



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

RAFAEL FERNANDES LEMOS

**“ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM ROBÔ VOLTADO PARA EXTRAÇÃO DE
LÁTEX EM CULTIVOS DE SERINGUEIRA”**

VITÓRIA
2017

RAFAEL FERNANDES LEMOS

**“ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM ROBÔ VOLTADO PARA EXTRAÇÃO DE
LÁTEX EM CULTIVOS DE SERINGUEIRA”**

Trabalho de Conclusão de Curso entregue à
Coordenadoria do Curso de Bacharelado em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal do Espírito como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Bento Filho

VITÓRIA

2017

RAFAEL FERNANDES LEMOS

**“ESTUDO DE IMPLEMENTAÇÃO DE UM ROBÔ VOLTADO PARA EXTRAÇÃO DE
LÁTEX EM CULTIVOS DE SERINGUEIRA”**

Trabalho de Conclusão de Curso entregue à Coordenadoria do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 20/07/2017.

Prof. Dr. Antônio Bento Filho

Orientador

Prof. Me. Rafael Milanezi de Andrade

Universidade Federal do Espírito Santo

Prof.^a Dra. Cristiane Pescador Tonetto

Universidade Federal do Espírito Santo

VITÓRIA

2017

RESUMO

Esse trabalho apresenta a idealização de um sistema automatizado para extração de látex em cultivos de seringueira, por meio do qual o procedimento de sangria das árvores é realizado sem intervenção humana, sem dependência da luminosidade do ambiente e de forma que uma mesma máquina pode atender diversas árvores.

A abordagem adotada para o desenvolvimento inicial desse sistema também é descrita, consistindo do desenvolvimento de uma parte fundamental do robô que o compõe visando a construção de um protótipo. Na sequência, seguindo essa abordagem, é realizada uma análise geométrica, o projeto e a construção de um conjunto de sensores que faz parte deste protótipo. Esse conjunto foi elaborado visando guiar a ferramenta de corte com a precisão adequada, permitindo que o robô realize a sangria nas árvores.

Palavras-chaves: robô, seringueira, heveicultura, látex.

“In the worldwide city of the future [...] a society of total automation, the need to work is replaced by a nomadic life of creative play, a modern return to Eden.

The ‘homo ludens’ whom man will become once freed from labor will not have to make art, for he can be creative in the practice of his daily life”

(Constant Nieuwenhuys)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Abertura do Painel de Corte. Fonte: http://www.fazendaterranobre.com.br/ ..	16
Figura 2 - Seringal formado. Fonte: http://www.oregional.com.br/	16
Figura 3 - Cortes quanto ao tipo. Da esquerda para a direita: Corte em espiral, corte em meia espiral, corte em “vê” e microcorte. Fonte: (SENAR, 2005).....	17
Figura 4 - Cortes quanto ao comprimento. Da esquerda para a direita: Espiral completa, meia espiral e um quarto de espiral. Fonte: (SENAR, 2005).....	17
Figura 5 - Número de cortes. Da esquerda para a direita: Único corte em meia espiral e dois cortes em meia espiral. Fonte: (SENAR, 2005)	17
Figura 6 - Direção do corte. Da esquerda para a direita: Sangria ascendente, sangria descendente e sangria mista (dois cortes em meia espiral, ascendente e descendente). Fonte: (SENAR, 2005)	17
Figura 7 - Visão microscópica das estruturas contidas na casca da seringueira. Fonte: (CASTRO, P. R. C, 2001). Retirado de (INCAPER, 2013).....	18
Figura 8 - Sangria Noturna. Fonte: http://www.folha.uol.com.br/	20
Figura 9 - Apresentação do “Automatic Rubber Tapping System (ARTS)” a Dato' Sri Douglas Uggah Embas, político da Malásia. Fonte: http://www.lgm.gov.my/	21
Figura 10 - Consumo e produção da borracha natural no Brasil, passado e tendências futuras. Fonte: (IRSG, 2006). Retirado de (IAC, 2015)	22
Figura 11 - Trecho do Sistema Automatizado para Extração de Látex.	24
Figura 12 - Módulo de Deslocamento (A) e Módulo de Fixação (B).....	25
Figura 13 - Módulo de Movimento Vertical "aberto" (A) e "fechado" (B).....	25
Figura 14 - Módulo de Movimento Rotacional "recuado" (A) e "avançado" (B).	26
Figura 15 - Robô se posicionando em frente à árvore.	27
Figura 16 - Procedimento de centralização da árvore: 1 e 2.	28
Figura 17 - Procedimento de centralização da árvore: 2 e 3.	29
Figura 18 - Procedimento de centralização da árvore: 3 e 4.	29
Figura 19 - Procedimento de centralização da árvore: 4 e 5.	30
Figura 20 - Robô executando o procedimento de centralização da árvore.	31
Figura 21 - Posicionamento do MMR em relação ao painel de corte.	32

Figura 22 - Retorno à configuração inicial e continuando o percurso.....	33
Figura 23 - Idealização Inicial do Protótipo, perspectiva 1.	34
Figura 24 - Idealização Inicial do Protótipo, perspectiva 2.	34
Figura 25 - Idealização Inicial do Protótipo, vista lateral.	35
Figura 26 - Idealização Inicial do Protótipo - Carro.	36
Figura 27 - Tronco de eucalipto adquirido.	37
Figura 28 - Painel de corte esculpido.	38
Figura 29 - Detecção da Resistência ao Deslizamento considerando uma deformação angular do elemento elástico.....	39
Figura 30 - Detecção da Resistência ao Deslizamento considerando uma deformação linear do elemento elástico.....	39
Figura 31 - Detecção da Resistência ao Deslizamento considerando uma deformação angular indevida do elemento elástico.	40
Figura 32 - Medições Pontuais de Distância a um Plano de Referência.....	40
Figura 33 - Funcionamento do sensor de confocal de codificação cromática. Fonte: (MICRO-EPSILON, 2017)	41
Figura 34 - Perfilometria 3D de superfície de madeira feita por meio de sensor confocal de codificação cromática. Fonte: (NANOVEA, 2015).....	42
Figura 35 - Medições de Distância a um Plano de Referência por contato físico.....	42
Figura 36 - Sensores de posição linear. Fonte: http://www.directindustry.com/	44
Figura 37 - Potenciômetros deslizantes adquiridos, da esquerda para a direita: B503 50K - Curso Total 10 [mm], A20K - Curso Total 20 [mm], A20K - Curso Total 30 [mm] e A50K - Curso Total 30 [mm].	44
Figura 38 - Design preliminar do apalpador a partir de um potenciômetro deslizante....	46
Figura 39 - Pontas cônicas testadas (dimensões em milímetros).	47
Figura 40 - Pontas esféricas testadas (dimensões em milímetros).	47
Figura 41 - Pontas cônicas obtidas por impressão 3D.	47
Figura 42 - Pontas esféricas obtidas por impressão 3D e apalpador montado.	48
Figura 43 - Ponta utilizando uma bola de gude (dimensões em milímetros).....	48
Figura 44 - Apalpador montado utilizando uma bola de gude.	48

Figura 45 - Efeito da curvatura da árvore na medição da distância até o plano de referência.	50
Figura 46 - Situação limite de contenção do ressalto, descida iminente.	51
Figura 47 - Situação limite de contenção do ressalto, subida iminente.	52
Figura 48 - Cálculo do raio do círculo de detecção de subida.	52
Figura 49 - Faixa de contenção do ressalto.	53
Figura 50 - Cálculo da espessura da faixa de contenção do ressalto.	53
Figura 51 - Faixa de contenção do ressalto resultante de dois pares de apalpadores.	54
Figura 52 - Cálculo da faixa de contenção do ressalto do par de apalpadores.	55
Figura 53 - Corte em andamento.	57
Figura 54 - Posicionamento do ponto de corte.	57
Figura 55 - Faixa de consumo de casca.	58
Figura 56 - Configurações de desalinhamento entre o conjunto de sensores e o painel de corte não detectáveis pelo par.	59
Figura 57 - Procedimento de Alinhamento - Passo 1	59
Figura 58 - Procedimento de Alinhamento - Passos 2 a 5 - Desalinhamento no sentido anti-horário.	60
Figura 59 - Procedimento de Alinhamento - Passos 2 a 5 - Desalinhamento no sentido horário.	61
Figura 60 - Procedimento de Alinhamento - Alinhamento atingido.	61
Figura 61 - Determinação do Ponto de Início de Corte - Passo 1.	62
Figura 62 - Determinação do Ponto de Início de Corte - Passos 2 e 3.	62
Figura 63 - Determinação do Ponto de Início de Corte - Passos 4 a 6.	63
Figura 64 - Determinação do Ponto de Início de Corte - Passos 7 a 9.	63
Figura 65 - Avanço frontal demandado pela curvatura de um tronco cilíndrico.	64
Figura 66 - Curvaturas no tronco utilizado como referência.	65
Figura 67 - Avanço frontal total do apalpador.	66
Figura 68 - Primeira abordagem de promoção do avanço frontal dos apalpadores.	67
Figura 69 - Segunda abordagem de promoção do avanço frontal dos apalpadores.	68
Figura 70 - Segunda abordagem de promoção do avanço frontal dos apalpadores - Superfície uniforme.	68

Figura 71 - Versão planificada do painel de corte.	70
Figura 72 - Modelo de tronco elíptico (dimensões em milímetros).	71
Figura 73 - Modelo Simulink - Raio instantâneo do tronco elíptico.....	72
Figura 74 - Modelo Simulink - Controle de Movimentos.....	72
Figura 75 - Modelo Simulink - Resultados, Forma do Tronco.	73
Figura 76 - Modelo Simulink - Resultados, $VV(\theta)$	73
Figura 77 - Modelo Simulink - Resultados, percurso no tronco planificado.	74
Figura 78 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Medidas principais (dimensões em milímetros).....	77
Figura 79 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Interior dos apalpadores.....	77
Figura 80 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Estrutura interna do par móvel.	78
Figura 81 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Par com movimento relativo.	78
Figura 82 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Apalpador fixo.	79
Figura 83 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Estrutura de apoio principal.....	79
Figura 84 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Montagem dos pares.....	80
Figura 85 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Estrutura traseira.....	80
Figura 86 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Montagem completa.....	81
Figura 87 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Resultado obtido.	81
Figura 88 - Esquemático do circuito de avaliação dos potenciômetros deslizantes. Elaborado por meio do site EasyEDA.com.	90
Figura 89 - Código executado pelo Arduino Mega 2560.	90
Figura 90 - Potenciômetros deslizantes adquiridos, da esquerda para a direita: B503 50K - Curso Total 10 [mm], A20K - Curso Total 20 [mm], A20K - Curso Total 30 [mm] e A50K - Curso Total 30 [mm].	91
Figura 91 - Resposta Analógica do PD B503 50K - Curso Total 10 [mm]	92
Figura 92 - Resposta Analógica do PD A20K - Curso Total 20 [mm].	92
Figura 93 - Resposta Analógica do PD A20K - Curso Total 30 [mm].	93
Figura 94 - Resposta Analógica do PD A50K - Curso Total 30 [mm].	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Incerteza de Precisão Estimada dos Potenciômetros Deslizantes.....	45
Tabela 2 - Resposta Analógica do Potenciômetro Deslizante B503 50K, $x = 5$ [mm]	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IAC	Instituto Agrônômico - Secretaria de Agricultura e Abastecimento - Governo do Estado de São Paulo.
SENAR	Serviço Nacional de Aprendizagem Rural - Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil.
INCAPER	Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural - Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca - Governo do Estado do Espírito Santo.
MD	Módulo de Deslocamento do robô que compõe o sistema automatizado para extração de látex.
MF	Módulo de Fixação do robô que compõe o sistema automatizado para extração de látex.
MMV	Módulo de Movimento Vertical do robô que compõe o sistema automatizado para extração de látex.
MMR	Módulo de Movimento Rotacional do robô que compõe o sistema automatizado para extração de látex.
CC	Cabeçote de corte do Módulo de Movimento Rotacional do robô que compõe o sistema automatizado para extração de látex.

LISTA DE SÍMBOLOS

d_{AP}	Distância vertical entre os apalpadores de um mesmo par.
h_R	Altura do ressalto do painel de corte, em relação à casca virgem.
r_{AP}	Raio da ponta do apalpador esférico.
r_{CDS}	Raio do círculo de detecção de subida do ressalto.
α	Inclinação do painel de corte.
e_{FCR}	Espessura da faixa de contenção do ressalto.
$d_{H,PAR}$	Distância horizontal entre os pares de apalpadores.
$d_{V,PAR}$	Distância vertical entre os pares de apalpadores.
$h_{R,min}$	Altura do ressalto do painel de corte mínima, em relação à casca virgem.
$h_{R,max}$	Altura do ressalto do painel de corte máxima, em relação à casca virgem.
$e_{FCR,min}$	Espessura da faixa de contenção do ressalto mínima.
$e_{FCR,max}$	Espessura da faixa de contenção do ressalto máxima.
$e_{CC,min}$	Espessura da porção de casca removida mínima.
$e_{CC,max}$	Espessura da porção de casca removida máxima.
e_{CC}	Espessura da porção de casca removida.
θ_i	Ângulo inicial entre a linha que conecta o centro dos apalpadores superiores e o plano horizontal.
θ_f	Ângulo final entre a linha que conecta o centro dos apalpadores superiores e o plano horizontal.
R_{ARV}	Raio do tronco considerado.
x_{AP}	Distância entre a posição do apalpador no plano de referência e o ponto do plano de referência que toca a casca.
av_{CC}	Avanço frontal demandado do apalpador para compensar a curvatura da casca e garantir o contato com a mesma.
av_{AR}	Avanço frontal demandado do apalpador para garantir que ele vai encostar na superfície rebaixada do painel de corte.
av_{FC}	Avanço frontal demandado do apalpador para permitir que ele entre em contato com a casca sem que a ferramenta de corte o faça.

av_{TOT}	Avanço frontal total demandado do apalpador.
y_{AP}	Retração do apalpador na situação indicada.
Δh_{AP}	Diferença entre as distâncias até a casca constatadas pelos apalpadores.
av_{EST}	Avanço frontal da estrutura que contém o par de apalpadores.
ϕ	Ângulo entre a planificação da trajetória no tronco e o plano horizontal.
V_{LC}	Velocidade ao longo da trajetória paralela à linha de centro do tronco, sendo a velocidade vertical na versão planificada do painel de corte.
V_H	Velocidade ao longo da trajetória normal à linha de centro do tronco, sendo a velocidade horizontal na versão planificada do painel de corte.
ω_{Rot}	Velocidade do movimento rotacional em relação ao tronco.
$R_{ARV,inst}$	Raio instantâneo do tronco, distância entre o ponto de contato com a casca e o ponto de giro do movimento rotacional.
θ	Posição angular correspondente ao movimento rotacional.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. A Importância do Látex	15
1.2. Procedimento de Sangria.....	15
1.3. Problemas Decorrentes da Sangria Manual.....	19
1.4. Tecnologias em Desenvolvimento	21
1.5. Cenário Atual	21
1.6. Objetivos do Trabalho	22
1.7. Organização do Trabalho.....	23
2. SISTEMA PROPOSTO.....	24
2.1. Componentes.....	24
2.2. Funcionamento	27
3. METODOLOGIA.....	34
3.1. Idealização do Primeiro Protótipo	34
3.2. Abordagem de Desenvolvimento	37
4. ESTRATÉGIA DE DETECÇÃO DO RESSALTO	39
4.1. Detecção da Resistência ao Deslizamento	39
4.2. Medições Pontuais de Distância a um Plano de Referência.....	40
4.3. Processamento de Imagem	43
4.4. Estratégia Adotada.....	43
5. CARACTERIZANDO OS APALPADORES.....	44
5.1. Escolha dos Sensores.....	44
5.2. Ponta do Apalpador.....	46

6. ANÁLISE GEOMÉTRICA.....	50
6.1. Efeito da Curvatura da Árvore	50
6.2. Faixa de Contenção do Ressalto	51
6.3. Posicionamento do Ponto de Corte.....	57
6.4. Procedimento de Alinhamento	58
6.5. Procedimento de Determinação do Ponto de Início de Corte	61
6.6. Avanço Frontal dos Apalpadores	64
6.7. Controle dos Movimentos.....	69
7. PROJETO DO PROTÓTIPO DO CONJUNTO DE SENSORES	75
7.1. Cálculos	75
7.2. Design Obtido	77
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
8.1. Sistema Proposto	82
8.2. Desenvolvimento do Conjunto de Sensores	83
8.3. Sugestões para Trabalhos Futuros	84
9. REFERÊNCIAS	86
APÊNDICE A - AVALIANDO OS POTENCIÔMETROS DESLIZANTES	90

1. INTRODUÇÃO

Nesta seção é feita uma breve discussão a respeito da importância do látex, da atividade associada à sua obtenção e do contexto atual da mesma. Também são descritos os objetivos e a organização deste trabalho.

1.1. A Importância do Látex

A borracha natural é produzida a partir de partículas contidas no látex, um fluido citoplasmático encontrado na natureza nos vasos laticíferos de diversas plantas como o caucho, a maniçoba e a mangabeira (EMBRAPA, 2004) (IAC, 2015).

A borracha sintética é mais resistente ao contato com solventes fortes e menos permeável a gases, além de possuir um custo de fabricação cerca de três vezes menor que a borracha natural. Porém, esta possui uma estrutura mais estável, se desgastando menos com o atrito e sendo mais elástica, não se rompendo com facilidade. Dessa forma, a borracha natural é obrigatoriamente empregada na fabricação de preservativos, luvas cirúrgicas e pneus de avião. Existem no mercado mais de 40 mil produtos constituídos de borracha natural (IAC, 2015).

Atualmente, quase a totalidade do látex utilizado provém do cultivo da seringueira (*Hevea Brasiliensis*), atividade denominada *heveicultura*. O látex é extraído dos vasos laticíferos da árvore por meio de cortes sucessivos de finas fatias de casca, processo denominado de sangria (IAC, 2015).

1.2. Procedimento de Sangria

Atualmente, em geral, o processo de sangria é realizado manualmente pelo *sangrador*, com o auxílio de uma ferramenta denominada *faca de sangria*. Quando as árvores atendem alguns requisitos mínimos de tamanho, um trabalhador define e marca a localização do *painel de corte*, sendo esta a região onde os cortes serão efetuados (INCAPER, 2013). O procedimento de criação, ou “abertura”, de um painel de corte pode ser visto na Figura 1.



Figura 1 - Abertura do Painel de Corte. **Fonte:** <http://www.fazendaterranobre.com.br/>

Assim, a sangria é efetuada diversas vezes em cada planta, ao se remover uma fina porção de casca do limite inferior do painel de corte, respeitando um intervalo de dias pré-estabelecido (SENAR, 2005). Após cada procedimento, o látex escoar para o exterior, escorrendo pelo painel de corte e sendo armazenado em canecas, como ilustrado na Figura 2. Posteriormente, a produção é recolhida e processada para a obtenção da borracha natural.



Figura 2 - Seringal formado. **Fonte:** <http://www.oregional.com.br/>

O procedimento de sangria é um dos fatores de maior relevância na heveicultura, tendo grande impacto na produtividade e na vida útil do seringal, além de responder por cerca de 60% do custo total da borracha natural produzida (GONÇALVES, et al., 2000).

Anos de pesquisa forneceram diversos parâmetros ideais para a realização da sangria nas plantas, a fim de se obter uma produção elevada aliada à manutenção da saúde do seringal. Os principais fatores a serem considerados são:

- **Configuração do corte:** Existem diversas configurações possíveis corte, que englobam o tipo (corte em espiral, em meia espiral, em “vê” e microcorte, Figura 3), o comprimento do corte (espiral completa, meia espiral e um quarto de espiral, Figura 4), número de cortes em uma mesma árvore (Figura 5) e a direção do corte (sangria ascendente, descendente e mista, Figura 6) (SENAR, 2005).

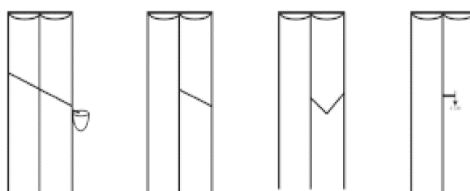


Figura 3 - Cortes quanto ao tipo. Da esquerda para a direita: Corte em espiral, corte em meia espiral, corte em “vê” e microcorte. **Fonte:** (SENAR, 2005)

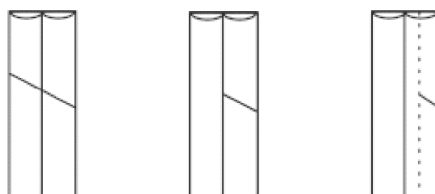


Figura 4 - Cortes quanto ao comprimento. Da esquerda para a direita: Espiral completa, meia espiral e um quarto de espiral. **Fonte:** (SENAR, 2005)

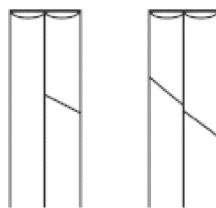


Figura 5 - Número de cortes. Da esquerda para a direita: Único corte em meia espiral e dois cortes em meia espiral. **Fonte:** (SENAR, 2005)

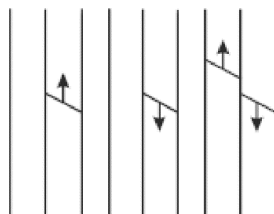


Figura 6 - Direção do corte. Da esquerda para a direita: Sangria ascendente, sangria descendente e sangria mista (dois cortes em meia espiral, ascendente e descendente). **Fonte:** (SENAR, 2005)

Cada configuração de corte tem sua finalidade, no entanto, a sangria em meia espiral descendente é a mais utilizada. Isso se deve ao fato de que esse sistema divide a circunferência da árvore em dois painéis de corte de mesmo tamanho, o que permite a obtenção de uma boa produção sem comprometer a vida útil da árvore, além ser executado com mais facilidade (SENAR, 2005).

- **Frequência de sangria:** É determinada ao considerar o intervalo em dias entre duas sangrias em uma mesma árvore. Frequências altas aumentam o consumo de casca, diminuindo a vida útil da planta, assim como a necessidade de mão de obra. No entanto, frequências baixas diminuem a produção e podem demandar a aplicação de produtos químicos. O intervalo de sangria mais utilizado atualmente é o de quatro dias (SENAR, 2005).
- **Profundidade do corte:** A profundidade do corte deve variar de 1,2 a 1,5 mm do tecido cambial da árvore (INCAPER, 2013), podendo ser observado na Figura 8, que consiste de uma representação das estruturas contidas na casca. Dessa forma, a profundidade do corte a partir da casca virgem varia de acordo com a espessura das camadas externas do caule.

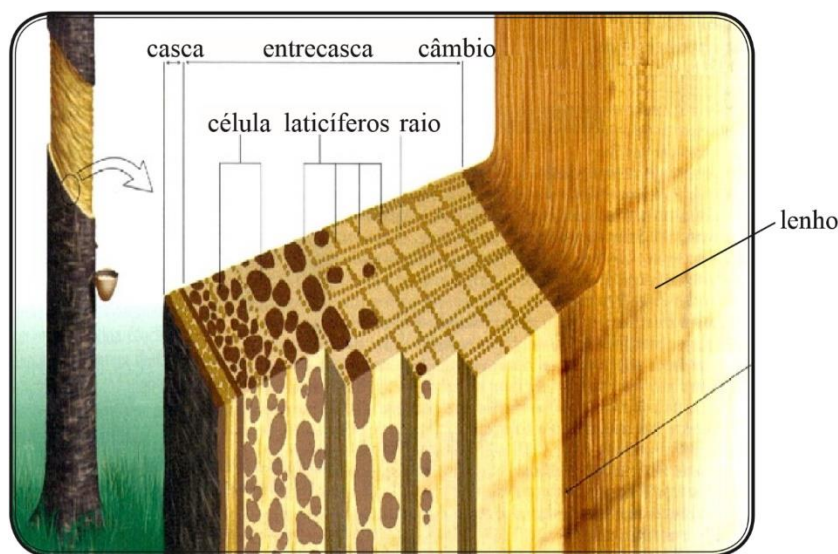


Figura 7 - Visão microscópica das estruturas contidas na casca da seringueira. **Fonte:** (CASTRO, P. R. C, 2001). Retirado de (INCAPER, 2013).

Uma profundidade do corte incorreta pode danificar o tecido cambial, dificultando a regeneração da casca (SENAR, 2005) e comprometendo sangrias futuras.

- **Consumo de casca:** A espessura da seção de casca removida deve ser suficiente para promover o escoamento do látex, porém, o consumo de casca excessivo da árvore implica em desperdício da capacidade produtiva das plantas. É recomendado que a porção de casca retirada na sangria possua aproximadamente 1,2mm de espessura (INCAPER, 2013).
- **Inclinação do corte:** A correta inclinação do corte deve permitir o escoamento pelo painel e evitar a coagulação antecipada do látex, o que poderia restringir o fluxo e comprometer a produtividade da sangria. Uma inclinação de 35° a 37° é recomendada na execução da sangria descendente (SENAR, 2005).
- **Horário da sangria:** Os horários ideais para a realização da sangria são aqueles onde a temperatura é mais baixa e a umidade relativa do ar é mais elevada, o que resulta em uma maior pressão no interior dos vasos laticíferos e favorece a produção. Normalmente essas condições são encontradas no período da noite ou antes do nascer do sol (INCAPER, 2013).

1.3. Problemas Decorrentes da Sangria Manual

Se a sangria for realizada de forma inadequada, a princípio os danos podem parecer pequenos, mas estes podem comprometer a saúde das plantas e reduzir a vida útil das mesmas, gerando uma perda financeira enorme ao produtor. Como dito pelo engenheiro agrônomo Carlos Alberto De Luca, diretor técnico da CATI (Coordenadoria de Assistência Técnica Integral) Regional Votuporanga e presidente da Comissão Técnica de Seringueira da Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo: *“Seringais bem trabalhados podem atingir mais de 40 anos de exploração, essa vida útil pode ser drasticamente reduzida para seis ou sete anos em casos extremos de desconhecimento das técnicas de sangria”* (ASSOVALE, 2013).

Existem diversas dificuldades associadas à sangria manual, que é realizada atualmente. As principais seguem abaixo:

- A qualidade da sangria obtida depende da experiência e habilidade manual do sangrador em questão, assim como de seu comprometimento em seguir os parâmetros de corte definidos.

- Em locais onde existe escassez de mão-de-obra qualificada, existe a tendência de adoção de frequências de sangria reduzidas (QUARTEROLI, et al., 2007), o que pode comprometer o volume de produção obtido (SENAR, 2005).



Figura 8 - Sangria Noturna. **Fonte:** <http://www.folha.uol.com.br/>

- Normalmente, o sangrador inicia o trabalho no seringal antes do nascer do sol e com o auxílio de lanternas, situação ilustrada na Figura 8, realizando a sangria em um grande número de árvores em sequência (SENAR, 2005) (HEVEA-TEC, 2012). Devido às condições de trabalho, o controle cuidadoso dos parâmetros do corte em cada planta é dificultado.
- Como o procedimento é realizado manualmente, em geral a localização do painel de corte fica restrita às posições que o sangrador pode alcançar com facilidade (SENAR, 2005). Dessa forma, o aproveitamento máximo da área superficial do caule é inviabilizado devido à dificuldade de se posicionar o painel de corte em posições mais elevadas da planta.

