

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA**

EUGÊNIO TEIXEIRA SCHREIBER PIERAZZOLI

**APLICADOR DINÂMICO DE
HERBICIDA E SENSORIAMENTO DE
ALTURA: ESTRATÉGIAS DE
AUTOMAÇÃO PARA A ROÇADEIRA
QUÍMICA CAMPO LIMPO**

**Bagé
2022**

EUGÊNIO TEIXEIRA SCHREIBER PIERAZZOLI

**APLICADOR DINÂMICO DE
HERBICIDA E SENSORIAMENTO DE
ALTURA: ESTRATÉGIAS DE
AUTOMAÇÃO PARA A ROÇADEIRA
QUÍMICA CAMPO LIMPO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Orientador: Naylor Bastiani Perez
Coorientador: Leonardo Bidese de Pinho

**Bagé
2022**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

P615 Pierazzoli, Eugênio Teixeira Schreiber
Aplicador dinâmico de herbicida e sensoramento de altura: estratégias de automação para a roçadeira química Campo Limpo / Eugênio Teixeira Schreiber Pierazzoli.
- 2022.
162 f.: il.
Orientador: Naylor Bastiani Perez
Coorientador: Leonardo Bidese de Pinho
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, em Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, 2022.
1. Sensoriamento de pastagem. 2. Pecuária de precisão. 3. Controle de plantas daninhas. 4. Recuperação de pastagens. I. Naylor Bastiani Perez. II. Título.

EUGÊNIO TEIXEIRA SCHREIBER PIERAZZOLI

APLICADOR DINÂMICO DE HERBICIDA E SENSORIAMENTO DE ALTURA: ESTRATÉGIAS DE AUTOMAÇÃO PARA A ROÇADEIRA QUÍMICA CAMPO LIMPO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Computação Aplicada.

Dissertação defendida e aprovada em: 19 de setembro de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Naylor Bastiani Perez
Orientador
(EMBRAPA)

Prof. Dr. Leonardo Bidese de Pinho
Coorientador
(Unipampa)

Prof.^a Dr.^a Fabiane Pinto Lamego
(EMBRAPA)

Prof. Dr. Julio Saraçol Domingues Júnior
(Unipampa)

Prof. Dr. Ricardo Yassushi Inamasu
(EMBRAPA)



Assinado eletronicamente por **JULIO SARACOL DOMINGUES JUNIOR, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/09/2022, às 11:35, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Fabiane Pinto Lamego, Usuário Externo**, em 23/09/2022, às 08:06, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Naylor Bastiani Perez, Usuário Externo**, em 26/09/2022, às 21:17, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Ricardo Yassushi Inamasu, Usuário Externo**, em 31/10/2022, às 18:29, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LEONARDO BIDESE DE PINHO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/10/2022, às 18:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0920956** e o código CRC **2440AFCD**.

AGRADECIMENTO

Obrigado aos Professores, Dr. Naylor Bastiani Perez e Dr. Leonardo Bidese de Pinho, pela confiança, pela paciência ao me ensinar, pela compreensão, pelos sábios conselhos e por prontamente me ajudar sempre. À instituição de ensino Unipampa e a instituição de pesquisa Embrapa Pecuária Sul, essenciais no meu processo de formação profissional, pela dedicação, e por tudo o que aprendi ao longo dos anos. Por fim, o meu profundo e sentido agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para a concretização desta dissertação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

*“If I have seen farther than others, it is
because I stood on the shoulders of giants.”*

— Sir Isaac Newton

RESUMO

A presente pesquisa de computação aplicada analisa e propõe melhorias ao funcionamento do aplicador seletivo de agroquímicos Campo Limpo, equipamento que promove o controle das ervas daninhas por contato direto dessas com cordas embebidas com solução contendo herbicida. O objetivo principal foi aprimorar a precisão da aplicação por meio do controle dinâmico da vazão associada à velocidade de deslocamento e ao nível de infestação. A primeira fase da pesquisa teve como objetivo automatizar o uso do dispositivo, relacionando a altura de plantas daninhas, obtida por sensores de baixo custo ao controle de plantas daninhas. A documentação do desempenho das atividades de pesquisa pode ser encontrada nos anexos, apresentados como relatórios técnicos. Um novo dispositivo autônomo foi prototipado para realizar atividades experimentais. Em conjunto com estudos teóricos o protótipo consolidou a relação entre os sensores e o ambiente, permitindo avaliar a eficiência dos sensores em detectar a altura das ervas daninhas. Os resultados preliminares do sistema desenvolvido demonstraram a viabilidade de detecção de plantas invasoras utilizando sensores de distância de baixo custo, especificamente o sensor laser ToF VL53L1X e o TFmini Plus, em conjunto com o sensor ultrassônico HC-SR04. A aplicação dinâmica e autorregulada do herbicida considerando os diferentes cenários de aplicação e as melhorias no módulo sensor, possibilitou o correto posicionamento dos aplicadores e a estabilização da quantidade de herbicida aplicada por área. Entretanto, o volume aplicado na primeira operação do sistema automatizado foi inferior ao esperado demandando novo procedimento experimental. Assim, a partir dos dados armazenados e uso de simulação computacional, foram identificadas as causas do menor volume de aplicação, permitindo a calibração do equipamento conforme desejado.

Palavras-chave: Sensoriamento de pastagem; Pecuária de precisão; Controle de plantas daninhas; Recuperação de pastagens.

ABSTRACT

This applied computing study analyzes and proposes improvements for operation of the Campo Limpo selective applicator for agrochemicals, a device that promotes weed control by the contact of wet ropes with herbicide on weeds. The main objective is to improve application technology by dynamically controlling the herbicide flow as a function of speed and weed infestation density. The first phase of the research aimed to automate the measure of weed height using low-cost sensors. Documentation of research performance activities can be found in annexes presented as a technical report. A new autonomous device was prototyped to carry out experimental activities. In conjunction with theoretical studies the prototype consolidated the relationship between sensors and environment, allowing to evaluate the efficiency of sensors in detecting the height of weeds. The preliminary results demonstrated the feasibility of identifying invasive plants height using low-cost distance sensors, specifically the ToF laser sensor VL53L1X and the TFmini Plus, together with the ultrasonic sensor HC-SR04. The dynamic and self-regulated application of herbicide considering different application scenarios and the improvements in the sensor module, allowed the correct positioning of herbicides applicators and the stabilization of the amount of herbicide applied per area. However, volume applied in the first automated system operation was lower than expected requiring a new experimental procedure. Using data stored and computing simulation causes of lower volume of application were identified allowing the calibration of the equipment as desired.

Keywords: Pasture sensing; Precision agriculture; Weed control; Pasture restoration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Área de concentração: artefatos para automação da vazão por velocidade....	19
Figura 2	Série histórica do uso das terras agricultáveis no Brasil.....	22
Figura 3	Emissões do setor Agropecuário, por subsetor, em CO ₂ eq.....	24
Figura 4	Apresentação da metodologia científica	28
Figura 5	Equipamentos de corda na mesma escala: Campo Limpo +, Campo Limpo, Enxada Química e Folder Mirapasto.....	32
Figura 6	Barriga formada pelas cordas, com peso e flexibilidade para acompanhar uma maior densidade da vegetação e cobrir uma faixa de altura.....	34
Figura 7	Módulo integrado para medir distância VL53L1X, baseado em laser Classe 1, faixa de 940 nm	35
Figura 8	Sensor de distância TFmini Plus, faixa de 850 nm.....	36
Figura 9	Cone de detecção de objetos com diferentes sensores ToF da STMicroelectronics.....	37
Figura 10	Cálculo da distância, baseado na diferença de fase, da Benewake.....	38
Figura 11	Comparativo entre as distâncias mensuráveis e os recursos da família de sensores ToF da STMicroelectronics. Em destaque os dois sensores da linha testados e em laranja o sensor definido como ideal (VL53L1X).....	39
Figura 12	<i>Shield</i> CJVL53OX-V2 com o módulo VL53L1X ao centro	40
Figura 13	Módulo VL53L1X, sem o encapsulamento e lente, permitindo observar a separação física entre o emissor, receptor e seu formato	41
Figura 14	Diagrama do VL53L1X.....	41
Figura 15	Emissão de um VCSEL de 940 nm com ótica adicional: padrão angular (esquerda) e representação 3D (direita) do sensor VL53L1X	42
Figura 16	Sistema FoV do VL53L1X com receptor com 27° de abertura. A figura apresenta o cone de abertura com as margens de montagem de 36,5° e 39,60° e áreas de exclusão ao utilizar um revestimento sobre a proteção de vidro	43
Figura 17	Área de interesse (RoI), destacado a seleção dos SPAD da matriz 16x16	44
Figura 18	Radiação solar e vidros com filtro de IR	45
Figura 19	Estrutura da folha da <i>Eragrostis plana</i> Nees visualizada no microscópio ótico e no microscópio eletrônico	46
Figura 20	Curva espectral da vegetação, água e solo.....	47
Figura 21	Refletância entre 750 e 1100 nm de vegetações do bioma Pampa. Em azul o Capim Annoni, o <i>Setaria</i> (laranja) é geneticamente próximo ao annoni e o <i>Sporobolus</i> (verde claro) morfologicamente.....	48
Figura 22	Vista explodida do TFmini Plus, composto de múltiplas partes.....	49
Figura 23	Circuito eletrônico da série TFmini e a atualização do microcontrolador de 32 bits entre as versões, trazendo mais recursos e menor consumo.....	51
Figura 24	Dimensões (mm) do TFmini Plus.....	52
Figura 25	Comportamento do sensor ToF ao medir objetos em distâncias diferentes e retorno de um valor intermediário.....	52
Figura 26	Sensor de pedal assistido para bicicleta elétrica, <i>Pedal Assisted Sensor</i> (PAS), como uma solução para mensuração de velocidade.....	54
Figura 27	<i>Encoder</i> Incremental AB ótico, com detecção do sentido da rotação baseado na diferença de sincronismo entre os dois sensores e os furos na roda codificada	55
Figura 28	Diagrama em bloco de um sistema agropecuário de controle	56
Figura 29	Decalque de velocidade por rpm do trator New Holland TL75E.....	62

Figura 30 Barra de sensores na frente da roçadeira autônoma, com os cones representando a área sensoriada.....	64
Figura 31 Montagem proposta para o protótipo de sensoriamento de altura de plantas, utilizando o Arduino Nano	66
Figura 32 Fluxograma proposto para o software de protótipo de sensoriamento. O início e fim do sensoriamento acontece pelo botão de acionamento ou pelo <i>smartphone</i> , podendo operar em modo de <i>debug</i> explorando mais detalhes da qualidade do sinal de sensoriamento.....	67
Figura 33 Comparativo dos equipamentos de corda na mesma escala: Campo Limpo +, Campo Limpo, UGV, Enxada Química e Protótipo UGV 6:1	69
Figura 34 Entradas do algoritmo de controle.....	70
Figura 35 Estrutura de código que simplifica a indicação da dose por velocidade e infestação	72
Figura 36 Diagrama em bloco do sistema agropecuário de controle da bomba para aplicação variável de defensivo.....	73
Figura 37 Dose aplicada em litros por hectare como entrada para o sistema de controle.....	74
Figura 38 Montagem proposta para o protótipo do controlador de vazão automático para a Campo Limpo. O sistema utiliza um sensor de campo Hall para deslocamento e um segundo para o controle do motor. Esta proposta inclui um acoplador ótico para isolar o microcontrolador de ruído do sistema elétrico e motor	75
Figura 39 Pinagem da placa de desenvolvimento <i>keyes</i> e o controlador de vazão construído com os cabos dos sensores e atuadores soldados, criando uma <i>shield</i>	76
Figura 40 Disposição do controlador e sensores Hall na roçadeira Campo Limpo.	77
Figura 41 Fluxograma do aplicativo para controle dinâmico, incluindo o tratamento das interrupções, funcionalidades de ajuste e configuração	78
Figura 42 Touceira de capim-annoni coletada em Bagé (31° 34' S, 54° 09' W)	79
Figura 43 Touceira de capim-annoni usada para verificar a capacidade de resposta dos sensores à refletância e textura	80
Figura 44 Barra de sensoriamento fixa na extremidade da estrutura e pivô de articulação no centro	81
Figura 45 Exemplo de intervalos de medição da altura da vegetação e da área tangente à linha em que são medidos os elementos vegetais lenhosos e herbáceos mais altos	83
Figura 46 Sensoriamento noturno com a barra de sensores em um período antes da aplicação de defensivo	84
Figura 47 Foto aérea das oito parcelas de 4x10 m e corredores roçados mecanicamente na Embrapa Pecuária Sul	85
Figura 48 Experimento preliminar de detecção do Capim Annoni com sensores	90
Figura 49 Touceira de Annoni vista com a câmera Mapir Survey2 Near Infrared (850 nm). O material apresenta uma significativa refletância devido à cor se aproximar do branco e também ser clara, aonde não tem incidência direta do sol, enquanto o solo tem menor refletância para esta frequência, apresentando uma cor mais escura.....	91
Figura 50 Touceira de Annoni vista com a câmera Mapir Survey2 de banda dupla, NDVI Red (660 nm) + NIR (850 nm). O material apresenta significativa refletância NIR (850 nm) e baixa contribuição do vermelho (660 nm) mesmo com a vegetação estressada. Já o solo, tem baixa refletância nestas frequências e apresentou um tom escuro.....	92
Figura 51 Local sem sombra: Medição manual com régua da altura da vegetação nativa no local de sensoriamento (Unipampa – Bagé, RS).....	94

Figura 52 Local com sombra - Medição manual com régua da altura da vegetação nativa no local de sensoriamento (Unipampa - Bagé, RS)	95
Figura 53 Exemplo de alteração da altura da barra de sensores por variação do solo, onde uma irregularidade alterou em 20 cm a altura da extremidade da barra	95
Figura 54 Curvas de distribuição normal da altura sensoriada no período noturno, nas parcelas do experimento final, com os três modelos de sensores. A linha marrom representa a altura do solo (76,5 cm) e verde a vegetação	100
Figura 55 Rota e velocidade para o procedimento na aplicação convencional, com o log do controlador	101
Figura 56 Rota e velocidade para o procedimento na aplicação automatizada, com o log do controlador	102
Figura 57 Telemetria de GNSS capturada com o aplicativo para <i>smartphone</i> <i>Strava</i> mostrando o trajeto e um gráfico da velocidade. Na esquerda se tem a aplicação com o controlador original e na direita o controlador automatizado. Se observa um deslocamento irregular que não corresponde ao traçado com parcelas em paralelo.....	103
Figura 58 Medição do traçado realizado pela Campo Limpo, um mês após aplicar o dessecante. Em vermelho o deslocamento utilizando o controlador tradicional e em azul o automatizado. As linhas brancas foram construídas a partir da visualização dos postes de demarcação das parcelas (4x10 metros), entretanto, o pastejo e as atividades podem levar a remoção sem garantia da recolocação no ponto inicial	105
Figura 59 Gráficos de variância de velocidade (km/h) e dosagem (L/ha) do experimento final gerado a partir do log. O manual da Campo Limpo recomenda operar entre 4 e 7 km/h (faixa verde) e foi definido aplicar 30 L/ha (linha verde).	107
Figura 60 Parcelas e traçado um mês após aplicar o dessecante.....	108
Figura 61 Declividade do terreno vista da parcela 7.....	109
Figura 62 Parcela 1, com inclinação lateral e degradê, onde menos calda foi aplicada na área à direita.....	109
Figura 63 Percentual de plantas mortas 14 e 28 DAA por tipo de controlador	112
Figura 64 Distribuição da altura (cm) por conjunto por parcela. À direita, os gráficos apresentam o resultado 14 DAA e à esquerda 28 DAA	113
Figura 65 Posição da mangueira (deformada) na bomba e o local de pressão pelo rolete. O sistema foi montado na terceira regulagem (furo interior)	118
Figura 66 Mangueira com o comprimento reduzido em comparação com a mangueira original	118
Figura 67 Dano interno na mangueira original abaixo da marca do rolete. É observável devido a transparência da mangueira e destacado pelas setas	118
Figura 68 Comparativo do comportamento das mangueiras por RPM. É necessário o ajuste acima de 10% para sair da inércia e se observa uma estabilidade nas rotações ao atingir o ajuste de 80% para a mangueira nova	120
Figura 69 Estabilidade de dosagem por rotação para a mangueira nova	121
Figura 70 Local dos experimentos de reparo e simulação com os dados de velocidade variável para calibração da vazão adequada	122
Figura 71 Circuito eletrônico do controlador de vazão por velocidade baseado no Atmega328P com sensores de campo hall e comunicação por <i>Bluetooth</i>	140
Figura 72 Placa controladora de vazão dinâmica com Atmega328P	141

Figura 73 Circuito eletrônico do controlador de vazão e concentração dinâmica, baseado no SoC ESP32 com comunicação LoRa para quatro motores e cinco sensores de campo Hall.....	142
Figura 74 Placa controladora de vazão e concentração dinâmica com ESP32 e comunicação LoRa, com cinco sensores de campo Hall e controle de quatro motores.....	143
Figura 75 Gráfico morfológico de Roçadeira Autônoma com finalidade de Agricultura Orgânica	154
Figura 76 Gráfico morfológico da Roçadeira Autônoma proposta.....	158
Figura 77 Estrutura e sistema de tração com motores independentes e redução da Roçadeira Autônoma	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Especificações do VL53L1X.....	40
Tabela 2	Comparação entre os sensores de distância utilizados	53
Tabela 3	Volume de calda (herbicida + água) sugerido para aplicação conforme o nível de infestação, e sua relação com o volume coletado no copo dosador, considerando o tempo para percorrer 50 metros (200 m ² de área tratada).	56
Tabela 4	Volume de herbicida glifosato (480 g/L) conforme o nível de infestação e o tipo de planta indesejável	57
Tabela 5	Teste para verificar o efeito da iluminação natural e artificial (<i>indoor</i>) sobre os sensores. Equipamento estático, distância do chão de 76 cm.....	92
Tabela 6	Valores válidos de sensoriamento em um total de 5.452 leituras. Experimento realizado em 28/12/2021 na Unipampa em uma condição de alta luminosidade (acima de 70 klux). Os valores agrupados apresentam a quantidade leituras válidas para o intervalo de distância entre barra e o solo e o percentual comparado ao total	96
Tabela 7	Valores válidos de sensoriamento em um total de 1.580 leituras. Experimento realizado em 31/12/2021 na Unipampa em uma condição de alta luminosidade (acima de 70 klux). Os valores agrupados apresentam a quantidade leituras válidas para o intervalo de distância entre barra e o solo e o percentual comparado ao total	97
Tabela 8	Medidas de altura da Parcela 1, realizada pelo operador da Campo Limpo ..	98
Tabela 9	Experimento de sensoriamento das parcelas em 09/02/2022, apresentando a distância média dos sensores HC-SR04 e TFmini Plus, seguido da diferença considerando a instalação com o solo de 76 cm. Por fim a diferença entre os dois sensores.....	99
Tabela 10	Comparativo entre o modo tradicional e automatizado para deslocamento e uso de defensivo nas duas aplicações. A pré-operação mediu a quantidade de defensivo necessário para preencher o sistema (bomba, tubos, filtro, mangueiras) e encharcar as cordas de forma homogênea	104
Tabela 11	Primeira avaliação de eficiência de aplicação da máquina Campo Limpo, 12 dias após a aplicação, com a média dos três quadros	110
Tabela 12	Segunda avaliação de eficiência de aplicação da máquina Campo Limpo, 28 dias após a aplicação, com a média dos três quadros	111
Tabela 13	Análise de Variância (ANOVA) para o percentual de plantas mortas 14 DAA, comparando os tratamentos com o aplicador original e o automatizado	112
Tabela 14	Análise de Variância (ANOVA) para o percentual de plantas mortas 28 DAA, comparando os tratamentos com o aplicador original e o automatizado	112
Tabela 15	Relação entre a tensão do sistema elétrico em diferentes estados para o trator Agrale 5075.4 (bateria de 100 Ah e alternador de 90 A)	115
Tabela 16	Resposta da rotação da bomba com o trator desligado (12,99 V @ 0 RPM) e a tensão de saída do controlador para cada faixa de ajuste	115
Tabela 17	Resposta da rotação da bomba com o trator ligado (14,18 V @ 1500 RPM) e a tensão de saída do controlador para cada faixa de ajuste	116
Tabela 18	Resposta da bomba para o motor do trator desligado e ligado.....	116
Tabela 19	Comparativo da substituição das mangueiras (impacto do desgaste e tensão)	119
Tabela 20	Dose por rotação para a nova mangueira.....	120
Tabela 21	Estimativa de calda por simulação na taxa de 30 L/ha.....	122

Tabela 22	Volume aplicado em simulação dos trajetos 01 e 02, utilizando a nova mangueira, com e sem o trator ligado antes da calibração	123
Tabela 23	Calibração do controlador automático por meio de simulações. Uso do trator com motor desligado e simulações de 120 e 123 metros, aplicando 30 litros por hectare	124
Tabela 24	Materiais usados para construção do conjunto completo de sensoriamento para uma barra completa (dois metros).....	137
Tabela 25	Materiais usados para construção da meia barra de sensores (1 metro).....	138
Tabela 26	Materiais usados para construção do protótipo de controlador automático de vazão para duas bombas e telemetria	139
Tabela 27	Materiais para atualizar o controlador digital com as funcionalidades de vazão automatizada e telemetria	143
Tabela 28	Definições do projeto UGV (continua).....	160
Tabela 29	Definições do projeto UGV (continuação)	161
Tabela 30	Definições do projeto UGV (conclusão)	162

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	Application programming interface
CAD	Computer Aided Design
CO ₂ eq	Gás carbônico equivalente
CFD	Computacional Fluid Dynamics
CAN	Controller Area Network
cps	Counts per second
DGPS	Differential Global Positioning System
DSS	Dynamic SPAD selection
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FoV	Field of view
GEE	Gases de Efeito Estufa
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
I ² C	Inter-integrated circuit (serial bus)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
IR	Infrared radiation
ISO	International Organization for Standardization
keps	kilocounts (of photons) per second
LADAR	Laser Detection and Ranging
LiDAR	Light detection and Ranging

NDVI	Índices de Vegetação por Diferença Normalizada
NVM	Non volatile memory
RF	Radio Frequency
RFID	Radio Frequency Identification
ROI	Region of interest
RTP	Real-Time Protocol
RTK	Real Time Kinematic
RSSF	Rede de Sensores sem Fio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IoT	Internet das Coisas
IoV	Internet dos veículos
SIMD	Single Instruction Multiple Data
SiPM	Silicon PhotoMultiplier
SPAD	Single Photon Avalanche Diode
TB	Timing budget
ToF	Time-of-Flight
UNIPAMPA	Universidade Federal do Pampa
VCSEL	Vertical cavity surface-emitting laser
WLAN	Wireless Local Area Network
xcd	Crosstalk calibration distance
xtalk	Crosstalk

SUMÁRIO

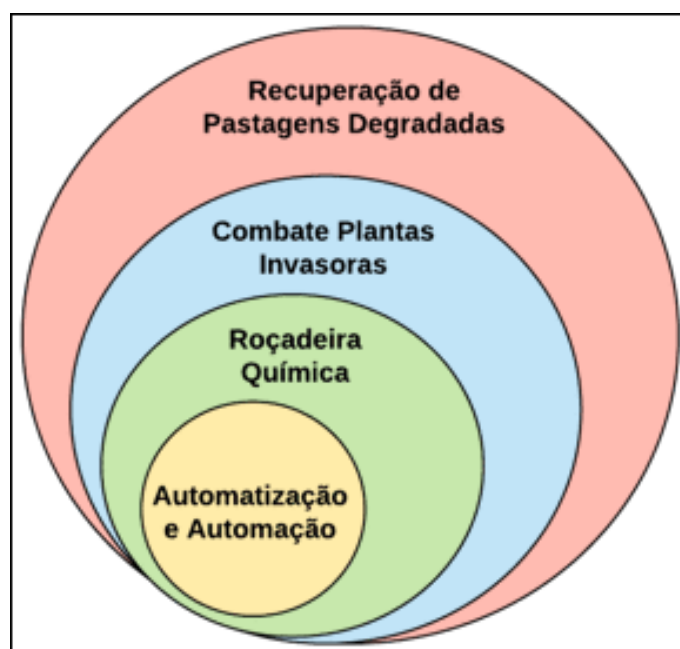
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Motivação e diferentes perspectivas do problema	21
1.1.1 Perspectiva da Computação	24
1.1.2 Perspectiva da Agropecuária	25
1.2 Hipóteses	26
1.3 Objetivos	26
1.4 Metodologia de pesquisa	27
1.5 Organização do texto	29
2 REFERENCIAL TEÓRICO	30
2.1 Métodos de controle das plantas invasoras.....	30
2.1.1 Controle mecânico	30
2.1.2 Controle com herbicida por cordas.....	31
2.1.3 Mirapasto e a roçadeira química Campo Limpo	31
2.2 Sensoriamento da altura e densidade de plantas invasoras	33
2.2.1 Sensores de distância Laser <i>Time-of-Flight</i> (ToF).....	35
2.2.1.1 Cálculo da distância ToF	36
2.2.1.2 Sensores da STMicroelectronics	38
2.2.1.3 Calibração, proteção, pinagem, perfis de operação e área de interesse no VL53L1X	42
2.2.1.4 Impacto da luz ambiente no VL53L1X.....	44
2.2.1.5 Sensoriamento por refletância da vegetação geral e do capim-annoni	45
2.2.1.6 Sensores da Benewake	49
2.3 Sensor de velocidade de deslocamento e rotação da bomba	53
2.3.1 Funcionamento do <i>encoder</i> para velocidade de deslocamento	54
2.3.2 Funcionamento do <i>encoder</i> ótico	55
2.4 Controle dinâmico da vazão por velocidade.....	55
2.4.1 Procedimento atual de calibração da Roçadeira Química Campo Limpo ..	56
2.5 Trabalhos correlatos	57
2.5.1 Síntese dos trabalhos	58
2.5.2 Contribuições para o projeto	59
3 SOLUÇÕES PROPOSTAS	62
3.1 Detecção do capim-annoni com as <i>shields</i> ToF.....	63
3.1.1 Uso da barra de sensores de altura	63
3.1.1.1 Hardware e Software do sistema de sensoriamento	64
3.2 Velocidade de deslocamento.....	68
3.3 Sensores no cálculo do controle da vazão	69
3.3.1 Equação da rotação da bomba por dose, equipamento e velocidade	70
3.4 Correção automática da vazão por velocidade.....	73
3.4.1 Controlador automatizado para Campo Limpo	74
4 MATERIAIS E MÉTODOS	79
4.1 Experimento preliminar em laboratório e campo	79
4.1.1 Experimentos de detecção do capim-annoni com a barra de sensores	80
4.1.2 Experimentos preliminares no laboratório da Unipampa	82
4.1.3 Experimentos preliminares de sensoriamento em campo nativo na Unipampa	82
4.2 Experimentos para validação do sensoriamento de altura a campo.....	83
4.3 Experimento prático do controlador automatizado para Campo Limpo....	84
4.3.1 Método para a avaliação do efeito da aplicação	87

4.4	Experimentos de substituição da mangueira (bomba peristáltica).....	88
4.5	Experimentos de influência do sistema elétrico do trator sobre o controlador	88
4.6	Simulação dos experimentos na Embrapa com dados da telemetria	89
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	90
5.1	Resultados dos experimentos preliminares de testes dos sensores	90
5.2	Resultados do sensoriamento no laboratório da Unipampa	92
5.3	Resultados do sensoriamento na Unipampa.....	93
5.4	Resultados do sensoriamento na Embrapa	98
5.5	Resultados da aplicação na Embrapa	101
5.6	Avaliação do efeito da aplicação	107
5.7	Resultados dos experimentos de reparo e alimentação elétrica.....	114
5.7.1	Experimento de influência do sistema elétrico do trator.....	114
5.8	Comparativo entre o volume de aplicação da bomba peristáltica utilizando a mangueira original, desgastada ou nova	117
5.8.1	Dose por rotação da bomba	120
5.9	Experimento com uso dos dados de telemetria de deslocamento no campo nativo.....	122
6	CONCLUSÃO	125
6.1	Melhorias para o sistema e considerações	126
6.2	Trabalhos Futuros.....	127
	REFERÊNCIAS.....	128
	APÊNDICE A – CUSTOS DOS MÓDULOS VALIDADOS, CIRCUITOS ELETRÔNICOS E MAIS FUNCIONALIDADES	137
A.1	Custos do protótipo de sensoriamento	137
A.2	Custos protótipo de sensoriamento parcial	138
A.3	Custos protótipo de controle da vazão automatizado.....	138
A.4	Circuito eletrônico do controle da vazão automatizado baseado no Atmega328P.....	139
A.5	Placas de circuito eletrônico e controlador baseado no ESP32 com comunicação por LoRa.....	141
A.6	Custos dos novos recursos para atualização do controlador digital original	143
	APÊNDICE B – SÍNTESE DOS RELATÓRIOS.....	145
	APÊNDICE C – MODELAGEM DE UM VEÍCULO AUTÔNOMO	150
C.1	Veículos autônomos terrestres ou <i>unmanned ground vehicle</i> (UGV)	150
C.2	Benefícios de equipamentos autônomos.....	151
C.3	Compactação do Solo.....	151
C.4	Automação Agrícola	152
C.4.1	Veículo aéreo não tripulado (VANT) ou <i>unmanned aircraft systems</i> (UAS).....	153
C.5	Trabalhos Correlatos UGV	153
C.6	Contribuições para o projeto UGV	155
C.7	Projeto do UGV	156
C.7.1	Proposta de estrutura e componentes do UGV	156

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo inicial objetiva introduzir o presente projeto de pesquisa e desenvolvimento, baseado no aperfeiçoamento de um equipamento destinado ao controle de plantas daninhas, mais precisamente caracterizado como um modelo de roçadeira química, denominado Campo Limpo. A figura 1 delimita o universo do problema tratado, onde se representa, em verde, a roçadeira química, a qual depende de inúmeras atividades para o seu aperfeiçoamento, assim como para o desenvolvimento de um equipamento autônomo. Dentre as formas de recuperação de pastagens degradadas, que podem ter várias origens, está o controle de plantas indesejáveis, as quais não conseguem suprir as necessidades nutricionais dos animais ou apresentam toxicidade para os mesmos (RADOSEVICH; HOLT; GHERSA, 2007). O uso da roçadeira química tem sido recomendado para um nicho específico de plantas indesejáveis adultas, sobretudo gramíneas invasoras de pastagens (PEREZ, 2015). Nesse equipamento, assume-se como premissa que o processo de automatização e automação deve trazer benefícios para o controle de invasoras, conforme abordado a seguir.

Figura 1 – Área de concentração: artefatos para automação da vazão por velocidade



Fonte: Autor (2022)

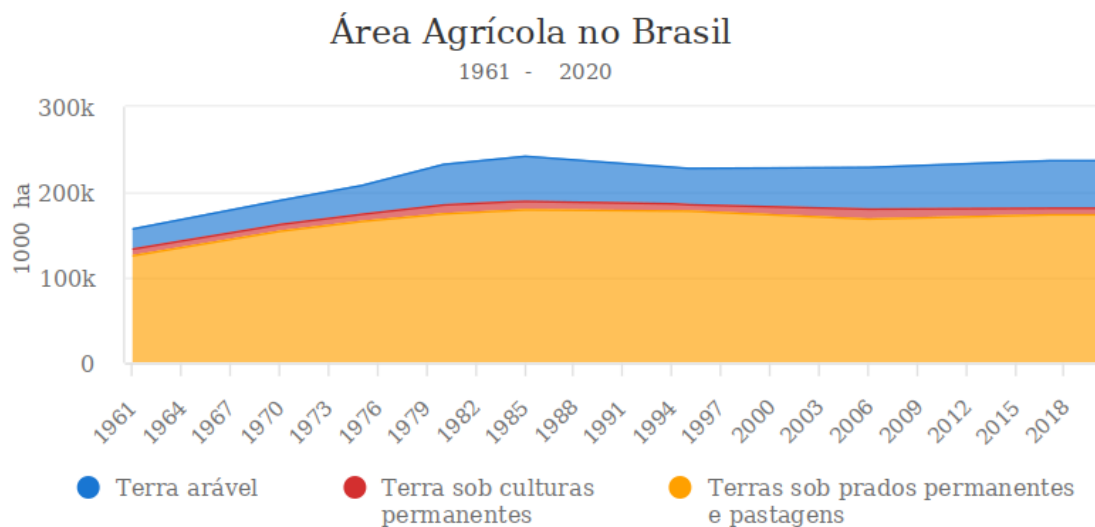
Atualmente, na operação da roçadeira química Campo Limpo, define-se uma vazão prévia considerada adequada, a qual está diretamente relacionada com o grau de infestação da pastagem, velocidade de deslocamento do conjunto trator-equipamento e largura da faixa de aplicação (PEREZ, 2010a). Entretanto, dificilmente se observa uma aplicação com velocidade constante, devido às irregularidades do terreno, eventuais obstáculos e mudanças na declividade, entre outros fatores que alteram a velocidade e a vazão programada. Por esse motivo é proposto um sistema alternativo, onde o controle da vazão da bomba será dado pela velocidade de deslocamento do equipamento, de forma automática, baseado na leitura da velocidade das rodas e da bomba. A estrutura atual que compõe a bomba peristáltica na Campo Limpo dispõe de espaço suficiente para receber melhorias, como sensores magnéticos, acoplados ao sistema existente. Um cabeamento adicional provê a alimentação e uma conexão de dados para cada sistema. A implementação do controle automático por velocidade de deslocamento, com adições de *hardware* para a leitura da velocidade da roda, demanda um investimento baixo e pouca alteração na estrutura do equipamento em operação. Entretanto, obrigatoriamente, deve-se prever a proteção do aparato de medição contra choques mecânicos, quando instalado nas rodas, assim como as demais proteções contra contaminações por poeira e água. Outro potencial aprimoramento na Campo Limpo, passível de melhorias por técnicas computacionais, está relacionado ao ajuste de altura dos aplicadores de herbicida. Atualmente, o ajuste de altura, que permite o contato do aplicador de herbicida com a planta alvo, é realizado de forma manual, conforme a altura média das plantas invasoras, sem considerar a variabilidade espacial relacionada à altura das plantas, mas observando a necessidade de não tocar na pastagem desejável. O atual procedimento poderia ser melhorado por um sistema automático de detecção de altura e atuação para ajuste da posição dos aplicadores de herbicida. Com relação ao *software*, as alterações, devem prever a transmissão por *Bluetooth* e receber os parâmetros (tabelas e configurações) da operação, atualmente disponíveis para regulagem manual. Considerando a existência de uma capacidade computacional ociosa do microcontrolador, no atual sistema de controle da Campo Limpo, a implementação de novas funcionalidades pode ser facilitada complementando a tecnologia já embarcada. No contexto de segurança, é baixo o custo de sistemas redundantes e secundários de validação das leituras para aumentar a robustez e torná-lo tolerante à falha parcial. Por outro lado, em caso de falha total do sistema de sensoriamento, a roçadeira pode operar no modo tradicional, com um valor fixo definido pelo operador.

1.1 Motivação e diferentes perspectivas do problema

A motivação, para o desenvolvimento desta pesquisa aplicada, parte da oportunidade de melhoria na relação homem-máquina, identificada no contexto da recuperação de pastagens degradadas e melhoria da nutrição para bovinocultura de corte, em um cenário com perspectivas futuras de aumento da demanda global para produção de alimentos. Especificamente, o desenvolvimento está ligado às tecnologias de aplicação de defensivos químicos por contato, com redução significativa na deriva e de forma automatizada, com apoio de tecnologias computacionais. Os avanços obtidos devem melhorar o equipamento atualmente comercializado num primeiro momento e, no futuro, atender requisitos necessários para implementação em um equipamento autônomo, sem necessidade de ser tracionado por tratores.

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), em 2025 a população mundial deve atingir 8 bilhões de pessoas e 9,4 bilhões até 2050, crescendo em um ritmo de 240 mil pessoas por dia. Contudo, o modelo da FAO (2017) não poderia prever o crescimento vegetativo da economia observado no período pandêmico e as incertezas do tamanho do impacto. Martha Júnior (2020) apresenta a avaliação de um cenário relacionado a produção de alimentos e os impactos imediatos e futuros, podendo ocorrer a retomada ou alterações na curva por novas mudanças políticas e sociais. A FAO (2017) também afirma que a capacidade de expandir as novas áreas cultiváveis está próxima do limite, sendo estimado que a produção de alimentos precise aumentar em 70% até 2050. Essa projeção tem como base a figura 2, gerada a partir do sistema de Banco de Dados Estatísticos Corporativos, denominado FAOSTAT (2022), o qual inclui os dados coletados e mantidos pela FAO, apresentando um panorama da cobertura do solo no Brasil, com as terras aráveis (azul), cultura permanente (vermelho) e pastagens (laranja) na série histórica de 1961 a 2020, sem incluir a degradação e a recuperação. Nota-se que desde a década de 80 não ocorre uma alteração significativa nas áreas dedicadas à agropecuária no país, demonstrando a necessidade de aumento da produtividade e conservação do ambiente por meio da incorporação de tecnologia aos sistemas produtivos.

Figura 2 – Série histórica do uso das terras agricultáveis no Brasil



Fonte: Adaptado de FAOSTAT (2022)

Em relação à proteína animal, depois dos suínos e aves, a carne vermelha é a mais consumida no mundo e, segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), gerou o valor bruto de produção na pecuária no Brasil (bovinos) em R\$ 160,8 bilhões em 2021 e uma previsão de safra de R\$ 152,2 bilhões em agosto, justificado por queda dos preços internos, e historicamente a produção agropecuária nacional segue uma trajetória expansionista com pequenas oscilações (MAPA MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2022). Entretanto, um limitante para a expansão da pecuária é a degradação das pastagens. As pastagens degradadas afetam 50% das áreas de pasto no Brasil, uma das causas da baixa produtividade em sistemas produtivos que utilizam as forrageiras sob o pastejo do animal, segundo Dias Filho (2014). A degradação tem as causas bastante diversas e reduz a capacidade de suporte, não permitindo suprir as necessidades dos animais, favorecendo o surgimento de áreas descobertas de vegetação e a proliferação de plantas daninhas, entre as quais se destaca o capim-annoni (*Eragrostis Plana* Nees). Como exemplo, verificou-se que existem situações onde 4% de cobertura do solo pelo capim-annoni é suficiente para atingir o nível de dano econômico, enquanto em uma área com 20% de cobertura por esta invasora pode ocorrer redução da produtividade da pastagem entre 20 e 50% (PEREZ; LAMEGO, 2020).

Em um cenário onde a demanda crescente por proteína deve ser conjugada com a conservação do ambiente, a proporção de pastagens degradadas no Brasil gera

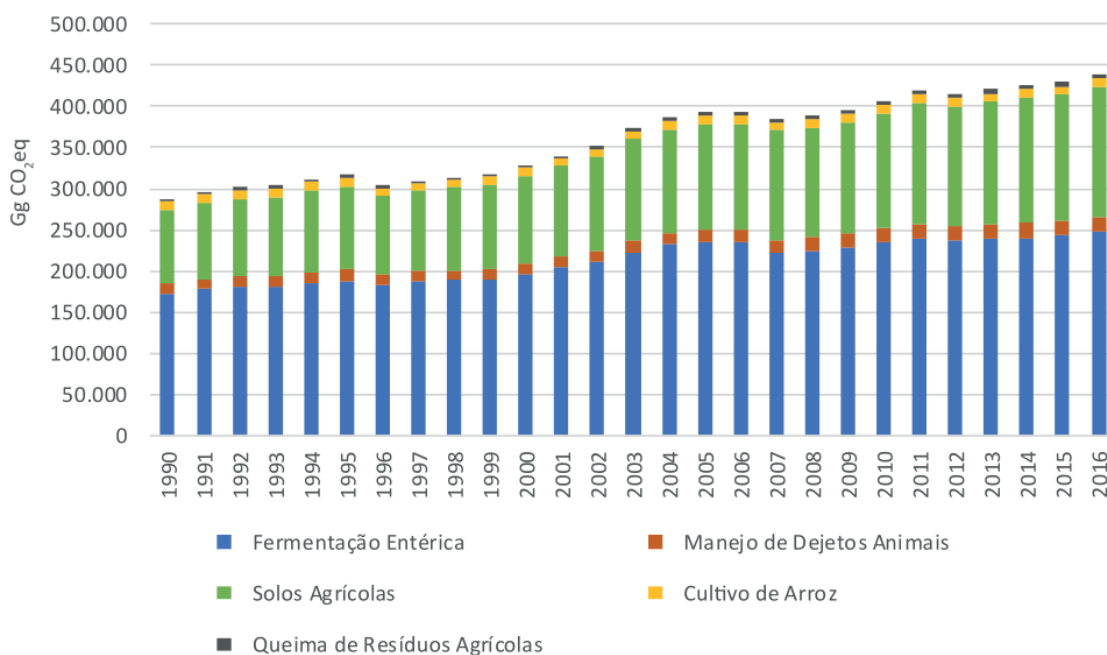
preocupação e demanda esforços da pesquisa. Considerando as pastagens do sul do Brasil, a maior causa de degradação e perda de produtividade ocorre por plantas invasoras como o capim-annoni, o qual é rejeitado pelos animais, tem baixo valor nutricional, alta fibrosidade e causa outros danos de desgaste excessivo na dentição (NASCIMENTO, 1976). Essa situação não permite a plena ocupação do solo por plantas forrageiras, gerando desperdício de energia, ineficiência no uso da terra e prejuízos ao bem-estar animal. Nesse contexto, é preciso buscar formas mais eficientes de controlar as invasoras de pastagem, gerando segurança alimentar. Entre as ações sustentáveis que evitam a conversão de áreas de vegetação nativa para agricultura, está a recuperação e melhoria das pastagens, permitindo intensificar a sua produtividade, manejar mais unidades animais por hectare (UA/ha), reduzindo a pressão pela abertura de novas áreas e permite liberar terras para a produção florestal e agricultura.

Para auxiliar o manejo das pastagens, visando uma pecuária sustentável que mantenha a qualidade da pastagem, deve-se evitar a degradação por plantas invasoras que não dispõem de valores nutritivos adequados. Para facilitar essa tarefa, propõe-se a automatização e a robotização, para desempenhar uma tarefa crítica e contínua na recuperação de pastagem, com menor custo e dispêndio de trabalhadores, tendo em vista os parâmetros para a integração dos processos no contexto de fazendas inteligentes. Nesses sistemas, o controle de plantas invasoras é considerado uma das atividades que mais consome energia. Não obstante ao custo, Perez *et al.* (2015) afirmam que 40% dos produtores pesquisados na região do Complexo Eólico do Cerro Chato, em Santana do Livramento – RS, realizam algum controle das invasoras, notadamente a pulverização de forma convencional ou a roçada mecânica, mas são desmotivados pela limitada efetividade dessas práticas no controle das invasoras. Sobretudo pela agressividade de dispersão e aumento gradual da infestação no decorrer do tempo.

A estimativa geral de emissões de gases de efeito estufa (GEE) do Brasil pode ser vista na figura 3, que representa as taxas de CO₂ equivalente (CO₂eq) para cada bioma e para cada uma das populações de vacas-leiteiras, de corte, bubalinos, ovinos, caprinos, equinos, muares, asininos e suínos. O subsetor caracterizado pela fermentação entérica foi o mais representativo, com uma contribuição de 56,5% do total das emissões no ano de 2016, onde a bovinocultura de corte é responsável pela emissão de um montante significativo de 48,51% de toda emissão. Considerando o manejo sustentável da pastagem em diversos níveis, é relevante melhorar a tecnologia de aplicação de herbicidas e a segurança do operador que realiza o controle, que deve ser obtida pela redução à exposição

aos defensivos químicos. Também é importante a redução da deriva no ambiente, pelo controle da aplicação de forma dinâmica, conforme a variabilidade do ambiente, visando deixar menos resíduos. Além dessas considerações, a ação de recuperação de pastagem promove a melhoria na qualidade da alimentação, ao remover os alimentos altamente fibrosos e de pouco valor nutricional, reduzindo o tempo de engorda e, conseqüentemente, o tempo de produção do ruminante no campo. Isso implica em melhorar o desempenho econômico e reduzir a emissão de GEE por unidade de produto (carne ou laticínio) gerado pelos ruminantes, o que, segundo O'Hara, Freney e Ulyatt (2003), pode ser obtido pela manipulação da dieta dos animais, buscando otimizar a retenção de nitrogênio pelo animal e pela digestão microbiana. Por fim, a robotização do controle de plantas daninhas com o uso de sistemas eletrificados, alimentados por painéis solares, substituindo o uso de combustíveis fósseis, também pode contribuir para maior eficiência e redução de GEE.

Figura 3 – Emissões do setor Agropecuário, por subsetor, em CO₂e



Fonte: MCTI Ministério da Ciência (2020)

1.1.1 Perspectiva da Computação

Parte-se da premissa de que o uso das técnicas do domínio da Engenharia de Computação, aplicadas no domínio das ciências agrárias para a automação da agropecuária, com a finalidade de recuperação da produtividade do campo infestado,

devem permitir o controle de plantas daninhas mais facilmente, com menor intervenção humana. Além disso, deve melhorar a eficiência, obtendo um nível mais alto de qualidade do que os métodos usualmente empregados, aumentando a segurança operacional e redução da exposição a produtos perigosos.

Bechar e Vigneault (2016) citam as condições ideais para um sistema robótico na agricultura e os casos onde a implementação é viável, bem como destacam o seu principal desafio:

O grande desafio da robótica e automação para as operações na fazenda é a redução de tarefas repetitivas e monótonas, muitas vezes sob condições severas para permitir melhores condições de trabalho, qualidade de vida e tornar atrativa a profissão no meio rural. Entretanto, ao contrário das aplicações industriais que são relativamente simples e bem determinadas, a aplicação no ambiente agrícola requer uma tecnologia para lidar com a complexa e extensa quantidade de variáveis do ambiente de produção (BECHAR; VIGNEAULT, 2016, tradução nossa).

Portanto, todos esses requisitos requerem uma tecnologia complexa, com capacidade de atuação contínua, cujo custo deve ser compatível com o benefício obtido. Assim, nas condições de desenvolvimento, o custo do sistema e sua durabilidade são prioritários, sendo uma solução a experimentação de sensores de baixo custo, que possibilitem uma proposta economicamente viável.

