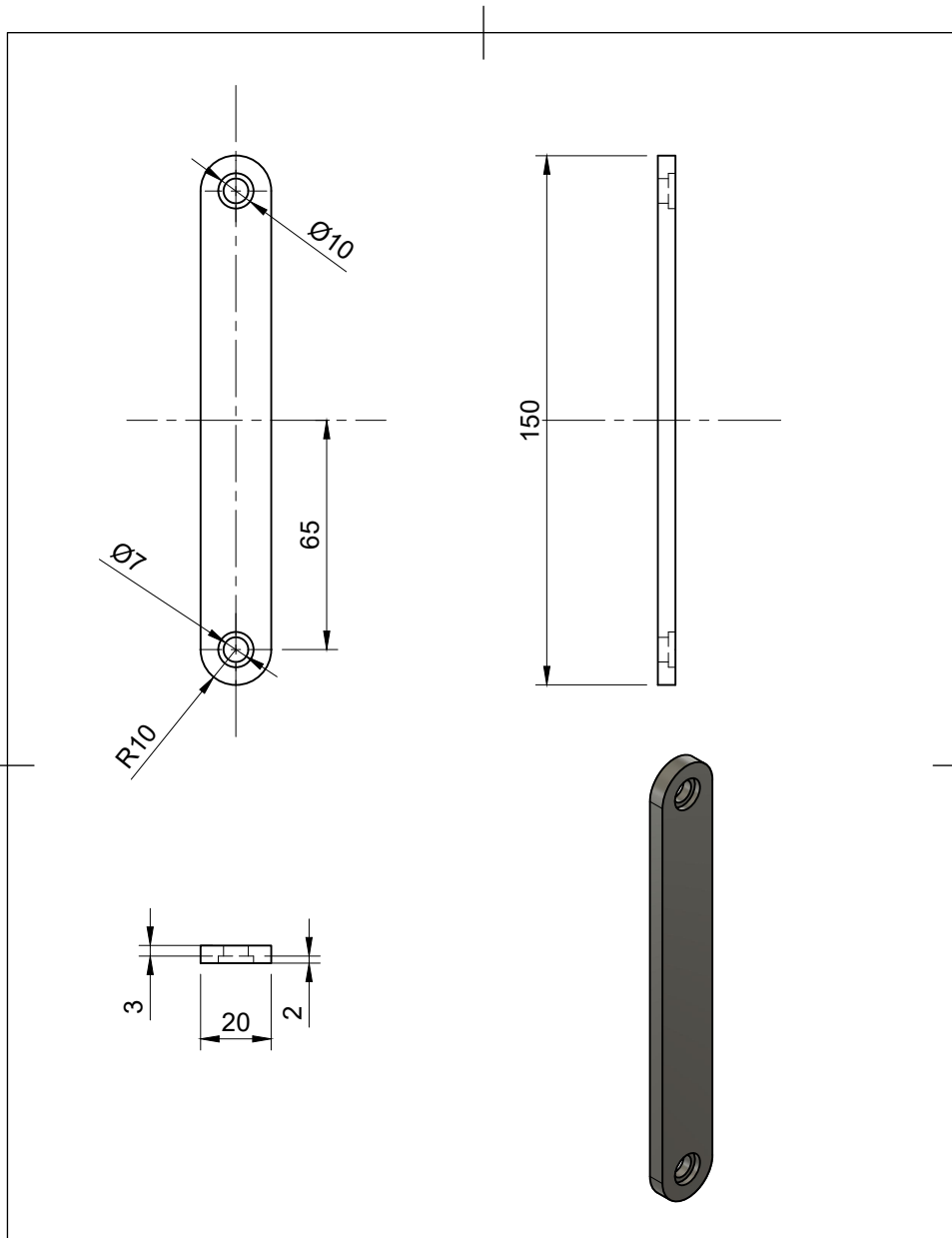


APÊNDICE B – DESENHOS DE FABRICAÇÃO DAS PEÇAS PRINCIPAIS

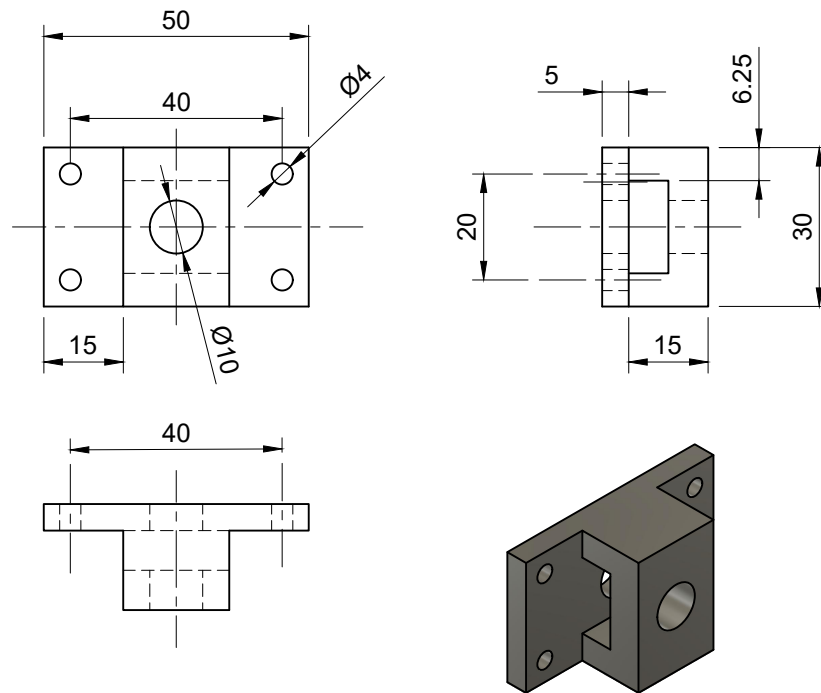




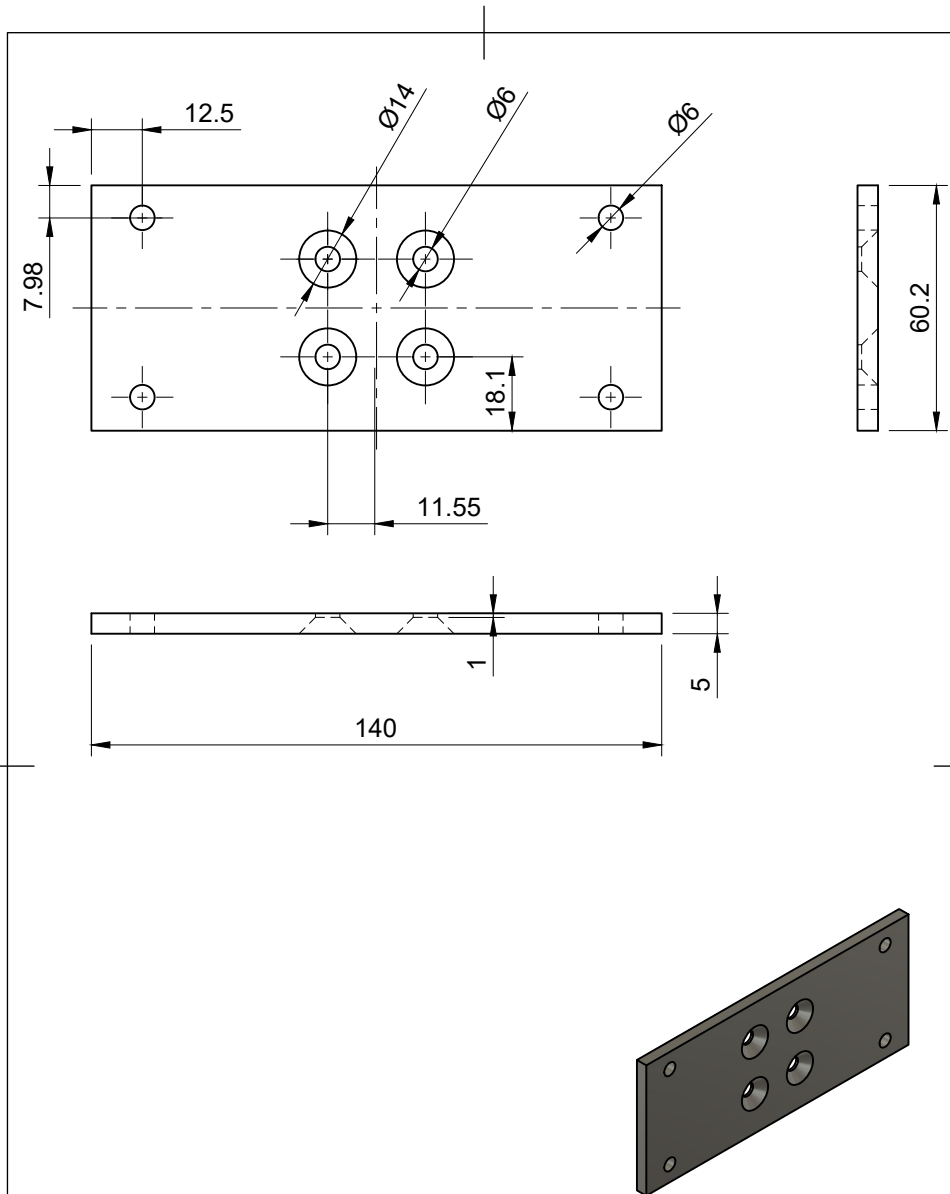
Dept.	Technical reference	Created by Daniel Imai 22/11/2021	Approved by		
		Document type	Document status		