1.4. Tecnologias em Desenvolvimento

Nos últimos anos, uma abordagem inovadora vem sendo desenvolvida na Malásia pela MRB (*Malaysian Rubber Board* - Órgão estatal responsável pelo gerenciamento da indústria da borracha na Malásia). Se trata do “*Automatic Rubber Tapping System (ARTS)*” que consiste basicamente de robôs que são fixados em cada árvore, utilizam painéis solares em conjunto com baterias como fonte de energia e realizam a sangria em um horário pré-programado, sem intervenção humana (MRB, 2011).



Figura 9 - Apresentação do “Automatic Rubber Tapping System (ARTS)” a Dato' Sri Douglas Uggah Embas, político da Malásia. **Fonte:** <http://www.lgm.gov.my/>

Se trata de um enorme avanço tecnológico. Porém, considerando que atualmente um seringueiro pode ser responsável pela sangria de 3.000 a 4.000 árvores (HEVEA-TEC, 2012), um grande número de máquinas seria necessário para realizar o trabalho correspondente a uma única pessoa. Assim, o custo de implantação e manutenção de um sistema que utiliza essa abordagem poderia comprometer a viabilidade do mesmo.

1.5. Cenário Atual

A possibilidade de automação do procedimento de sangria ganha especial destaque ao se considerar que, apesar do gênero *Hevea* ter se originado no Brasil, o país importa a maior parte da borracha natural consumida. Esse fato tende a se agravar nos próximos anos (IAC, 2015), como ilustrado na Figura 10.

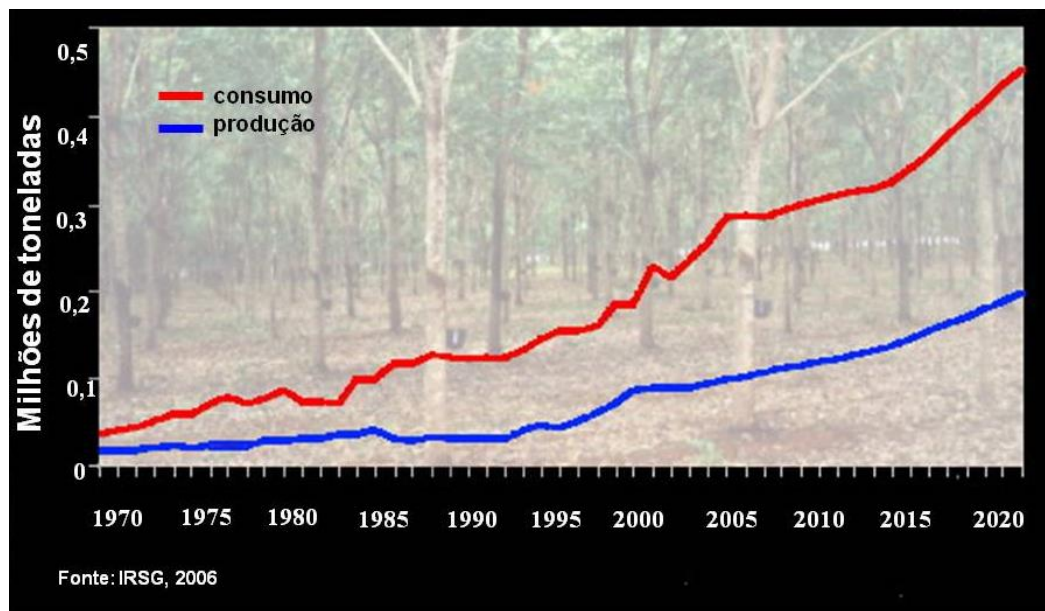


Figura 10 - Consumo e produção da borracha natural no Brasil, passado e tendências futuras. **Fonte:** (IRSG, 2006). Retirado de (IAC, 2015)

Além disso, a conjuntura atual associada à oferta da borracha proveniente de países do Sudeste Asiático resultou na queda do preço de venda do látex no mercado internacional para valores próximos ao custo atual de produção do látex no Brasil, resultando em uma crise no setor. Esse cenário tende a se manter tanto no curto quanto no médio prazo (G1, 2016) (AGROANALYSIS, 2015).

1.6. Objetivos do Trabalho

Este trabalho objetiva descrever e propor um sistema automatizado para extração de látex, que permite que diversos problemas associados à realização da sangria manual sejam evitados. Ainda, este sistema adota uma abordagem que provavelmente resultaria em custos inferiores em comparação com o sistema apresentado em 1.4.

Além disso, este trabalho busca descrever um protótipo que pode ser desenvolvido para testar uma parte fundamental do robô que compõe esse sistema, isto é, a parte responsável por guiar a ferramenta de corte, que deve ser capaz de lidar com árvores distintas, permitindo que o procedimento de sangria seja realizado nas mesmas.

Este trabalho também tem como objetivo iniciar o desenvolvimento desse protótipo, por meio de uma análise geométrica que descreva como os sensores interagem com a casca das árvores e um método que pode ser utilizado para o controle dos movimentos, visando elaborar equações que podem ser posteriormente utilizadas no projeto do robô e do protótipo descritos.

1.7. Organização do Trabalho

Na Seção 2 é feita a descrição do sistema automatizado para extração de látex proposto. Na Seção 3 será descrita a metodologia adotada para o desenvolvimento inicial desse sistema, isto é, o desenvolvimento de uma parte fundamental do robô que o compõe visando a construção de um protótipo. Nas seções 4 e 5 são realizadas a determinação do método de interação com o painel de corte e a caracterização dos sensores utilizados para tal. Já na Seção 6 é feita a análise geométrica, fornecendo resultados que são utilizados na Seção 7 para o projeto do conjunto de sensores que compõe o protótipo descrito na Seção 3.

2. SISTEMA PROPOSTO

Essa seção descreve os componentes e o funcionamento de um sistema automatizado para extração de látex, por meio do qual é possível que a sangria das árvores seja efetuada sem intervenção humana, sem dependência da luminosidade do ambiente e, portanto, com maior flexibilidade de horários. Além disso, uma mesma máquina atende diversas árvores e o aproveitamento da área superficial dos caules pode ser aumentado, uma vez que a localização do painel de corte não é restrita a locais em que um sangrador pode realizar a sangria com facilidade.

2.1. Componentes

Uma representação de um trecho do sistema segue ilustrada na Figura 11.

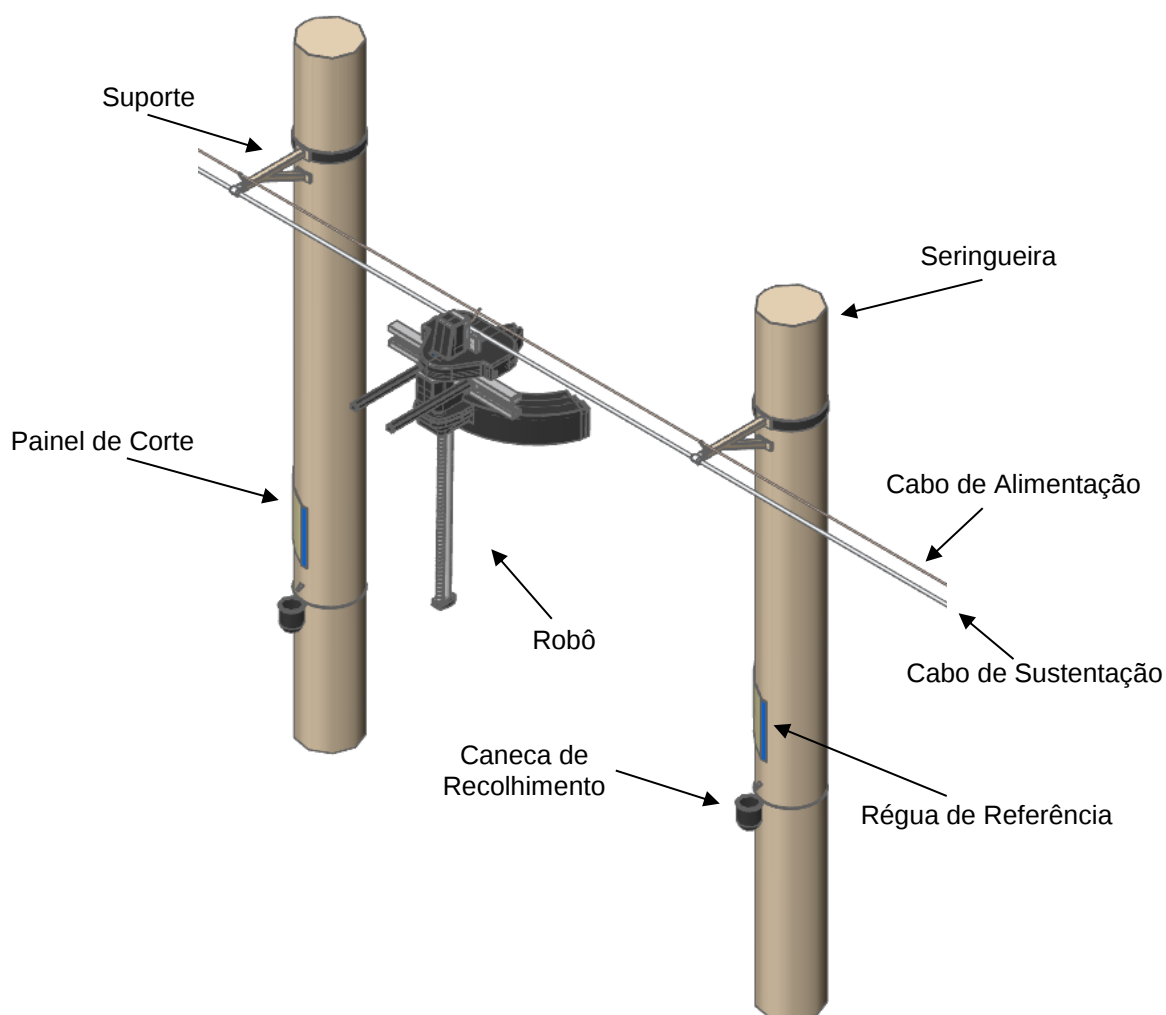


Figura 11 - Trecho do Sistema Automatizado para Extração de Látex.

O sistema é composto de suportes instalados nas árvores por meio dos quais circulam cabos, que são utilizados por robôs para se locomoverem. A energia que alimenta os robôs é transmitida por um cabo secundário, com tensão e corrente adequadas de forma a evitar danos a pessoas ou animais possam vir a encostar no mesmo. Podem ser utilizados postes associados a suportes especiais de forma a permitir que os robôs façam curvas e possam circular por todo o seringal. Cada robô pode ser dividido em quatro módulos, representados nas Figuras 12, 13 e 14.

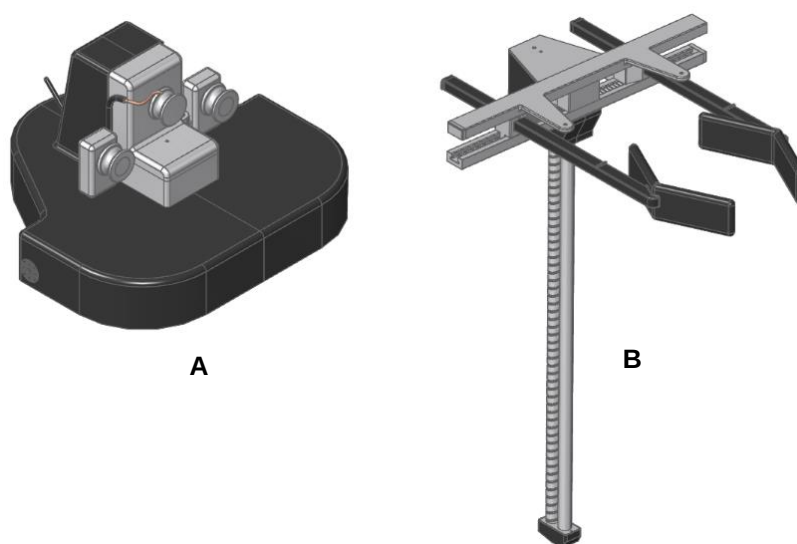


Figura 12 - Módulo de Deslocamento (A) e Módulo de Fixação (B).

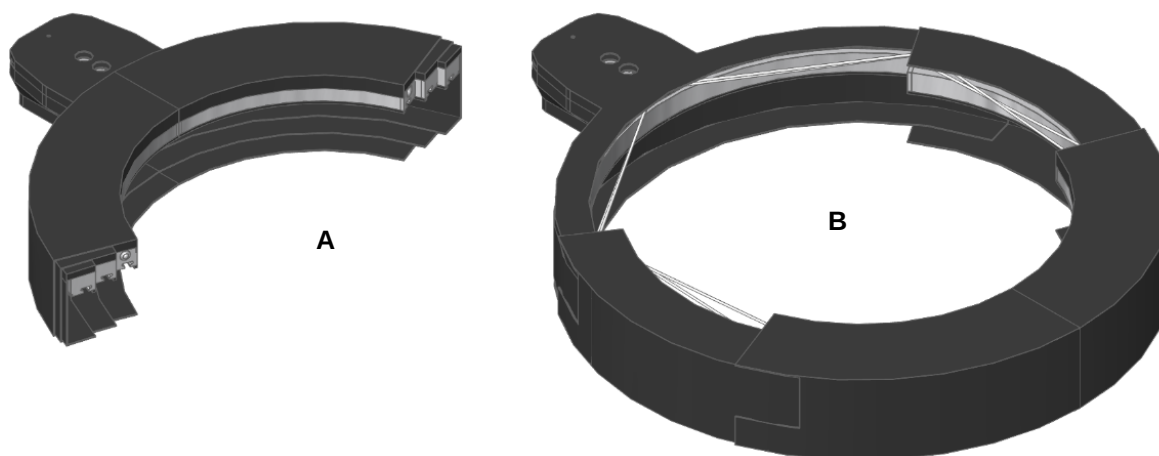


Figura 13 - Módulo de Movimento Vertical "aberto" (A) e "fechado" (B).

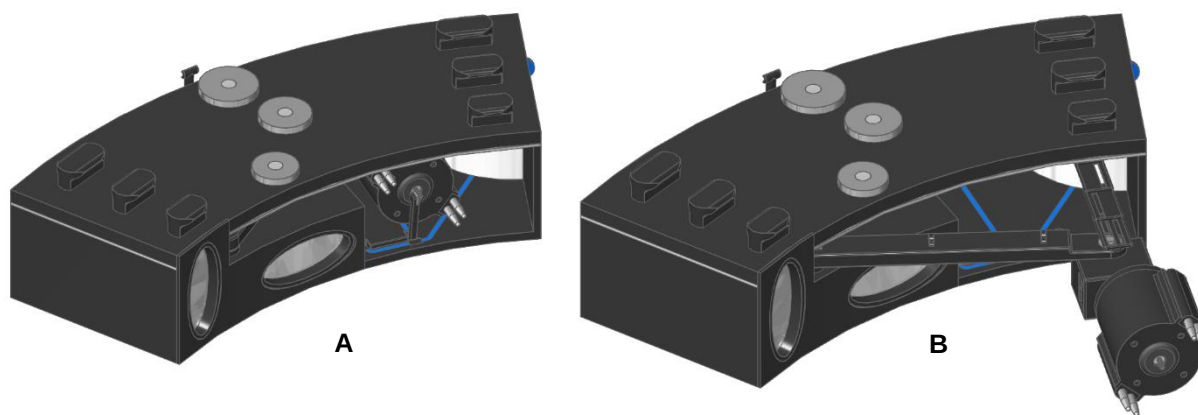


Figura 14 - Módulo de Movimento Rotacional "recuado" (A) e "avançado" (B).

O Módulo de Deslocamento (MD) possui as funções de permitir o deslocamento do robô pelo cabo de sustentação, captar energia proveniente do cabo de alimentação e detectar obstáculos a fim de evitar colisões com galhos caídos ou outros robôs. O Módulo de Fixação (MF) pode ser deslocado em relação ao MD por meio de cabos e possui a função principal de deslocar o robô em relação a árvore a fim de posicioná-la no centro dos trilhos do Módulo de Movimento Vertical (MMV). O MMV possui a função de abrir e retrair os trilhos em torno da árvore, permitindo o deslocamento do Módulo de Movimento Rotacional (MMR) ao redor desta. Além disso, o MMV pode se deslocar pelo MF, de forma a fornecer um movimento vertical mais preciso do que o existente entre o MF e o MD, permitindo a realização do corte em espiral.

É o MMR que possui as funções de localizar o painel de corte, guiar e realizar o corte em torno da árvore, possuindo as ferramentas e sensores necessários para tal. No caso ilustrado, uma fresa de topo é utilizada para promover o corte e transdutores lineares de posição são utilizados para fins de interação com os desníveis do painel, permitindo que o ressalto resultante dos cortes anteriores seja utilizado como referência para a realização de um novo corte. Além disso, o MMR possui um sistema de desinfestação, que promove o contato da ferramenta de corte com desinfetante, para evitar a transmissão de doenças entre as árvores.

2.2. Funcionamento

Na sequência, é feita a descrição do funcionamento do robô que compõe o sistema.

2.2.1. Deslocamento entre Árvores

O robô se desloca pelos cabos até se posicionar em frente à árvore onde se deseja fazer a sangria. Um método que pode ser usado para que o robô constate que se encontra na posição correta é a interação entre o suporte instalado na árvore com um botão presente no MD, de forma que o botão seja pressionado quando o robô passe por um suporte. Uma etiqueta RFID também poderia ser utilizada com essa finalidade. Dessa forma, é possível determinar se o robô se encontra em frente a uma árvore e a identificação da mesma, uma vez que a posição das árvores ao longo do cabo de sustentação e o sentido do movimento do robô são conhecidos. O posicionamento inicial do robô segue ilustrado na Figura 15.

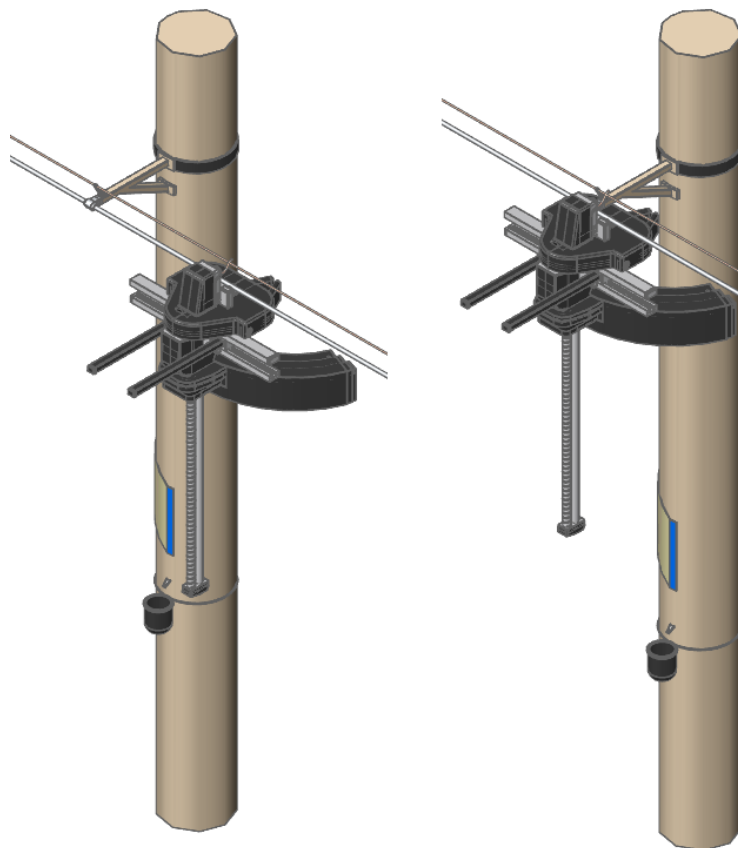


Figura 15 - Robô se posicionando em frente à árvore.

2.2.2. Centralização da Árvore

Uma vez posicionado em frente a uma árvore, o MF se desloca para baixo em relação ao MD e, utilizando um conjunto de movimentos das hastes pré-programado, centraliza a árvore em relação aos trilhos do MMV. Deve-se considerar que o procedimento de centralização deve englobar uma faixa de diâmetros das árvores compatível com o seringal em questão, ou seja, o robô deve ser capaz de trabalhar com árvores de diferentes diâmetros. Além disso, o procedimento deve tolerar certo grau de excentricidade do tronco, uma vez que as árvores não possuem formato totalmente cilíndrico. Um procedimento de centralização que pode ser usado será descrito adiante, por meio de vistas de topo do MF e MMV ilustradas nas Figuras 16, 17, 18 e 19.

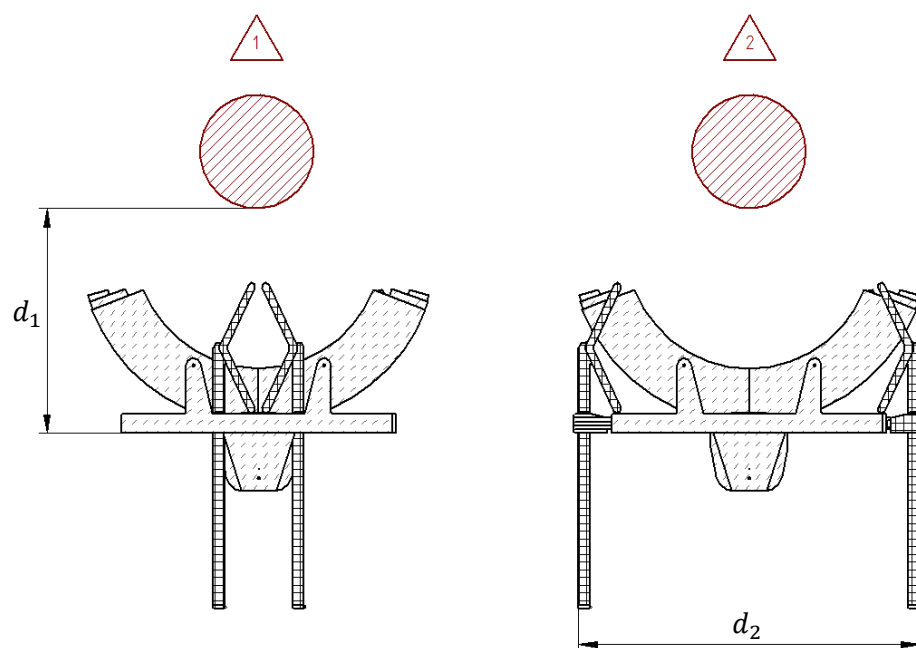


Figura 16 - Procedimento de centralização da árvore: 1 e 2.

Inicialmente, o robô se encontra a uma distância d_1 da superfície da árvore, representada como um cilindro de diâmetro desconhecido, que depende das dimensões dos suportes instalados. Então, as hastes do MF são abertas até uma distância d_2 , pré-determinada, como pode ser visto na Figura 16.

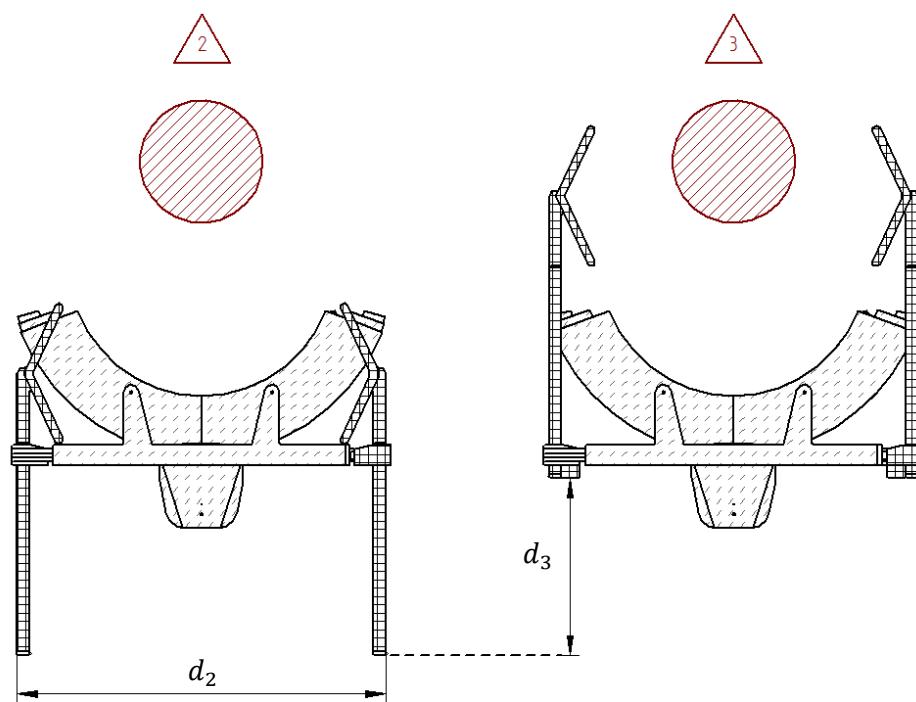


Figura 17 - Procedimento de centralização da árvore: 2 e 3.

Em seguida, como exposto na Figura 17, as hastes avançam por uma distância d_3 .

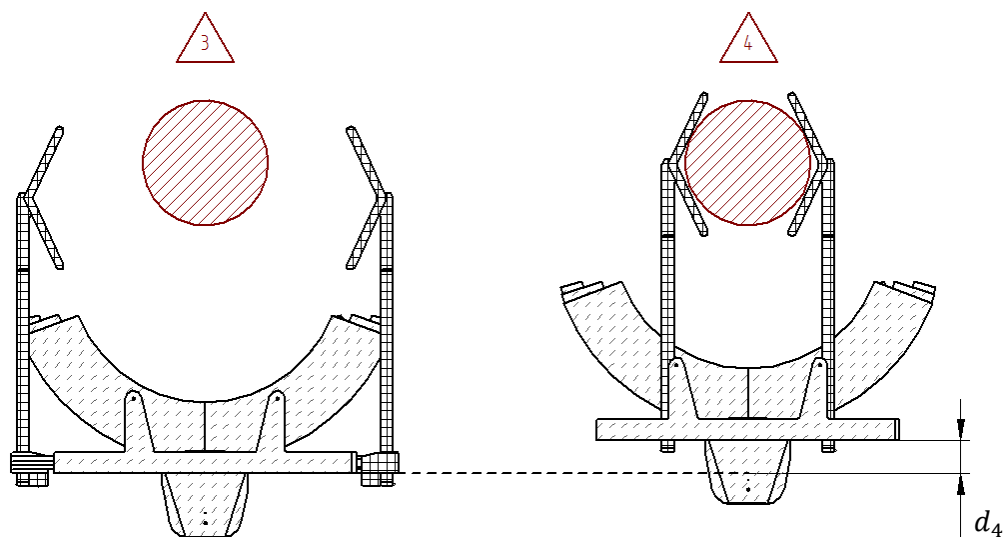


Figura 18 - Procedimento de centralização da árvore: 3 e 4.

Na sequência, as hastes são fechadas em torno da árvore. Devido ao formato das extremidades das hastes, à medida que o movimento de fechamento ocorre, elas deslizam até se centralizarem em relação ao tronco.

Existem sensores que informam a força exercida pelas hastes na superfície do caule. Quando as extremidades das hastes forem centralizadas em relação ao tronco e estiverem ajustadas ao mesmo, independentemente de seu diâmetro, a continuidade do fechamento vai resultar em um grande aumento da força constatada, indicando que o movimento deve ser interrompido. É importante notar que, como as hastes permanecem avançadas na posição d_3 , o movimento horizontal do tronco em relação ao MF resulta em um movimento horizontal do MF em relação do MD, indicado por d_4 , como pode ser observado na Figura 18. O MF se encontra separado do MD por cabos, resultando no grau de liberdade necessário para este avanço.