1.1.2 Perspectiva da Agropecuária

Na perspectiva das ciências agrárias, o problema da proliferação das plantas invasoras no campo nativo do Bioma Pampa, também pode ser projetado para as pastagens de outros biomas, com os devidos ajustes. Atualmente, Perez *et al.* (2015) é uma das principais referências para a reversão da degradação por meio do Método Integrado de Recuperação de Pastagens (Mirapasto), desenvolvido para atenuar o problema das plantas invasoras em pastagem. Assim, o entendimento das técnicas atualmente utilizadas e suas justificativas possibilitam criar ou adaptar tecnologias computacionais buscando o aumento na produtividade de forma sustentável. Montgomery *et al.* (2017) afirmam que o herbicida glifosato é mais efetivo durante o meio do dia do que no início da manhã para casos específicos de ervas daninhas, já Mohr, Sellers e Smeda (2007) não observaram nenhum efeito consistente de hora do dia nas ervas daninhas tratadas, mas que pode ter uma relação com o ângulo da folha na pulverização e Copeland *et al.* (2021) chegaram em resultados onde o controle foi afetado pela hora do dia para a erva daninha *Amaranthus palmeri*, utilizando o herbicida glufosinato de amônio que tem alvos

diferentes na planta, sendo o ultimo dependente da luz para melhor ação. Também se observa a importância da tecnologia de aplicação e dos aditivos de formulação para eficiência dos produtos e menor potencial volátil, não sendo o caso para o glifosato (defensivo recomendado) e sim de 2,4D e dicamba. Considerando que a tecnologia de aplicação Campo Limpo utiliza uma aplicação direta de herbicida na vegetação, sem a necessidade de pulverização na atmosfera, os horários de aplicação podem ser melhor ajustados, se necessário. Entretanto, considerando que o método, naturalmente, promove uma redução da deriva pelo vento de produtos, a implementação de um sistema que aplica o defensivo com a dosagem ajustada dinamicamente, com precisão, poderia trazer grandes benefícios. Os diversos sensores acoplados ao novo equipamento, dedicados a coleta abundante de dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, vento e radiação solar, podem permitir ajustes ainda mais refinados, não restritos à simplificação de uso por faixas de horários. O novo modelo seria criado por meio da análise dos resultados obtidos em experimentos de campo, conforme as condições climáticas, em geral, utilizando ferramentas computacionais.

1.2 Hipóteses

O presente trabalho levanta as seguintes hipóteses:

- É possível propor, implementar e avaliar um protótipo de prova de conceito capaz de identificar de forma eficaz, com sensores de baixo custo, a altura das plantas do pasto nativo, plantas de capim-anonni e solo exposto?
- É possível desenvolver uma solução eficaz de baixo custo para automatizar a regulagem do fluxo de aplicação de herbicida na roçadeira química Campo Limpo?

1.3 Objetivos

A partir das hipóteses, foram definidos dois principais objetivos:

1. Gerar módulos de automação visando detectar a altura de plantas invasoras em uma pastagem nativa, não uniforme, por sensores compondo um sistema de baixo custo.
2. Desenvolver um sistema automático de controle de vazão, substituindo as regulagens manuais por uma regulagem automática, que possa adequar o fluxo de

aplicação à velocidade de deslocamento.

1.4 Metodologia de pesquisa

Resultados satisfatórios podem ser esperados quando se define uma metodologia de pesquisa adequada para o projeto, permitindo um planejamento adequado das atividades, para atender os objetivos do trabalho. Conforme Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa científica envolve diversas fases indo da preparação do referencial teórico e do planejamento para ao trabalho de campo, processamento, análise e interpretação e, por fim, o relatório da pesquisa. Parte das fases preparatórias, as etapas de revisão bibliográfica buscam dar sustentação a cada característica observada nos requerimentos do equipamento para atender a tarefa especificada e para compreender como ela ocorre. Visto que o presente trabalho é interdisciplinar, visando solucionar o problema apresentado na área agrária através de ferramentas computacionais, se torna necessário o levantamento bibliográfico das características que atendam ambas as áreas.

A primeira fase da pesquisa buscou a compreensão do método de recuperação de pastagens voltado para o bioma Pampa, bem como identificar os processos que devem ser otimizados prioritariamente. Procurando avaliar de forma quantitativa e qualitativa as melhorias prioritárias no equipamento Campo Limpo, realizou-se uma entrevista com os usuários relacionados no cadastro de clientes. Embora a análise dos dados coletados não tenha permitido elencar a prioridade de melhorias de forma objetiva, foi observado que a operação do equipamento no campo não tende a seguir devidamente, o que detalha a seção de calibração e dispersão do herbicida, documentada no manual. A partir desta constatação, vislumbrou-se a oportunidade para melhorar a distribuição do herbicida e gerar soluções tecnológicas para automatizar o processo de regulação e aplicação.

Na segunda fase da pesquisa, foi utilizada a metodologia explicativa, para aprofundar a análise do comportamento da aplicação dinâmica e autoajustada da calda herbicida em diferentes cenários de uso, bem como buscou-se avanços no módulo de sensoriamento. Sequencialmente, procurou-se validar as propostas de tecnologias em experimentos práticos, no Campus Bagé da Unipampa e na unidade Pecuária Sul da Embrapa, bem como verificar a eficiência e a viabilidade econômica do uso de sensores nos equipamentos. A compreensão detalhada do método necessário para o combate as plantas adultas e todas as suas características físicas e evolutivas, foram consideradas para a idealização do novo modelo. Este deve se espelhar no modelo base do equipamento,

mas vislumbrando um processo de continuidade, visto que a construção do protótipo de veículo autônomo inclui um nível de complexidade que exigirá o esforço de profissionais de diferentes áreas do conhecimento, numa perspectiva de melhorias contínuas. Assim, a figura 4 mostra a metodologia científica definida para este trabalho.

Figura 4 – Apresentação da metodologia científica



Fonte: Adaptado de Prodanov e Freitas (2013, p.127)

As tecnologias em desenvolvimento são norteadas pelos estudos e aperfeiçoamentos da Campo Limpo, entre elas as melhorias propostas por Specht (2020), por experimentos em laboratório e modelagem computacional do fluxo interno de insumos, com diversas configurações, as quais geraram recomendações de melhorias a partir da melhor solução entre as possibilidades simuladas. As soluções deste projeto também visam constituir um ferramental associado ao sistema de predição de crescimento de pastagem denominado TouceiraTech (SOARES; PEREZ; PINHO, 2020), ao fornecer dados de entrada com relação à altura do pasto e das manchas de forma georreferenciada. Além destas constatações obtidas a partir de trabalhos anteriores, como atividade preliminar do projeto foi gerado um formulário *online* para entender o perfil dos usuários com relação às necessidades e uso do equipamento. Dada a resistência em participar de maneira espontânea, procurou-se realizar um contato inicial, por telefone, o qual foi efetivo para realizar as diversas perguntas. Ao informar a motivação da pesquisa por telefone, alguns usuários se dispuseram a acessar o formulário, o que poderia indicar que o contato telefônico para o público proprietário do equipamento tem uma maior aceitação.

Outra forma de garantir a credibilidade seria hospedando a pesquisa diretamente no portal da Embrapa como estratégia para um novo ciclo de contatos. Parte das respostas permitiu entender a forma de controle da velocidade além da estimativa de volume aplicado. O resultado preliminar também observou a recepção técnica de um novo equipamento na Embrapa, Campo Limpo+ 2021, indicando a dificuldade dos produtores e operadores para regular o equipamento de maneira eficiente, para encontrar o ponto certo para a relação entre a velocidade do trator e a vazão do herbicida, considerando o nível de infestação das porções de campo tratadas.

1.5 Organização do texto

O restante do texto está organizado como segue. No capítulo 2 são apresentados os principais referenciais teóricos adotados no desenvolvimento do projeto, incluindo uma discussão sobre trabalhos relacionados. No capítulo 3 são detalhadas as soluções desenvolvidas em consonância com os objetivos do projeto. No capítulo 4 são descritos os experimentos conduzidos para verificar o funcionamento dos protótipos desenvolvidos. No capítulo 5 são expostos os resultados obtidos, os quais são discutidos quantitativa e qualitativamente. No capítulo 6 são sintetizadas as conclusões e delineados possíveis trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este referencial teórico sintetiza o resultado dos estudos realizados para identificar os principais métodos de controle das plantas invasoras, alternativas potenciais de sensores para a sua identificação e os fundamentos para controle da principal planta alvo: capim-annoni.

2.1 Métodos de controle das plantas invasoras

Segundo Oliveira e Brighenti (2018), os métodos de controle de plantas daninhas podem usar técnicas como roçadeira, flamejamento, eletrocussão, solarização entre outras técnicas em desenvolvimento (produtos com ação herbicida, microrganismos para controle biológico de plantas, substâncias alelopáticas, plantio consorciado) fundamentadas em princípios biológicos, mecânicos, de cobertura morta e de alelopatia. Diversos métodos são listados em detalhes por Bakker *et al.* (2010) para a agricultura orgânica em um ambiente controlado, onde as plantas estão em linha, perfeitamente espaçadas. Em uma escala reduzida, estas tecnologias poderiam funcionar para o combate de ervas daninhas em meio ao campo nativo, entretanto precisam de ferramentas para identificar e garantir a velocidade e precisão na aplicação que atualmente torna inviável essa linha de desenvolvimento.

2.1.1 Controle mecânico

A roçada mecânica, muito utilizada para controlar plantas invasoras em pastagens, não tem se mostrado uma opção viável para invasoras como o capim-annoni. O resultado dessa prática é insatisfatório, pelas características evolutivas como a capacidade de rebrote da planta, reservas nas raízes ou reserva de açúcares (amido) nas raízes (FAVARETTO *et al.*, 2015). A fibrosidade das folhas dificulta o corte causando um elevado desgaste na roçadeira mecânica e trator, gera um alto consumo de combustível e a necessidade prematura de manutenção dos equipamentos (RODRIGUES; PEREZ; PEREZ, 2021). Outro problema da roçada mecânica do capim-annoni em florescimento é a piora da infestação por espalhar sementes para outras áreas não infestadas. Entretanto, em algumas situações, seu uso no Mirapasto é necessário para remover lenhosas que dificultam o uso

da Campo Limpo e permitir que o defensivo entre em contato com um tecido novo da planta, o que deve ser executado com muito critério (PEREZ, 2010b).

2.1.2 Controle com herbicida por cordas

[...] a tecnologia de aplicação é diretamente responsável pela correta colocação dos produtos fitossanitários no alvo, em quantidade necessária, de forma econômica, com mínimo de contaminação ambiental, requerendo o conhecimento biológico da praga (MATUO, 1990).

O método de aplicação do herbicida por cordas umedecidas permite utilizar defensivo não seletivo, para controlar com precisão as ervas daninhas altas em meio a pastagem. Outra vantagem é evitar o risco de deriva por pulverização, podendo ser utilizado em condições de vento.

Entretanto, apesar desta tecnologia poder custar menos que a pulverização existem problemas que devem ser observados, como a forma de aplicar, o efeito da deposição incluindo o seu *design*, o tipo e a formulação do herbicida podem afetar os resultados e problemas ocasionais de gotejamento que causa danos ao pasto.

2.1.3 Mirapasto e a roçadeira química Campo Limpo

A base para o desenvolvimento do presente trabalho é o Método Integrado de Recuperação de Pastagens (Mirapasto) Perez (2015), que utiliza a roçadeira química Campo Limpo também idealizada por Perez (2010b) na EMBRAPA Pecuária Sul e vistos na figura 5. Mirapasto reúne diversos procedimentos para recuperar a pastagem, observando a fisiologia da planta invasora, dispersão de sementes e manejo dos animais, para barrar sua disseminação. Recomendando atitude e cuidados para cada aspecto que pode aumentar o sucesso da supressão das invasoras, o equipamento Campo Limpo, que permite a aplicação seletiva de herbicida, destaca-se por combater as gramíneas invasoras estabelecidas na pastagem. Invasoras como o capim-annoni, presente no Rio Grande do Sul, Cipó-cururu (*Stigmaphyllon sinuatum*), capim-navalha (*Paspalum virgatum* L.) e outras ervas daninhas presentes em outros estados, conforme relatado por Ikeda e Inoue (2015), podem ser controladas sem comprometer as gramíneas forrageiras.

A Campo Limpo é eficiente para aplicar a quantidade ideal de defensivo em uma única aplicação, onde o sistema de cordas permeia o interior das touceiras visando aplicar

de forma homogênea. Isso permite combater as plantas altas, que podem representar 90% da infestação. Posteriormente, as plantas invasoras novas ou pastejadas, em baixa estatura, por estarem abaixo da linha de aplicação, devem ser tratadas em outra aplicação. Embora seja eficiente, existem diversas possibilidades de melhorias sendo buscadas pertencentes ao estado da arte na área de computação para atender ao agronegócio de forma que possibilitem desenvolver um produto que atenda uma operação complexa, com mais simplicidade e um custo que seja viável. Para tanto, por meio da eletrificação e automação, o uso de técnicas e planejamento das missões, além de gerar um refinamento na qualidade da aplicação, alcançado somente por operadores experientes, permite gerar e acessar um *dataset* espaçotemporal do pasto, relacionado à variabilidade da infestação. Esse procedimento possibilita alimentar os sistemas de predição e controle, como o em desenvolvimento pelo grupo responsável pelo TouceiraTech (SOARES; PEREZ; PINHO, 2020), seguindo o conceito de *smart farm*, com micro dados espaciais que aumentem a predição localizada, permitindo extrair o máximo dos sensores usados, elevando o nível de acerto e capacidade de operação da máquina. Essas novas diretrizes visam uma produção mais sustentável, com ações para reduzir a quantidade total de defensivos aplicados, a emissão de carbono e aumentar a segurança do operador ao reduzir a exposição aos produtos químicos pela não-pulverização do herbicida na atmosfera. Esse processo reforçaria os benefícios já obtidos com a tecnologia, a longo prazo, pelo controle continuado de manchas de plantas invasoras, interrompendo o processo de reinfestação e reduzindo a quantidade total de defensivos.

Figura 5 – Equipamentos de corda na mesma escala: Campo Limpo +, Campo Limpo, Enxada Química e Folder Mirapasto



Fonte: Adaptado de Perez (2008), Perez (2010b) e Grazmec (2021)

Usualmente, o comprador da roçadeira Campo Limpo recebe o treinamento básico de operação do equipamento, baseado nos ajustes de altura e identificação do grau de infestação para o correto uso no campo. Entretanto, ainda existe a necessidade de difusão

do conhecimento sobre o Mirapasto, como nos seminários “Capim-annoni Tolerância Zero”, realizados de forma conjunta pela Embrapa, Grazmec e Senar, desde 2019. A restrição de conhecimento de todo o conjunto de técnicas para a recuperação de pastagens, conforme demonstraram as entrevistas realizadas por telefone, na etapa preliminar de levantamento de requisitos, mostra ser necessária uma maior divulgação do método, podendo ser solucionada ao incluir uma cartilha para cada equipamento novo ou um adesivo *QR-Code* no equipamento com o *link* para acesso à cartilha digital e treinamentos.

2.2 Sensoriamento da altura e densidade de plantas invasoras

Segundo Zhang (2015), as atividades de agricultura de precisão utilizam amplamente os sensores e atuadores dentro da automação no campo, para conhecer a variabilidade de parâmetros e também gerenciá-las. A aplicação com precisão no campo, em taxa variável, pode exigir mapas de prescrição ou sensoriamento local, onde os sensores fotoelétricos podem ser incorporados a sistemas de aplicação de herbicida em taxas variáveis. Contudo, este tipo de sensor não distingue as ervas daninhas da plantação e está limitado a uma porção de plantas cobrindo uma área. Para esta tarefa específica com um campo manejado, para que a altura das ervas daninhas e plantas sejam distintas, é necessário o conjunto de sensoriamento de velocidade com Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) ou sensor de deslocamento relacionando a altura e classifique a densidade de acordo com um modelo específico para o local. Outro aspecto é compreender o funcionamento do sensor segundo o *datasheet*, aspectos construtivos, sua capacidade de ajuste e responsividade ao material sensoriado conforme as propriedades físicas de textura, absorção do sinal, resposta e quais as intervenções devem ser tomadas para que seu uso seja viável.

Existe uma heterogeneidade entre os piquetes¹ com relação à massa de forragem e a altura devido à variação da lotação durante o ano (BARIONI; FERREIRA, 2007), além disso, a variação no piquete ocorre por diferentes motivos como, por exemplo, diferentes solos que podem ocorrer em uma mesma divisão, localização de sombra e aguadas, locais próximos às porteiras, que recebem mais esterco, entre outros. Esses mesmos fatores tendem a imprimir variabilidade espacial na distribuição de plantas indesejáveis. Assim, o ajuste de altura do aplicador de herbicida é essencial para aplicar o defensivo na quantidade e local correto, sendo os sensores de distância responsáveis por indicar

¹Área que corresponde a uma sub-divisão de uma unidade de manejo de pastejo.

o ajuste de altura e a dosagem de defensivo conforme o grau de infestação dado pela densidade. Idealmente, o sistema de cordas deve reagir de forma similar à suspensão ativa de automóveis, que ajusta a altura em resposta às irregularidades no terreno.

Neste contexto, observa-se a altura das plantas invasoras por meio do sistema de sensores, onde a estrutura do aplicador deve ser posicionada em uma altura correta, considerando as seguintes restrições para o aplicador:

- Deve atingir a parte ativa da vegetação alvo;
- Não deve estar acima da vegetação alvo de forma que não entre em contato;
- Deve evitar áreas mortas das plantas por desperdiçar o insumo;
- Não pode ficar excessivamente baixo, de forma que dobre a vegetação, gerando um efeito guarda-chuva;
- Não deve ficar excessivamente baixo de forma que atinja as plantas desejáveis; e
- Não deve ficar excessivamente baixo de forma que sofra danos de pedras, lenhosas, cupinzeiros, terreno.

É observado na figura 6 a parte de baixo da estrutura de cordas na Campo Limpo+. A barriga flexível acompanha a densidade da vegetação e também gera um componente horizontal, entretanto existem variações de altura de até 3 cm entre as cordas por questões de padronização no comprimento ou torção na instalação.

Figura 6 – Barriga formada pelas cordas, com peso e flexibilidade para acompanhar uma maior densidade da vegetação e cobrir uma faixa de altura



Fonte: Autor (2022)

Caso a planta a ser controlada esteja muito alta, o que pode acarretar o amassamento pelas rodas do trator e o escape da altura de aplicação do herbicida, é recomendado realizar a roçada mecânica e, posteriormente, realizar o manejo com o gado para criar a diferença de estratos necessária para a aplicação.

Cabe também destacar que, entre as boas práticas de manejo de um sistema de pecuária, a literatura cita a necessidade de medir a altura da vegetação, como parte dos dados necessários para estimar a disponibilidade de forragem e a quantidade de biomassa, o que permite ajustar a taxa de lotação. Esse procedimento, utilizando uma régua graduada, também pode ser realizado por meio de sensores, tornando os dados coletados de forma automática de interesse para o presente estudo, assim como para outras aplicações como adequar a taxa de lotação para uso da máquina.

2.2.1 Sensores de distância Laser *Time-of-Flight* (ToF)

Antes restritos pelo custo e tamanho, hoje estão disponíveis novos sensores do tipo *Light Detecting And Ranging* (LiDAR) de baixo custo, que operam em infravermelho próximo. Estes sensores utilizam os princípios da ótica de Fourier para calcular rapidamente distâncias ao medir, com grande precisão, alta resolução, baixo consumo, o tempo entre o disparo e o retorno de uma rajada de fótons, chamado *Time-of-Flight* (ToF). Um exemplo é a família de sensores ToF da STMicroelectronics (STMICROELECTRONICS, 2021a), que inclui o módulo VL53L1X (figura 7), recomendado para uso em dispositivos como robôs aspiradores, veículos autônomos e *drones*.

Figura 7 – Módulo integrado para medir distância VL53L1X, baseado em laser Classe 1, faixa de 940 nm



Fonte: STMicroelectronics (2018b)

Outra alternativa disponível são os sensores ToF da fabricante Benewake, tais como o módulo TFmini Plus (figura 8), que tem pontos positivos e negativos em comparação aos dispositivos da STMicroelectronics, como capacidade e características de operação, mas com um custo relativamente mais elevado.

Figura 8 – Sensor de distância TFmini Plus, faixa de 850 nm



Fonte: Benewake (2019)

2.2.1.1 Cálculo da distância ToF

Similar ao sensor ultrassônico que mede o tempo de retorno da onda de som, o ToF registra o tempo que o fóton é emitido, encontra o alvo e retorna ao sensor, conforme a equação 1, onde um centímetro equivale a 67 picossegundos. A equação 1 da distância se baseia no tempo de viagem do Fóton para encontrar uma superfície e retornar, onde “c” é a velocidade da luz arredondada em 3×10^8 m/s e “t” é o tempo decorrido.

$$D = (c \times t) / 2 \quad (1)$$

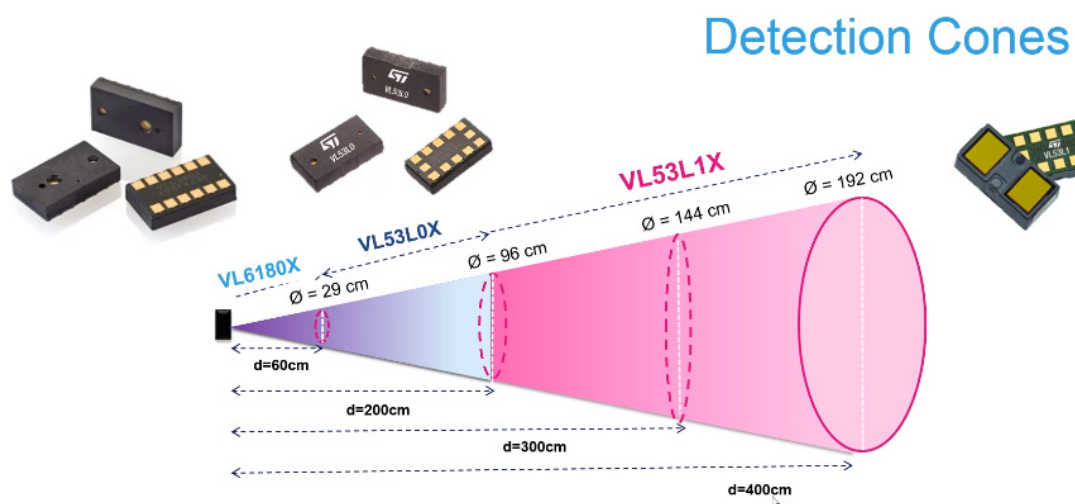
O *Single-Photon Avalanche Diode* (SPAD) ou em português, Diodo de Avalanche de Fóton Único, é um termo que define uma classe de fotodetectores capazes de detectar sinais de baixa intensidade e sinalizar o tempo de chegada do fóton com alta resolução temporal, dada em picossegundos, construídos com semicondutores baseados em uma junção PN com polarização reversa em uma tensão mais alta do que a tensão de ruptura (INOUE *et al.*, 2020).

A sequência de operação começa ao estabelecer quantos SPAD são necessários (ex.: 16x16). Em seguida, durante um intervalo de 30 ms, são disparados cerca de um milhão de pulsos. Durante o processo de medição, o sensor realiza duas operações de auto calibração, medindo a temperatura do sensor e a captura do sinal na faixa *Near Infrared* (NIR), ou infravermelho próximo em português, sem disparar novos pulsos, o que permite ajustar a potência do *Vertical Cavity Surface Emitting Laser* (VCSEL) e disparar algumas rajadas para avaliar a intensidade do sinal de retorno e ajustar novamente a quantidade SPAD a serem usados. O processo de auto calibração pode levar de 3 a 4 ms. Para uma superfície significativamente opaca ou distante, são necessários todos SPAD, enquanto para um alvo brilhante e próximo são usados apenas um ou dois. Após esse procedimento, chamado de Seleção Dinâmica de SPAD (DSS), os SPAD são desligados

e os tempos armazenados no *hardware*. Todos os fótons detectados durante cada ciclo de trabalho do sensor são agrupados em um histograma, onde o histograma é avaliado e a forma determina a distância até o alvo por meio estatístico com mais de uma variação e intervalos de repetição de pulsos diferentes para detectar e tratar sombras.

A precisão é dada em milímetros, devido à medição em picossegundos, mas a lógica do sensor não é rápida o suficiente. Para isso, são usadas estatísticas, onde o sensor coleta entre 0,5 e 20 milhões de fótons, segundo o fabricante. Outro fator é o diâmetro do círculo do alvo, onde os fótons do centro e das bordas percorrem distâncias diferentes em uma distância de 60 cm, o cone tem 29 cm de diâmetro, conforme pode ser observado na figura 9.

Figura 9 – Cone de detecção de objetos com diferentes sensores ToF da STMicroelectronics

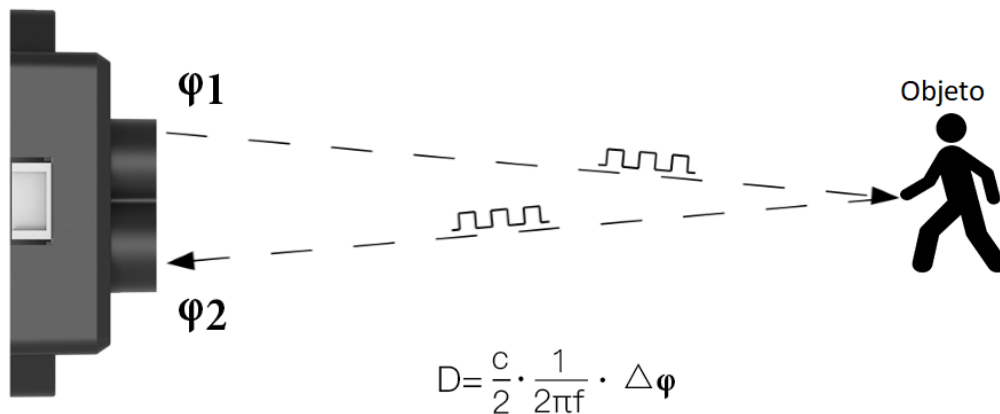


Fonte: STMicroelectronics (2021a)

Diferentemente do que ocorre com os sensores da STMicroelectronics, o LiDAR TFmini Plus realiza o cálculo da distância ToF a partir da emissão periódica de ondas de modulação de raios NIR em 850 nm, refletidos após o contato com o objeto. O sensor calcula o tempo de voo medindo a diferença de fase de ida e volta e, em seguida, calcula o intervalo relativo entre o sensor e o objeto de detecção, conforme mostrado na figura 10.

Importante destacar que os sensores dos dois fabricantes realizam diversas medições, onde a repetitividade gera a precisão da medida, relacionando a força do ponto lido com a taxa de leitura.

Figura 10 – Cálculo da distância, baseado na diferença de fase, da Benewake



Fonte: Benewake (2019)

2.2.1.2 Sensores da STMicroelectronics

Os *datasheets* informam a capacidade de medir distâncias acima de 200 cm para o modelo VL53L0X e 400 cm para o VL53L1X para objetos brancos, com refletância de 88% em um ambiente sem infravermelho (IR). Ao contrário dos sensores IR convencionais, a tecnologia de resposta de ToF permite medir a distância do alvo independentemente da cor e refletância, além de programar o tamanho da *Region of Interest* (RoI) ou região de interesse, servindo para criar um *array* multi zona. Seu *driver* inclui funções de calibração para vidros de proteção, podendo ter o desempenho compensado conforme o manual da API específica por modelo. Há outros sensores da família, como o VL6180X, que tem capacidade máxima de 60 cm, e o VL53L3CX, com capacidade máxima de 500 cm. Já a quarta geração, com o VL53L1 e o VL535CX, permite, segundo a fabricante, detectar múltiplos objetos em um *array* e podem operar a 400 e 800 cm, respectivamente. Todos os modelos são substituições físicas com a mesma pinagem e necessidades, mas utilizam API, *softwares* e recursos diferentes.

A figura 11 compara os módulos ToF da STMicroelectronics, destacando-se os dois modelos analisados. Estas apresentam diferentes parâmetros de desempenho, conforme a refletância do objeto e condições de luz ambiente, documentados nos respectivos *datasheets*, sendo que o modelo de entrada, VL53L0X, não atende ao requisito do projeto, ao operar de forma limitada a 40 cm, para refletância de 17% em ambientes com luz de 10 kcps/SPAD. Por outro lado, o modelo VL53L1X se mostra compatível, pois apresenta uma capacidade nominal máxima de medição de 120 cm com variação de ± 25 mm em modo de 100 ms, em ambientes com luz de 200 kcps/SPAD e refletância de 17%.

Figura 11 – Comparativo entre as distâncias mensuráveis e os recursos da família de sensores ToF da STMicroelectronics. Em destaque os dois sensores da linha testados e em laranja o sensor definido como ideal (VL53L1X)

	VL6180X SENSOR DE PROXIMIDADE+ SENSOR DE LUZ AMBIENTE	VL6180 SENSOR DE PROXIMIDADE	VL53L0X SENSOR DE DISTÂNCIA	VL53L1X SENSOR DE DISTÂNCIA	VL53L3X SENSOR DE PROXIMIDADE+ SENSOR DE MÚLTIPLOS ALVOS	VL53L1 SENSOR DE LONGA DISTÂNCIA+ SENSOR DE MÚLTIPLOS ALVOS	VL53L5CX SENSOR DE MULTIZONAS
NÚMERO DA PEÇA	VL6180XV0NR/1	VL6180V1NR/1	VL53L0CXV0DH/1	VL53L1CXV0FY/1	VL53L3CXV0DH/1	VL53L1CBV0FY/1	VL53L5CXV0GC/1
DISTÂNCIA MÁX	20 cm	60 cm	200 cm	400 cm	500 cm	800 cm	400 cm
SENSOR DE LUZ AMBIENTE	•						
DETECÇÃO DE CURTA DISTÂNCIA	•	•	•		•		
DETECÇÃO DE MÚLTIPLOS ALVOS					•	•	•
MULTI-ZONA						•	•
FOV PROGRAMÁVEL				•		•	
MODO DE BAIXA POTÊNCIA	•	•	•	•			•

Fonte: Adaptado de STMicroelectronics (2021a)

A tabela 1 sintetiza as principais características do VL53L1X adotado no trabalho, presente na *shield* CJVL530X-V2, com base no *datasheet* STMicroelectronics (2018b). Conforme destacado pela fabricante, o seu uso em um ambiente externo requer parâmetros específicos e possui restrição de luminosidade equivalente a um dia nublado.

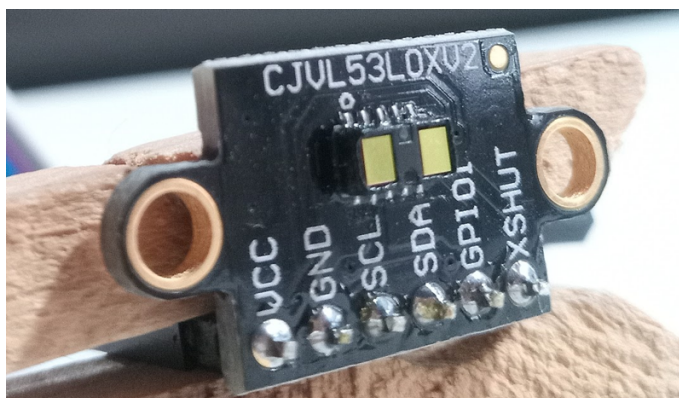
Tabela 1 – Especificações do VL53L1X

Parâmetros	Valor
distância máxima	400 cm
laser emissor	940 nm
resolução	1 mm
campo de visão	15-27°
taxa de leitura	acima de 50 Hz
tamanho do módulo	4,9 x 2,5 x 1,56 mm
consumo standby	5 μ A
consumo médio	20 mW em 10 Hz, 33 ms
tensão	2,6 a 3,5 volts

Fonte: Adaptado de STMicroelectronics (2021a)

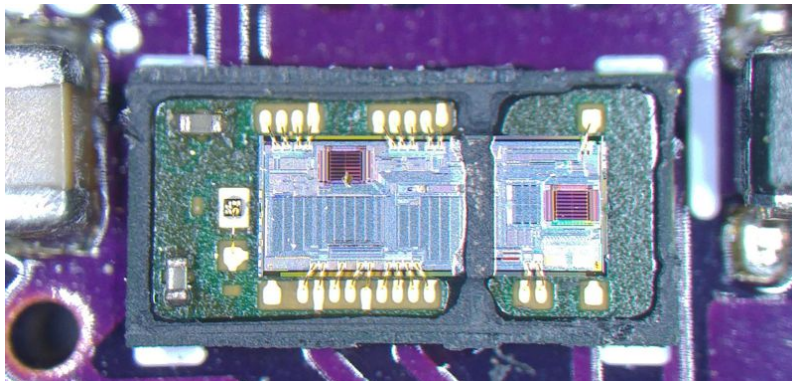
A *shield* CJVL530X-V2 (figura 12) tem dimensão de 25 × 12 × 2 mm, pesa 0,5 g e consome de 15 a 40 mA, tendo ao centro o módulo VL53L1X. É possível identificar, na construção do módulo, visível na figura 13, a disposição dos elementos de transmissão ao centro e recepção de pequenos retângulos. O VL53L1X integra um laser Classe 1, invisível na faixa de 940 nm, uma matriz *SPAD* 16x16 com lente integrada e um microcontrolador de baixo consumo programável, conforme o diagrama da figura 14. O circuito do módulo integrado requer dois capacitores de 100 nF e 4,7 μ F o mais próximo possível dos pinos *AVDDVCSEL* e *AVSSVCSEL*, já a *shield* CJVL530X-V2 contém mais nove componentes, sendo quatro capacitores, dois resistores de *pull-up* para o *XSHUT* e *GPIO1*, uma rede resistiva de 10 k ohms, um mosfet 72k, um regulador de tensão modelo 662k série PW6566 que, converte a alimentação recomendada de 5 para 3,3 volts, simplificando o uso do módulo.

Figura 12 – *Shield* CJVL530X-V2 com o módulo VL53L1X ao centro



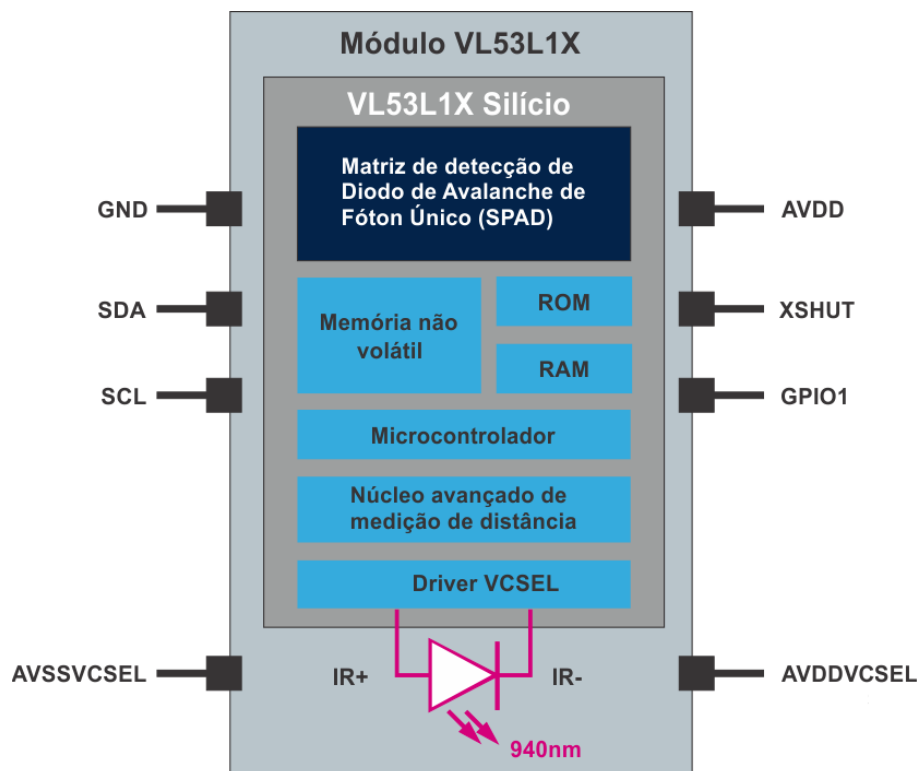
Fonte: Autor (2022)

Figura 13 – Módulo VL53L1X, sem o encapsulamento e lente, permitindo observar a separação física entre o emissor, receptor e seu formato



Fonte: Strayan (2018)

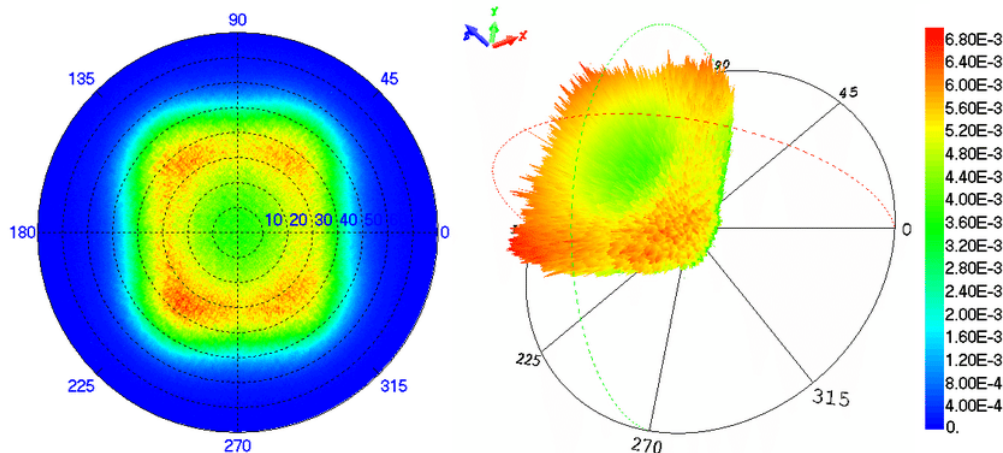
Figura 14 – Diagrama do VL53L1X



Fonte: Adaptado de STMicroelectronics (2018b)

O padrão de dispersão e a potência do laser do VL53L1X foram medidos por Boher e Leroux (2019) utilizando um sensor CMOS de 12 bits, apresentado na figura 15, onde o retângulo caracteriza o módulo SPAD do laser apresentando uma distribuição de luz bem definida por lentes adicionais.

Figura 15 – Emissão de um VCSEL de 940 nm com ótica adicional: padrão angular (esquerda) e representação 3D (direita) do sensor VL53L1X



Fonte: Boher e Leroux (2019)

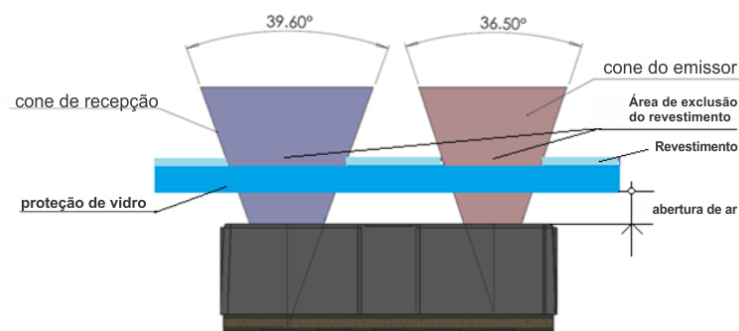
2.2.1.3 Calibração, proteção, pinagem, perfis de operação e área de interesse no VL53L1X

Para alcançar a maior precisão, o sensor VL53L1X conta com duas funções de calibração da distância mensurada. A primeira a ser executada é denominada *Offset Calibration* e a segunda *Crosstalk Calibration*. Além dessas, disponibiliza funções para ler ou definir manualmente o valor. É recomendado recalibrar o SPAD a cada variação de 8 graus na temperatura, conforme o manual da API do módulo, justificado pela diferente dilatação de cada componente como a lente e o sensor. O procedimento de calibração requer um objeto cinza com 17% de refletância a uma distância de 140 mm, com a função *Calibrate Offset (140)* (STMICROELECTRONICS, 2021b). Cabe destacar que uma característica da luz em 940 nm é que, a maioria dos plásticos são translúcidos e, a menos que se pinte a superfície, o sensor pode detectar um objeto através do plástico. Outra condição semelhante pode ocorrer com líquidos como a água, onde o sensor pode medir o fundo do recipiente e não a superfície, para a qual uma solução apontada é realizar a calibração de *Offset* e aumentar o *time budget* no *software*.

Para a proteção física, o fabricante disponibiliza um guia com os requisitos de

design para otimizar o projeto. A cobertura vista na figura 16 tem o propósito de prover proteção física ao módulo, incluindo sujeira ou filtro óptico adicional. É recomendado o uso de materiais com transparência acima de 85% como acrílico e vidro temperado, não sendo recomendado o Polietilenotereftalato (PET) e materiais que filtram a onda de 940 nm. Por fim, a camada deve ser fina, lisa e paralela ao sensor para não distorcer a luz. A calibração *Crosstalk* serve para compensar a quantidade de luz dependendo da proteção na frente do sensor STMicroelectronics (2021b).

Figura 16 – Sistema FoV do VL53L1X com receptor com 27° de abertura. A figura apresenta o cone de abertura com as margens de montagem de 36,5° e 39,60° e áreas de exclusão ao utilizar um revestimento sobre a proteção de vidro

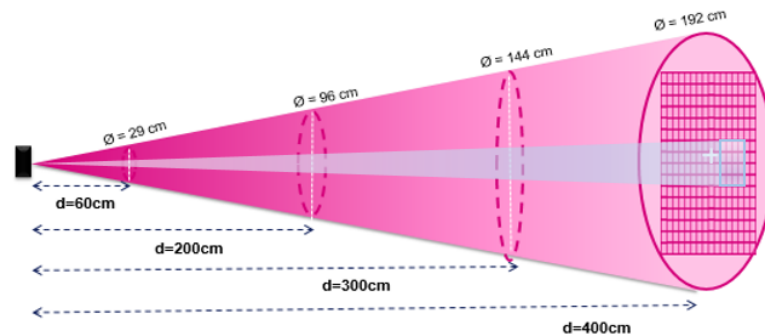


Fonte: Adaptado de STMicroelectronics (2018a)

Existem usos onde a aplicação exige configurar a área de interesse (RoI) para melhorar a precisão, como quando instalado em um tubo onde as paredes refletem parte do sinal e podem afetar a distância medida. A consequência é diminuir a capacidade de detectar os fótons. O manual de programação do RoI do VL53L1X informa que o menor ângulo de abertura, com área de 4x4, é de 15°, enquanto 8x8 limita em 20° e 16x16 restringe a 27°, conforme o cone de área de interesse observado na figura 17.

Além dos pinos de alimentação e dados, o conector *XSHUT* é uma entrada usada para o sensor ficar no modo de espera para comunicação I2C (*HW standby mode*), e permite operar múltiplos sensores realizando o procedimento de acionar um por vez com o endereço padrão ou inicializar unitariamente e alterar o endereço de comunicação, que acontece pelo barramento serial baseado no protocolo *Inter-Integrated Circuit* (I2C) no endereço 0x29. Um novo endereço pode ser definido durante a inicialização, apenas definindo na função padrão de *begin lox.begin(0x30)* para inicializar no endereço exemplo de 0x30 ou a função *lox.setAddress(0x30)* para alterar a qualquer momento. Outro recurso de interesse é o pino *GPIO1*, que opera como uma saída de interrupção programável,

Figura 17 – Área de interesse (RoI), destacado a seleção dos SPAD da matriz 16x16



Fonte: STMicroelectronics (2021a)

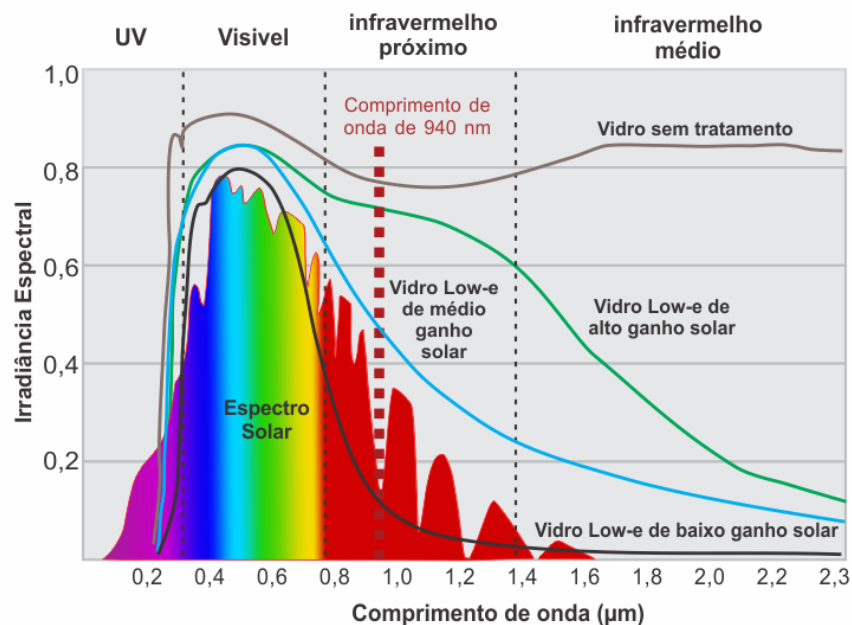
mutando de estado quando um objeto entra na zona desejada, ou sai desta zona. O VL53L1X opera com dois perfis de distância, onde o modo de longa distância permite operar a até 4 metros, mas seu alcance máximo é significativamente afetado pela luz natural. Operando no modo de curta distância, fica limitado a 1,3 metros, e se torna um pouco mais imune à luz. Para seleção do perfil de distância, a biblioteca inclui funções como *setDistanceModeShort()* e *setDistanceModeLong()*. Pierazzoli e Domingues (2021i) apresentam detalhes sobre a metodologia exploratória usada para avaliar o VL53L1X.

2.2.1.4 Impacto da luz ambiente no VL53L1X

O ambiente externo (*outdoor*) representa um desafio, porque a luz solar reduz a distância de alcance. É possível monitorar as condições de operação do sensor com os dados de intensidade do sinal, intensidade da luz ambiente e um *status* das medições que gera imprecisão das leituras. O ambiente escuro é definido como a inexistência de NIR, na banda de $940\text{ nm} \pm 30$, sendo a quantidade de radiação informada no manual e pelo sensor medindo em fótons por segundo, na unidade de quilocontagens (de fótons) por segundo (kcps). Como referência, o manual cita que 5 kcps/SPAD representa a luz de um escritório, 50 kcps/SPAD a luz de um dia ensolarado atrás de uma janela e 200 kcps/SPAD para a luz solar sobre o sensor. O VL53L1X apresenta a especificação de capacidade máxima de medição em ambientes com luz de 120 a 130 cm conforme a refletância do objeto, no modo de curta distância. A regulamentação de segurança do laser para os olhos, limita o brilho do laser no sensor, entretanto, a luz do sol pode saturar o SPAD e este passa a não diferenciar o sinal, tendo em vista que o sol gera um excesso de luz na

faixa de 940 nm. Uma solução descrita pelos engenheiros da STMicroelectronics seria utilizar mais SPAD, para não saturarem, o que impactaria no custo do sensor. Para o uso *indoor*, os vidros revestidos nas instalações podem filtrar a radiação infravermelha (IR) vinda da radiação solar, permitindo passar energia pela janela. A figura 18, baseada na classificação da *National Fenestration Rating Council* (NFRC), criada pela Comissão de Energia da Califórnia, ilustra o espectro de transmissão do vidro sem tratamento e as curvas de três filtros. O termo *Low-e* significa que o vidro tem um revestimento de baixa emissividade sendo rotulados segundo o coeficiente de ganho de calor (SHGC) e a transmissão visível (VT) (ELEY, 2016).