		Title Base geral - Efetuador	DWG No.		
			Rev.	Date of issue	Sheet 1/1



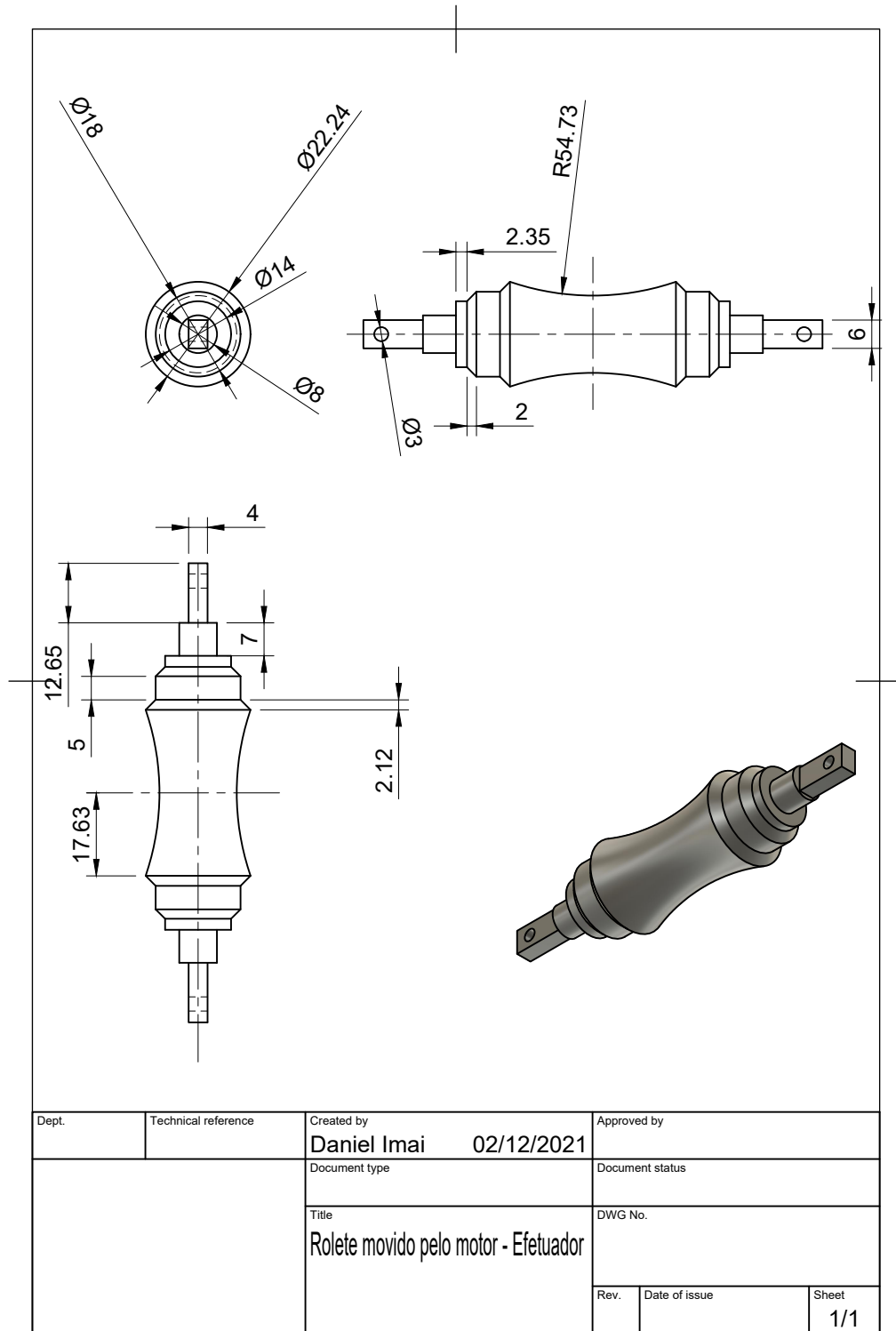
Dept.	Technical reference	Created by Daniel Imai 22/11/2021	Approved by		
		Document type	Document status		
		Title Braço - Efetuador	DWG No.		
			Rev.	Date of issue	Sheet 1/1