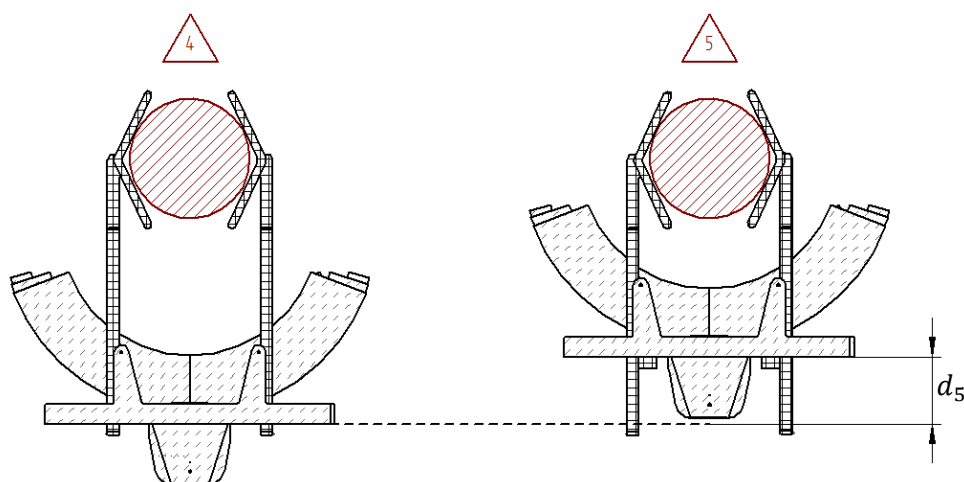


Figura 19 - Procedimento de centralização da árvore: 4 e 5.

Como o centro do tronco já se encontra em uma posição conhecida em relação ao centro dos trilhos do MMV, as hastes são recolhidas por uma distância d_5 pré-determinada, levando o centro da árvore a coincidir com o centro dos trilhos do MMV. Novamente, esse movimento resulta em um avanço frontal do MF em relação do MD. As distâncias d_2 , d_3 e d_5 devem ser determinadas de acordo com as dimensões dos suportes instalados nas árvores do seringal e com a faixa de diâmetros das mesmas. O afastamento vertical do MF em relação ao MD no início do processo de centralização deve ser compatível com os avanços horizontais d_4 e d_5 , que também podem ser estimados a partir das dimensões dos suportes e da faixa de diâmetros das árvores. A Figura 20 demonstra o robô executando o procedimento de centralização.

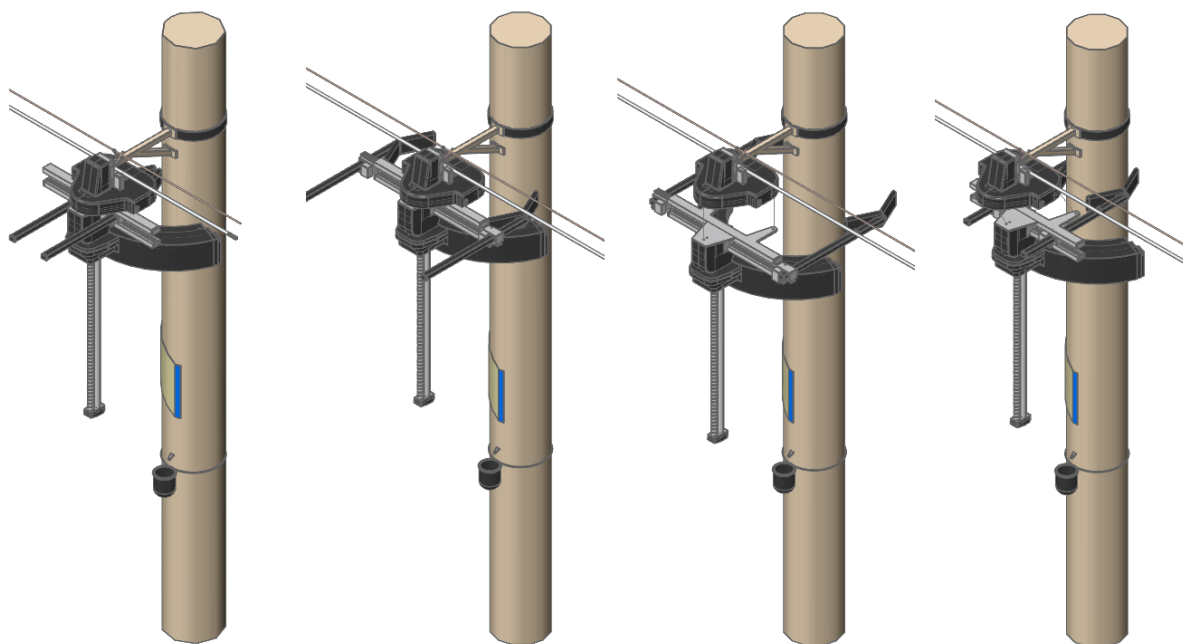


Figura 20 - Robô executando o procedimento de centralização da árvore.

2.2.3. Localização do Painel de Corte

Uma vez que a árvore esteja centralizada, os trilhos do MMV são abertos em torno da mesma permitindo que o MMR possa se movimentar por eles. Então, sensores do MMR deverão fazer uma varredura da superfície da árvore a fim de localizar a régua de referência (indicada na Figura 11). A superfície da árvore será analisada a medida que o MF se desloca verticalmente em relação ao MD e o MMR percorre os trilhos. No caso ilustrado, a régua de referência possui códigos de barras horizontais indicando alturas de referência do painel e um código de barras vertical que corresponde à posição angular adequada. O MMR possui leitores adequados para constatar essas referências, tornando possível que o mesmo se posicione adequadamente em relação ao painel de corte, de forma aproximada. Uma vez que a árvore pode ser identificada pelo robô, a localização de cada painel de corte pode ser armazenada em um banco de dados para consulta futura, poupando tempo em procedimentos de corte posteriores.

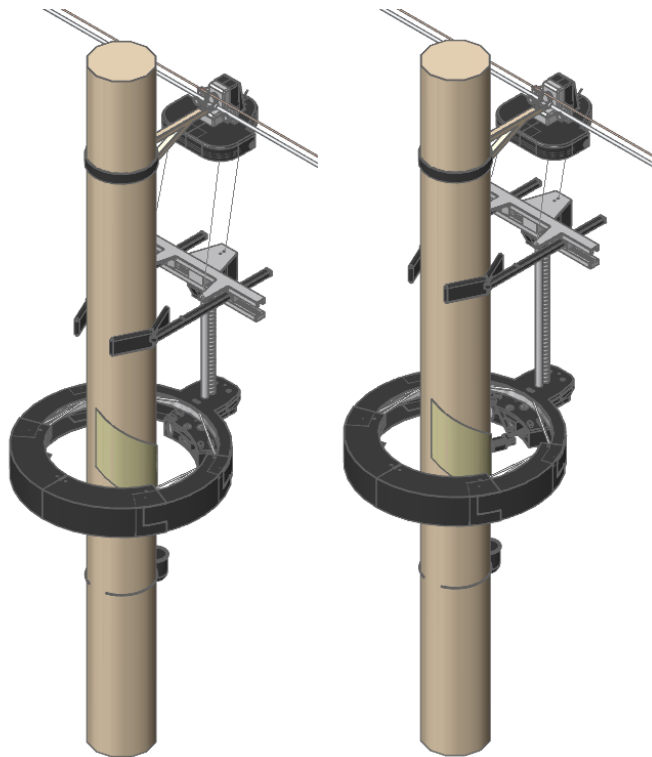


Figura 21 - Posicionamento do MMR em relação ao painel de corte.

2.2.4. Procedimento de Corte

Como exposto anteriormente, o cabeçote de corte do MMR (CC) deve possuir sensores que tornam possível que o ressalto do painel de corte (distância entre a casca virgem e a superfície resultante dos cortes anteriores) seja usado como referência para a realização do novo corte. Esses sensores devem permitir a execução de procedimentos de ajuste para compensar eventuais desalinhamentos entre o robô e o painel de corte, de determinação do ponto inicial de corte, e também garantir que a ferramenta de corte se encontra na posição correta durante todo o procedimento. O avanço do CC após a localização do painel de corte segue ilustrado na Figura 21. No caso, são utilizados transdutores lineares de posição. Outras opções seriam utilizar sensores que não demandam contato físico com a casca, ou um método de processamento de imagem de forma a constatar a “linha do ressalto” e utiliza-la como referência. O funcionamento do sistema de controle de corte é desenvolvido em maiores detalhes nas próximas seções deste trabalho.

Uma vez que a inclinação do painel seja determinada e a ferramenta de corte se encontre na posição adequada, esta deverá ser ligada e o CC pressionado contra a casca da árvore, de forma que a profundidade de corte seja restringida por um limitador. Um elemento elástico associado a um transdutor linear de posição e o mecanismo de avanço frontal do CC em relação à casca da árvore permitem que as excentricidades da mesma sejam compensadas (ou “amortecidas”), de forma que a força exercida pelo limitador contra a casca seja mantida em um valor constante.

O movimento rotacional do MMR associado ao movimento vertical do MMV e ao movimento de avanço frontal do CC permitem que a fresa faça o percurso em espiral correspondente à sangria, fazendo o corte na profundidade estabelecida pelo limitador. A relação entre o movimento rotacional, vertical e frontal de forma a promover o corte é desenvolvido em detalhes na Subseção 6.7.

2.2.5. Retorno à Configuração Inicial e Continuando o Percurso

Após a realização do corte, o CC será recolhido, o MMR retornará para a posição que se encontrava inicialmente, os trilhos do MMV serão abertos, as hastes de fixação do MF retornarão às suas posições iniciais e os cabos entre o MF e o MD serão recolhidos. Assim, o robô poderá continuar seu percurso pelo cabo de sustentação, se dirigindo para a árvore seguinte e repetindo o processo, como ilustrado na Figura 22.

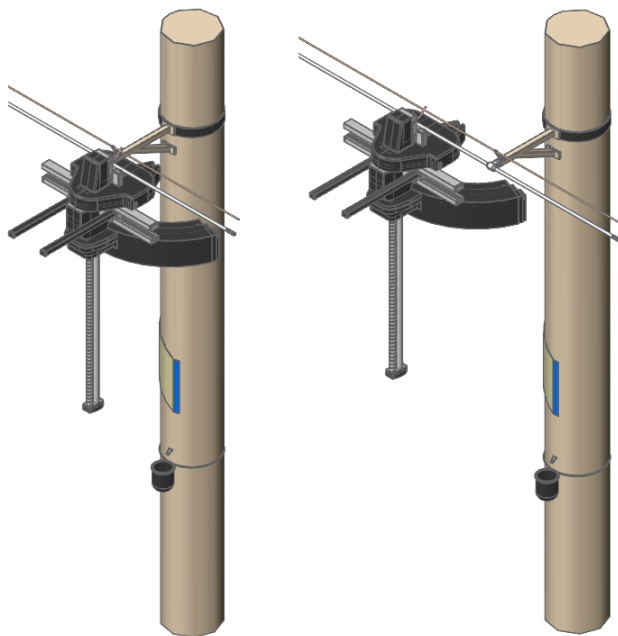


Figura 22 - Retorno à configuração inicial e continuando o percurso.

3. METODOLOGIA

Essa seção trata da metodologia adotada para o desenvolvimento inicial do sistema proposto, que consiste do desenvolvimento de uma parte fundamental do robô que o compõe visando a construção de um protótipo para a realização de testes.

3.1. Idealização do Primeiro Protótipo

O primeiro protótipo idealizado consiste de uma base de testes que simula o sistema atuante uma vez que o robô esteja fixado à árvore e o MMV esteja posicionado em relação ao painel de corte, após constatar a posição da régua de referência.

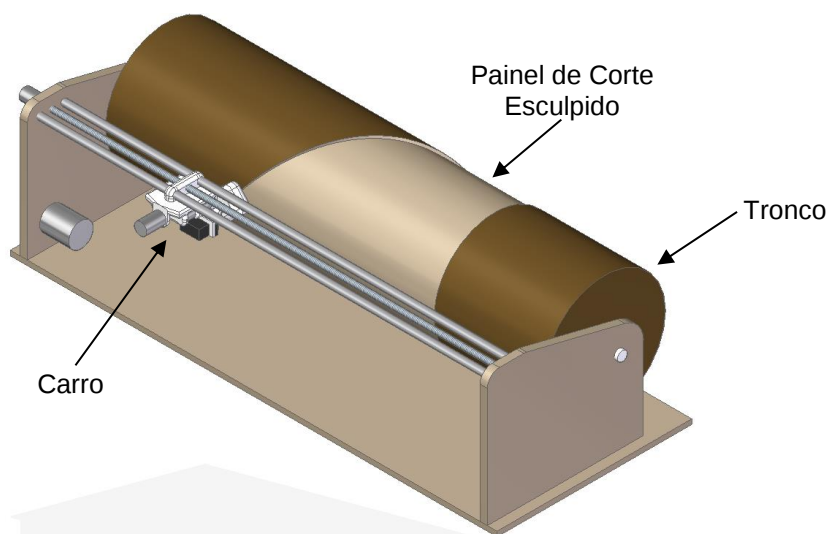


Figura 23 - Idealização Inicial do Protótipo, perspectiva 1.

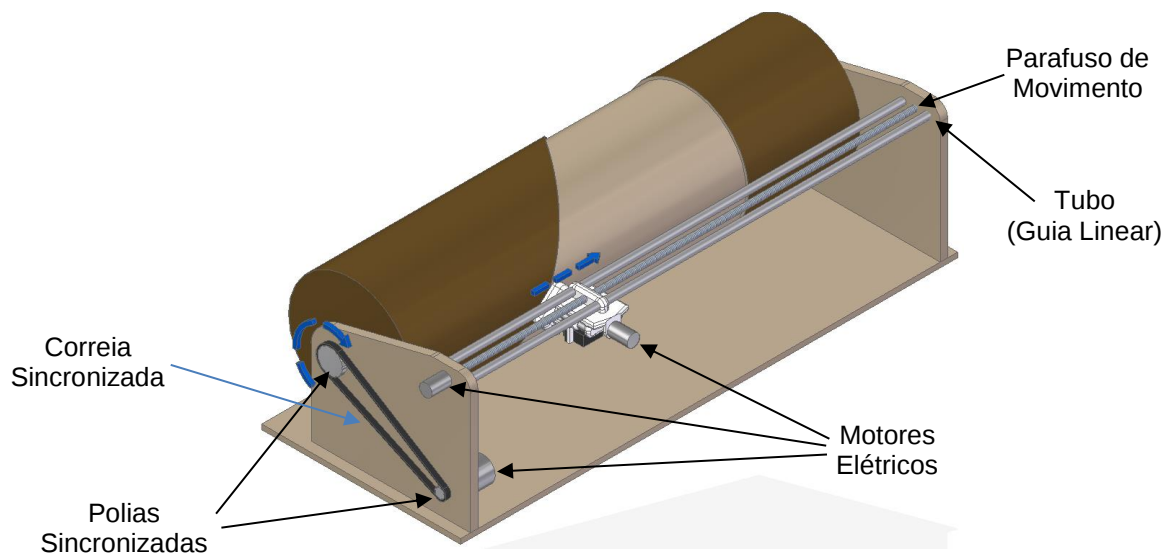


Figura 24 - Idealização Inicial do Protótipo, perspectiva 2.

Esse protótipo inicial foi concebido a fim de gerar os movimentos principais necessários para o funcionamento do sistema de realização do corte com uma relativa facilidade construtiva. É possível observar nas Figuras 23 e 24 que, a fim de simular o movimento rotacional do MMR, o tronco será girado por meio de um motor elétrico, um conjunto de polias sincronizadas e a devida correia sincronizada. O movimento horizontal ao longo do tronco, obtido por meio de um motor elétrico, um parafuso de movimento e tubos, utilizados como guias lineares, possui equivalência com o movimento realizado pelo MMV durante o procedimento de corte.

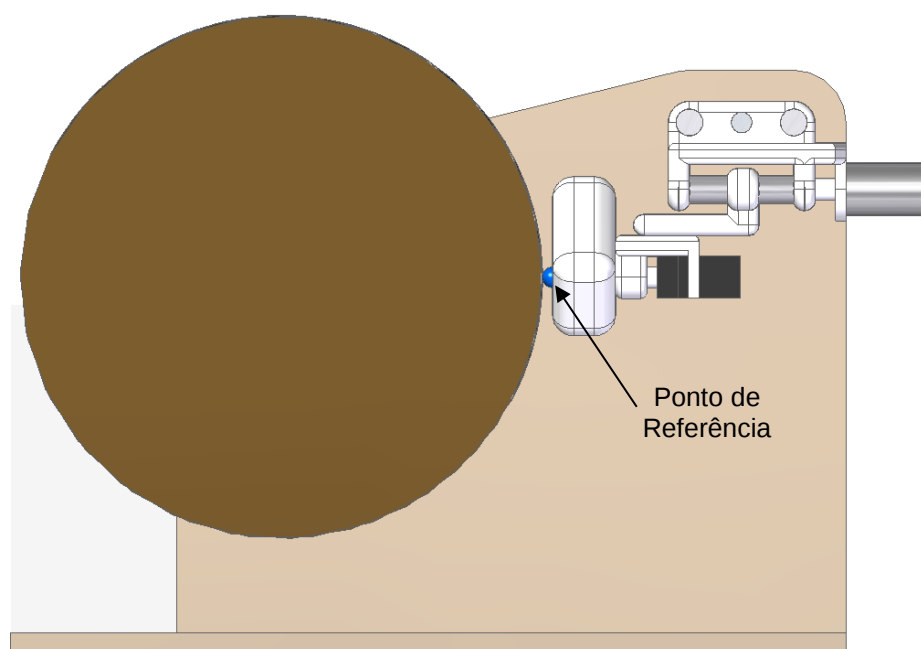


Figura 25 - Idealização Inicial do Protótipo, vista lateral.

O “carro” do protótipo possui um “ponto de referência”, que pode ser observado na Figura 25 e consiste do ponto que entra em contato com a casca, devendo ser guiado pelo percurso em espiral que seria feito pela ferramenta de corte. Ainda, o carro possui um motor associado a outro parafuso de movimento, sendo capaz de promover o movimento frontal em relação à casca, e um servomotor capaz de girar os sensores que entram em contato com a mesma, como ilustrado na Figura 26.

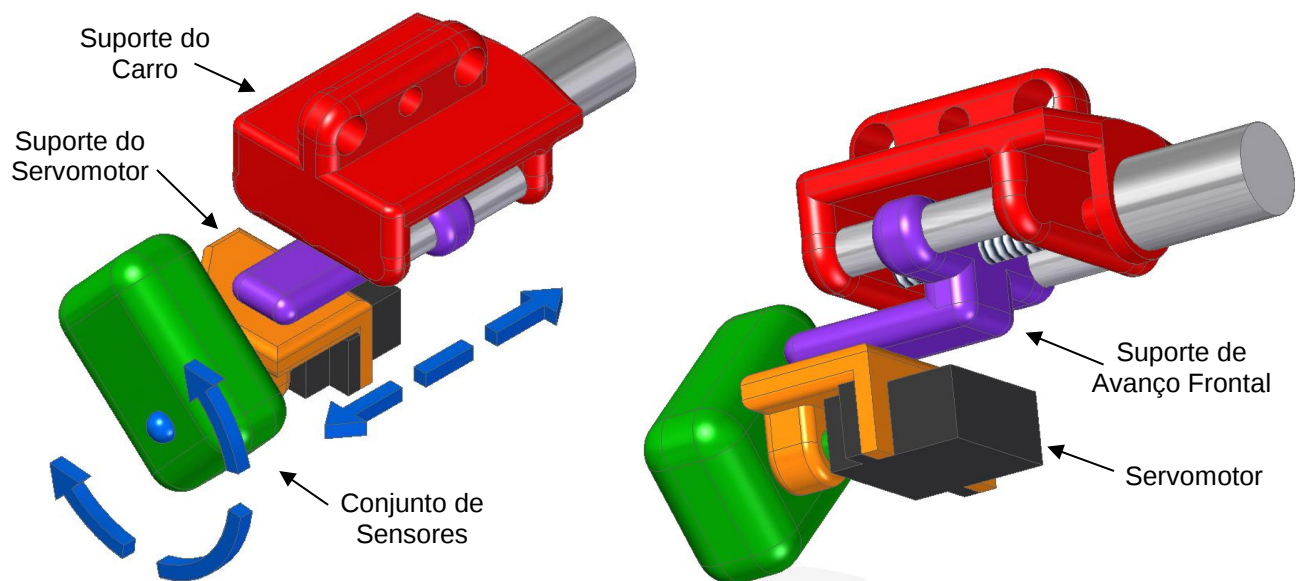


Figura 26 - Idealização Inicial do Protótipo - Carro.

O conjunto de sensores é composto pelos sensores que entram em contato com a casca e pelo ponto de referência. Do conjunto de sensores, sai um eixo que se apoia em um mancal contido na estrutura do suporte do servomotor e posteriormente é acoplado ao servomotor. Dessa forma, o conjunto de sensores pode girar em relação a este eixo, permitindo a execução de procedimentos de ajuste à inclinação do painel, de forma a compensar eventuais desalinhamentos, assim como a realização de procedimentos de determinação do ponto de início de corte.

O suporte do servomotor é ligado ao suporte de avanço frontal através de uma junção deslizante, sendo pressionado frontalmente por uma mola de compressão. Dessa forma quando o ponto de referência é pressionado contra a casca, essa mola é comprimida pelo movimento relativo entre o suporte do servomotor e o suporte de avanço frontal. Um transdutor linear de posição mede constantemente a deformação da mola, permitindo que o movimento de avanço frontal seja controlado para que ela seja mantida em determinado valor pré-estabelecido, que corresponde à força desejada de contato com a casca. Com isso, as excentricidades da árvore podem ser amortecidas pelo mecanismo de avanço frontal.

Encoders rotacionais são utilizados para os controles de posição e de velocidade. Chaves fim de curso limitam o movimento horizontal, assim como o movimento frontal. O desenvolvimento dos circuitos eletrônicos pode ser realizado em torno de uma placa micro controladora de prototipagem.

3.2. Abordagem de Desenvolvimento

Uma vez que o procedimento de controle do percurso de corte consiste de um problema complexo, envolvendo a interação de sensores com a superfície irregular de uma árvore, que possui excentricidades, rugosidade elevada, etc., a modelagem matemática completa exigiria tempo e recursos não disponíveis para a realização do presente trabalho. Assim, no desenvolvimento inicial do sistema, foi adotada uma abordagem prática. Para testar os componentes desenvolvidos, foi adquirido um tronco de eucalipto com dimensões compatíveis com as de uma seringueira em fase de produção, exposto na Figura 27.



Figura 27 - Tronco de eucalipto adquirido.

Utilizando uma fresa de topo, foi esculpido um painel de corte, exposto na Figura 28, que se estende por aproximadamente metade do perímetro do tronco, possui inclinação de 37° em relação ao plano do piso e 3,0mm de profundidade, dimensões compatíveis com as de um painel de corte real com configuração em meia espiral e corte descendente, mais utilizada em cultivos comerciais (SENAR, 2005).



Figura 28 - Pannel de corte esculpido.

O design das peças e os desenhos da análise geométrica foram feitos por meio do software “*SIEMENS - Solid Edge Student Edition ST7*” (SIEMENS, 2017). Para a prototipagem das peças, foi utilizada uma impressora 3D “*3D Machine One*” (3DMACHINE, 2015) com filamento PLA. No desenvolvimento de modelos matemáticos, foi utilizado o software “*MATLAB and Simulink Student Suite 2017a*” (MATHWORKS, 2017). Para o teste de circuitos eletrônicos foi utilizada uma placa micro controladora “*Arduino Mega 2560*”, juntamente com o software “*Arduino IDE 1.8.3*” (ARDUINO, 2017).

Esse trabalho objetiva desenvolver o método de controle do corte visando a elaboração de uma base de testes, não se tratando do desenvolvimento do produto final. Dessa forma, o custo e a praticidade do projeto e da construção dos componentes desenvolvidos foram levados em conta a todo momento. Portanto, muitas vezes os elementos de máquina ideais (como os devidos rolamentos lineares com eixos retificados, acopladores de eixo flexíveis, etc.) não foram adotados.

4. ESTRATÉGIA DE DETECÇÃO DO RESSALTO

Nessa seção, foram avaliadas três estratégias para a detecção do ressalto do painel de corte, a fim de usá-lo como referência na realização de um novo corte: detecção da resistência ao escorregamento do ressalto, comparação de medições pontuais de profundidade a partir de um plano de referência e processamento de imagem.

4.1. Detecção da Resistência ao Deslizamento

Na primeira estratégia, um apalpador associado a um elemento elástico faz contato físico com a casca da árvore, de forma que ele é capaz de deslizar sobre a mesma até entrar em contato com o ressalto. Quando isso ocorresse, o elemento elástico se deforma de forma angular ou linear, como ilustrado nas Figuras 29 e 30. Essa deformação é constatada por meio de um elemento sensor, permitindo que o ressalto seja detectado.

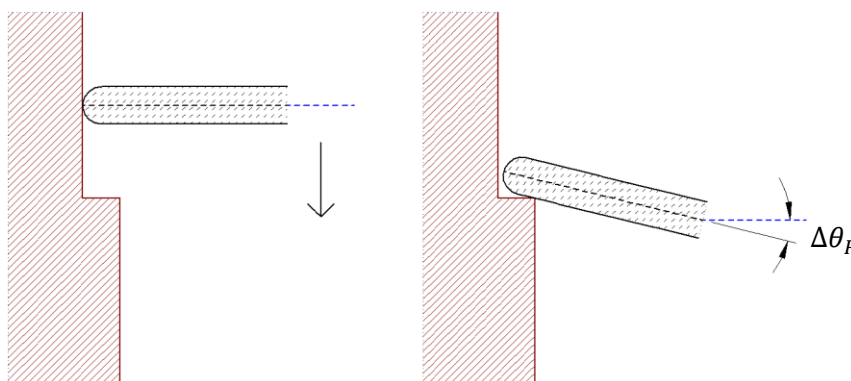


Figura 29 - Detecção da Resistência ao Deslizamento considerando uma deformação angular do elemento elástico.

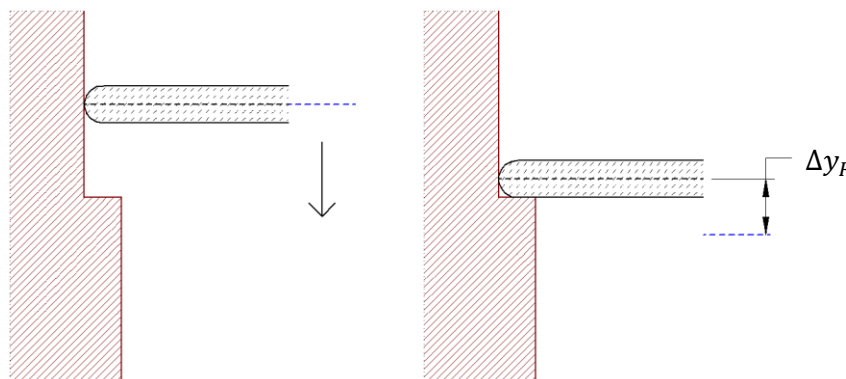


Figura 30 - Detecção da Resistência ao Deslizamento considerando uma deformação linear do elemento elástico.

Um problema dessa abordagem é que a rugosidade da casca já resulta em uma resistência ao deslizamento elevada, de forma que é possível que o elemento elástico se deforme sem ter contato com o ressalto, situação ilustrada na Figura 31.