Figura 18 – Radiação solar e vidros com filtro de IR



Fonte: Adaptado de Carmody e Haglund (2012)

Portanto, se torna necessário o uso de uma estrutura para limitar a incidência de sol no ponto sensoriado, sendo um aspecto confirmado com o fabricante, mesmo explorando todas as configurações disponíveis na API.

2.2.1.5 Sensoriamento por refletância da vegetação geral e do capim-annoni

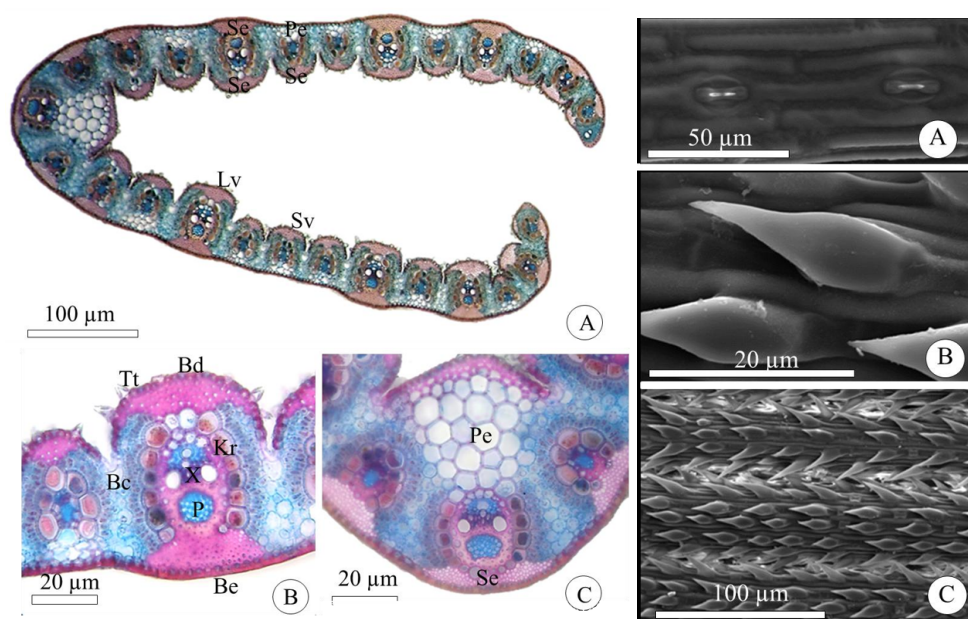
Para que o sensor LiDAR possa atender a operação de reconhecimento da altura da pastagem, três parâmetros devem ser observados: o comprimento de onda de trabalho e sensibilidade de refletância para o alvo; a distância de instalação; e as condições de trabalho e suas fontes de ruído, como a luz, que restringe a distância máxima de operação.

Com relação à faixa eletromagnética de 940 nm \pm 30 nm, o sensor deve se encontrar na área esperada para medir a distância da vegetação, grama, grama seca, solo arenoso e solo argiloso pela capacidade de energia refletida no espectro de trabalho e sua necessidade. Florenzano (2002) indica refletância acima de 40% para a vegetação (verde e sadia) com a maior refletância na faixa do infravermelho próximo, conforme o gráfico da figura 20, ilustrada pela linha verde.

No espectro visível, a refletância baixa ocorre em função da absorção da radiação pelos pigmentos da folha; no comprimento de 450 nm está o azul, em 650 nm o vermelho pelos carotenos, xantofilas e o pequeno pico de refletância do verde ocorre em 550 nm onde a clorofila está presente.

O comprimento de infravermelho próximo tem alta refletância devido à estrutura do mesófilo esponjoso e, especificamente a estrutura do capim-annoni (*Eragrostis plana* Nees) que foi analisada por Favaretto *et al.* (2015), com microscópio ótico e eletrônico (figura 19), usando amostras de cinco plantas, coletadas em Passo Fundo (28° 15' S, 53° 24' W), exibindo que as paredes externas são espessas e lignificadas, duras e impermeáveis. Essa alta fibrosidade da planta gera dificuldade de corte e favorece a refletância no espectro NIR.

Figura 19 – Estrutura da folha da *Eragrostis plana* Nees visualizada no microscópio ótico e no microscópio eletrônico



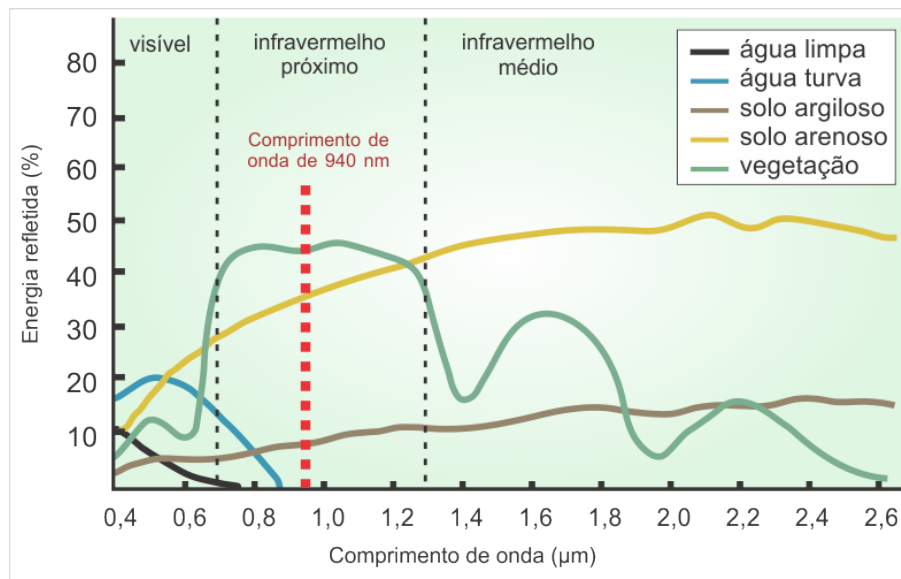
Fonte: Favaretto *et al.* (2015)

Outro aspecto observado com relação à refletância está no índice de área foliar (IAF), conforme o tipo de vegetação e tipo de solo observado com um sensor

multi-espectral. Segundo Neves *et al.* (2019), “As folhas finas em plantas tendem a resultar em IAF menores. Pequenos valores de IAF, por sua vez, aumentam a influência do solo na resposta espectral”. Caratti (2019) também relatou dificuldades de uso de IRGA (*Infrared Gas Analyzer*) para medições fisiológicas em plantas de capim-annoni, 468 – 668 cm^2 encontrados em 10 materiais deannoni do RS como área foliar.

Com relação ao solo, para o comprimento de onda de 940 nm, a refletância do solo arenoso, visto na linha amarela, pode apresentar valores próximos a 35% e pouca diferenciação entre o solo e vegetação, observada na figura 20. A refletância de 5% para o solo argiloso, visto na linha marrom, pode restringir a distância medida, visto que o *datasheet* da STMicroelectronics (2018b) apresenta o comportamento de medição com objetos com a refletância de 88%, 54% e 17%, limitando a distância máxima de detecção, que diminui conforme se reduz a refletância. Jensen e Epiphanyo (2009) citam mais aspectos como cor, umidade, matéria orgânica e granulometria como fatores que influenciam a refletância, enquanto Novo (2010) destaca o comportamento espectral de rochas com propriedades de teor de ferro, que absorvem o espectro de 800 a 1000 nm.

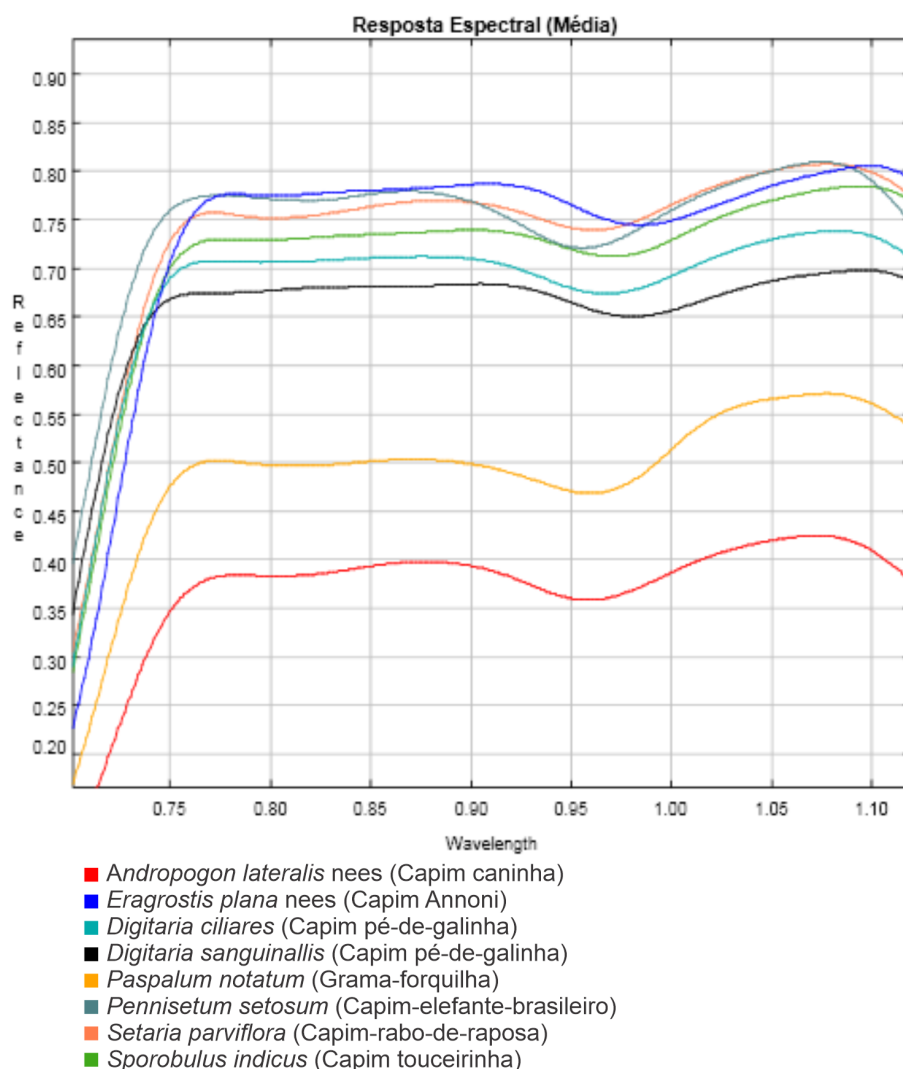
Figura 20 – Curva espectral da vegetação, água e solo



Fonte: Adaptado de Florenzano (2002)

Especificamente no bioma Pampa, Prado *et al.* (2018) mediram a resposta espectral de oito plantas, na região de Uruguaiana-RS, durante o verão, obtendo valores de refletância entre 36% e 80%, na faixa de 940 nm \pm 30 nm. Na figura 21 pode ser observada a refletância da planta invasora capim-annoni, em azul, a qual está agrupada com as plantas com maior reflexão, indicando uma boa qualidade no retorno do sinal ao realizar a medição de altura. Contudo, não apresentam dados das outras estações do ano, onde o grau de desenvolvimento e estresse hídrico são diferentes.

Figura 21 – Refletância entre 750 e 1100 nm de vegetações do bioma Pampa. Em azul o Capim Annoni, o *Setaria* (laranja) é geneticamente próximo aoannoni e o *Sporobulus* (verde claro) morfologicamente



Fonte: Prado *et al.* (2018)

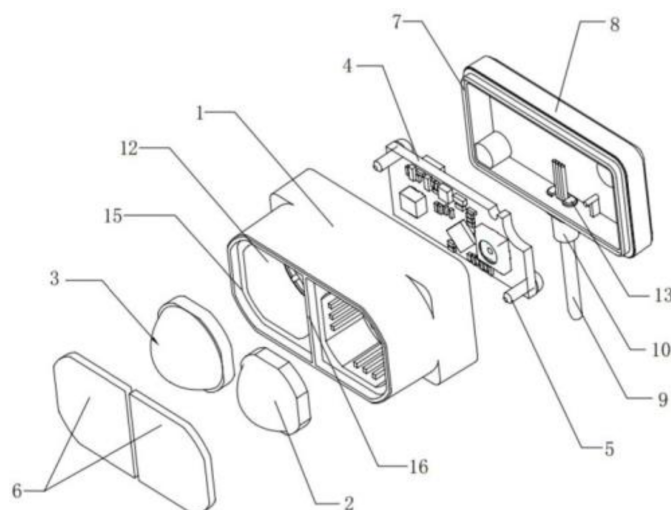
A partir dos elementos identificados a partir da revisão da literatura, foi possível verificar o potencial de uso do sensor de distância laser ToF VL53L1X para o sensoriamento do capim-annoni, tendo em vista as condições esperadas de operação para

o ambiente e o objeto medido com sua resposta espectral na faixa de operação do sensor. Se observou as condições locais na figura 21 de forma detalhada por espécie e na figura 20 adaptada, onde o comprimento de onda de 940 nm do sensor se encontra para os elementos do ambiente.

2.2.1.6 Sensores da Benewake

Representando uma alternativa ao VL53L1X, o sensor de distância TFmini Plus, fabricado pela Benewake Co., Ltd., também é do tipo ToF, opera em condições de 70 klux, com encapsulamento de nível IP65, visto na figura 8, que protege contra água e poeira. A diferença entre o sensor TFmini e TFmini Plus é a estrutura IP65 que vem calibrada de fábrica e uma série de detalhes da sua construção. Seus componentes são observados na figura 22 de vista explodida, identificados como: 1 - a carcaça principal; 2 - a lente do transmissor; 3 - a lente do receptor; 4 - placa de circuito; 5 - parafuso; 6 - lentes de proteção; 7 - ponto da estrutura plástica soldada; 8 - carcaça traseira; 9 - cabo; 10 - base do cabo; 11 - coluna de focalização; 12 - furo de montagem; 13 - estrutura farpada; 14 - *shield* de proteção; 15 - ranhuras da montagem; e 16 - estrutura de separação luz entre emissor e receptor.

Figura 22 – Vista explodida do TFmini Plus, composto de múltiplas partes



Fonte: Dou *et al.* (2021)

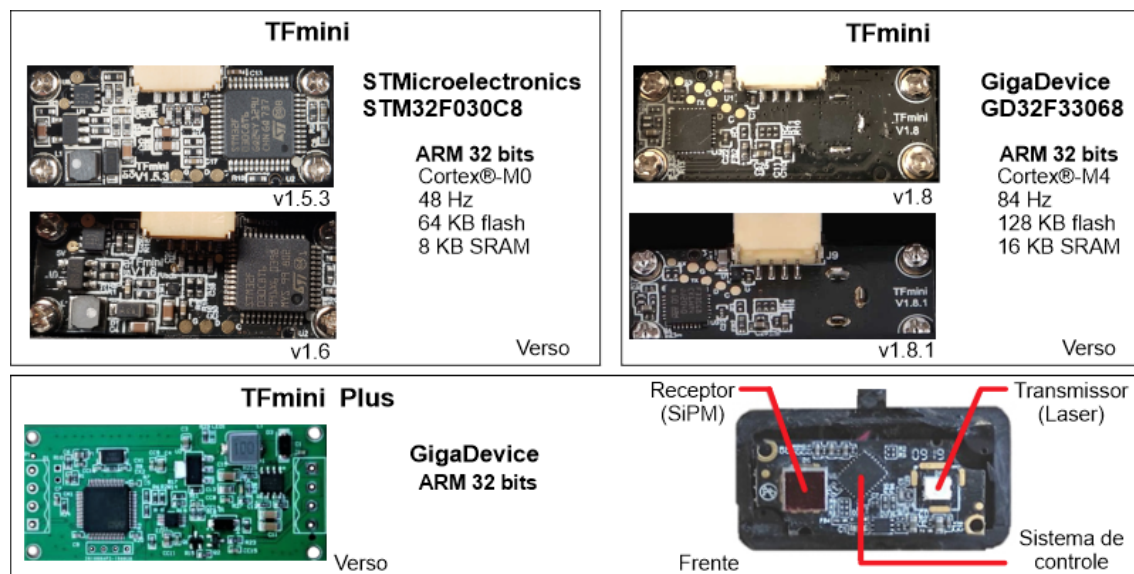
Assim como o sensor da STMicroelectronics, o TFmini Plus usa um microcontrolador de 32 bits dedicado ao processamento do sinal. Contudo, enquanto o VL53L1X integra o microcontrolador e toda parte ótica em um único invólucro, o

TFmini Plus separa os componentes da ótica e utiliza um microcontrolador de uso geral do tipo ARM para o processamento dos sinais, o qual evoluiu conforme a versão. A figura 23 mostra a disposição do microcontrolador e demais componentes, permitindo identificá-lo e levantar suas características, visto que o fabricante não disponibiliza dados específicos da construção do sensor, código-fonte ou ferramentas para alterar o funcionamento. Foi possível observar, nas versões 1.5.3 e 1.6, o uso do microcontrolador da STMicroelectronics STM32F030C8 que possui arquitetura ARM® Cortex®-M0 RISC com frequência de 48 MHz, flash de 64 KB on-chip e 8 KB de SRAM. Conta com 39 portas de *GPIO* que podem ser alternadas entre entrada ou saída, possui um conversor ADC de 12-bit ADC, dez temporizadores, um de controle, um básico e cinco de propósito geral de 16-bit, e um de 24-bit, seis controladores avançados de PWM, calendário *RTC* com alarme para despertar do modo de espera. Para a comunicação dispõe de dois canais *SPI*, dois *I2C* e dois *USART* (STMICROELECTRONICS, 2013). As versões 1.8 e 1.8.1 utilizam o microcontrolador do fabricante GigaDevice Semiconductor Inc., modelo GD32F33068, que possui uma arquitetura ARM® Cortex®-M4 RISC com características superiores, operando em 84 MHz, flash de 128 KB e 16 KB de SRAM. Dispõe de 55 portas de *GPIOs* e 16 interrupções externas. O dispositivo utiliza um conversor ADC de 12-bit ADC, cinco temporizadores de uso geral com resolução de 16-bit, e um de 32-bit, um controlador avançado de PWM e como comunicação dispõe de dois *SPI*, dois *I2C* e dois *USART* (GIGADEVICE, 2022). Comparativamente, o ARM Cortex-M4 dispõe de mais instruções de processamento digital de sinais, sendo que as de ponto flutuante permitem executar operações de 12 a 174 vezes mais rápido que o ARM Cortex-M0 que consumiria 2 a 9 vezes mais energia (na prática, o consumo máximo informado no *datasheet* do fabricante STM32F030xx é de 120 mA somando todas as linhas e 33,6 mA para a linha GD32F303xx).

O receptor do VL53L1X utiliza SPAD capazes de detectar um fóton por vez e requerem uma temporização de alguns nanossegundos. Já o TFmini utiliza SiPM que, segundo Villa *et al.* (2021), consistem em conexões em paralelo de diversas microcélulas composta de um SPAD e seu circuito. Seu funcionamento se dá pela detecção de fótons e a taxa de detecção opera de forma proporcional ao número de SPAD que formam o SiPM.

A comunicação com o sensor ocorre em nível lógico de 3,3 V para TX e RX, e se recomenda um conversor para os microcontroladores de 5 V. A saída de dados é simplificada ao se restringir às funções de distância, força do sinal, versão do *firmware* e temperatura interna. O sensor permite parâmetros de configuração, como detecção em

Figura 23 – Circuito eletrônico da série TFmini e a atualização do microcontrolador de 32 bits entre as versões, trazendo mais recursos e menor consumo



Fonte: Adaptado do fórum da ardupilot.org e Benewake Dou *et al.* (2021)

uma distância programada, modo de curta distância para 0–5 m e longa para 1–12 m influenciando o consumo energético. A unidade de saída dos dados pode ser alterada de cm para mm, e existe um controle para restringir a saída, se o sinal não alcançar a potência mínima definida. O TFmini Plus sensor não possui rotinas de calibração, somente a opção de delimitar o retorno de distância em um valor nulo, conforme a força do sinal recebido e apesar da grande disponibilidade de pinos e capacidade de processamento, o projeto não incluiu pinos para gerar interrupções ou controlar o desligamento por buscar a simplicidade e redução de peso para o uso em *VANT*. Sua capacidade de medição varia conforme a condição *indoor* ou *outdoor* e a refletância do material, onde a zona de medição em condições extremas se reduz para três metros para casos de alta luminosidade e baixa refletância.

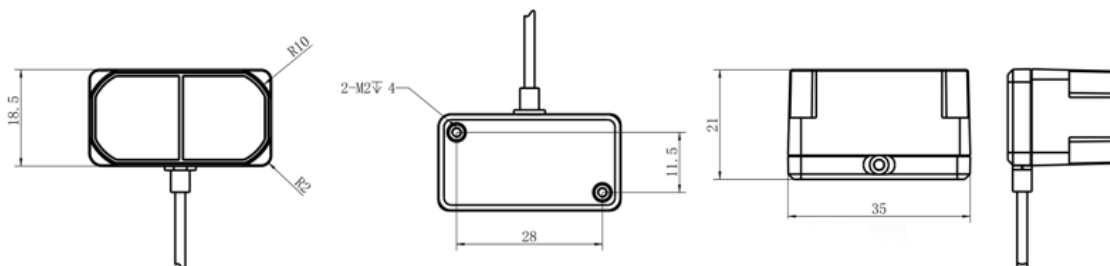
O design do sensor atende ao uso em *VANTs*, por sua capacidade nativa de integrar ao Ardupilot², alterando o modo de comunicação para Pixhawk³, além do fabricante dispor de manuais específicos de configuração para uso no Ardupilot, atuando nas operações de *Terrain Following*, para permitir que o equipamento realize voos baixos, mantendo uma altitude relativa ao solo. Sua dimensão vista na figura 24 e peso de 11 gramas, 2 pontos de fixação na traseira, o cabo de dados padronizado para conectar no Ardupilot, com 30 cm de comprimento, pinos de 5 V, TX, RX e GND, sendo possível ser

²<https://ardupilot.org/>

³<https://pixhawk.org/>

configurado para I2C em um endereço programável.

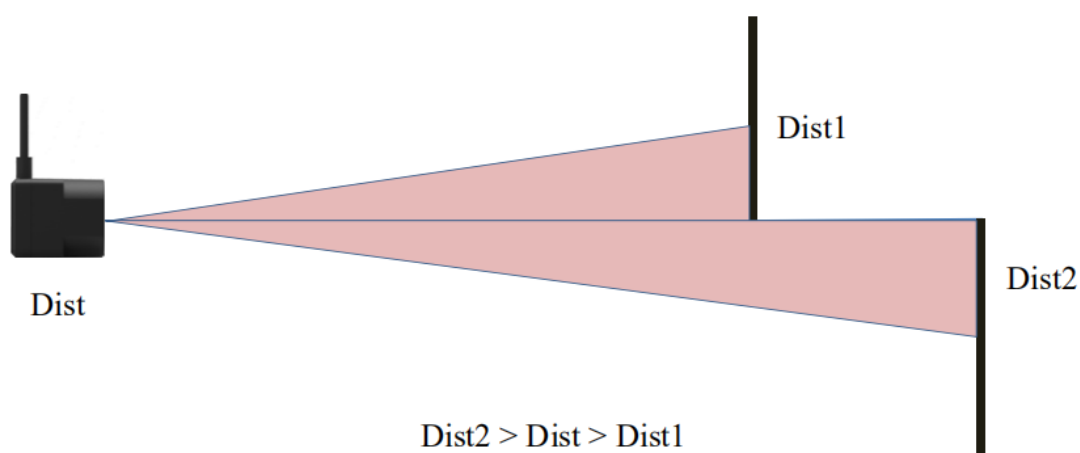
Figura 24 – Dimensões (mm) do TFmini Plus



Fonte: Adaptado de Benewake (2019)

Sua pequena abertura ótica de $3,6^\circ$, com uso de lentes e comprimento de onda em 850 nm diferem do VL53L1X, assim como a capacidade limite de operar com a luz ambiente de 70 klux. O fabricante afirma que a intensidade alta de luz solar causa a queda de precisão de ± 10 cm até certo ponto e se observa a necessidade de um algoritmo que faça a devida filtragem e correção como experimentos operados na condição de 136 à 150 klux demonstraram. A medição de distância de objetos em diferentes distâncias retorna um valor intermediário deles, podendo representar a média entre o topo da folha e o chão, devido à forma de tratar as múltiplas leituras realizadas e processadas no TFmini como o comportamento informado pelo *datasheet* e mostrado na figura 25.

Figura 25 – Comportamento do sensor ToF ao medir objetos em distâncias diferentes e retorno de um valor intermediário



Fonte: Benewake (2017)

O sensor é proporcionalmente maior e consome mais energia, em média 550 mW e picos de 800 mA, com um valor nominal de 110 mA e cerca de 70 mA em espera,

requerendo do projeto uma capacidade de alimentação dimensionada. Sua comunicação de *interface* TTL não deve exceder 1,5 metros de cabeamento e sua vida útil estimada é de 30–50 mil horas, mas operando na temperatura ambiente de 25 °C pode chegar a mais de 30 mil horas, equivalendo a mais de 3 anos segundo o fabricante.

Dentre os sensores de distância avaliados neste trabalho, o HC-SR04 pode ser considerado simples e rudimentar, pelas características construtivas, ao gerar um feixe com lóbulos e não possuir um circuito de calibração para fatores como temperatura e umidade, comparado aos sensores de uso industrial. A taxa de amostragem recomendada no *datasheet* é de 60 ms ou 16,66 Hz, onde se leva 10 μ s para o *trigger*, que gera 8 rajadas de ultrassom a 40 kHz. Após este processo o circuito de eco retorna o sinal, sem informar a qualidade ou intensidade do sinal recebido. Por fim, a tabela 2 agrupa as características de operação e funcionamento dos três sensores selecionados, conforme os respectivos *datasheets*.

Tabela 2 – Comparação entre os sensores de distância utilizados

Características de medição (capacidade, abertura e precisão)							
Sensor	Dist Mín. (m)	Dist. Máx. (m)	Resolução (mm)	Campo de visão (graus)	Precisão		
VL53L1X	0,03	4	1	27°	± 1 mm		
TFmini Plus	0,10	12	50	3,6°	$\pm 1\%$		
HC-SR04	0,02	4	3	30°	± 3 mm		
Características operacionais (propriedades, proteção e comunicação) e custo							
Sens.	Classe	Banda	Taxa de leitura (Hz)	Proteção	Protocolos	Consumo (mA)	Custo (R\$)
VL	LiDAR	940 nm	50	Vidro	I2C	18	36,00
TF	LiDAR	850 nm	1000	IP65	UART, I2C	110	599,00
HC	Ultras.	40 kHz	40	Não	PWM	15	7,50

Fonte: Adaptado de Cytron Technologies (2013), Benewake (2017), STMicroelectronics (2018b)

2.3 Sensor de velocidade de deslocamento e rotação da bomba

As roçadeiras químicas Campo Limpo, Campo Limpo + ou os equipamentos em desenvolvimento, podem utilizar sensores de baixo custo para aferição do deslocamento e vazão das bombas, explorando mais a capacidade do controlador digital que embarca as versões atuais, o qual também seria necessário para um novo sistema autônomo idealizado no apêndice C. O sensor de campo magnético é usado nas indústrias para identificar a

rotação e posição do eixo do motor e, também, podem ser usadas para sincronizar motores trifásicos, informar a rotação de motores de corrente contínua e alguns modelos de sensor de fluxo de água usam um rotor interno e um sensor de efeito Hall. Outra possibilidade é o uso de um sensor ótico com um disco *encoder* e, também, se considera o uso do GNSS, observando que a latência do GNSS pode não atender a temporização e que existem locais onde apesar da capacidade de corrigir a precisão com o *Real-time Kinematic* (RTK), gera um custo proibitivo para aquisição.

2.3.1 Funcionamento do *encoder* para velocidade de deslocamento

Um sistema para medir o deslocamento mostrado na figura 26 é composto por um disco com múltiplos magnetos de terras raras, instalado em uma bicicleta com a função de ler a cadência do ciclista. Utiliza um sensor de campo magnético como o 3141 THRU, bobina ou *reed Switch* acionado com a aproximação do campo magnético do ímã e gera um pulso que indica a fração da rotação do sistema medido.

Figura 26 – Sensor de pedal assistido para bicicleta elétrica, *Pedal Assisted Sensor* (PAS), como uma solução para mensuração de velocidade



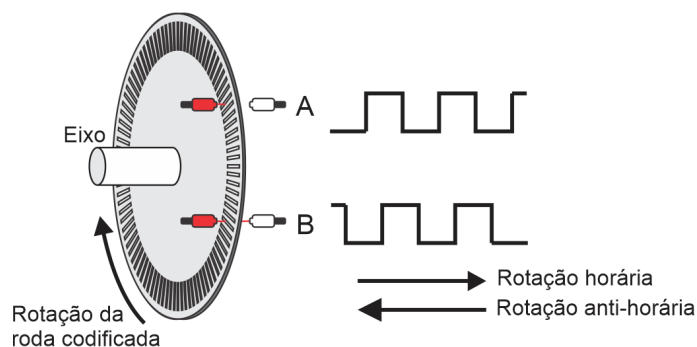
Fonte: Amazon.com, Inc (2022)

Com um custo maior, mas mais confiabilidade, é possível utilizar um *encoder* industrial, que deve ser dimensionado para rotação máxima do sistema, taxa de leituras e capacidade de comunicação e processamento para permitir que o sistema leia adequadamente as informações de deslocamento.

2.3.2 Funcionamento do *encoder* ótico

A figura 27 mostra uma implementação de *encoder* incremental que cria os canais de pulsos A e B, defasados em 90 graus para identificar o sentido de rotação, onde se lê o início do ciclo do canal A, e se distingue a direção se o canal B está em nível zero ou um. O sistema de pulsos pode ser gerado por LED e lido por um ou mais sensores de luz como fotodiodos, onde a captura da temporização entre os pulsos e a temporização de uma quantidade de pulsos permite calcular a velocidade.

Figura 27 – *Encoder* Incremental AB ótico, com detecção do sentido da rotação baseado na diferença de sincronismo entre os dois sensores e os furos na roda codificada



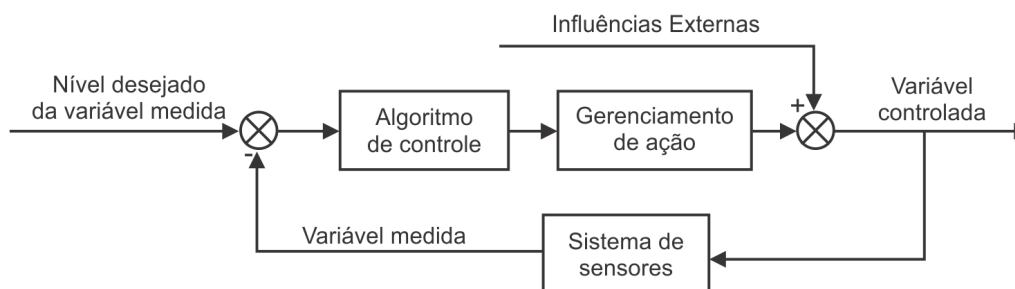
Fonte: Adaptado de Lynch, Marchuk e Elwin (2016)

2.4 Controle dinâmico da vazão por velocidade

O modelo de Zhang (2015), onde o controle temporal prevê uma taxa variável de dispersão de herbicida, pode receber sua indicação baseada na prescrição espacial como entrada. A figura 28 representa o conceito de ajuste dinâmico, a partir de um valor de entrada, onde um algoritmo recebe os dados definidos por um sistema anterior que, acrescido da leitura dos sensores para a situação presente, permite realizar o tratamento gerenciando o ajuste necessário.

Este diagrama representa o elemento de meio, onde no caso de uso a entrada é dada pela variação da velocidade e infestação, e como saída o ajuste contínuo da bomba para alcançar a vazão ideal para o setor.

Figura 28 – Diagrama em bloco de um sistema agropecuário de controle



Fonte: Adaptado de Zhang (2015)

2.4.1 Procedimento atual de calibração da Roçadeira Química Campo Limpo

O procedimento de calibração de volume por velocidade da máquina depende de uma boa estimativa da velocidade de trabalho no campo. Conforme o manual Campo Limpo — Controle de Plantas Indesejadas de Perez (2010b), “o primeiro passo consiste em observar o terreno de aplicação, quanto à presença de buracos, pedras e irregularidades em geral”. Existe uma metodologia clara, que consiste em anotar o tempo para percorrer 50 metros e calcular a vazão segundo a cobertura de 100 m² para os protótipos de 2 m, 200 m² para Campo Limpo de 4 m ou 375 m² para a Campo Limpo + de 7,5 metros de largura por meio da tabela do manual do equipamento. A tabela 3 apresenta a indicação da faixa de volume que deve ser aplicada no tempo cronometrado para o nível de infestação da planta combatida, sendo necessário repetir a medição até a calibração correta, e operar todo o tempo na velocidade estimada, já a tabela 4 indica a posologia de herbicida por planta e nível de infestação.

Tabela 3 – Volume de calda (herbicida + água) sugerido para aplicação conforme o nível de infestação, e sua relação com o volume coletado no copo dosador, considerando o tempo para percorrer 50 metros (200 m² de área tratada).

	Nível de infestação			
	Baixo (até 30%)	Médio (30 a 50%)	Alto (50 a 70%)	Muito Alto (mais de 70%)
Volume de calda (L/ha)	8 – 10	12 – 20	22 – 34	36 – 56
Volume coletado no copo (mL)	160 – 200	240 – 400	440 – 680	720 – 1120

Fonte: Perez (2010b)

Tabela 4 – Volume de herbicida glifosato (480 g/L) conforme o nível de infestação e o tipo de planta indesejável

Nível de infestação	Baixo (menor que 30%)	Médio (30 a 50%)	Alto (maior que 50%)
Espécie invasora	Volume de herbicida (L/ha)		
Capim-annoni 2	2,5	2,5 – 3,0	3,0 – 4,0
Caraguatá, Carqueja, Mio-mio e Chirca	3,0 – 3,5	3,5 – 4,0	4,0 – 5,0

Fonte: Perez (2010b)

2.5 Trabalhos correlatos

Para atender ao objetivo do presente trabalho, procurou-se identificar na literatura o uso de sensores de altura de baixo custo e fácil acesso, de modo a aplicá-los no contexto de automação, onde é necessário que o equipamento seja menos dependente da experiência e habilidade do operador. Como palavras-chave, foram utilizadas: sensores, agricultura e sensores, detecção de ervas daninhas e uma busca por trabalhos que utilizem os sensores selecionados e detalhem seu funcionamento e construção. Outros trabalhos, além dos listados a seguir foram observados. Entretanto, a seleção apresentada foi considerada relevante pela proximidade com as necessidades do projeto, permitindo orientar os experimentos preliminares.

A complexidade é um dos grandes desafios para o *design* de equipamentos para o combate as plantas daninhas, pois a solução característica envolve diversos sensores que geram dados e precisam ser analisados para a compreensão dentro de um contexto específico. Além disso, uma integração ao conceito *Smart Farm* deveria permitir o controle do fluxo de processo e atender outras estruturas e soluções, possibilitando que as camadas de gerenciamento e monitoramento sejam mais versáteis devido à geração de dados pontuais de interesse. No caso específico da Roçadeira Química Campo Limpo, considerou-se a necessidade de uso de um ferramental capaz de ajustar a altura da roçadeira química às plantas invasoras e, com a velocidade e a distância percorrida relacionada à leitura dos sensores, posicionados no início do equipamento. A pesquisa bibliográfica evidenciou que as necessidades do presente estudo diferem de outras propostas, conforme mostrado a seguir.

2.5.1 Síntese dos trabalhos

Machleb *et al.* (2020) propuseram a atualização de uma roçadeira mecânica que utiliza facas para remover plantas daninhas em uma plantação em linha, e recebe sensores para diferenciar a estrutura da planta cultivada das invasoras. O equipamento compartilha algumas características da Campo Limpo, como a baixa velocidade de operação, comparada com um sistema de pulverização, e usa os sensores para manter a parte mecânica o mais próximo das plantas, sem causar danos e proteger a plantação pelo correto ajuste do equipamento, que permite operadores menos experientes controlem o equipamento alcançando um desempenho avançado. Para ser viável, deve existir uma vantagem econômica para justificar os custos de aquisição e ainda estender o tempo de operação diurna para noturna. Os implementos semi-autônomos tracionados por um trator poderiam utilizar técnicas de visão de máquina, mas são considerados mais complexos devido à variação no formato das plantas e cores, enquanto os sensores ultrassônicos e LiDAR permitem identificar a partir da altura, sendo o LiDAR mais preciso e com uma boa resposta, porque a clorofila reflete o infravermelho próximo. Seus prospectos foram alterar a forma de ver as medições do campo como um valor médio para a escala de plantas, sem comprometer a eficiência do controle, e por meio de sistemas inteligentes, diminuir o tempo de ajuste manual para as diversas condições de campo. Assim, seu estudo mostra que equipamentos com sensores podem aumentar o controle de ervas daninhas sem danificar a plantação em linha com espaçamento, em contrapartida, ainda tem um alto custo de reparo e aquisição.

Murphy *et al.* (2021) apresentaram uma revisão de tecnologias de precisão para medição da pastagem e os princípios básicos que melhoram o gerenciamento do pastejo. Um dos maiores obstáculos é que a variação das plantas dificulta quantificar e existem limitações nos métodos convencionais. Os autores destacam que sensores ultrassônicos tem uma baixa precisão e resposta, devido à grande abertura, mudança na geometria das plantas e sua heterogeneidade. Já utilizando o sensoriamento terrestre do ultrassônico em conjunto com o infravermelho próximo, podem obter uma precisão aceitável, mas com limitações em relação à luz solar. Por fim, destaca os desafios atuais de heterogeneidade do pasto, falta de um modelo de validação, conclui que a aplicação deste tipo de automação permite reduzir os custos de mão de obra para esta operação.

Existem diversos trabalhos que utilizam múltiplos sensores de alto custo alcançando um resultado promissor para medir a altura, densidade, estresse hídrico

e desenvolvimento em plantações homogêneas e ordenadas. Em Legg e Bradley (2020), foram observados experimentos da leitura da altura de gramíneas em diferentes continentes e pastagens, para estimar a massa verde, predominantemente pelo uso de sensores ultrassônicos de alto custo, onde o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), segundo Rouse *et al.* (1973), relacionam a refletância da vegetação nos comprimentos de onda do vermelho e do infravermelho próximo e indica acúmulo de biomassa verde ou massa seca. Já que agrega o sensor térmico, RGB e LiDAR, tem resultados dependentes da altura homogênea. De acordo com Bendig *et al.* (2015), a altura da planta e a refletância espectral têm uma forte relação com a biomassa seca em todos os estágios de crescimento. Ele obteve um resultado satisfatório utilizando o sensor ultrassônico plantas com folhas largas em uma plantação homogênea.

Dou *et al.* (2021) desenvolveram um sistema para ajuste de altura de pulverizador, utilizando o LiDAR TFmini plus, como opção aos sistemas de sensores ultrassônicos de alto custo, para ajustar a pulverização conforme a distância entre a barra e o dossel da cultura. Ao avaliar os aspectos construtivos, se observa a necessidade computacional para o processamento interno dos sinais. Sua metodologia de testes do sensor utilizou uma plataforma de trilho, avaliando o comportamento do sensor em diferentes velocidades de deslocamento no espectro de atuação no campo e blocos que variam a altura em espaços fixos. Posteriormente, seus experimentos práticos demonstraram que em um campo de restolho de trigo, o sensor detectou prioritariamente as raízes e o interior da cultura, onde em movimento a detecção foi maior na copa, com erro de 5%, assim um valor de 1,05 foi usado para corrigir o pulverizador em um sistema autônomo. Sua conclusão foi que o uso deste sensor é viável para a operação de sensoriamento e ajuste de altura do pulverizador em substituição do ultrassônico de alto custo, aplicando um coeficiente de correção.

2.5.2 Contribuições para o projeto

Os sensores usados na agricultura irão enfrentar condições hostis com sujeira, uma alta variação de temperatura e umidade. Os sensores ópticos estão sujeitos a uma grande variação de luminosidade do ambiente, que pode facilmente saturar a leitura. Sensores ultrassônicos necessitam de superfícies homogêneas para uma boa reflexão e leitura. Adicionalmente, os diversos manuais técnicos dos sensores fornecem o suporte para compreender o comportamento e o resultado medido, em um objeto fora da especificação ideal para retornar o sinal.

Os diferentes tipos de sensores, suas características e custos, são observados no levantamento “PlanListaSensores.pdf” (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021a). Este documento mostra que os sensores de distância e presença podem ser do tipo LiDAR, micro-ondas, ultrassônico e contato, capacitância, apresentando diferentes características conforme a construção, frequência de operação, filtros de microcontrolador, sensores internos de auto calibração, possibilitando ser imunes a interferência em algum nível, segundo o ambiente de operação e construção. Os sensores ultrassônicos de baixo custo podem não atender aos requisitos de abertura, distância e superfície reflexiva conforme os relatórios. Entretanto, existem modelos da linha SENSE com transdutor piezoelétrico, um projeto de construção que apresenta poucos lóbulos, microprocessado recomendados para o uso agrícola, mas apresentam um alto custo. A indicação dos sensores de baixo custo ultrassônicos pode atender as funções de segurança contra atropelamento e colisão, similar ao adotado por automóveis. Uma aplicação dos sensores de micro-ondas, baseado no efeito *doppler* é na detecção de presença, por apresentar a maior abertura entre os sensores avaliados e ter um baixo custo, entretanto, não permite identificar a posição dos objetos. Assim, os sensores LiDAR apresentam características desejáveis para o controle do sistema.

Os trabalhos correlatos colaboraram e foram relevantes para o presente estudo, sobretudo os que tratam a capacidade de estimar massa verde, onde se requer informações de altura, obtidas por meio do sensor LiDAR. Entretanto, nota-se a necessidade de uma altura homogênea para bons resultados, reforçando o desafio de se trabalhar na pastagem nativa. O sensoriamento do restolho de trigo de Dou *et al.* (2021), com o TFmini Plus em movimento, apresentou resultados coerentes com o que foi obtido na detecção de altura do capim-annoni, onde se observa a necessidade de um coeficiente de ajuste. Entretanto, o referido artigo não aprofunda as questões técnicas de refletância do alvo medido para o espectro trabalhado no sensor, tampouco as características elétricas de funcionamento. Os valores obtidos são compreendidos pelo *datasheet* como uma resposta atípica ao medir elementos em distâncias diferentes no raio de visão do sensor, tendo como retorno um valor médio. Esse coeficiente de ajuste necessário pelo valor obtido de média entre o chão e o dossel nos experimentos em campo nativo também sofre de uma falta de modelo de validação para indicar o nível de infestação e ajuste necessário.

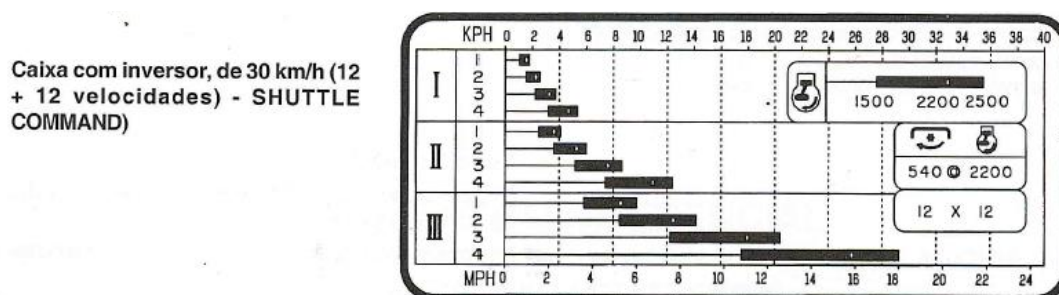
Por fim, pode-se dizer que as propostas estudadas nos artigos correlatos preenchem parte das lacunas para o presente projeto. Entretanto, visto que não utilizam sensores de baixo custo e estão restritos a ambientes significativamente controlados, como

terrenos completamente planos e plantações em linha espaçada, percebe-se que a proposta de uso do sistema de cordas com um aplicador com dosagem dinâmica se apresenta como uma área complexa e não explorada pelo uso de sensores de baixo custo, em um ambiente de pastagem nativa com altura heterogênea. A heterogeneidade que também dificulta uma molécula específica ao capim-annoni, baseada no RNAi.

3 SOLUÇÕES PROPOSTAS

Com base nas observações obtidas a partir dos estudos preliminares, salientados na introdução (capítulo 1), destacou-se como problemática principal o controle do ajuste de vazão, definido-o pela velocidade do conjunto máquina, trator e o tipo da infestação da área. Essas situações podem se alterar durante a aplicação, exigindo uma recalibração do sistema, o que nem sempre ocorre no sistema atual. Normalmente, durante as operações no campo, não existe um controle da velocidade, que fica restrita à faixa de operação do motor diesel do trator conforme a marcha e a rotação. Esta realidade é amparada por comentários como o de um dos entrevistados na etapa preliminar, o qual afirmou: “Eu coloco a terceira reduzida no trator e sigo”. Este procedimento pode gerar uma grande variação de velocidade entre modelos e fabricantes de tratores, tomando, por exemplo, o indicado nos decalques da New Holland TL75E (figura 29), que varia de 5,2 km/h em 1500 rpm a 8,6 km/h com 2500 rpm, em um trator novo. Além disso, conforme Santos (2019), existe uma diferença de 9 a 23% nas velocidades medidas, justificada pelo desgaste mecânico e de pneus. Entretanto, esse mesmo autor não considerou mudanças na composição do combustível, temperatura do ar e altitude. Assim, uma aplicação sem um melhor controle, pode ocasionar uma aplicação errada, dobrando ou reduzindo pela metade a quantidade de defensivo necessária, ocasionando o gotejamento das cordas ou secamento, além da necessidade de retrabalho, aumento de custos, entre outros.

