

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Dissertação de Mestrado

**Modelagem Dinâmica Híbrida Aplicada a Pulverizadores  
Agrícolas em Barras com Tecnologia de Aplicação  
Liga/Desliga**

Gabrielle Almeida Duarte

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews-Jr  
Co-orientador: Prof. Dr. Eder Mateus Nunes Gonçalves

Rio Grande, 2021

### Ficha Catalográfica

D812m Duarte, Gabrielle Almeida.

Modelagem dinâmica híbrida aplicada a pulverizadores agrícolas em barras com tecnologia de aplicação liga/desliga / Gabrielle Almeida Duarte. – 2021.

105 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Computação, Rio Grande/RS, 2021.

Orientador: Dr. Paulo Lilles Jorge Drews-Jr.

Coorientador: Dr. Eder Mateus Nunes Gonçalves.

1. Agricultura de Precisão 2. Pulverizador em Barras 3. Tempo de Atraso 4. Automação 5. Modelagem 6. Sistemas Dinâmicos Híbridos  
I. Drews-Jr., Paulo Lilles Jorge II. Gonçalves, Eder Mateus Nunes  
III. Título.

CDU 004:631

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

## DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

### **Modelagem Dinâmica Híbrida Aplicada a Pulverizadores Agrícolas em Barras com Tecnologia de Aplicação Liga/Desliga**

Gabrielle Almeida Duarte

Banca examinadora:



Documento assinado digitalmente  
Julio Elias Normey Rico  
Data: 10/11/2021 20:52:05-0300  
CPF: 762.840.859-15  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Dr. Julio Elias Normey-Rico



---

Prof. Dr. Marcelo Becker



---

Profa. Dra. Silvia Silva da Costa Botelho



Documento assinado digitalmente  
Eder Mateus Nunes Goncalves  
Data: 11/11/2021 11:04:47-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

---

Prof. Dr. Eder Mateus Nunes Gonçalves  
Coorientador



---

Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews Junior  
Orientador

*Descobrir consiste em olhar para o que todo mundo  
está vendo e pensar uma coisa diferente.*

— ROGER VON OECH

## RESUMO

DUARTE, Gabrielle Almeida. **Modelagem Dinâmica Híbrida Aplicada a Pulverizadores Agrícolas em Barras com Tecnologia de Aplicação Liga/Desliga**. 2021. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande.

A aplicação tradicional de agrotóxicos tem sido motivo de preocupação tanto para ambientalistas, quanto por parte dos agricultores. Ao mesmo tempo que o uso massivo dos agrotóxicos representa alto custo para agricultores de pequeno porte, sua aplicação é extremamente necessária e, portanto, indispensável em algumas situações. No entanto, o uso de tecnologias pode ajudar na redução da quantidade de produto aplicado, resultando tanto em economia de produto quanto em redução dos impactos ambientais agregados. Nesse sentido, o projeto AutoCERES desenvolveu um aparato experimental com equipamentos de baixo custo para levantamento de parâmetros e comportamento dos sistemas de pulverização. Logo, o projeto de dissertação que é apresentado a seguir tem como tema a análise e modelagem do sistema completo de pulverização automatizado desenvolvido pelo AutoCERES, de modo que seja possível verificar o comportamento dinâmico deste mediante variação de parâmetros do sistema. O objetivo é representar os atrasos inerentes ao sistema e a modelagem do sistema de pulverização automatizado que visa determinar a abertura e o fechamento de bicos de pulverização. É apresentada a metodologia adotada tanto para a construção do modelo dinâmico híbrido do sistema quanto para a estimação dos atrasos do sistema. São realizados ensaios e experimentos com câmera de alta velocidade para análise da dinâmica da trajetória das gotas de pulverização e da dinâmica envolvida nas válvulas solenoides adotadas no protótipo estudado. Além disso, é realizado um levantamento da complexidade do algoritmo de visão computacional adotado, bem como são realizados alguns experimentos em *software* para verificar tal complexidade. É realizada também a descrição de todos os blocos de estados e eventos implementados para simulação e os resultados obtidos a partir de tais simulações em *software*. Nos resultados obtidos são elaborados cenários de teste onde é avaliada a sensibilidade da saída do modelo dada a variação dos seus parâmetros. Ainda, é apresentado o impacto de cada parâmetro no sistema completo, onde é possível observar, por exemplo, que um aumento de apenas 5% na velocidade do trator, impacta em uma redução de 11% no tempo disponível para a aplicação da calda sobre as plantas. Logo, é apresentado o efeito causado na atuação das válvulas de controle e os parâmetros que mais influenciam a saída do sistema. Por fim, são abordadas algumas possibilidades para trabalhos futuros e citadas as publicações geradas no âmbito deste estudo.

**Palavras-chave:** Agricultura de Precisão, Pulverizador em Barras, Tempo de Atraso, Automação, Modelagem, Sistemas Dinâmicos Híbridos.

## ABSTRACT

DUARTE, Gabrielle Almeida. **Hybrid Dynamic Modeling Applied to Bar Agricultural Sprayers with On/Off Application Technology**. 2021. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande.

The traditional application of pesticides has been a cause of concern for both environmentalists and farmers. While the massive use of pesticides is costly for small farmers, their application is extremely necessary and therefore indispensable in some situations. However, the use of technologies can help to reduce the amount of product applied, resulting in product savings and reduced aggregate environmental impacts. In this context, AutoCERES project developed an experimental apparatus with low cost equipment to survey parameters and behavior of spraying systems. Then, this master's project has as its theme the analysis and modeling of the complete automated spraying system developed by the AutoCERES, so that it is possible to verify its dynamic behavior by varying the system parameters. The objective is to represent the inherent delays of the system and the modeling of the automated spraying system that aims to determine the correct time for opening and closing spray nozzles. The adopted methodology for construction of hybrid dynamic model of the system and also for estimation of system delays is presented. Tests and experiments are carried out with a high-speed camera aiming to analyze the spray dynamics droplets trajectory and the dynamics involved in solenoid valves adopted in studied prototype. In addition, a survey of computer vision algorithm complexity adopted is carried out, as well as some *software* experiments to verify such complexity. It is also performed a description of all state blocks and events implemented for simulation and the results obtained from such *software* simulations. In results obtained, test scenarios are elaborated where model's output sensitivity is evaluated given the variation of its parameters. Furthermore, the impact of each parameter on complete system is presented, where it is possible to observe, for example, that an increase of only 5% in tractor speed, impacts on a reduction of 11% in the time available for plants application. Then, the effect caused on actuation of the control valves and the parameters that most influence the system output are presented. Finally, some possibilities for future work are discussed and publications generated within the scope of this study are mentioned.

**Keywords:** Precision Agriculture, Boom Sprayer, Delay Time, Automation, Modeling, Hybrid Dynamic Systems.

## LISTA DE FIGURAS

1	Imagem com destaque para a diferença de posição entre sensores e atuadores (VONDRICKA; HLOBEN; LAMMERS, 2007). . . . .	13
2	Conceito de sensoriamento em tempo real para sistema de controle de pulverizadores agrícolas em barras (TIAN; REID; HUMMEL, 2000). . . . .	14
3	Organização do AutoCERES. . . . .	14
4	Solução proposta por (HANKS; BECK, 1998). . . . .	17
5	Solução proposta por (OZLUOYMAK et al., 2019). . . . .	19
6	Modelo para helicóptero criado no <i>Ptolemy II</i> por (LIU et al., 1999). . . . .	21
7	Modelo de gestão de painéis solares fotovoltaicos criado no <i>Simulink</i> por (CASTANEDA et al., 2013). . . . .	22
8	Protótipo adaptado para realização da pesquisa (TERRA; ROSA; DREWS, 2019). . . . .	24
9	Dados catalogados do bico de pulverização (Canal Agrícola, 2021). . . . .	24
10	Instalação das válvulas solenoides. . . . .	25
11	Instalação dos sensores de pressão e vazão. . . . .	25
12	Arquitetura de controle e automação. . . . .	26
13	Painel de controle e caixa de conexões. . . . .	27
14	Fluxograma de funcionamento do sistema. . . . .	28
15	Bloco de aquisição de imagem. . . . .	29
16	Bloco de processamento de imagem. . . . .	30
17	Bloco GPS e IMU. . . . .	30
18	Bloco de transformação imagem-mundo. . . . .	31
19	Bloco atraso espacial de aquisição. . . . .	31
20	Bloco pressão e vazão. . . . .	32
21	Bloco de processamento do controlador. . . . .	32
22	Bloco de atraso de processamento do controlador. . . . .	33
23	Bloco de comparação de atrasos do sistema. . . . .	33
24	Bloco tempo de aplicação. . . . .	34
25	Bloco tomada de decisão. . . . .	34
26	Bloco de atuação. . . . .	35
27	Gráfico comparativo entre dados de tempo de processamento e reta ajustada. . . . .	37
28	Gráfico comparativo entre dados de tempo de processamento e reta ajustada. . . . .	38
29	Gráfico comparativo entre dados de tempo de processamento e reta ajustada. . . . .	39

30	Imagens do ensaio para obtenção do tempo de resposta das válvulas solenoide. . . . .	39
31	Modelo cinemático do conjunto trator-pulverizador. (ANDRADE; HERNANDES; BECKER, 2012) . . . . .	41
32	Ilustração do atraso temporal associado a diferença de altura entre bicos de pulverização e plantas. . . . .	41
33	Imagem do vídeo realizado para obtenção de parâmetros da trajetória das gotas. . . . .	44
34	<i>Frame</i> destacando o ponto inicial da gota mapeada. . . . .	45
35	<i>Frame</i> destacando o ponto final da gota mapeada. . . . .	46
36	<i>Frame</i> destacando a trajetória completa da gota mapeada. . . . .	46
37	Modelo do sistema de pulverização em ferramenta de simulação. . . . .	50
38	Máquina de estados de aquisição de imagem. . . . .	51
39	Máquina de estados de processamento de imagem. . . . .	53
40	Máquina de estados GPS e IMU. . . . .	54
41	Máquina de estados de transformação imagem-mundo. . . . .	56
42	Máquina de estados de atraso espacial de aquisição. . . . .	57
43	Máquina de estados de aquisição de dados de pressão e vazão. . . . .	58
44	Máquina de estados de processamento do Arduino. . . . .	59
45	Máquina de estados de comparação de atrasos. . . . .	61
46	Máquina de estados de tempo de aplicação. . . . .	62
47	Máquina de estados de tomada de decisão. . . . .	63
48	Máquina de estados de atuação. . . . .	65
49	Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina <i>Image Acquisition</i> . . . . .	69
50	Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina <i>Pressure and Flow Acquisition</i> . . . . .	69
51	Gráfico de visualização da sincronização entre máquinas de aquisição. . . . .	70
52	Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina <i>Image Processing</i> . . . . .	70
53	Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina <i>GPS IMU</i> . . . . .	71
54	Gráfico de visualização da sincronização entre máquinas de processamento de imagem e GPS e IMU. . . . .	72
55	Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina <i>Image-World</i> . . . . .	72
56	Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina <i>Spacial Acquisition Delay</i> . . . . .	73
57	Gráfico de visualização da variável <i>tempo_espacial</i> da máquina <i>Spacial Acquisition Delay</i> . . . . .	73
58	Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina <i>Arduino Processing</i> . . . . .	74
59	Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina <i>Delay Comparison</i> . . . . .	75
60	Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina <i>Application Time</i> . . . . .	75
61	Gráfico de visualização da variável <i>tempo_aplicacao</i> da máquina <i>Application Time</i> . . . . .	76

62	Gráfico de visualização da variável $t$ da máquina <i>Decision Make</i> . . . . .	76
63	Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina <i>Decision Make</i> para $t$ positivo. . . . .	77
64	Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina <i>Actuation</i> para $t$ negativo. . . . .	78
65	Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina <i>Actuation</i> . . . . .	78
66	Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina <i>Actuation</i> . . . . .	79
67	Gráfico de visualização da evolução dos estados das máquinas <i>Image Acquisition</i> e <i>Image Processing</i> para uma entrada cíclica. . . . .	80
68	Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina <i>Decision Make</i> e da variável $t$ para uma entrada cíclica. . . . .	80
69	Gráfico de saída da máquina <i>Decision Make</i> e da variável $t$ para a condição imposta no cenário inicial. . . . .	81
70	Gráfico de saída da máquina <i>Decision Make</i> e da variável $t$ para $Image\_time\_acquisition = 0,05\ s$ . . . . .	82
71	Gráfico de saída da máquina <i>Decision Make</i> e da variável $t$ para $Green\_percentual = 99\%$ . . . . .	83
72	Gráfico de saída da máquina <i>Decision Make</i> e da variável $t$ para $Camera\_distance = 1,86\ m$ . . . . .	83
73	Gráfico de saída da máquina <i>Decision Make</i> e da variável $t$ para $Tractor\_velocity = 2,69\ m/s$ . . . . .	84
74	Gráfico de saída da máquina <i>Decision Make</i> e da variável $t$ para $Bar\_height = 2,04\ m$ . . . . .	84
75	Gráfico de saída da máquina <i>Decision Make</i> e da variável $t$ para $Arduino\_time\_processing = 0,82\ s$ . . . . .	85
76	Gráfico de saída da máquina <i>Decision Make</i> e da variável $t$ para $Camera\_distance = 1,5\ m$ e $Tractor\_velocity = 1,6\ m/s$ . . . . .	86
77	Gráfico de saída da máquina <i>Decision Make</i> e da variável $t$ para $Tractor\_velocity = 3,0\ m/s$ , $Bar\_height = 0,5\ m$ e $Camera\_distance = 3,0\ m$ . . . . .	87
78	Pulverizador em barras tratorizado (VIARURAL, 2018). . . . .	95
79	Controle por seções de pulverizador em barras, onde as cores verde e vermelho representam os bicos abertos ou fechados, respectivamente. . . . .	96
80	Controle bico a bico de pulverizador em barras. Cores verde e vermelho representam bicos abertos ou fechados, respectivamente. . . . .	96

## LISTA DE TABELAS

1	Tabela comparativa entre soluções propostas por diferentes autores (parte 1). . . . .	20
2	Tabela comparativa entre soluções propostas por diferentes autores (parte 2). . . . .	20
3	Tabela comparativa entre ensaios de tempo de atraso das válvulas solenoide. . . . .	40
4	Coordenadas dos pontos inicial e final da trajetória da gota. . . . .	45
5	Coordenadas dos pontos inicial e final da trajetória da gota. . . . .	47
6	Tabela das variáveis do bloco de aquisição de imagem e seus respectivos tipos. . . . .	52
7	Tabela das variáveis do bloco de processamento de imagem e seus respectivos tipos. . . . .	53
8	Tabela das variáveis do bloco GPS e IMU e seus respectivos tipos. . .	55
9	Tabela das variáveis do bloco de transformação imagem-mundo e seus respectivos tipos. . . . .	55
10	Tabela das variáveis do bloco de atraso espacial de aquisição e seus respectivos tipos. . . . .	57
11	Tabela das variáveis do bloco de pressão e vazão e seus respectivos tipos. . . . .	58
12	Tabela das variáveis do bloco de processamento do Arduino e seus respectivos tipos. . . . .	60
13	Tabela das variáveis do bloco de comparação de atrasos do sistema e seus respectivos tipos. . . . .	60
14	Tabela das variáveis do bloco de tempo de aplicação e seus respectivos tipos. . . . .	62
15	Tabela das variáveis do bloco de tomada de decisão e seus respectivos tipos. . . . .	64
16	Tabela das variáveis do bloco de atuação do sistema e seus respectivos tipos. . . . .	65
17	Tabela com o mapeamento dos estados do modelo e seus respectivos identificadores. . . . .	68
18	Parâmetros iniciais utilizados no cenário de avaliação da sensibilidade do modelo. . . . .	81
19	Limites dos parâmetros obtidos para o cenário de avaliação da saída do modelo. . . . .	85

20	Parâmetros iniciais utilizados no cenário de avaliação da sensibilidade do modelo. . . . .	87
----	--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	Agricultura de Precisão
C3	Centro de Ciências Computacionais
CBAP	Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão
CPS	<i>Cyber-Physical Systems</i> (Sistemas ciberfísicos)
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> (Unidade de Medição Inercial)
INCA	Instituto Nacional do Câncer
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
ONU	Organização das Nações Unidas

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	12
1.1	Problema Científico	15
1.2	Objetivos	15
1.3	Organização do Trabalho	15
<b>2</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	16
2.1	Trabalhos Relacionados com Análise Dinâmica de Sistemas de Pulverização em Barras	16
2.2	Trabalhos Relacionados com Modelagem de Sistemas Dinâmicos Híbridos	19
2.3	Resumo do Capítulo	22
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	23
3.1	Protótipo do Pulverizador	23
3.2	Modelo Dinâmico Híbrido do Sistema	27
3.3	Análise dos Atrasos do Sistema	35
3.4	Modelo descrito em simulador	49
3.5	Resumo do Capítulo	65
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	67
4.1	Simulações	67
4.2	Resumo do Capítulo	88
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	89
5.1	Produção Científica	90
	<b>REFERÊNCIAS</b>	91
	<b>APÊNDICE A FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	94
A.1	Agricultura de Precisão	94
A.2	Pulverizadores Agrícolas em Barras	95
	<b>APÊNDICE B DADOS DE TEMPO DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM</b>	97

# 1 INTRODUÇÃO

A introdução de novas tecnologias para a produção de *commodities* agrícolas a partir da década de 50 acarretou em um aumento expressivo da carga de agrotóxicos utilizada no controle de pragas no campo. Devido a essas mudanças que a agricultura tem sofrido, de acordo com o Instituto Nacional do Câncer (INCA), os brasileiros tem consumido, em média, cinco litros de agrotóxico por ano (MILHORANCE, 2015).