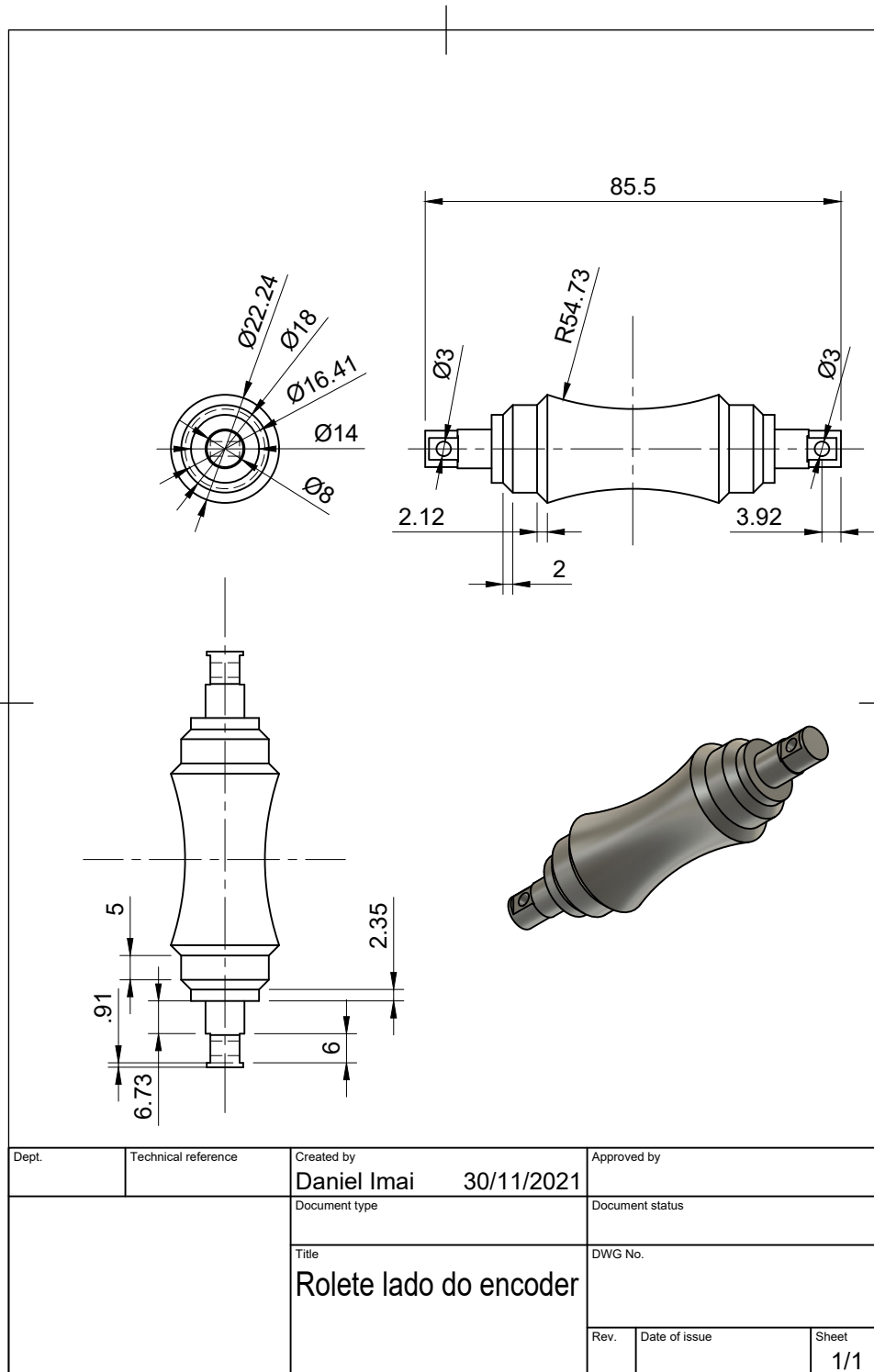


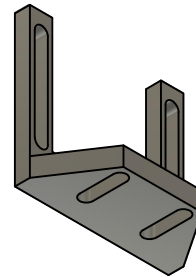
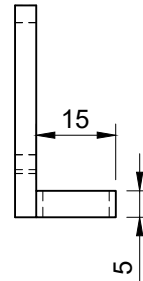
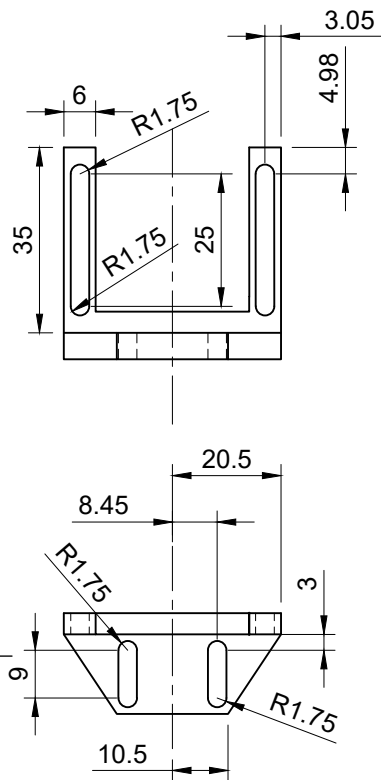
Dept.	Technical reference	Created by Daniel Imai 30/11/2021	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Ponteira