Figura 29 – Decalque de velocidade por rpm do trator New Holland TL75E



Fonte: Santos (2019)

Nas seguintes seções são apresentadas as soluções desenvolvidas com o objetivo de realizar a correção automática da vazão pela velocidade, considerando os diferentes perfis de equipamentos de corda e simplificar seu uso.

3.1 Detecção do capim-annoni com as *shields* ToF

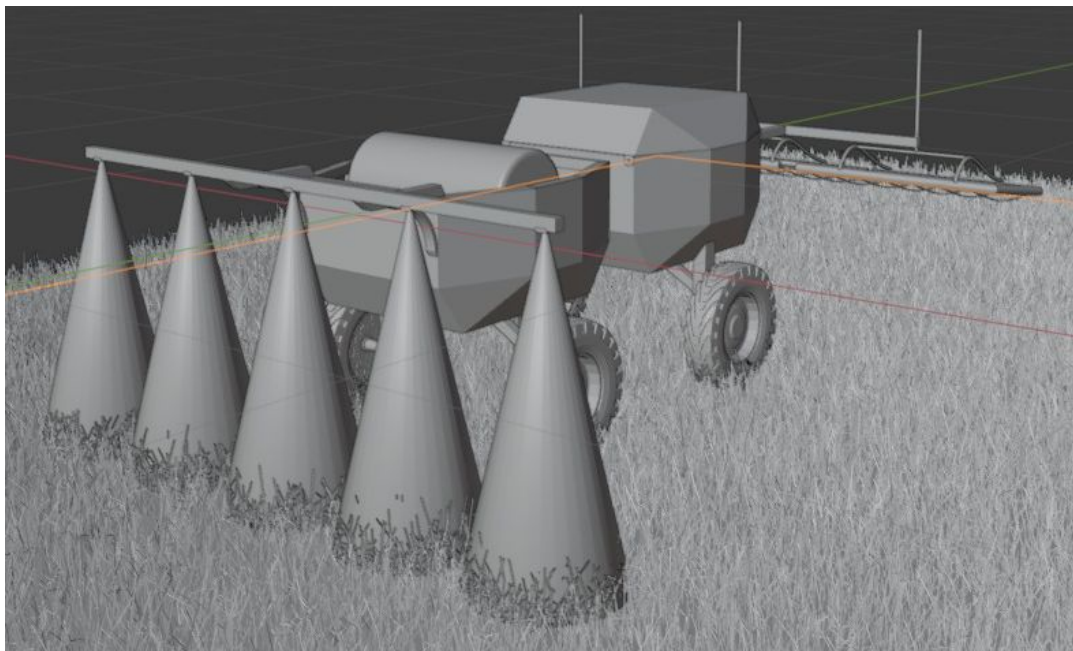
Para validar a solução ToF, e a capacidade de uso dos sensores de distância baseados em infravermelho, foram reunidas as informações e as características de funcionamento físicas descritas no *datasheet* dos fabricantes, trabalhos específicos da planta alvo e vegetação geral (capítulo 2). Diante dessas informações, considerou-se plausível a detecção do capim-annoni de acordo com sua refletância, sendo necessário verificar a capacidade de detecção da variação da altura e da estrutura da vegetação, a partir de diferentes densidades da invasora.

3.1.1 Uso da barra de sensores de altura

Para realizar a avaliação do sensoriamento de altura, utilizou-se a estrutura preliminar construída para prototipação de um *Unmanned Ground Vehicle* (UGV), do português Veículo Terrestre Não-Tripulado, detalhada no apêndice C, a qual inclui uma barra frontal, posicionada 65 centímetros à frente do rodado, especificamente para embarcar módulos de sensores. Os valores lidos recebem ajustes quando identificada irregularidade ou alteração no ângulo de operação do terreno, a partir de um giroscópio, que também tem os valores dos eixos salvos no log. Para verificar a exequibilidade das medidas, foram realizados experimentos, instalando o sensor a 80 cm de altura do solo, formando uma área de detecção como um cone, com abertura de 27 graus e diâmetro aproximado de 38,5 cm, conforme representado na figura 30 que simula cinco sensores em uma barra de dois metros

Após realizar as leituras da altura do pasto, por meio dos sensores de distância, foi necessário armazená-las em um vetor e, posteriormente, transmiti-las para o atuador do aplicador no momento em que este se encontrar próximo ao local da aplicação. Esse procedimento considerou o ajuste da altura no intervalo de tempo para um dado deslocamento. Também foram observados os ajustes de densidade das plantas e a sua relação com a topografia do terreno. O caso mais simples de implementação de uso é quando não há variação no terreno, assim os dados gerados para orientação, armazenados no giroscópio, não diferem na posição de aplicação.

Figura 30 – Barra de sensores na frente da roçadeira autônoma, com os cones representando a área sensoriada



Fonte: Pierazzoli e Domingues (2022)

3.1.1.1 Hardware e Software do sistema de sensoriamento

Os cinco sensores de distância utilizados – HC-SR04 (recebendo o rótulo no log de HC1), VL53L1X (VL1), VL53L1X (VL2), VL53L1X (VL3) e TFmini Plus (TF1) – são ativados sequencialmente, observando as particularidades para a instalação conjunta. Cada sensor tem características únicas, sensíveis a ruídos na sua faixa de operação, como o sensor ultrassônico HC-SR04 que pode interpretar errado um sinal caso existam ruídos na frequência 40 MHz. Já os sensores ToF, que operam nas faixas de 850 para o TFmini Plus e 940 nm para o VL53L1X, embora passíveis de sofrer degradação do sinal, são beneficiados pela presença de microcontroladores internos dedicados a analisar e informar a qualidade do sinal.

O programa foi escrito na Linguagem C, para o modelo Arduino Nano R3, baseado no microcontrolador ATmega328P, considerando uma distribuição dos recursos e conexões do hardware obedecendo às necessidades e restrições de pinagem. Cada *shield* foi testado individualmente e seu código encapsulado em uma função. Em seguida a função foi duplicada para gerar uma saída simplificada de log. O sistema pode receber opções de configuração, modo de *debug* com todas as opções da API para informar a qualidade do sinal, iniciar ou terminar a captura, registrar o sentido de deslocamento

ou desabilitar funcionalidades por comandos seriais. É possível portar o código para o ESP32, realizando as devidas alterações. O ESP32 é um sistema em um chip ou *System-on-a-Chip* (SoC), por integrar Wi-Fi e o *Bluetooth* em *dual-mode* visto que a interface das *shields* utilizadas também operam eletricamente em 3,3 volts e existe documentação e suporte oficial dos fabricantes.

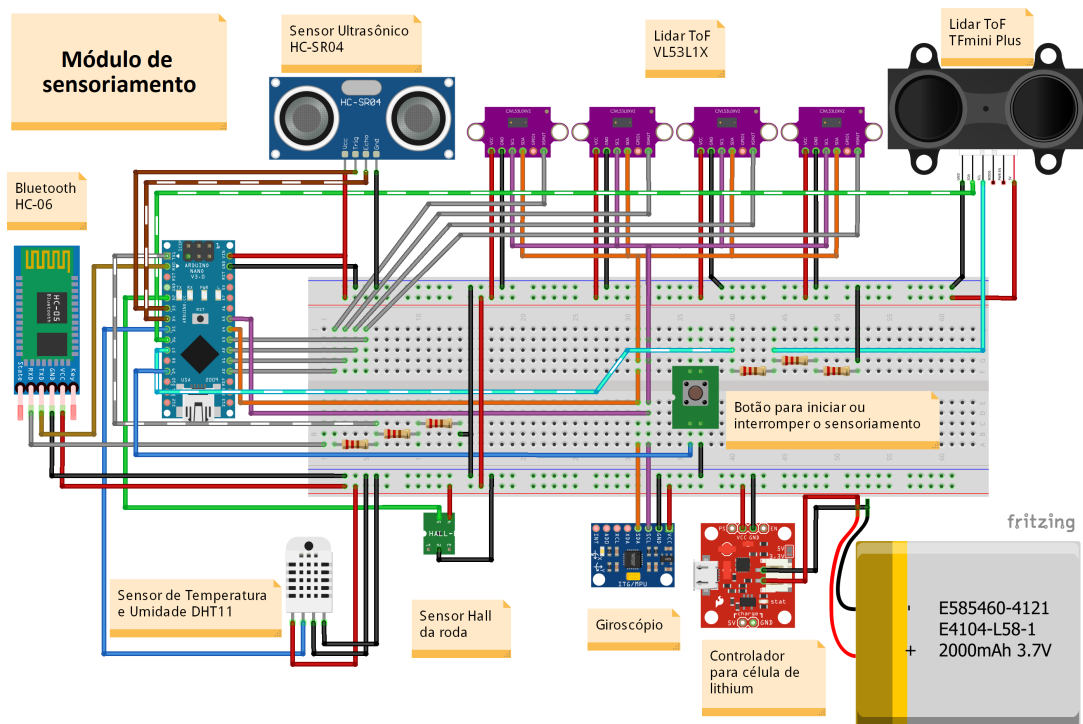
Os sensores operam atendendo a configuração:

- A *shield* Hall Ky-003 ativa por proximidade de um magneto e aciona uma interrupção no microcontrolador por meio de um pino digital, para medir o deslocamento ou a vazão da bomba.
- O sensor de distância TFmini Plus foi configurado no modo padrão de comunicação UART que demanda dois pinos.
- Os sensores VL53L1X realizam a comunicação por I2C, e cada pino *xshut* foi conectado em uma porta do microcontrolador para definir um endereço único.
- O sensor HC-SR04 utiliza os dois pinos, para o *trigger* e o *echo*.
- O giroscópio realiza a comunicação por I2C, os valores indicam a posição da leitura de altura em que a barra se encontra.
- Um sensor de temperatura e umidade DHT11 informa os parâmetros ambientais a cada inicialização e utiliza um pino.

A figura 31 apresenta a proposta de sensoriamento utilizando o *software open-source* Fritzing¹, e conexões, incluindo a alimentação externa por um gerenciador de bateria de lítio, o botão para acionar ou interromper o sensoriamento de forma manual e a *shield* do *Bluetooth*.

¹<https://fritzing.org/>

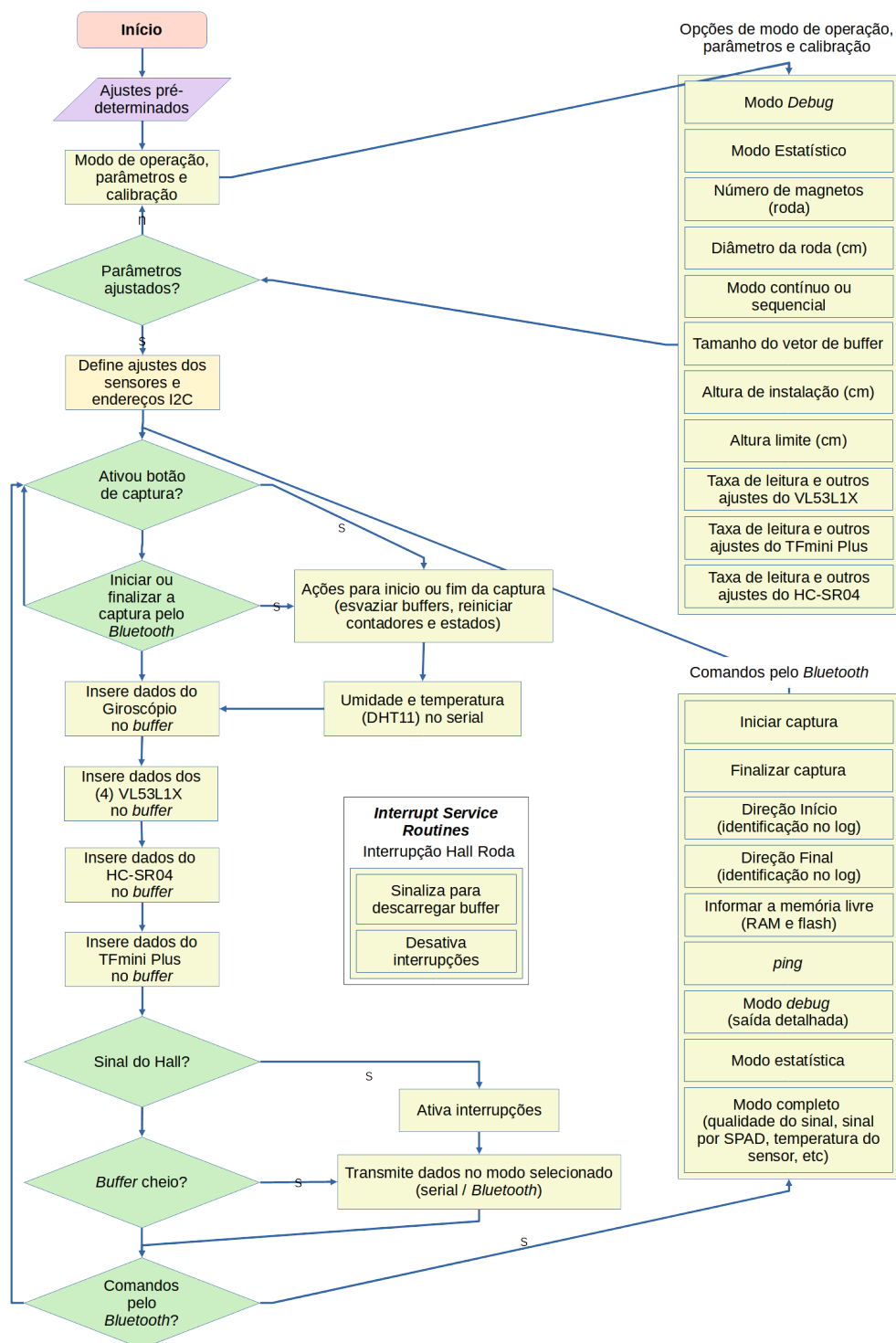
Figura 31 – Montagem proposta para o protótipo de sensoriamento de altura de plantas, utilizando o Arduino Nano



Fonte: Autor (2022)

O software definido pelo fluxograma (figura 32) utiliza a rotina de interrupção para agrupar as leituras dos sensores. Os modos de operação são ajustados pelo *Bluetooth* assim como os modos de funcionamento que podem gerar o log com dados simples de altura ou explorar todas as opções disponíveis nas APIs como a qualidade do sinal e o nível de interferência.

Figura 32 – Fluxograma proposto para o software de protótipo de sensoriamento. O início e fim do sensoriamento acontece pelo botão de acionamento ou pelo *smartphone*, podendo operar em modo de *debug* explorando mais detalhes da qualidade do sinal de sensoriamento



Fonte: Autor (2022)

3.2 Velocidade de deslocamento

Para sensoriar o deslocamento de chão, foram utilizados magnetos de terra nobre no eixo da roda, igualmente espaçados. Os magnetos acionam um sensor de campo Hall, ativando uma interrupção no microcontrolador, que conta os pulsos, quando de sua ocorrência. Além do baixo custo, a precisão e acurácia podem aumentar conforme o número de magnetos. A circunferência da roda de 1,80 m dividida por 5 magnetos gera pulsos a cada 36 cm, servindo como marcador do sensoriamento e também permite calcular a velocidade de duas formas seguindo a mecânica clássica, onde uma contabiliza o deslocamento de uma fração de distância medida pela diferença de tempo entre os pulsos (equação 2) e a outra por meio da quantidade de pulsos em um intervalo fixo de tempo (equação 3).

$$\text{velocidade escalar} = \frac{\left(\frac{\text{circunferência da roda}}{\text{número de magnetos}} \right)}{\Delta t} \quad (2)$$

$$\text{velocidade escalar} = \left(\frac{\text{pulsos} \times \left(\frac{\text{circunferência da roda}}{\text{número de magnetos}} \right)}{\text{tempo total dos pulsos}} \right) \quad (3)$$

Como a função no código é chamada em intervalos regulares para atualizar o *display* e calcular a dosagem, se seleciona qual das três unidades do odômetro irá trabalhar, métrica (km/h), imperial (mph) ou SI (m/s) para a constante adequada. É verificada a contagem de pulsos para não realizar a divisão por zero e então converte o tempo medido pela diferença de milissegundos armazenada entre a última que ativou a interrupção do microcontrolador de milissegundos em segundos multiplicando por 1000 obtendo metros por segundo (equação 4), em km/h multiplicando por 3,6 (equação 5) ou milhas por hora utilizando 2,2369356 (equação 6).

$$\text{velocidade (m/s)} = \left[\frac{\text{pulsos}}{\Delta t(\text{ms})} \times 1000 \right] \times \left[\frac{\text{circunferência da roda(m)}}{\text{número de magnetos}} \right] \quad (4)$$

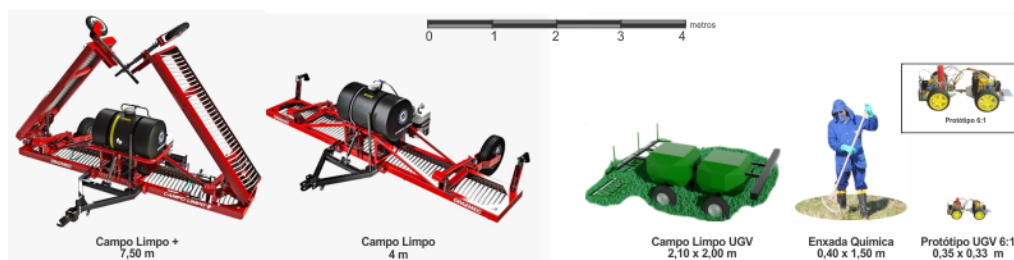
$$\text{velocidade (km/h)} = \left[\frac{\text{pulsos}}{\Delta t(\text{ms})} \times 1000 \right] \times \left[\frac{\text{circunferência da roda(m)}}{\text{número de magnetos}} \right] \times 3,6 \quad (5)$$

$$\text{velocidade (mph)} = \left[\frac{\text{pulsos}}{\Delta t(\text{ms})} \times 1000 \right] \times \left[\frac{\text{circunferência da roda(m)}}{\text{número de magnetos}} \right] \times 2,2369356 \quad (6)$$

3.3 Sensores no cálculo do controle da vazão

A figura 33 apresenta exemplos de tecnologias de controle baseadas na aplicação seletiva de herbicida por meio do embebimento de cordas, onde estão presentes a roçadeira química Campo Limpo + e Campo Limpo, licenciadas para Grazmec (2021), o UGV, a enxada química (PEREZ, 2008) e o protótipo do UGV. Cada equipamento tem diferentes capacidades de aplicação e configurações, atendendo uma estratégia de controle de plantas invasoras, conforme o grau de infestação, área ou manchas residuais após tratamento. Em função das suas diferenças de escala, o módulo de sensoriamento precisa ser adaptável aos seus cenários de aplicação. A roçadeira de grande porte geralmente permite controlar 90% da infestação na passada quando bem ajustadas (PEREZ, 2010b). Para tratar os pontos remanescentes após tratamento, de plantas que estavam em meio ao extrato inferior ou novas, se recomenda a enxada química.

Figura 33 – Comparativo dos equipamentos de corda na mesma escala: Campo Limpo +, Campo Limpo, UGV, Enxada Química e Protótipo UGV 6:1



Fonte: Adaptado de Grazmec (2021) e Perez (2008)

No caso da Campo Limpo e da Campo Limpo +, a inclusão do sistema de sensores ao controlador e alterações no *software* torna possível o controle da vazão por velocidade. Os sensores de rotação permitem realimentar com dados o controlador digital que, atualmente, é ajustado com valores absolutos de 0 a 100, fornecendo uma saída linear. Entretanto, o motor de corrente contínua de escovas, utilizado no projeto não opera de forma linear pela tensão e corrente de alimentação, segundo o *datasheet* da fabricante Bosch. A instalação dos sensores de rotação permite aproximar a dosagem recomenda, gerando um ajuste fino sensível à variação da velocidade. Outro aspecto é que

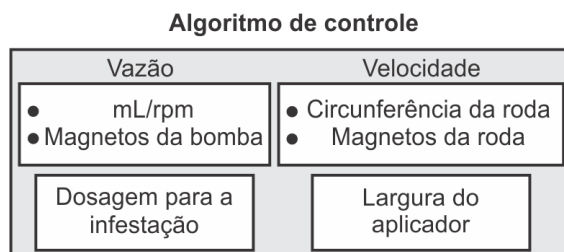
o sistema pode ter diferenças conforme ocorrem alterações no circuito elétrico interno, como aumento da carga gerando mudanças na rotação.

3.3.1 Equação da rotação da bomba por dose, equipamento e velocidade

Para o controle dinâmico da vazão, foi necessário desenvolver uma equação para o ajuste da velocidade da bomba peristáltica conforme a velocidade de deslocamento. Para calcular a rotação ideal, foi proposta a equação 7, utilizando-se de quatro dados de entrada, conforme a figura 34. O primeiro é o valor posologia indicada de acordo com nível/tipo de infestação, dada em litros por hectare, relativa a uma área homogênea, com nível de infestação definido. O segundo valor é a largura útil em metros do equipamento ativo ou setor de cordas controlado, sendo de 3,8 m para a roçadeira Campo Limpo e 7,5 m para o modelo Campo Limpo +, que utiliza duas bombas e pode operar com uma ou as duas asas suspensas dois setores com quatro combinações. O terceiro valor é a sua velocidade de deslocamento que varia durante a operação, devido a obstáculos no terreno, a última entrada do sistema é o volume bombeado por rotação que se comporta de forma estável para a faixa de rotação usada.

$$\text{rpm}(\text{bomba}) = \frac{\text{dose} \left(\frac{L}{ha} \right) \times \text{setorEquipamento} (m) \times \text{velocidade} \left(\frac{km}{h} \right) \times 1,667}{\text{volumeBombeado} \left(\frac{mL}{\text{rotação}} \right)} \quad (7)$$

Figura 34 – Entradas do algoritmo de controle



Fonte: Autor (2022)

A equação 8 mostra a origem das constantes necessárias para as conversões ao se trabalhar com unidades comuns como entrada. A posologia, indicada de acordo com nível de infestação, é geralmente informada em litros por hectare, e a conversão de litros/hectare para mL/m² se dá multiplicando o valor por 0,1. E se realiza a conversão da velocidade

de deslocamento de km/h para metros por minutos multiplicando por 16,6667.

$$rpm_{(bomba)} = \frac{dose \left(\frac{\text{litros}}{\text{hectare}} \frac{1.000}{10.000} \right) \times largura (metros) \times velocidade \left(\frac{km}{h} \frac{1000}{60} \right)}{volumeBombeado \left(\frac{\text{mililitros}}{\text{rotação}} \right)} \quad (8)$$

Exemplo: Para a validação do sistema na experimentação, o técnico responsável indicou a posologia de 30 litros por hectare com a Campo Limpo (3,8 metros de largura), numa velocidade de trabalho de 4 km/h na área experimental, adequada às condições do local. Durante a inspeção do equipamento, foi confirmando que a bomba transfere o volume de 22 mL por rotação. Ao aplicar os valores de entrada na equação 8, observa-se a rotação indicada na equação 9.

$$rpm_{(bomba)} = \frac{30 \left(\frac{L}{ha} \right) \times 0,1 \times 3,8 (m) \times 4 \left(\frac{km}{h} \right) \cdot 16,6667}{22 \left(\frac{mL}{r} \right)} = 34,54 rpm \quad (9)$$

O estado e a capacidade de vazão por rotação da bomba devem ser aferidos antes da aplicação, dado que o volume por rotação varia conforme o envelhecimento, que causa perda da elasticidade e o desgaste das partes móveis. A substituição da mangueira da bomba pode ter um grande impacto no volume aplicado. Conforme verificado, alterou-se o volume, de 22 para 33 mL, à cada rotação. Assim, o novo valor da equação 9 para a equação 10 impactou em 33,32% de queda na rotação.

$$rpm_{(bomba)} = \frac{30 \left(\frac{L}{ha} \right) \times 0,1 \times 3,8 (m) \times 4 \left(\frac{km}{h} \right) \cdot 16,6667}{33 \left(\frac{mL}{r} \right)} = 23,03 rpm \quad (10)$$

Para evitar a realização de cálculos com valores que se repetem frequentemente, foi desenvolvido o mapeamento visto na figura 35, em que uma matriz, com pesos previamente calculados, pode ser acessada por meio do índice de linha e coluna. Neste método, o custo computacional de armazenamento e acesso à memória é menor que as seis operações da nova rotação com a alteração da velocidade. A matriz foi construída com 112 posições de 2 bytes, e agrupa o nível de infestação calculada para cada velocidade operacional, considerando a aplicação do produto em 1 metro durante 1 minuto. Assim, as quatorze linhas representam as velocidades de 1 a 14 km/h, enquanto as colunas são agrupadas pela recomendação dos valores de infestação, seguindo a indicação da tabela 3 do manual da Campo Limpo.

Figura 35 – Estrutura de código que simplifica a indicação da dose por velocidade e infestação

```

/*****
Tabela glifosato 480g
mililitros por minuto por minuto para cada 1 metro de aplicador em Capim Annoni
kmPorHora_infestacao [km/h -1 ][grauDeInfestação]
*****/
static const int kmPorHora_infestacao [14][8] = {
//Infestação Menor que 30 %   30 à 50 %   Maior que 50 %   50 à 70 %
//      min. max.           min. max.           min. max.           min. max.
{      13, 17,             20, 33,             37, 57,             60, 93}, //1 km/h
{      27, 33,             40, 67,             73, 113,            120, 187}, //2 km/h
{      40, 50,             60, 100,            110, 170,            180, 280}, //3 km/h
{      53, 67,             80, 133,            147, 227,            240, 373}, //4 km/h
{      67, 83,             100, 167,            183, 283,            300, 467}, //5 km/h
{      80, 100,            120, 200,            220, 340,            360, 560}, //6 km/h
{      93, 117,            140, 233,            257, 397,            420, 653}, //7 km/h
{     107, 133,            160, 267,            293, 453,            480, 747}, //8 km/h
{     120, 150,            180, 300,            330, 510,            540, 840}, //9 km/h
{     133, 167,            200, 333,            367, 567,            600, 933}, //10 km/h
{     147, 183,            220, 367,            403, 623,            660, 1027}, //11 km/h
{     160, 200,            240, 400,            440, 680,            720, 1120}, //12 km/h
{     173, 217,            260, 433,            477, 737,            780, 1213}, //13 km/h
{     187, 233,            280, 467,            513, 793,            840, 1307}, //14 km/h
};
/*****

```

Fonte: Autor (2022)

Nesta abordagem, supondo um caso de uso onde se opera com uma velocidade de 4 km/h, com um nível médio de infestação maior que 50%, se utilizaria uma faixa de dosagem entre 147 e 227 mL por metro-minuto. Considerando a roçadeira com 3,8 metros de largura, seriam necessários 558,6 à 862,6 mL por minuto. Assim, considerando-se que a capacidade do modelo de bomba permite uma vazão de 22 mL por rotação, seria necessário operar a bomba com o valor mínimo de 25,4 rpm (equação 11) e o máximo de 39,2 rpm (equação 12). Entretanto, o cálculo pode ser simplificado, definindo apenas as entradas de dose conforme a infestação e a velocidade, transformando os demais em uma constante, necessitando apenas de três operações de multiplicação. Também é possível atualizar a tabela no início da aplicação com o valor de largura ou setor e capacidade da bomba, podendo ser definido uma função de calibração automática a cada início de operação.

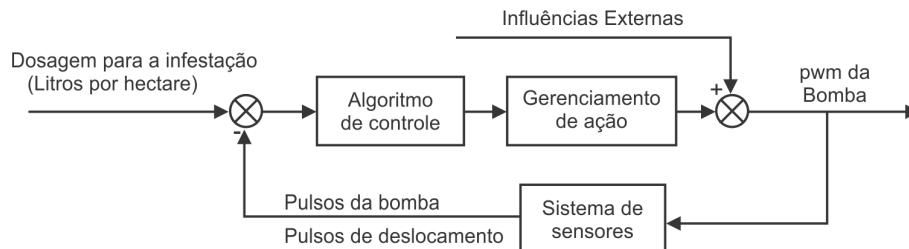
$$rpm_{min(bomba)} = \frac{147 \left(\frac{\text{mililitros}}{\text{metro} \times \text{min}} \right) \times 3,8 \text{ (metros)}}{22 \left(\frac{\text{mililitros}}{\text{rotação}} \right)} = 25,4 \text{ rpm} \quad (11)$$

$$rpm_{máx(bomba)} = \frac{227 \left(\frac{\text{mililitros}}{\text{metro} \times \text{min}} \right) \times 3,8 \text{ (metros)}}{22 \left(\frac{\text{mililitros}}{\text{rotação}} \right)} = 39,2 \text{ rpm} \quad (12)$$

3.4 Correção automática da vazão por velocidade

No presente caso se idealizou um modo complexo e desejável de ajuste de vazão, baseado na velocidade e no mapeamento dos dados, fornecidos por um sistema GNSS integrado em um dispositivo móvel (*smartphone* ou *tablet*), associando-se o controle da trajetória do equipamento e da aplicação no campo (marcador de linha), em uma interface com todas as funções e informações da operação, alimentado os parâmetros de funcionamento do controlador da Campo Limpo por *Bluetooth*. O uso do GNSS evita a sobreposições de áreas tratadas, interrompendo automaticamente a aplicação por setores da máquina. Entretanto, uma atualização simples requer dois sensores, como os de campo hall, para monitorar a rotação da bomba peristáltica, que aplica um volume constante de líquido aplicado a cada giro, conjugado ao outro sensor, posicionado sobre o eixo da roda da Campo Limpo. Destaca-se que a roda não é tracionada, portanto, imune a patinagem idealizado na figura 36.

Figura 36 – Diagrama em bloco do sistema agropecuário de controle da bomba para aplicação variável de defensivo

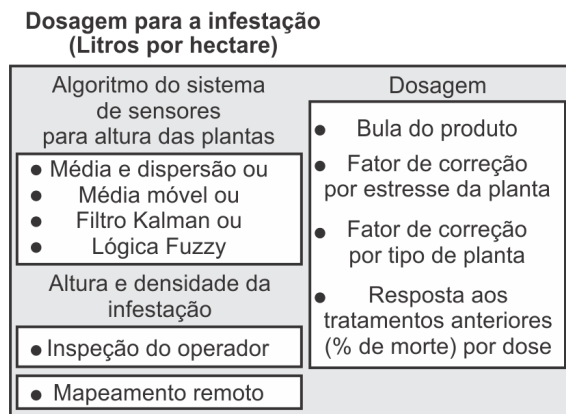


Fonte: Adaptado de Zhang (2015)

Os dados de sensoriamento do capim-anoni, identificando o volume de massa por outros sistemas, visa auxiliar a aplicação da vazão necessária, ativando adequadamente ou interrompendo a alimentação dos aplicadores com a calda herbicida sendo a entrada para o diagrama em bloco, onde se levantaram as possibilidades da figura 37 para a altura e densidade, alinhado pela dosagem do produto aplicado.

Segundo pressupostos de máquinas agrícolas precisas, é desejável a comunicação seguindo as regras ISOBUS entre o implemento e o trator. Entretanto, a operação com a Campo Limpo é, usualmente, executada com um trator pequeno de 30 ou menos cavalos que, normalmente, não dispõe desta tecnologia. A norma ISO 11784 ou ISOBUS, define o uso do barramento CAN e mensagens utilizando a unidade mm^3/m^2 para a vazão, onde a relação de 1 litro/ha equivale a $100 \text{ mm}^3/\text{m}^2$. Contudo, a padronização da indústria

Figura 37 – Dose aplicada em litros por hectare como entrada para o sistema de controle



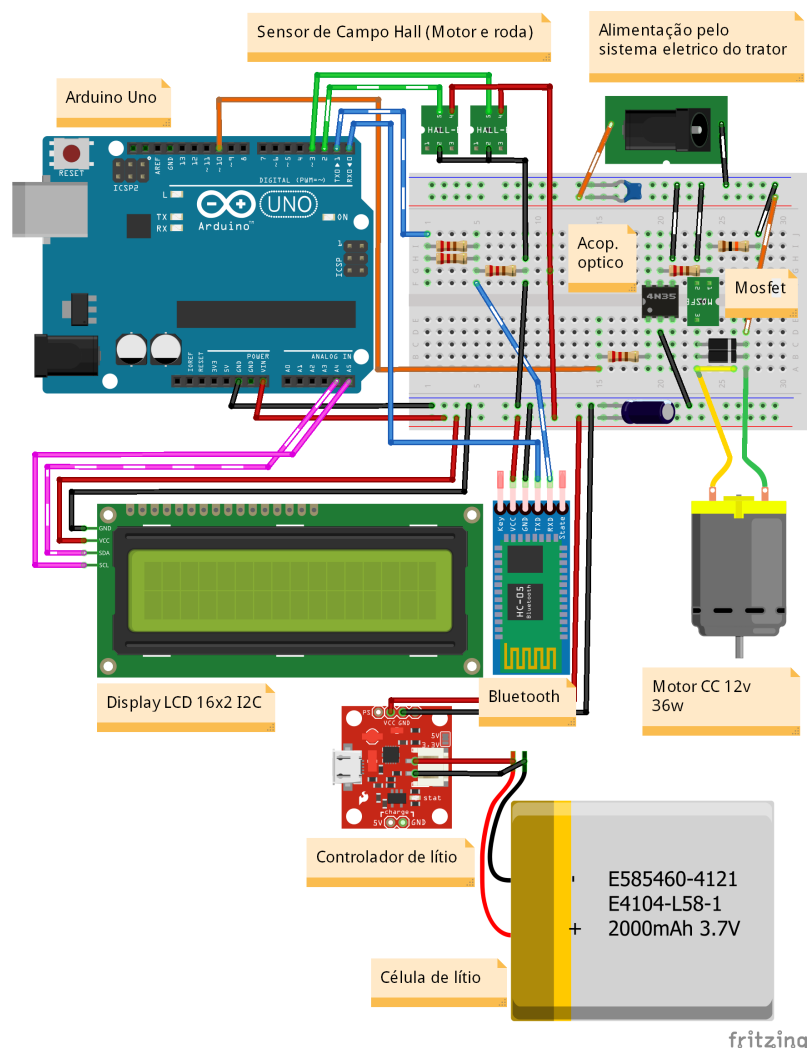
Fonte: Autor (2022)

automotiva e industrial com componentes que se comunicam utilizando o formato CAN para motores, bombas, sensores e atuadores é de interesse, dando preferência ao uso de sistemas que suportem o protocolo CAN para outras versões como o SoC ESP32.

3.4.1 Controlador automatizado para Campo Limpo

O controlador é composto por uma *shield* Arduino Uno com o microcontrolador ATmega328P, um sensor de campo Hall na roda com cinco magnetos e outro na bomba, com três que ativam as interrupções, para medir a velocidade e realimentar o acionamento do motor por PWM que chaveia o Mosfet de potência IRF1404. As velocidades e os demais dados são transmitidos por *Bluetooth* e também exibidas no *display* LCD 16x2 I2C com atualizações a cada dois segundos. Na primeira linha é mostrada a velocidade e rotação da bomba, enquanto na segunda são apresentados o *setpoint* calculado para alcançar a vazão e um cronômetro. Este *display* pode ser lido mesmo na condição de luminosidade alta que restringe a leitura da tela do celular ou *display* OLED. Foram instalados cinco magnetos no eixo da roda de circunferência 180,34 cm que fica segmentada em intervalos de 21,66 cm, que quando movimentada gera pulsos do sensor de campo Hall em intervalos iguais de deslocamento, permitindo calcular a velocidade relacionando o período tempo e o número de pulsos registrados. Uma proposta de montagem do controlador de vazão utilizando pode ser vista na figura 38, com os componentes utilizados para o controle de uma bomba. A lista de componentes e o esquema elétrico final da versão de produção deste sistema foram incluídos no apêndice A.

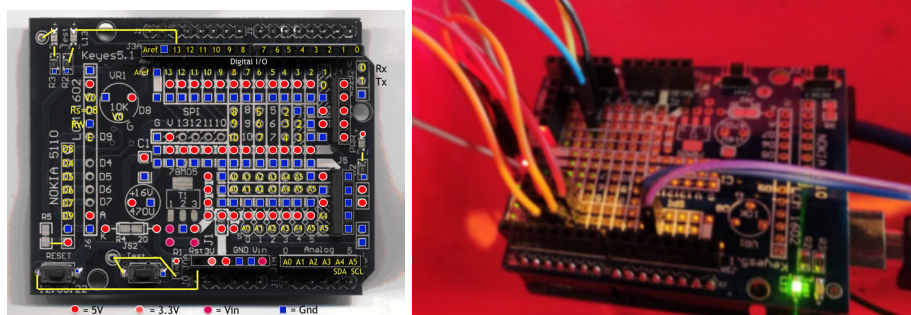
Figura 38 – Montagem proposta para o protótipo do controlador de vazão automático para a Campo Limpo. O sistema utiliza um sensor de campo Hall para deslocamento e um segundo para o controle do motor. Esta proposta inclui um acoplador ótico para isolar o microcontrolador de ruído do sistema elétrico e motor



Fonte: Autor (2022)

Para melhorar a robustez, visando suportar a vibração e evitar o mau contato, os cabos dos sensores foram soldados em uma placa de desenvolvimento do tipo *protoshield*, modelo keyes 5.1², vista na figura 39, reduzindo a quantidade de problemas experimentados nos testes preliminares. Para reduzir o risco de ruídos elétricos na alimentação, um conjunto de baterias e regulador de tensão para o microcontrolador e sensores foi utilizado, já o motor foi alimentado pelo sistema elétrico acoplado à bateria. Os componentes do controlador foram instalados em uma caixa plástica de ferramentas, fixada na roçadeira com abraçadeira e ímãs de neodímio ao fundo, conforme a figura 40.

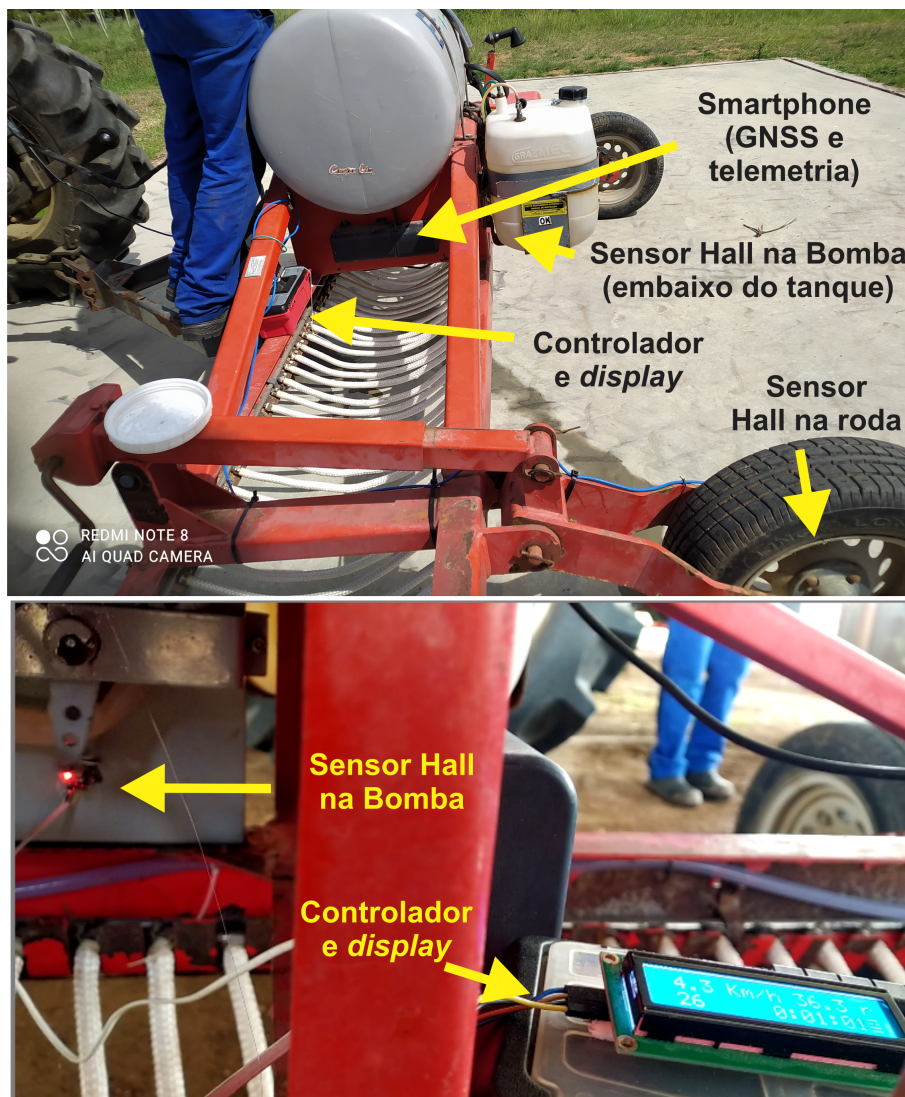
Figura 39 – Pinagem da placa de desenvolvimento keyes e o controlador de vazão construído com os cabos dos sensores e atuadores soldados, criando uma *shield*



Fonte: Fórum Arduino.cc e Autor (2022)

²Pinagem e conexões na placa de desenvolvimento Keyes 5.1 <<https://forum.arduino.cc/t/keyes-5-1-development-board-pin-identities/289429>>

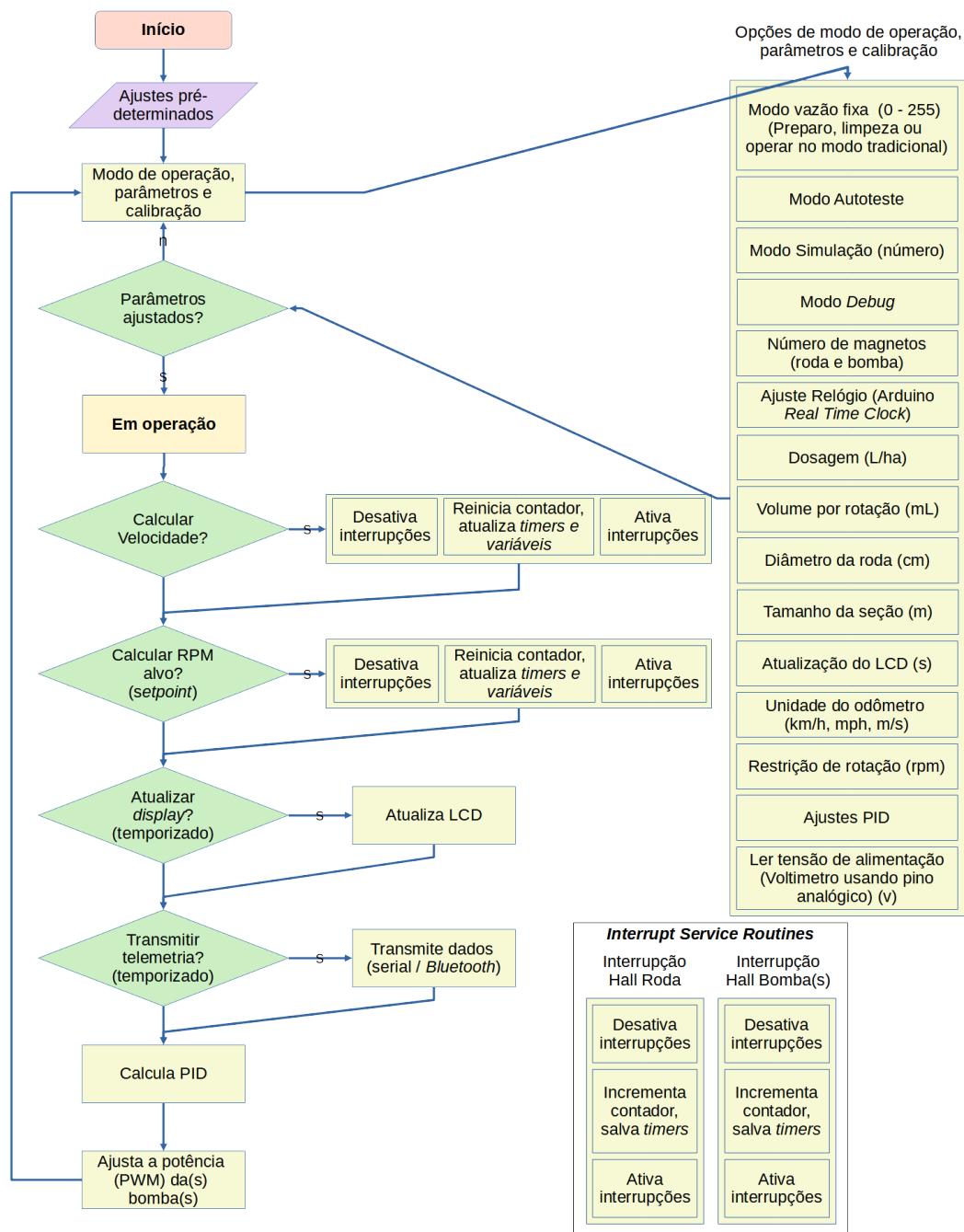
Figura 40 – Disposição do controlador e sensores Hall na roçadeira Campo Limpo.



Fonte: Autor (2022)

O software definido pelo fluxograma (figura 41) utiliza rotinas de interrupções, buscando minimizar o impacto na execução, e temporizações fixas para atualizar ou realizar a transmissão da telemetria, ficando a maior parcela de tempo livre para gerenciar o motor. Os parâmetros de ajustes permitem configurar o controlador para modelos com diferentes características, e ajustar a resposta para as variações nas condições de operação.

Figura 41 – Fluxograma do aplicativo para controle dinâmico, incluindo o tratamento das interrupções, funcionalidades de ajuste e configuração



4 MATERIAIS E MÉTODOS

A partir dos protótipos de soluções desenvolvidas, conforme descrito no capítulo 3, foram delineados experimentos para a verificação quantitativa e qualitativa da sua operação. Para atender os objetivos do projeto, foram realizadas pesquisas exploratórias e experimentais com os sensores, de modo a validar e conhecer as restrições às hipóteses levantadas para cada tomada de decisão. A partir de cada experimentação detalhada no apêndice B, foi possível observar em quais condições as soluções desenvolvidas atenderam os objetivos iniciais. Foram realizados seis experimentos relacionados ao VL53L1X: um preliminar de laboratório, um preliminar de campo, um avançado de laboratório com diferentes ajustes e calibração e outros três avançados de campo.

4.1 Experimento preliminar em laboratório e campo

O experimento inicial de laboratório teve o objetivo de validar o ângulo de abertura do sensor laser e ultrassônico, sua capacidade de reconhecer a planta invasora, de acordo com inclinação variável e a capacidade de leitura do topo.

Para validar a capacidade de o sensor reconhecer o sinal refletido do capim, foi coletada parte de uma planta na fase adulta, em estágio de disseminação de sementes, em Bagé (31° 34' S, 54° 09' W). A planta de capim-annoni se desenvolveu entre uma cobertura gramínea de hábito prostrado e o solo descoberto da rua de terra, gerando duas touceiras de 60 x 20 cm de largura, conforme a figura 42.