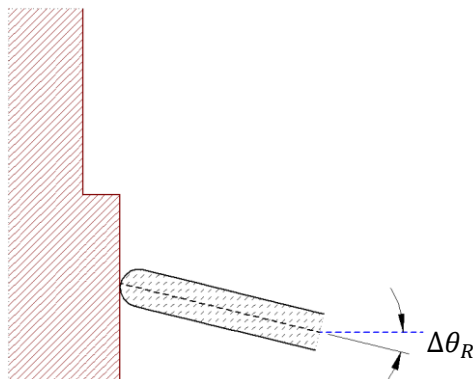


Figura 31 - Detecção da Resistência ao Deslizamento considerando uma deformação angular indevida do elemento elástico.

4.2. Medições Pontuais de Distância a um Plano de Referência

A segunda estratégia consiste de comparar a distância de um plano de referência até a casca da árvore em mais de um ponto. Na situação ilustrada na Figura 32, é possível constatar que o ressalto se encontra dentro da faixa com espessura d entre os dois pontos de referência (extremidades da linha tracejada azul).

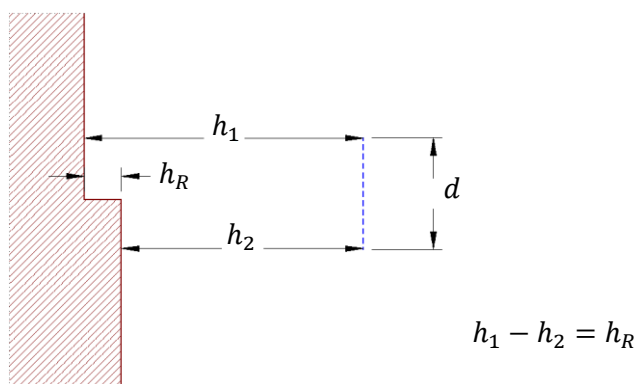


Figura 32 - Medições Pontuais de Distância a um Plano de Referência.

O diâmetro de detecção deve ser mínimo, e uma resolução de décimos de milímetros é necessária, o que dificulta o emprego de sensores ultrassônicos, fotoelétricos difusos ou capacitivos. Além disso, a natureza isolante da madeira impede que sensores indutivos sejam utilizados (OMRON, 2017) (FARGO CONTROLS, 2008).

No entanto, existem diversos tipos de sensores utilizados em técnicas de metrologia superficial (LEICA MICROSYSYSTEMS, 2013) que são compatíveis com essas condições. Idealmente, seriam empregados sensores que não demandam contato físico com a casca, evitando problemas relacionados à resistência ao deslizamento devido à rugosidade da madeira e ao ressalto, além de diminuir a complexidade do mecanismo.

Um tipo de sensor que pode ser utilizado para constatar as distâncias sem a necessidade de contato físico é o sensor confocal de codificação cromática, ilustrado na Figura 33, capaz de medir distâncias com diâmetro de detecção relativamente pequenos e precisão relativamente elevada (STIL, 2017) (MICRO-EPSILON, 2015). Além disso, estes sensores estão disponíveis em versões miniaturizadas (MICRO-EPSILON, 2017), o que permite a medição de distâncias correspondentes a pontos bem próximos no plano de referência, estreitando a faixa de contenção do ressalto.

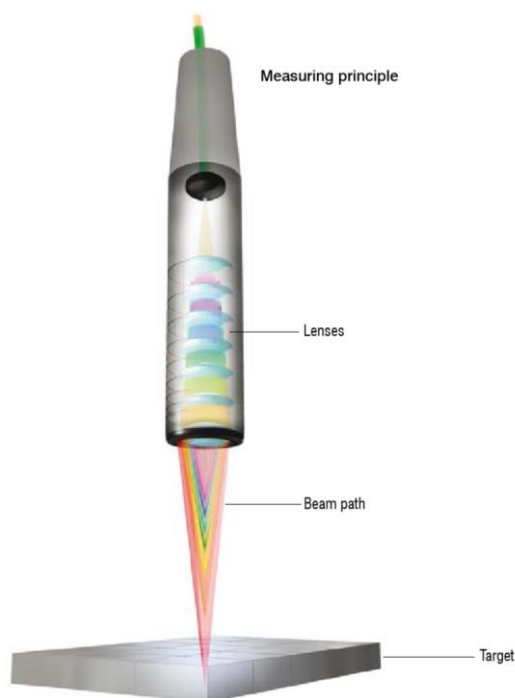


Figura 33 - Funcionamento do sensor de confocal de codificação cromática. **Fonte:** (MICRO-EPSILON, 2017)

Ainda, a eficiência desse tipo de sensor em superfícies de madeira é comprovada, uma vez que são utilizados na inspeção do acabamento de superfícies de madeira por meio de perfilometria 3D (NANOVEA, 2015). A Figura 34 demonstra uma superfície gerada por esse método com o uso de um desses sensores.

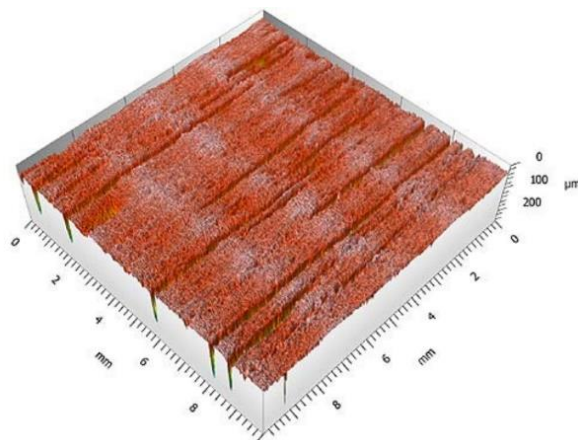


Figura 34 - Perfilometria 3D de superfície de madeira feita por meio de sensor confocal de codificação cromática. **Fonte:** (NANOVEA, 2015).

Porém, sensores confocais de codificação cromática apresentam um custo relativamente elevado e um manejo relativamente complexo. Além disso, são sensíveis à inclinação da superfície alvo (STIL, 2016) (MICRO-EPSILON, 2017), de forma que medir distâncias em pontos onde o plano de referência que contém os sensores não é normal à casca da árvore poderia vir a ser um problema. Outra opção a ser considerada é medir as distâncias do plano de referência até a casca por meio do contato físico, situação ilustrada na Figura 35.

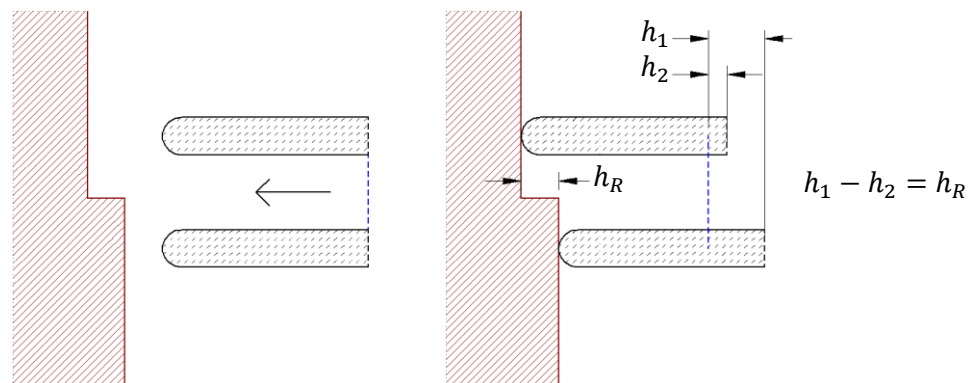


Figura 35 - Medições de Distância a um Plano de Referência por contato físico.

Diversos modelos de transdutor linear de posição disponíveis no mercado podem ser usados para constatar os parâmetros ilustrados acima, com resolução adequada para a detecção do ressalto.

4.3. Processamento de Imagem

Um método de processamento de imagem também poderia ser aplicado, mas o desenvolvimento dessa abordagem é mais complexo, envolvendo as condições de luminosidade do ambiente de operação, equipamentos sensíveis, etc. Além disso, corresponde a um custo relativamente elevado.

4.4. Estratégia Adotada

Após considerar as estratégias expostas anteriormente, a estratégia de comparar distâncias até a casca a partir de um plano de referência foi adotada, com o emprego de sensores que funcionam por meio de contato físico. Essa estratégia foi escolhida devido ao fato de que é a que pode ser implementada, a princípio, com menor custo.

No entanto, a ocorrência de contato físico aumenta bastante a complexidade da interação entre o conjunto de sensores e o painel de corte, conforme será demonstrado nas próximas seções. Além disso, provavelmente resulta em um desgaste superior dos componentes e, por consequência, demanda uma frequência de manutenção mais elevada em comparação com um sistema que não demanda contato físico entre os sensores e a casca da árvore.

5. CARACTERIZANDO OS APALPADORES

Nessa seção será feita a caracterização dos sensores utilizados na interação com o painel de corte do tronco, partindo da estratégia de detecção do ressalto adotada.

5.1. Escolha dos Sensores

Existem diversos transdutores lineares de posição industriais (Figura 36) disponíveis no mercado que podem ser empregados, com diferentes métodos de medição, faixas de operação e resoluções (MICRO MEASUREMENTS, 2016) (TURCK, 2009).



Figura 36 - Sensores de posição linear. **Fonte:** <http://www.directindustry.com/>

Porém, tais sensores apresentam custo muito elevado em comparação com potenciômetros deslizantes, que podem ser encontrados com facilidade em lojas de componentes eletrônicos em diversos tamanhos. Portanto, diversos potenciômetros deslizantes foram adquiridos para teste, estando expostos na Figura 37.

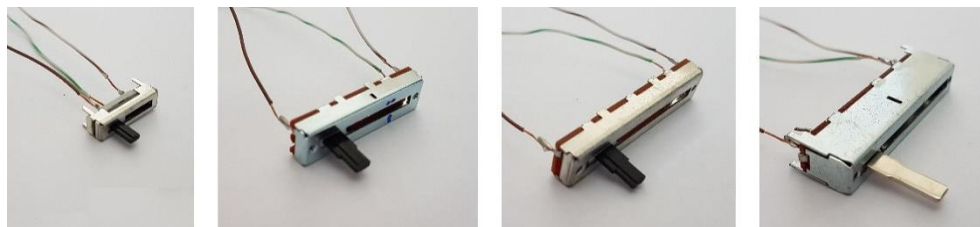


Figura 37 - Potenciômetros deslizantes adquiridos, da esquerda para a direita: B503 50K - Curso Total 10 [mm], A20K - Curso Total 20 [mm], A20K - Curso Total 30 [mm] e A50K - Curso Total 30 [mm].

Após a aquisição dos potenciômetros deslizantes, as incertezas correspondendo à medição do deslocamento do cursor em trechos do curso total foram estimadas experimentalmente, o que resultou na Tabela 1.

Tabela 1 - Incerteza de Precisão Estimada dos Potenciômetros Deslizantes

Potenciômetro Deslizante	Trecho		$\partial SA/\partial x$	μ_x [mm]
	$x_i - x_f$	C [mm]		
B503 50K - Curso Total 10 [mm]	1 - 2	1	57	0.53
	2 - 8	6	147.33	0.20
	8 - 9	1	81	0.37
A20K - Curso Total 20 [mm]	1 - 8	7	112.14	0.27
	8 - 19	11	21.64	1.39
A20K - Curso Total 30 [mm]	3 - 14	11	79	0.38
	14 - 27	13	10.46	2.87
A50K - Curso Total 30 [mm]	2 - 14	12	67.25	0.45
	14 - 28	14	14.93	2.01

O procedimento experimental, as considerações adotadas e os cálculos que levaram a esses resultados podem ser verificados no Apêndice A. É possível constatar que todos os potenciômetros apresentaram trechos com incerteza de medição estimada inferior a $\mu_x = 0,5$ [mm]. Uma vez que a comparação das distâncias objetiva a detecção do ressalto com profundidade de 3,0 [mm], essas precisões foram consideradas satisfatórias para o desenvolvimento do protótipo inicial.

É possível obter um apalpador que atende as necessidades da estratégia que foi adotada para a detecção do ressalto ao associar um potenciômetro deslizante, uma ponta que pode ser conectada ao cursor, uma estrutura guia, uma mola e um limitador. Uma das configurações possíveis dessa associação segue ilustrada na Figura 38, considerando o potenciômetro “A20K - Curso Total 30 [mm]”.

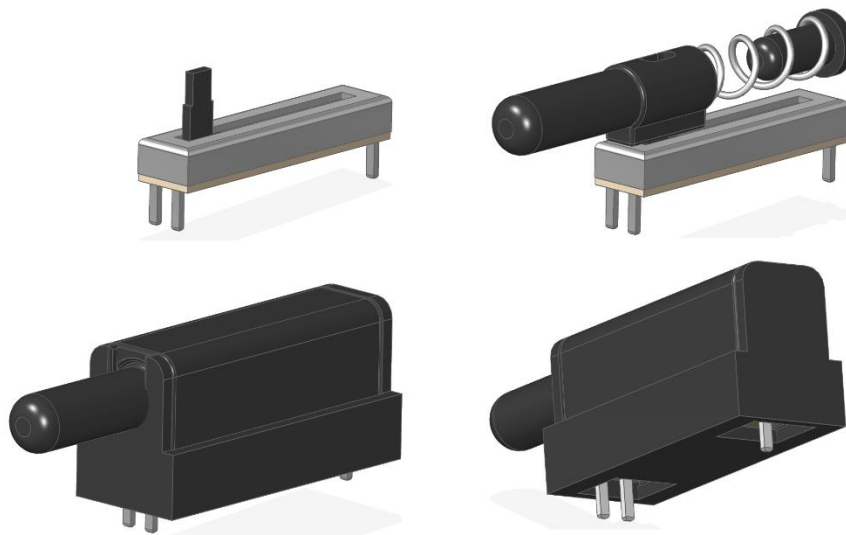


Figura 38 - Design preliminar do apalpador a partir de um potenciômetro deslizante.

Dessa forma, o cursor do potenciômetro deslizante adotado tende a ficar em uma posição x_{min} quando a ponta não está em contato com a casca, e se desloca até o x correspondente quando em contato, até atingir uma posição x_{max} . Os esforços mecânicos são absorvidos pela estrutura do apalpador e x_{min} e x_{max} são estabelecidos em seu projeto, permitindo que se escolha o trecho do curso do potenciômetro deslizante que será adotado.

Assim, levando em consideração o baixo custo e a facilidade de aquisição dos potenciômetros deslizantes obtidos, eles foram adotados como sensor de medição da distância entre o plano de referência e a casca da árvore.

5.2. Ponta do Apalpador

Uma vez com os sensores determinados, o próximo passo foi determinar da ponta do apalpador, que entraria em contato com a casca da árvore. A ponta deve ter o menor diâmetro possível, aproximando a medição da condição pontual e permitindo que fosse feita a comparação das distâncias de dois pontos próximos um do outro no plano de referência, estreitando a faixa de contenção do ressalto e evitando que as irregularidades da casca interferiram no resultado da comparação.

No entanto, a ponta também deve ser capaz de deslizar facilmente pela casca, que possui rugosidade elevada, e ultrapassar o ressalto com facilidade caso entre em contato com o mesmo, evitando o travamento do conjunto de sensores enquanto se movimenta pela superfície do tronco e eventuais danos decorrentes dessa situação. Por meio da impressão 3D dos componentes, foram feitos testes de algumas pontas cônicas e esféricas no tronco previamente adquirido.

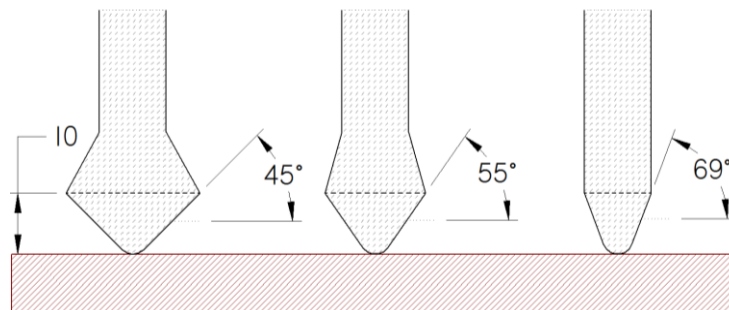


Figura 39 - Pontas cônicas testadas (dimensões em milímetros).

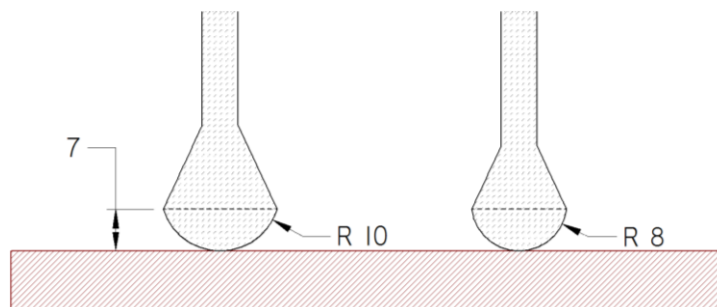


Figura 40 - Pontas esféricas testadas (dimensões em milímetros).

As pontas foram postas em contato com a casca e deslizadas manualmente pelo tronco e contra o ressalto, enquanto se variava a intensidade com que eram pressionadas contra o tronco, para que fosse avaliada a facilidade com que elas atravessavam o ressalto. Nesses testes preliminares, as pontas esféricas se mostraram mais promissoras, então as pontas cônicas (Figura 41) foram descartadas.



Figura 41 - Pontas cônicas obtidas por impressão 3D.

Na sequência, os demais elementos que compõe o apalpador foram impressos e as pontas esféricas foram montadas no conjunto (Figura 42). Então, o apalpador preliminar foi deslizado manualmente pelo tronco e contra o ressalto, enquanto se variava a intensidade com que era pressionado contra o tronco. Nesse teste, a ponta esférica de maior raio se mostrou mais promissora.



Figura 42 - Pontas esféricas obtidas por impressão 3D e apalpador montado.

Posteriormente, foi constatado que bolas de gude tem dimensões compatíveis com a ponta esférica de maior raio que foi testada, possuindo um acabamento superficial com qualidade superior. Assim, uma ponta que utiliza uma bola de gude como elemento de contato foi desenvolvida, estando ilustrada nas Figuras 43 e 44.

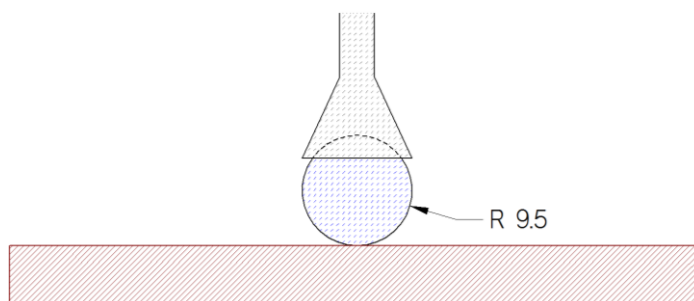


Figura 43 - Ponta utilizando uma bola de gude (dimensões em milímetros).



Figura 44 - Apalpador montado utilizando uma bola de gude.

Nos testes realizados manualmente, essa ponta apresentou desempenho bem satisfatório e muito superior às demais testadas. Foi constatada pouca resistência ao deslizamento pela casca e grande facilidade de transposição do ressalto. Ainda, esse elemento possui baixo custo e pode ser adquirido com facilidade, de forma que esse foi o design adotado para o projeto do protótipo.

6. ANÁLISE GEOMÉTRICA

Nessa seção é feita uma análise geométrica que busca descrever como os apalpadores interagem com a casca, garantindo o posicionamento correto do ponto de corte em relação ao ressalto. Além disso, é desenvolvido um método de controle dos movimentos, visando permitir que o percurso de corte seja realizado, assim como procedimentos de alinhamento e de determinação do ponto de início de corte. Exemplos desses procedimentos também são fornecidos.

6.1. Efeito da Curvatura da Árvore

Ao observar a Figura 45 é possível constatar que, devido à curvatura da árvore, apalpadores dispostos em um mesmo plano de referência que entram em contato com a casca em pontos que correspondem a ângulos θ diferentes, fornecem leituras diferentes. No entanto, é razoável considerar que a curvatura da árvore não afeta significativamente a comparação das leituras provenientes de dois pontos afastados verticalmente por uma pequena distância.

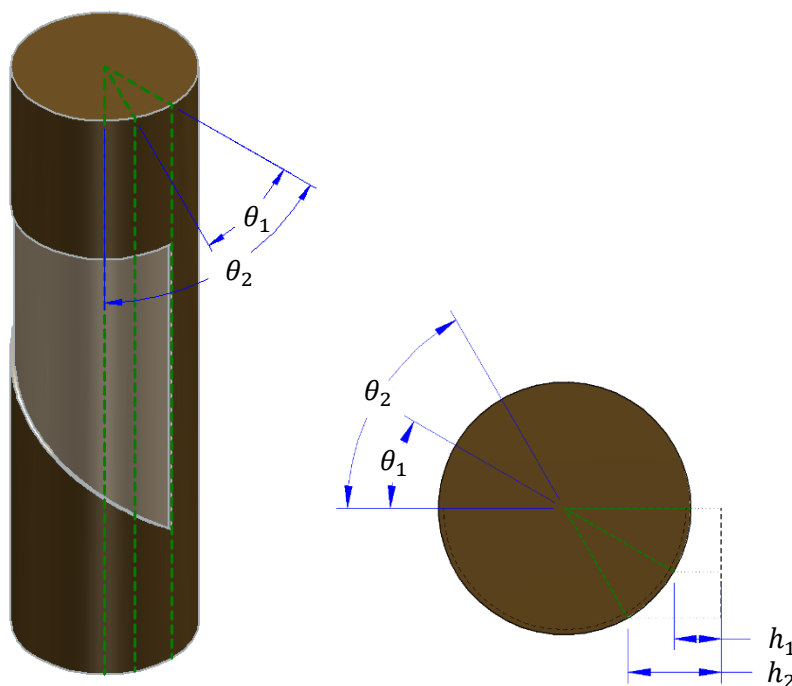


Figura 45 - Efeito da curvatura da árvore na medição da distância até o plano de referência.

Dessa forma, para tornar possível a detecção do ressalto, com altura relativamente pequena, é necessária a comparação da distância medida por dois apalpadores que estejam em contato com a casca em posições que correspondam ao mesmo ângulo θ . Ou seja, dois apalpadores que entrem em contato com a casca em uma mesma linha tracejada verde na Figura 45. Vale notar que a distância entre tais apalpadores deve ser a menor possível, de forma que as variações das leituras referentes às irregularidades da casca sejam mínimas.

6.2. Faixa de Contenção do Ressalto

As dimensões das pontas dos apalpadores que entram em contato com a casca da árvore têm grande influência na precisão resultante do par. Considerando que a distância vertical entre os dois apalpadores é constante e que a variação da leitura devido às irregularidades da árvore entre ambos é desprezível, a diferença entre as leituras corresponde aproximadamente à altura do ressalto h_R no intervalo entre duas situações-limite, descritas adiante.

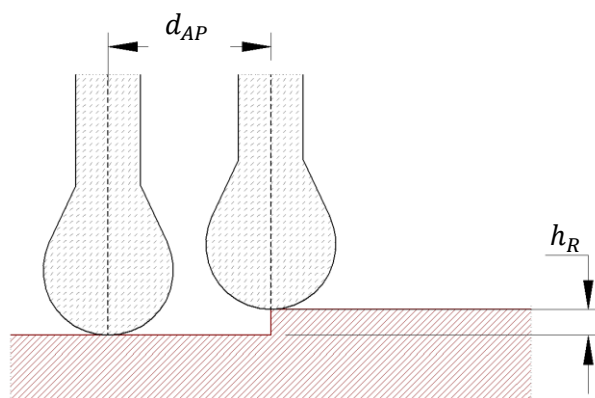


Figura 46 - Situação limite de contenção do ressalto, descida iminente.

Na primeira situação limite, um dos sensores se encontra em contato com a casca virgem e outro em contato com a superfície rebaixada do painel, sendo que o primeiro está na iminência de descer para a superfície rebaixada. Caso o conjunto se movimente para a esquerda, a diferença entre as leituras vai se tornar menor que h_R , tendendo a 0.

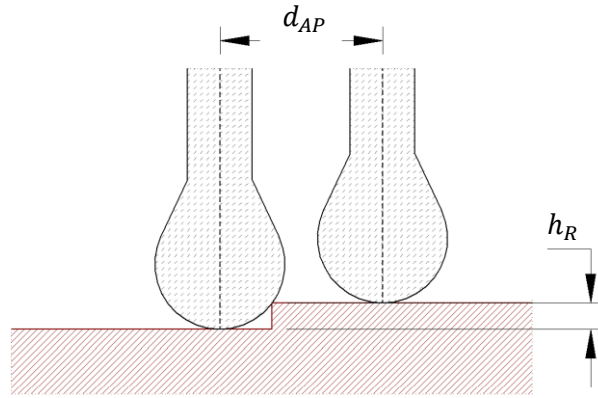


Figura 47 - Situação limite de contenção do ressalto, subida iminente.

Na segunda situação limite, novamente, um dos sensores se encontra em contato com a casca virgem e outro em contato com a superfície rebaixada do painel, porém o segundo está na iminência de subir para a casca virgem. Caso o conjunto se movimente para a direita, a diferença entre as leituras vai se tornar menor que h_R , tendendo a 0. Considerando esse caso, é possível calcular o raio do círculo de detecção de subida (r_{CDS}) por meio dos parâmetros da ponta do apalpador e do ressalto do painel, conforme ilustrado na Figura 48.

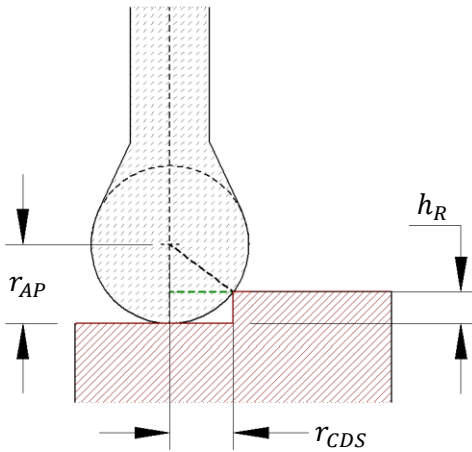


Figura 48 - Cálculo do raio do círculo de detecção de subida.

$$r_{AP}^2 = r_{CDS}^2 + (r_{AP} - h_R)^2$$

$$r_{CDS} = \sqrt{r_{AP}^2 - (r_{AP} - h_R)^2} \quad (1)$$

Dessa forma, considerando os dois apalpadores alinhados verticalmente e separados por uma distância conhecida, é possível calcular espessura da faixa em que a condição “*diferença entre as leituras corresponde a h_R* ” é verdadeira, ou seja, a espessura da faixa de contenção do ressalto (e_{FCR}), como ilustrado nas Figuras 49 e 50.

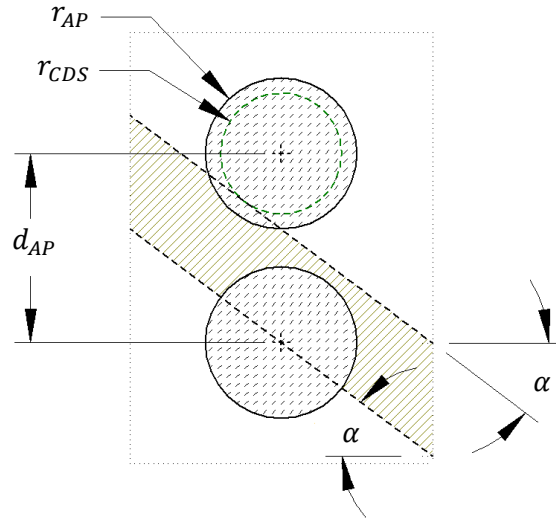


Figura 49 - Faixa de contenção do ressalto.