atuador avanço v3	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 1/1



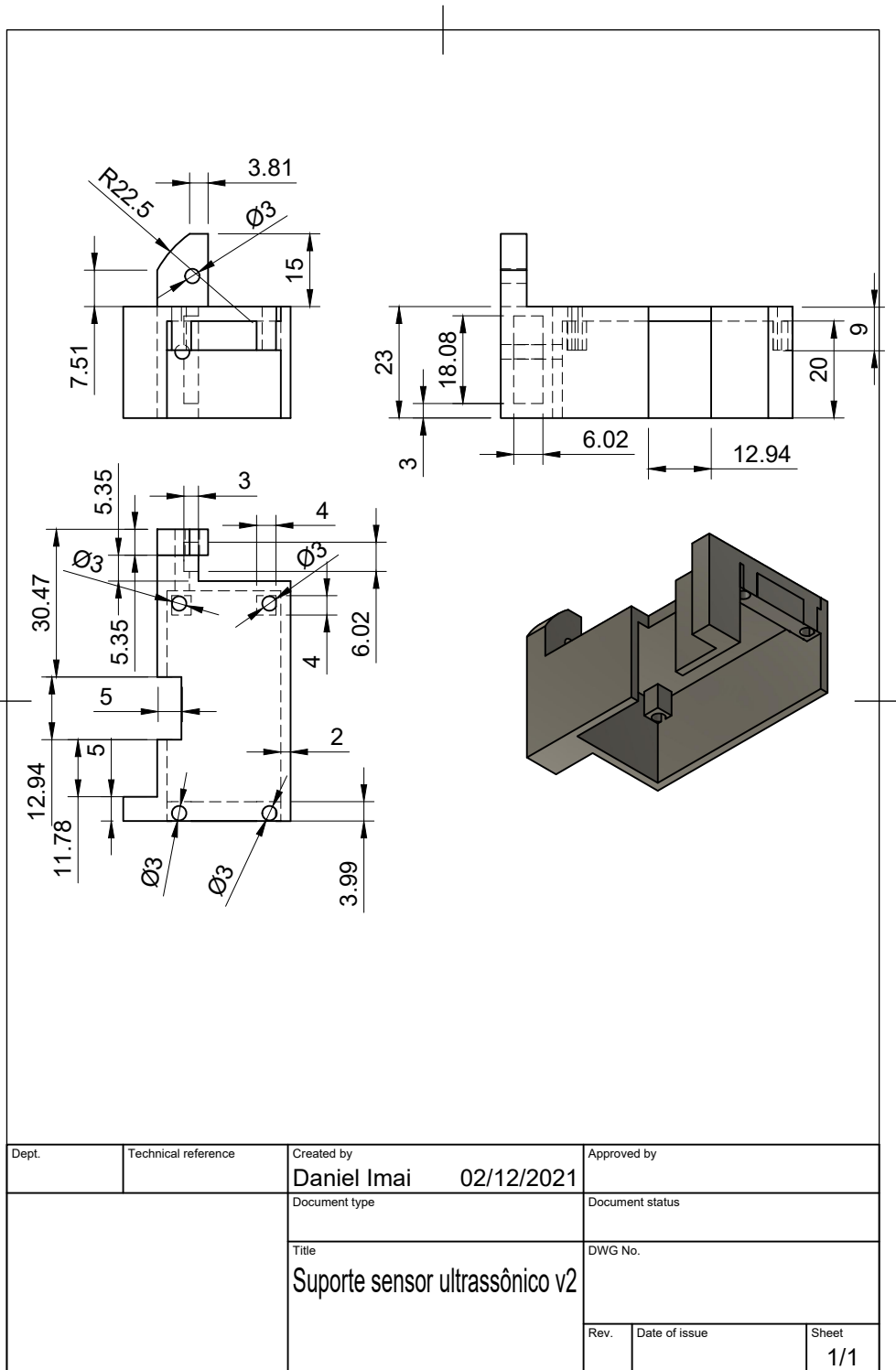
Dept.	Technical reference	Created by Daniel Imai 22/11/2021	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Reforço base geral - Efetuador	DWG No.	
			Rev.	Date of issue