Figura 42 – Touceira de capim-annoni coletada em Bagé (31° 34' S, 54° 09' W)



Fonte: Autor (2022)

A parte aérea da planta foi cortada próximo da base, com uma tesoura, sendo posteriormente unida com fita crepe, gerando uma amostra com altura máxima de 83 cm, diâmetro de 30 cm e massa verde de 123 g, vista na figura 43.

Figura 43 – Touceira de capim-annoni usada para verificar a capacidade de resposta dos sensores à refletância e textura



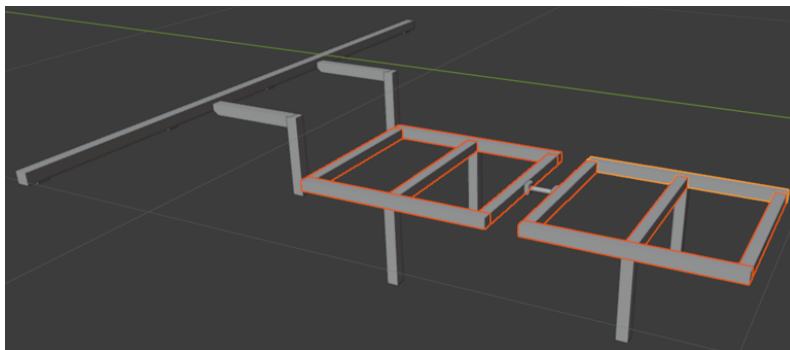
Fonte: Autor (2022)

No referencial teórico, seção 2.2.1.5, se observa a medição da planta alvo no verão com o espectrômetro, obtendo uma refletância de 70% na faixa de infravermelho, entretanto, em campo, se tem a oportunidade de compreender qual a visão do sensor para radiação ambiente e aspectos da iluminação, por meio de câmeras que utilizam o filtro infravermelho, modelo Mapir Survey2 Near Infrared que tem uma lente de 82° HFOV (23mm) f/2.8 de abertura com o filtro de NIR (850 nm), e uma segunda câmera, Mapir Survey2 com filtro duplo de NDVI Red (660 nm) + NIR (850 nm).

4.1.1 Experimentos de detecção do capim-annoni com a barra de sensores

Os experimentos de sensoriamento de altura foram realizados com o protótipo, onde a metade da barra de sensores do UGV estaria à 76,5 cm \pm 2,5 do chão. Variação essa devida ao acoplamento da articulação central, conforme visto na figura 44. O módulo de sensoriamento de distância utilizou três unidades de VL53L1X, uma de TFmini Plus e uma do sensor ultrassônico HC-SR04, com um botão para acionar ou interromper o sensoriamento e envio de dados, com um LED indicando o estado. O cabeamento foi projetado para cobrir quatro metros, suficiente para o processo de sensoriamento na faixa de cobertura da Campo Limpo, podendo ser acoplada à frente do trator.

Figura 44 – Barra de sensoriamento fixa na extremidade da estrutura e pivô de articulação no centro



Fonte: Domingues (2022)

Nas configurações indicadas no *datasheet* do fabricante STMicroelectronics (2021a), o sensor VL53L1X pode ser imune a luminosidade se ajustado para o modo de curta distância, onde opera a 136 cm em uma condição de *time budget* de 100 ms, alvo branco com refletância de 88% e luz ambiente de 200 kcps/SPAD dada como a condição de dia nublado. Ele tem capacidade de informar leituras à 50 Hz em detrimento da precisão, mas como é desejável uma taxa de leituras de 11 Hz para operar na velocidade de 1,1 m/s, foi ajustado com mais tempo de leitura e processamento interno, antes de retornar um valor. As bibliotecas Adafuit_VL53L0X v1.10 e SparkFun_VL53L1X v1.2.9, foram experimentadas no modo padrão da biblioteca e no modo de curta distância, com o parâmetro de *time budget* definido em 100 ms. Os demais ajustes foram uniformizados, como *timeout* de 500 ms que informa um sensor com problema, tempo entre leituras de 200 ms e de leitura de 200 ms, visto que ele retornou valores mais estáveis ao aumentar o valor padrão de 50 ms em condições de alta luminosidade. O pino *xshut* de cada VL53L1X foi usado para ligar sequencialmente e definir um endereço I2C único. O sistema realizou todos os ajustes e ficou operacional após dois segundos, indicando uma mensagem de sucesso na inicialização e configuração dos sensores. Por último, o fabricante STMicroelectronics foi contatado em seu fórum de suporte, confirmando que este seria o melhor cenário de ajuste e uso *outdoor*. Assim, apontado para baixo e sobre efeito sombra, aumentaria a chance de obtenção de uma leitura aceitável.

Com maior tolerância a ruído, por usar *SiPM* como receptor, o *datasheet* do sensor TFmini Plus, que opera com radiação de 70 klux (BENEWAKE, 2019), também foi testado nas condições próximas do limite e acima do indicado. Nessas circunstâncias, suas opções de ajuste se restringiram à configuração no modo de curta distância e envio de dados em 20 Hz.

A luz ambiente foi medida com o luxímetro LD 550, permitindo quantificar a interferência sobre os sensores ToF nas condições de alta radiação, radiação no limite do sensor TFmini Plus e sombra parcial. O sensor VL53L1X forneceu mais de 80% dos valores válidos numa quantidade de radiação próxima a de um dia nublado ou com redução total da luminosidade. Durante os experimentos foram medidos valores acima de 110 klux nas horas com alta radiação.

4.1.2 Experimentos preliminares no laboratório da Unipampa

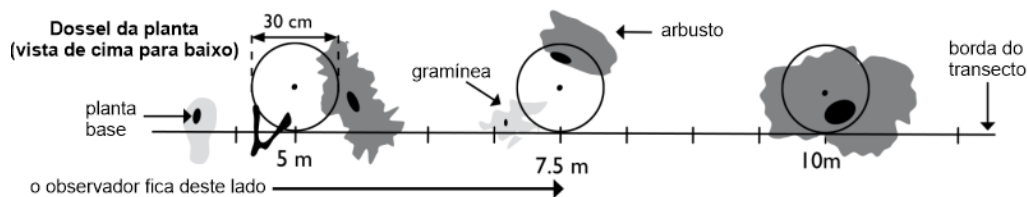
Os experimentos preliminares, realizados no laboratório, foram usados para validar o comportamento de todos os sensores, em uma condição ideal, de superfície plana com o equipamento estático, para medir a altura. Os ajustes dos sensores foram experimentados para temporização de captura da distância, de acionamento único ou contínuo, variando a luminosidade natural indireta, artificial fluorescente e medidos com um luxímetro.

4.1.3 Experimentos preliminares de sensoriamento em campo nativo na Unipampa

Diversos locais foram utilizados para os experimentos no campus da Unipampa Bagé, com a vegetação característica do Bioma Pampa e invasoras, como pontos próximos ao bloco 4, entrada do campus e nas proximidades do Planetário. Estes experimentos preliminares de sensoriamento foram usados para explorar a capacidade de medir a altura das gramíneas em locais com alta incidência de luz solar, com áreas sombreadas, com solo exposto e com a altura máxima homogênea por corte mecânico. Uma trena de 10 metros foi utilizada para delimitar o traçado que a roda seguiu, foram anotadas as características de luminosidade do local e temperatura. A altura de toque das plantas foi registrada utilizando uma régua e disco, repetindo a cada metro, seguindo os cuidados indicados no método de Herrick *et al.* (2015), como ilustrado na figura 45.

O equipamento de sensoriamento foi posicionado na linha e cada passada teve a telemetria salva no *smartphone* ao pressionar o botão de iniciar ou por comando de terminal, medindo pontos continuamente e agrupando pela interrupção gerada no sensor Hall para cada 23 cm de deslocamento. Estes dados foram armazenados em um arquivo do tipo *comma-separated values* (CSV), permitindo calcular o ajuste ideal

Figura 45 – Exemplo de intervalos de medição da altura da vegetação e da área tangente à linha em que são medidos os elementos vegetais lenhosos e herbáceos mais altos



Fonte: Herrick *et al.* (2015)

do equipamento Campo Limpo, conforme a capacidade e sensibilidade de cada série de sensores. O processo de preparar os dados, filtrar e realizar a análise, foi realizado de forma semi-automática e, sendo necessário, o programa instalado no microcontrolador informava os valores de mínimo, média, máximo e desvio padrão da altura para cada 20 conjuntos de leituras. Nesse procedimento, também foram desenvolvidas funções de diagnóstico e modo *debug*, detalhando a qualidade do sinal lido e erros de medição nos sensores. O local dos experimentos, ao fundo do Bloco 4 do Campus Bagé da Unipampa, foi demarcado em diferentes pontos, conforme a necessidade. O experimento realizado em 04/09/2021 apresentava uma camada expressiva de material morto, medido a altura do dossel com uma régua, a vegetação ativa e por fim o disco de 23 cm para indicar a distribuição de densidade. Salnab, Soares e Canesin (2006) indicam o disco medidor ou prato ascendente como um método de amostragem para avaliação da forragem, indicado para pastagem uniforme e densa por ser simples e de fácil entendimento e uso.

4.2 Experimentos para validação do sensoriamento de altura a campo

Para validar o sensoriamento de altura e a infestação em um local de pastejo real, foram realizados dois procedimentos. O primeiro, logo após delimitar as parcelas no campo e o segundo próximo ao dia de aplicação do herbicida, no período noturno, visando excluir o efeito da luz direta na vegetação. No dia da aplicação do herbicida, o operador e técnico experiente, realizou a medição de uma parcela com a régua e configurou o equipamento na condição ideal de altura da roçadeira, servindo com uma orientação de correção para o valor sensoriado. A figura 46 mostra o início da preparação do sensoriamento, onde o equipamento foi movimentado nas parcelas, coletando dados na lateral, repetidamente, excluindo a área pisoteada.

Figura 46 – Sensoriamento noturno com a barra de sensores em um período antes da aplicação de defensivos



Fonte: Autor (2022)

O procedimento, similar em ambos experimentos, seguiu um método de movimentar manualmente o UGV, acoplado aos sensores, saindo do repouso no início da parcela, em uma velocidade entre 2 e 4 km/h, parando no final da parcela. Foram realizadas quatro medidas (repetições) por parcela, alternando-se o sentido do deslocamento a cada repetição. Em todas as parcelas foi mantido o traçado para não sensoriar o local pelas rodas ou pisoteado pelos operadores. Além das parcelas, uma porção com gramínea rasteira e uma parte da estrada de cascalho foram sensoriadas, para coletar dados de altura mínima com outra textura e a refletância alterando a superfície. Os dados foram transmitidos por comunicação serial utilizando o *Bluetooth*, e tratados para conhecer comportamento de altura e dispersão por tipo de sensor em cada parcela.

4.3 Experimento prático do controlador automatizado para Campo Limpo

O procedimento final de validação dos dois sistemas propostos para atender o objetivo principal deste trabalho iniciou no dia 9 de fevereiro de 2022, com a seleção do local do experimento dentro da Embrapa Pecuária Sul e marcação das parcelas. Ainda que o controlador automático de vazão tenha sido previamente instalado na Campo Limpo,

uma série de problemas ocorreram durante os testes de calibração. Os problemas foram solucionados com o aprimoramento de controle de vazão proporcional para PID que, posteriormente, foi simplificado pelo PI. As alterações no programa, foram realizadas também visando a portabilidade para outros microcontroladores, com mais recursos. O cabeamento de sensores foi reconstruído com mais robustez, numa placa de prototipação.

Para o experimento, comparando o sistema tradicional de aplicação com o sistema automatizado, uma área de campo nativo infestado por capim-annoni, foi definida na Embrapa Pecuária Sul. Primeiramente, a altura da vegetação foi sensoriada, assim como a definição do nível de infestação, para o ajuste da altura das cordas no equipamento. Posteriormente, foi realizada a aplicação seletiva de herbicida, comparando as duas situações. A primeira no procedimento tradicional, com a vazão pré-fixada pelo operador, com o controlador original. A segunda, em taxa variável, estabelecida em função da variação na velocidade do conjunto Campo Limpo e trator. A área definida para o experimento (31° 34' 79" S, 54° 01' 30" W) também atendeu a necessidade logística de proximidade da sala de pesquisadores e acesso ao ferramental. O local apresentava um nível de infestação considerado alto, recebendo o pastejo frequente de bovinos e ovinos. Foram demarcadas oito parcelas retangulares de 4 x 10 metros, adequado à largura do equipamento Campo Limpo, separadas por um corredor de 4 metros entre elas, que recebeu uma roçada mecânica prévia, observado na figura 47.

Figura 47 – Foto aérea das oito parcelas de 4x10 m e corredores roçados mecanicamente na Embrapa Pecuária Sul



Fonte: Autor (2022)

A aplicação de herbicida foi realizada no dia 16 de março de 2022, utilizando o

modo tradicional como controle, gerando observações e questionamentos ao acompanhar a execução por um operador experiente. Posteriormente, no dia 29 de março, foi realizada a primeira avaliação das parcelas, para verificar a eficiência dos controladores na aplicação do herbicida. Após os procedimentos de campo, foi realizada uma série de experimentos em laboratório, tendo por base as observações e questionamentos gerados durante a aplicação do herbicida. Nesses experimentos, simulou-se a repetição da aplicação do herbicida com os dados do log, buscando-se obter um resultado ideal para este procedimento. No dia 13 de abril foi realizada uma segunda avaliação das parcelas.

O delineamento experimental foi completamente causalizado, sendo o procedimento padrão, com controlador original, alocado nas parcelas 1, 2, 5 e 8 e o controlador de vazão dinâmica nas parcelas 3, 4, 6 e 7. A aplicação foi realizada com uma única passada. A avaliação da infestação e ajuste de altura e vazão foi pré definida por um operador experiente, conforme a sua avaliação do local, caracterizada como área alta infestação. A calda herbicida prescrita foi constituída de 4 litros de glifosato comercial (480g/litro), diluídos em 30 litros de calda, suficientes para tratar um hectare, o que condiz com os valores recomendados pelo manual para a *Eragrostis plana* Nees. A altura foi ajustada pelo operador, entre 16,5 e 19,5 cm, de modo a tocar o maior número de plantas do capim-annoni, sem afetar o estrato inferior, preservando as espécies nativas.

O trator Yanmar 1145-4 de 39 cv, ID 054, com bateria de 12 V 40 Ah e alternador com capacidade de 1,4 kW ou (14 V × 100 A) foi selecionado para a tarefa, na velocidade de 4,21 km/h, na marcha "F3", segundo a ficha técnica. Para a aplicação do defensivo foi acoplado um equipamento Campo Limpo, ano 2013, com controlador analógico. O conjunto de cordas e mangueiras (aplicadores) era novo, enquanto os outros componentes, como bomba e motor foram inspecionados e considerados adequados. Foi necessário refazer os conectores elétricos e uma limpeza nos bornes de conexão elétrica que apresentavam oxidação. O efeito da aplicação no campo foi avaliado a cada duas semanas. Duas formas distintas foram utilizadas para captura da telemetria. O equipamento Campo Limpo foi conectado ao celular com capacidade de conectar diversas constelações de satélite para georreferenciamento. A velocidade e deslocamento entre os pontos, foi mensurada com o aplicativo Strava, visando exportar os dados no formato GPX "GPS eXchange Format", similar ao XML, contendo hora, latitude, longitude e elevação. A amostragem a cada segundo, não registrou a quantidade de satélites visados. A telemetria enviada pelo controlador consistiu na velocidade de deslocamento, velocidade da bomba e o *setpoint* de vazão, ajustado pela capacidade da bomba ou sistema a cada dois

segundos. Os aplicativos de telemetria e log foram inicializados e o celular armazenado no compartimento de manual da Campo Limpo ao lado do tanque.

Antes dos experimentos, a capacidade de bombeamento foi medida, com o motor alimentado por uma fonte estabilizada de 12 V e 30 A nominal, de modo a atender o consumo da bomba peristáltica de 18 A nominais e 50 A em pico, obtendo uma taxa de transferência de 21 a 23 mililitros por rotação de 14 a 72 rpm, com as peças originais. Também foi aferida a quantidade de volume da calda herbicida necessária para preencher o sistema. Foram computados 7 litros para encharcar as 68 cordas de 40 cm, cada uma armazenando, em média, 110 gramas por capilaridade, além da mangueira interior, com 5 mm de diâmetro, dois tubos de inox medindo 3,8 m, uma mangueira $\frac{3}{4}$ de polegadas de interconexão entre filtro, bombas e registros que totalizaram uma extensão de 7 metros. Foram preparados 20 litros de calda em um galão, com 4 litros de glifosato 480 g/litro, atendendo a indicação para situação de infestação alta de capim-annoni. Esse mesmo galão foi utilizado para drenar o tanque após a aplicação, para medir o consumo. Antes de abastecer, o operador revisou o estado das mangueiras, tubulações e filtros, que operavam com água durante os testes.

4.3.1 Método para a avaliação do efeito da aplicação

De acordo com Salnab, Soares e Canesin (2006), vários métodos de avaliação quantitativa da pastagem podem ser usados, não existindo um método perfeito, por possuírem vantagens e desvantagens. Em cada parcela foi realizada a amostragem direta com uma moldura de metal quadrada de 0,25 m². O número de amostras aleatórias para medir a matéria dessecada em cada parcela foi de três. As molduras de 0,5 × 0,5 m (0,25 m²) foram lançadas ao acaso para cada parcela, na área delimitada, sendo realizadas as medições no seu interior. O primeiro passo após lançar a moldura foi fotografar o local em vista superior, avaliando-se o percentual da parte aérea morta. Foi gerada uma média pela observação de dois observadores. A avaliação visual da quantidade de matéria morta contabilizou a proporção de plantas que entraram em contato com o herbicida e foram efetivamente controladas, excluídas as que estariam abaixo da linha de aplicação das cordas. Em sequência, se realizou a medição da altura no primeiro toque em três pontos no quadro de diferentes plantas e, por fim, foram contados o número de touceiras.

4.4 Experimentos de substituição da mangueira (bomba peristáltica)

Embora o procedimento de substituição da mangueira da bomba peristáltica seja uma manutenção rotineira, por ser uma peça que sofre desgaste por uso, devido à tração e à compressão nos roletes, foi idealizado um experimento, de modo a comparar o efeito da substituição da mangueira na qualidade da aplicação. Antes e após a substituição da mangueira, foi procedida a aferição da vazão, utilizando-se um copo graduado e um cronômetro, obtendo a dosagem a partir de repetições para cada intervalo de rotação. A seção 5.8 detalha o procedimento de substituição, e como ele impactou na nova vazão, podendo ser este um fator que alterou o resultado do experimento de aplicação no campo.

4.5 Experimentos de influência do sistema elétrico do trator sobre o controlador

O manual da Campo Limpo de Perez (2010a) destaca a necessidade de os cabos serem bem conectados e sem a presença de oxidação ou sujeira, o que pode gerar um baixo desempenho da bomba. Entretanto, no experimento realizado em campo, se observou que existe uma alteração devido à variação de tensão do sistema elétrico do trator sobre o controlador, levando a necessidade de avaliar este comportamento em diferentes condições. Analogamente, usuários da Campo Limpo também relataram problemas após a retificação do motor do trator, o que produziria um comportamento errôneo, descaracterizando a regulagem prévia.

Como a rotação da bomba peristáltica é responsiva à variação da tensão do sistema elétrico, foi feito um ensaio com o motor do trator desligado e ligado, em diferentes rotações, para determinar a diferença máxima gerada entre os dois procedimentos. Para aferição, foi utilizando um multímetro seguindo-se a mensuração da rotação da bomba. O experimento foi repetido em dois tipos de controladores, analógico e digital, devido ao autoajuste para manter a rotação definida.

A seção 5.7.1 detalha as diferenças ao realizar a calibração no controlador antigo com o trator desligado e qual o impacto para cada rotação da bomba no trator, bem como a capacidade de ajuste do controlador baseado na dosagem da rotação da bomba. Por fim, é observado qual a tensão máxima aceitável o controlador suporta, baseado nas especificações dos componentes eletrônicos.

4.6 Simulação dos experimentos na Embrapa com dados da telemetria

Era previsto que, na primeira utilização do novo controlador, poderia haver um resultado significativamente diferente do esperado, como consequência do desconhecimento da variação de velocidade, questões de calibração e falta de uma telemetria, equivalente à realidade da operação do trator com a roçadeira Campo Limpo acoplada. Desta forma, para ajustar a calibração e confirmar os aspectos que poderiam alterar os resultados do experimento como, por exemplo, o consumo de calda por deslocamento, foram realizadas diversas repetições, simulando diferentes cenários, como a alimentação elétrica do trator nos estados do motor desligado e, posteriormente, ligado até aplicar a quantidade ideal. Para simular a variação de velocidade no controlador automatizado, os valores de telemetria da velocidade foram salvos na memória do microcontrolador. Para estes experimentos, o tanque da Campo Limpo foi preenchido com água e a roçadeira permaneceu estática, alimentada eletricamente pelo trator.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

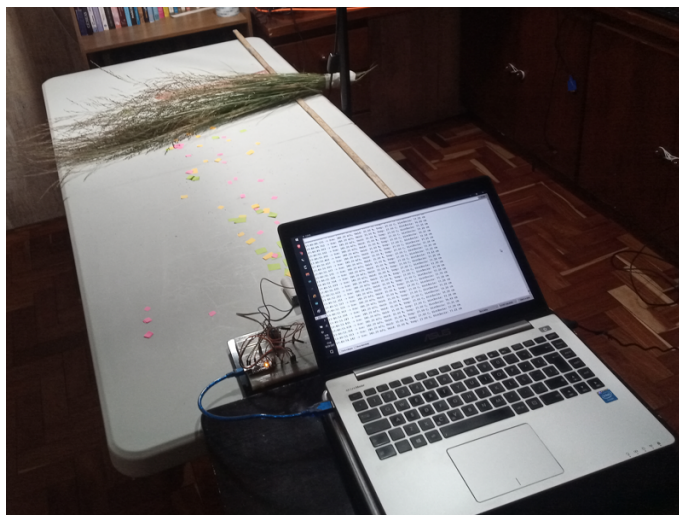
Este capítulo aborda os resultados dos testes iniciais dos sensores, do sensoriamento realizado na Unipampa, os resultados comparativos do uso do controlador tradicional e automatizado na Embrapa. Também são relatadas as falhas normais de uso do equipamento, as quais podem alterar os resultados. Por fim, apresenta-se a avaliação do efeito das aplicações nas parcelas, utilizando os dois tipos de controladores de vazão.

5.1 Resultados dos experimentos preliminares de testes dos sensores

A medição do topo da touceira foi realizada com os dois sensores da STMicroelectronics. Entretanto, a amostra para simular uma única touceira apresentou-se mais densa que a planta em ambiente natural. Apenas o sensor com maior capacidade apresentou leituras consistentes, a partir de 10 cm do ponto mais alto da planta do experimento, confirmando que, nestas condições, o sensor ToF VL53L1X conseguiu detectar pequenos objetos e a amostra do capim-annoni (*Eragrostis Plana* Nees) para a distância de 110 cm, em todos os ângulos, enquanto o sensor de entrada VL53L0X não detectou com sucesso a planta nas mesmas condições.

O experimento inicial de laboratório, aplicado à planta alvo, sem incidência da luz do sol como fonte de ruído de NIR, pode ser visto na figura 48, o qual serviu para validar a capacidade de medir a distância em uma condição controlada.

Figura 48 – Experimento preliminar de detecção do Capim Annoni com sensores



Fonte: Autor (2022)

Outro experimento preliminar, realizado em campo, utilizou câmeras NIR ao lado dos sensores, visando maior compreensão da textura, visualizar diferenças na altura e refletância de áreas com sol ou sombreada, similar à visão de máquina dos sensores ToF. Por meio da câmera modelo Mapir Survey2 Near Infrared, com o filtro de NIR (850 nm), se obteve a figura 49. Uma segunda câmera com filtro duplo de NDVI Red (660 nm) + NIR (850 nm) captura o mesmo local e instante, na figura 50. Elas foram utilizadas na configuração de fábrica, sem zoom e acoplada à barra de sensores para o experimento de medição com infestação alta do capim-annoni na região de Bagé-RS, dia 25/04/2021, às 16 horas e 56 minutos.

Figura 49 – Touceira de Annoni vista com a câmera Mapir Survey2 Near Infrared (850 nm). O material apresenta uma significativa refletância devido à cor se aproximar do branco e também ser clara, aonde não tem incidência direta do sol, enquanto o solo tem menor refletância para esta frequência, apresentando uma cor mais escura



Fonte: Autor (2022)

A altura máxima dada pelo primeiro toque das touceiras aconteceu entre 40 e 56 cm, onde se pode observar na imagem os aspectos que influenciaram os sensores, como a refletância causada pelo sol em contraste com sombra. Nessa situação, os pontos com incidência direta da luz do sol apresentaram uma tonalidade clara e bem definida. Também foi possível observar a proporção de plantas, folhagem deitada e solo visível na visão superior.

Assim, a figura 49 permite compreender visão do sensor ToF tem, ao retornar um valor intermediário entre os pontos, a partir de seu processamento interno utilizando múltiplas leituras. Em alguns pontos vão ter um sinal mais forte de acordo com ângulo e quantidade de folhas.

Figura 50 – Touceira de Annoni vista com a câmera Mapir Survey2 de banda dupla, NDVI Red (660 nm) + NIR (850 nm). O material apresenta significativa refletância NIR (850 nm) e baixa contribuição do vermelho (660 nm) mesmo com a vegetação estressada. Já o solo, tem baixa refletância nestas frequências e apresentou um tom escuro



Fonte: Autor (2022)

5.2 Resultados do sensoriamento no laboratório da Unipampa

No laboratório (condição *indoor*), com a barra de sensores instalada a 76,5 cm do chão no UGV, foram avaliadas quatro condições de iluminação, para medir continuamente a uma altura estável durante cada mensuração. Em uma das condições de luminosidade avaliadas, a luz solar, no horário de 11 horas, incidiu indiretamente no piso vinílico claro e liso, proporcionando uma alta refletância. Nessa condição, o luxímetro obteve o valor máximo de 572 lux na sala. A tabela 5 apresenta os resultados de 20 repetições com a luz do sol e o efeito (com e sem) da luz fluorescente, e restringindo a maioria da luz solar.

Tabela 5 – Teste para verificar o efeito da iluminação natural e artificial (*indoor*) sobre os sensores. Equipamento estático, distância do chão de 76 cm

Fonte de luz	Solar e fluorescente	Solar	Fluorescente	Residual e dispersa
Lux	572	439	220	84
HC-SR04 (cm)	70 ±0,59	70 ±0,94	71 ±0,79	70 ±0,69
TFmini Plus (cm)	77 ±0,47	77 ±0,49	77 ±0,49	77 ±0,47
VL53L1X (cm)	81 ±15,60	78 ±11,45	74 ±3,34	74 ±2,83

Fonte: Autor (2022)

Na tabela 5 os valores do sensor VL53L1X apresentaram uma média de 81 cm

comparado a altura real de 76 cm com um desvio padrão de 15,60 cm na condição de luz solar. Na condição de restrição da luz ambiente o VL operou mais próximo da altura real e com um desvio padrão menor que 3,34 cm. Para todas as condições o comportamento do TFmini Plus e HC-SR04 se mantiveram estáveis, onde a diferença de mínimo e máximo de 2 cm representa 2,85% de variação nas leituras e com relação à distância real de 76 cm, ao medir 69 cm existe uma diferença de 9,21%. Além disso, a iluminação por lâmpada fluorescente e LED não gerou oscilações nos valores de altura sensorizados, devido ao seu espectro. Entretanto, os equipamentos com luzes incandescentes de filamento de tungstênio, halógenas e xenônio converteram a maioria da energia em radiação infravermelha, usados como fonte de iluminação em uma operação noturna.

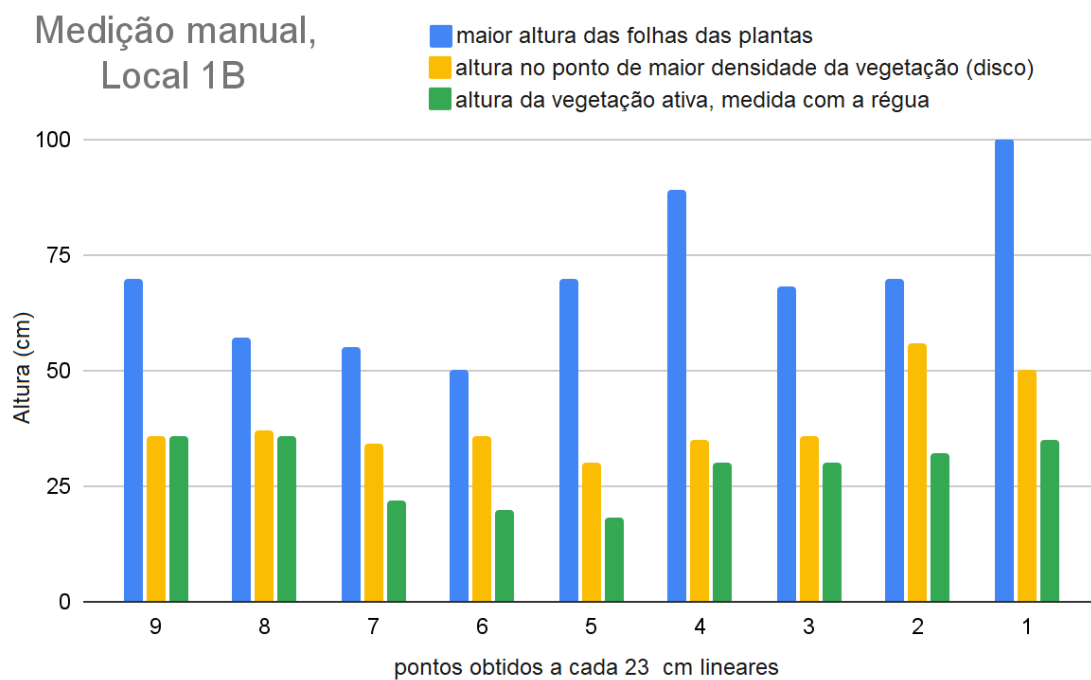
Considerando o equipamento onde o modo de aplicação, utiliza as cordas (figura 6) que são flexíveis, dispostas na diagonal, e formam um arco com altura de 5 a 10 cm, assim durante a operação a oscilação neste eixo de altura por contato acompanha a densidade tocando uma grande área das plantas. Essa forma de operar permite que um ajuste aproximado seja eficaz em combater plantas em diversos estágios de desenvolvimento e flexibiliza a configuração de ajuste da altura.

5.3 Resultados do sensoriamento na Unipampa

Considerando a espessa camada de material morto (onde pela diferença entre o ponto mais denso e o verde em alguns pontos alcançou de 10 a 25 cm) a avaliação da altura incluiu a altura da vegetação acima dessa camada. Na figura 51, as barras azuis do gráfico representam as alturas máximas, medidas com disco, em amarelo a maior proporção de matéria vegetal e, em verde, o substrato ativo. Os dois pontos sensorizados vistos nas figuras 51 e 52 se diferenciam, por um ser um local exposto e o outro, um local com a presença de sombra por arbustos.

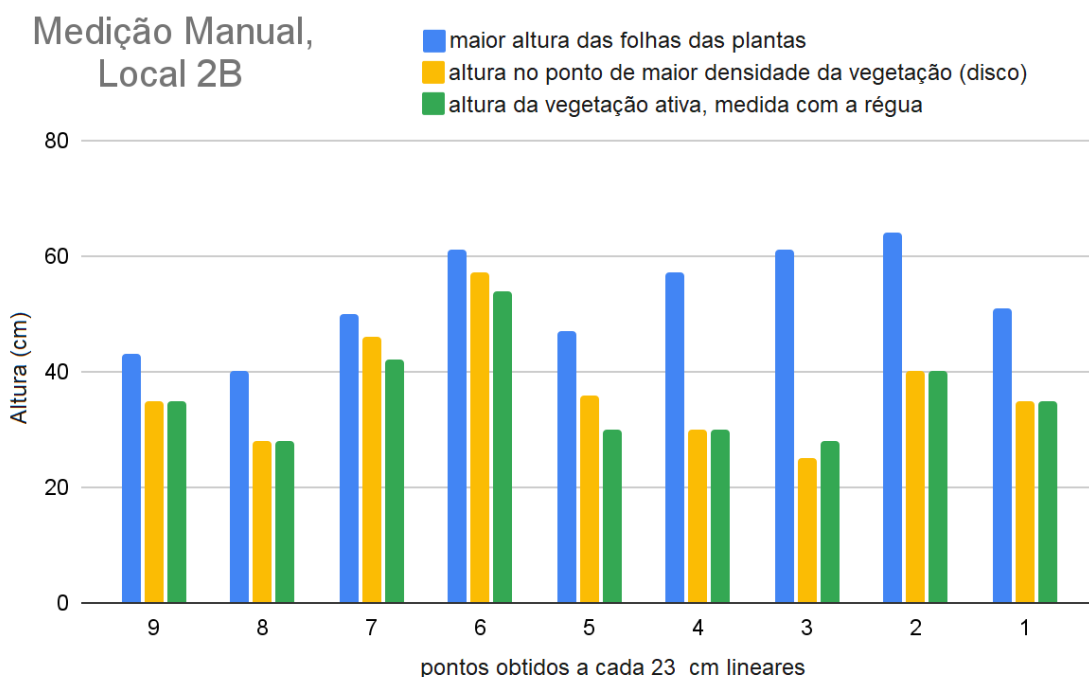
No período de 21 a 31 de dezembro de 2021, os sensores foram avaliados na condição de alta radiação de 93,6 klux, que superou a recomendação dos fabricantes dos modelos baseados em luz. O sensor identificado como VL1 foi instalado ao lado do TF1 e HC1, os quais correspondem respectivamente ao VL53L1X, TFmini Plus e HC-SR04. A posição do final da barra sofreu uma amplitude maior de oscilação durante o deslocamento, interferindo no eixo da altura como se observa na figura 53, reduzindo ou elevando a altura em 20 cm.

Figura 51 – Local sem sombra: Medição manual com régua da altura da vegetação nativa no local de sensoriamento (Unipampa – Bagé, RS)



Fonte: Autor (2022)

Figura 52 – Local com sombra - Medição manual com régua da altura da vegetação nativa no local de sensoriamento (Unipampa - Bagé, RS)



Fonte: Autor (2022)

Figura 53 – Exemplo de alteração da altura da barra de sensores por variação do solo, onde uma irregularidade alterou em 20 cm a altura da extremidade da barra



Fonte: Autor (2022)

Os resultados mostraram a viabilidade do uso do sensor TFmini Plus na condição de alta radiação solar, com aproveitamento de 91,10% a 93,4% das leituras realizadas. Entretanto, o valor “0” totalizou 570 leituras das 8622, indicando que o sensor não estaria apto para uso ou, ainda, um possível erro do microcontrolador. Consultando o manual do TFmini Plus verificou-se que o sensor possui uma tolerância a 70 klux de luz ambiente. Entretanto, o local sensoriado recebeu valores acima do especificado, o uso *outdoor*, embora o sensor estivesse apontando diretamente para o solo, para reduzir o número de leituras inválidas. Já o HC-SR04, apesar da baixa potência do sensor e a necessidade de objetos sólidos com boa reflexão do som, o sensor apresentou resultados de sensoriamento próximos ao sensor TF Mini Plus, onde a média da diferença foi de 1,90 cm para os valores válidos.

Os experimentos na Unipampa confirmaram a viabilidade dos sensores VL53L1X, que operaram com redução da luminosidade natural por meio da geração de uma área sombreada (figura 51). Mesmo assim, as leituras obtidas pelos sensores apresentaram ruídos e uma grande oscilação. Entretanto, o experimento demonstrou a capacidade de se operar com múltiplos sensores. As tabelas 6 e 7 apresentaram a quantidade de valores coletados em um intervalo válido, utilizando múltiplas repetições, para cinco sensores: um HC-SR04, três VL53L1X e um TFmini Plus.

Tabela 6 – Valores válidos de sensoriamento em um total de 5.452 leituras. Experimento realizado em 28/12/2021 na Unipampa em uma condição de alta luminosidade (acima de 70 klux). Os valores agrupados apresentam a quantidade leituras válidas para o intervalo de distância entre barra e o solo e o percentual comparado ao total

Distância sensoriada (cm)	Sensores				
	HC1	VL1	VL2	VL3	TF1
Menor que 85 cm	5.224	168	386	1.773	4.824
valores válidos (%)	95,82%	3,08%	7,08%	32,52%	88,48%
Menor que 90 cm	5.379	5.298	5.291	5.341	4.910
valores válidos (%)	98,66%	97,18%	97,05%	97,96%	90,06%
Menor que 95 cm	5.407	365	787	2.662	4.906
valores válidos (%)	99,17%	6,69%	14,14%	48,83%	89,99%
Menor que 100 cm	5.437	536	1.077	3.168	4.918
valores válidos (%)	99,72%	9,83%	19,75%	58,11%	90,21%

Fonte: Autor (2022)

Tabela 7 – Valores válidos de sensoriamento em um total de 1.580 leituras. Experimento realizado em 31/12/2021 na Unipampa em uma condição de alta luminosidade (acima de 70 klux). Os valores agrupados apresentam a quantidade leituras válidas para o intervalo de distância entre barra e o solo e o percentual comparado ao total

Distância sensoriada (cm)	Sensores				
	HC1	VL1	VL2	VL3	TF1
Menor que 85 cm	1.546	42	115	517	1.482
valores válidos (%)	97,85%	2,66%	7,28%	32,72%	93,80%
Menor que 90 cm	1.568	66	169	659	1.487
valores válidos (%)	99,24%	4,18%	10,70%	41,71%	94,11%
Menor que 95 cm	1.575	100	247	803	1.487
valores válidos (%)	99,68%	6,33%	15,63%	50,82%	94,11%
Menor que 100 cm	5.437	144	337	942	1.487
valores válidos (%)	99,87%	9,11%	21,33%	59,62%	94,11%

Fonte: Autor (2022)

O excesso de valores inválidos nos sensores VL53L1X reforçou a necessidade de definir estratégias para operar o sensor sob uma área sombreada. Considerando a premissa do presente estudo, de realizar o sensoriamento utilizando sensores de baixo custo, na condição de alta luminosidade, buscou-se informação junto ao fabricante. O mesmo afirmou que, apenas alterando a construção do sensor, adicionando mais SPAD ao mesmo, seria suficiente para lidar com esta condição. Entretanto, esse procedimento acabaria por elevar os custos do sensor. Também foi confirmado pelo fabricante que o sensor recebeu os parâmetros ideais para operar nas condições de iluminação dos experimentos.

Posteriormente, considerando o ambiente externo, foram obtidos resultados satisfatórios na medição experimental numa condição de ausência de luminosidade direta, no horário próximo do crepúsculo. Na condição de funcionamento de 400 lux, o sensor VL53L1X passou a apresentar leituras sem os erros, que eram causados pelo ruído gerado pelo componente de infravermelho ambiente. Entretanto, os valores lidos na área externa (tabelas 6 e 7), com gramíneas, não representaram o ponto mais alto da planta, mas sim uma faixa de altura média, próxima ao ponto de maior densidade de folhas. Essas medidas, em alguns experimentos, se aproximaram das medições feitas com disco medidor. Este comportamento, parece ser uma característica do funcionamento do sensor, descrito no *datasheet* do fabricante, que afirma que o valor de leitura obtido representa a média dos pontos de diferentes distâncias para os sensores de luz na condição

de superfície irregular (PIERAZZOLI, 2021c). Para a finalidade de aplicação do herbicida com a Campo Limpo, a medida no ponto de maior densidade da planta não parece ser um impedimento, pois nessa região se verificava a maior presença de folhas ativas, aptas a ter uma boa absorção e translocação do herbicida na planta.

5.4 Resultados do sensoriamento na Embrapa

O sensoriamento ocorreu em duas condições: a primeira em condição de alta luminosidade, obtendo valores válidos apenas para os sensores ultrassônico e TFmini Plus; a segunda com restrição de luminosidade, o que possibilitou ao sensor VL53L1X operar na melhor condição possível, sem ruído de infravermelho próximo, o que permitiu gerar dados válidos.

Antes de realizar as medições com os instrumentos de medida, o operador da Campo Limpo, com ampla experiência na sua utilização, afirmou, a partir de uma avaliação visual, que a altura ideal para ajustar o equipamento seria em torno de 24 cm. Após esta estimativa empírica, comumente adotada por diferentes usuários do equipamento, foram executadas dez medições aleatórias de altura na Parcela 1 com a régua, bem como o processo de medição exposto na seção 4.2, resultando, respectivamente, na tabela 8 e na tabela 9.

Tabela 8 – Medidas de altura da Parcela 1, realizada pelo operador da Campo Limpo

Medição com a régua	
Ponto	Altura (cm)
1	15
2	14
3	21
4	18
5	20
6	27
7	17
8	18
9	31
10	14
Média:	19,5

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9 – Experimento de sensoriamento das parcelas em 09/02/2022, apresentando a distância média dos sensores HC-SR04 e TFmini Plus, seguido da diferença considerando a instalação com o solo de 76 cm. Por fim a diferença entre os dois sensores

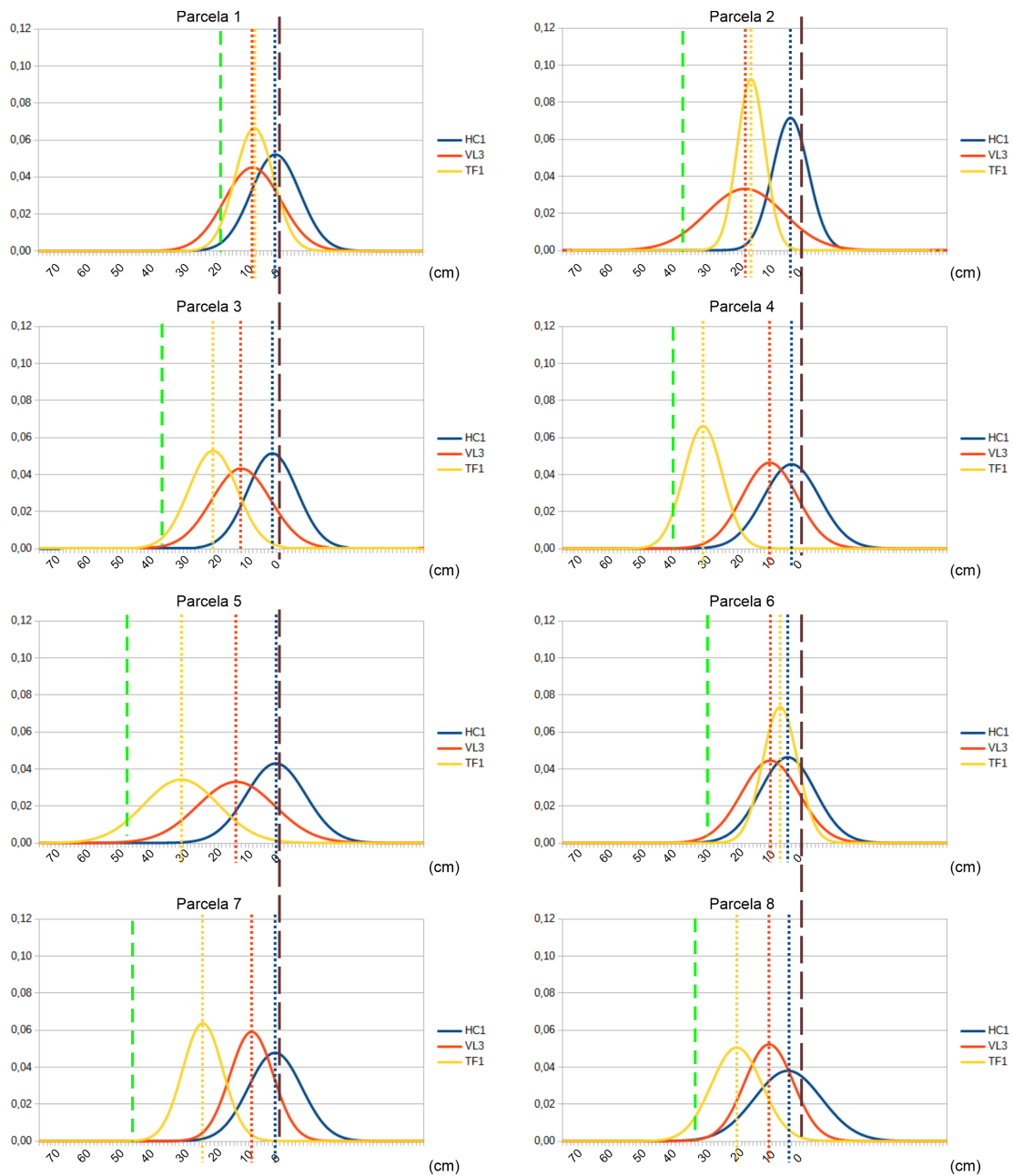
Parcela	Dist.(cm) do sensor na barra até o alvo		Altura do objeto sensoriado (cm)		Diferença entre HC1 e TF1 (cm)
	HC1	TF1	(76 cm) – HC1	(76 cm) – TF1	
1	68,75	60,33	7,25	15,67	8,41
2	69,33	58,09	6,67	17,91	11,24
3	67,55	53,69	8,45	22,31	13,86
4	66,31	56,41	9,69	19,59	9,90
5	68,67	58,07	7,33	17,93	10,60
6	71,74	65,44	4,26	10,56	6,30
7	65,52	56,84	10,48	19,16	8,69
8	71,38	57,12	4,62	18,88	14,26
Média	68,66	58,25	7,34	17,75	10,41

Fonte: Autor (2022)

O sensoriamento das parcelas no período noturno permitiu operar sem o problema da radiação solar. Entretanto, houve um mau funcionamento de dois sensores VL53L1X por vibração, devido à montagem na *protoboard*. Mas, apesar disso, o terceiro sensor (VL3) operou durante todo o experimento.

A figura 54 apresenta os resultados encontrados no log do sensoriamento noturno, com as curvas de distribuição normal da estrada de cascalho, de um local com vegetação baixa e das parcelas. Para o sensoriamento na estrada, indicou uma distância da barra ao solo de 76,52 cm \pm 3,33, sendo seu formato de distribuição de dados atribuído às irregularidades do solo e oscilação da barra. Sequencialmente, observou-se como o conjunto de dados gerado por cada sensor se comportou, devido às particularidades de cada tipo de sensor. Foi possível verificar que o sensor ultrassônico (em azul na figura 54) foi o menos sensível à vegetação, sensoriando valores mais próximos ao solo ou próximo a uma grande densidade da vegetação. Os outros sensores retornaram valores das folhagens de forma diferente. No TFmini Plus (em amarelo na figura 54), a concentração do feixe, devido à abertura de 3,6 graus, fez ele detectar folhas isoladas, que se encontravam mais altas, enquanto o VL53L1X (em laranja na figura 54), com 27 graus, realizou a medição em pontos com um número maior de plantas e/ou visadas do solo.