Outro fator a ser considerado é que o problema também pode causar poluição ambiental e desequilíbrio do agrossistema (GRUTZMACHER et al., 2008; ZHANG et al., 2018). Prova disso é que, em alguns casos, 99,9% do produto aplicado tende a se mover para locais como águas superficiais e subterrâneas (RIBEIRO et al., 2007), pois de 30 a 50% da área total das plantações, não é coberta por plantas (CHANG et al., 2012).

Entretanto, a Agricultura de Precisão (AP), definida por Bernardi et al. (2014) como um “sistema de gestão que leva em conta a variabilidade espacial do campo com o objetivo de obter um resultado sustentável social, econômico e ambiental”, parte de um viés puramente teórico, isto é, temática abordada apenas em livros, para a efetiva aplicação no campo em meados da década de 90 com o barateamento dos dispositivos GPS (SARAIVA; CUGNASCA; HIRAKAWA, 2000).

Neste contexto, surgem os pulverizadores em barras com aplicação bico a bico Liga/Desliga, isto é, que agregam tecnologias capazes de aplicar os produtos agrotóxicos onde de fato se faz necessária sua inserção. A partir disso, surgem no mercado soluções com esta abordagem, como é o caso do *Omni 700*, lançado pela empresa Jacto em 2016, capaz de realizar controle por bicos em pulverizadores em barras (OTMIS, 2017). Entretanto, o custo de pulverizadores deste porte, somado à tecnologia embarcada, está em torno de 830 mil reais (ARAUJO, 2016) e, portanto, representa uma solução economicamente inviável para agricultores de pequeno porte, maioria no Rio Grande do Sul (IBGE, 2017).

Destaca-se, ainda, que as soluções adotadas para sincronizar o tempo entre detecção e atuação dos dispositivos dos pulverizadores das empresas supracitadas não é de domínio público e, portanto, são desconhecidas as variáveis e parâmetros que possibilitam uma aplicação precisa dos agrotóxicos. Além disso, nas tecnologias abordadas não são uti-

lizadas câmeras, apenas dispositivos GPS e IMU em alguns casos. A Figura 1 ilustra um exemplo de atraso referente a diferença entre a posição dos sensores e atuadores no pulverizador.

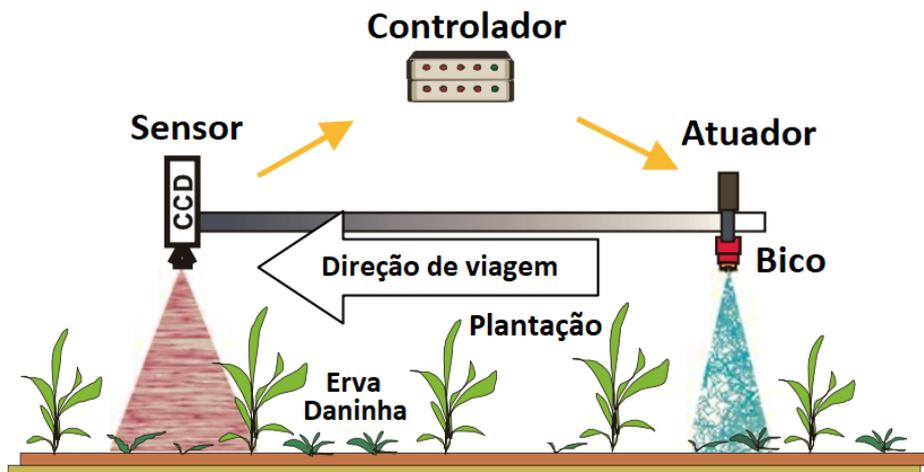


Figura 1: Imagem com destaque para a diferença de posição entre sensores e atuadores (VONDRICKA; HLOBEN; LAMMERS, 2007).

Logo, considerando o problema abordado, surgiu o AutoCERES, projeto de pesquisa integrante do Grupo de Automação e Robótica Inteligente (NAUTEC) do Centro de Ciências Computacionais (C3), da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). O objetivo do AutoCERES é construir um protótipo de um pulverizador agrícola automatizado de baixo custo específico para o nicho dos pequenos agricultores e agricultores familiares. Em outras palavras, pode-se dizer que se deseja elaborar ensaios e agregar tecnologias de baixo custo para otimizar a aplicação dos agrotóxicos (Figura 2).

Como é possível observar na Figura 2, existem diversos dispositivos e sistemas que devem integrar o desenvolvimento de um pulverizador agrícola automatizado. Alguns dos principais fatores a serem considerados são os tempos de processamento dos dispositivos de *hardware*, tempo de resposta de aquisição dos sensores envolvidos, os sistemas de atuação dos bicos de pulverização, a distância entre as câmeras e o sistema de atuação e a velocidade de viagem do conjunto. Tais fatores possuem naturezas diferentes (analógica e digital) e, portanto, o sistema pode ser classificado um sistema híbrido.

Dessa forma, devido à complexidade envolvida no sistema, o projeto é dividido em três principais frentes de atuação: ControlCERES, VisionCERES e LocCERES. O ControlCERES tem como foco os estudos e desenvolvimento relativos aos sistemas de controle e atuação dos bicos de pulverização e sensores de pressão e vazão, o VisionCERES se dedica a desenvolver os algoritmos e soluções envolvidas na aquisição de imagem realizada pelas câmeras do sistema e, por fim, o LocCERES é a equipe responsável pelo problema de localização do conjunto trator-pulverizador no mundo. A Figura 3 apresenta as equipes que compõem o AutoCERES.

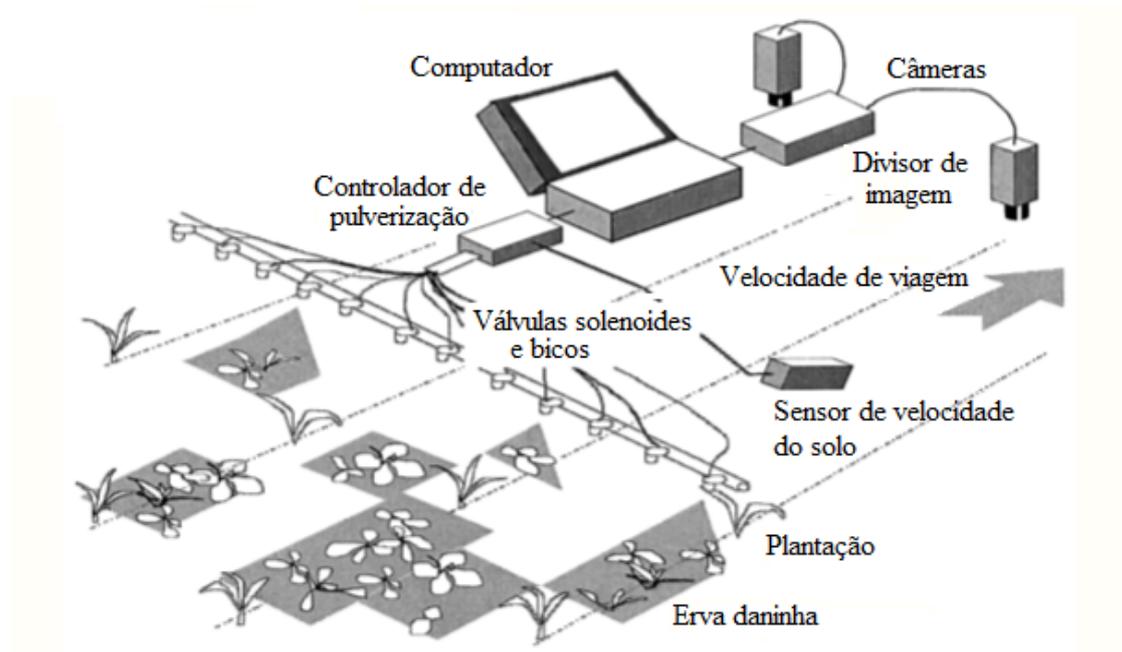


Figura 2: Conceito de sensoriamento em tempo real para sistema de controle de pulverizadores agrícolas em barras (TIAN; REID; HUMMEL, 2000).

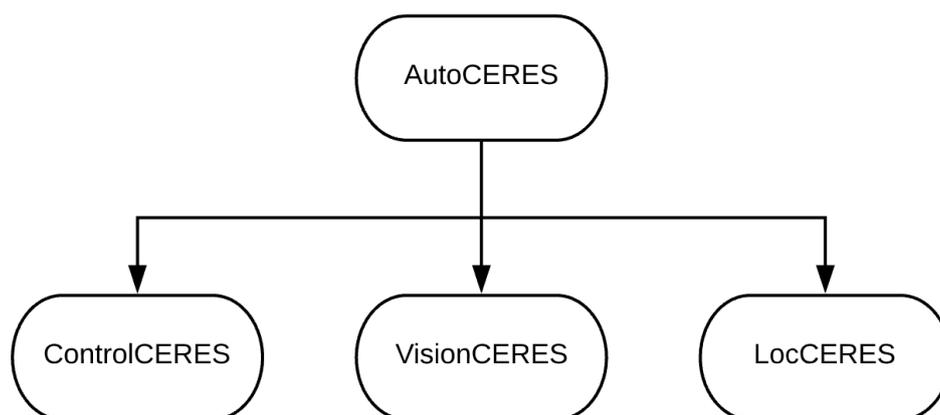


Figura 3: Organização do AutoCERES.

No entanto, embora as equipes sejam divididas para o aprofundamento dos estudos específicos em cada área, algumas decisões de projeto devem ser tomadas avaliando todo o contexto das partes que integram o AutoCERES. Isso significa que mudanças no posicionamento das câmeras, por exemplo, afetam todo o sistema de controle do protótipo, uma vez que a distância entre os dispositivos de atuação e as câmeras são extremamente importantes para a aplicação correta dos agrotóxicos.

Com base nisso, este trabalho tem como tema a modelagem dinâmica do sistema completo de pulverização agrícola automatizado em desenvolvimento pelo grupo AutoCERES, de modo a possibilitar, por meio de simulações, análises globais do sistema. Além disso, deverá ser realizada a análise temporal dos atrasos envolvidos, sejam eles decorrentes de aspectos físicos ou gerados a partir da inserção de componentes no sistema.

## 1.1 Problema Científico

À vista das questões abordadas, é necessário considerar os atrasos de aquisição, processamento e atuação dos dispositivos de controle do sistema. Portanto, este trabalho tem como problema científico a análise e modelagem do sistema completo de pulverização automatizado desenvolvido no AutoCERES, de modo que seja possível verificar o comportamento dinâmico deste mediante variação de parâmetros do sistema.

## 1.2 Objetivos

Diante do contexto apresentado, define-se como objetivo geral realizar a modelagem dinâmica completa do pulverizador agrícola automatizado e analisar os atrasos inerentes ao sistema, para que seja possível realizar simulações que descrevam a saída do sistema mediante a variação de alguns dos parâmetros que o compõem.

Dessa forma, elegem-se como objetivos específicos:

- Modelar todas as etapas envolvidas no sistema de pulverização do AutoCERES;
- Levantar dados e medidas para obtenção de parâmetros do sistema;
- Estudar e definir ferramentas para simulação do modelo a ser desenvolvido;
- Verificar o funcionamento do modelo;
- Avaliar a saída da simulação do modelo mediante variação de parâmetros.

## 1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho foi estruturado em cinco capítulos de forma a facilitar a compreensão do leitor a respeito da temática proposta. Sendo assim, o atual capítulo apresentou questões importantes relativas ao benefício e à importância da modelagem e análise dinâmica do sistema, além dos principais objetivos a serem atingidos por este projeto.

Na sequência, o Capítulo 2 aborda alguns autores que propuseram soluções semelhantes ou correlatas e para estes são realizados alguns apontamentos das principais características positivas e negativas referentes aos seus trabalhos, que são resumidas em formato de tabela para melhor visualização e comparação entre autores.

O Capítulo 3, por sua vez, apresenta a metodologia realizada para solução o problema proposto. Já no Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos na implementação do modelo em simulação, gráficos gerados a partir de simulações e avaliação da saída do modelo a partir da variação nos parâmetros do sistema. Por fim, no Capítulo 5 são descritas as considerações finais da autora e suas sugestões de trabalhos futuros.

## 2 TRABALHOS RELACIONADOS

A Agricultura de Precisão (AP), em especial os pulverizadores agrícolas em barras, vem sendo discutida por diferentes grupos de pesquisa principalmente a partir da década de 90 (APÊNDICE A). No entanto, não foram encontradas pesquisas que abordam especificamente a modelagem dinâmica de sistemas automatizados de pulverização em barras.

Sendo assim, este capítulo foi dividido em duas seções, em que a primeira aborda os trabalhos relacionados no que tange as análises dinâmicas de sistemas de pulverização em barras e a última apresenta trabalhos de autores que realizam modelagem de sistemas dinâmicos híbridos.

### 2.1 Trabalhos Relacionados com Análise Dinâmica de Sistemas de Pulverização em Barras

Para a identificação de importantes trabalhos relacionados à área estudada, foram filtrados trabalhos publicados a partir de 1998 que utilizam tecnologias eletrônicas e mecânicas que auxiliam na automatização de sistemas de pulverização agrícola. Além disso, foi dada maior prioridade ao estudo de trabalhos que se preocuparam com o atraso dos dispositivos que compõem as soluções de automação.

Sendo assim, em Hanks e Beck (1998) é abordada a necessidade de detecção do verde em plantações para aplicação específica de herbicida nos alvos encontrados. Com a utilização de sensores espectrais foi possível diferenciar plantas (cor verde) de demais objetos da natureza em trechos a serem avaliados. Como a tecnologia detecta apenas o verde das demais cores, não há diferenciação entre o verde das plantas e o verde das ervas daninhas. Logo, o autor sugere em seu trabalho a inserção de *hoods*, que são toldos que separam as linhas de plantação das copas (região entre as linhas de plantação), conforme mostra a Figura 4.