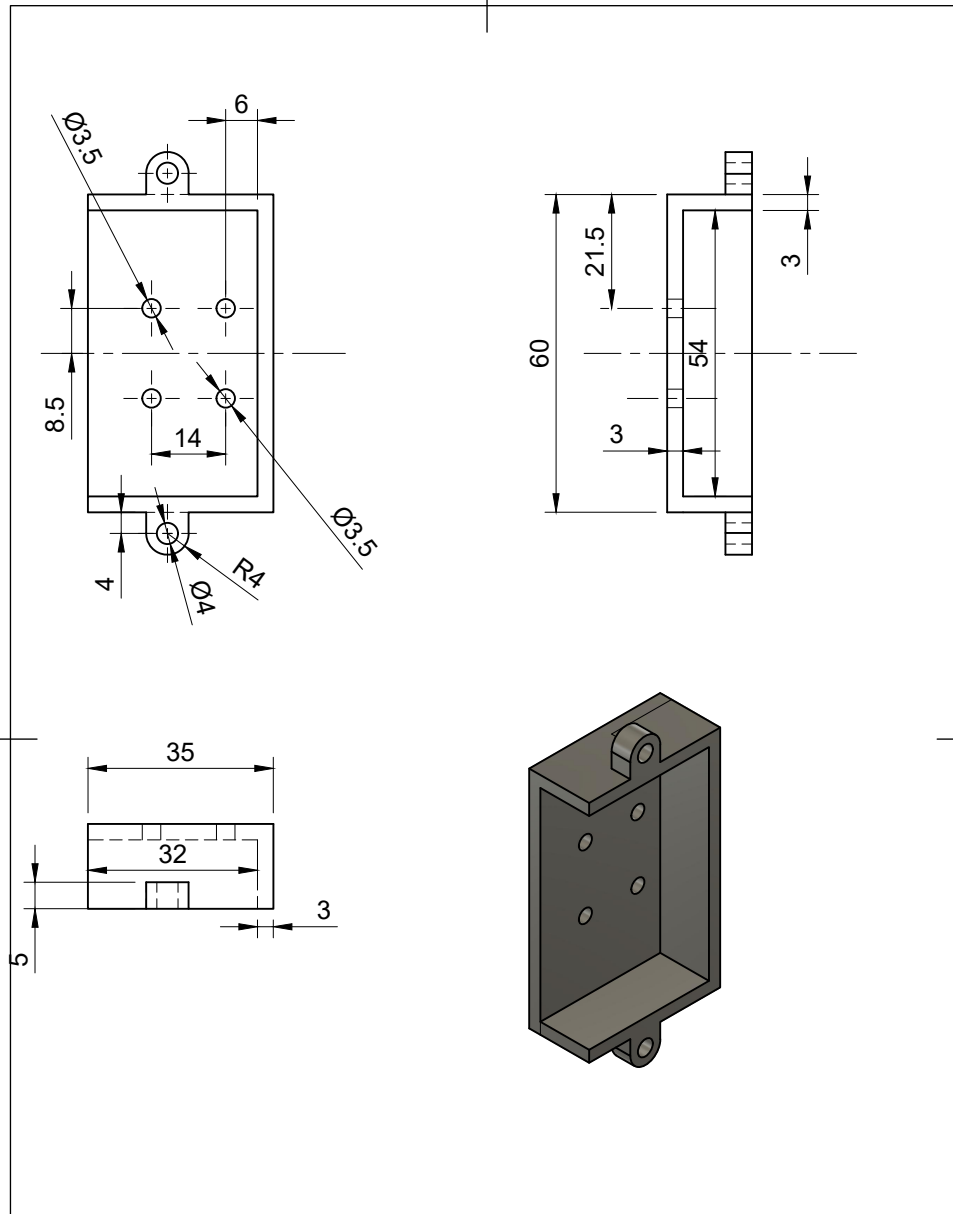






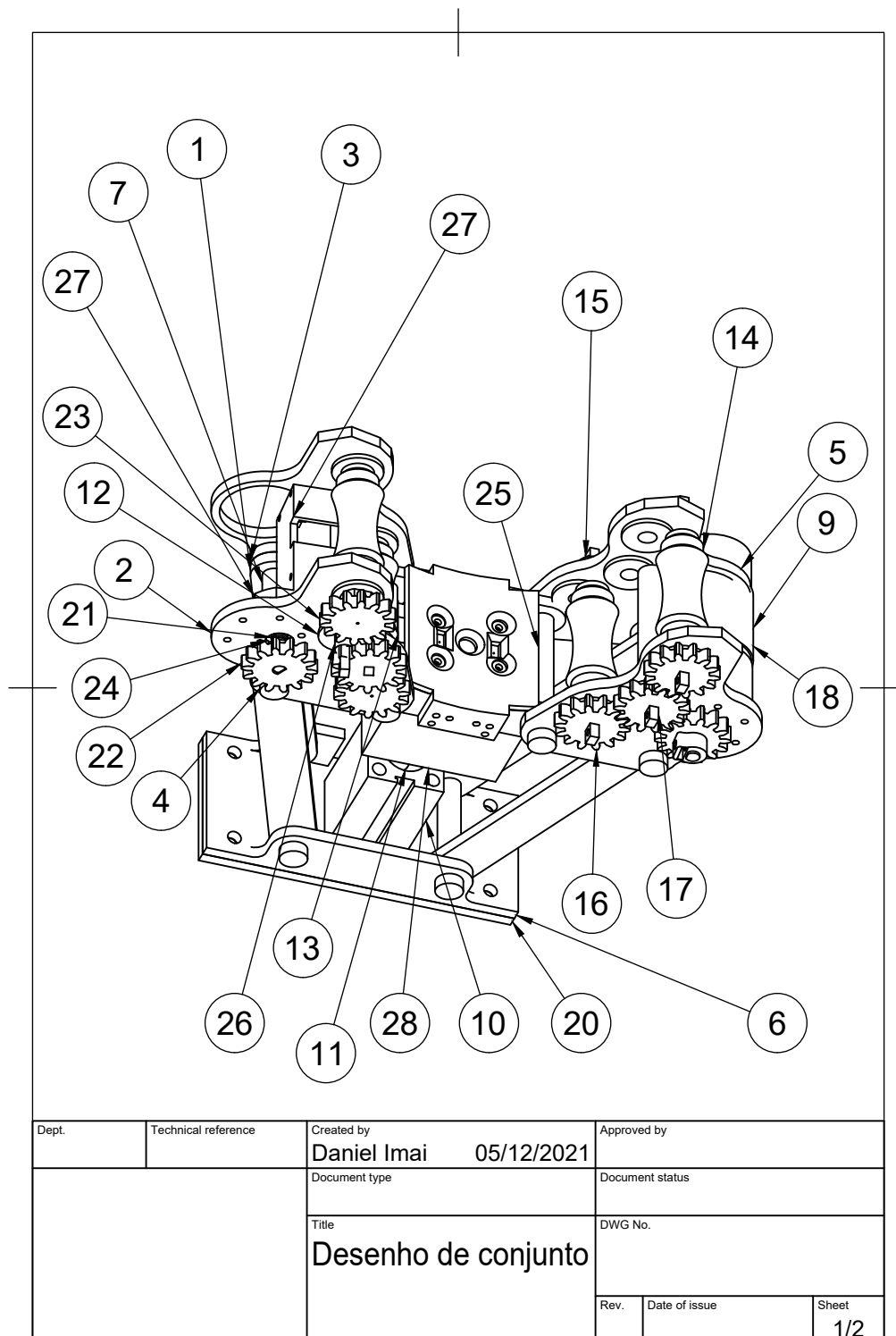
Dept.	Technical reference	Created by Daniel Imai 30/11/2021	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Suporte shield ESP32 CAM	DWG No.	
			Rev.	Date of issue