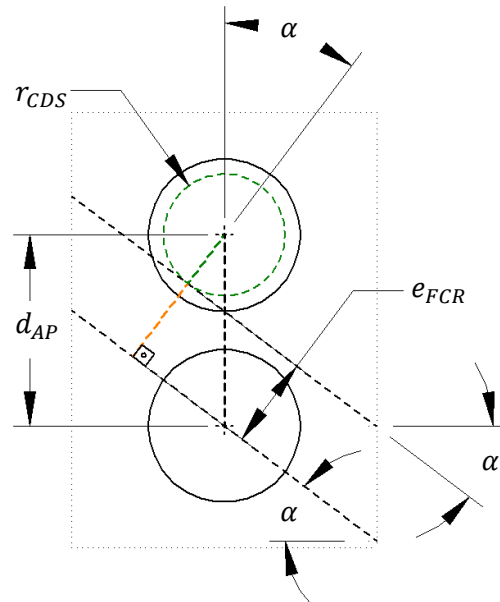


Figura 50 - Cálculo da espessura da faixa de contenção do ressalto.

$$\cos(\alpha) = \frac{e_{FCS} + r_{CDS}}{d_{AP}}$$

$$e_{FCR} = d_{AP} \cos(\alpha) - r_{CDS}$$

E assim:

$$e_{FCR} = d_{PAR} \cos(\alpha) - \sqrt{r_{AP}^2 - (r_{AP} - h_r)^2} \quad (2)$$

Considerando o uso de apalpadores esféricos com ponta de dimensões similares às adotadas na Subseção 5.2 ($r_{AP} \approx 9,5 [mm]$), separados por uma distância $d_{AP} = 20,5 [mm]$, atuando em um painel com inclinação $\alpha = 37^\circ$ e um ressalto com altura $h_r = 3,0 [mm]$, pela Equação (2):

$$\rightarrow e_{FCR} \approx 9,4 [mm]$$

Assim, é possível notar que um par de apalpadores com uma ponta de dimensões similares àquela adotada forneceria uma faixa de contenção do ressalto excessivamente espessa, considerando que o robô deve lidar com a remoção de uma porção de casca com aproximadamente $1,2[mm]$ de espessura. Portanto, se faz necessário adicionar um segundo par de apalpadores ao conjunto de sensores.

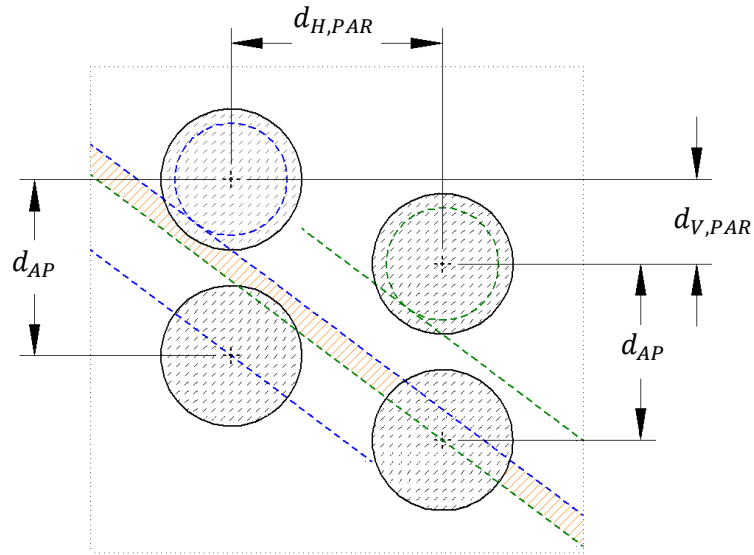


Figura 51 - Faixa de contenção do ressalto resultante de dois pares de apalpadores.

Dessa forma, considerando a Figura 51, a condição “*diferença entre as leituras corresponde a h_r* ” ser verdadeira para o par de apalpadores à esquerda resulta na faixa de contenção do ressalto limitada pelas linhas azuis. Já a mesma condição ser verdadeira para o par de apalpadores à direita resulta na faixa de contenção do ressalto

limitada pelas linhas verdes. Portanto, se a condição for verdadeira para os ambos os pares, o ressalto está contido na interseção das duas faixas, preenchida em laranja.

Assim, é possível manipular a espessura da faixa de contenção do ressalto resultante de dois pares de apalpadores por meio do posicionamento relativo dos mesmos. É possível calcular o distanciamento vertical ($d_{V,PAR}$) entre os pares de apalpadores em função do distanciamento horizontal ($d_{H,PAR}$) ou vice-versa, de forma a garantir determinada espessura da faixa de posições do ressalto. O método é descrito abaixo, considerando a Figura 52.

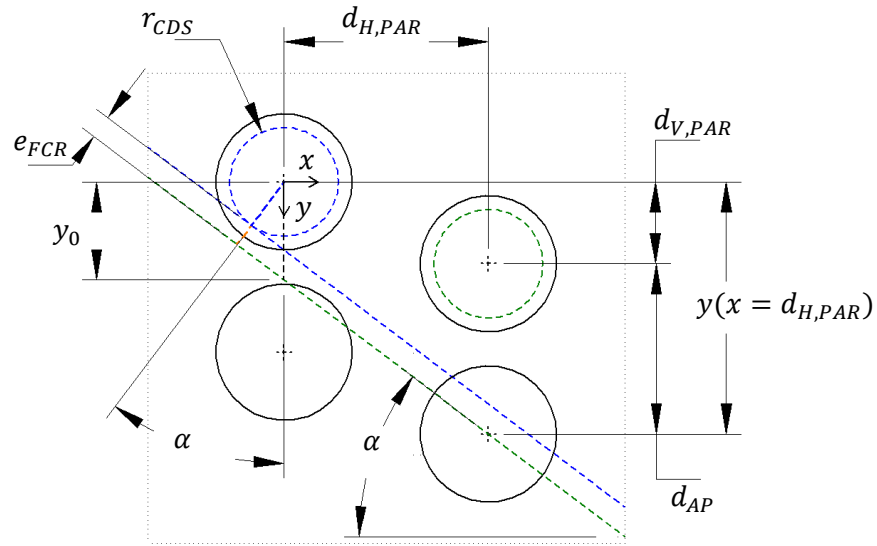


Figura 52 - Cálculo da faixa de contenção do ressalto do par de apalpadores.

$$x = 0 \rightarrow y_0 = \frac{r_{CDS} + e_{FCR}}{\cos(\alpha)}$$

$$y = y_0 + \tan(\alpha) x$$

$$y = \frac{r_{CDS} + e_{FCR}}{\cos(\alpha)} + \tan(\alpha) x$$

Sabendo que a coordenada y corresponde à soma do distanciamento vertical entre pares ($d_{V,PAR}$) com a distância entre os apalpadores de cada par (d_{AP}):

$$y = d_{V,PAR} + d_{AP}$$

$$x = d_{H,PAR}$$

Assim:

$$d_{V,PAR} = \frac{r_{CDS} + e_{FCR}}{\cos(\alpha)} + \tan(\alpha) d_{H,PAR} - d_{AP} \quad (3)$$

Ao substituir a Equação (1) na Equação (3), é possível obter:

$$d_{V,PAR} = \frac{\sqrt{r_{AP}^2 - (r_{AP} - h_R)^2} + e_{FCR}}{\cos(\alpha)} + \tan(\alpha) d_{H,PAR} - d_{AP} \quad (4)$$

Como dito anteriormente, a distância entre os apalpadores de cada par (d_{AP}) deve ser a menor possível, de forma que as variações das leituras referentes às irregularidades da casca sejam mínimas. Na situação ideal, o conjunto de sensores deveria ser projetado de forma a resultar na menor espessura da faixa de contenção do ressalto (e_{FS}) possível, visando guiar o corte com o máximo de precisão. Porém, é importante considerar que quanto mais estreita for a faixa de contenção do ressalto, menos flexível é o conjunto de sensores em relação à faixa de alturas do ressalto das árvores do seringal. Pela Equação (4):

$$e_{FCR} = \frac{(d_{V,PAR} - \tan(\alpha) d_{H,PAR} + d_{AP}) \times \cos(\alpha)}{\sqrt{r_{AP}^2 - (r_{AP} - h_R)^2}} \quad (5)$$

$$h_R \uparrow \rightarrow e_{FCR} \downarrow \quad (6)$$

A situação $e_{FCR} < 0$ indica que a condição de detecção do ressalto de ambos os pares nunca será satisfeita simultaneamente, impossibilitando que a posição do mesmo seja determinada. Assim, o projeto deve ser elaborado considerando a faixa de alturas do ressalto que devem ser englobadas pelo robô, de forma que:

$$h_{R,max} \rightarrow e_{FCR,min} \quad (7)$$

$$h_{R,min} \rightarrow e_{FCR,max}$$

Onde $e_{FCR,min} > 0$ e $e_{FCR,max}$ é compatível com a precisão de corte desejada.

6.3. Posicionamento do Ponto de Corte

Como exposto anteriormente, em uma estrutura de corte funcional, o ponto de contato com a casca corresponde ao ponto de corte. A princípio, o eixo de giro do conjunto de sensores também passaria por este ponto, de forma que o ajuste da inclinação do conjunto de sensores em relação ao painel de corte não alteraria a posição do ponto de corte no cabeçote de corte.

Assim, uma vez que a faixa de contenção do ressalto estabelecida, a posição do ponto de corte pode ser determinada de acordo com a mesma, resultando no consumo de casca desejado (e_{cc}). Isso segue ilustrado nas Figuras 53 e 54, considerando o uso de uma fresa de topo como ferramenta de corte.

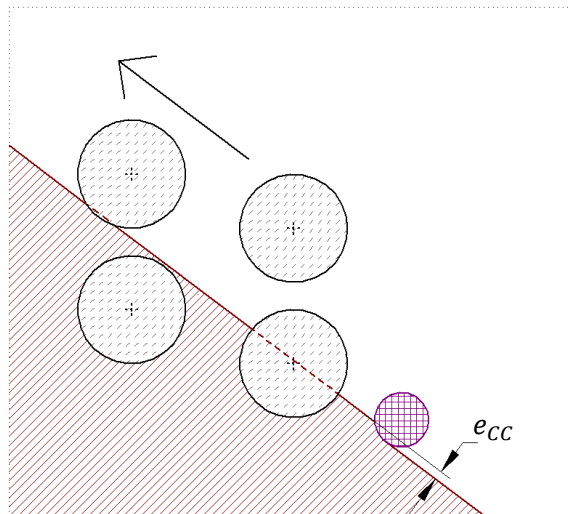


Figura 53 - Corte em andamento.

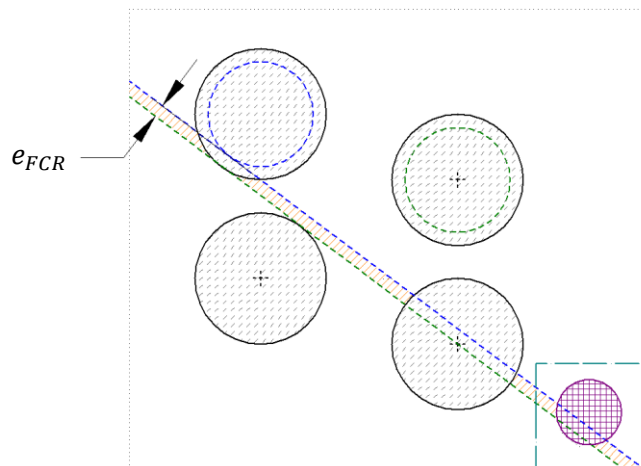


Figura 54 - Posicionamento do ponto de corte.

Dessa forma, o corte poderia ser executado garantindo um consumo mínimo de casca $e_{CC,min}$ e um consumo máximo de casca $e_{CC,max}$. É possível observar isso com mais clareza por meio da Figura 55.

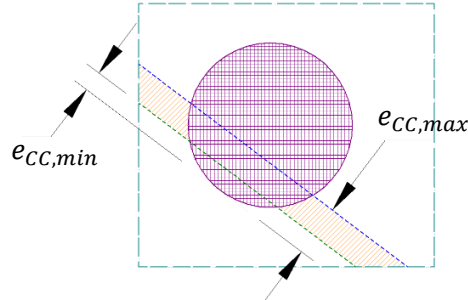


Figura 55 - Faixa de consumo de casca.

De forma que:

$$e_{CC,min} \leq e_{CC} \leq e_{CC,max} \quad (8)$$

$$e_{CC,max} = e_{CC,min} + e_{FCR}$$

Ficando assim evidente que a espessura da faixa de contenção do ressalto possui um papel fundamental na precisão de corte obtida. Vale lembrar que e_{FCR} é uma função de h_R , de forma que a faixa de altura dos ressaltos das árvores do cultivo deve ser levada em consideração ao se elaborar o projeto do conjunto, uma vez que o acréscimo da altura do ressalto faria com que $e_{CC,max}$ tendesse a $e_{CC,min}$.

6.4. Procedimento de Alinhamento

Vale notar que a correspondência da inclinação do conjunto de sensores com a inclinação do painel de corte é necessária para que o corte seja guiado corretamente, uma vez que desalinhamentos em relação ao painel entre as situações limite ilustradas na Figura 56 não seriam constatados pelo conjunto de sensores.

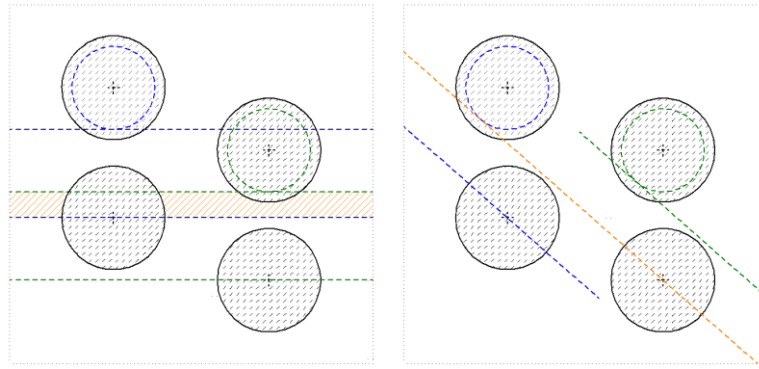


Figura 56 - Configurações de desalinhamento entre o conjunto de sensores e o painel de corte não detectáveis pelo par.

Nesse contexto, garantir o alinhamento entre o conjunto de sensores e o painel assume um papel fundamental. Um procedimento que pode ser adotado para esse fim será descrito adiante. Inicialmente, deve-se girar o conjunto de sensores por $\Delta\theta$, até que o ângulo entre a linha que liga o centro dos apalpadores superiores corresponda ao ângulo do painel de corte adotado no cultivo (α), como ilustrado na Figura 57.

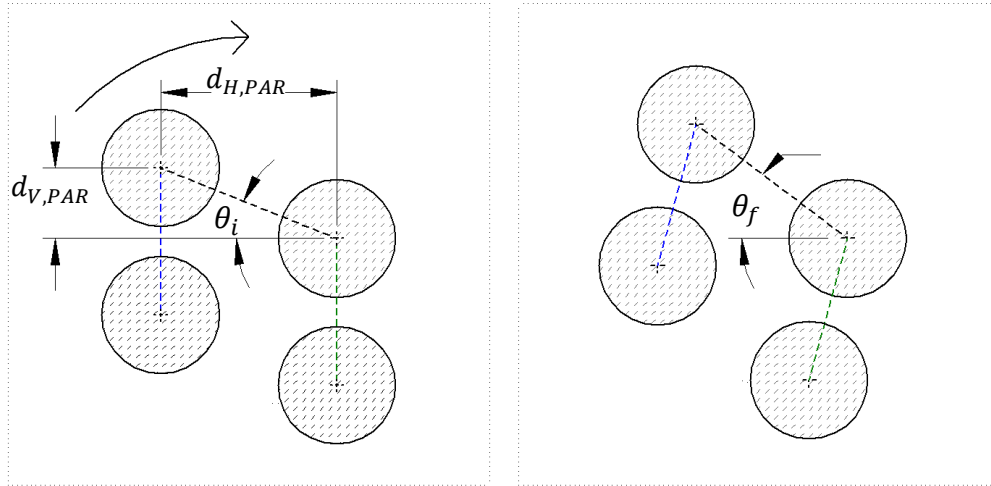


Figura 57 - Procedimento de Alinhamento - Passo 1

De forma que:

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{d_{V,PAR}}{d_{H,PAR}} \right); \theta_f = \alpha \quad (9)$$

$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$$

O passo seguinte é pressionar os sensores contra a casca virgem e desliza-los para cima até que o ressalto do painel de corte seja encontrado. Caso exista um desalinhamento no sentido anti-horário, o apalpador superior à esquerda vai detectar o ressalto antes do apalpador superior à direita. Essa constatação permite de o conjunto de sensores seja descido pela casca virgem, gire um passo no sentido horário e repita o processo. Esse procedimento segue representado na Figura 58.

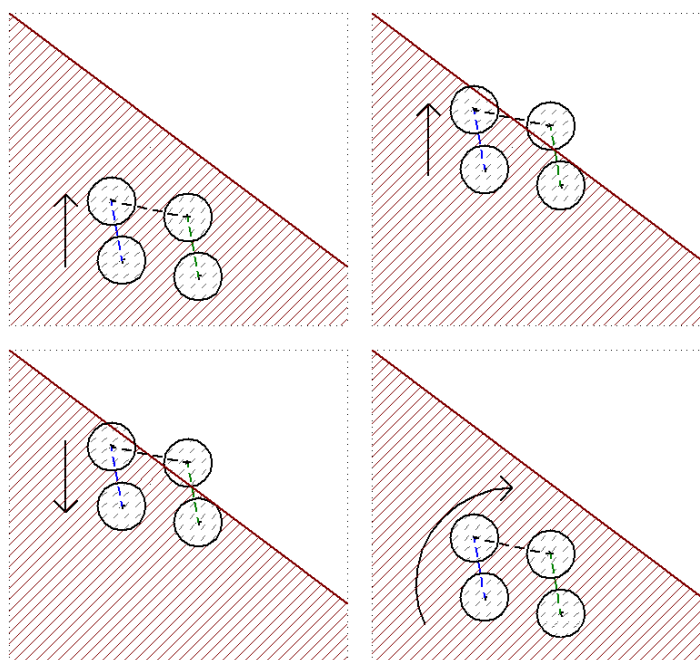


Figura 58 - Procedimento de Alinhamento - Passos 2 a 5 - Desalinhamento no sentido anti-horário.

De forma similar, caso exista um desalinhamento no sentido horário, o apalpador superior à direita vai constatar o ressalto antes do apalpador superior à esquerda. Isso permite que o conjunto de sensores desça pela casca virgem, gire um passo no sentido anti-horário e repita o processo. O procedimento é ilustrado na Figura 59.

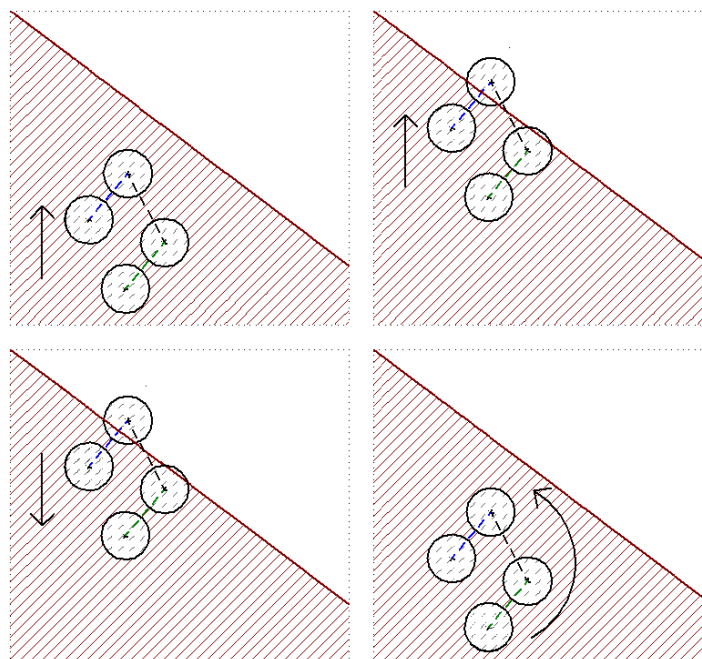


Figura 59 - Procedimento de Alinhamento - Passos 2 a 5 - Desalinhamento no sentido horário.

Uma vez que o conjunto de sensores esteja alinhado em relação ao painel de corte, o ressalto será detectado simultaneamente, como ilustrado na Figura 60.

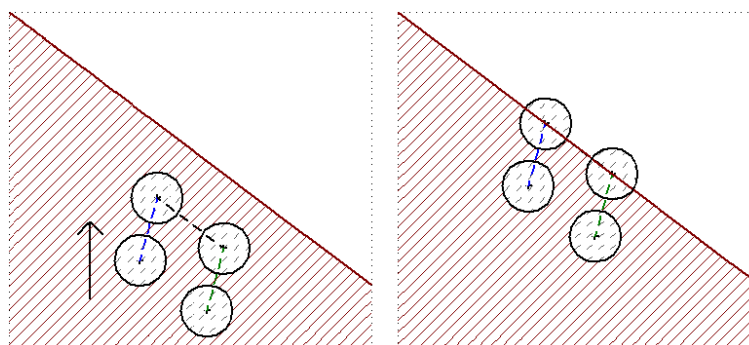


Figura 60 - Procedimento de Alinhamento - Alinhamento atingido.

6.5. Procedimento de Determinação do Ponto de Início de Corte

Com o alinhamento garantido, é possível utilizar um procedimento similar ao anterior para determinar o ponto de início de corte. Inicialmente, deve-se girar o conjunto de sensores por $\Delta\theta$, até que o ângulo entre a linha que liga o centro dos apalpadores superiores esteja alinhado com a vertical, conforme ilustrado na Figura 61.

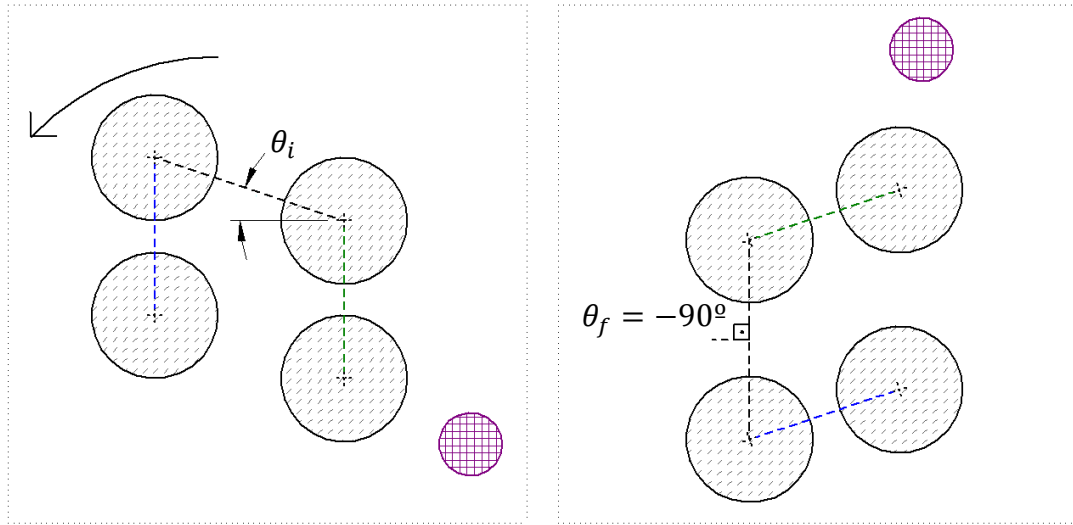


Figura 61 - Determinação do Ponto de Início de Corte - Passo 1.

De forma que:

$$\theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{d_{V,PAR}}{d_{H,PAR}} \right) ; \theta_f = -90^\circ \quad (10)$$

$$\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$$

Na sequência, os apalpadores são pressionados contra a casca virgem à direita do ressalto vertical do painel, e são deslizados para a esquerda até que o ressalto seja encontrado. Essa situação segue ilustrada na Figura 62.

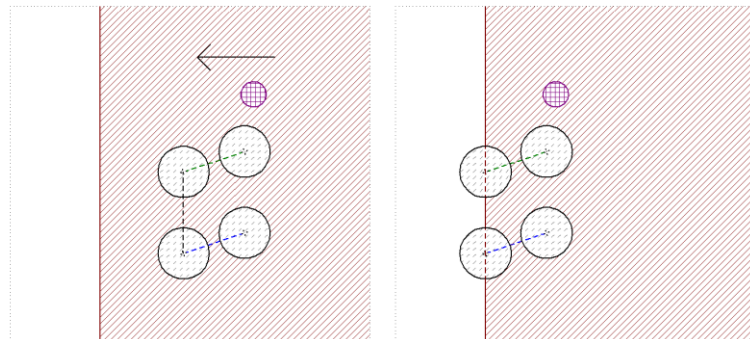


Figura 62 - Determinação do Ponto de Início de Corte - Passos 2 e 3.

Uma vez com o painel encontrado, o avanço deve continuar até que o ponto de corte chegue a uma posição aproximadamente tangente ao ressalto vertical. Esse segundo avanço será calculado ao considerar as dimensões do conjunto de sensores e os dados provenientes do sistema responsável pelo controle de movimentos, descrito na Subseção 6.7. Na sequência, o conjunto de sensores deverá ser girado em torno do ponto de corte até que o ângulo entre a linha que liga o centro dos apalpadores superiores corresponda ao ângulo do ressalto, e então será deslizado para baixo pelo painel de corte. Esse procedimento segue ilustrado na Figura 63.

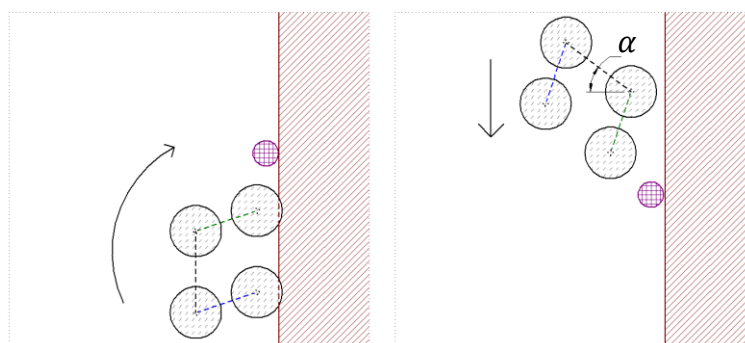


Figura 63 - Determinação do Ponto de Início de Corte - Passos 4 a 6.

Após encontrar o ressalto inferior do painel de corte, o conjunto de sensores deverá ser girado em torno do ponto de corte até que o ângulo entre a linha que liga o centro dos apalpadores superiores corresponda à configuração de corte. Então, o ajuste de posição vertical deve ser feito de forma a garantir o consumo de casca adequado, conforme ilustrado na Figura 64.

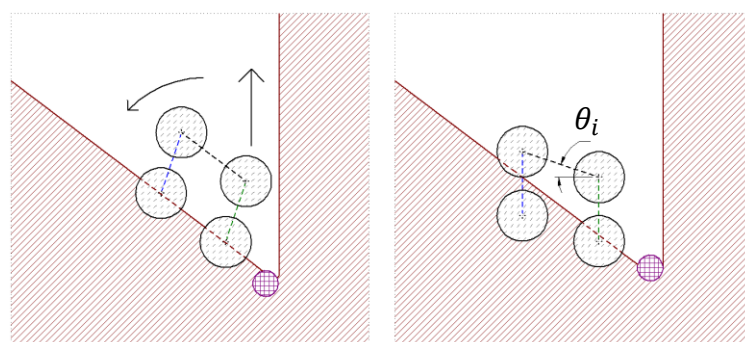


Figura 64 - Determinação do Ponto de Início de Corte - Passos 7 a 9.