O dispositivo inserido auxilia na homogeneização da luz incidente nas plantas, reduz a deriva e inibe o contato do herbicida com a cultura cultivada. Um importante fator a ser abordado é que o autor considera o atraso causado na abertura e fechamento dos dispositivos de atuação para liberação da calda. Além disso, a solução proposta permite



Figura 4: Solução proposta por (HANKS; BECK, 1998).

que o trator se desloque a uma velocidade de até  $7,4 \text{ km/h}$ . No entanto, destaca-se que a velocidade adotada deve ser prevista e constante, pois a distância entre os dispositivos sensores e atuadores depende diretamente da velocidade do trator.

Embora Hanks e Beck (1998) realizem a adaptação de um pulverizador convencional para aplicação da tecnologia, a inserção dos dispositivos *hoods* torna-se pouco viável devido a alta manutenção e baixa flexibilidade para uso em outras culturas. Destaca-se, ainda, que a solução apresentada é capaz apenas de detectar as ervas daninhas presentes nas copas das plantações e a necessidade em manter a velocidade do trator constante é fator limitante no processo.

Por outro lado, Tian, Reid e Hummel (2000) introduzem o uso de câmeras como sensores para a detecção de ervas daninhas. A tecnologia desenvolvida permite que sejam detectados diferentes tipos de verde e, portanto, dispensa o uso de dispositivos auxiliares, conforme o trabalho de Hanks e Beck (1998) sugeria. Utilizando-se de válvulas solenoides como dispositivos de atuação, o trabalho desenvolvido pelos autores permite uma velocidade máxima do trator de  $4,2 \text{ km/h}$ , pois a distância entre as câmeras e os bicos de pulverização é de aproximadamente  $1,0 \text{ m}$  e é levado em consideração o tempo de processamento da imagem das câmeras.

É possível observar, então, que o uso de câmeras torna-se uma solução viável se comparada à proposta apresentada por Hanks e Beck (1998). Todavia, não é citado e nem abordado no trabalho de Tian, Reid e Hummel (2000) o atraso mecânico e de dispersão do líquido por parte dos bicos de pulverização. Tais dinâmicas podem impactar no tempo de atuação dos bicos de pulverização, porém nenhum tipo de avaliação é realizada.

Com uma abordagem um pouco diferente, Carrara et al. (2004) propõem o controle de ervas daninhas a partir de um mapeamento *offline* da cultura, isto é, é realizada uma

identificação prévia dos locais onde será necessária a aplicação dos herbicidas e, então, a partir de dados de GPS é calculada uma trajetória para o trator realizar de modo a aplicar nos locais pontuados no mapa prévio.

É importante destacar que o controle exposto por Carrara et al. (2004) é realizado por seções e, portanto, ainda que reduza o consumo de herbicida, não é a melhor solução para o problema, conforme abordado anteriormente. Observa-se, ainda, que nesse tipo de abordagem não há limitação da velocidade do trator, porém o mapeamento *offline* da cultura dificulta o uso da tecnologia. Por fim, novamente o autor despreza a questão dos atrasos inerentes ao acionamento e desacionamento das seções da barra de pulverização.

Já em Vondricka, Hloben e Lammers (2007) é utilizado um pulverizador convencional em que são realizadas algumas adaptações. Preocupado também com ervas daninhas, o trabalho propõe o controle bico a bico da barra de pulverização. O diferencial deste autor é que o mesmo realiza uma análise do tempo de resposta do fluido dado um sinal (pulso) de abertura dos bicos de pulverização.

Contudo, não é realizada uma análise da dinâmica do trator e do fluido para que sejam calibrados os tempos de acionamento de cada bico de pulverização envolvido (VONDRICKA; HLOBEN; LAMMERS, 2007). Ainda, uma vez que trata-se de identificação em tempo real (*online*) o trabalho não considera o tempo de processamento do sensor, nem apresenta qual o tipo de sensor utilizado na solução proposta.

Diferente dos trabalhos anteriores que se preocupavam com a aplicação em ervas daninhas (herbicidas), o trabalho de Chattha et al. (2014) aborda a aplicação de agrotóxicos nas próprias plantações. O autor faz o uso de câmeras para identificação de linhas de plantação em tempo real e, a partir disso, realiza uma análise do tempo de processamento para posicionamento dos dispositivos de atuação na barra de pulverização.

Como aspecto positivo no trabalho Chattha et al. (2014), pode-se elencar que os autores além de considerar o tempo de processamento das imagens obtidas pelas câmeras, também leva em consideração o atraso no jato de pulverização (atraso de transporte do líquido). Em contrapartida, o dispositivo apresentado conta com suportes para as câmeras que ficam a uma distância de 7,32 m da barra de pulverização, o que pode dificultar as manobras a serem realizadas pelo trator.

Soma-se a isso a limitação da velocidade máxima de 4,8 km/h a ser desenvolvida pelo trator e também o fato do trator não ser do tipo convencional, ou seja, é utilizado um trator específico para a solução proposta, o que representa pouca flexibilidade para inserção da tecnologia em outros dispositivos e também alto custo para aquisição por parte dos agricultores familiares (CHATTHA et al., 2014).

Em Esau et al. (2018) é abordada também a questão da aplicação de agrotóxicos e não de herbicidas. O trabalho é desenvolvido em um trator convencional e câmeras são integradas como dispositivo sensor. Neste trabalho são considerados tanto o tempo de processamento por parte das câmeras quanto o atraso mecânico da atuação das válvulas

solenoides.

Os testes da solução proposta são desenvolvidos em campos de mirtilo selvagem e o sistema é capaz de identificar até mesmo os estágios da planta, isto é, a intensidade de desfolhamento da cultura. Por outro lado, não é considerado o atraso de transporte do jato de pulverização e a velocidade máxima que pode ser desenvolvida pelo trator neste sistema é de  $6,3 \text{ km/h}$ .

Por fim, mais recentemente Ozluoymak et al. (2019) propôs uma solução pouco convencional. Em seu trabalho é desenvolvido um protótipo em que são acoplados câmera e bico de pulverização com atuação pneumática, como mostra a Figura 5.

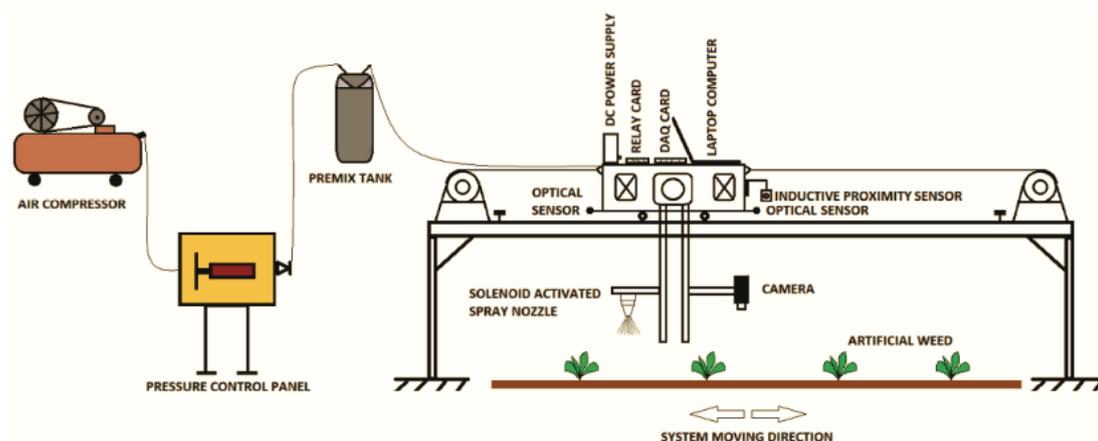


Figura 5: Solução proposta por (OZLUOYMAK et al., 2019).

O ambiente em que são realizados os ensaios é totalmente controlado. Como o protótipo é fixo, a câmera consegue localizar com precisão as coordenadas do ponto de aplicação de agrotóxico. Neste trabalho também não são abordados os atrasos de processamento, transporte do fluido ou mecânico do atuador e, devido às suas características construtivas, a tecnologia é pouco prática devido a sua baixa mobilidade.

Portanto, foram destacados alguns trabalhos que se relacionam com as análises dinâmicas propostas no âmbito dos pulverizadores agrícolas em barras. Como forma de resumir e comparar o exposto por cada autor citado anteriormente e o que se pretende abordar no modelo a ser elaborado, são apresentadas as Tabelas 1 e 2.<sup>1</sup>

## 2.2 Trabalhos Relacionados com Modelagem de Sistemas Dinâmicos Híbridos

De modo geral, as máquinas de estados são máquinas teóricas que descrevem o comportamento e a dinâmica de sistemas reais. Podem ser aplicadas tanto em problemas simples do dia-a-dia quanto em problemas complexos envolvendo mecânica, eletrônica e

<sup>1</sup>Na Tabela 1  $T_P$  é o tempo de processamento das câmeras,  $T_F$  é o tempo que o fluido leva para atingir o alvo e  $T_M$  é o tempo mecânico para atuação das válvulas solenoide.

Artigo	Deteccção	Controle	Alvo	Câmera?	$T_P?$	$T_F?$	$T_M?$
Hanks (1998)	Online	Bicos	Erva Daninha	Não	Sim	Não	Não
Tian (1999)	Online	Bicos	Erva Daninha	Sim	Sim	Não	Não
Carrara (2004)	Offline	Seção	Erva Daninha	Não	-	Não	Não
Vondricka (2007)	Online	Bicos	Erva Daninha	N/D	Não	Não	Sim
Chattha (2014)	Online	Bicos	Cultura	Sim	Sim	Sim	Não
Esau (2018)	Online	Bicos	Cultura	Sim	Sim	Não	Sim
Ozluoymak (2019)	Online	Bicos	Cultura	Sim	Não	Não	Não
Trabalho Proposto	Online	Bicos	Cultura	Sim	Sim	Sim	Sim

Tabela 1: Tabela comparativa entre soluções propostas por diferentes autores (parte 1).

Artigo	Pulverizador convencional?
Hanks (1998)	Sim
Tian (1999)	Sim
Carrara (2004)	Sim
Vondricka (2007)	Sim
Chattha (2014)	Não
Esau (2018)	Sim
Ozluoymak (2019)	Não
Trabalho Proposto	Sim

Tabela 2: Tabela comparativa entre soluções propostas por diferentes autores (parte 2).

*software*, como, por exemplo, o caso do protótipo a ser analisado (VIEIRA, 2006).

Nesse contexto, de acordo com Henzinger (2000), sistemas híbridos são modelos matemáticos capazes de descrever sistemas tratam eventos que interagem com componentes contínuos. Deste modo, uma máquina de estados (ou autômato) híbrida é uma máquina de estados finitos que possui um conjunto finito de variáveis contínuas.

Dessa forma, a possibilidade da combinação de comportamentos discretos e contínuos possibilita que sistemas dinâmicos com características tanto digitais quando analógicas possam ser modelados e avaliados (LYNCH et al., 2005).

Logo, uma vez definida a abordagem que se pretende realizar, é possível afirmar que o sistema de pulverização automatizado é composto de diferentes componentes, os quais se caracterizam como contínuos, dinâmicos ou discretos. Exatamente por esta característica, o sistema é dito híbrido, isto é, composto por eventos que interagem com componentes contínuos (APÊNDICE A). Nesse sentido, essa seção aborda alguns trabalhos desenvolvidos na área de modelagem de sistemas dinâmicos híbridos.

O intuito de Liu et al. (1999) é apresentar a modelagem de um sistema híbrido baseado em hierarquia utilizando a ferramenta *Ptolemy II*, estrutura de *software* de código aberto que suporta simulações de redes de processos, eventos discretos, fluxo de dados, modelos de tempo contínuo, entre outros. Logo, os autores utilizam modelos de tempo contínuo combinados com autômatos de estados finitos para simular um sistema de controle de

helicóptero híbrido, como mostra a Figura 6.

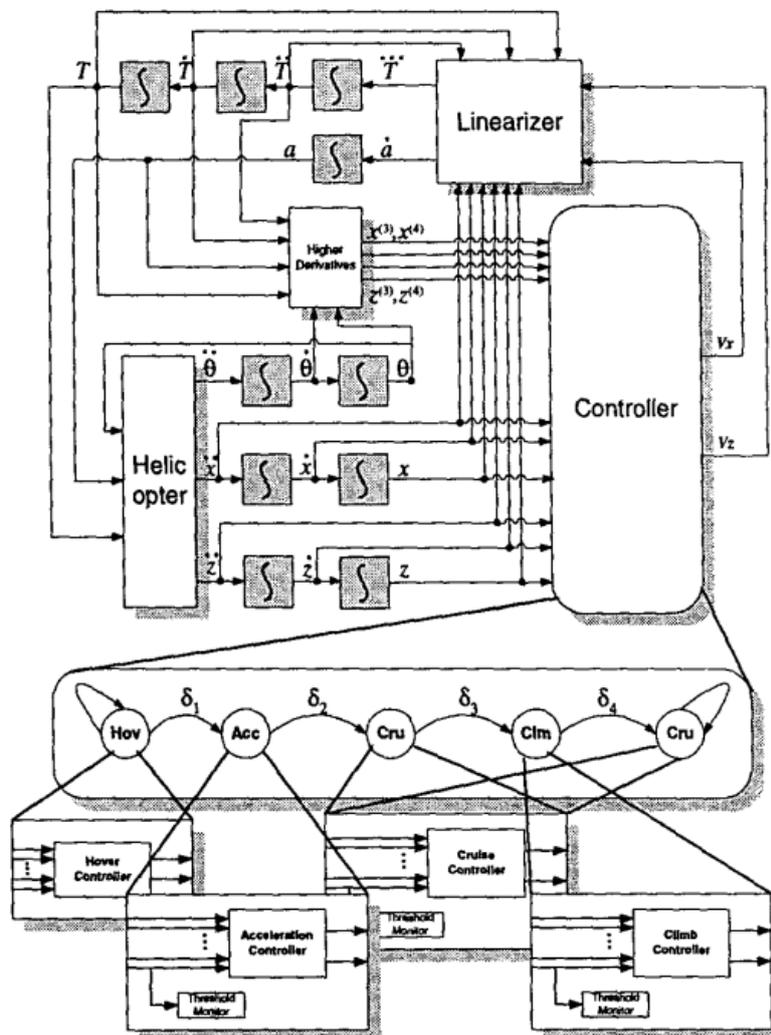


Figura 6: Modelo para helicóptero criado no *Ptolemy II* por (LIU et al., 1999).

Embora o *software* permita a inserção do modelo, não é possível realizar simulações, sendo necessária a utilização de uma Applet Java, *software* destinado à execução de uma atividade específica para obtenção dos resultados do modelo.

Por outro lado, Castaneda et al. (2013) utilizam a ferramenta *Simulink* do *software* Matlab, que permite tanto a modelagem quanto a simulação dos modelos elaborados. Utilizando-se dessa possibilidade os autores realizam a modelagem da gestão de um sistema híbrido autônomo baseado em painéis solares fotovoltaicos. Sendo assim, conseguem avaliar informações como a potência gerada em função da tensão nos painéis e a curva de descarga das baterias, comparando as diferentes estratégias de controle implementadas.

A Figura 7 apresenta o modelo híbrido implementado no Matlab que, de acordo com Castaneda et al. (2013), apontaram resultados que demonstram que o sistema híbrido projetado garante fornecimento confiável de eletricidade para a aplicação autônoma estudada,

como era desejado.