Figura 54 – Curvas de distribuição normal da altura sensoriada no período noturno, nas parcelas do experimento final, com os três modelos de sensores. A linha marrom representa a altura do solo (76,5 cm) e verde a vegetação



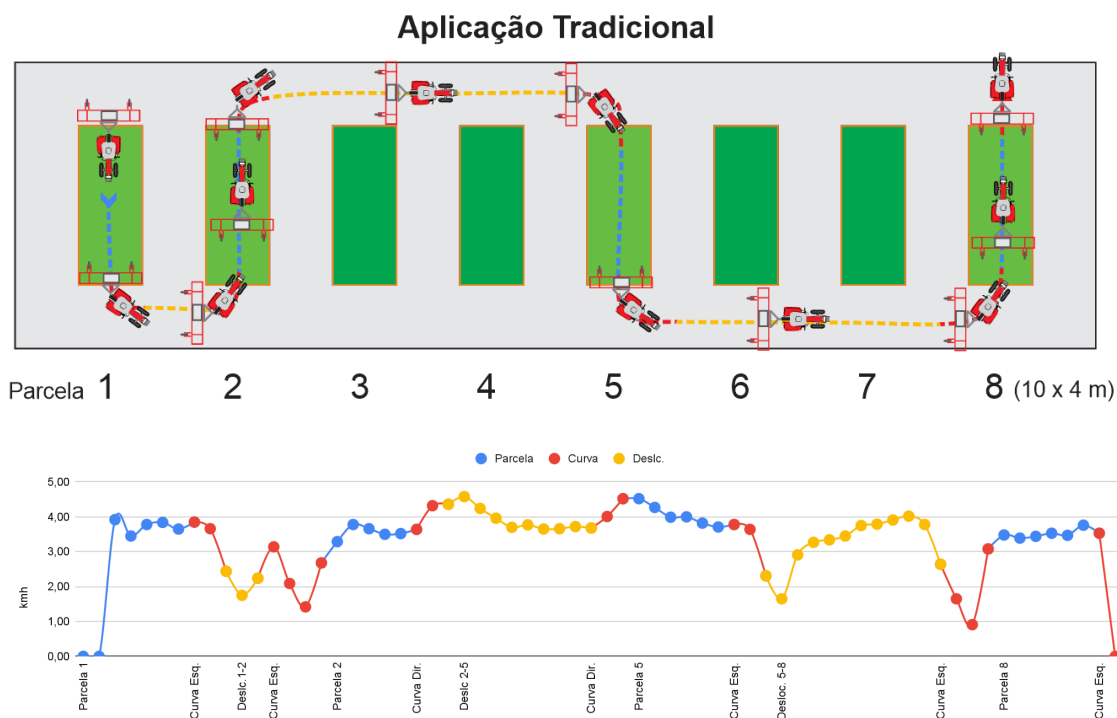
Fonte: Autor (2022)

A média obtida pelo sensor laser foi de 17,75 cm, compatível com a faixa de aplicação ajustada pelo operador, entre 16 e 19,5 cm. A relação entre a medição manual média, de 19,5 cm e a sensoriada para a primeira parcela (15,67 cm), pode ser considerada aceitável, representando um valor 19,64% menor (3,83 cm). Além disso, estaria abaixo do valor real medido, o que não deixaria de proporcionar um contato dos aplicadores de herbicida com as plantas alvo.

5.5 Resultados da aplicação na Embrapa

A operação convencional da Campo Limpo foi iniciada após as cordas estarem saturadas (gotejando) e, ao final de cada aplicação, a calda restante no tanque foi medida pelo operador do trator. A rota obedeceu ao traçado ilustrado na figura 55 com o gráfico que apresenta no eixo vertical a velocidade desenvolvida e no horizontal o tempo. Nas duas imagens da figura 55, azul representa o deslocamento na parcela, vermelho a mudança de direção entre as parcelas e por fim amarelo o deslocamento entre as parcelas.

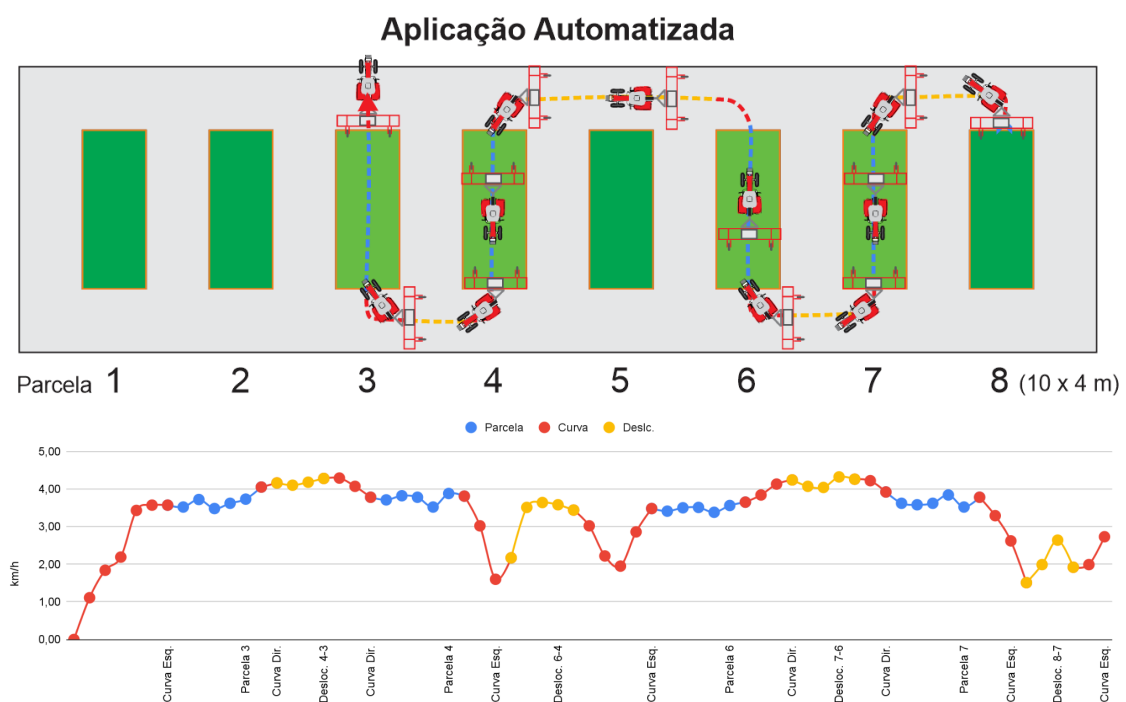
Figura 55 – Rota e velocidade para o procedimento na aplicação convencional, com o log do controlador



Fonte: Autor (2022)

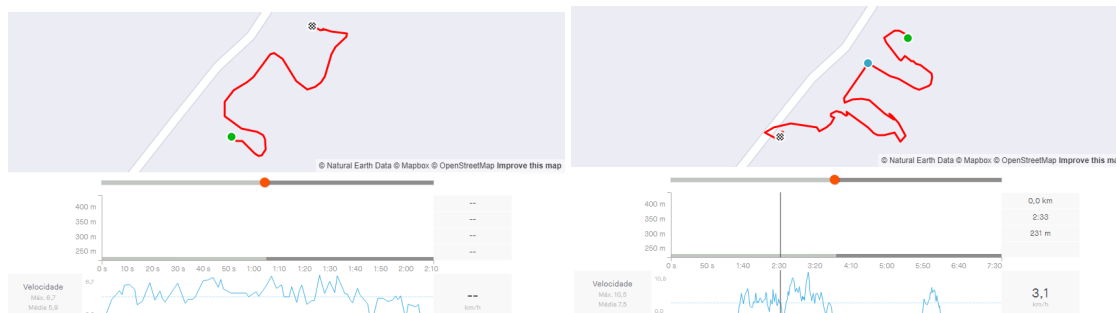
A operação automatizada foi iniciada após a medição do consumo na operação tradicional. O controlador automatizado estava operacional apenas para capturar a telemetria de deslocamento e a rotação da bomba peristáltica, sendo conectado para eletrificar o motor no lugar do controlador original. A rota obedeceu ao traçado ilustrado na figura 56, iniciando da parcela 8 e repetindo as cores da legenda. O eixo horizontal do gráfico foi invertido para facilitar a visualização do sentido de movimento realizado pelo trator.

Figura 56 – Rota e velocidade para o procedimento na aplicação automatizada, com o log do controlador



Fonte: Autor (2022)

Figura 57 – Telemetria de GNSS capturada com o aplicativo para *smartphone* Strava mostrando o trajeto e um gráfico da velocidade. Na esquerda se tem a aplicação com o controlador original e na direita o controlador automatizado. Se observa um deslocamento irregular que não corresponde ao traçado com parcelas em paralelo



Fonte: Autor (2022)

De forma geral, a captura de dados georreferenciados por GNSS permitiu delimitar os locais do experimento no log, subdividindo por parcela, identificando as mudanças de direção, deslocamento entre entrada e saída. Entretanto, poucos pontos foram capturados, devido a curta duração e tamanho do circuito de 120 à 130 m. A existência de irregularidades e a mudança brusca de sentido de 90 graus e 180 graus, podem ter contribuído para a baixa precisão do traçado capturado, apesar do céu limpo, sem nuvens para influenciar no sinal e nenhum obstáculo. A trajetória irregular do GNSS fez a atividade ser relatada com mais distância do que a foi percorrida, já que cada zigue-zague foi contabilizado com uma linha reta que os conecta, como se pode observar na figura 57. Como melhoria neste procedimento poderia ser incluso o uso de um segundo equipamento, alterar a instalação para as extremidades da roçadeira e o uso de um equipamento GPS com maior sensibilidade.

A operação ideal, descrita no manual de utilização da Campo Limpo, recomenda a velocidade de 4 e 7 km/h. Durante o experimento, se esperava que o trator mantivesse um deslocamento com menos oscilação, devido à inércia e curva de torque em baixa rotação, tendo como alvo a média de 5 km/h na marcha terceira reduzida. Entretanto, o sensor mostrou uma variação significativa e médias menores que a projetada. Na primeira aplicação, o aplicativo de GNSS apontou a velocidade máxima de 6,7 km/h e média de 3,2 km/h, enquanto o sistema baseado no sensor de campo Hall mediu 4,58 km/h e média de 3,43 km/h. Na segunda aplicação, o equipamento trafegou uma distância similar à primeira, com velocidades maiores, atingindo a máxima de 10,5 km/h e média de 7,5 km/h pelo GNSS, o comportamento no sensor de campo Hall apontou 4,32 km/h e média de 3,37 km/h como comparados e agrupados na tabela 10, o traçado por GNSS na segunda

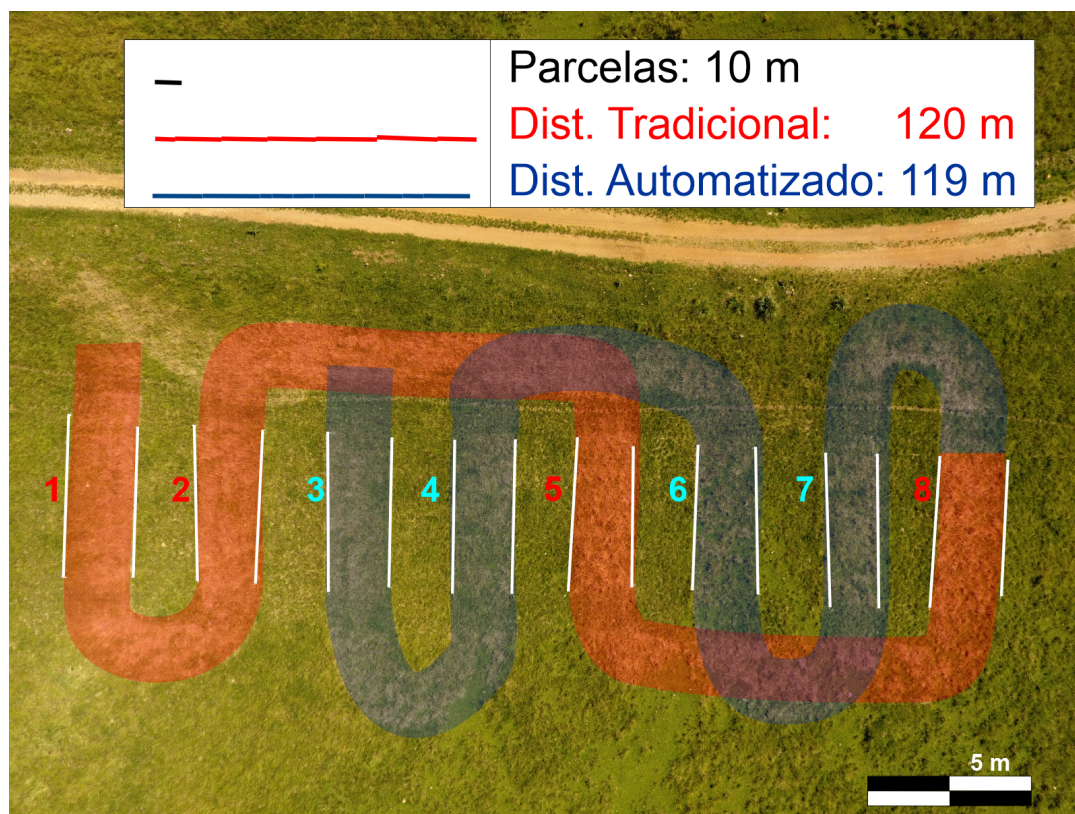
aplicação, visto na figura 57 apresenta mais pontos com imprecisos, comparado ao local dessecado da figura 60 um mês após a aplicação no traçado pode ser visto em destaque na figura 58 onde o deslocamento medido se aproxima do obtido com o sensor de campo Hall.

Tabela 10 – Comparativo entre o modo tradicional e automatizado para deslocamento e uso de defensivo nas duas aplicações. A pré-operação mediu a quantidade de defensivo necessário para preencher o sistema (bomba, tubos, filtro, mangueiras) e encharcar as cordas de forma homogênea

Ação	Local	Contr.	Consumo (Litros)	Sensor	Desloc. (m)	V. Média (km/h)	V. Máx (km/h)
Pré-operação			6,7		0	0	0
Aplicação	1	Orig.	1,4	GNSS	130,00	3,60	6,70
				Hall	120,43	3,43	4,58
				Fotografia	120		
Aplicação	2	Auto.	0,9	GNSS	160,00	4,20	10,50
				Hall	123,55	3,37	4,35
				Fotografia	119		

Fonte: Autor (2022)

Figura 58 – Medição do traçado realizado pela Campo Limpo, um mês após aplicar o desseccante. Em vermelho o deslocamento utilizando o controlador tradicional e em azul o automatizado. As linhas brancas foram construídas a partir da visualização dos postes de demarcação das parcelas (4x10 metros), entretanto, o pastejo e as atividades podem levar a remoção sem garantia da recolocação no ponto inicial



Fonte: Autor (2022)

O equipamento foi calibrado e testado previamente, simulando as velocidades operacionais para diferentes dosagens e infestações. Entretanto, a análise da distância percorrida e volume medido indicaram que o sistema aplicou uma quantidade de defensivo diferente do esperado, aferido pela medição do consumo do tanque. O Cálculo da quantidade de produto aplicado por área nas duas situações, considerando as falhas, utiliza a equação 13, onde Q = taxa de aplicação (L/ha), C = consumo (litros) e A = área em hectares. A aplicação convencional consumiu próximo do ideal, enquanto o modo automático, menos calda herbicida foi aplicada, caso estivesse operando em velocidade contínua em linha reta. Considerando 120 metros indicados pelo sensor de campo Hall, na taxa de 30 litros por hectare, deveriam ser aplicados 1.400 mL. Ao aplicar 900 mL, foi utilizado 19,16 L/ha de calda e proporcionalmente 2,55 L/ha de herbicida, indicado para uma infestação média, e não alta como definido para as parcelas experimentais (a dosagem recomendada por infestação é vista nas tabelas 3 e 4).

$$Q = C/A \quad (13)$$

Para a aplicação com o controlador original:

$$C = 1,4L$$

$$A = 3,8 * 120,43 = 457,63m^2 = 0,045763 \text{ ha}$$

$$Q = 1,4/0,045763 = 30,59 \text{ L/ha}$$

Glifosato por hectare com o controlador original:

$$30L/ha = 4L \text{ Glifosato } 480g/L$$

$$30,59 \text{ L/ha} = X$$

$$X = 4,078 \text{ L/ha}$$

Para a aplicação com o controlador automatizado:

$$C = 0,9L$$

$$A = 3,8 * 123,55 = 469,49 \text{ m}^2 = 0,046949 \text{ ha}$$

$$Q = 0,9/0,046949 = 19,16 \text{ L/ha}$$

Glifosato por hectare com o controlador automatizado:

$$30L/ha = 4L \text{ Glifosato } 480g/L$$

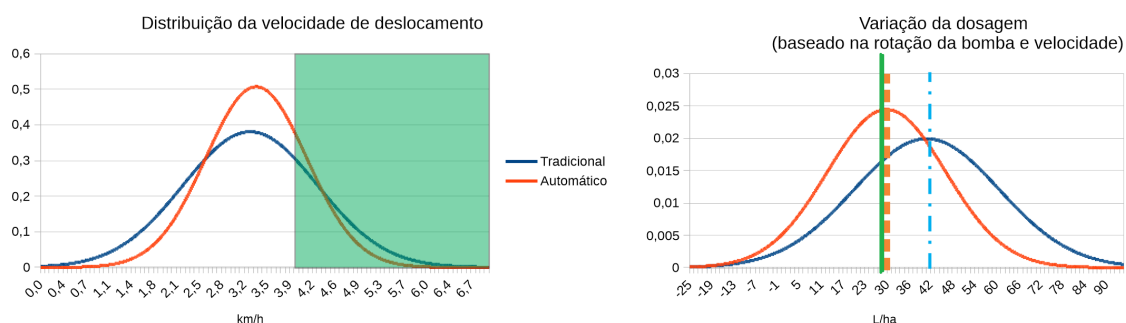
$$19,16L/ha = X$$

$$X = 2,55 \text{ L/ha}$$

Para uma primeira execução prática experimental, já era esperado que o sistema apresentasse um nível de imprecisão, devido ao desconhecimento do comportamento da

operação do tratorista com o equipamento, além do curto tempo de experimento, que durou dois minutos. A figura 59 utilizou os dados do *log* e ilustra a relação entre as velocidades de operação, em que o controlador automatizado foi mais constante e a dosagem média foi em tese a idealizada.

Figura 59 – Gráficos de variância de velocidade (km/h) e dosagem (L/ha) do experimento final gerado a partir do *log*. O manual da Campo Limpo recomenda operar entre 4 e 7 km/h (faixa verde) e foi definido aplicar 30 L/ha (linha verde).



Fonte: Autor (2022)

Durante a análise dos dados de *logs*, telemetrias e medição do consumo de defensivo, dois problemas que poderiam alterar os resultados foram identificados. O primeiro, devido à calibração com o trator desligado, o que elevou a rotação do sistema tradicional conforme registrado pelo *log* quando em operação. O segundo, relacionado à mangueira da bomba peristáltica, que perdeu capacidade de vazão. Entretanto, não foi possível identificar o momento exato deste defeito, nem se estes defeitos são passíveis de se repetirem em qualquer equipamento. A partir da identificação desses problemas, foram realizados os reparos da bomba peristáltica e novos experimentos, para entender como ela e a variação do sistema elétrico nos controladores impactaram a operação. O passo seguinte foi simular o comportamento de deslocamento com os dados de telemetria real para a calibração da dosagem, entretanto, não foi executada uma nova aplicação em campo.

5.6 Avaliação do efeito da aplicação

Baseando-se nos métodos descritos na seção 4.3.1, com as devidas adaptações, no dia 29 de março foi realizada a primeira avaliação do efeito da aplicação. As condições climáticas entre a aplicação e a avaliação proporcionaram um volume acumulado de chuvas no período de 25,4 mm, totalizando a quantidade de 91 mm para o mês, com média

móvel de 114 mm. A temperatura média foi de 19,62 °C com uma radiação solar por dia de 23.243 KJ/m². A energia solar decresceu 0,7 kWh, de 5,7 para 5 kWh, conforme a estação BAGE A827, com dados obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia.

As condições ambientais verificadas, favoreceram o crescimento e desenvolvimento da vegetação, permitindo uma resposta mais rápida e eficiente, aumentando a sua absorção e distribuição no interior da planta. Entretanto, o manejo por meio da aplicação seletiva foi dificultado pelo estado de alto desenvolvimento das plantas devido à maior quantidade de reservas de amido presentes no sistema radicular, onde cada planta em um diferente estado de desenvolvimento pode ter apresentado níveis diferentes de absorção (BASTIANI *et al.*, 2018).

Figura 60 – Parcelas e traçado um mês após aplicar o dessecante



Fonte: Autor (2022)

Apesar de próximas, como visto na figura 60, as parcelas apresentaram características diferentes de inclinação horizontal, vertical, densidade de infestação, altura e distribuição das plantas entre o início e o fim figura 61. A topografia interferiu na capacidade de distribuição do defensivo quando o equipamento operou com um desnível lateral, gerando uma aplicação desuniforme, vista na figura 62. Nessa imagem, nota-se que o lado direito apresentou uma tonalidade esverdeada de vegetação ativa e a da esquerda

amarelada, com uma maior porção dessecada.

Figura 61 – Declividade do terreno vista da parcela 7



Fonte: Autor (2022)

Figura 62 – Parcela 1, com inclinação lateral e degradê, onde menos calda foi aplicada na área à direita



Fonte: Autor (2022)

A avaliação apresentou diversas dificuldades, devido à variabilidade e determinação de parâmetros para a avaliação do percentual de plantas mortas que é, em parte, subjetiva. No quadro de avaliação de campo, foi observada a quantidade e a parte de plantas dessecadas, supondo o ponto onde ocorre o toque das cordas, conforme o ajuste realizado na Campo Limpo. A contagem das touceiras pode não representar a densidade da infestação, já que um quadrado com 20 plantas e 2 cm de diâmetro e outro que tem

um conjunto de 4 com 10 cm. O ajuste da altura do aplicador, determinado pelo operador do trator, foi considerado ideal, dado o contato com a maioria das touceiras, sem causar o dobramento da planta, nem o efeito guarda-chuva. Apesar da altura das cordas dos aplicadores, posicionadas entre 16 e 19,5 cm, variar quando a roda se move sobre uma depressão ou uma elevação, como uma touceira mais densa, a aplicação copiou bem o terreno nas duas aplicações. A média da avaliação dos quadros foi utilizada para construir a tabela 11.

Tabela 11 – Primeira avaliação de eficiência de aplicação da máquina Campo Limpo, 12 dias após a aplicação, com a média dos três quadros

Controlador	Parcela	Altura (cm)	Nº de touceiras	% morta
Original	1	35	18	53
Original	2	41	18	67
Automático	3	42	19	32
Automático	4	36	14	35
Original	5	46	13	67
Automático	6	41	4	40
Automático	7	48	16	52
Original	8	41	10	80

Fonte: Autor (2022)

Foi visível a diferença das plantas dessecadas entre os dois tipos de aplicação, devido a diferença da quantidade calda aplicada, sendo que a quantidade no modo tradicional foi maior que a do automático. A distribuição ao longo das parcelas ocorreu de forma homogênea na extensão e entre as cordas, exceto nas parcelas 1 e 3 devido à inclinação do terreno, que fez o ponto mais baixo receber mais defensivo, gerando um degradê na coloração da vegetação. Não foram observados pontos de gotejamento por excesso de calda nas cordas e o desenvolvimento das plantas que estavam abaixo da linha do aplicador foi favorecido pelas condições climáticas.

O experimento apresentou características da vegetação uniformes nas parcelas tratadas, conforme a tabela 11. Os locais das parcelas de aplicação convencional apresentaram uma altura média de 40,83 cm \pm 6,39 e na aplicação automatizada 41,83 cm \pm 10,46. O número de touceiras foi de 15 \pm 6,58 e 13,5 \pm 6,76 por fim, o percentual de matéria morta resultante foi de 66,67% \pm 16,56 para o modo convencional enquanto no modo automático 39,58% \pm 17,90, uma diferença resultante que pode se explicada devido ao uso de 25% \pm 3 menos defensivo pelo automatizado. Ao aplicar menos defensivo, onde foi indicado o uso de 4 litros por hectare, a dose de 2,56 litros

por hectare para infestação alta, conforme o manual indica na tabela 4 que pode não ser o ideal.

A segunda avaliação da vegetação, foi realizada no dia 14 de março e classificou outros pontos sorteados, utilizando a mesma metodologia, apresentados na tabela 12. Os locais das parcelas de aplicação convencional, apresentaram uma altura média de 45,81 cm \pm 5,37 e para automatizado 51,19 cm \pm 7,16. O número de touceiras foi de 15,92 \pm 5,70 e 19,25 \pm 5,66 por fim, o percentual de matéria morta resultante foi de 78,33% \pm 15,13 para o modo tradicional e para o automático 47,50% \pm 17,52, uma diferença de 31% na matéria morta, devendo ser considerado o uso de 25% \pm 3 menos defensivo pelo automatizado. Em comparação com a primeira avaliação, se observou um aumento na vegetação morta em 11,97% para a aplicação tradicional e 7,97% para a automatizada.

Tabela 12 – Segunda avaliação de eficiência de aplicação da máquina Campo Limpo, 28 dias após a aplicação, com a média dos três quadros

Controlador	Parcela	Altura (cm)	Nº de touceiras	% morta
Original	1	44	16	85
Original	2	43	20	63
Automático	3	52	22	35
Automático	4	48	18	48
Original	5	50	14	80
Automático	6	45	13	47
Automático	7	59	24	60
Original	8	47	13	85

Fonte: Autor (2022)

Utilizando os dados de percentual de morte da *Eragrostis Plana* Nees, foram analisados os efeitos dos tratamentos com os diferentes aplicadores por meio de Análise de Variância (ANOVA) para a análise dos efeitos dos tratamentos vistos nas tabelas 13 e 14. A ANOVA indicou um efeito significativo dos tratamentos e essa diferença aumentou no intervalo de avaliação. A figura 63 apresenta o percentual das plantas mortas, usando a observação de pontos sorteados. O resultado correspondeu à condição, onde a sobredosagem do comando do controlador original pode ter compensado a falha da bomba peristáltica, enquanto o resultado do aplicador automatizado foi penalizado pela dosagem menor. A medição vista na figura 64 permitiu comparar a distribuição das alturas medidas nas parcelas agrupadas e individual 14 e 28 dias após a aplicação.

Tabela 13 – Análise de Variância (ANOVA) para o percentual de plantas mortas 14 DAA, comparando os tratamentos com o aplicador original e o automatizado

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr>F
Aplicador	1	4401	4401	14,81	0,000874 ***
Resíduos	22	6540	297		

Signif.: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Fonte: Autor (2022)

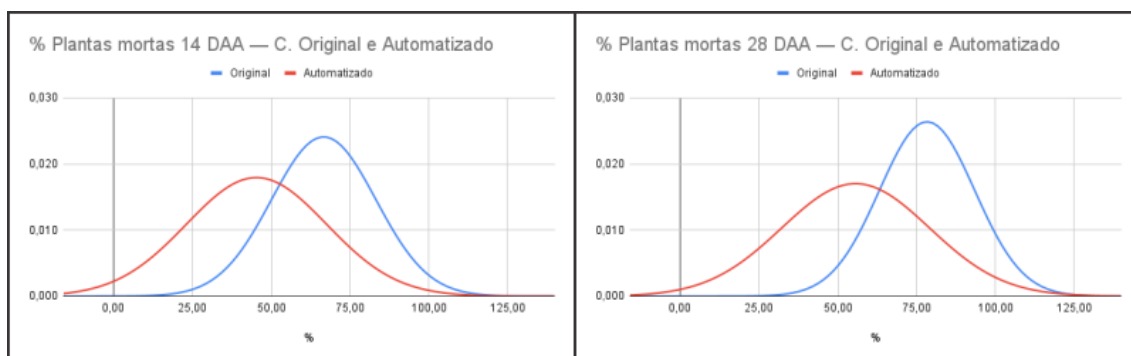
Tabela 14 – Análise de Variância (ANOVA) para o percentual de plantas mortas 28 DAA, comparando os tratamentos com o aplicador original e o automatizado

Fontes de Variação	GL	SQ	QM	F	Pr>F
Aplicador	1	5704	5704	21,3	0,000134 ***
Resíduos	22	5892	268		

Signif.: 0 '****' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

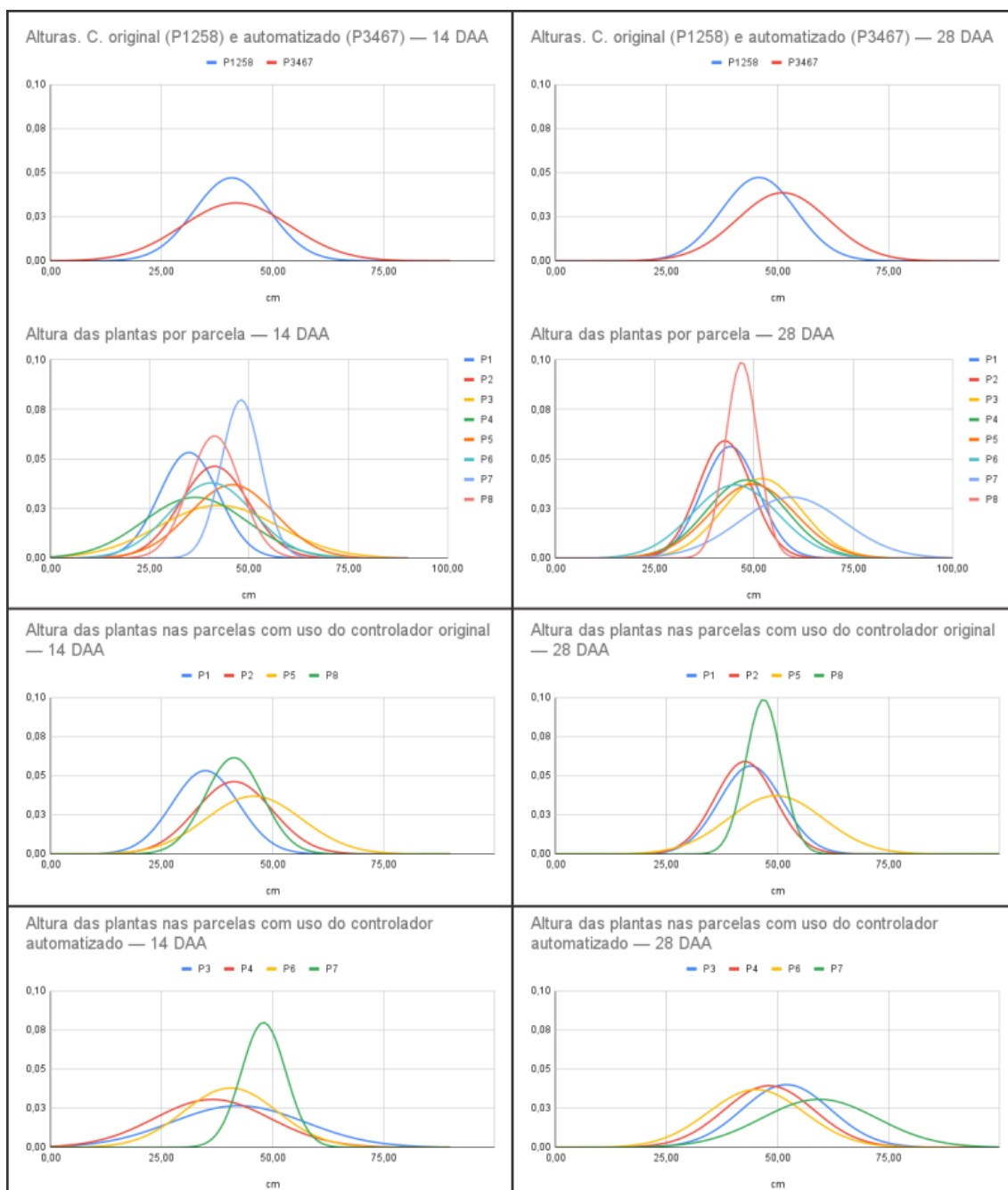
Fonte: Autor (2022)

Figura 63 – Percentual de plantas mortas 14 e 28 DAA por tipo de controlador



Fonte: Autor (2022)

Figura 64 – Distribuição da altura (cm) por conjunto por parcela. À direita, os gráficos apresentam o resultado 14 DAA e à esquerda 28 DAA



Fonte: Autor (2022)

5.7 Resultados dos experimentos de reparo e alimentação elétrica

Alguns comportamentos não documentados pelo manual podem ocorrer como, por exemplo, medir a vazão com o motor desligado ao realizar a calibração da Campo Limpo. O envelhecimento do equipamento, fabricado em 2013, permitiu experimentar as mesmas condições observadas pelos usuários, em questão de falhas e necessidade de manutenção, como a bomba peristáltica, que operava normalmente durante os testes.

5.7.1 Experimento de influência do sistema elétrico do trator

Segundo Bosch Ltda (2019), o alternador é o componente responsável por suprir a demanda de energia do sistema elétrico, acionado pelo motor do veículo, para transformar energia mecânica em elétrica, que carrega a bateria e os demais equipamentos elétricos. Uma parte deste sistema é o regulador de 14 V, cuja especificação original da tensão de regulagem deve ser de $14,5 \text{ V} \pm 0,3$, com uma tensão em função da corrente e temperatura linear, podendo não ocorrer em reguladores paralelos com um projeto simplificado, o que causaria instabilidade no sistema, reduzindo a vida útil da bateria. Já a tensão nominal da bateria, 12 V, apresenta um estado de transição após interromper o carregamento. Assim, espera-se uma variação entre 9 e 20% na tensão, além da capacidade de manter a corrente. Como a rotação da bomba peristáltica é responsiva à variação da tensão do sistema elétrico, foi investigado como o motor do trator desligado e ligado em diferentes rotações impactou no volume aplicado pela roçadeira.

O trator utilizado neste experimento foi um Agrale 5075.4, com bateria de 12 V – 100 Ah e alternador de 14 V – 90 A, similar a capacidade de geração de energia do trator Yanmar Agritech modelo 1145-4, com o alternador de 1,4kW usado para os experimentos no campo. Apesar da bateria de 12 V – 40 Ah ser menor, o impacto do consumo inferior à 3 A permite operar por horas com uma queda de tensão lenta. Para avaliar a oscilação do sistema elétrico na vazão, foi monitorada a tensão entregue pelo trator em diferentes rotações, com o multímetro DT-9205A que, segundo seu manual, atualiza os dados entre 2 e 3 segundos, com erro de $0,5\% \pm 1$ para a faixa lida e sua impedância interna é de 10 M Ω . A tabela 15 mostra que, em qualquer faixa de rotações por minuto (RPM) do motor a diesel, a geração foi estabilizada refletindo na constância de rotação da bomba peristáltica.

Tabela 15 – Relação entre a tensão do sistema elétrico em diferentes estados para o trator Agrale 5075.4 (bateria de 100 Ah e alternador de 90 A)

Motor ligado	Sistema elétrico (V)	RPM do motor
Não	12,99	0
Sim	14,18	1.300
Sim	14,18	1.500
Sim	14,18	1.700
Sim	14,19	2.000

Fonte: Autor (2022)

A tabela 16 detalhou o comportamento da bomba quando se definiu os diferentes tempos de ciclo do PWM com o trator desligado, onde o valor de entrada foi de 12,99 V e a saída máxima 11,95 V. Mesmo com o ciclo de trabalho no máximo, existiu uma queda de 1,09 V, causada pelo diodo de proteção contra inversão da polaridade responsável por 0,7 V e dos outros componentes somados. Também se observou que o PWM entre as faixas de 80 a 100 foi estável, onde a tensão e a rotação se igualaram, devido o capacitor de saída de 2.200 μ F por 25 V, usado para transformar a onda quadrada em um sinal linear, reduzindo o *ripple*.

Tabela 16 – Resposta da rotação da bomba com o trator desligado (12,99 V @ 0 RPM) e a tensão de saída do controlador para cada faixa de ajuste

Posição do Potenciômetro	Tensão med. (V)	RPM mín.	RPM máx.	RPM méd.
10	0,74	3,3	3,3	3,3
20	2,90	17,5	19,2	18,3
30	4,91	31,8	33,0	32,4
40	6,80	43,0	46,0	44,5
50	8,20	54,0	57,5	55,7
60	9,60	63,6	67,3	65,5
70	11,12	74,5	78,7	76,6
80	11,90	79,9	84,6	82,3
90	11,95	80,0	93,6	86,8
100	11,90	79,7	79,7	79,7

Fonte: Autor (2022)

O procedimento de medição foi repetido com o motor ligado, operando em 1.500 RPM gerando 14,18 V e nessa condição, conforme a tabela 17, notou-se a variação da rotação da bomba consoante a alteração da tensão de saída, bem com o aumento do valor de saída máximo do controlador em 13,24 V e estabilidade da tensão para valores

com o PWM acima de 80%.

Tabela 17 – Resposta da rotação da bomba com o trator ligado (14,18 V @ 1500 RPM) e a tensão de saída do controlador para cada faixa de ajuste

Posição do Potenciômetro	Tensão med. (V)	RPM mín.	RPM máx.	RPM méd.
10	0,97	3,7	4,0	3,9
20	3,30	20,7	22,0	21,4
30	5,60	37,3	37,3	37,3
40	7,50	43,0	51,6	47,3
50	9,30	62,9	63,2	63,0
60	10,76	71,7	73,7	72,7
70	12,27	83,3	85,6	84,5
80	13,22	92,4	93,6	93,0
90	13,21	92,8	93,8	93,3
100	13,24	92,9	94,1	93,5

Fonte: Autor (2022)

A relação entre a tensão e a rotação final esteve ligada às características da curva de potência do motor, conforme a carga para realizar o trabalho. A tabela 18 apresenta a comparação de duas peças ao aumentar a tensão em 9,16% passando de 12,99 V para 14,18 V. Ao ligar o trator, o sistema teve um acréscimo médio de 12,87% nas rotações e de 13,81% de tensão na saída do controlador original, observando-se também uma maior variação proporcional nas rotações mais baixas.

Tabela 18 – Resposta da bomba para o motor do trator desligado e ligado

Posição Pot.	RPM Desligado	RPM Ligado	% de diferença na rotação	Tensão (V) Ligado	Tensão (V) Desligado	% diferença na tensão
10	3,3	3,9	18,46%	0,97	0,74	31,08%
20	18,3	21,4	16,51%	3,30	2,90	13,79%
30	32,4	37,3	15,12%	5,60	4,91	14,17%
40	44,5	47,3	6,29%	7,50	6,80	10,29%
50	55,7	63,0	13,11%	9,30	8,20	13,41%
60	65,5	72,7	11,07%	10,76	9,60	12,08%
70	76,6	84,5	10,26%	12,27	11,12	10,34%
80	82,3	93,0	13,04%	13,22	11,90	11,09%
90	86,8	93,3	7,48%	13,21	11,95	10,54%
100	79,7	93,5	17,31%	13,24	11,90	11,26%

Fonte: Autor (2022)

A tensão de alimentação no decalque do controlador original foi de 14 V. Entretanto, a restrição foi verificada no componente eletrônico que recebeu alimentação e operou com a tensão mais baixa, o que foi identificado como o capacitor de entrada, de 2.200 μF por 25 V, seguido do circuito eletrônico regulador de tensão L7805, que converteu até 35 V para os 5 V do microcontrolador ATmega328P e demais componentes, que receberam uma tensão estabilizada a partir deste ponto. Outro componente que recebeu a alimentação direta foi o Mosfet IRF1404, operando com 40 V entre o *drive* e *source*. Assim, a alteração dos capacitores de entrada para um valor maior por margem de segurança e do motor da bomba peristáltica permite o sistema operar em tratores de 24 volts. A oscilação no controlador tradicional pode ser corrigida se o sistema tradicional de vazão monitorar a tensão de saída, para ajustar continuamente o PWM.

Por fim, este experimento permitiu avaliar e confirmar que existiu impacto ao calibrar o sistema com o trator desligado e ligado, quantificando a alteração da dosagem. Também se concluiu que o sistema original é sensível à alimentação elétrica, enquanto o automatizado conseguiu realizar a compensação. Partindo deste princípio, é importante que o operador esteja atento a outras causas de instabilidade na alimentação, como problemas com alternador, retificador, aterramento ou bateria e um aumento excessivo de cargas no sistema elétrico.

5.8 Comparativo entre o volume de aplicação da bomba peristáltica utilizando a mangueira original, desgastada ou nova

A perda da capacidade de vedação da mangueira impossibilitou simular os experimentos nas mesmas condições capturadas pela telemetria dos dados de campo. Mesmo com a bomba parada e com os roletes em diferentes posições, passou a ocorrer vazamento, sendo necessário substituir a peça. Na figura 65 é possível ver a bomba removida e o local de contato do rolete colapsado e deformado, após desconectar uma das pontas.

A figura 66 mostra a mangueira antiga ao lado da nova onde, apesar de terem a mesma medida de diâmetro interno e externo, ocorreu um dano estrutural, ilustrado na figura 67, causado pelo uso. O procedimento de redução do comprimento pelo corte da mangueira, foi repetido por três vezes até que a pressão do rolete sobre as paredes conseguisse vedar a passagem de líquidos.

Figura 65 – Posição da mangueira (deformada) na bomba e o local de pressão pelo rolete. O sistema foi montado na terceira regulagem (furo interior)



Fonte: Autor (2022)

Figura 66 – Mangueira com o comprimento reduzido em comparação com a mangueira original



Fonte: Autor (2022)

Figura 67 – Dano interno na mangueira original abaixo da marca do rolete. É observável devido a transparência da mangueira e destacado pelas setas



Fonte: Autor (2022)

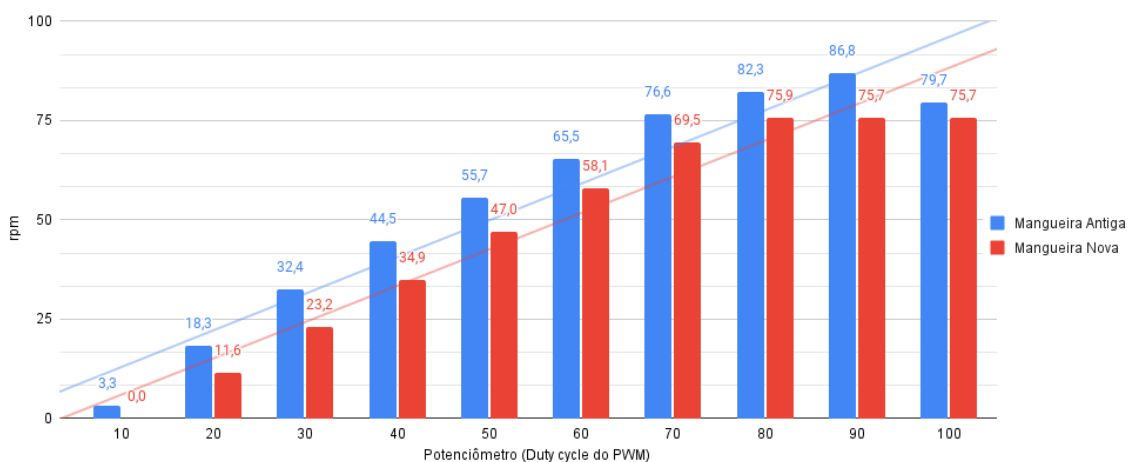
A mangueira nova mostrou-se mais elástica. Entretanto, exigiu mais torque para mover os roletes, o que foi observado com o sensor de rotação e ao movimentar a bomba manualmente, para ajustar a posição dos magnetos em comparação à manipulação com a mangueira original. Após todo o conjunto instalado, o experimento delineado para medir a rotação por nível de PWM foi repetido nesta nova configuração, e a diferença apresentada na tabela 19 mostrou que a condição para iniciar o movimento foi alterada, sendo o sistema inerte na posição e nos demais ajustes apresentando uma queda média de 16,54% na rotação. A figura 68 apresenta o comportamento da mangueira antiga e da nova com relação à potência aplicada e o bombeamento. Percebe-se uma variação próxima de linear quando nova, até o ciclo de trabalho de 75%, e uma variação de 15 a 28%, para as rotações mais comuns de operação, quando a alimentação foi de 12,99 V.

Tabela 19 – Comparativo da substituição das mangueiras (impacto do desgaste e tensão)

Pot.	Mangueira desgastada (RPM médio)	Mangueira nova (RPM médio)	Diferença de rotação entre as mangueiras (%)
10	3,3	0,0	
20	18,3	11,6	-36,70%
30	32,4	23,2	-28,55%
40	44,5	34,9	-21,69%
50	55,7	47,0	-15,66%
60	65,5	58,1	-11,23%
70	76,6	69,5	-9,33%
80	82,3	75,9	-7,80%
90	86,8	75,7	-12,85%
100	79,7	75,7	-5,08%

Fonte: Autor (2022)

Figura 68 – Comparativo do comportamento das mangueiras por RPM. É necessário o ajuste acima de 10% para sair da inércia e se observa uma estabilidade nas rotações ao atingir o ajuste de 80% para a mangueira nova



Fonte: Autor (2022)

5.8.1 Dose por rotação da bomba

A dosagem por RPM da bomba peristáltica é uma constante para o funcionamento do sistema automatizado, sendo necessário verificar o resultado da instalação da nova mangueira, procedendo a recalibração em várias rotações. Para este procedimento foi utilizado o copo graduado com escala de 20 mL em três repetições de 30 segundos quando a rotação alvo estabilizou. As medições com a mangueira original apresentava um volume de 22 mL por rotação e na tabela 20 foi verificado que existiu um aumento na dosagem e uma curva diferente.