Dept.	Technical reference	Created by Daniel Imai 22/11/2021	Approved by		
		Document type	Document status		
		Title Tampa da base frontal - Efetuador	DWG No.		
			Rev.	Date of issue	Sheet 1/1

APÊNDICE C – DESENHO DE CONJUNTO DO EFETUADOR FINAL



Parts List		
Item	Qty	Part Number
1	4	Braço
2	2	Braço da garra debaixo motor - Efetuador
3	4	Espaçador 5mm
4	6	Parafuso 1/4 3"
5	2	Braço da garra de cima
6	1	Base geral - Efetuador
7	4	Espaçador 44.2mm
9	1	Motor dc
10	1	Carcaça pistão
11	1	Embolo pistao
12	12	Rolamento 608
13	2	Rolete lado encoder - Efetuador
14	2	Rolete lado motor - Efetuador
15	3	Espaçador engrenagem
16	4	Engrenagem
17	1	Rolete central do lado motor - Efetuador
18	1	Engrenagem motor
20	1	Reforço da base geral - Efetuador
21	1	KY-040 Rotary Encoder
22	1	Engrenagem encoder
23	2	Engrenagem rotor movido
24	1	Suporte do encoder v2 - Efetuador
25	1	Placa de sensores
26	1	Rolete central encoder v2 - Efetuador
27	1	Suporte sensor ultrassônico v2 - Efetuador
28	1	Base sensores v3 - Efetuador
29	1	Tampa da base frontal - Efetuador

Dept.	Technical reference	Created by Daniel Imai 05/12/2021	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Desenho de conjunto	DWG No.	
		Rev.	Date of issue	Sheet 2/2

APÊNDICE D – LISTA DE MATERIAIS

Planilha de materiais do protótipo final			
Categoria	Nome do Item	Preço	
Pneumática	2x Válvula 5/3 vias duplo solenóide 24V	R\$	400,00
Mecânica	Compensado de madeira 18mm p/ estrutura - 2m ²	R\$	260,00
Pneumática	Cilindro atuador 25x300mm	R\$	250,00
Eletrônica	Motor DC 24V com redução	R\$	138,00
Pneumática	Conexões pneumáticas diversas	R\$	100,00
Pneumática	Cilindro atuador 10x25mm	R\$	90,00
Eletrônica	Fonte ATX 200W	R\$	90,00
Eletrônica	2x Módulo sensor V15310x	R\$	87,80
Eletrônica	Módulo ESP-CAM + programador	R\$	75,00
Mecânica	Filamento plástico PLA para impressão	R\$	60,00
Eletrônica	Módulo ESP32s 38p, modelo U	R\$	60,00
Mecânica	8x Cantoneira 80x80	R\$	55,00
Mecânica	Parafusos, porcas e arruelas diversos	R\$	40,00
Mecânica	2x Corrediças de gaveta	R\$	35,00
Mecânica	20x Rolamento 608	R\$	31,23
Eletrônica	4x Reed Switch Encapsulado	R\$	30,40
Eletrônica	Módulo camera OV2640 75mm 66º	R\$	30,00
Eletrônica	20mts fio de cobre revestido 24awg	R\$	30,00
Eletrônica	Solda para eletrônicos	R\$	16,20
Eletrônica	Módulo encoder KY040	R\$	16,00
Pneumática	Mangueira poliuretano de 8mm x 3 metros	R\$	15,00
Eletrônica	Módulo ultrassom HC-SR04	R\$	15,00
Eletrônica	5x TIP122	R\$	11,50
Pneumática	Mangueira poliuretano de 4mm x 3 metros	R\$	10,00
Eletrônica	Placa perfurada 10x10cm	R\$	10,00
Eletrônica	Chave 3 polos	R\$	7,00
Eletrônica	2x Barra de pinos fêmea	R\$	6,00
Mecânica	Tubo de Silicone	R\$	5,80
Eletrônica	4x Resistor 2k2	R\$	4,00
Eletrônica	4x Resistor 15k	R\$	4,00
Eletrônica	Relé 5V	R\$	3,00
Eletrônica	2x Botão com trava	R\$	2,60
Eletrônica	2x Resistor 1k	R\$	2,00
Eletrônica	LED Vermelho	R\$	0,25
Eletrônica	Capacitor Cerâmico 0,1uF	R\$	0,10
TOTAL		R\$	1.990,88