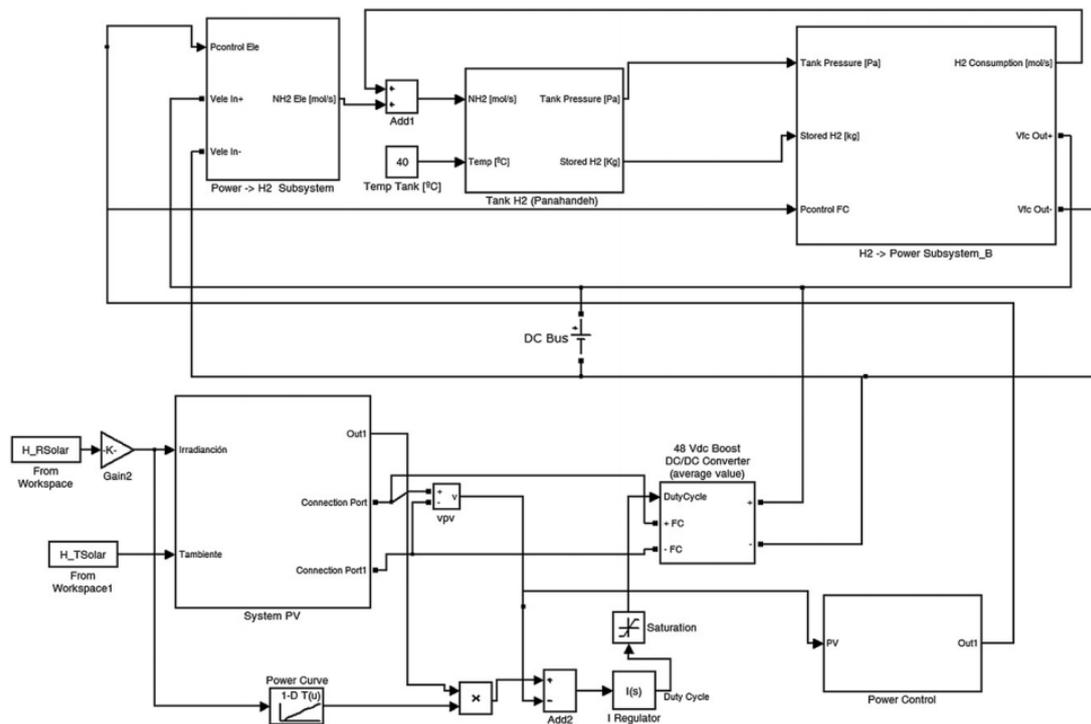


Figura 7: Modelo de gestão de painéis solares fotovoltaicos criado no *Simulink* por (CASTANEDA et al., 2013).

## 2.3 Resumo do Capítulo

Ao finalizar o estudo de trabalhos relacionados ao tema proposto, pode-se concluir que, embora as tecnologias apresentadas possuam como objetivo a aplicação bico a bico de produtos agrotóxicos, nenhum dos autores destacados aborda a incerteza nas medidas de localização e velocidade do trator tão importantes na agricultura de precisão.

Ademais, não são apresentados todos os atrasos inerentes ao sistema, mesmo na situação em que possam ser desconsiderados. Por fim, destaca-se a ausência de trabalhos que tratem a questão dos modelos dinâmicos específicos de sistemas de pulverização agrícola e até mesmo que tratem especificamente de sistemas com características híbridas aplicadas à agricultura de precisão. Sendo assim, no capítulo a seguir será apresentada a metodologia proposta para solucionar o problema que vem sendo discutido ao longo deste trabalho.

## 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é discutida a metodologia idealizada para a modelagem dinâmica de sistemas de pulverização agrícola em barras com aplicação Liga/Desliga cuja solução é baseada em máquinas de estado híbrida para análise temporal do sistema. Para tanto, o capítulo foi dividido, respectivamente, nas subseções protótipo do pulverizador, modelo dinâmico híbrido do sistema, análise dos atrasos do sistema e modelo descrito em simulador.

### 3.1 Protótipo do Pulverizador

O protótipo desenvolvido foi adaptado a partir de um pulverizador agrícola em barras modelo Rubemaq P320X com barra de pulverização de 10 *m* de comprimento, reservatório com capacidade de 320 *L*, bomba de deslocamento positivo (diafragma) Udor KAPPA-43-1C com vazão de até 43 *L/min* quando submetida a uma rotação de 540 *rpm*, 20 bicos de pulverização com anti-gotejamento, alimentados por mangueira agrícola de 1/2", filtro de partículas e uma válvula de alívio ajustável montada em um bloco com manômetro e três válvulas de controle manuais, sendo uma para o agitador superior do reservatório, uma para o lado esquerdo da barra e a última para o lado direito da barra (TERRA; ROSA; DREWS, 2019; TERRA et al., 2020).

A Figura 8 ilustra as adaptações realizadas no pulverizador. Os itens instalados para a solução proposta estão destacados em vermelho.

Os bicos de pulverização utilizados são da fabricante Magnojet, cujo modelo é o MF 015 com abertura de 110°, tipo leque, da classe gota fina, com volume de diâmetro médio entre 150 e 250  $\mu\text{m}$ . Além disso, a vazão média fornecida é 0,50 *L/min* para a pressão de 2,0 *bar*, 0,61 *L/min* para a pressão de 3,1 *bar* e 0,70 *L/min* para a pressão de 4,1 *bar*, conforme mostrado na Figura 9.

O lado direito da barra do pulverizador foi totalmente instrumentado utilizando-se uma válvula solenoide para cada bico de pulverização e sensores de pressão e vazão em locais estratégicos para avaliação das variáveis de processo do sistema. No lado esquerdo da barra foi instalado apenas um sensor de vazão para realização de futuras comparações

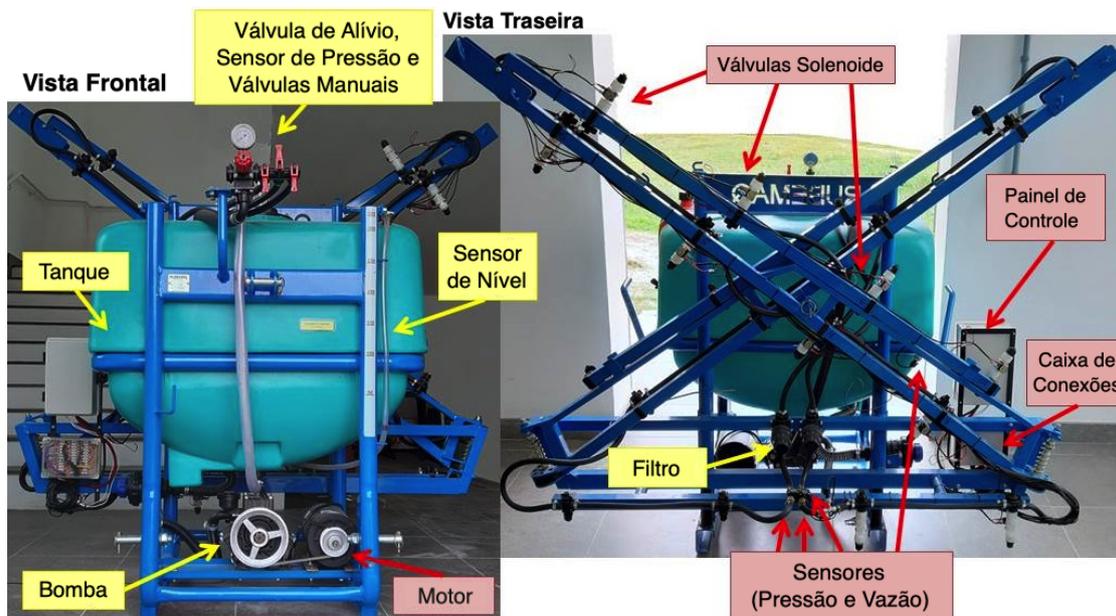


Figura 8: Protótipo adaptado para realização da pesquisa (TERRA; ROSA; DREWS, 2019).

MF		ISO	110°		30 - 60 lbf/pol <sup>2</sup> 2 - 4,1 bar	POLIACETAL / POLYACETAL / POLIACETAL												
CÓDIGO CÓDICE CÓDIGO	PONTAS NOZZLES BOQUILLAS	bar	lbi/ pol <sup>2</sup>	DMV VMD l/min	0,5 m I/ha													
					4 km/h	5 km/h	6 km/h	7 km/h	8 km/h	9 km/h	10 km/h	12 km/h	14 km/h	16 km/h	18 km/h	20 km/h	25 km/h	
M 301/1B	MF 015  MALHA / MESH / MALLA 100	2	30	F	0,50	150	120	100	86	75	67	60	50	43	37	33	30	24
		3,1	45	F	0,61	183	146	122	105	92	81	73	61	52	46	40	36	29
		4,1	60	F	0,70	210	168	140	120	105	93	84	70	60	52	46	42	34

Figura 9: Dados catalogados do bico de pulverização (Canal Agrícola, 2021).

entre o volume total de produto aplicado e o volume gasto por cada um dos lados das barras do pulverizador.

As válvulas solenoides instaladas são do tipo normalmente aberta (NA), com tensão de alimentação de 12  $V_{DC}$ , conexões do tipo macho de 1/2"  $NPT$  e pressões de trabalho de até 8 bar. Estas foram instaladas individualmente nos 10 bicos de pulverização instrumentados entre o sistema anti-gotejo e o bico de pulverização. Para tanto, foi necessária a fabricação de conexões específicas, que foram confeccionadas em Tecnil, como mostra a Figura 10.

Para avaliação do consumo de agrotóxico, foram instalados dois sensores de vazão volumétrica, um de cada lado das barras do pulverizador. O modelo deste sensor é YSF-S201 e possui conexões fêmeas de 1/2". Para realizar as medições, o sensor trabalha contando pulsos e a relação correspondente é de 7,5 pulsos para cada litro consumido por

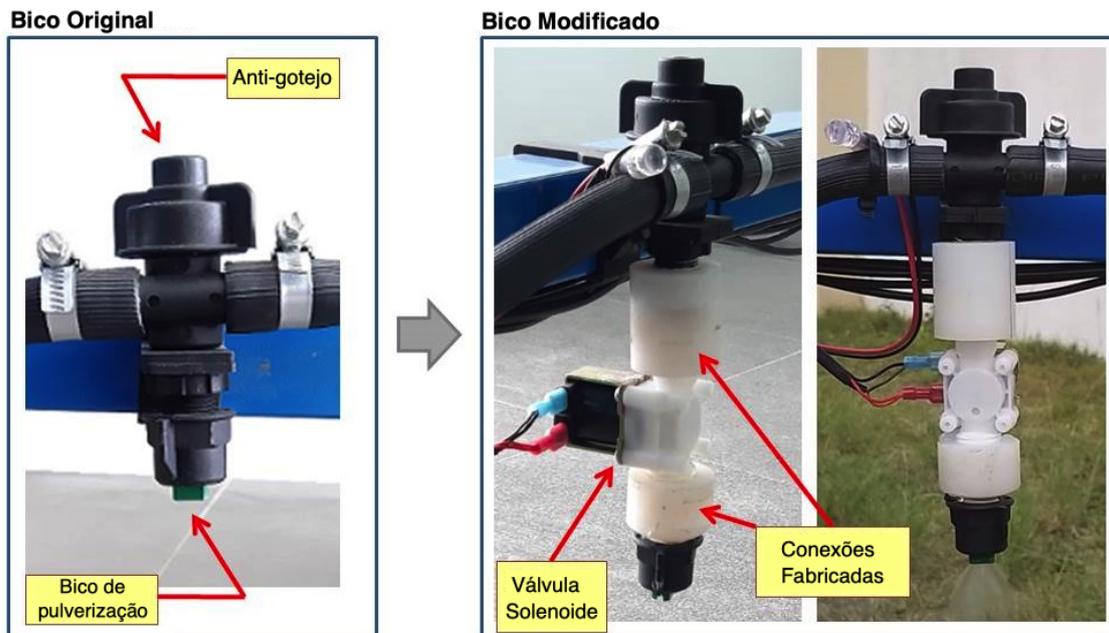


Figura 10: Instalação das válvulas solenoides.

minuto.

Como a abertura e o fechamento dos bicos de pulverização causa variação na pressão do sistema e, conseqüentemente, nas variáveis associadas, foram instalados dois sensores de pressão na barra de pulverização direita. Deste modo, além de verificar a variação de pressão causada pelos bicos de pulverização, como os sensores foram instalados em lados opostos, é possível também verificar a queda de pressão ao longo do sistema como um todo. Tais sensores são do tipo piezo-resistivos, modelo HK1100C, com conexões fêmeas de 1/4" e pressão de trabalho de 0 a 12 *bar*. Na Figura 11 é mostrada a instalação dos sensores descritos.

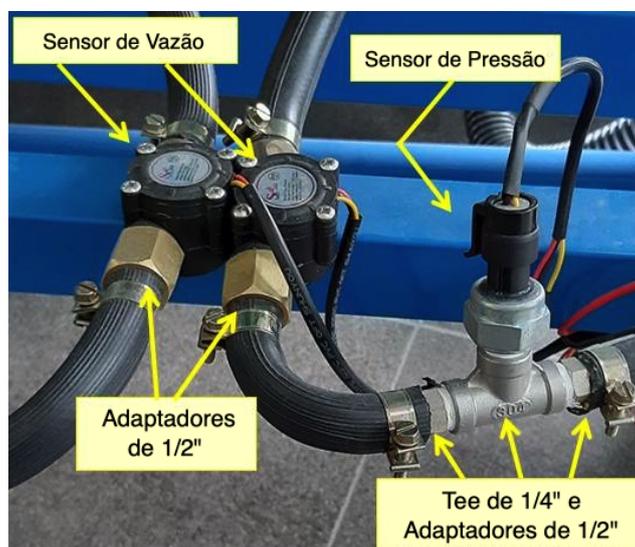


Figura 11: Instalação dos sensores de pressão e vazão.

O controle principal do protótipo é realizado por Arduino MEGA (ATmega2560). O controlador é responsável por ler os sinais de pressão e vazão. Os dados de vazão são requisitados via comunicação *I2C* para um segundo controlador escravo do modelo Arduino UNO (ATmega328P). Além disso, o controlador principal recebe os dados de abertura de fechamento das válvulas solenoides que é transmitido por *Bluetooth* por um *smartphone*. Como o controlador não possui corrente suficiente para alimentação de todo o sistema, foi desenvolvida uma placa de acionamento por relés para as válvulas solenoides.

À arquitetura também é inserido um módulo de relógio de tempo real (RTC) que envia dados de data e hora atualizados para mapeamento dos eventos no tempo e realiza a escrita das informações em um cartão de memória.

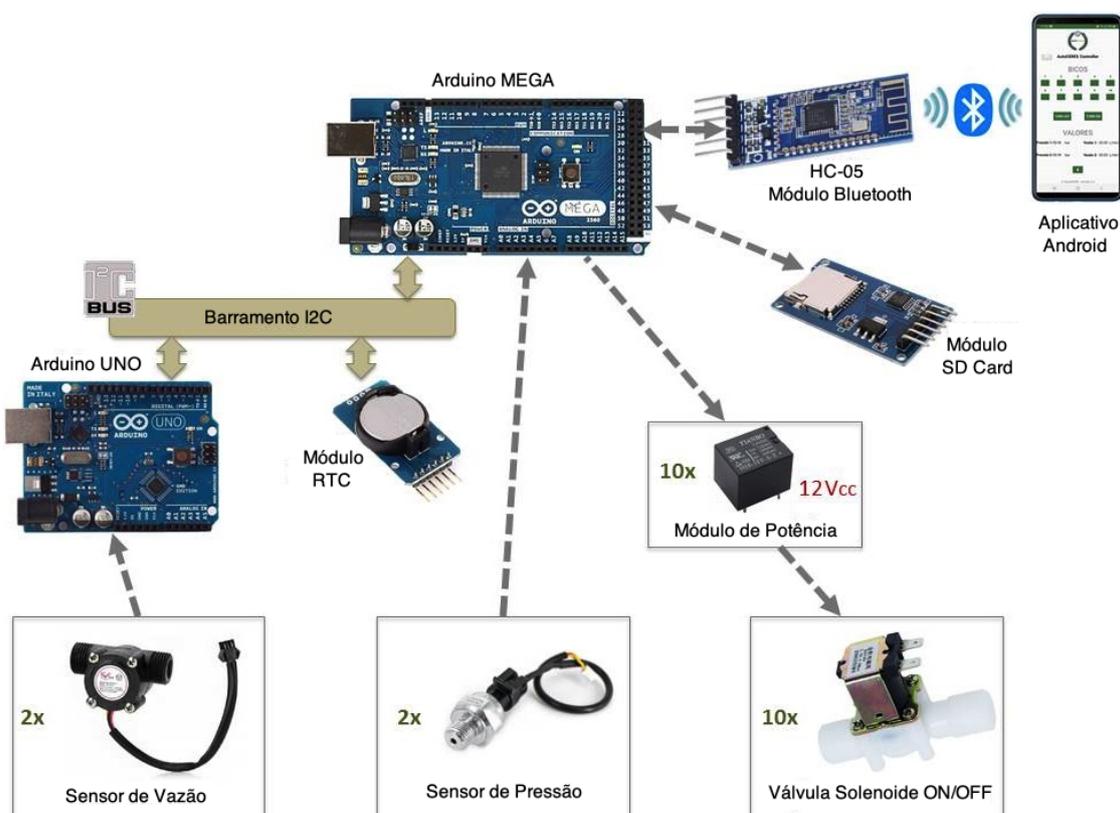


Figura 12: Arquitetura de controle e automação.