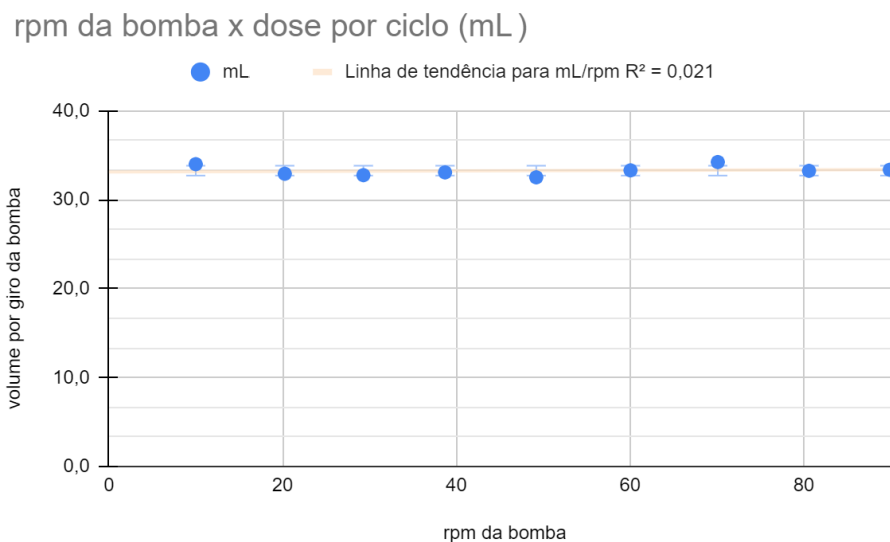
Tabela 20 – Dose por rotação para a nova mangueira

RPM alvo	RPM médio	Vazão média (mL)	Dosagem (mL por rotação)
10	10,0	170	34,0
20	20,2	333	32,9
30	29,3	480	32,8
40	38,7	640	33,1
50	49,2	800	32,5
60	60,0	1.000	33,3
70	70,1	1.200	34,2
80	80,6	1.340	33,3
90	89,9	1.500	33,4

Fonte: Autor (2022)

A média geral da dose foi de 33,27 mL por rotação, com o desvio padrão de 0,554, quadrático de 2,456 e a variância de 0,307. Assim, evidenciou-se o valor de 33,27 mL \pm 0,554 por cada rotação, para a mangueira recém-instalada, em processo de acomodação e, apesar de a rotação ter reduzido, houve um acréscimo de vazão e uma variação menor. A figura 69 permite ver que existiu uma estabilidade da vazão conforme a rotação, sofrendo variação de 1,67%.

Figura 69 – Estabilidade de dosagem por rotação para a mangueira nova



Fonte: Autor (2022)

A vazão máxima de dois litros por minuto, informada no manual é válida para a mangueira original, já a mangueira recém-instalada, também fornecida pela fábrica, alcançou três litros. Devido ao ocorrido, considera-se necessário avaliar o desgaste por horas de uso e, também, pelo tempo de instalação, uma vez que, mesmo em repouso, pode ocorrer uma degradação pela tração da mangueira sobre o rolete, bem como o envelhecimento do material. Os procedimentos básicos de recomendações de manutenção e inspeção são detalhados no manual para verificação estrutural da máquina, entretanto, seria importante incluir os dados sobre a durabilidade dos componentes, alertas para a manutenção preventiva e preditiva, detalhamento dos pontos de lubrificação das partes móveis e perguntas feitas frequentemente.

5.9 Experimento com uso dos dados de telemetria de deslocamento no campo nativo

O experimento comparativo dos dois controladores gerou dados de telemetria reais do comportamento do trator. Esperava-se que a falta destes dados preliminares criasse algum nível de inconsistência na quantidade aplicada. Assim, o experimento foi simulado de forma controlada, para entender e responder diversas questões. Para isso, foram inseridos os dados de telemetria de velocidade, na forma de vetores, no microcontrolador, de forma que, a alteração no código não impactasse na execução. Também foi experimentado a influência do motor do trator ligado ou desligado. A figura 70 mostra o local de experimento, com o trator acoplado e a inserção dos novos parâmetros de comportamento da bomba, simulações e correções, já a tabela 21 apresenta os parâmetros simplificados de distância e a dosagem dispersada para a área coberta.

Figura 70 – Local dos experimentos de reparo e simulação com os dados de velocidade variável para calibração da vazão adequada



Fonte: Autor (2022)

Tabela 21 – Estimativa de calda por simulação na taxa de 30 L/ha

Simulação	Distância (m)	Dose (L/ha)	Volume total (mL)
01	120,14	30	1.370
02	123,56	30	1.409

Fonte: Autor (2022)

O uso do controlador automatizado, permitiu que o volume se mantivesse próximo em todas as repetições, com o trator ligado ou desligado, após o ajuste para o volume da nova mangueira, 33 mL por rotação, mantendo o fator de calibração de dosagem em

1,76 e 30 L/ha. O Becker utilizado para calibrar os bicos pulverizadores nas medições, graduado a cada 20 mL, foi empregado para construir a tabela 22. Assim, pode-se notar a similaridade dos resultados quando a tensão de alimentação foi alterada (trator ligado e desligado), mostrando a capacidade do sistema em ajustar o pulso PWM, fazendo a compensação para a faixa de rotação almejada.

Tabela 22 – Volume aplicado em simulação dos trajetos 01 e 02, utilizando a nova mangueira, com e sem o trator ligado antes da calibração

Simulação	Trator ligado Volume (mL)	Trator desligado Volume (mL)
01	1.060	1.060
01	1.060	1.060
01	1.080	1.060
02	1.160	1.140
02	1.160	1.160
02	1.140	1.140

Fonte: Autor (2022)

A simulação 01 visava o valor de 1,370 litros. Com seis repetições, foi obtida uma média de 1,063, representando um volume 22,4% menor que o projetado. O mesmo se repetiu para a simulação 02, que almejou 1,409 litros, obtendo 1,150 litros, sendo 18,38% inferior. Assim, considerando os erros, como o funcionamento da bomba que entregou porções de $\pm 11,09$ mL por fração de rotação e a precisão da medição com o copo calibrador de pulverizadores graduado em 20 mL, a variável de calibração foi ajustada de 1,76, em passos de 0,2, com repetições, conforme apresentado na tabela 23 onde o valor teste de 2,16 alcançou a dosagem com a diferença de -0,64% e -3,65% para o volume desejado. Com base nos valores testados, o ajuste fino em 2,21 alcançou 1,360 e 1,425 litros, representando um erro de -0,72 e 1,14% para o valor desejado.

Após a análise e compreensão dos resultados, em suma, os experimentos atenderam as necessidades de testar as duas soluções propostas, mas devem ser criados testes com tempo de operação e área maiores. A solução de sensoriamento é desejável com o uso de múltiplos sensores, como foram observadas vantagens para o uso de cada sensor, mas não deve necessariamente utilizar quantidades iguais de sensores que devem ser selecionados conforme a abertura, custo, segurança, altura de instalação e sobreposição de sinais. Pelo custo, o VL53L1X e o HC-SR04 poderia ser utilizados de forma sobreposta cobrindo todo o comprimento da linha sensoriada e o TFmini Plus

Tabela 23 – Calibração do controlador automático por meio de simulações. Uso do trator com motor desligado e simulações de 120 e 123 metros, aplicando 30 litros por hectare

Simulação	Volume (mL)	Variável de Calibração
01	1.063	1,76
01	1.220	1,96
01	1.320	2,16
01	1.480	2,36
02	1.150	1,76
02	1.260	1,96
02	1.400	2,16
02	1.500	2,36

Fonte: Autor (2022)

em intervalos regulares. A solução para controlar a vazão por deslocamento pode ser considerada satisfatória após a calibração com as simulações. Os fatores não previstos de falha física e procedimento, que alteraram a aplicação prática, foram compreendidos e representam mais uma contribuição, além de indicar um protocolo de autoteste que pode ser a simulação de dois minutos e outra de aferição rápida, baseada em um certo número de rotações.

6 CONCLUSÃO

Os estudos e experimentos exploratórios demonstraram a viabilidade do uso dos sensores escolhidos para atender os objetivos deste trabalho, utilizando sensores de baixo e médio custo, explorando o limite de sua utilização, para identificar até que ponto são viáveis e, em quais condições oferecem dados confiáveis. Para sensoriar a altura da pastagem, dentre as dezenas de opções de sensores listadas na tabela de especificações e custos de Pierazzoli e Domingues (2021a), escolheu-se, para medir a altura das plantas, o sensor ToF VL53L1X, que apresentou um sistema completo computacionalmente. Mesmo explorando-se as diversas opções de calibração, verificou-se a necessidade de limitar a influência de fatores externos do ambiente relacionado à luminosidade natural, que precisa ser controlada sobre a área sensoriada. O sensor LiDAR o TFmini Plus foi indicado para comparar o resultado do sensor de baixo custo, VL53L1X. Devido às suas características de abertura de 3,6° e limite de uso com radiação solar de 70 klux, tornou-se ideal para complementar o sistema, sendo vantajoso intercalar com outros sensores. Assim, mesmo estando em quantidade reduzida e realizando apenas uma cobertura amostral, o sensor funcionou em situações severas de luminosidade natural. O sensor ultrassônico apresentou um valor médio de leitura equivalente à altura do solo ou de um objeto de grande densidade. Sua utilidade foi evidenciada ao indicar a altura mínima de trabalho, assim como obstáculos no solo que poderiam danificar o sistema de cordas. O valores dos sensores ToF nas parcelas experimentais se aproximaram da altura de trabalho ajustada pelo operador da Campo Limpo, em um campo com alta infestação e plantas em diferentes estados de desenvolvimento. Entretanto, deve ser considerada uma correção, para retornar um valor intermediário, baseado nas diversas alturas sensoriadas.

O controlador automatizado de vazão por velocidade apresentou o resultado esperado, após realizar a calibração com as simulações de deslocamento. Um problema recorrente, relatado por usuários do equipamento, é o efeito carimbo, onde o rodado, impregnado por calda herbicida, afeta a vegetação nativa, quando o conjunto opera em períodos com a velocidade abaixo do definido, ou mesmo por fatores mecânicos que aumentem a velocidade da bomba. O controlador automatizado foi capaz de estabilizar a quantidade aplicada por m² deslocado, no espectro de velocidades de trabalho recomendadas. Essa característica melhora a qualidade de aplicação, quando comparado ao controlador original, com a restrição de uma única velocidade, que se mostrou impraticável em um campo irregular. Dessa forma, o controlador automatizado evita a

condição de falta ou excesso do produto nas cordas, evitando também o problema de calibração do sistema, quando o trator estiver desligado.

Os resultados obtidos na experimentação de campo, em ambiente real de trabalho, provaram a capacidade do equipamento de aplicar o defensivo com uma distribuição uniforme sem criar falhas ao alterar a velocidade. Embora o controlador automatizado tenha, inicialmente, aplicado uma quantidade inferior à planejada, posteriormente o processo foi corrigido. A partir dos dados armazenados no experimento a campo, a simulação da aplicação, com velocidade variável, evidenciou ganhos em tempo e simplicidade para calibrar a vazão. O novo sistema levou dois minutos para calibração, enquanto que o tradicional necessita de quinze a vinte minutos, com o trator ligado consumindo combustível. Por fim, os experimentos adicionais demonstraram o impacto da substituição da mangueira, e a influência do sistema elétrico do trator no controlador original e a imunidade do novo controlador.

6.1 Melhorias para o sistema e considerações

O sistema de controle da vazão pode ser mais robusto ao receber rotinas de autoteste, diagnóstico de erros e auto-calibração, detalhadas no mapeamento das condições mínimas de operação como vencer o atrito estático e a capacidade máxima de operação, além de reconhecer situações anormais de desempenho por potência aplicada, que necessitam de intervenção devido a entupimento ou vazamento a partir do acionamento de alarmes para vazamento, problemas de alimentação ou desconexão de sensores e atuadores.

O atual desenho da bomba peristáltica, sem batente móvel, ocasiona uma constrição na mangueira no ponto de contato do rolete, que permanece quando o equipamento não se encontra em operação. Como consequência, têm sido reportados casos de deformação permanente da mangueira, impedindo a aplicação. Um novo projeto da bomba peristáltica, dotado de batente móvel, permitiria aliviar a constrição com o rolete, melhorando a durabilidade da mangueira. Como o rolete realiza a vedação e não a pista, a mangueira sofre o estresse da tração além do esmagamento. No sistema original, a rotação teve queda quando os registros estão fechados, gerando pressão contra a descarga. Por fim, a vazão ainda pode ser alterada conforme a temperatura, viscosidade, pressões de admissão, descarga e o desempenho da tubulação temporalmente. Também se observou irregularidades na fabricação da tubulação com bolhas e um formato disforme, podendo

variar o desempenho. A manutenção realizada no equipamento, com a desmontagem completa de todos os sistemas da Campo Limpo indicaram o estado de desgaste de cada componente, e possibilidade de melhoria. Seria necessário documentar o histórico de manutenções e a durabilidade das peças por horas de trabalho, de modo que o fabricante pudesse realizar campanhas de manutenção preventiva.

6.2 Trabalhos Futuros

O novo módulo de controle, proposto no presente trabalho, abre a oportunidade de integração ao *smartphone* que, além do armazenamento e visualização da telemetria, possibilitaria realizar e expandir a precisão por meio da aplicação em taxas variáveis e pré-processadas. Também se flexibilizaria a capacidade computacional, memória e persistência de dados como, por exemplo, o registro do uso de defensivos, relacionado à segurança e aumento da eficiência pelo controle do trabalho.

O desenvolvimento de um sistema de auto-teste, que poderia ser acionado pelo *smartphone*, permitiria aferir a calibração da vazão da bomba, usando a telemetria dos experimentos ou parte deles.

O trabalho paralelo da criação do UGV, sintetizado no apêndice C, que não pôde ser executado em sua totalidade devido à restrição de tempo, recursos e à sua elevada complexidade, merece consideração.

O sensoriamento de altura das plantas pode funcionar de forma complementar ao controlador automatizado desenvolvido, de modo a permitir um ajuste, também automatizado, da altura do aplicador. Outra necessidade premente é superar a restrição de luminosidade solar direta sobre os pontos sensoriados, de modo a encontrar uma solução para reduzir a luminosidade a valores próximos de um dia nublado definido como 3.000 lux e, idealmente, alcançar valores inferiores à 400 lux.

De forma complementar, observou-se também a necessidade de reestruturação completa da bomba. Para isso, recomenda-se a criação de um modelo com o uso de peças impressas em 3D, para flexibilizar o manuseio dos fluidos, setorizar a adução da calda herbicida, composta de água e herbicida e, assim, gerar mais controle sobre a distribuição de defensivos e criar um misturador para controlar de forma dinâmica a proporção de água na calda.

REFERÊNCIAS

- AMAZON.COM, INC. **Sensor elétrico de velocidade da bicicleta PAS**. 2022. Fabricante: Bnineteenteam. Acesso em: 30 jan. 2022. Disponível em: <<https://a.co/d/eTeugnp>>.
- BAKKER, T. *et al.* Systematic design of an autonomous platform for robotic weeding. **Journal of Terramechanics**, v. 47, n. 2, p. 63–73, 2010. ISSN 0022-4898. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022489809000858>>.
- BARIONI, L. G.; FERREIRA, A. C. Monitoramento da massa de forragem e altura para ajustes de taxa de lotação em fazenda agropecuária na região do cerrado. **Embrapa Cerrados-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAC-2009/28932/1/bolpd_191.pdf>.
- BASTIANI, M. O. *et al.* Influence of growth stage on efficacy, absorption and translocation of glyphosate in eragrostis plana. In: IN: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 31., 2018, RIO DE JANEIRO. DESAFIOS E SUSTENTABILIDADE NO MANEJO DE PLANTAS DANINHAS: RESUMOS. LONDRINA: ED. DA SBCPD, 2018. **Embrapa Pecuária Sul-Resumo em anais de congresso (ALICE)**. 2018. p. 267. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1098682>>.
- BECHAR, A.; VIGNEAULT, C. Agricultural robots for field operations: Concepts and components. **Biosystems Engineering**, v. 149, p. 94–111, 2016. ISSN 1537-5110. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511015301914>>.
- BENDIG, J. *et al.* Combining uav-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 39, p. 79–87, 2015. ISSN 0303-2434. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243415000446>>.
- BENEWAKE, B. C. L. **Document No.: SJ-GU-TFmini-01**. Beijing, China, 2017. Acesso em: 7 abr. 2022. Disponível em: <https://github.com/TFmini/TFmini-Plus/raw/master/SJ-GU-TFminiPlus-01-A05-Datasheet_EN.pdf>.
- BENEWAKE, B. C. L. **Product Manual of TFmini Plus**. Beijing, China, 2019. Acesso em: 7 abr. 2022. Disponível em: <<https://github.com/TFmini/TFmini-Plus/raw/master/SJ-PM-TFminiPlusA04ProductManual.pdf>>.
- BOHER, P.; LEROUX, T. 83-4: High resolution optical characterization of nir light sources for 3d imaging. In: WILEY ONLINE LIBRARY. **SID Symposium Digest of Technical Papers**. 2019. v. 50, n. 1, p. 1210–1213. Disponível em: <<https://sid.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sdtp.13149>>.
- BOSCH LTDA, R. **Alternadores, motores de partida e principais componentes**. Campinas, SP, 2019. 151 p. Disponível em: <https://www.boschaftermarket.com/xrm/media/images/country_specific/br/downloads_19/pdf_9/catlogo_rm_completo_2019.pdf>.

CARATTI, F. C. **Capim-annoni: germinação, caracterização morfoanatômica, genética e absorção de herbicidas**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/cr/a/ZwzLvrrrj6xkfHLkydp8V3G/>>.

CARMODY, J.; HAGLUND, K. **Measure guideline: Energy-efficient window performance and selection**. Oak Ridge, TN, 2012. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/55444.pdf>>.

COPELAND, J. D. *et al.* Palmer amaranth control by glufosinate depends on application time of day. **The Journal of Cotton Science**, v. 25, p. 58–66, 2021. Disponível em: <<https://www.cotton.org/journal/2021-25/1/upload/JCS25-058.pdf>>.

CYTRON TECHNOLOGIES, S. B. **Product User's Manual – HC-SR04 Ultrasonic Sensor**. Johor, Malaysia, 2013. 10 p. Acesso em: 30 abr. 2019. Disponível em: <<https://cdn.awsli.com.br/945/945993/arquivos/HCSR04.pdf>>.

DIAS FILHO, M. B. Diagnóstico das pastagens no Brasil. **Embrapa Amazônia Oriental-Documentos (INFOTECA-E)**, Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, p. 38, 2014. ISSN 1983-0513. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/986147/1/DOC402.pdf>>.

DOU, H. *et al.* A lidar sensor-based spray boom height detection method and the corresponding experimental validation. **Sensors**, v. 21, n. 6, 2021. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/6/2107>>.

ELEY, C. Smart building design: Contextual design, energy efficiency, and curtailment. In: _____. **Design Professional's Guide to Zero Net Energy Buildings**. Washington, DC: Island Press/Center for Resource Economics, 2016. p. 9–60. ISBN 978-1-61091-765-0. Disponível em: <https://doi.org/10.5822/978-1-61091-765-0_2>.

ESPRESSIF, S. **ESP32 Series Datasheet v3.8**. Shanghai, China, 2022. 68 p. Acesso em: 10 ago. 2022. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>.

FAO. **Representante da FAO Brasil apresenta cenário da demanda por alimentos**. FAO Rome, 2017. Acesso em: 21 set. 2020. Disponível em: <<https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/fr/c/901168/>>.

FAOSTAT, F. . A. O. **FAO's Statistics Division**. FAO Rome, 2022. Acesso em: 21 jun. 2022. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#country/21>>.

FAVARETTO, A. *et al.* The first anatomical and histochemical study of tough lovegrass (*eragrostis plana* nees, poaceae). **African Journal of Agricultural Research**, Academic Journals, v. 10, n. 30, p. 2940–2947, 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/280680832_The_first_anatomical_and_histochemical_study_of_tough_lovegrass_Eragrostis_plana_Nees_Poaceae>.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 97 p. ISBN 858623821X.

- GIGADEVICE, S. I. **GD32F330xx ARM Cortex-M4 32-bit MCU Datasheet 2.2**. Beijing, China, 2022. 86 p. Acesso em: 23 ago. 2022. Disponível em: <https://www.gd32mcu.com/download/down/document_id/134/path_type/1>.
- GONZALEZ-DE-SANTOS, P. *et al.* Unmanned ground vehicles for smart farms. **Agronomy-Climate Change & Food Security**, IntechOpen, Rijeka, p. 73, 2020. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/chapters/70626>>.
- GRAZMEC. **Roçadeira Química Campo Limpo +**. Não-Me-Toque, RS: [s.n.], 2021. Acesso em: 28 jan. 2021. Disponível em: <<https://www.grazmec.com.br/rocadeira-quimica-campo-limpo-+>>.
- HERRICK, J. E. *et al.* **Monitoring manual for grassland, shrubland and savanna ecosystems. Volume I: Core Methods**. 2. ed. [S.l.], 2015. 86 p. Disponível em: <https://jornada.nmsu.edu/files/Core_Methods.pdf>.
- IBGE. Retratando a realidade do brasil agrário. Rio de Janeiro, p. 98, 2017. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/d37d30efd337a9b66852d60148695df1.pdf>.
- IKEDA, F. S.; INOUE, M. H. **Manejo sustentável de plantas daninhas em sistemas de produção tropical**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 117 p. ISBN 9788570355010. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/140981/1/2015-spdptropical-livro.pdf>>.
- INAMASU, R. *et al.* Portfólio automação agrícola, pecuária e florestal. **Embrapa Instrumentação-Documentos (INFOTECA-E)**, São Carlos: Embrapa Instrumentação, p. 14, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/conteudo-web/-/asset_publisher/fHv2QS3tL8Qs/content/tema-embrapa-mecanizacao-e-agricultura-de-precisao-perguntas-e-respostas/10180>.
- INOUE, A. *et al.* Modeling and analysis of capacitive relaxation quenching in a single photon avalanche diode (spad) applied to a cmos image sensor. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 20, n. 10, p. 3007, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/10/3007>>.
- JENSEN, J. R.; EPIPHANIO, J. C. N. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. [S.l.]: Parêntese Editora São José dos Campos, 2009. 597 p. ISBN 978-85-60507-06-1.
- LEGG, M.; BRADLEY, S. Ultrasonic arrays for remote sensing of pasture biomass. **Remote Sensing**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 1, 2020. ISSN 2072-4292. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/1/1111>>.
- LYNCH, K. M.; MARCHUK, N.; ELWIN, M. L. Chapter 21 - sensors. In: LYNCH, K. M.; MARCHUK, N.; ELWIN, M. L. (Ed.). **Embedded Computing and Mechatronics with the PIC32**. Oxford: Newnes, 2016. p. 317–340. ISBN 978-0-12-420165-1. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124201651000214>>.

MACHLEB, J. *et al.* Sensor-based mechanical weed control: Present state and prospects. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 176, p. 105638, 2020. ISSN 0168-1699. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169919318708>>.

MAPA MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, P. e. A. **Valor da produção agropecuária de 2022 está estimado em R\$ 1,207 trilhão**. MAPA Brasília, DF, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias-2022/valor-da-producao-agropecuaria-de-2022-esta-estimado-em-r-1-207-trilhao>>.

MARTHA JÚNIOR, G. B. Uma agropecuária forte amortece os impactos da covid-19. **Revista de Política Agrícola**, Embrapa, v. 29, n. 2, p. 140, 2020. Disponível em: <<https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/1612>>.

MATUO, T. Técnicas de aplicação de defensivos agrícolas., 1990. **Jaboticabal: Funep**, 1990.

MCTI MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, T. e. I. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil**. MCTI Brasília, DF, 2020. v. 5. 24–40 p. Estimativas de 1990 - 2016 Emissões do setor Agropecuária, por subsetor, em CO₂eq. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-aneais-de-emissoes-gee/arquivos/livro_digital_5ed_estimativas_aneais.pdf>.

MELO JUNIOR, A. d. **Uso de Unmanned Aircraft Systems (UAS) em um inventário florestal censitário, para estimativa do DAP**. Dissertação (Mestrado), 2019. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1129011/1/27091.pdf>>.

MOHR, K.; SELLERS, B. A.; SMEDA, R. J. Application time of day influences glyphosate efficacy. **Weed Technology**, Cambridge University Press, v. 21, n. 1, p. 7–13, 2007.

MONTGOMERY, G. B. *et al.* Effect of time of day of application of 2, 4-D, dicamba, glufosinate, paraquat, and saflufenacil on horseweed (*conyza canadensis*) control. **Weed Technology**, Cambridge University Press, v. 31, n. 4, p. 550–556, 2017.

MURPHY, D. J. *et al.* A review of precision technologies for optimising pasture measurement on irish grassland. **Agriculture**, v. 11, n. 7, 2021. ISSN 2077-0472. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2077-0472/11/7/600>>.

NASCIMENTO, A. d. **Caracterização química e digestibilidade do capimannoni (*Eragrostis plana*, Ness.) comparado com o pasto nativo em diferentes estágios de desenvolvimento**. 79 p. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Zootecnia) — Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 1976.

NEVES, M. C. *et al.* Avaliação de sensor multiespectral em mapeamentos da infestação de pastagens naturais pelo capim-annoni. In: IN: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Embrapa Meio Ambiente-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. 2019. ISBN 978-85-17-00097-3. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1117339>>.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. Edgard Blücher, 2010. 388 p. ISBN 9788521216902. Disponível em: <https://www.blucher.com.br/sensoriamento-remoto_9788521205401>.

O'HARA, P.; FRENEY, J.; ULYATT, M. J. **Abatement of Agricultural Non-carbon Dioxide Greenhouse Gas Emissions: A Study of Research Requirements: Report Prepared for the Ministry of Agriculture and Forestry on Behalf of the Convenor, Ministerial Group on Climate Change, the Minister of Agriculture, and the Primary Industries Council.** Ministry of Agriculture and Forestry, 2003. 177 p. ISBN 0478077548. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.458.3182&rep=rep1&type=pdf>>.

OLIVEIRA, M. d.; BRIGHENTI, A. Controle de plantas daninhas: métodos físico, mecânico, cultural, biológico e alelopatia. **Embrapa Milho e Sorgo-Livro técnico (INFOTECA-E)**, Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/193269/1/Controle-plantas-daninhas.pdf>>.

PEREZ, N. B. Aplicador manual de herbicida por contato: enxada química. **Embrapa Pecuária Sul-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, Bagé: Embrapa Pecuária Sul, Bagé, RS, 2008. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/63859/1/CO67.pdf>>.

PEREZ, N. B. Campo limpo: controle de plantas indesejáveis em pastagens. **Embrapa Pecuária Sul-Fôlder/Folheto/Cartilha (INFOTECA-E)**, Bagé: Embrapa Pecuária Sul, Bagé, RS, 2010. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/879925/campo-limpo-controle-de-plantas-indesejaveis-em-pastagens>>.

PEREZ, N. B. Controle de plantas indesejáveis em pastagens: uso da tecnologia campo limpo. **Embrapa Pecuária Sul. Comunicado técnico**, Bagé: Embrapa Pecuária Sul., Bagé, RS, 2010. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/883991/1/CO72online.pdf>>.

PEREZ, N. B. Método integrado de recuperação de pastagens mirapasto: foco capim-annoni. **Embrapa Pecuária Sul-Fôlder/Folheto/Cartilha (INFOTECA-E)**, Bagé: Embrapa Pecuária Sul, Bagé, RS, 2015. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/pecuaria-sul/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1023496/metodo-integrado-de-recuperacao-de-pastagens-mirapasto-foco-capim-annoni>>.

PEREZ, N. B. *et al.* Programa de controle do capim-annoni no parque eólico cerro chato: diagnóstico e proposições. **Embrapa Pecuária Sul-Documentos (INFOTECA-E)**, Bagé: Embrapa Pecuária Sul, Bagé, RS, p. 31, 2015. ISSN 19825390. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1033631/1/Dt146online.pdf>>.

PEREZ, N. B.; LAMEGO, F. Guia de prevenção e controle de capim-annoni no pampa. **Embrapa Pecuária Sul-Livro técnico (INFOTECA-E)**, Bagé: Embrapa Pecuária Sul: Alianza del Pastizal Brasil, Bagé, RS, 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1129766/guia-de-prevencao-e-controle-de-capim-annoni-no-pampa>>.

PIERAZZOLI, E. T. S. **Planilha de dimensionamento por componentes e funcionalidades do UGV.** Bagé, RS, 2021. "GraMorfoUGV.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S. **Relatório de entrega técnica do equipamento: Campo Limpo +, na Embrapa Pecuária Sul.** Bagé, RS, 2021.

"CampoLimpomais2021compressed.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S. **Relatório Protótipo Versão de sensoriamento com a adição do TFmini plus.** Bagé, RS, 2021. "Relatório Protótipo Versão 21 12 2021.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S. **Tabela de vazão por infestação e velocidade.** Bagé, RS, 2021. "Campo Limpo Vazão por infestação e velocidade.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Planilha de avaliação dos sensores e características.** Bagé, RS, 2021. "PlanListaSensores.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Planilha de dimensionamento com as combinações de recursos que compõem o peso do UGV.** Bagé, RS, 2021. "PlanUGVpeso.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Planilha de dimensionamento do sistema de baterias e motorização do UGV, de acordo com o terreno.** Bagé, RS, 2021. "PlanUGV.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Planilha de dimensionamento dos elementos do quadro do UGV, sistema de cordas e de uma série de opção de materiais.** Bagé, RS, 2021. "PlanUGVpesoestrutura.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Recuperação de Pastagens - Formulário.** Bagé, RS, 2021. "Recuperação de Pastagens - Formulário.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Relatório de construção do protótipo UGV em escala reduzida, para validar o sistema de motores e movimentação da estrutura (Escala 6:1).** Bagé, RS, 2021. "RelConstrProtUGV.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Relatório de controle da vazão, relacionando o deslocamento do equipamento e rotação da bomba peristáltica.** Bagé, RS, 2021. "RelContDinVazVelCampoLimpUpgrades.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Relatório de custo energético: Dimensionamento do banco de baterias, faixa de operação dos motores e os diferentes perfis de pneus em condições terreno e velocidade.** Bagé, RS, 2021. "RelUGVGeoferenciamento.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Relatório de estudo e tradução da API do sensor VL53L1X**. Bagé, RS, 2021. "Funcvl53l1x.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Relatório de experimento de campo - Local: Anversa**. Bagé, RS, 2021. "RelAnversa5sensores .pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Relatório de experimento de campo com sensores posicionais e câmeras Survey 2**. Bagé, RS, 2021. "ExpInfrasEmCampo.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Relatório de experimento de campo com sensores posicionais: Local: Anversa, técnica de Herrick (2015)**. Bagé, RS, 2021. "RelAnversa5sensores .pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Relatório de experimento em Laboratório, para identificar o ângulo de abertura e a capacidade de detecção do sensor HC-SR04**. Bagé, RS, 2021. "RelHCSR04.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Relatório de experimento em Laboratório, para identificar o ângulo de abertura e a capacidade de detecção dos sensores Time-of-Flight Sensor - STMicroelectronics, modelos VL53L0X e VL53L1X**. Bagé, RS, 2021. "Expl53l1x.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Relatório de experimento exploratório de campo com o VL53L1X e luxímetro**. Bagé, RS, 2021. "Campo experimental da Unipampa". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Relatório de experimento exploratório de campo, com uso de cinco sensores ultrassônicos HC-SR04, distribuídos em uma barra de 2 metros, acionados de forma sequencial**. Bagé, RS, 2021. "RelAnversa5sensores .pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PIERAZZOLI, E. T. S.; DOMINGUES, W. S. **Relatório de inspeção e reparos da Roçadeira Química Campo Limpo, no Campus Bagé**. Bagé, RS, 2021. "RelCampolimpo.pdf". Disponível em: <<https://drive.google.com/drive/folders/1SNcR4t5zNJCe7NfE6iszf8YcTQz3v778/>>.

PRADO, T. C. S. d. *et al.* Espécie exótica invasora capim annoni (*eragrostis plana*) e sua expansão no bioma pampa existente na bacia hidrográfica do rio ibirapuitã-rs: uma análise por meio do sensoriamento remoto. 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/206182>>.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição**. Editora Feevale, 2013. 276 p. Disponível em: <<https://www.feevale.br/Comum/midias/0163c988-1f5d-496f-b118-a6e009a7a2f9/E-bookMetodologiaDoTrabalhoCientifico.pdf>>.

RADOSEVICH, S. R.; HOLT, J. S.; GHERSA, C. M. **Ecology of weeds and invasive plants: relationship to agriculture and natural resource management**. 3. ed. John Wiley & Sons, Ltd, 2007. 454 p. ISBN 9780470168943. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470168943>.

RODRIGUES, P. F.; PEREZ, L.; PEREZ, N. B. **LIVE - Capim-annoni: tolerância zero. Segunda live realizada pelo Senar-RS e Embrapa Pecuária Sul, para debater métodos preventivos e de controle das infestações de capim-annoni**. SENAR Rio Grande do Sul, 2021. "1 vídeo (87 min). Acesso em: 20 abr. 2021". Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Cir8yiBFyQw>>.

ROSHANIANFARD, A. *et al.* A review of autonomous agricultural vehicles (the experience of hokkaido university). **Journal of Terramechanics**, v. 91, p. 155–183, 2020. ISSN 0022-4898. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022489820300562/>>.

ROUSE, J. W. *et al.* Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. **NASA special publication**, v. 351, n. 1974, p. 309–317, 1973. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>>.

SALNAB, A. K. D.; SOARES, J. P. G.; CANESIN, R. C. Métodos de amostragem para avaliação quantitativa de pastagens. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2006., p. 6, 2006. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/710690/1/ct84pastagem.pdf>>.

SANTOS, A. S. **Avaliação de parâmetros de trabalho de um trator New Holland modelo TL75E-4X2 TDA**. 31 p. — Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), 2019. Disponível em: <https://repository.ufrpe.br/bitstream/123456789/1222/1/tcc_atossiqueirasantos.pdf>.

SEIFERTH, B. **Development of a system for selective pasture care by an autonomous mobile machine**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020. 106 p. ISBN 978-3-662-61655-0. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-662-61655-0>>.

SOARES, Â. F. **Aerolevanteamento com VANT no auxílio contra o abigeato**. 79 p., Bagé, RS, 2018. Disponível em: <<https://dspace.unipampa.edu.br/handle/rii/4661>>.

SOARES, Â. F.; PEREZ, N. B.; PINHO, L. Bidese de. Touceiratech: uma proposta de fms inovador para predição de disponibilidade de pasto e ajuste de lotação animal. In: **XII Congresso de AgroInformática (CAI 2020)-JAIIO 49 (Modalidad virtual)**. Argentina: [s.n.], 2020. p. 298–311. ISSN 2525-0949. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1133748/1/Soares-et-al.pdf>>.

SPECHT, M. **Modelagem Computacional de Fluxo em Aplicador de Herbicida Amparada por Simulação com Ênfase em Exploração de Paralelismo**. 76 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada) —

Universidade Federal do Pampa, Campus Bagé, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/riu/5394>>.

STMICROELECTRONICS. **Datasheet STM32F030C8**. Geneva, Switzerland, 2013. Acesso em: 15 abr. 2022. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/524580/STMICROELECTRONICS/STM32F030C8.html>>.

STMICROELECTRONICS. **Application note: Cover window guidelines for the VL53L1X long-distance ranging Time-of-Flight sensor**. Geneva, Switzerland, 2018. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/application_note/an5231-cover-window-guidelines-for-the-vl53l1x-longdistance-ranging-timeofflight-sensor-stmicroelectronics.pdf>.

STMICROELECTRONICS. **Datasheet - production data. A new generation, long distance ranging Time-of-Flight sensor based on ST's FlightSense™ technology**. Geneva, Switzerland, 2018. Disponível em: <www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l1x.pdf>.

STMICROELECTRONICS. **Datasheet - production data. New generation Time-of-Flight ranging sensor with advanced multi-zone and multi-object detection**. Geneva, Switzerland, 2021. Disponível em: <www.st.com/resource/en/datasheet/vl53l1.pdf>.

STMICROELECTRONICS. **User manual - A guide to using the VL53L1X ultra lite driver**. Geneva, Switzerland, 2021. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2510-a-guide-to-using-the-vl53l1x-ultra-lite-driver-stmicroelectronics.pdf>.

STRAYAN, S. E. **VL53L1X Teardown**. HACKADAY.IO, 2018. Acesso em: 20 jun. 2021. Disponível em: <<https://hackaday.io/project/25571-mappydot/log/148243-vl53l1x-teardown>>.

Tim Chamen, W. *et al.* Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. **Soil and Tillage Research**, v. 146, p. 10–25, 2015. ISSN 0167-1987. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198714001901>>.

VÄLJAOTS, E. *et al.* Soil sampling automation using mobile robotic platform. Estonian University of Life Sciences, p. 917–922, 2018. Disponível em: <https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2018/05/Vol16No3_30.pdf>.

VILLA, F. *et al.* Spads and sipms arrays for long-range high-speed light detection and ranging (lidar). **Sensors**, v. 21, n. 11, 2021. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/11/3839>>.

WEIDE, R. V. D. *et al.* Innovation in mechanical weed control in crop rows. **Weed research**, Wiley Online Library, v. 48, n. 3, p. 215–224, 2008. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-3180.2008.00629.x>>.

ZHANG, Q. **Precision agriculture technology for crop farming**. Taylor & Francis, 2015. 374 p. ISBN 9780429159688. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/oa-edit/10.1201/b19336/precision-agriculture-technology-crop-farming-qin-zhang>>.

APÊNDICE A – CUSTOS DOS MÓDULOS VALIDADOS, CIRCUITOS ELETRÔNICOS E MAIS FUNCIONALIDADES

Este apêndice apresenta os custos para os protótipos e propostas de soluções finais, com a lista de componentes, circuito eletrônico, uma proposta de versão final da placa e propostas com capacidade para atender mais bombas e modos de comunicação.

A.1 Custos do protótipo de sensoriamento

O custo de desenvolvimento do protótipo de sensoriamento da pastagem visto na tabela 24, com os componentes utilizados em uma barra de 2 metros de comprimento com diversos sensores de distância e ambientais, totalizou R\$ 2.900,28 reais em abril de 2022. O componente mais caro foi o sensor TFmini Plus ao custo de seiscentos reais, contudo, é considerado baixo comparado aos sensores ultrassônicos utilizados na agricultura e indústria, que chegam a valores superiores a dois mil reais.

Tabela 24 – Materiais usados para construção do conjunto completo de sensoriamento para uma barra completa (dois metros)

Item	Descrição/função	Un.	Total (R\$)
Arduino Mega 2560		1	90,00
Módulo com. Bluetooth	HC-06	1	32,67
Mód. sens. Campo Hall	KY-003, encoder de deslocamento	1	10,83
Mód. sens. acel. e giros.	Mpu6050 3 Eixos Gy-521	2	38,00
Mód. sens. temp. umidade	DHT 11	1	12,90
Mód. sens. luminosidade	LDR 5 mm	1	0,60
Mód. sens. dist. ToF	VL53L1X – STMicroelectronics	9	541,35
Mód. sens. dist. ToF	TFmini Plus IP65 – Benewake	3	1799,97
Mód. sens. dist. ultrassônico	HC-SR04	5	70,80
Módulo reg. tensão	Step up, 5 V, 2 A	2	20,00
Bateria	Lithium 18650, 3.7 V, 2200 mAh	4	91,60
Resistores 1/4 W		24	4,56
Diodo de proteção		1	1,00
Capacitor	10 nF, 6,3 V	17	34,00
Cabeamento de dados	Cabo UTP	14	28,00
Barra de aço	1/2"	2	20,00
Fixação		16	80,00
Imãs de Neodímio	8x5 mm	12	24,00

Fonte: Autor (2022)

A.2 Custos protótipo de sensoriamento parcial

Na tabela 25 temos o custo do protótipo utilizado para sensoriar as parcelas e experimentos, com menos sensores por ser uma configuração de meia barra com custo total de R\$ 1.122,83, obtendo os componentes sem importação.

Tabela 25 – Materiais usados para construção da meia barra de sensores (1 metro)

Item	Descrição/função	Un.	Total (R\$)
Arduino Micro		1	59,00
Módulo com. Bluetooth	HC-06	1	32,67
Mód. Sens. campo hall	KY-003, encoder de deslocamento	1	10,83
Mód. Sens. acel. e giroscópio	Mpu6050 3 Eixos Gy-521	1	19,00
Mód. Sens. temp. umidade	DHT 11	1	12,90
Mód. Sens. luminosidade	LDR 5 mm	1	0,60
Mód. Sens. distância ToF	VL53L1X 4 m- STMicroelectronics	4	240,60
Mód. Sens. distância ToF	TFmini Plus 12 m IP65-Benewake	1	599,99
Mód. Sens. dist. ultrassônico	HC-SR04	1	14,16
Módulo Regulador de tensão	Step up, 5 V, 2 A	1	10,00
Bateria	Lithium 18650, 3.7 V, 2.200 mAh	2	45,80
Capacitor	10 nF, 6,3 V	8	16,00
Resistores 1/4 W		12	2,28
Diodo de proteção		1	1,00
Cabeamento de dados	Cabo UTP	7	14,00
Barra de aço		1	10,00
Fixação		5	10,00
Imãs de Neodímio	8x5 mm	12	24,00

Fonte: Autor (2022)

A.3 Custos protótipo de controle da vazão automatizado

O sistema do controle da vazão automatizado se diferencia do original com o acréscimo de sensores para ler a velocidade, e o módulo de comunicação para receber comandos e ajustes e transmitir a telemetria. O custo para criar o controlador de vazão por velocidade é apresentado na tabela 26 e totalizou R\$ 684,62, já a inclusão do módulo de comunicação *bluetooth* usado prioritariamente para captura da operação, possibilita atualizar a dosagem conforme o nível de infestação georreferenciado ou sensoriado. Além disso, se trabalha com a portabilidade para o SoC ESP32 e incluir a integração com outros sistemas da *Smartfarm* por meio da comunicação LoRa e as demais opções nativas no

SoC e gera um acréscimo de R\$ 190,00, entretanto, este procedimento está em um estágio inicial.

Tabela 26 – Materiais usados para construção do protótipo de controlador automático de vazão para duas bombas e telemetria

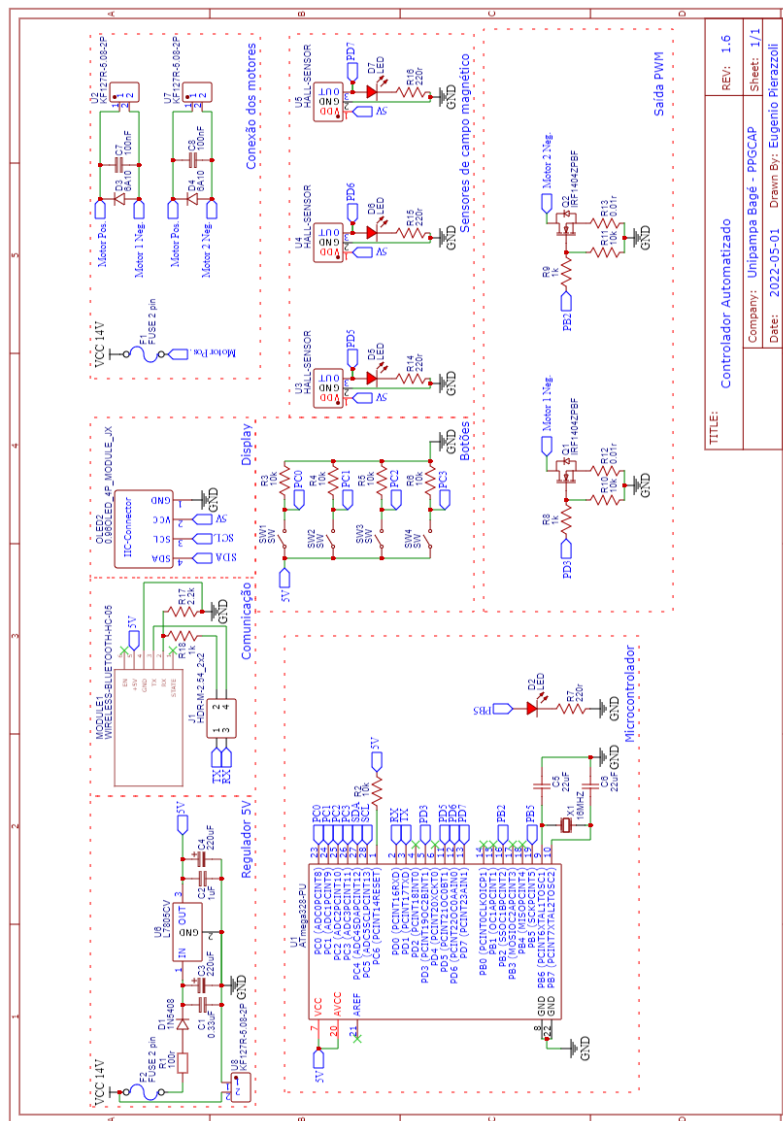
Item	Descrição/função	Un.	Total (R\$)
Arduino Uno R3	ATmega328P	1	78,00
Shield Keyes 5.1	Shield para soldar cabos e componentes	1	25,00
Mód. com. Bluetooth	HC-06	1	32,67
Mód. Display LCD	16x2 caracteres, I2C	1	25,56
Mód. Reg. tensão	Step down 5 V, 2 A	1	10,00
Mód. Sens. campo hall	KY-003, encoder de deslocamento	3	32,49
Reed Switch		0	0,00
Power MOSFET	IRF1404, Vds 40 V, Rds 4 mΩ, Ids 162 A	2	22,40
Resistores 1/4 W		18	3,42
Capacitor Cerâmico	4,7 μF	10	7,90
Capacitor Cerâmico	100 nF	10	1,40
Capacitor Eletrolítico	2.200 μF, 25 V, 105°C, Low E.S.R	4	54,80
Fusível e suporte	Para entrada 10 A, para saídas 3 A	3	38,70
Diodo de proteção	Para FCEM, 6 A, 1.000 V	2	5,80
Chave Táctil	6x6x5 mm 4 Terminais	3	1,08
Dissipador de calor	20 W de pico e 0,324 W	2	15,00
Case		1	30,00
Cabo de sensores	Cabo UTP 6 vias	30	63,00
Cabo de alimentação	Cabo PP 3 vias, 4 mm	10	146,00
Conector para motores	Conector 2 Vias, IP67	2	14,00
Conector para sensores	Conector 4 Vias, IP67	3	53,40
Imãs de neodímio	8x5 mm	12	24,00

Fonte: Autor (2022)

A.4 Circuito eletrônico do controle da vazão automatizado baseado no Atmega328P

Foi projetado um controlador com os sensores, módulo de comunicação para receber comandos e enviar a telemetria, visto na figura 71. Os quadros setorizam a retificação, microcontrolador, sensoriamento, atuadores, entrada e saída de dados.