REFERÊNCIAS

- 1 CEPEA-ESALQ-USP. *PIB do agronegócio brasileiro*. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 14/10/2020. Citado na página 1.
- 2 IBGE. *Censo Agro 2017*. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/>. Acesso em: 14/10/2020. Citado 3 vezes nas páginas 1, 2 e 4.
- 3 CNA Brasil. *Balança Comercial do Agronegócio Brasileiro 2020*. 2021. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acesso em: 14/10/2020. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 2.
- 4 FUNDECITRUS. *Reestimativa da Safra de laranja 20/21*. Disponível em: https://www.fundecitrus.com.br/pdf/pes_relatorios/0920_Reestimativa_da_Safra_de_Laranja.pdf. Acesso em: 14/10/2020. Citado 3 vezes nas páginas 1, 2 e 3.
- 5 FUNDECITRUS. *Cinturão citrícola de SP e MG produzirá 38.889 milhões de caixas de laranja na safra 2019/2020*. Disponível em: <https://www.fundecitrus.com.br/comunicacao/noticias/integra/cinturao-citricola-de-sp-e-mg-produzira-38889-milhoes-de-caixas-de-laranja-na-safra-201920/797>. Acesso em: 15/10/2020. Citado na página 2.
- 6 CITRUSBR. *Retrato Citricultura Brasileira*. Disponível em: https://citrusbr.com/wp-content/uploads/2020/10/Retrato_Citricultura_Brasileira_MarcosFava.pdf. Acesso em: 15/10/2020. Citado 3 vezes nas páginas 2, 3 e 23.
- 7 Hortifruti/CEPEA. *Análise dos custos de produção*. 2020. 18-20 p. Disponível em: <https://www.hfbrasil.org.br/br/revista/edicao-de-maio-oportunidades-ao-setor-na-quarentena-especial-citros.aspx>. Acesso em: 26/11/2020. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 23.
- 8 ARAUJO, A. A. de; OKAWA, C. M. P. *Diagnóstico dos Riscos Ambientais em uma Empresa de Cultivo de Laranja*. Disponível em: <https://docplayer.com.br/59752301-Diagnostico-dos-riscos-ambientais-em-uma-empresa-de-cultivo-de-laranja.html>. Acesso em: 15/10/2020. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 4.
- 9 CAMPOS, R. A. de. *Importância do Gerenciamento Humano na colheita de Citrus*. Disponível em: <http://www.gtacc.com.br/pdf/irrigation/214.pdf>. Acesso em: 15/10/2020. Citado na página 5.
- 10 LUMASP. *Facilitadora FC-5500*. Disponível em: <http://www.lumasp.com.br/Site/Facilitadora.html>. Acesso em: 15/10/2020. Citado na página 6.
- 11 SCHULTER. *Facilitadora*. Disponível em: <https://www.schulter.com.br/home-personal/facilitadora/>. Acesso em: 15/10/2020. Citado na página 6.

- 12 Lexicar brasil. *JACTO*. Disponível em: <https://www.lexicarbrasil.com.br/jacto/>. Acesso em: 15/10/2020. Citado na página 7.
- 13 MOSELEY LISA A. HOUSE, F. R. K. R. *Adopting Mechanical Harvesting for Sweet Oranges Trees in Florida: Addressing Grower Concerns on Long-Term Impacts*. <https://www.ifama.org/resources/Documents/v15i2/Moseley-House-Roka.pdf>. Acesso em: 15/10/2020. Citado na página 8.
- 14 WOUTER, C. et al. *Harvesting Robots for High-Value Crops: State-of-the-Art Review and Challenges Ahead — Request PDF*. 2014. https://www.researchgate.net/publication/263858492_Harvesting_Robots_for_High-Value_Crops_State-of-the-Art_Review_and_Challenges_Ahead. Acesso em: 12/02/2020. Citado 4 vezes nas páginas 8, 21, 24 e 25.
- 15 Ripe Robotics. Disponível em: <http://riperobotics.com/>. Acesso em: 16/10/2020. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 10.
- 16 FF Robotics. Disponível em: <https://www.ffrobotics.com/>. Acesso em: 16/10/2020. Citado na página 11.
- 17 Abundant Robotics. Disponível em: <https://www.abundantrobotics.com/>. Acesso em: 16/10/2020. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.
- 18 Robotics Plus. Disponível em: <https://www.roboticsplus.co.nz/kiwifruit-picker>. Acesso em: 16/10/2020. Citado na página 12.
- 19 WILLIAMS, H. A. et al. *Robotic kiwifruit harvesting using machine vision, convolutional neural networks, and robotic arms*. 2019. https://www.researchgate.net/publication/332789260_Robotic_kiwifruit_harvesting_using_machine_vision_convolutional_neural_networks_and_robotic_arms. Acesso em: 23/11/2020. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 16.
- 20 Tortuga Agtech. Disponível em: <https://www.tortugaagtech.com/>. Acesso em: 16/10/2020. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 28.
- 21 FLOOD, S. *Design of a Robotic Citrus Harvesting end effector and Force Control Model Using Physical Properties and Harvesting Motion Tests*. 2006. http://etd.fcla.edu/UF/UFE0017572/flood_s.pdf. Acesso em: 23/11/2020. Citado na página 14.
- 22 WANG, Y. et al. *End-effector with a bite mode for harvesting citrus fruit in random stalk orientation environment*. 2019. https://www.researchgate.net/publication/330803087_End-effector_with_a_bite_mode_for_harvesting_citrus_fruit_in_random_stalk_orientation_environment. Acesso em: 23/11/2020. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 25.
- 23 ZHANG, B. et al. *State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: A review - ScienceDirect*. 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169920311030>. Acesso em: 23/11/2020. Citado na página 14.
- 24 GONGAL, A. et al. *Sensors and systems for fruit detection and localization: A review*. 2015. https://www.researchgate.net/publication/279518267_Sensors_and

systems_for_fruit_detection_and_localization_A_review}. Acesso em: 23/11/2020. Citado 3 vezes nas páginas 15, 45 e 46.