Além disso, são utilizados reguladores de tensão (DC-DC) para alimentação de diferentes níveis de tensão necessários aos circuitos eletrônicos implementados no pulverizador. Todos os circuitos eletrônicos e de ligação entre os dispositivos são armazenados em painéis acrílicos a prova d'água, conforme apresentado na Figura 13.

Para a identificação das linhas de plantação serão utilizadas câmeras para aquisição de imagens. A partir das imagens capturadas serão identificadas as linhas de plantação por meio de algoritmos de visão computacional (WEBER et al., 2018). Após capturadas as imagens, ocorre a etapa de pré-processamento, responsável por determinar o percentual de pixels verdes presentes na imagem. As demais etapas de segmentação, clusterização,

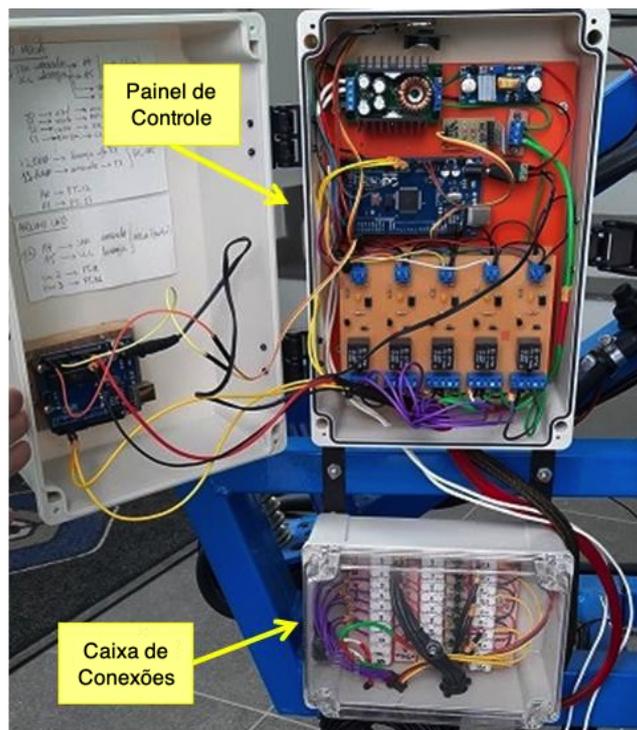


Figura 13: Painel de controle e caixa de conexões.

identificação de linhas de plantação e demais tecnologias envolvidas são realizadas na etapa de processamento. O estudo dos algoritmos que atendem melhor aos requisitos impostos pelo sistema ainda encontra-se em desenvolvimento. Dada a definição da câmera que será utilizada, serão construídos suportes para realizar a sustentação dos dispositivos de captura de imagens.

Encontra-se em fase de desenvolvimento, a inserção de unidades de medida inercial (IMU), formadas por acelerômetros e giroscópios e responsáveis por oferecer ao sistema informações de posição e orientação, e GPS para coleta de informações de posicionamento global (NYLAND, 2017). Com estes dados é possível monitorar o deslocamento do trator e também mapear as áreas de aplicação dos agrotóxicos. É importante ressaltar que o protótipo pode sofrer alterações e alguns dispositivos podem ser retirados ou inseridos no sistema, de forma a garantir a melhor funcionalidade para o pulverizador agrícola automatizado.

### 3.2 Modelo Dinâmico Híbrido do Sistema

Conforme abordado na seção anterior, o sistema de pulverização em barras convencional foi equipado com diversos componentes mecânicos e eletrônicos para que fosse possível tornar o modo de aplicação dos defensivos no formato Liga/Desliga e, devido à natureza destes elementos, o sistema pode ser caracterizado como um sistema dinâmico híbrido. Nesse contexto, é necessário avaliar como ocorre a dinâmica do processo, isto é,

o impacto dinâmico acarretado a partir da inserção de sensores, controladores e atuadores no sistema.

Logo, é interesse nesta seção abordar o sistema completo de pulverização adaptado elencando as principais etapas, partindo desde a aquisição de imagem e detecção de plantas até a efetiva aplicação dos agrotóxicos pelo sistema de controle de aplicação.

Sendo assim, de modo geral, o sistema de pulverização automatizado pode ser dividido em quatro grandes áreas: sistema de visão e localização, sistema de aquisição de dados, sistema trator-pulverizador e sistema de atuação. Dito isso, o sistema de visão trata da aquisição e processamento de imagens para identificação de plantas e linhas de plantação. O sistema de aquisição de dados coleta as informações de GPS e IMU para verificar comportamento dinâmico do trator em que está inserido o pulverizador agrícola em barras e dados de pressão e vazão para avaliação da dinâmica fluídica da calda para pulverização. Por fim, o sistema de atuação é responsável pelo acionamento das válvulas que controlam a aplicação, permitindo ou obstruindo a passagem do fluido que atinge as plantas.

Logo, serão apresentados a seguir os modelos obtidos para cada uma das grandes áreas do sistema de pulverização automatizado. Além disso, serão apresentadas com maior detalhe cada parte do sistema e seus respectivos modelos. No entanto, inicialmente, para melhor visualização do comportamento geral do sistema, a Figura 14 apresenta o fluxograma de funcionamento do sistema de pulverização automatizado.

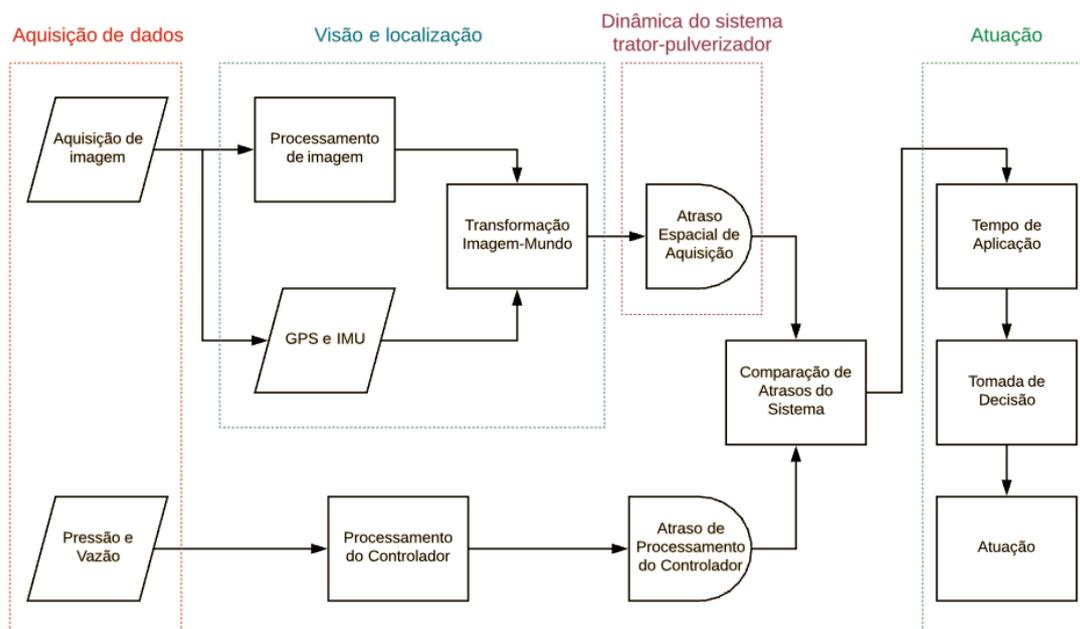


Figura 14: Fluxograma de funcionamento do sistema.

Dessa forma, inicialmente o sistema realiza a aquisição da imagem da plantação e, paralelamente, a coleta de dados de pressão e vazão do sistema de pulverização. Para questões de organização do texto, primeiramente será apresentado o fluxo da aquisição

de imagem e, após, será realizado o detalhamento do fluxo a partir da coleta de dados de pressão e vazão. Por fim, será abordado o fluxo mediante a comparação de atrasos do sistema.

Desse modo, na Figura 15 é possível observar que o bloco de aquisição de imagem apresenta dois estados, sendo o primeiro a representação do início da coleta efetiva da imagem e o segundo a finalização desta aquisição.

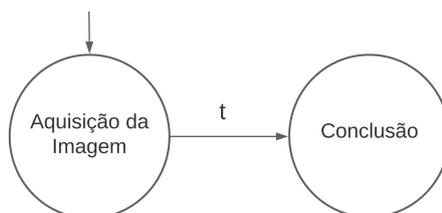


Figura 15: Bloco de aquisição de imagem.

Associados a esses estados, pode-se destacar a transição temporal  $t$ , que representa justamente o tempo necessário para que a câmera possa coletar de fato a imagem de interesse para fornecer ao algoritmo que realizará seu processamento. Um importante fator a ser destacado é a presença da seta superior no bloco de aquisição de imagem, que representa o estado inicial da referida máquina de estados e será utilizada em todos os blocos iniciais na modelagem do sistema.

Uma vez que a imagem é coletada e está disponível para utilização por parte dos algoritmos de processamento de imagem, dois processos são disparados: o processamento de imagem e a coleta de dados por parte dos dispositivos GPS e IMU. É importante destacar que este fluxo paralelo pode ser definido como um sistema ciberfísico (CPS) (GARAY, 2012), visto que há integração de sensores que fornecem dados em tempo real e trabalham em frequências diferentes.

Assim, o bloco de processamento de imagem é responsável pela execução dos algoritmos que determinarão a presença ou ausência de plantas no raio de visão em que a câmera está inserida. Caso haja presença de plantas, o algoritmo informa a posição em pixels dessa planta na imagem. Um importante fator a ser considerado é que, conforme será apresentado na próxima seção, o tempo total de processamento de determinada imagem está fortemente relacionado à quantidade de pixels verdes presentes nesta imagem. Portanto, é realizado um pré-processamento que verifica o percentual desses pixels verdes e entrega a informação para o estado de processamento, conforme pode ser visto na Figura 16.

Ainda na Figura 16 é possível observar que, após o processamento de imagem, há o estado conclusão, que representa o momento em que a imagem foi completamente processada. Como é de se esperar, cada mudança de estado apresenta um tempo associado, em que  $t1$  representa o atraso devido ao pré-processamento da imagem e  $t2$  o atraso de pro-

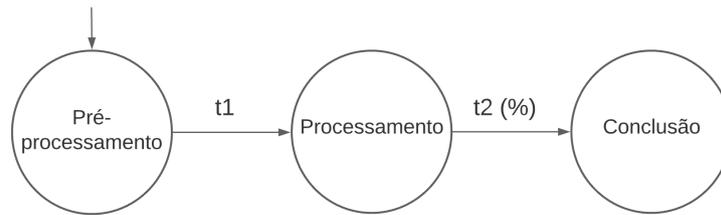


Figura 16: Bloco de processamento de imagem.

cessamento, que é diretamente relacionado com o percentual de pixels verdes calculados na etapa de pré-processamento.

Paralelamente ao processamento de imagem, ocorre a coleta e fusão dos dados de GPS e IMU para fornecer informações mais precisas ao cálculo da dinâmica e posicionamento global do trator. Logo, a máquina de estados GPS e IMU apresenta três estados: aquisições, estimação e conclusão. O estado de aquisição fornece os dados de localização do sistema trator-pulverizador, o estado de estimativa determina a velocidade em que o trator está se movimentando por meio dos dados adquiridos e, por fim, o estado conclusão representa o término do processo. A Figura 17 apresenta os estados para o bloco GPS e IMU.

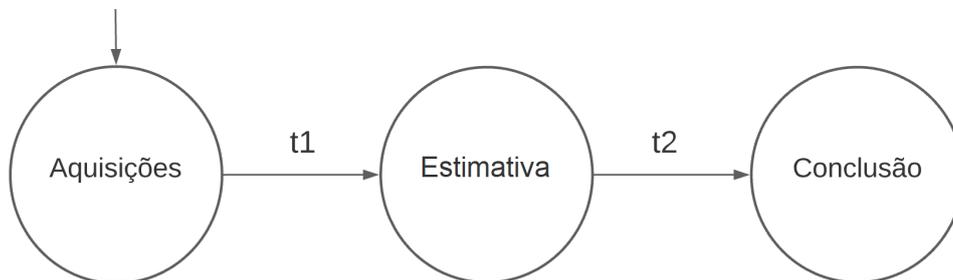


Figura 17: Bloco GPS e IMU.

Logo, o atraso  $t1$  representa a transmissão da informação das aquisições e  $t2$  o atraso proveniente da estimativa relativos à dinâmica e ao posicionamento global do trator.

Visto que as informações da imagem, proporcionadas pelo bloco de processamento, e localização espacial, disponíveis após conclusão do bloco GPS e IMU, são fornecidas, ocorre o processo de transformação dos dados de imagem em dados de localização global, de forma que seja possível comparar os pontos de aplicação de defensivos com as informações de localização do conjunto trator-pulverizador.

Como estados, conforme apresentado na Figura 18, o bloco transformação imagem-mundo apresenta a verificação de parâmetros, o processamento das informações e, ainda, o estado de conclusão.

Os parâmetros dizem respeito às características físicas e de instalação específicas da câmera no sistema e são fornecidos pelo operador. Já o estado de processamento representa a execução dos algoritmos que relacionam as informações de imagem e localização

global, visando definir os pontos em que deve ser realizada a aplicação dos defensivos. Por fim, o estado de conclusão representa a finalização dos processos e, consequentemente, término da máquina de estados em questão.

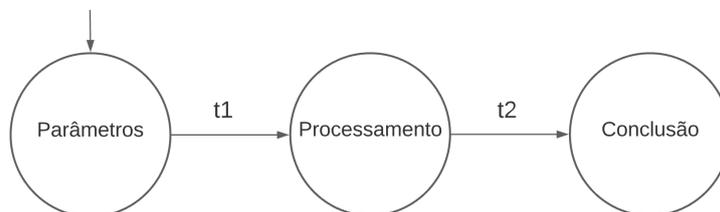


Figura 18: Bloco de transformação imagem-mundo.

De forma análoga às máquinas de estado apresentadas anteriormente, as transições entre estados ocorrem a partir de um tempo que é dependente da execução e, neste caso, são representadas por  $t1$  e  $t2$  (Figura 18).