Figura 71 – Circuito eletrônico do controlador de vazão por velocidade baseado no Atmega328P com sensores de campo hall e comunicação por *Bluetooth*



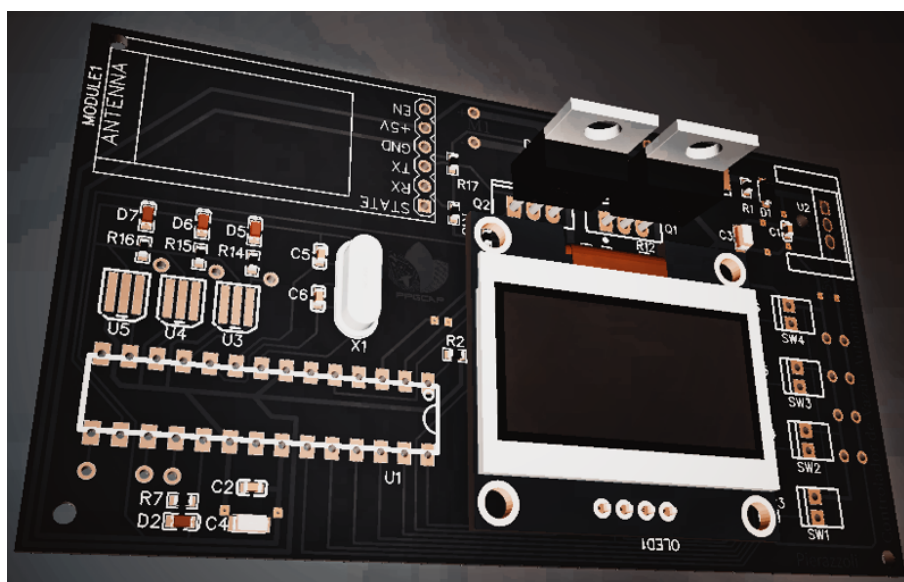
TITLE: Controlador Automatizado	REV: 1.6
Company: Unipampa Bagé - PPGCAP	Sheet: 1/1
Date: 2022-05-01	Drawn By: Eugenio Pierazzoli

Fonte: Autor (2022)

A.5 Placas de circuito eletrônico e controlador baseado no ESP32 com comunicação por LoRa

A partir do protótipo e esquema elétrico com as modificações para o uso final, foi simulada a confecção da placa de circuito e disposição dos componentes, atendendo aos requisitos propostos e com capacidade de expansão, por disponibilizar: mais portas, acesso ao barramento I2C, pontos de teste e alimentação adicional, como visto na figura 72. O custo do protótipo foi próximo e inclui simplificações no projeto, como o uso de um regulador de tensão em substituição à *shield* de *stepdown*. Outra capacidade seria a de misturar a calda de forma dinâmica, obedecendo a tabela 3 e a tabela 4, baseadas na bula por nível de infestação ou atendendo às novas oportunidades da área, como o aumento de eficiência observado por Caratti (2019) ao associar o glifosato com o fluazifop. Nesse aspecto, o controle da relação de água e defensivo permitiria adequar o funcionamento para os casos onde existe a formação de orvalho, para ajustar a proporção de água, ou quando existem alternâncias expressivas de nível de infestação alta, média, baixa como se observa em manchas.

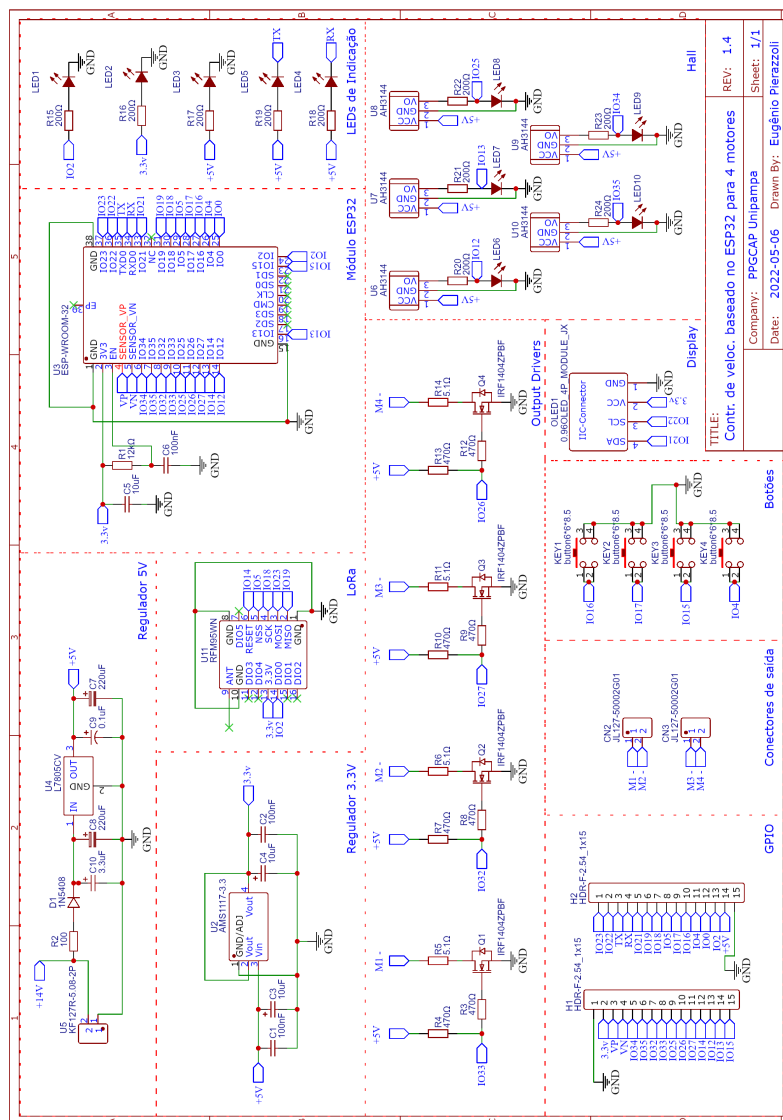
Figura 72 – Placa controladora de vazão dinâmica com Atmega328P



Fonte: Autor (2022)

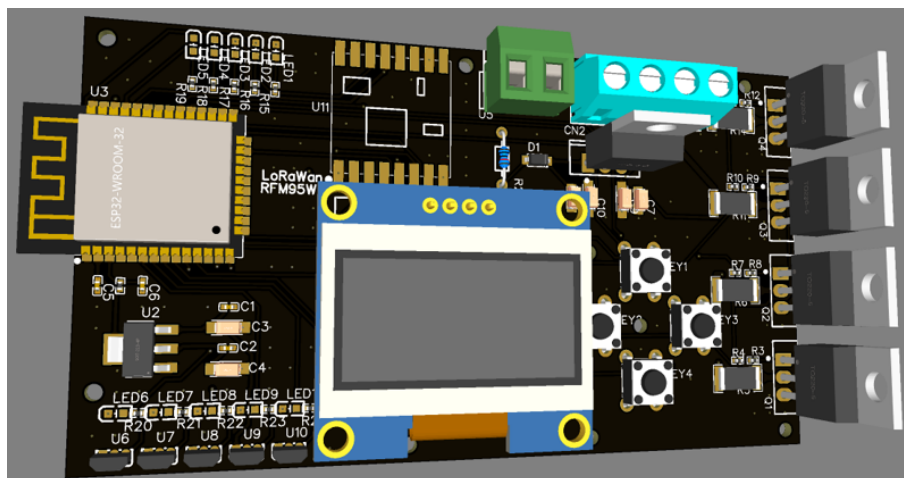
Devido às limitações do Atmel328p, para atender a necessidade de mais motores e integração com as tecnologias em desenvolvimento no grupo de pesquisa *TouceiraTech*, foi modelado a proposta com o SoC ESP32 (Espressif (2022)), agregando a tecnologia de comunicação LoRa, e possibilitando o controle de quatro motores e cinco sensores de campo Hall visto na figura 74. O esquema elétrico na figura 73, agrupa os setores, acrescenta um regulador de tensão de 3,3 V e o módulo LoRa.

Figura 73 – Circuito eletrônico do controlador de vazão e concentração dinâmica, baseado no SoC ESP32 com comunicação LoRa para quatro motores e cinco sensores de campo Hall



Fonte: Autor (2022)

Figura 74 – Placa controladora de vazão e concentração dinâmica com ESP32 e comunicação LoRa, com cinco sensores de campo Hall e controle de quatro motores



Fonte: Autor (2022)

A.6 Custos dos novos recursos para atualização do controlador digital original

O custo em materiais para dar novas funcionalidades ao controlador de vazão digital existente é apresentado na tabela 27 e totalizou R\$ 227,63 (sem considerar a confecção da placa e outros insumos para a montagem). A atualização é vantajosa, observando o custo do equipamento, a possibilidade de economia de defensivo, possível melhora na qualidade do tratamento e redução do tempo entre ajustes. A capacidade computacional do controlador utilizado originalmente atende a demanda para este uso.

Tabela 27 – Materiais para atualizar o controlador digital com as funcionalidades de vazão automatizada e telemetria

Item	Descrição/função	Un.	Total (R\$)
Módulo com. <i>Bluetooth</i>	HC-06	1	32,67
Mód. Sens. de campo hall	KY-003	3	32,49
Resistores 1/4 W		8	1,52
Capacitor cerâmico	4,7 μ F	10	7,90
Capacitor cerâmico	100 nF	10	1,40
Cabo de sensores	Cabo Pp 6 Vias X 1,0 mm	8	62,40
Cabo de sensor	Cabo Pp 3 Vias X 1,0 mm	5	33,95
Conector para sensores	6 Vias IP67	2	35,60
Ímãs de neodímio	8x5 mm	12	24,00
Case	Sensor da roda	1	5,00

Fonte: Autor (2022)

O investimento para atualizar o equipamento Campo Limpo e ter mais controle na aplicação devido à oscilação na velocidade do trator no terreno, reduz o tempo de preparação e pode permitir um uso mais sustentável e econômico. Apesar de ser esperado um rápido retorno do investimento na atualização, são necessários mais dados da operação pelos usuários para criar uma estimativa de ganho. Também se visualizou um o processo de limpeza poderia pós operação mais simplificado e automatizado com o acréscimo de um circuito com válvulas para substituir os registros, onde se espera um custo equivalente na substituição.

APÊNDICE B – SÍNTESE DOS RELATÓRIOS

O conjunto de atividades da Etapa 1 permitiu conhecer melhor o equipamento, observar as possibilidades de melhoria e formular uma consulta com usuários, de modo a elencar prioridades. O formulário de pesquisa intitulado “Recuperação de Pastagens” (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021e) foi idealizado para os proprietários da Roçadeira Campo Limpo e organizado em uma série de perguntas, agrupadas em seções. A primeira seção caracteriza o operador e a propriedade rural, com capacidade de anexar o arquivo de mapa da fazenda, qualificar a unidade e atividade, o nível de infestação e tipo, em seguida a próxima seção trata da infraestrutura de conectividade, tecnologias dos tratores e acessórios de agricultura de precisão. Na próxima seção, se observa a capacitação técnica com relação ao Mirapasto, roçadeira e os resultados obtidos do tratamento. Sequencialmente, aponta vídeos “online” de construção da enxada química, manual técnico da Campo Limpo e controle do capim-annoni. A seção seguinte é focada na Pecuária 4.0 e questiona a necessidade e expectativa de novos recursos para a roçadeira. Por fim, existem perguntas abertas sobre modificações e espaço para as sugestões de melhorias na roçadeira e método, além do convite para parceria experimental. A conclusão das atividades da Etapa 1 foi priorizar a automação do processo de aplicação e permitiu construir um planejamento das atividades das outras seções.

O conjunto de atividades da Etapa 2 previu obter formas de sensoriamento da vegetação. Foram levantados os sensores de baixo custo, capazes de identificar a altura da vegetação usando, prioritariamente, o sensor ultrassônico HC-SR04, devido a sua disponibilidade imediata. Paralelamente, foram observados outros 26 sensores disponíveis para aquisição sem a necessidade de importação, bem como avaliar quais sensores poderiam ser utilizados para atender as necessidades do projeto. Os parâmetros observados foram: modelo, zona morta, distância máxima, resolução, abertura, comprimento de onda, taxa de leitura, modo de comunicação, e proteção, custo e endereço de compra, assim como o *datasheet* do fabricante. Os sensores de micro-ondas foram rejeitados devido ao grande ângulo de abertura. Todas as informações foram ordenadas em uma planilha intitulada “PlanListaSensores.pdf”.

Os demais experimentos da Etapa 2, relacionados aos sensores, foram repetidos com diferentes conjuntos de sensores, configurações, calibrações e condições:

01 – Experimento Exploratório de Campo (Local: Anversa), com uso de cinco sensores ultrassônicos HC-SR04, distribuídos em uma barra de 2 metros, acionados de

forma sequencial. Sua construção é observada no relatório “RelAnversa5sensores .pdf” (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021p).

02 – Experimento em Laboratório, para identificar o ângulo de abertura do sensor HC-SR04, sua capacidade de detectar diferentes objetos e detectar uma touceira do capim-annoni em várias distâncias é observado no relatório “RelHCSR04.pdf” (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021m).

03 – Experimento de Laboratório, para identificar o ângulo de abertura dos sensores *Time-of-Flight Sensor — STMicroelectronics* modelos VL53L0X e VL53L1X, sua capacidade de detectar diferentes objetos, entre eles, uma touceira do capim-annoni em distância variável, com ajuste padrão. Seus resultados são observados no relatório “Expl53l1x.pdf” (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021n).

04 – Experimento de Campo (Local: Anversa), com o VL53L1X e o HC-SR04, sua capacidade de detectar as diferentes alturas da touceira do capim-annoni com ajuste padrão é observado no relatório “RelAnversa5sensores .pdf” (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021j).

05 – Experimento de Campo (Local: Ginásio Presidente Médici) com o VL53L1X e o HC-SR04, sua capacidade de detectar as diferentes alturas da touceira do capim-annoni com ajuste padrão, inclusão do sensor de campo Hall e giroscópio. Adicionalmente foi realizada a filmagem superior com as câmeras Survey 2 NIR e Survey 2 NIR + IR. Disponível no relatório “ExpInfrasEmCampo.pdf” (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021k).

06 – Experimento de Campo (Local: Anversa), com o sensor VL53L1X e o sensor HC-SR04, sua capacidade de detectar as diferentes alturas da touceira do capim-annoni com ajuste padrão, inclusão do sensor de campo Hall e giroscópio. Para a metodologia utilizada na medição manual do capim, utilizou-se a metodologia de medição manual indicada por Herrick *et al.* (2015), onde o mesmo propõe a utilização de um disco e um cordão no centro (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021l).

07 – Estudo da API e biblioteca do sensor VL53L1X e codificação para extrair dados do ambiente por meio das funções para calibração e *debug* (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021i).

08 – Experimento Exploratório de Campo (Área Experimental do Campus Unipampa Bagé), com o VL53L1X sobre diferentes condições de luminosidade e sua interferência na detecção de uma touceira de capim-annoni, variando as distâncias no modo de curta distância. Os pontos experimentados tiveram a luminosidade e temperatura

ao nível do solo (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021o).

O conjunto de atividades da Etapa 3, procurou avaliar o uso de atuadores e controle da altura dos aplicadores de defensivo da Campo Limpo e, baseado no relatório de Inspeção e Reparos Roçadeira Química Campo Limpo, no Campus Bagé, relatório (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021q), se realizou a desmontagem e avaliação do desgaste por uso da roçadeira química. O procedimento, possibilitou avaliar os diversos pontos necessários para modificar a Campo Limpo, para permitir um ajuste dinâmico de altura. Se constata que o sistema atual não prevê ajustes constantes, e se torna ineficiente, devido à necessidade de movimentar toda a massa da máquina, incluindo o tanque. Uma possível alteração seria composta do acoplamento de um motor, com redução, no eixo da manivela utilizada para erguer a roçadeira, utilizando rolamentos nas partes móveis relacionadas ao ajuste de altura. A mesma possibilidade poderia ser incorporada ao novo modelo, Campo Limpo+ 2021, após avaliação durante o processo de montagem e entrega técnica, conforme relatório (PIERAZZOLI, 2021b). Adicionalmente às melhorias apontadas para a Campo Limpo, na Campo Limpo+ 2021, existe a necessidade de incorporar atuadores no novo sistema estabilizador das abas laterais, dotado de rodados, o qual substituiu o antigo sistema de esquis.

O conjunto de atividades da Etapa 4, baseou-se em promover um controle aprimorado da vazão, com base no sensoriamento do capim. Sendo essa fase definida como uma prioridade do presente projeto de pesquisa. A seção 2.2.1.5 mostra os resultados parciais obtidos e a relação do funcionamento do sensor com os procedimentos investigados. Entretanto, ainda existem experimentos e condições a serem avaliadas, sobretudo utilizando o sensor laser, dada a sua capacidade de realizar a tarefa em condições controladas.

O conjunto de atividades da Etapa 5, teve por objetivo o controle da vazão, relacionando o deslocamento do equipamento no campo e rotação da bomba peristáltica que promove o afluxo da calda herbicida aos aplicadores. Esta etapa foi definida como uma prioridade de desenvolvimento devido ao custo e as vantagens obtidas. A seção 3.3 mostra a solução a ser implementada e o relatório (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021g) detalha os demais sensores e ferramentas necessários. Nos experimentos realizados, a aferição da velocidade e do deslocamento, passou a ser controlada por um sensor de campo Hall, em um disco com 8 magnetos de terras raras, como descrito na figura 26.

As demais atividades da Etapa 6, que realiza a calibração e ajustes conforme a disposição, são as próximas tarefas a serem desenvolvidas. As

atividades da Etapa 7 que prevê a setorização das cordas podem ser atendidas com o desenvolvimento de um novo sistema de bomba observada no relatório “RelContDinVazVelCampoLimpoUpgrades.pdf” (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021g), onde um ou mais motores movimentam múltiplas vias de uma bomba peristáltica, setorizando o aplicador.

O conjunto de atividades da Etapa 1 atende aos objetivos secundários do projeto UGV que está detalhado na seção C.7. Onde procurou-se relacionar a totalidade dos requerimentos e necessidades para iniciar o desenvolvimento de um novo equipamento.

O conjunto de atividades da Etapa 2 visou ajustar o modelo em CAD, para atender a complexidade de desenvolvimento em diferentes cenários de simulações.

O conjunto de atividades da Etapa 3 detalha a construção do protótipo em escala reduzida, para validar sistema de motores e movimentação da estrutura (Escala 6:1), conforme o relatório “RelConstrProtUGV.pdf” (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021f). Seu desenvolvimento permitiu um controle remoto efetivo do equipamento, como o passo inicial da automação.

Para o conjunto de atividades da Etapa 4 previa a validação do UGV. Entretanto, dada a dinamicidade das atividades de desenvolvimento, as animações são ajustadas frequentemente, adicionando mais detalhes e refinamentos de forma cíclica. Para o desenvolvimento técnico e dimensionamento de componentes, os relatórios “PlanUGV.pdf” (PIERAZZOLI, 2021a), como um *brainstorm*, o “PlanUGVpeso.pdf” (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021c) auxilia na modelagem do sistema de baterias e motorização, conforme o terreno. O documento (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021b) relaciona as combinações de recursos que compõem o peso do sistema, a planilha “PlanUGVpesoestrutura.pdf” (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021d) detalha o peso dos elementos do quadro, do conjunto de cordas e de uma série de materiais metálicos e compostos necessários para criar a carenagem, relacionando o impacto de cada solução em três ou mais espessuras. O relatório Georreferenciamento e Planejamento de Rota para Eficiência Energética “RelUGVGeoferenciamento.pdf” (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021h) visa esclarecer o custo energético e o dimensionamento de banco de baterias, faixa de operação dos motores e os diferentes perfis de pneus em condições pastagem e velocidade.

As atividades iniciais da Etapa 5 foram executadas e, atualmente, o desenvolvimento avançou na Atividade 18, referente a barra de sensor e para permitir que a estrutura receba os sensores de leitura e gere dados em uma condição próxima à

operação final.

A operação final foi detalha no relatório “Conjunto de experimentos Campo limpo com controlador automático, mangueira, trator-compactado.pdf” (PIERAZZOLI, 2021d), sintetizado como o capítulo 5 de resultados e discussões. Também inclui duas avaliações da aplicação e experimentos adicionais que investigam o comportamento da troca da mangueira da bomba, danificada por desgaste e a influência do ajuste com o trator desligado para os dois controladores.

APÊNDICE C – MODELAGEM DE UM VEÍCULO AUTÔNOMO

Um projeto secundário e futuro a este trabalho é a modelagem de um equipamento autônomo para controle de plantas invasoras, por meio da aplicação de defensivos químicos por contato (sem pulverização e deriva) em um campo heterogêneo/nativo, com capacidade de operar sem interrupção, com eficiência igual ou superior à roçadeira Campo Limpo, considerando um novo cenário, de operação automatizada, a flexibilidade de horários permite implementar uma estratégia de atividades em faixas de horários que eram restritas por custos e outras circunstâncias, como as aplicações noturnas. Também se pode priorizar as atividades de recarga e manutenção dos equipamentos, considerando as melhores condições de rendimento na aplicação dos defensivos.

C.1 Veículos autônomos terrestres ou *unmanned ground vehicle* (UGV)

O uso de veículos autônomos terrestres ou *unmanned ground vehicle* (UGV) e seu grau de automação tem sido definido pelo ASTM Comitê F45 em veículos industriais guiados automáticos sem condutor. Ele representa as novas ferramentas para produção e trabalho na agropecuária, gerando resultados com mais sustentabilidade e expondo menos o ser humano a riscos e produtos químicos. No contexto de autonomia e níveis de inteligência, o uso e alimentação dos sistemas de informação geográfica (SIG) ou *Geographic Information System* (GIS) influencia na eficiência e custos operacionais ao realizar o planejamento das missões, cada vez mais complexas devido ao modelo de equipamentos menores trabalhando de forma colaborativa e coordenada em uma *Smart Farm*. Os UGV podem ampliar a capacidade humana, onde, Våljaots *et al.* (2018) um UGV de 470 kg que pode repetir de forma automática tarefas de amostragem do solo. Seu protótipo foi desenhado para armazenar 140 amostras, e obteve um resultado 50% mais rápido que o método tradicional, necessitando da intervenção humana apenas para planejar a rota, transportar o robô e receber o conjunto de amostras coletadas ao final da tarefa. Além disso, apontaram como futuro desenvolvimento o uso de mais sensores para permitir a umidade, densidade do solo, temperatura, etc.

C.2 Benefícios de equipamentos autônomos

A maioria dos UGVs tem como vantagem o tamanho reduzido, a robustez, quantidade reduzida de partes, agilidade para mudança de direção e menos atuadores. O uso coordenado de vários UGVs pode custar o mesmo que máquinas grandes e realizar a mesma quantidade de trabalho e permite que se adquira UGVs de forma incremental, reduzindo a necessidade de um grande investimento imediato. Além disso, múltiplos UGVs podem continuar a tarefa mesmo se alguns deles falharem, replanejando automaticamente a tarefa. O peso reduzido, em comparação aos conjuntos tracionados por tratores, ocasiona menor compactação do solo (GONZALEZ-DE-SANTOS *et al.*, 2020).

"embora vários pequenos robôs possam custar o mesmo que uma grande máquina e realizar a mesma quantidade de trabalho, o uso de pequenos robôs permite que um sistema multi-robôs continue uma tarefa, mesmo se vários robôs falharem. Além disso, o peso reduzido dos pequenos robôs reduz a compactação do terreno e permite que os agricultores adquiram robôs de forma incremental."(GONZALEZ-DE-SANTOS *et al.*, 2020, tradução nossa)

O desenvolvimento do equipamento autônomo deve permitir o uso de múltiplos equipamentos, flexibilizando a produção e alterando a perspectiva de um operador de trator para um gerente de frota de máquinas autônomas. Essa transformação parece se mostrar mais sustentável por gerar menos impacto ambiental, sobretudo pela possibilidade do uso de energia fotovoltaica, redução do uso de defensivos, e ação contínua de combate a plantas invasoras.

Outro desafio relacionado ao investimento em um equipamento de grande porte, é que ele pode ser subdimensionado ou superdimensionado para a tarefa, e nem sempre apresenta a melhor relação de custo operacional e custo de manutenção. O equipamento idealizado visa ser simples e robusto e, embora a manutenção (preventiva, corretiva e reforma geral) seja uma atividade inevitável, muitas vezes negligenciada, a programação com antecedência das paradas para manutenção preventiva, ajustes, lubrificações e substituição de componentes, pode reduzir o custo temporalmente. Trazendo benefícios como aumento no prazo entre manutenções, redução da probabilidade de problemas durante a operação no campo, entre outros fatores.

C.3 Compactação do Solo

Tim Chamen *et al.* (2015) identificaram que uma economia de energia de 70% pode ser alcançada no cultivo mudando de sistemas tradicionais de tração (255 MJ/ha)

para um sistema sem tração (79 MJ/ha) para realizar a tarefa de arar o solo. Também estimou que 80-90% da energia do sistema tradicional de cultivo é usada para reparar o dano causado por grandes tratores. Assim, sistemas mais leves e inteligentes causam menos compactação no solo, trazendo menos perdas de produtividade por compactação e operação de aragem ou revolvimento do solo, onde mesmo um trator agrícola leve de 38 a 47 cv tem o peso em ordem de Marcha de 1240 a 2550 kg.

C.4 Automação Agrícola

A necessidade de aumento da produção leva a automação e conforme o Censo Agropecuário 2017 IBGE (2017), houve aumento nos investimentos em novas tecnologias e, o número de tratores cresceu 49,7% em 11 anos, somando 409.189 unidades na comparação com o Censo Agropecuário de 2006, totalizando 1.229.907, onde também se observou o crescimento da produtividade.

"A automação, segundo o conceito adotado pela Embrapa, é um sistema onde os processos operacionais de produção agrícola, pecuária e/ou florestal são monitorados, controlados e executados por máquinas e/ou dispositivos mecânicos, eletrônicos ou computacionais, para ampliar a capacidade de trabalho humano."(INAMASU *et al.*, 2016)

Enquanto a automação amplia a capacidade humana, gera-se a necessidade de melhorar a qualificação entre os usuários, pois "43,4% (2.913.348 produtores) frequentaram até o fundamental e, destes, 66,5% não concluíram o curso" (IBGE, 2017).

A automação por meio da robótica sobre os processos agrícolas e pecuários visam aumentar a produtividade, otimizar o uso do tempo. É uma tendência e necessidade, melhorar a qualidade de vida do trabalhador rural, especialmente em tarefas repetitivas ou que requerem um grande esforço físico, também deve ser considerado os dados do Censo Agropecuário (IBGE, 2017) relacionados ao envelhecimento e pela baixa sucessão familiar na agricultura, onde a contribuição percentual de faixa etária de 45 a 55 anos corresponde a 24,2%, 55 a 65 anos 23,5% e acima de 65 anos corresponde a 23%, totalizando 70,7% dos trabalhadores. Roshanianfard *et al.* (2020) também citam o envelhecimento em nações mais desenvolvidas como Japão e os Estados Unidos, onde a idade média dos fazendeiros é de 65,9 anos e 55,9 respectivamente em 2017 e 2019.

O controle de plantas daninhas representa uma das atividades que consome mais tempo e energia, além de ser um dos fatores que mais afeta o rendimento e a produtividade agrícola.

"A introdução da robótica no controle de plantas daninhas parece ter um futuro promissor. No entanto, a relação custo-benefício, a confiabilidade e a facilidade de uso são questões que devem ser consideradas para garantir uma integração futura adequada no gerenciamento da fazenda."(WEIDE *et al.*, 2008, tradução nossa)

C.4.1 Veículo aéreo não tripulado (VANT) ou *unmanned aircraft systems* (UAS)

Os VANT, UAS e aerodrones se tornaram populares para fins criativos e de pesquisa por acoplar ao voo equipamentos como câmeras que fotografam e filmam com qualidade. Entretanto, os UAS são equipamentos mais complexos ao utilizar sensores com GNSS, altímetro, bússola, giroscópio, transponder, ultrassônico e infravermelho, estando todos vinculados a uma unidade inercial de movimento, podendo ter as mais diversas finalidades, como inventário florestal censitário Melo Junior (2019), que utiliza a fotometria com os sensores de distância para gerar dados da morfometria da copa das árvores. Outras aplicações como pulverização de defensivos, mapeamento com câmeras utilizando filtros como infravermelho próximo (NIR), e índices como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), obtido da soma do filtro de espectro vermelho e NIR. Permitem identificar nas plantações problemas hídricos, infestações de pragas ou deficiência de nutrientes, sendo mais relevantes em períodos onde as fotos de satélite não estão disponíveis devido a condições atmosféricas. Também são relatados sistemas de segurança contra o abigeato (SOARES, 2018). Outro aspecto que pode ser explorado é o uso de entregas de ferramentais e logística de suporte no campo, tirando vantagem da velocidade e agilidade do equipamento.

C.5 Trabalhos Correlatos UGV

Bakker *et al.* (2010) descrevem um modelo sistemático de desenvolvimento de uma roçadeira autônoma para uso em agricultura orgânica, restrita ao uso de defensivos químicos. Seu *design* visa atender um campo de beterrabas cultivado em linhas, onde levanta diversas possibilidades técnicas sem uso de químicos e amplas possibilidades de aplicação. A figura 75 ilustra as diversas opções avaliadas e sua escolha de *design*, que automatiza a roçada mecânica em linha e entre as plantas na linha, um procedimento que realizado de forma manual é trabalhoso e tem alto custo com os trabalhadores.

Seiferth (2020) desenvolveu um protótipo de roçadeira mecânica autônoma com

Figura 75 – Gráfico morfológico de Roçadeira Autônoma com finalidade de Agricultura Orgânica

Determine where intra-row weeding has to be performed							
	seed mapping	shape & color	pattern	spectral reflectance	seed mapping, shape & color	seed mapping, spectral refl.	shape & color, pattern
	shape & color, spectral refl.	pattern, spectral refl.					
Positioning of weeding							
	GPS	GPS, dead reckoning	dead reckoning	camera			
Intra-row weeding							
	mechanical	air	flaming	electrical	hot water	freezing	microwaves
	infrared	laser	water jet				
Determine if within field							
	GPS	GPS, dead reckoning	vision, dead reckoning				
Navigate along the row							
	GPS	GPS, dead reckoning	vision	vision, dead reckoning	tactile, dead reckoning	ultrasonic, dead reck.	optical, dead reckoning
	GPS, tactile	GPS, ultrasonic	GPS, optical				
Determine if on headland							
	GPS	GPS, dead reckoning	vision	vision, dead reckoning	ultrasonic, dead reck.	optical, dead reckoning	
Navigate on the headland							
	GPS	GPS, dead reckoning	dead reckoning	vision, dead reckoning	GPS, vision	GPS, dead reck., vision	
Supplying energy							
	fill up	power point	sun				
Convert energy into movement							
	gas engine	diesel engine	electric engine				
Transmission of movement							
	gear-box	continuous variable	hydrostatic				
Move							
	3 wheels	4 wheels	2 tracks	4 tracks			
Input of robot settings							
	board/computer	pda	pc	wap	webpage		
Sending user status info at request							
	board/computer	sms	pda	pc	wap	webpage	
Notify status to user							
	board/computer	sms	pda	pc	wap	webpage	
Detect unsafe situations							
	super canopy front & rear	super canopy around	sub canopy front & rear	sub canopy around	super & sub front & rear	super & sub around	

Fonte: Bakker *et al.* (2010)

a função de remover touceiras e semear com precisão os locais danificados pelos cascos dos animais. Seu protótipo se baseou em um veículo, que recebeu melhorias, como um sistema de GNSS e atuadores para o deslocamento e um *scanner* laser 2D, para localizar em tempo real os pontos com solo exposto ou com touceiras. Seus resultados foram a economia de combustível por utilizar a roçada mecânica apenas quando necessário e o aumento da qualidade da pastagem por homogeneizar a forragem.

Roshanianfard *et al.* (2020) avaliaram diversos veículos autônomos de uso agrícola, desenvolvidos na universidade japonesa de Hokkaido, e afirmam que a robótica na fazenda irá desempenhar um papel significativo na agricultura sustentável. Sua investigação classificou e caracterizou diversos veículos autônomos de uso agrícola, por função e plataforma no período de 1990 a 2018, onde apontam as principais dificuldades encontradas no desenvolvimento, como a necessidade de uma transmissão automática e controlável eletricamente, políticas de segurança para controle de acordo com regulações internacionais e específicas, acesso à *Engine Control Unit* — ECU ou Unidade de Controle do Motor por um padrão conhecido, ou criação de uma ECU própria, um SSD para armazenar os dados devido à vibração e necessidade de acesso rápido aos dados, um sistema de navegação baseado em GNSS que considere áreas de baixo desempenho e obstáculos como árvores e construções. Por fim, destacam que a lógica de controle e algoritmo devem ser o mais simples possível e considerar os parâmetros importantes.

C.6 Contribuições para o projeto UGV

Uma possível solução a ser estudada é baseada na calibração local e por época do ano, visando aumentar a eficiência e observar se a margem de erro permite operar de forma eficiente e qual o nível de precisão obtido. O livro de Seiferth (2020) contribuiu ao reforçar a necessidade de o acessório para semear os locais com as manchas tratados. Nele é detalhado seu processo de construção de um UGV, a partir de uma plataforma e como o uso do sensor Lidar permitiu gerar economia de combustível em sua roçadeira mecânica e semeadora. A contribuição de Bakker *et al.* (2010), se deu por sua metodologia em descrever um modelo sistemático do desenvolvimento de uma roçadeira mecânica autônoma, utilizada em um ambiente com relativo controle, por se tratar de uma plantação em linha. E com base nas tabelas de especificações definidas para o projeto, foi construído o gráfico morfológico com as propostas observadas, selecionando as opções do projeto. Ao prever uma *docking station*, visto que o sistema faz o uso de defensivos químicos,

o modelo construído contém mais elementos e possibilidades. Já Roshanianfard *et al.* (2020) contribuíram ao apontar uma série de gargalos ao desenvolvimento da proposta do UGV, realizando uma análise de cada área do desenvolvimento.

Por fim, pode-se dizer que as propostas estudadas nos artigos correlatos preenchem parte das lacunas para o atual equipamento e geram soluções na construção do UGV. Entretanto, visto que não utilizam sensores de baixo custo e estão restritos a ambientes muito controlados, como terrenos completamente planos e plantações em linha, perfeitamente espaçadas, percebe-se que a proposta de uso do sistema de cordas, autônomo, se apresenta como uma área complexa e não explorada pelo uso de sensores de baixo custo, em um ambiente de pastagem nativa com altura heterogênea.

C.7 Projeto do UGV

O projeto de modelagem e desenvolvimento do UGV, definido como objetivo secundário deste trabalho, busca a inovação do controle por meio da criação de um equipamento autônomo. Sob a premissa de que é preciso buscar por formas mais eficientes e, em simultâneo, mais sustentáveis de produção em fazendas, considera-se que a infraestrutura e os equipamentos são fatores-chave. Neste contexto, a agricultura de precisão é uma solução relevante, por ser baseada em um conjunto de métodos e controle de excesso de variáveis que permitem um manejo localizado, a partir da variabilidade existente. Nesse cenário, a automação e a robotização podem fazer a diferença em fazendas inteligentes, especialmente para combater plantas invasoras, considerada uma das atividades que mais consome energia nos sistemas produtivos.

C.7.1 Proposta de estrutura e componentes do UGV

Foram estipulados alguns requisitos para o desenvolvimento do UGV como, funcionamento sem o uso de combustíveis fósseis, capacidade de geração de energia por painéis fotovoltaicos, largura de trabalhos de 2 metros e a capacidade para cobrir, no mínimo, 1 hectare por dia. Espera-se obter do equipamento um funcionamento ininterrupto, realizando pausas apenas para repor insumos e carregar a bateria. É simulado um peso de 300 kg, com o reservatório carregado de 60 litros, uma quantidade geralmente usada para cobrir dois hectares. Por simulações usando o *software Blender*, foram gerados

os modelos 3D conforme as especificações definidas. Entre eles, um protótipo para experimentos do uso dos quatro motores e como os primeiros passos para o controle autônomo no relatório “RelConstrProtUGV.pdf” (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021f). A figura 76 apresenta o gráfico morfológico da proposta de automação nas opções avaliadas para a tarefa de recuperação de pastagens nativas infestadas. Entre as possíveis especificações, selecionamos o modelo de operação, detalhado na tabela 28 e tabela 29 que relacionam os requisitos do UGV e a tabela 30 para acessórios como a estação de recarga e o reboque acoplável.

O controle da direção para manobrabilidade é obtido pelo controle independente de rotação de cada uma das rodas como o *skid*, que tem como vantagens um tamanho compacto, robustez e menos componentes que um sistema tradicional, baseado em pivôs e articulações das rodas. Esse sistema também é ágil para realizar mudanças no trajeto de aplicação. Entretanto, em suas considerações Roshanianfard *et al.* (2020) recomendam observar possíveis limitações relacionadas a outras aplicações, dadas as restrições de segurança na operação. As simulações realizadas computacionalmente previram o desenvolvimento de um modelo com capacidade de realizar curvas de 180 graus, para a mudança de sentido, em um raio de 2 metros, baseado na largura do aplicador, de modo a facilitar a transição entre linhas. A suspensão rígida, com o sistema de controle de direção e o corpo bipartido, articulado, são considerados adequados para a baixa velocidade de operação, que deve ocorrer entre 1 e 3 km/h. A figura 77 mostra a estrutura tubular com os motores, caixa de redução e o sistema de cordas em verde.

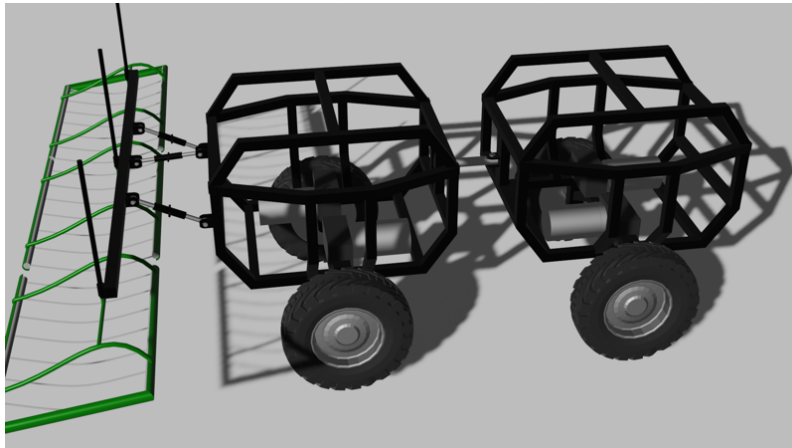
Para operação do equipamento foi necessário prever um conjunto de procedimentos automatizados, quando uma tarefa termina, ou após períodos longos de funcionamento, como o abastecimento de insumos e de energia. Na solução proposta foi prevista a construção de uma estação de recarga e manutenção (*docking station*), capaz de armazenar e facilitar o transporte de vários equipamentos. Os requisitos de segurança do equipamento são relativos a um equipamento operando em velocidade reduzida, permitindo flexibilizar a especificação dos sensores para detectar obstáculos. Entretanto, o sistema deve desviar de obstáculos maiores do que as rodas, bem como erguer a parte do sistema com os aplicadores de herbicida, impedindo que o mesmo colida com algum obstáculo, evitando as falhas catastróficas. O armazenamento dessas informações também permitirá mapear os obstáculos para gerar a melhor rota em operações futuras. Um sistema com vários níveis de redundância foi pensado para o veículo, permitindo manter a operação com o mínimo de interrupções. Externamente, o UGV conta com

Figura 76 – Gráfico morfológico da Roçadeira Autônoma proposta

Posicionamento da remoção de ervas daninhas							
	Forma e cor	Reflectância espectral	GNSS	Visão de máquina	Ultrassônico	Óptico	Tátil
Remoção de ervas daninhas							
	Mecânica	Ar comprimido	Chama	Descarga elétrica	Água quente	Congelamento	Microondas
	Infravermelho	Laser	Jato de Água	Herbicida Pulverização	Herbicida Contato por tapete	Herbicida Contato por rolo	Herbicida Contato por Cordas
Determine se dentro do campo							
	GNSS	GNSS	Visão de máquina				
Determinar e navegar na cabeceira							
	GNSS	GNSS	Visão	Visão	Ultrassônico	Óptico	
Fonte de energia							
	Abastecimento	Rede elétrica	Solar	Baterias	Reogerador	Supercapacitor	Ar comprimido
Converter energia em movimento							
	Motor a gasolina	Motor diesel	1 Motor elétrico	2 Motores elétricos	3 Motores elétricos	4 Motores elétricos	6 Motores elétricos
	Motor Pneumático						
Transmissão do movimento							
	Transmissão por engrenagem	Transmissão variável	Transmissão por corrente	Transmissão hidráulica			
Deslocamento							
	3 rodas	4 rodas	6 rodas	2 esteiras	4 esteiras		
Entrada das configurações do robô							
	Computador de bordo	SMS	Software Mobile	Webpage	Wireless	Retransmissão Docking Station	
Enviar informações de status a pedido							
	Computador de bordo	SMS	Software Mobile	Webpage	Wireless	Retransmissão Docking Station	
Notificar o usuário							
	Computador de bordo	SMS	Software Mobile	Webpage	Wireless	Retransmissão Docking Station	
Segurança							
	Ajuste de rota	Obstáculos nas rotas	Manuseio do defensivo	Deteção de vazamentos	Anti-collisão	Animais	Humanos
Controle de Insumos							
	Misturador de insumos	Concentração água/ calda/ adjuvante	Transferência entre UGVs	UGV Tanque			
Docker Station							
	Inspeção e Reparos	Autotestes	Limpeza das Placas	Higienização das rodas	Higienização do aplicador		
	Wireless	Recarga de Insumos	Recarga elétrica	Agitador e misturador	Preservação (Temporária)	Preservação (Curta)	Preservação (Longa)
Coordenação da missão	Processamento de dados	Geração Solar (Off gride)	Geração Eólica	Baterias	Rede elétrica		

Fonte: Adaptado de Bakker *et al.* (2010)

Figura 77 – Estrutura e sistema de tração com motores independentes e redução da Roçadeira Autônoma



Fonte: Pierazzoli e Domingues (2022)

interruptores de emergência em local visível e acessível, para desligamento rápido em caso de acidente. A navegação no campo necessita precisão do posicionamento, considerado um dos requisitos com maior importância. O plano e a rota precisam ser criados com eficiência, considerando objetos conhecidos, estradas, pontes, porteiras e reagir a elementos desconhecidos de forma segura. O uso de *Geographic Information System* (GIS), permite armazenar as informações físicas sobre os terrenos, de modo garantir o planejamento do tráfego conforme as características de inclinação, altitude e capacidade de manobrar. Também foi observado o impacto do consumo de energia elétrica no relatório “RelUGVGeoferenciamento.pdf” (PIERAZZOLI; DOMINGUES, 2021h).

Tabela 28 – Definições do projeto UGV (continua)

	Requerimentos	Descrição
Sistema	Aplicador seletivo de herbicida por cordas	altura automática, vazão automática, trajeto programado com áreas de restrição
Procedimento geral	Opera sem animais na área Tempo por hectare Velocidade de locomoção Velocidade mínima de operação Velocidade padrão de operação Declividade máxima Largura total Capacidade mínima desejável de operação Velocidade máxima de deslocamento	menor que 5 horas 1100 a 4600 metros por hora 500 metros por hora 1000 metros por hora 30 graus 2,0 metros >0,56 m ² /s 4 km/h
Deteção do substrato	Tamanho mínimo da touceira detectável Altura mínima da planta invasora Altura máxima Identificação de altura e densidade (sensor)	20 x 20 cm 10 cm 70 cm laser, ultrassônico, contato
Aplicador do defensivo	Aplicador Largura do aplicador Seções Altura mínima Altura máxima Vazão máxima Tanque de polietileno 30L	cordas umedecidas 2 metros 3 partes 10 cm 110 cm 0,5 Litros/minuto 60 litros
Chassi	Altura do solo Altura da estrutura Ângulo de subida máximo Estrutura Painel de revestimento Acesso para manutenção Capacidade de reboque Articulação de ligação	>40 cm >120 cm 30 graus Retangular em aço carbono Material composto Tampa superior 200 kg Permite as 4 rodas no solo
Fonte de energia	Operação contínua Baterias 104 Ah 48 V Supercapacitores Conversor DC-DC MPPT Painel solar (Desacoplável na Docking Station)	24 horas Aproximadamente 5 kWh 48 V 16 F 1500W 4x 330 W

Tabela 29 – Definições do projeto UGV (continuação)

	Requisitos	Descrição
Peso do UGV	193 kg incluindo as baterias	
Peso total máximo	260 kg	
Tracionamento	4x4 Motor elétrico 48 V 700 W Diâmetro das rodas	4 unidades 45 cm
Nível de ruído	Datasheet do motor	Menor que 60 dB
Controle e navegação	Trajeto planejado GNSS com correção GNSS em 2 pontos Controle automático por rádio Controle direcional	Rota - Ardupilot precisão de 10 cm Rotação das rodas
Temperatura de operação e umidade	Segue as recomendações do produto aplicado	10 a 40 graus celsius, 50% < umidade relativa < 100%
Temperatura de armazenamento	Segue as recomendações do componente mais sensível	-10 a 50 graus celsius
Vida útil projetada	Acima de 10 anos para os componentes estruturais	Demais componentes comuns do mercado
Sistemas de segurança	Mapeamento de restrições Identificar e evitar obstáculos Visão computacional para detectar obstáculos Barra na frente do veículo para colisões Geo cerca e controle de velocidade para desligamento Desativação remota Botões no chassi para desligamento de emergência Freio acionado por cabo Freio magnético (regenerativo do motor) Requisitos de segurança do chassi Normas de resíduos de defensivos Detecção de vazamentos	

Tabela 30 – Definições do projeto UGV (conclusão)

	Requisitos	Descrição
Reboque	Reboque para repor insumos (calda, sementes, carga elétrica)	Acoplado em um UGV
	Docking Station	Insumos, reparos
	Peso	20 kg
	Capacidade mínima	120 L
Docking station	Capacidade de recarga rápida ou substituição de baterias	Uso de painéis solares
	Peças de reposição e ambiente para reparos simples	Troca de mangueiras, nipples
	Recepção, processamento e transm. de dados para fazenda	Maior potência de transmissão, antenas
	Reserva de água e defensivo	Calda ou limpeza do sistema
	Sistema de segurança para armazenamento dos UGVs	Contra intempéries, armazenar múltiplos UGVs
	Rebocável por trator	
	Normas de resíduos de defensivos (líquidos)	
	Mini estação de tratamento	Filtro de areia e carvão
Coletor de água da chuva		
Semeador	Uso dinâmico	Local dessecado ou sem plantas
	Taxa de referência	4 kg/ha
	Ativação	Gravidade
	Peso	10 kg
	Consumo elétrico	5 Wh

Fonte: Autor (2022)