25 TANG, Y. et al. Recognition and localization methods for vision-based fruit picking robots: A review. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, 2020. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2020.00510/full>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 45.

26 ZHUANG, J. et al. *Detection of orchard citrus fruits using a monocular machine vision-based method for automatic fruit picking applications*. 2018. https://www.researchgate.net/publication/327373520_Detection_of_orchard_citrus_fruits_using_a_monocular_machine_vision-based_method_for_automatic_fruit_picking_applications. Acesso em: 23/11/2020. Citado na página 15.

27 YANG, C. et al. *Integrated detection of citrus fruits and branches using a convolutional neural network*. 2020. https://www.researchgate.net/publication/341739206_Integrated_detection_of_citrus_fruits_and_branches_using_a_convolutional_neural_network. Acesso em: 23/11/2020. Citado na página 15.

28 ZHAO, Y. et al. *A review of key techniques of vision-based control for harvesting robot*. 2015. https://www.researchgate.net/publication/305828246_A_review_of_key_techniques_of_vision-based_control_for_harvesting_robot. Acesso em: 23/11/2020. Citado na página 15.

29 MEHTA, S.; BURKS, T. F. *Vision-based control of robotic manipulator for citrus harvesting*. 2014. https://www.researchgate.net/publication/260605301_Vision-based_control_of_robotic_manipulator_for_citrus_harvesting. Acesso em: 23/11/2020. Citado na página 15.

30 MEHTA, S.; MACKUNIS, W.; BURKS, T. F. *Robust visual servo control in the presence of fruit motion for robotic citrus harvesting*. 2016. https://www.researchgate.net/publication/299347150_Robust_visual_servo_control_in_the_presence_of_fruit_motion_for_robotic_citrus_harvesting. Acesso em: 23/11/2020. Citado na página 16.

31 BAETEN, J. et al. *Autonomous Fruit Picking Machine: A Robotic Apple Harvester*. 2007. https://www.researchgate.net/publication/29644243_Autonomous_Fruit_Picking_Machine_A_Robotic_Apple_Harvester. Acesso em: 23/11/2020. Citado na página 16.

32 DE-AN, Z. et al. *Design and control of an apple harvesting robot*. 2011. https://www.researchgate.net/publication/251682239_Design_and_control_of_an_apple_harvesting_robot. Acesso em: 23/11/2020. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 26.

33 PAHL, G. et al. *Projeto na Engenharia*. São Paulo: Blucher, 2016. 49-85 p. Citado na página 18.

34 HARREL, R. *Economic analysis of robotic citrus harvesting in Florida*. 1987. <https://citrusmh.ifas.ufl.edu/pdf/db/HarrellASAE87.pdf>. Acesso em: 12/06/2020. Citado na página 22.

35 Rede Sans. *Saiba quanto de fruta tem numa porção - Redesans*. 2012. <http://redesans.com.br/saiba-quanto-de-fruta-tem-numa-porca/>. Acesso em: 12/06/2020. Citado na página 23.

- 36 FERREIRA, M. D. et al. *HARVESTING FRUITS USING A MOBILE PLATFORM: A CASE STUDY APPLIED TO CITRUS*. 2018. <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci.arttext&pid=S0100-69162018000200293>. Acesso em: 11/28/2020. Citado na página 26.
- 37 EMBRAPA. *Laranja 'Valência Tuxpan CNPMF' - uma opção de laranja tardia para a citricultura*. 2014. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/125069/1/Folder-Tuxpan.pdf>. Acesso em: 12/06/2020. Citado na página 26.
- 38 AZEVÊDO, C. L. L. *Sistemas de Produção de Citros para o Nordeste*. 2003. <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Citros/CitrosNordeste/colheita.htm>. Acesso em: 06/03/2021. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 31.
- 39 ZUJEVS, A.; OSADCUKS, V.; AHRENDT, P. Trends in robotic sensor technologies for fruit harvesting: 2010-2015. *Procedia Computer Science*, Elsevier BV, v. 77, p. 227–233, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.378>. Citado na página 39.
- 40 KAPACH, K. et al. Computer vision for fruit harvesting robots - state of the art and challenges ahead. *International Journal of Computational Vision and Robotics*, v. 3, n. 1/2, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1504/ijcvr.2012.046419>. Citado na página 45.
- 41 AI-THIKER. *ESP32-CAM Product Specification*. 2017. Disponível em: <https://loboris.eu/ESP32/ESP32-CAMProductSpecification.pdf>. Citado na página 47.
- 42 HANNAN, M.; BURKS, T.; BULANON, D. A machine vision algorithm combining adaptive segmentation and shape analysis for orange fruit detection. *Agricultural Engineering International : The CIGR e-journal*, v. 0, 05 2010. Disponível em: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/1281>. Citado 6 vezes nas páginas 47, 48, 50, 52, 53 e 63.
- 43 AN Implementation Of The Connected Component Labelling Algorithm - CodeProject. <https://www.codeproject.com/Articles/825200/An-Implementation-Of-The-Connected-Component-Label>. (Accessed on 12/05/2021). Citado na página 51.
- 44 PLA, F. Recognition of partial circular shapes from segmented contours. *Computer Vision and Image Understanding*, Elsevier BV, v. 63, n. 2, p. 334–343, mar. 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1006/cviu.1996.0023>. Citado na página 52.
- 45 PAVLIDIS, T. *Algorithms for Graphics and Image Processing*. Springer Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 9783642932083. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=xWpCAAQBAJ>. Citado na página 53.
- 46 MANSONARI L.; IMAI, D. *GitHub - Vassoura-1/coletor-automatico-de-laranja*. <https://github.com/Vassoura-1/coletor-automatico-de-laranja>. (Accessed on 12/05/2021). Citado na página 63.