Dado que as informações de velocidade do trator, posição da planta no mundo e posição do trator no mundo são definidas, é possível calcular a distância a ser percorrida pelo pulverizador, isto é, o espaço disponível entre o ponto de aquisição das informações visuais e aplicação dos defensivos agrícolas. Logo, a máquina de estados atraso espacial de aquisição é composta por um estado que recebe todas as informações e realiza as estimativas necessárias para determinar o tempo restante até o ponto de aplicação e um estado de conclusão que representa o término e é alcançado a partir da transição temporal representada por  $t$ , como aborda a Figura 19.

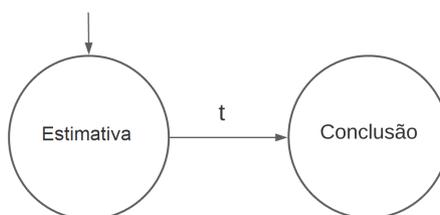


Figura 19: Bloco atraso espacial de aquisição.

Ressalta-se que, neste momento é levada em consideração a distância restante até o ponto de aplicação em virtude da possibilidade de variação da velocidade do conjunto trator-pulverizador. Logo, utilizando-se da distância, e não do tempo, para este caso, minimiza-se erros de predição de posição, como ocorre comumente em aplicativos de navegação por GPS que apontam o tempo de chegada até o destino buscado.

Finalizada a modelagem do fluxo que se inicia na aquisição de imagem, será apresentado a seguir a elaboração dos modelos que compõem o fluxo do bloco de pressão e vazão.

Deste modo, o bloco de pressão e vazão contém apenas um estado, que é justamente a coleta dos dados de pressão e vazão. Como trata-se apenas de um sinal elétrico, cons-

tantemente disponível na porta de leitura de dados, seu atraso pode ser desprezado. Logo, esta máquina conta com o estado de aquisição dos dados, que representa de fato a escrita dos dados disponíveis na linha de transmissão de informações, como pode ser visto na Figura 20.



Figura 20: Bloco pressão e vazão.

Com a informação de vazão é possível calcular a velocidade de escoamento da calda, de forma que se avalie, a partir da distância presente entre o bico de pulverização e as plantas, qual é o tempo necessário para que o fluido escorra pelo bico de pulverização e atinja corretamente a planta alvo. Logo, a máquina de processamento do controlador é composta por três estados, sendo o primeiro deles a representação do cálculo da velocidade da calda, o segundo do processamento das informações e o último da conclusão das etapas.

A Figura 21 apresenta tanto os estados supracitados bem como suas transições temporais ( $t1$  e  $t2$ ).

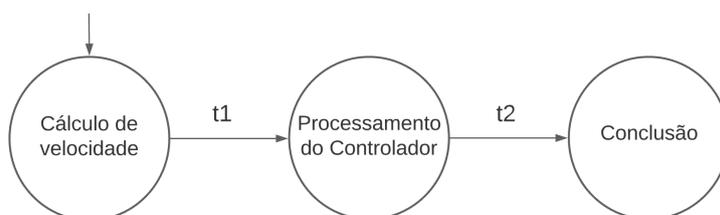


Figura 21: Bloco de processamento do controlador.

Após o processamento por parte do controlador, faz-se necessária a obtenção do tempo total gasto no fluxo iniciado pelo bloco pressão e vazão. Dessa forma, o bloco atraso de processamento do controlador é responsável apenas por obter o tempo decorrido entre a aquisição dos dados e o término do processamento realizado pelo controlador. Logo, a Figura 22 apresenta a máquina de estados para este bloco.

Como os fluxos iniciados nos blocos aquisição de imagem e pressão e vazão ocorrem de forma paralela, deve ser adotado o atraso respectivo ao fluxo que apresenta maior atraso temporal para o sistema. Nesse sentido, o bloco comparação de atrasos do sistema recebe as duas informações temporais e realiza a comparação, de maneira que aquela que representar o maior atraso para o sistema seja considerada.



Figura 22: Bloco de atraso de processamento do controlador.

Portanto, o bloco de comparação de atrasos do sistema é composto por um estado de início, ativado mediante a chegada dos atrasos de cada fluxo, e dois estados de conclusão, conforme mostrado na Figura 23. Ou seja, para fins de sincronização entre as informações, o bloco só é iniciado quando as duas informações  $t1$  e  $t2$  estão disponíveis para comparação.

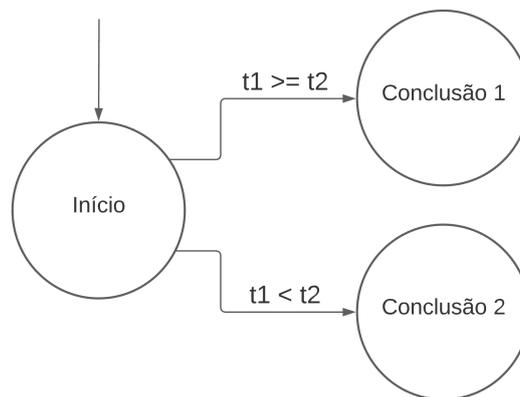


Figura 23: Bloco de comparação de atrasos do sistema.

À vista disso, e considerando que  $t1$  e  $t2$  correspondem aos atrasos do fluxo de aquisição de imagem e aquisição de pressão e vazão, respectivamente, o estado conclusão 1 é alcançado se o atraso  $t1$  for superior ou igual ao atraso  $t2$  e, por outro lado, o estado conclusão 2 só é alcançado quando o atraso  $t2$  for superior ao atraso  $t1$ . Sendo assim, o estado de conclusão 1 assume  $t1$  como atraso a ser considerado para o restante do sistema, enquanto o estado de conclusão 2 considera o atraso  $t2$ .

Sabendo-se, então, o tempo decorrido na simulação desde a aquisição da imagem até esta etapa do sistema, pode ser realizado o cálculo para verificar o tempo ainda restante até o ponto de aplicação da calda. Em outras palavras, é necessário subtrair do tempo disponível para a aplicação os atrasos do sistema, ou seja, validar o tempo útil até o efetivo ponto de aplicação da calda.

Na Figura 24 são apresentados os estados que compõem o bloco tempo de aplicação. Este bloco é composto por um estado que realiza a estimativa do tempo até a aplicação e um estado de conclusão, que sinaliza o final do processo. Além disso, associados aos

estados há a presença da transição temporal  $t$  representando o tempo para realização da estimativa pela máquina de estados.

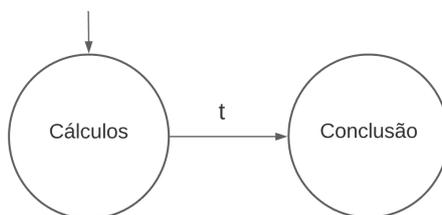


Figura 24: Bloco tempo de aplicação.

Após identificado o tempo ainda restante até o ponto de aplicação da calda, faz-se necessária a tomada de decisão por parte do sistema. Nesse momento, é importante destacar que, após a tomada de decisão, ocorre o acionamento das válvulas do sistema e, ainda, que existem atrasos inerentes a essa atuação que serão detalhados em breve. Tal fator faz que no bloco que tomada de decisão seja levado em consideração o atraso devido ao acionamento do sistema de atuação.

O bloco de tomada de decisão é responsável por verificar as ações que devem ser realizadas pelo sistema mediante informações temporais. Logo, a Figura 25 apresenta a máquina de estados para a tomada de decisão do sistema.

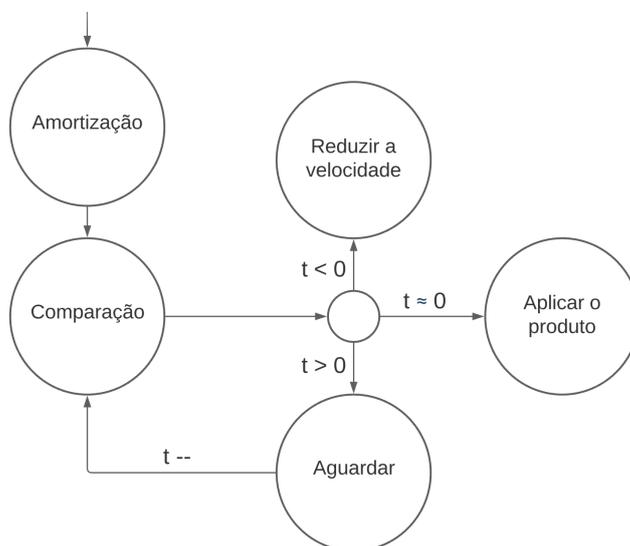


Figura 25: Bloco tomada de decisão.

A partir da Figura 25 verifica-se que o início da máquina de estados ocorre no estado denominado amortização, incumbido de reduzir do tempo disponível até a aplicação o atraso relativo à atuação do sistema. Como trata-se de uma operação simples, o atraso na amortização, predição do tempo disponível até a planta, é desconsiderado e iniciam-se as operações no estado de comparação. O estado de comparação disponibiliza a informação temporal  $t$  para que seja avaliada a ação que deve ser tomada pelo sistema.

Dessa forma, uma vez que o tempo amortizado seja igual a zero, o bloco de atuação deve ser imediatamente acionado para que o produto defensivo seja aplicado corretamente nas plantas, o que é representado no estado aplicar o produto. Por outro lado, se este tempo for inferior a zero, o estado reduzir a velocidade é alcançado e significa que não houve tempo hábil entre a identificação da plantação e o acionamento dos bicos de pulverização e o sistema deve sugerir ao tratorista que a velocidade do conjunto trator-pulverizador seja reduzida.

Ainda, caso o conjunto trator-pulverizador ainda não tenha atingido a posição necessária para aplicação do produto, isto é, o tempo amortizado seja superior a zero, é necessário aguardar até que este tempo se torne nulo. Para esta situação, o estado aguardar é alcançado, a variável  $t$  é decrementada e o estado de comparação é novamente alcançado. Assim, o ciclo comparação-aguardar ocorre até que  $t$  atinja o valor zero.

Uma vez que o comando para atuação das válvulas ocorra, o bloco de atuação é acionado. Este bloco é responsável por realizar o disparo das válvulas de acionamento do sistema de pulverização. A Figura 26 apresenta o bloco de atuação do sistema.

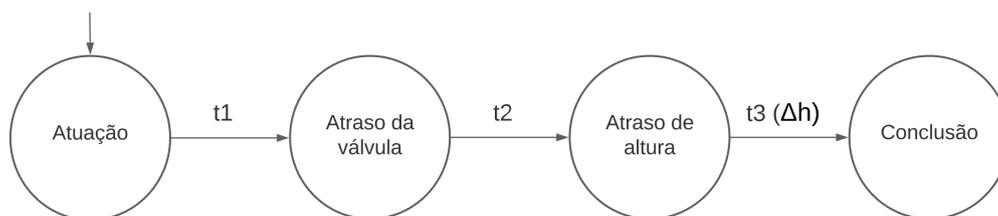


Figura 26: Bloco de atuação.

Deste modo, inicialmente o estado de atuação representa o envio dos comandos elétricos para acionamento das válvulas solenoide. Além do sistema contar com o atraso elétrico ocasionado pelos circuitos eletrônicos de acionamento das válvulas ( $t1$ ), existe o atraso mecânico relativo ao acionamento da válvula ( $t2$ ), representado no estado atraso da válvula. Ainda, devido a altura existente entre as saídas dos bicos de pulverização e as plantas, é inserido no sistema o atraso de altura representado por  $t3$ , que é dependente da diferença de altura existente. Por fim, o estado de conclusão é alcançado e o bloco de atuação, assim como o sistema, é concluído.

Uma vez concluído o detalhamento de cada bloco do modelo completo do sistema, faz-se necessária a análise dos atrasos temporais de cada uma das etapas envolvidas. Portanto, a próxima seção aborda a análise dos dinâmicas do sistema.

### 3.3 Análise dos Atrasos do Sistema

Na solução proposta neste trabalho, conforme abordado anteriormente, existem atrasos inerentes ao pulverizador automatizado que são desconsiderados por alguns autores. Como exemplos, no protótipo desenvolvido podem-se destacar o atraso devido ao

tempo de captura e processamento das imagens, o atraso mecânico que ocorre entre o sinal elétrico transmitido para as válvulas solenoides e a abertura e o fechamento de fato dos dispositivos, a dinâmica envolvida no conjunto trator-pulverizador e, ainda, o atraso de transporte devido ao deslocamento do fluido a partir do momento em que este é liberado até atingir o alvo desejado. Nesse contexto, sugerem-se algumas metodologias para obtenção destes atrasos.

Como é de se esperar, o atraso devido aquisição de imagens é definido a partir da adoção da câmera a ser utilizada. Embora ainda não tenham sido estabelecidos os modelos de câmera que serão adotados para o sistema, há expectativa de que sejam utilizadas câmeras próprias para Raspberry Pi e que se utilize processamento embarcado nesse dispositivo. No entanto, a partir dos dados disponibilizados pelo fabricante (SONY, 2020), a Câmera Raspberry Pi v2 8MP possui taxa de aquisição de  $60 \text{ frames/s}$ . Desse modo, pode-se dizer que o atraso de aquisição de cada imagem (*frame*) é de  $0,01667 \text{ s}$ , conforme apresenta a Equação 1.

$$\begin{aligned} T &= 1/f \\ T &= 1/60 \\ T &= 0,01667s, \end{aligned} \tag{1}$$

onde  $T$  é o período e  $f$  a frequência de aquisição de imagens.

Para obtenção do tempo relativo ao pré-processamento de imagens, isto é, o tempo consumido para o carregamento e preparação do conteúdo a ser passado ao algoritmo que de fato realiza o processamento das imagens, foram realizados testes em *software*, onde foram obtidos os tempos de pré-processamento para diferentes entradas e, portanto, foi constatado que este atraso varia de  $45 \text{ ms}$  a  $55 \text{ ms}$  para o conjunto de imagens presentes no *dataset* de imagens de plantação de soja desenvolvido pelo AutoCERES.

Na etapa de processamento de imagens, foram realizados testes de verificação do atraso relativo a execução de algoritmos dada a entrada de determinada imagem (NAS-CIMENTO et al., 2019). Dessa forma, verificou-se, conforme dados apresentados no Apêndice B, que o percentual de pixels verdes presentes na imagem está diretamente relacionado ao atraso de processamento relativo a esta imagem. Isto se deve ao fato do modo como o algoritmo está implementado, isto é, sua complexidade linear  $O(n)$ , como mostra o pseudocódigo a seguir.

À vista disso, foram utilizados os dados do Apêndice B de forma a ajustar a função que descreve o comportamento da relação em destaque. Para tanto, por meio da função *fit* do *software* Matlab, que tem como função ajustar os coeficientes do polinômio que melhor descreve um conjunto de pontos, foi realizado o ajuste de uma reta e obtidos seus parâmetros.

Assim, o parâmetro obtido para o coeficiente angular da reta foi de  $4,074$ , enquanto para coeficiente linear foi de  $262,3$ . Além disso, a reta ajustada possui erro quadrático

---

**Algoritmo 1:** Pré-processamento de imagem.
 

---

**Entrada:**  $I(c,x,y)$ ,  $k$ ,  $t$ ,  $h$ ,  $w$

- 1 Recebe a imagem de entrada  $I(R,G,B)$ ;
- 2 Redimensiona para 360x480 pixels;
- 3 Retira a Região de Interesse;
- 4 **for**  $i=0$ ;  $i \leq w$ ;  $i++$  **do**
- 5     **for**  $j=0$ ;  $j \leq h$ ;  $j++$  **do**
- 6         **if**  $((I(0,i,j) + I(2,i,j)) k < I(1,i,j)) \ \&\& \ ((I(0,i,j) + I(2,i,j)) > t)$  **then**
- 7             O pixel é considerado verde e é trocado para branco
- 8         **else**
- 9             O pixel não é considerado verde e é trocado para preto
- 10         **end**
- 11     **end**
- 12 **end**

---

médio de 9,9991 *ms*. A Figura 27 apresenta o comparativo entre os dados de processamento obtido e a reta ajustada.