Na sequência, basta ligar a ferramenta de corte, realizar o movimento de avanço frontal até que o limitador entre em contato com a casca, e iniciar o movimento em espiral. A princípio, o grau de precisão do posicionamento resultante desses procedimentos deriva principalmente da resposta dos sensores utilizados para a medição de distâncias medidas pelos apalpadores. A dificuldade em estimar a magnitude do efeito que as irregularidades da casca terão sobre a execução dos mesmos torna necessária uma análise experimental.

6.6. Avanço Frontal dos Apalpadores

Considerando um apalpador disposto em um plano tangente a um tronco cilíndrico com raio R_{ARV} e afastado por uma distância x_{AP} do ponto de contato com o tronco, é possível calcular o avanço av_{CC} que teria que ser realizado de forma a compensar a curvatura da casca. Essa situação segue ilustrada na Figura 65.

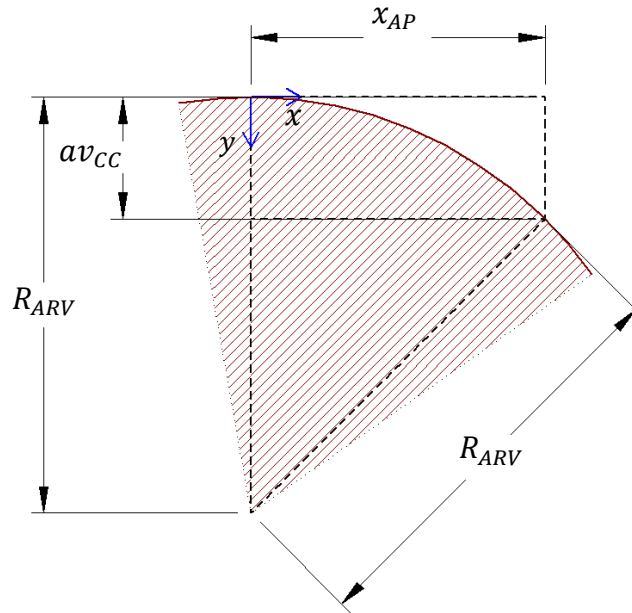


Figura 65 - Avanço frontal demandado pela curvatura de um tronco cilíndrico.

Assim, é possível chegar à Equação (11):

$$av_{CC} = R_{ARV} - \sqrt{R_{ARV}^2 - x_{AP}^2} \quad (11)$$

No entanto, um tronco real não possui formato cilíndrico, de forma que a curvatura da sua casca varia significativamente a medida que é percorrida. Isso pode ser observado por meio da Figura 66, que consiste de uma vista de topo do tronco utilizado como referência.



Figura 66 - Curvaturas no tronco utilizado como referência.

É possível notar que existem trechos do perímetro do tronco com curvatura aproximadamente nula, próximas da condição plana (como o trecho evidenciado pela linha verde) e trechos com curvatura bem expressiva (como o trecho evidenciado pelo arco azul). Portanto, os apalpadores devem ser capazes de lidar com a condição plana e possuir um avanço capaz de compensar a curvatura máxima do tronco, ou seja, o trecho que corresponde ao menor raio. Assim:

$$av_{CC} = R_{ARV,min} - \sqrt{R_{ARV,min}^2 - x_{AP}^2} \quad (12)$$

Além de avançar frontalmente até entrar em contato com a casca, o apalpador deve ser capaz de avançar a partir desse ponto por um curso equivalente à altura máxima do ressalto do cultivo ($h_{R,max}$), de forma a tornar possível a medição da diferença entre as distâncias entre as pontas que constituem o par e, portanto, permitir a detecção do ressalto.

$$av_{AR} = h_{R,max} \quad (13)$$

Ainda, considerando um conjunto com a capacidade de corte implementada, uma parcela do avanço também deve permitir que os procedimentos de alinhamento e posicionamento inicial do ponto de corte sejam executados sem que a ferramenta de corte encoste na casca. Dessa forma, é possível calcular o avanço total da ponta que é demandado, considerando sua distância até o ponto de contato normal à casca, como ilustrado pela Figura 67.

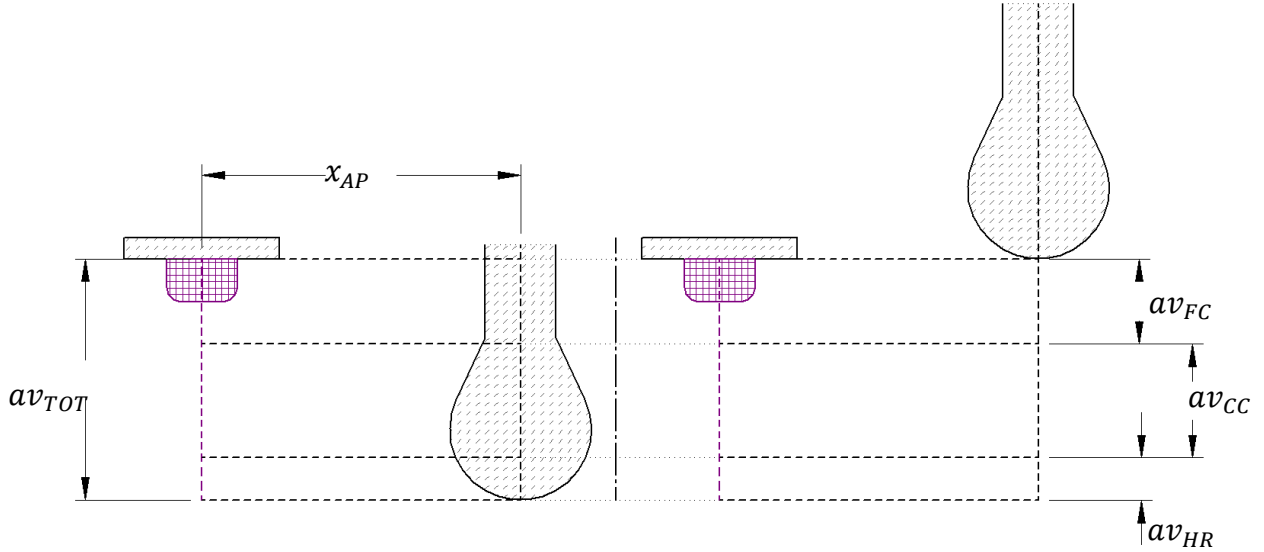


Figura 67 - Avanço frontal total do apalpador.

Onde av_{FC} corresponde ao avanço devido à ferramenta de corte, av_{CC} corresponde ao avanço devido à curvatura da casca e av_{AR} corresponde ao avanço devido à altura máxima do ressalto. Dessa forma, temos que:

$$av_{TOT} \geq av_{FC} + av_{CC} + av_{AR} \quad (14)$$

Que, considerando as Equações (9) e (10), resulta em:

$$av_{TOT} \geq av_{FC} + \left(R_{ARV,min} - \sqrt{R_{ARV,min}^2 - x_{AP}^2} \right) + h_{R,max} \quad (15)$$

Foram consideradas duas abordagens para promover o avanço frontal dos apalpadores necessário. Ambas serão descritas na sequência.

6.6.1. Primeira Abordagem de Promoção do Avanço Frontal

A primeira consiste em adotar apalpadores com cursos relativamente longos, que possam constatar variações da posição da ponta em relação ao plano tangente durante todo o curso correspondente a av_{TOT} , conforme ilustrado na Figura 68.

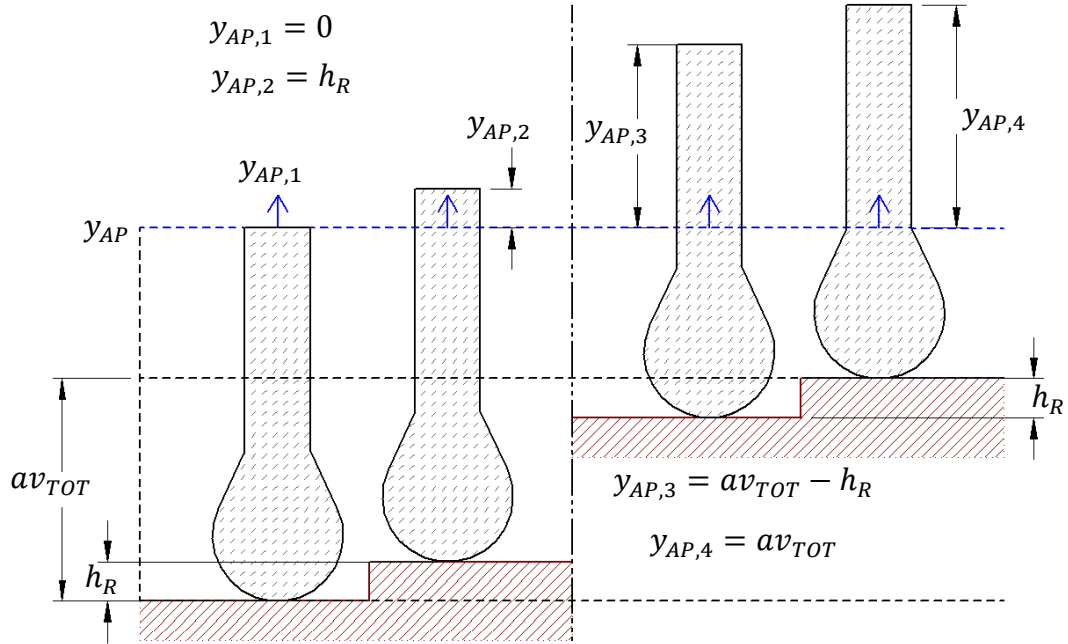


Figura 68 - Primeira abordagem de promoção do avanço frontal dos apalpadores.

Relacionando a retração dos apalpadores (y_{AP}) com a diferença entre as distâncias até a casca correspondente (Δh_{AP}):

$$0 \leq y_{AP} \leq av_{TOT} ; \Delta h_{AP} = \Delta y_{AP} \quad (16)$$

6.6.2. Segunda Abordagem de Promoção do Avanço Frontal

A segunda abordagem consiste em instalar o par de apalpadores em uma estrutura capaz de realizar um avanço frontal, constatado por um sensor. Um dos apalpadores é fixo na estrutura, enquanto o outro é capaz de realizar um avanço frontal em relação a mesma, sendo constatado por outro sensor.

Se faz necessário constatar a posição do avanço da estrutura que contém os pares para que seja possível determinar se o par está em contato com a casca da árvore em uma situação em que o apalpador que possui movimento relativo se encontra avançado e o limitador de corte não está fazendo contato com a casca. Por exemplo, quanto os procedimentos de alinhamento e determinação do ponto inicial de corte estão sendo executados. No entanto, considerando que o contato com a casca seja garantido, apenas o avanço do apalpador com movimento relativo tem relevância na detecção do ressalto. A segunda abordagem segue ilustrada na Figura 69.

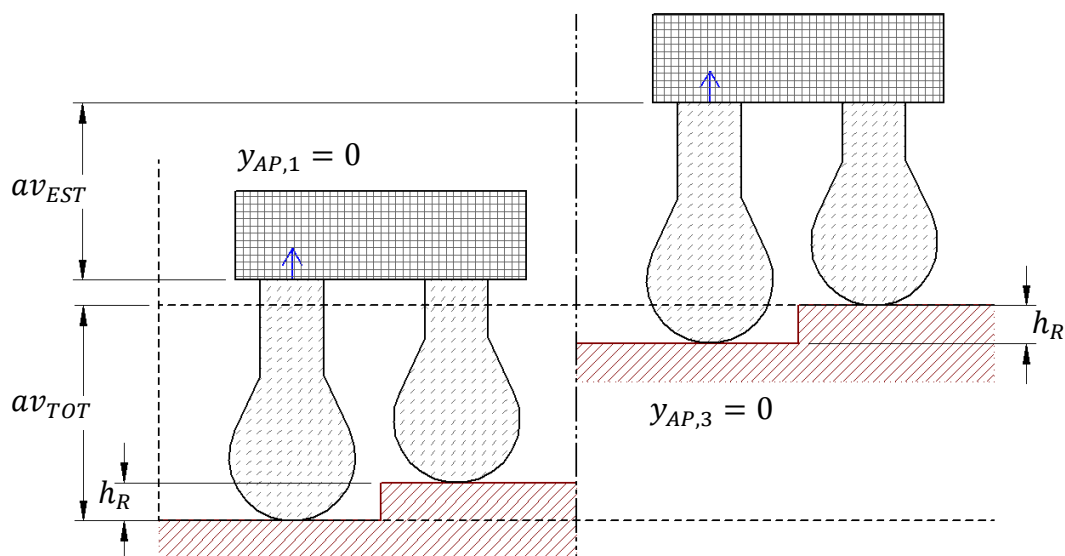


Figura 69 - Segunda abordagem de promoção do avanço frontal dos apalpadores.

Assim, é possível observar que a retração de um apalpador em relação ao outro indica apenas a diferença das distâncias até a casca constadas por ambos. A Figura 70 ilustra um caso onde o par entra em contato com uma superfície uniforme.

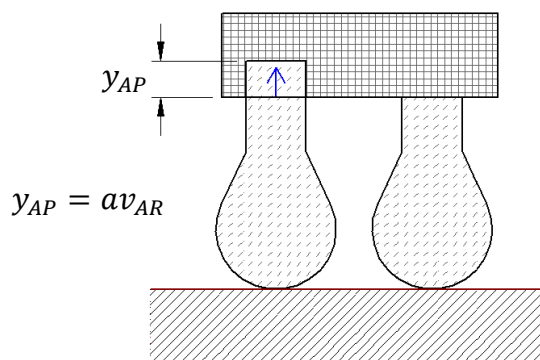


Figura 70 - Segunda abordagem de promoção do avanço frontal dos apalpadores - Superfície uniforme.

Relacionando a retração dos apalpadores (y_{AP}) com a diferença entre as distâncias até a casca correspondente (Δh_{AP}):

$$0 \leq y_{AP} \leq av_{AR} ; \Delta h_{AP} = av_{AR} - y_{AP} \quad (17)$$

É importante notar que o avanço da estrutura que contém o par deve ser suficiente para garantir o restante do avanço total demandado. Assim, por meio das Equações (12) e (14):

$$av_{EST} \geq av_{FC} + \left(R_{ARV,min} - \sqrt{R_{ARV,min}^2 - x_{AP}^2} \right) \quad (18)$$

6.6.3. Comparando as Abordagens

A primeira abordagem tem como vantagem o fato de que facilita o design mecânico do conjunto, uma vez que uma mesma estrutura poderia oferecer suporte para os dois pares de apalpadores e para os demais componentes do cabeçote de corte. No entanto, essa abordagem demanda o uso de sensores para a detecção do ressalto com cursos mais longos.

Já a segunda abordagem possibilita o uso de sensores para a detecção do ressalto com cursos úteis mais curtos, o que pode permitir ganho de precisão. No entanto, resulta em um design mecânico relativamente mais complexo.

6.7. Controle dos Movimentos

O controle do movimento rotacional em torno do tronco e do movimento paralelo à linha de centro do mesmo é necessário para promover o percurso em espiral correspondente ao corte, e também para a realização dos procedimentos de alinhamento e de determinação do ponto inicial de corte. O método que estabelece a base para esse controle será descrito na sequência.

6.7.1. Modelagem Matemática

A modelagem será iniciada ao considerar uma representação planificada do painel de corte, conforme a Figura 71.

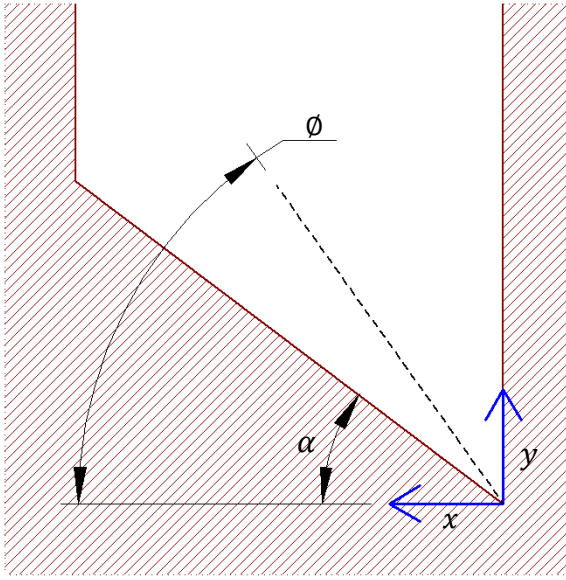


Figura 71 - Versão planificada do painel de corte.

Para que um ponto de referência percorra um trajeto retilíneo nesse plano, partindo da origem, com ângulo ϕ em relação ao eixo x , bastaria fazer o controle das velocidades na horizontal ($\dot{x} = V_H$) e na vertical ($\dot{y} = V_V$) de forma que a relação entre elas correspondesse à tangente do ângulo da trajetória desejada, ou seja:

$$\tan \phi = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \frac{V_V}{V_H} \quad (19)$$

Se um tronco cilíndrico com raio R_{ARV} fosse envolto por essa planificação do painel de corte, a trajetória tracejada iria corresponder a um percurso em espiral. O movimento do ponto de referência para acompanhar esse percurso poderia ser promovido por meio de um movimento rotacional e do movimento vertical, sabendo que o comprimento do arco resultante do movimento rotacional deve ser equivalente ao movimento horizontal da situação planificada. Assim, pela Equação (19):

$$V_H \equiv \omega_{Rot} \times R_{ARV} \quad (20)$$

$$\tan \phi = \frac{V_V}{\omega_{Rot} \times R_{ARV}} \quad (21)$$

Apesar do tronco de uma árvore não possuir formato cilíndrico, a mesma consideração é válida se o raio instantâneo da curvatura for utilizado. Se trata da distância do ponto de contato com a casca até o ponto de giro do tronco, que consiste de uma função da posição angular do ponto de referência. Assim, pela Equação (21):

$$\frac{V_V}{\omega_{Rot}} = R_{ARV,inst}(\theta) \times \tan \phi \quad (22)$$

Com isso, conhecer o raio instantâneo do tronco no ponto de referência, que pode ser calculado pelo controle de posição do mecanismo de avanço frontal (como descrito na Subseção 3.1), permite que trajetórias estabelecidas na versão planificada do painel de corte sejam reproduzidas no mesmo, por meio do controle de velocidade do movimento rotacional e do movimento paralelo à linha de centro do tronco.

6.7.2. Modelagem no Simulink

Esse procedimento de ajuste das velocidades em função do raio instantâneo será ilustrado por meio de um modelo desenvolvido na interface *Simulink*, considerando um tronco com formato elíptico, ilustrado na Figura 72.

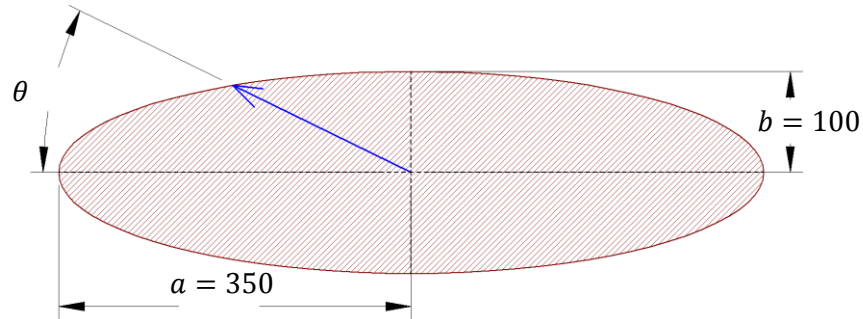


Figura 72 - Modelo de tronco elíptico (dimensões em milímetros).

Nesse caso, o raio instantâneo do tronco em função de θ é dado pela Equação:

$$R_{ARV,inst}(\theta) = \frac{ab}{\sqrt{a^2(\sin \theta)^2 + b^2(\sin \theta)^2}} \quad (23)$$

A Equação (23) pode ser escrita na forma de um diagrama de blocos como ilustrado na Figura 73, considerando as dimensões de a e b da Figura 72.

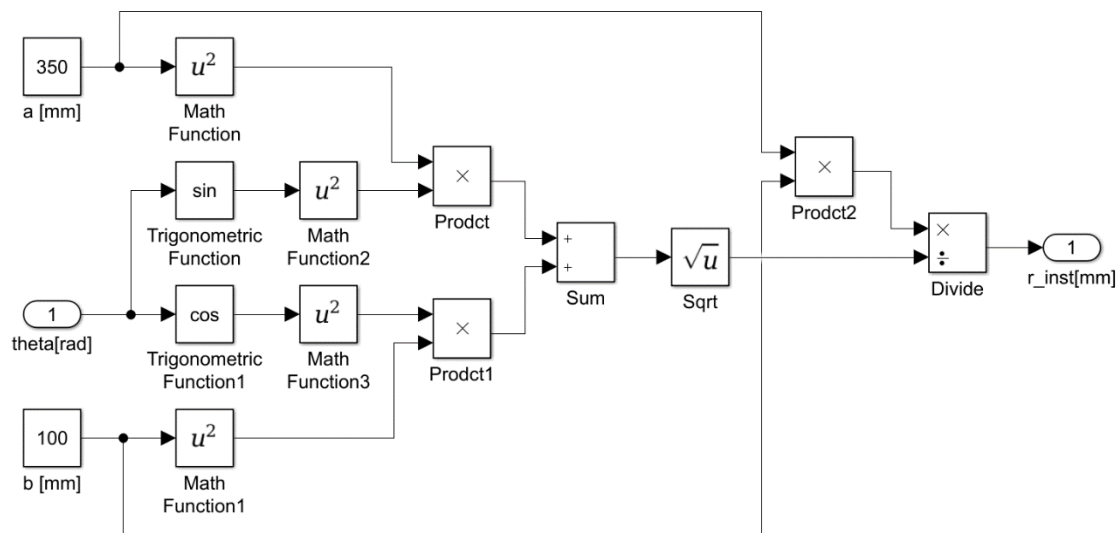


Figura 73 - Modelo Simulink - Raio instantâneo do tronco elíptico.

O diagrama de blocos da Figura 73 consiste do subsistema “elipse-raio(theta)”, que foi usado no modelo de controle de movimentos, ilustrado na Figura 74.

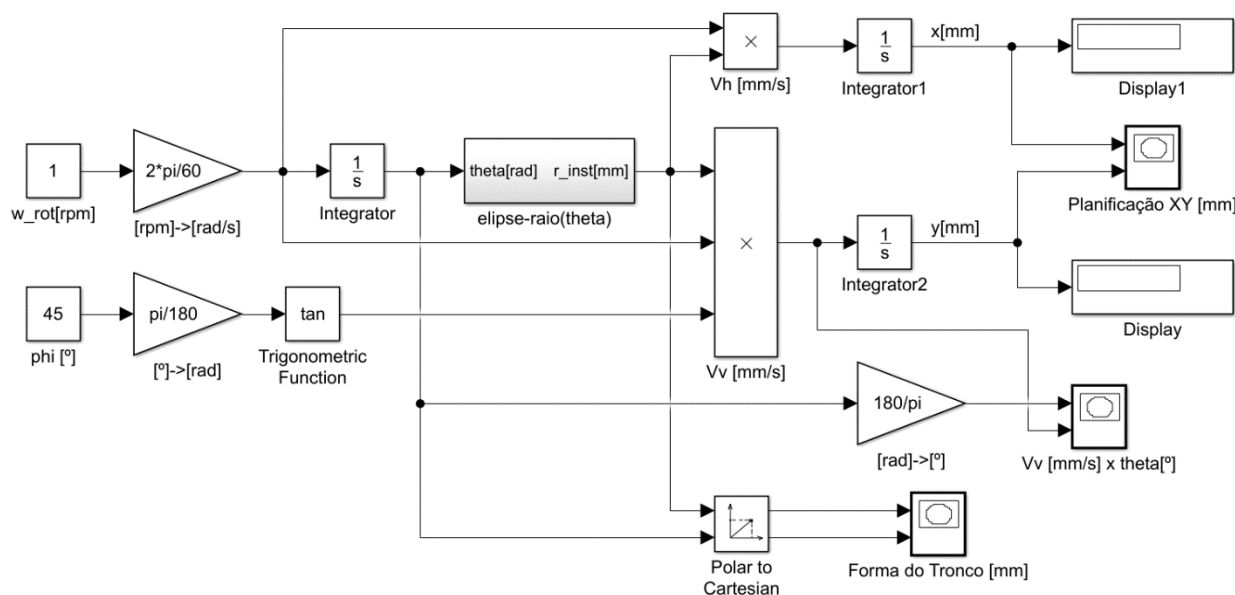


Figura 74 - Modelo Simulink - Controle de Movimentos.

No caso, a velocidade de rotação ao redor do tronco ω_{Rot} foi considerada constante. A posição θ pode ser determinada ao integrar a ω_{Rot} em relação ao tempo, sendo usada para a determinação do raio instantâneo correspondente ao tronco elíptico. Com esses dados, pela Equação (22), a velocidade vertical pode ser calculada:

$$V_V = R_{ARV,inst}(\theta) \times \tan \phi \times \omega_{Rot} \quad (24)$$

Dessa forma, é garantido que o ângulo ϕ desejado seja obtido na planificação do percurso resultante das velocidades. O modelo gera os gráficos da forma do tronco, da velocidade vertical em função da posição angular e da planificação do percurso no plano cartesiano. Nas Figuras 75, 76 e 77 seguem os resultados obtidos, ao adotar $\omega_{Rot} = 1[rpm]$ e $\phi = 45^\circ$.

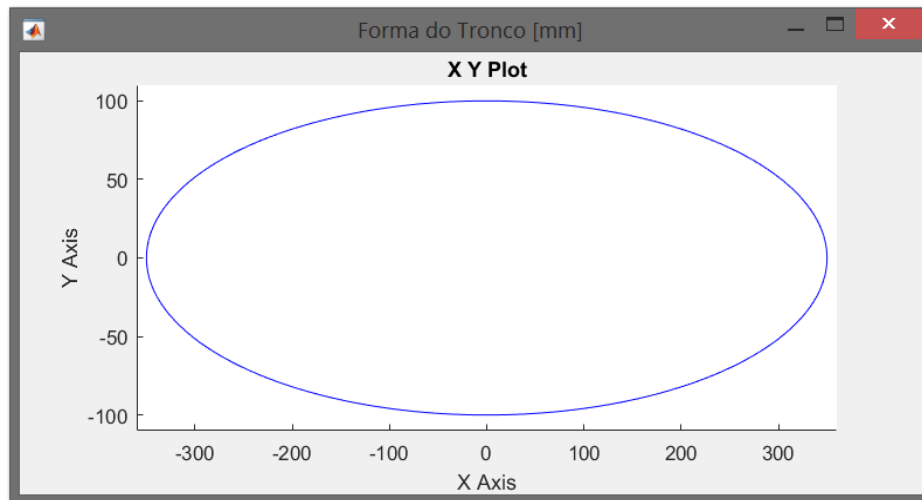


Figura 75 - Modelo Simulink - Resultados, Forma do Tronco.