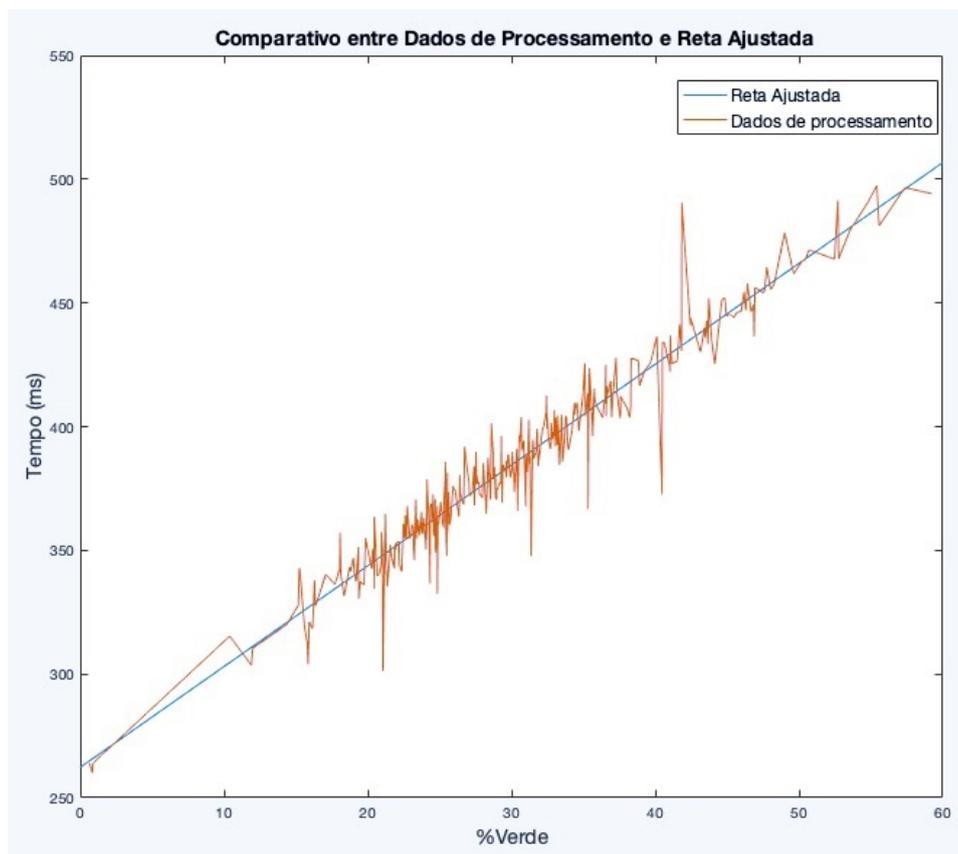


Figura 27: Gráfico comparativo entre dados de tempo de processamento e reta ajustada.

É importante destacar que os ensaios que resultaram nos dados de processamento apresentados foram realizados em computadores. É de se esperar que quando o sistema for embarcado em *hardware* dedicado, o atraso seja maior. O intuito nesse momento é

apenas avaliar o comportamento do algoritmo dada a variação na imagem de entrada, isto é, sua complexidade de tempo. Ainda, na obtenção dos dados foi considerado o tempo total do bloco de processamento de imagens, sem levar em consideração a divisão entre os tempos de pré-processamento e processamento, ou seja, é necessário decrementar o valor do tempo de pré-processamento do coeficiente linear obtido.

Neste mesmo contexto, com a finalidade de verificar a repetibilidade do tempo de processamento das imagens de acordo com o percentual de *pixels* verdes, algumas amostras com diferentes percentuais foram submetidas 15 vezes ao algoritmo atualmente utilizado para o processamento de imagens. Sendo assim, a Figura 28 apresenta os dados obtidos de forma ordenada.

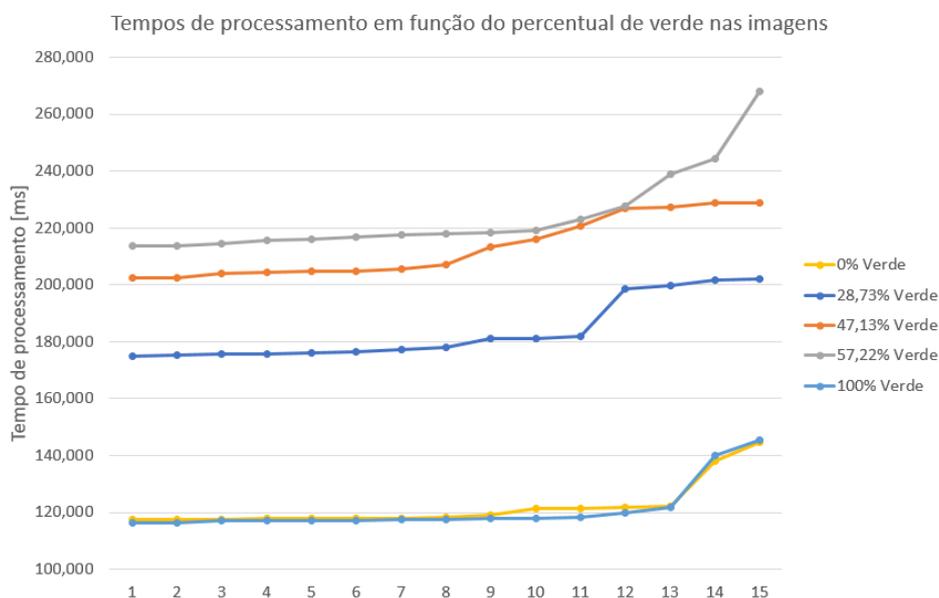


Figura 28: Gráfico comparativo entre dados de tempo de processamento e reta ajustada.

É possível observar que para os valores de 0% e 100%, o algoritmo apresenta tempo de processamento inferior aos demais valores percentuais e, ainda, que para os dois casos, este tempo é semelhante. Isto ocorre devido a uma etapa inicial em que tais condições são avaliadas e parte do algoritmo é ignorado, uma vez que não faz sentido encontrar linhas de plantação (através da Transformada de *Hough*) em imagens em que não há presença de plantas (0%) ou imagens que são completamente cobertas por plantas (100%).

Outrossim, para o restante dos valores percentuais constata-se que existem pequenas variações entre os tempos das amostras e, em algumas ocorrências, valores até mesmo divergentes. Para verificar melhor tal comportamento, a Figura 29 apresenta a distribuição normal para cada conjunto de amostras.

Destaca-se que foram utilizados quatro desvios padrão no gráfico de distribuição normal apresentado. Além disso, a partir da distribuição observada para o percentual de 57,22%, verifica-se que quanto maior for o percentual de *pixels* verdes presente na imagem, menor será a confiabilidade em relação à repetibilidade do tempo de processamento

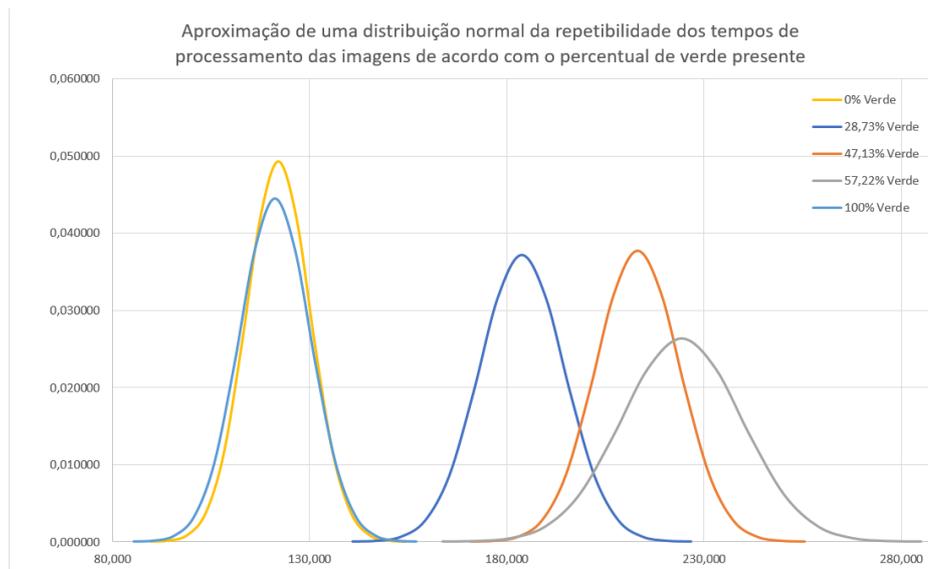


Figura 29: Gráfico comparativo entre dados de tempo de processamento e reta ajustada.

da imagem.

Dando seguimento à análise dos atrasos, foram realizados ensaios visando a obtenção de dados de atraso referentes ao tempo de abertura e fechamento das válvulas solenoides. Os ensaios foram realizados por câmera de alta velocidade do modelo Phantom Miro R 311. Para tanto, foi elaborado um cenário em que foi possível verificar a diferença entre o tempo de disparo do LED e o tempo em que a válvula solenoide completa seu movimento.

A Figura 30 apresenta um dos ensaios realizados em laboratório. Uma vez que a taxa de aquisição de imagem da câmera é de  $1000 \text{ frames/s}$ , tem-se que para cada *frame* gasto para a execução do movimento o tempo é de  $1 \text{ ms}$ . Logo, a partir de análise visual, obtém-se o *frame* de início e fim do movimento, o que possibilita determinar a diferença entre *frames* e, conseqüentemente, o tempo associado a abertura e ao fechamento da válvula solenoide.

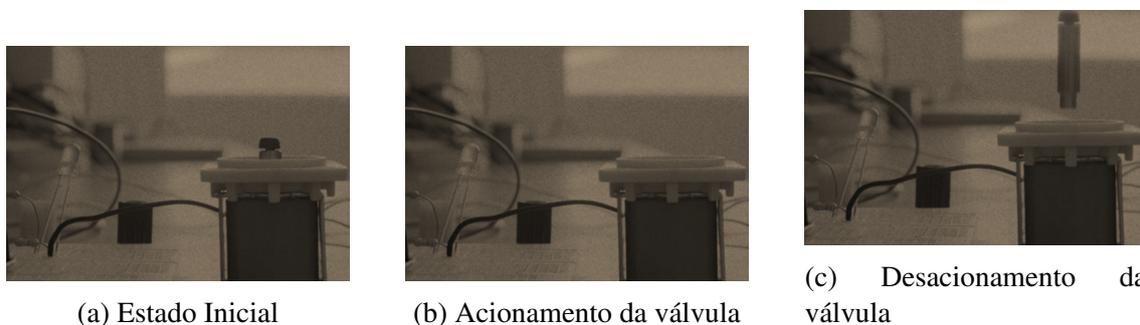


Figura 30: Imagens do ensaio para obtenção do tempo de resposta das válvulas solenoide.

Dessa forma, para exemplificar o modo de obtenção dos atrasos em questão, verificou-se em determinado ensaio que o movimento da válvula se iniciou no *frame* de número 500 e foi concluído no *frame* de número 600. A partir dessas informações e sabendo-se que

cada *frame* corresponde ao tempo de 1 *ms*, infere-se que o movimento teve duração de 100 *ms*.

Logo, foram realizados três ensaios com três diferentes válvulas solenoides de modo a verificar a repetibilidade nos tempos de atuação dos dispositivos. Os resultados para uma das solenoides podem ser visualizados na Tabela 3.

<b>Parâmetro</b>	<b>Ensaio 1</b>	<b>Ensaio 2</b>	<b>Ensaio 3</b>
FPS	1000/s	1000/s	1000/s
LED	<i>frame: 774</i>	<i>frame: 1471</i>	<i>frame: 592</i>
Solenóide ON	<i>frame: 825</i>	<i>frame: 1520</i>	<i>frame: 640</i>
Diferença ON	<i>51 frames</i>	<i>49 frames</i>	<i>48 frames</i>
Tempo ON	<i>51 ms</i>	<i>49 ms</i>	<i>48 ms</i>
LED OFF	<i>frame: 1174</i>	<i>frame: 1894</i>	<i>frame: 1104</i>
Solenóide OFF	<i>frame: 1189</i>	<i>frame: 1909</i>	<i>frame: 1118</i>
Diferença OFF	<i>15 frames</i>	<i>15 frames</i>	<i>14 frames</i>
Tempo OFF	<i>15 ms</i>	<i>15 ms</i>	<i>14 ms</i>

Tabela 3: Tabela comparativa entre ensaios de tempo de atraso das válvulas solenoide.

Sendo assim, conclui-se que o tempo para acionamento das válvulas solenoides é de aproximadamente 50 *ms* e de desacionamento de 15 *ms*. É importante destacar que para as demais solenoides os tempos de atuação foram semelhantes aos obtidos no experimento apresentado e, ainda, que tratam-se de válvulas normalmente fechadas, diferentemente das válvulas do protótipo em estudo, que possuem válvulas com característica normalmente aberta.

No que diz respeito à dinâmica envolvendo o conjunto trator-pulverizador, é válido ressaltar que a fusão dos dados de GPS e IMU fornecem informações de velocidade e posição deste conjunto. Nesse contexto, o modelo cinemático do trator a ser considerado é a conhecida geometria de Ackerman. A Figura 31 apresenta o modelo cinemático para veículos com as mesmas características do trator que está sendo estudado.

Portanto, o deslocamento do veículo pode ser estimado através da Equação 2. É válido ressaltar que o conjunto trator-pulverizador possui natureza física contínua, enquanto que a natureza do sistema de controle e atuação é discreta, o que torna a modelagem do sistema híbrida e não apenas discreta, como comumente modelado por máquinas de estados convencionais.

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + \dot{x}\Delta t \\ y(k+1) = y(k) + \dot{y}\Delta t \\ \phi(k+1) = \phi(k) + \dot{\phi}\Delta t \end{cases}, \quad (2)$$

onde  $[x \ y \ \phi]^T$  é o vetor que representa a posição do veículo nas coordenadas globais,  $k$  é o contador de iterações,  $[\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\phi}]^T$  é o vetor de velocidades do veículo e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre iterações do algoritmo (ANDRADE; HERNANDES; BECKER, 2012).

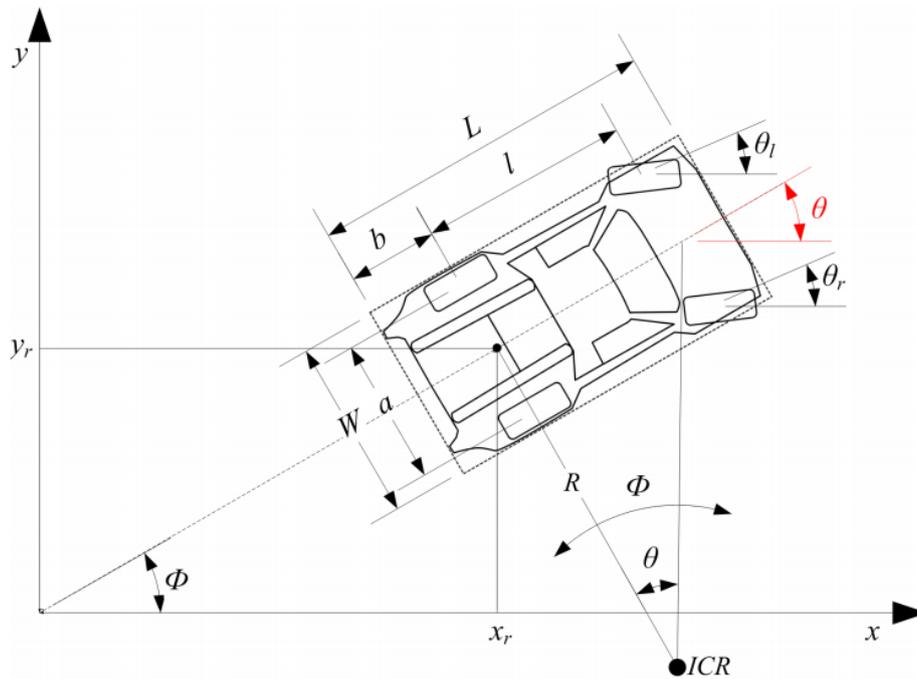


Figura 31: Modelo cinemático do conjunto trator-pulverizador. (ANDRADE; HERNANDES; BECKER, 2012)

Para verificar o atraso temporal associado a diferença de altura entre o bico de aplicação e as linhas de plantação, conforme ilustrado pela variável  $d$  na Figura 32, faz-se necessária uma análise matemática de modo a relacionar a velocidade de escoamento do fluido com a pressão a que o sistema está submetido para que o atraso em questão possa ser calculado.