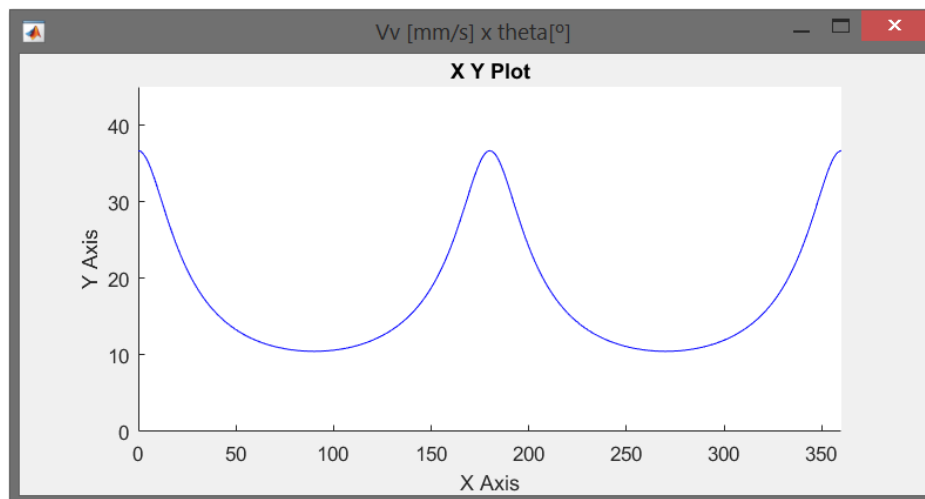


Figura 76 - Modelo Simulink - Resultados, $V_V(\theta)$.

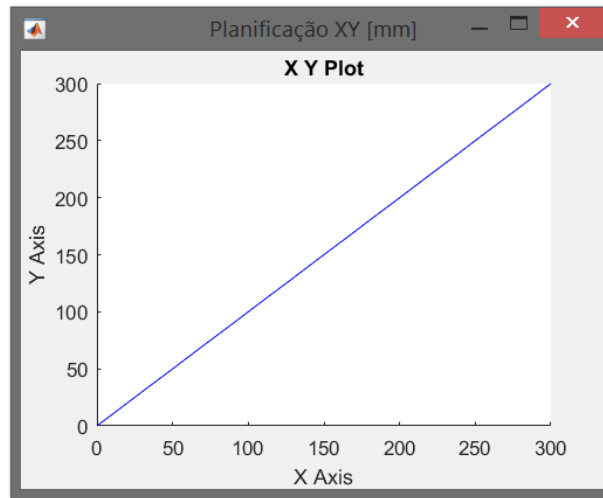


Figura 77 - Modelo Simulink - Resultados, percurso no tronco planificado.

Assim, é possível observar que a velocidade vertical aumenta nos trechos com maior curvatura e diminui nos trechos menos curvos, garantindo que o percurso equivalente no tronco planificado mantenha a inclinação desejada.

7. PROJETO DO PROTÓTIPO DO CONJUNTO DE SENSORES

Com os resultados obtidos anteriormente, foi possível estabelecer um procedimento de projeto do conjunto de sensores, considerando o uso de apalpadores esféricos. No projeto do protótipo, a segunda abordagem de promoção do avanço frontal do par foi adotada, possibilitando que o potenciômetro deslizante “B503 50K - Curso Total 10mm”, que resultou na maior precisão nos testes, mas possui um curso relativamente curto, fosse utilizado.

Além disso, uma vez que o objetivo do protótipo é testar o sistema que guia o corte, não lidando com o procedimento de corte em si, o ponto de contato com a casca e de rotação do conjunto foi adotado como sendo o centro do apalpador inferior à direita. Isto eliminou a necessidade de avanço da estrutura que contém o par à direita. Ainda, a ausência da ferramenta de corte eliminou a necessidade de medir o avanço da estrutura do par à esquerda.

7.1. Cálculos

Como exposto anteriormente, a ponta dos apalpadores consiste de uma bola de gude correspondendo a $r_{AP} \approx 9,5 [mm]$. A distância vertical entre os apalpadores de cada par deve ser compatível com o diâmetro das pontas adotadas, de forma que foi estabelecida como $d_{AP} = 20,0 [mm]$. Após o design da estrutura do apalpador, foi constatado que horizontal entre pares obtida foi de $d_{H,PAR} = 35,5 [mm]$, sendo que esse resultado deriva principalmente do tipo de mecanismo de avanço frontal e das espessuras das paredes adotadas, que no caso foram de $2,0 [mm]$.

A inclinação e a altura do ressalto do painel de corte correspondem ao painel esculpido no tronco, de forma que $\alpha = 37^\circ$ e $h_R = 3,0 [mm]$. Uma vez que se trata de um protótipo preliminar, foi adotada uma faixa de contenção do ressalto relativamente espessa, evitando que a imprecisão do controle dos movimentos resulte na paralização frequente dos procedimentos de corte simulados. Dessa forma, foi estabelecido que $e_{FCR} = 5,0 [mm]$.

Com esses dados, foi possível calcular distância vertical entre pares por meio da Equação (3), obtida anteriormente:

$$d_{V,PAR} = \frac{\sqrt{r_{AP}^2 - (r_{AP} - h_R)^2} + e_{FCR}}{\cos(\alpha)} + \tan(\alpha) d_{H,PAR} - d_{AP} \quad (3)$$

$$\rightarrow d_{V,PAR} \approx 21,7 [mm]$$

Objetivando aproveitar o máximo do curso do potenciômetro deslizante, o avanço relativo entre os apalpadores de um mesmo par foi estabelecido como:

$$av_{AR} = 6,0 [mm]$$

No caso desse projeto, a distância horizontal entre pares também corresponde à distância do segundo par ao ponto de referência em contato com a casca. Assim, essa distância foi utilizada para calcular o avanço frontal necessário da estrutura que contém o par com movimento relativo, através da Equação (18).

$$av_{EST} \geq av_{FC} + \left(R_{ARV,min} - \sqrt{R_{ARV,min}^2 - x_{AP}^2} \right) \quad (18)$$

Experimentalmente, por meio de um compasso e uma régua, foi constatado que a curvatura máxima do tronco em questão corresponde a aproximadamente 60 [mm] de raio. Assim, a fim de estabelecer certa margem de segurança, o raio de curvatura mínimo de $R_{ARV,min} = 45 [mm]$ foi adotado no projeto deste protótipo. Assim, pela Equação (18):

$$\rightarrow av_{EST} \geq 17,34 [mm]$$

Com isso, foi estabelecido que:

$$av_{EST} = 20,0 [mm]$$

Na sequência, o design mecânico foi elaborado de forma a atender as medidas principais obtidas por meio dos cálculos. Estas medidas estão ilustradas na Figura 78.

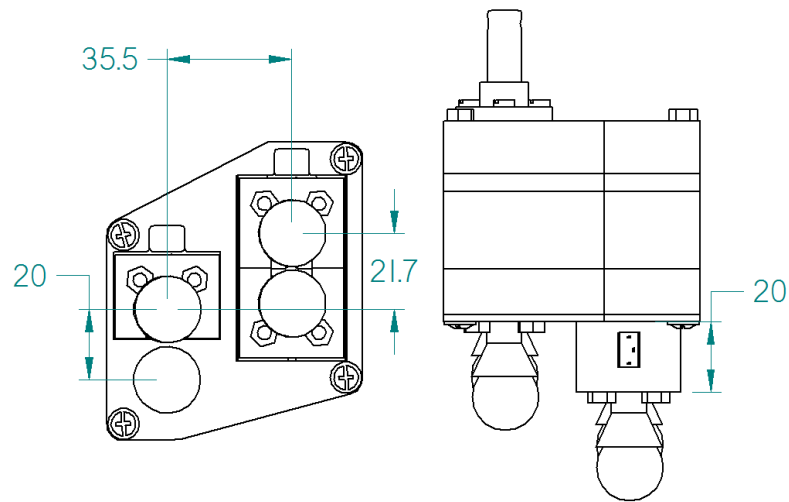


Figura 78 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Medidas principais (dimensões em milímetros).

7.2. Design Obtido

A seguir, as Figuras 79 a 86 ilustram o procedimento de montagem do conjunto de sensores obtido, indicando alguns dos componentes mais relevantes. A Figura 79 expõe a estrutura interna dos apalpadores. A posição do cursor do potenciômetro deslizante quando completamente avançado e a posição quando completamente retraído foram escolhidas de forma a corresponderem ao trecho do curso total que apresentou a maior precisão ($x_i = 2 [mm]$ e $x_f = 8 [mm]$), que pode ser constatado na Tabela 1. A aba da ponta do apalpador possui as funções de evitar que esforços mecânicos sejam transmitidos para o cursor e de limitar o avanço frontal.

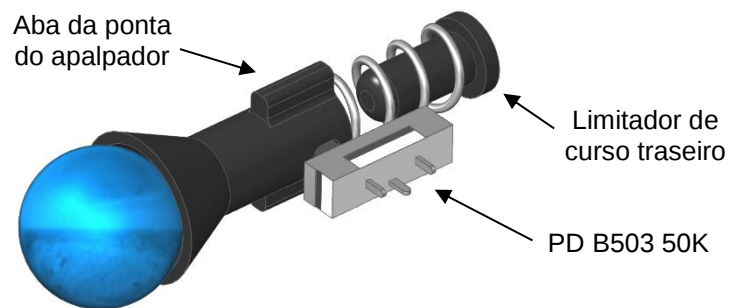


Figura 79 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Interior dos apalpadores.

A estrutura interna do par móvel, retratada na Figura 80, fornece o suporte para a bola de gude fixa à estrutura e para os componentes do interior do apalpador, expostos na Figura 79.

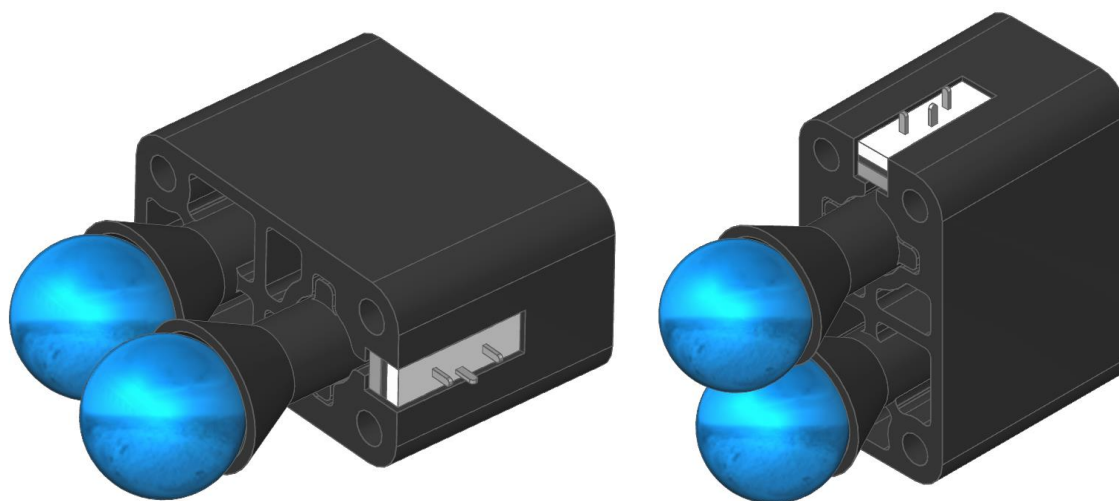


Figura 80 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Estrutura interna do par móvel.

Por meio da Figura 81 é pode-se observar que o par é envolvido por peças que possuem as funções de manter o potenciômetro no lugar correto e limitar o movimento da ponta do apalpador. Ainda, uma aba limita o avanço do par como um todo.

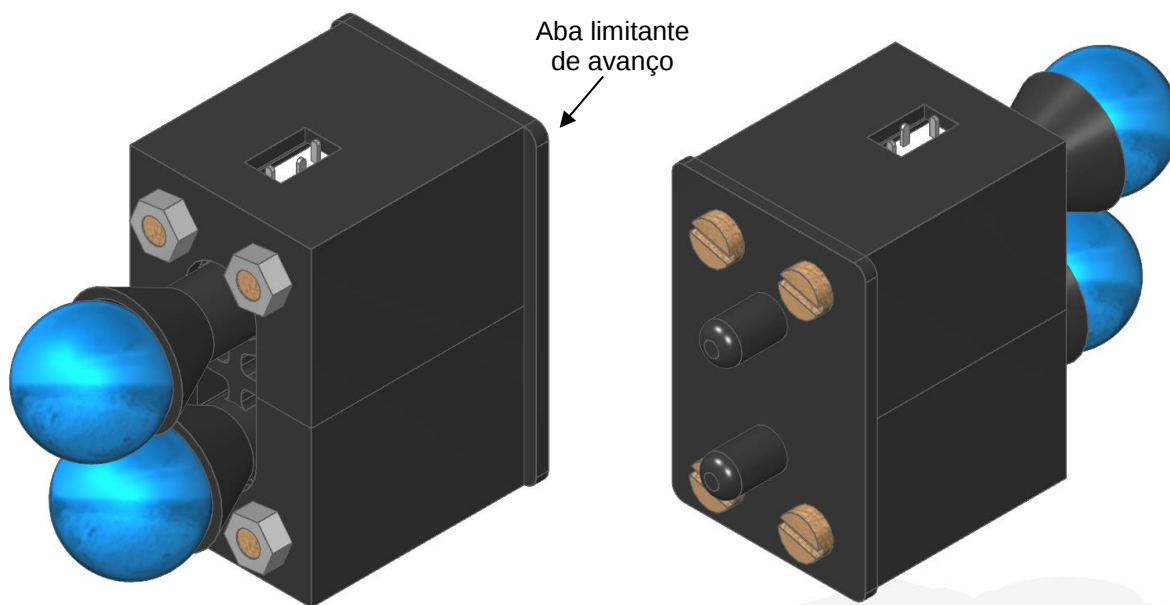


Figura 81 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Par com movimento relativo.

O design do apalpador fixo pode ser observado na Figura 82.

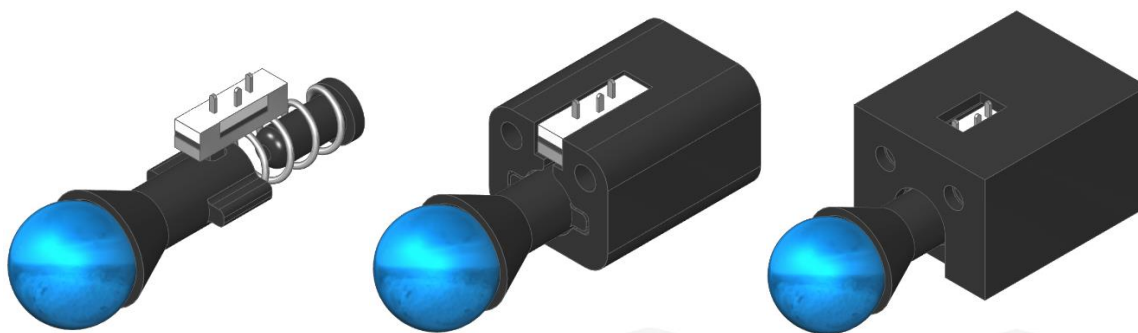


Figura 82 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Apalpador fixo.

A Figura 83 exibe a estrutura de apoio principal, onde são encaixadas as estruturas exibidas nas Figuras 81 e 82. Também é possível observar a aba que limita o avanço frontal do par móvel.



Figura 83 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Estrutura de apoio principal.

As Figuras 84 e 85 apresentam as estruturas exibidas anteriormente montadas na estrutura de apoio principal e a parte traseira do conjunto de sensores, respectivamente. É possível observar as molas responsáveis pelo avanço frontal do par móvel e o eixo que será posteriormente conectado ao servomotor do carro do protótipo.

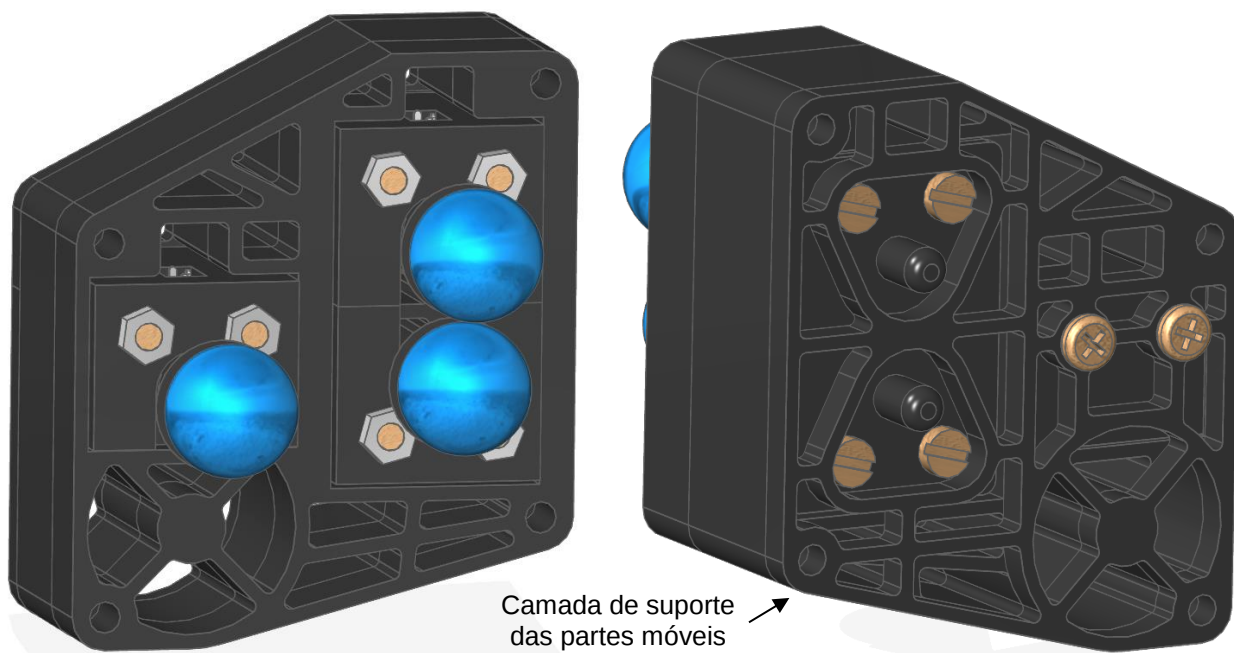


Figura 84 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Montagem dos pares.

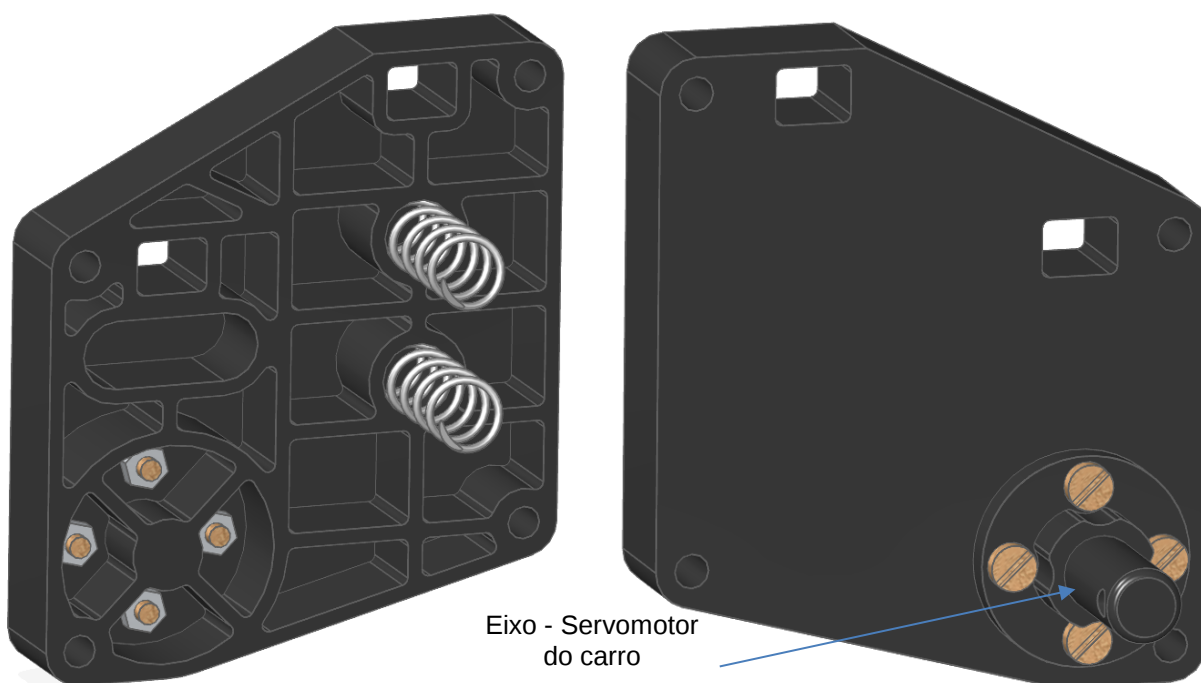


Figura 85 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Estrutura traseira.

Na Figura 86 é possível observar o conjunto de sensores completo e, na Figura 87 segue exposto o resultado obtido por meio da impressão 3D dos componentes apresentados nas Figuras anteriores. Vale notar que o eixo que será posteriormente conectado ao servomotor do carro não foi produzido até o encerramento deste trabalho, uma vez que seu design final depende do dimensionamento do restante dos componentes do carro.

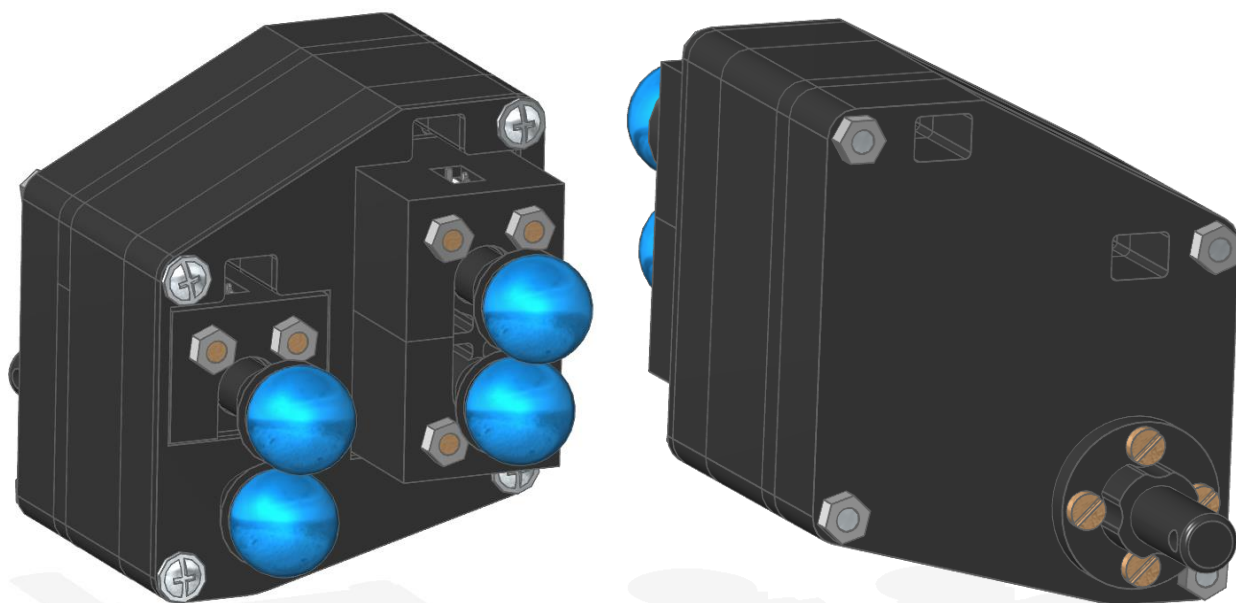


Figura 86 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Montagem completa.

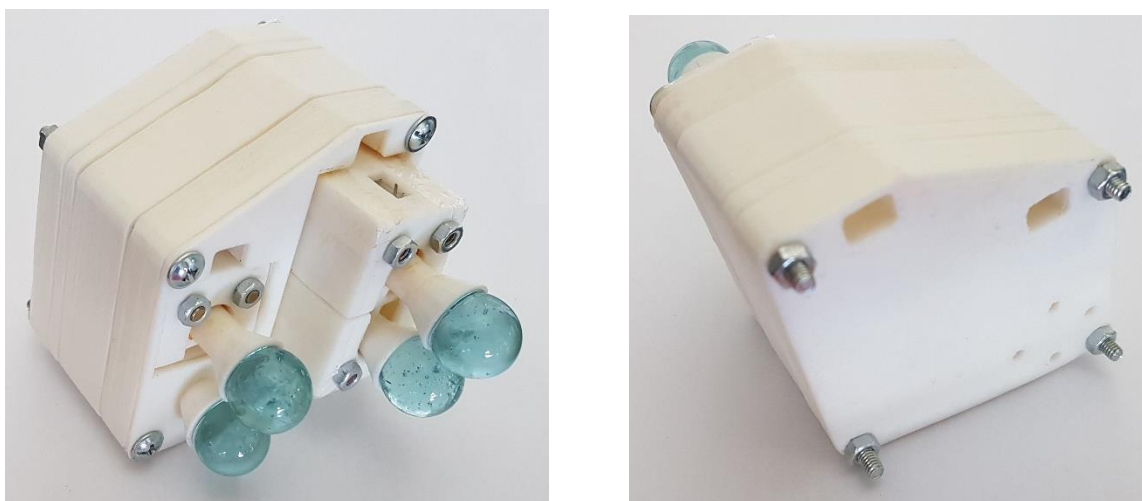


Figura 87 - Protótipo do Conjunto de Sensores - Resultado obtido.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nessa seção é feita uma série de considerações finais a respeito dos tópicos desenvolvidos ao longo desse trabalho. Ela é dividida nas considerações sobre o sistema proposto na Seção 2, nas considerações sobre o desenvolvimento do conjunto de sensores ao longo das Seções 4, 5, 6 e 7, e em sugestões para trabalhos futuros.

8.1. Sistema Proposto

Este trabalho propõe um sistema automatizado para extração de látex que permite que o procedimento de sangria seja realizado sem intervenção humana e sem dependência da luminosidade do ambiente. O sistema pode ser pré-programado para que os robôs atuem de acordo com as condições climáticas e com frequências de sangria ideais, permitindo um grau de controle da produção do seringal que dificilmente seria obtido ao adotar a sangria manual. Além disso, os robôs podem realizar a sangria em trechos do caule mais elevados, que um trabalhador teria dificuldade em alcançar, permitindo um aproveitamento maior da área superficial da árvore.

Uma vez que um mesmo robô pode realizar a sangria em diversas árvores, os custos de manutenção e implantação desse sistema provavelmente seriam menores em comparação com sistemas automatizados em desenvolvimento que adotam o uso de um robô por árvore. Um robô que compõe o sistema demandaria muito mais tempo para realizar a sangria em comparação com um sangrador experiente, porém, é possível utilizar vários robôs simultaneamente e adotar horários e frequências de sangria de forma a compensar esse fato. Também é importante notar que o controle da poda das árvores do seringal assume um papel importante no desempenho desse sistema, uma vez que galhos podem comprometer a atuação dos robôs.

A implantação do sistema proposto permitiria que o sangrador assumisse um papel mais técnico, dedicando seu tempo a avaliar a produção do seringal, à fiscalização do trabalho executado pelas máquinas e à manutenção do sistema. Isso melhoraria suas condições de trabalho e os resultados provenientes do mesmo. Além disso, um único indivíduo poderia ser responsável pelo manejo de uma área maior de cultivo, o que favoreceria a ocorrência de melhorias salariais.

Assim, o novo sistema permitiria um maior aproveitamento do capital humano disponível e possivelmente uma queda significativa do custo de produção do látex, o que tornaria a borracha natural mais competitiva em relação à sintética e favoreceria seu uso em uma gama maior de produtos, aumentando sua participação no mercado e, com isso, sua demanda. Ainda, o risco associado ao manejo das plantas poderia ser reduzido e o retorno financeiro do produtor aumentado, incentivando o cultivo de novos seringais e, com isso, o aumento da produção interna de borracha natural e do número de postos de trabalho associados à atividade.

8.2. Desenvolvimento do Conjunto de Sensores

A estratégia de utilização do ressalto do painel como referência para a realização de um novo corte que foi adotada neste trabalho, isto é, a comparação de distâncias de um plano de referência até a casca por meio de apalpadores, demandou que diversos parâmetros associados ao contato físico com a casca fossem considerados no projeto do conjunto de sensores.

Essa estratégia foi adotada uma vez que pode ser implementada com menor custo em comparação com as outras que foram avaliadas na Seção 4, de forma que se julgou importante desenvolvê-la a fundo inicialmente. É incerto grau de validade das considerações e simplificações adotadas, assim como a magnitude do efeito que as irregularidades da árvore vão ter no funcionamento do conjunto de sensores desenvolvido. Dessa forma, uma análise experimental se faz necessária, por meio de testes controlados com o protótipo construído.

Uma parte considerável da análise geométrica que foi desenvolvida também se aplicaria à adoção da estratégia de comparação de distâncias de um plano de referência até a casca com a ausência de contato físico. No entanto, neste caso não existiria a necessidade de considerar o contato entre o apalpador e o ressalto, o avanço dos apalpadores, etc. Portanto, a adoção dessa estratégia demandaria uma análise relativamente simples, assim como provavelmente resultaria em um conjunto de sensores mais confiável e preciso. No entanto, ela resultaria no uso de sensores que apresentam custo relativamente elevado.

8.3. Sugestões para Trabalhos Futuros

Abaixo seguem próximos passos para o desenvolvimento do sistema de realização do corte. A sequência de apresentação corresponde à sequência sugerida de desenvolvimento, mas vale notar que alguns dos passos expostos podem ser desnecessários caso resultados obtidos anteriormente sejam satisfatórios.

- Finalizar o projeto e a construção da base de testes apresentada na Subseção 2.1. Realizar testes com o conjunto de sensores desenvolvido neste trabalho e avaliar o grau de precisão do procedimento de alinhamento com o painel de corte, do procedimento de determinação do ponto de início de corte e do movimento em espiral correspondente ao corte. Também deve-se avaliar a tolerância a desalinhamentos, a diferentes pontos de giro do tronco, etc.
- Desenvolver um conjunto de sensores que utiliza a primeira abordagem de promoção do avanço frontal dos apalpadores, apresentada na Subseção 6.6. Realizar testes e avaliar o grau de precisão do procedimento de alinhamento com o painel de corte, do procedimento de determinação do ponto de início de corte e do movimento em espiral correspondente ao corte. Também deve-se avaliar a tolerância a desalinhamentos, a diferentes pontos de giro do tronco, etc.
- Desenvolver um conjunto de sensores adotando a estratégia de comparação de distâncias de um plano de referência até a casca sem contato físico. Realizar testes e avaliar o grau de precisão do procedimento de alinhamento com o painel de corte, do procedimento de determinação do ponto de início de corte e do movimento em espiral correspondente ao corte. Também deve-se avaliar a tolerância a desalinhamentos, a diferentes pontos de giro do tronco, etc.
- Desenvolver um conjunto de sensores adotando a estratégia de processamento de imagem para a detecção do ressalto. Realizar testes e avaliar o grau de precisão do procedimento de alinhamento com o painel de corte, do procedimento de determinação do ponto de início de corte e do movimento em espiral correspondente ao corte. Também deve-se avaliar a tolerância a desalinhamentos, a diferentes pontos de giro do tronco, etc.

- Comparar os resultados obtidos através dos testes das diferentes estratégias de desenvolvimento do conjunto de sensores, avaliando se eles são satisfatórios e, em caso positivo, qual estratégia é a mais viável.
- Projetar e construir uma base de testes com a capacidade de realizar o corte no painel de corte esculpido, adotando uma ferramenta de corte adequada e a estratégia para guiar o corte que se mostrou mais viável anteriormente. Realizar testes e avaliar o grau de precisão do procedimento de alinhamento com o painel de corte, do procedimento de determinação do ponto de início de corte e do corte que foi obtido. Também deve-se avaliar a tolerância a desalinhamentos, a diferentes pontos de giro do tronco, etc.

Uma vez com o sistema de corte definido, o restante do robô pode ser projetado em função do mesmo. Com o design do robô finalizado, o restante do sistema automatizado para extração de látex proposto pode ser desenvolvido, permitindo que sua viabilidade econômica seja avaliada.

9. REFERÊNCIAS

- 3DMACHINE, 2015. *3D Machine ONE*. [Online]
Disponível em: <http://www.3dmachine.com.br/suporte/ONE.html>
[Acesso 11 Julho 2017].
- AGROANALYSIS, 2015. *Quedas nos Preços do Látex*. [Online]
Disponível em: http://www.agroanalysis.com.br/materia_detalhe.php?idMateria=1858
[Acesso 30 Maio 2015].
- ARDUINO, 2017. *ARDUINO MEGA 2560 REV3*. [Online]
Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>
[Acesso 11 Julho 2017].
- ARDUINO, 2017. *Arduino Products*. [Online]
Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/Products>
[Acesso 11 Julho 2017].
- ARDUINO, 2017. *Software*. [Online]
Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>
[Acesso 11 Julho 2017].
- ASSOVALE, 2013. *CATI capacita mão de obra para sangria da seringueira*. [Online]
Disponível em: <http://www.assovale.com.br/noticias/1799/cati-capacita-mao-de-obra-para-sangria-da-seringueira>
[Acesso 02 Junho 2015].
- EMBRAPA, 2004. *O Látex e a Borracha da Mangabeira*, Belém: Embrapa Amazônia Oriental.
- FARGO CONTROLS, 2008. *Photoelectric Proximity Sensors*. [Online]
Disponível em: <http://www.fargocontrols.com/sensors/photoelectric.html>
[Acesso 22 Maio 2017].

G1, 2016. *Plantio de seringueiras enfrenta dificuldades com crise econômica no Pontal do Triângulo.* [Online]

Disponível em: <http://g1.globo.com/minas-gerais/triangulo-mineiro/mgtv-2edicao/videos/v/plantio-de-seringueiras-enfrenta-dificuldades-com-crise-economica-no-pontal-do-triangulo/4849786/>

[Acesso 18 Julho 2017].

GONÇALVES, P. d. S. et al., 2000. Efeito da Frequência de Sangria e Estimulação no Desempenho Produtivo e Econômico de Clones de Seringueira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 35, pp. p.1081-1091.

HEVEA-TEC, 2012. *Quantas pessoas são necessárias para explorar um seringal?* [Online]

Disponível em: <http://www.heveatec.com.br/?pergunta=quantas-pessoas-sao-necessarias-para-explorar-um-seringal>

[Acesso 18 Julho 2017].

HowStuffWorks, 2007. *How RFID Works.* [Online]

Disponível em: <http://electronics.howstuffworks.com/gadgets/high-tech-gadgets/rfid.htm>

[Acesso 11 Julho 2017].

IAC, 2015. *Centro de Seringueira e Sistemas Agroflorestais.* [Online]

Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/seringueira/>

[Acesso 23 Maio 2015].

INCAPER, 2013. *Sangria da Seringueira: Guia Prático para o Seringueiro - Incaper.* [Online]

Disponível em: <http://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/487/1/Sangria-da-Seringueira-2013-AInfo.pdf>

[Acesso 12 Abril 2017].

LEICA MICROSYSTEMS, 2013. *Brief Introduction to Surface Metrology.* [Online]

Disponível em: <http://www.leica-microsystems.com/science-lab/brief-introduction-to-surface-metrology/>

[Acesso 22 Maio 2017].

MATHWORKS, 2017. *MATLAB for Student Use*. [Online]
Disponível em: https://uk.mathworks.com/academia/student_version.html
[Acesso 11 Julho 2017].

MICRO MEASUREMENTS, 2016. *Linear Displacement Sensors*. [Online]
Disponível em: <http://www.vishaypg.com/docs/11350/hs-series.pdf>
[Acesso 08 Julho 2017].

MICRO-EPSILON, 2015. *Confocal Sensor Systems for Displacement, Distance, Position and Thickness*. [Online]
Disponível em: <http://www.micro-epsilon.com/displacement-position-sensors/confocal-sensor/>
[Acesso 11 Julho 2017].

MICRO-EPSILON, 2017. *confocalDT // Confocal Chromatic Measurement System*. [Online]
Disponível em: <http://www.micro-epsilon.com/download/products/cat--confocalDT--en.pdf>
[Acesso 08 Julho 2017].

MICRO-EPSILON, 2017. *confocalDT IFS2402 // Confocal Chromatic Miniature Sensors*. [Online]
Disponível em: <http://www.micro-epsilon.com/download/products/confocal/dax--confocalDT-IFS2402--en-us.html>
[Acesso 08 Julho 2017].

MRB, 2011. *Automatic Rubber Tapping System (ARTS)*. [Online]
Disponível em: <http://www.lgm.gov.my/Technology/Technology-ARTS.aspx>
[Acesso 23 Maio 2015].

NANOVEA, 2015. *Surface Finish Inspection of Wood Using 3D Profilometry*. [Online]
Disponível em: <http://nanovea.com/App-Notes/finish-inspection-wood.pdf>
[Acesso 22 Maio 2017].

Neto, P. G. & Guglielmetti, L. C., 2012. *HEVEICULTURA - A cultura da seringueira*. São José do Rio Preto: Grafisa - Santos Gráfica e Editora Ltda..

OMRON, 2017. *Sensors Technical Guide*. [Online]
Disponível em: <http://www.ia.omron.com/support/guide/5.html>
[Acesso 23 Maio 2017].

QUARTEROLI, J. S. et al., 2007. Viabilidade Econômica de Diferentes Sistemas de Sangria em Clones de Seringueira. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, n.3, Março, pp. 349-356.

SENAR, 2005. *Sangrador de Seringueira: Sangria em seringueira*, São Paulo: SENAR.

SIEMENS, 2017. *Solid Edge Student Edition*. [Online]
Disponível em: <https://www.plm.automation.siemens.com/en/academic/resources/solid-edge/student-download.cfm>
[Acesso 11 Julho 2017].

STIL, 2016. *Optical Sensors: Catalogue 2016*. [Online]
Disponível em: <http://ecatalog.stil-sensors.com/STIL-catalog.pdf>
[Acesso 11 Julho 2017].

STIL, 2017. *Chromatic Confocal: The Technology*. [Online]
Disponível em: <http://technology.stil-sensors.com/?lang=EN>
[Acesso 11 Julho 2017].

TURCK, 2009. *Inductive Linear Position Sensors*. [Online]
Disponível em: <http://www.clrwtr.com/PDF/TURCK/TURCK-Linear-Position-Catalog.pdf>
[Acesso 08 Julho 2017].

APÊNDICE A - AVALIANDO OS POTENCIÔMETROS DESLIZANTES

O circuito representado na Figura 88 foi montado para que o sinal analógico de cada potenciômetro deslizante pudesse ser analisado através do *Arduino Mega 2560*. Além disso, o código exibido na Figura 89 foi elaborado por meio do *Arduino IDE*.

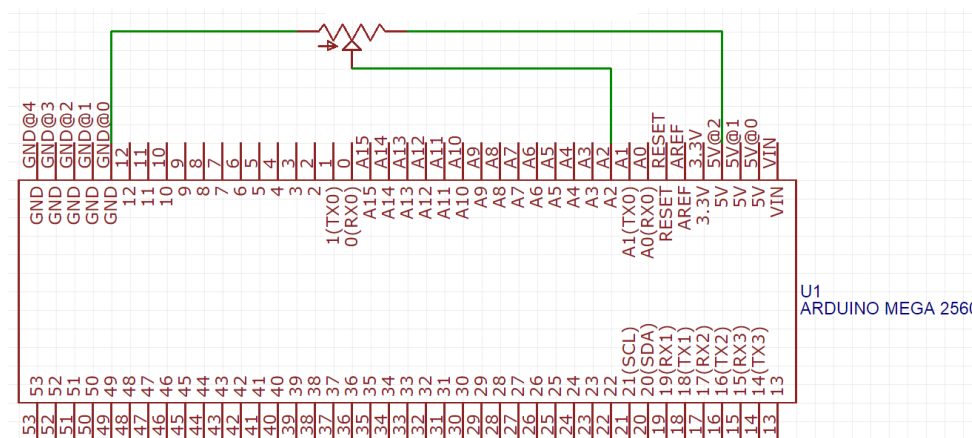


Figura 88 - Esquemático do circuito de avaliação dos potenciômetros deslizantes. Elaborado por meio do site EasyEDA.com.

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
}  
  
void loop() {  
  float soma = 0;  
  for (int i = 0 ; i < 100 ; i++) {  
    soma += analogRead(A2);  
    delay(10);  
  }  
  int media = soma / 100;  
  Serial.println(media);  
}
```

Figura 89 - Código executado pelo Arduino Mega 2560.

Assim, o Arduino faz a leitura do sinal analógico proveniente do potenciômetro a cada 10 [ms]. Ele efetua a média de 100 medições e exibe o resultado em tela, através do *Serial Monitor* da *Arduino IDE*. Com o código escrito e o circuito montado, o Arduino foi conectado ao notebook pela porta USB, que alimentou o circuito e permitiu o upload e execução do código.

Utilizando um papel com uma escala milimetrada, o cursor do potenciômetro deslizante foi estabelecido em sua posição mínima, em uma de suas extremidades, que resulta na leitura analógica 0. Foi estabelecido que essa posição corresponde a $x = 0 \text{ [mm]}$ e, na sequência, utilizando a escala milimetrada como referência, o cursor do potenciômetro foi deslocado manualmente de 1 em 1 [mm]. A leitura analógica correspondente a cada posição foi registrada, até que o cursor do potenciômetro atingisse sua posição máxima, limitada pelo seu curso total. Esse procedimento foi repetido para todos os potenciômetros testados, exibidos na Figura 90.

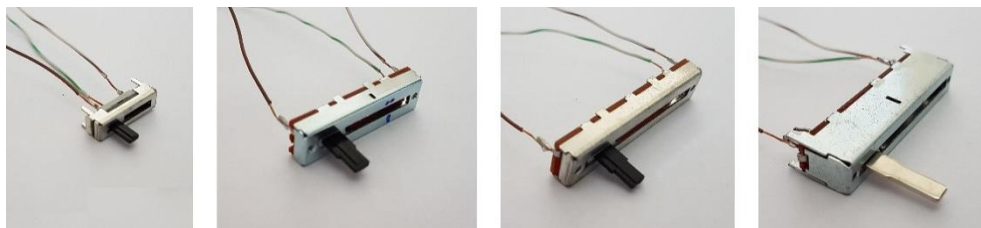


Figura 90 - Potenciômetros deslizantes adquiridos, da esquerda para a direita: B503 50K - Curso Total 10 [mm], A20K - Curso Total 20 [mm], A20K - Curso Total 30 [mm] e A50K - Curso Total 30 [mm].

Após as medições, os dados foram plotados em gráficos de dispersão por meio do software MS-Excel, resultando nos gráficos exibidos nas Figuras 91, 92, 93 e 94. Foi considerado que o sinal analógico de cada potenciômetro deslizante varia de forma linear em determinados trechos de seu curso. Assim, foi possível estimar com facilidade a taxa de variação do sinal analógico em função do deslocamento do cursor ($\partial SA / \partial x$) para cada trecho. Na sequência, os cálculos correspondentes a cada um dos potenciômetros são apresentados.

B503 50K - Curso Total 10 [mm]

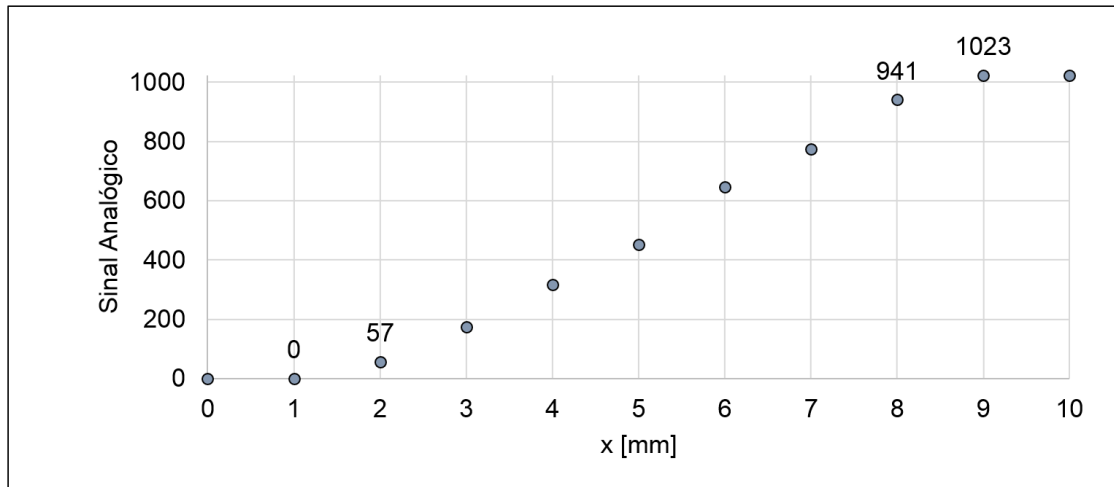


Figura 91 - Resposta Analógica do PD B503 50K - Curso Total 10 [mm]

O curso útil foi considerado como sendo de $x = 1$ [mm] até $x = 9$ [mm].

$$\left(\frac{\partial SA}{\partial x}\right)_{1-2} \approx \frac{57 - 0}{2 - 1} = 57,00$$

$$\left(\frac{\partial SA}{\partial x}\right)_{2-8} \approx \frac{941 - 57}{8 - 2} = 147,33$$

$$\left(\frac{\partial SA}{\partial x}\right)_{8-9} \approx \frac{1023 - 941}{9 - 8} = 81,00$$

A20K - Curso Total 20 [mm]

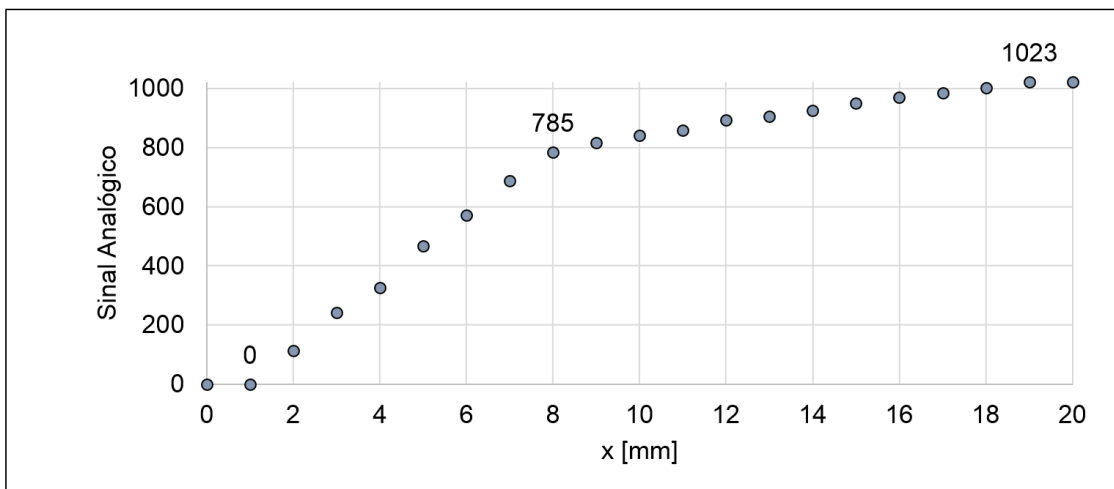


Figura 92 - Resposta Analógica do PD A20K - Curso Total 20 [mm].

O curso útil foi considerado como sendo de $x = 1$ [mm] até $x = 19$ [mm].

$$\left(\frac{\partial SA}{\partial x}\right)_{1-8} \approx \frac{785 - 0}{8 - 1} = 112,14$$

$$\left(\frac{\partial SA}{\partial x}\right)_{8-19} \approx \frac{1023 - 785}{19 - 8} = 21,64$$

A20K - Curso Total 30 [mm]

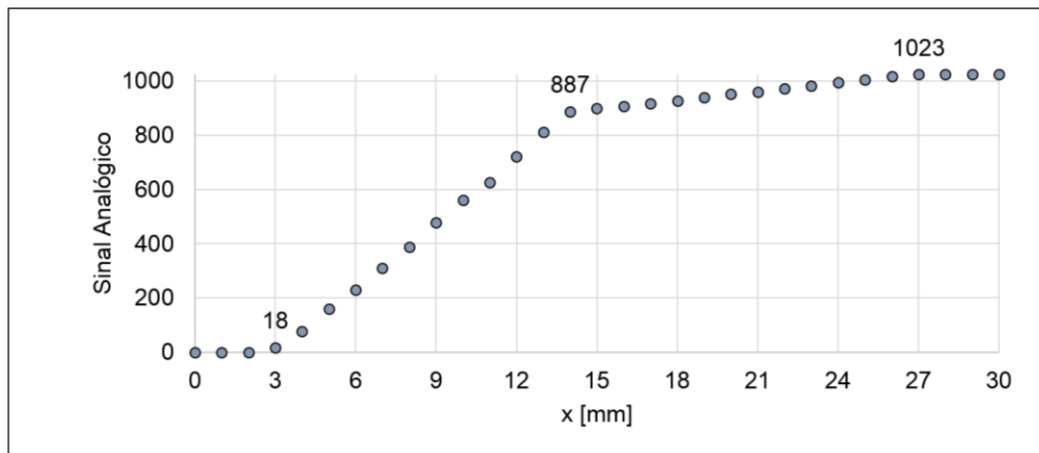


Figura 93 - Resposta Analógica do PD A20K - Curso Total 30 [mm].

O curso útil foi considerado como sendo de $x = 3$ [mm] até $x = 27$ [mm].

$$\left(\frac{\partial SA}{\partial x}\right)_{3-14} \approx \frac{887 - 18}{14 - 3} = 79,00$$

$$\left(\frac{\partial SA}{\partial x}\right)_{14-27} \approx \frac{1023 - 887}{27 - 14} = 10,46$$

A50K - Curso Total 30 [mm]

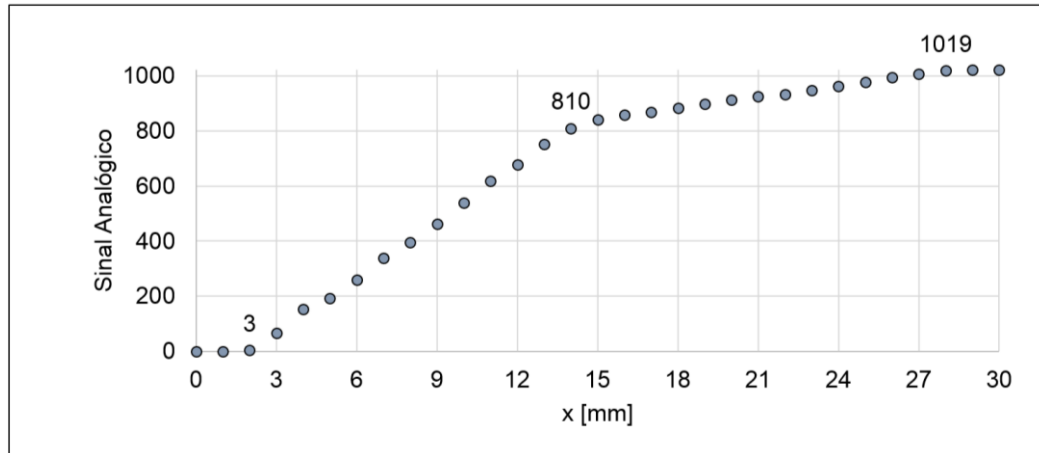


Figura 94 - Resposta Analógica do PD A50K - Curso Total 30 [mm].

O curso útil foi considerado como sendo de $x = 2$ [mm] até $x = 28$ [mm].

$$\left(\frac{\partial SA}{\partial x}\right)_{2-14} \approx \frac{810 - 3}{14 - 2} = 67,25$$
$$\left(\frac{\partial SA}{\partial x}\right)_{14-28} \approx \frac{1019 - 810}{28 - 14} = 14,93$$

Além disso, a fim de verificar a repetibilidade desse tipo de sensor, o procedimento de leitura analógica foi repetido 10 vezes para a posição central do trecho que apresentou a maior taxa de variação do sinal analógico em função do deslocamento do cursor ($\partial SA / \partial x$), ou seja, a posição $x = 5$ [mm] do potenciômetro deslizando B503 50K. Após cada leitura, o cursor era deslocado até sua posição mínima ($x = 0$ [mm]) e novamente até a posição $x = 5$ [mm]. Os resultados seguem na Tabela 2.

Tabela 2 - Resposta Analógica do Potenciômetro Deslizante B503 50K, $x = 5$ [mm]

Medição	Sinal Analógico	Desvio da Média	%Fundo de Escala
1	561	13.4	1.3%
2	573	1.4	0.1%
3	571	3.4	0.3%
4	577	2.6	0.3%
5	572	2.4	0.2%
6	561	13.4	1.3%
7	590	15.6	1.5%
8	578	3.6	0.4%
9	587	12.6	1.2%
10	574	0.4	0.0%

Ou seja, a variação máxima do sinal analógico em torno da média foi de 15,6, correspondendo a 1,5% do fundo de escala. A maior parcela desses desvios provavelmente se deve às condições não ideais do teste, uma vez que o movimento do cursor foi feito manualmente. No entanto, esse grau de precisão já satisfaz as necessidades de projeto do protótipo inicial, escopo deste trabalho.

A fim de estimar a incerteza de medição dos trechos de cada potenciômetro deslizante testado, foi considerado que o sinal analógico pode flutuar 30 unidades em torno da que realmente corresponde a x , ou seja:

$$\begin{aligned}x &\rightarrow SA \pm \mu_{SA} \\ 0 &\leq SA \leq 1023 \\ \mu_{SA} &= 30\end{aligned}\tag{25}$$

Vale notar que esse valor é próximo do dobro do maior desvio da média obtido experimentalmente, exposto na Tabela 2. Ele foi adotado a fim de proporcionar certa margem de segurança aos resultados, devido às incertezas associadas às condições de realização do experimento. Assim, é possível estimar a incerteza de medição correspondente a cada trecho ao relacionar a incerteza do sinal analógico com a taxa de variação deste em função de x .

$$\mu_x = \mu_{SA} \times \frac{\partial x}{\partial SA}\tag{26}$$

Utilizando os resultados obtidos anteriormente, a Tabela 1 foi gerada.

Tabela 1 - Incerteza de Precisão Estimada dos Potenciômetros Deslizantes

Potenciômetro Deslizante	Trecho		$\partial SA/\partial x$	μ_x [mm]
	$x_i - x_f$	C [mm]		
B503 50K - Curso Total 10 [mm]	1 - 2	1	57	0.53
	2 - 8	6	147.33	0.20
	8 - 9	1	81	0.37
A20K - Curso Total 20 [mm]	1 - 8	7	112.14	0.27
	8 - 19	11	21.64	1.39
A20K - Curso Total 30 [mm]	3 - 14	11	79	0.38
	14 - 27	13	10.46	2.87
A50K - Curso Total 30 [mm]	2 - 14	12	67.25	0.45
	14 - 28	14	14.93	2.01