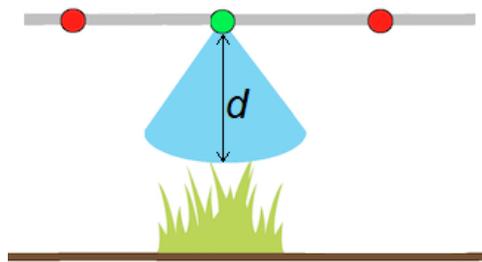


Figura 32: Ilustração do atraso temporal associado a diferença de altura entre bicos de pulverização e plantas.

Isto posto, de acordo com o Teorema de Bernoulli, o comportamento de um fluido em movimento ao longo de uma linha corrente pode ser representado pela expressão dada pela Equação 3.

$$P_1 + \rho \cdot g \cdot h_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = P_2 + \rho \cdot g \cdot h_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2, \quad (3)$$

onde  $P_1$ ,  $h_1$  e  $v_1$  são a pressão [Pa], a altura [m] e a velocidade [m/s] no ponto de jato

livre, respectivamente; e  $P_2$ ,  $h_2$  e  $v_2$  são as variáveis do fluido disperso no ambiente. Ainda,  $\rho$  é a densidade absoluta do fluido [ $kg/m^3$ ] e  $g$  é a gravidade local do sistema [ $m/s^2$ ].

Para os elementos hidráulicos do módulo de pulverização, considera-se que a diferença de altura entre os pontos 1 e 2 pode ser dada por  $\Delta h$ , que representa a diferença de altura entre o ponto em que ocorre o jato e a posição das gotículas em direção às culturas.

Logo, considerando, ainda, que  $P_2 - P_1 = \Delta P$ , as relações do Teorema de Bernoulli podem ser representadas, conforme mostrado na Equação 4.

$$\frac{1}{2}\rho \cdot (v_1^2 - v_2^2) = \Delta P + \rho g \Delta h. \quad (4)$$

Por outro lado, a velocidade em que o fluido deixa o orifício está diretamente relacionado com a área de passagem e até mesmo com a própria vazão volumétrica do fluido no sistema. Dessa forma, a relação em destaque pode ser estabelecida pela Equação 5.

$$Q_1 = v_1 \cdot A_1, \quad (5)$$

onde  $Q_1$  é a vazão [ $m^3/s$ ],  $v_1$  é a velocidade de escoamento do fluido [ $m/s$ ] e  $A_1$  é a área do orifício do bico de pulverização [ $m^2$ ].

Portanto, substituindo-se a Equação 5 na Equação 4 e isolando-se o resultado em termos de  $v_2$ , tem-se como relação entre velocidade e pressão de trabalho do sistema a Equação 6.

$$v_2 = \sqrt{\left(\frac{Q_1}{A_1}\right)^2 - \frac{2}{\rho}\Delta P - 2g\Delta h}, \quad (6)$$

onde  $Q_1$  é a vazão [ $m^3/s$ ],  $A_1$  é a área do orifício do bico de pulverização [ $m^2$ ],  $\rho$  é a densidade absoluta do fluido [ $kg/m^3$ ],  $\Delta P$  é a diferença de pressão entres os pontos 1 e 2 [ $Pa$ ],  $g$  é o valor da gravidade local [ $m/s^2$ ] e  $\Delta h$  é a diferença de altura entres os pontos 1 e 2 [ $m$ ].

Porém, como as gotas de água estão sujeitas a interferências externas, é necessário considerar que durante a trajetória das gotas existem perdas relativas, principalmente, à resistência do ar. Logo, é necessário avaliar as forças que atuam sobre as gotas a fim de verificar este comportamento.

Nesse sentido, de acordo com a Segunda Lei de Newton, a força resultante aplicada a um corpo é igual ao produto da massa da matéria pela aceleração adquirida. Sendo assim, a Equação 7 apresenta o somatório de forças que atuam na trajetória da gota.

$$F_J + F_P - F_A = m \cdot a. \quad (7)$$

Todavia, isolando-se a variável  $a$  na Equação 7, obtém-se a Equação 8.

$$a = (F_J + F_P - F_A)/m. \quad (8)$$

onde  $a$  é o valor da aceleração da gota na trajetória [ $m/s^2$ ],  $F_J$  é a força do jato devido à pressão do sistema de pulverização [ $N$ ] cac,  $F_P$  é a força peso devido à ação da gravidade sobre a gota [ $N$ ],  $F_A$  é a força de atrito devido à resistência do ar que a gota sofre durante a queda [ $N$ ] e  $m$  é a massa da gota [ $kg$ ].

A força do jato devido à pressão do sistema de pulverização  $F_J$  pode ser estimada por  $F_J = P.A$ , em que  $P$  é a pressão do sistema de pulverização [ $Pa$ ] e  $A$  é a área do orifício do bico de pulverização [ $m^2$ ]. Já a força peso devido à ação da gravidade sobre a gota  $F_P$  pode ser estimada por  $F_P = m.g$ , onde  $m$  é a massa da gota [ $kg$ ] e  $g$  é o valor da gravidade local [ $m/s^2$ ]. Por fim, a força de atrito devido à resistência do ar que a gota sofre durante a queda  $F_A$  pode ser estimada por  $F_A = k.v^2$ , em que  $k$  é uma constante que depende do formato do corpo e da área de seção transversal perpendicular à direção do movimento [ $N.s^2/m^2$ ] e  $v$  é a velocidade da gota [ $m/s$ ].

Uma vez conhecida a aceleração da gota na trajetória dada pela Equação 8 e sabendo-se da cinemática que a velocidade final de trajetória pode ser dada por  $V = V_0 + a.t$  e utilizando-se da Equação de Torricelli  $V^2 = V_0^2 + 2.a.\Delta s$ , é possível concluir que o tempo da trajetória das gotas pode ser dado pela Equação 11.

$$t = \frac{\sqrt{V_0^2 + 2a\Delta s} - V_0}{a}, \quad (9)$$

onde  $V_0$  é a velocidade inicial, isto é, a velocidade em que o sistema de pulverização libera a gota para a atmosfera [ $m/s$ ],  $a$  é a força de aceleração contrária ao movimento da gota devido à resistência com o ar [ $m/s^2$ ] e  $\Delta s$  é a distância percorrida pela gota na trajetória [ $m$ ].

Logo, é possível concluir que a velocidade inicial da gota  $V_0$  é exatamente a velocidade em que o sistema de pulverização libera o jato para a atmosfera  $v_2$ . Ainda, como a trajetória desenvolvida pela gota é predominantemente vertical, para fins de simplificação não será considerado o movimento horizontal e, portanto,  $\Delta s = \Delta h$ .

Dessa forma, considerando que  $V_0 = v_2$  e que  $\Delta s = \Delta h$ , obtém-se a Equação 10, que determina o atraso temporal da diferença de altura entre bicos de pulverização e as plantas ( $\Delta h$ ).

$$t = \frac{\sqrt{v_2^2 + 2a\Delta h} - v_2}{a}, \quad (10)$$

onde  $t$  é o atraso temporal referente à diferença de altura entre bicos de pulverização e linhas de plantação [ $s$ ],  $v_2$  é velocidade com que o fluido deixa o orifício do bico de pulverização dado pela Equação 6 [ $m/s$ ],  $\Delta h$  é a diferença de altura entres os bicos e

as plantas  $[m]$  e  $a$  é a aceleração correspondente à perda de velocidade da gota em sua trajetória até as plantas  $[m/s^2]$ , dada pela Equação 8.

Dessa forma, como alguns dos parâmetros necessários para a realização da estimação inerentes à modelagem apresentada não são conhecidos, foram realizados ensaios com o intuito de obter tais grandezas. Para tanto, foram realizados novos ensaios com a câmera de alta velocidade durante o funcionamento do pulverizador agrícola com foco no escoamento das gotas nos bicos de pulverização, como mostra a Figura 33.

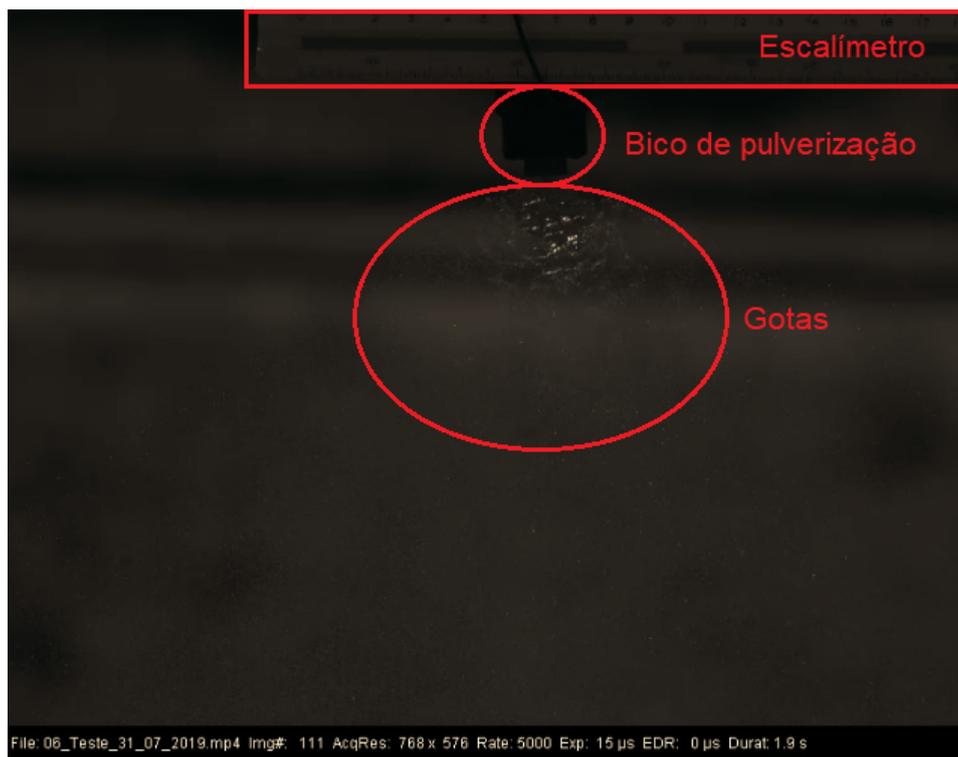


Figura 33: Imagem do vídeo realizado para obtenção de parâmetros da trajetória das gotas.

Assim, foram utilizadas bibliotecas de visão computacional disponíveis no *software* Matlab para obtenção de dados precisos dos *frames* da gravação. Primeiramente, verificou-se que 15 *pixels* da imagem correspondem à medida de um centímetro (1,0 *cm*) no sistema métrico. Tal medida foi obtida a partir do escalímetro posicionado estrategicamente na parte superior do bico de pulverização e, conseqüentemente, da imagem (Figura 33).

Sabendo-se, então, da relação entre o sistema métrico e os *pixels* na imagem, foi rastreada uma gota em específico com o intuito de avaliar sua trajetória. Na Figura 34, é possível observar em vermelho o entorno do ponto inicial da gota mapeada. Sendo assim, foram obtidas as coordenadas em *pixels* do centroide da gota e o valor do seu respectivo *frame*.

É importante destacar que a gota foi selecionada a partir da possibilidade de visualização e acompanhamento nos demais *frames* do vídeo, isto é, devido ao grande

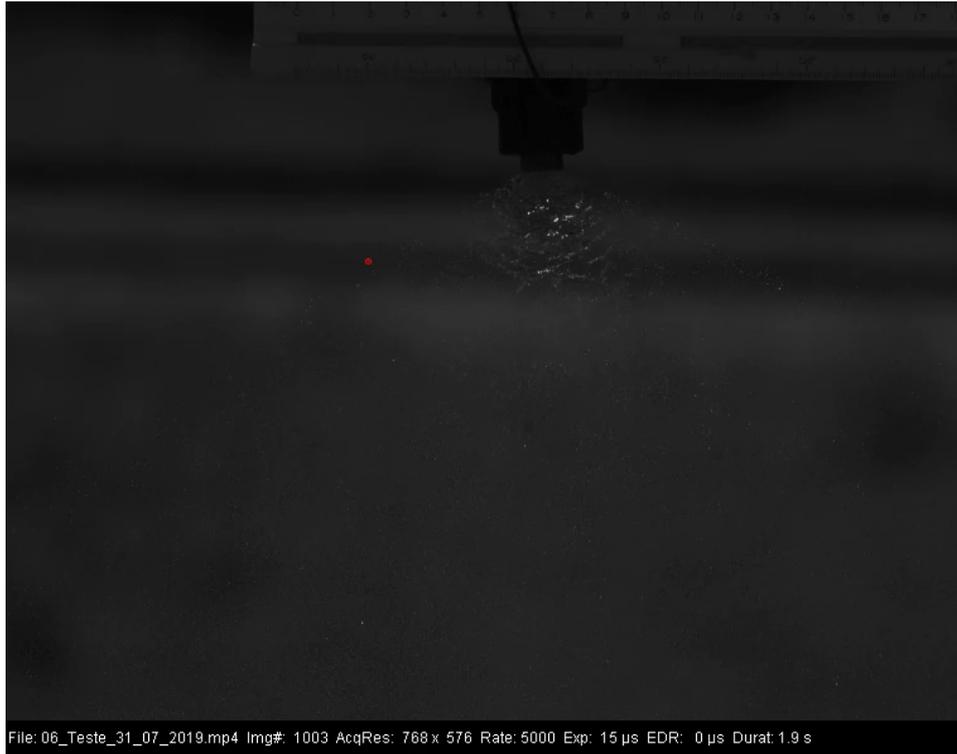


Figura 34: *Frame* destacando o ponto inicial da gota mapeada.

número de gotas presentes na área central dos bicos, não foi possível mapear as gotas mais ao centro da imagem.

Dito isso, foram obtidas as coordenadas e o *frame* da posição final da gota, isto é, do ponto em que a gota deixou de ser observada no vídeo realizado (Figura 35).

Para uma melhor visualização de toda a trajetória realizada pela gota, foram obtidas as localizações da gota em todo o intervalo de *frames* avaliado. Assim, a imagem do primeiro *frame* foi somada à última imagem avaliada e todos as coordenadas obtidas foram destacadas, como pode ser visto na Figura 36.

Sendo assim, com os dados obtidos é possível avaliar a distância percorrida, parâmetro fundamental para o cálculo da velocidade inicial da gota. Logo, a Tabela 4 apresenta os dados dos *frames* e das coordenadas da trajetória apresentada pela gota.

<b>Parâmetro</b>	<b>Frame</b>	<b>Valor [pixel]</b>
Coordenada inicial $[x_0, y_0]$	1003	[290, 210]
Coordenada final $[x_1, y_1]$	1041	[356, 56]

Tabela 4: Coordenadas dos pontos inicial e final da trajetória da gota.

Dessa forma, a partir da Equação 11 calcula-se a distância entre os dois pontos.

$$d = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}, \quad (11)$$

onde  $d$  é a distância percorrida pela gota [pixels],  $x_0$  e  $y_0$  são as coordenadas iniciais da



Figura 35: *Frame* destacando o ponto final da gota mapeada.

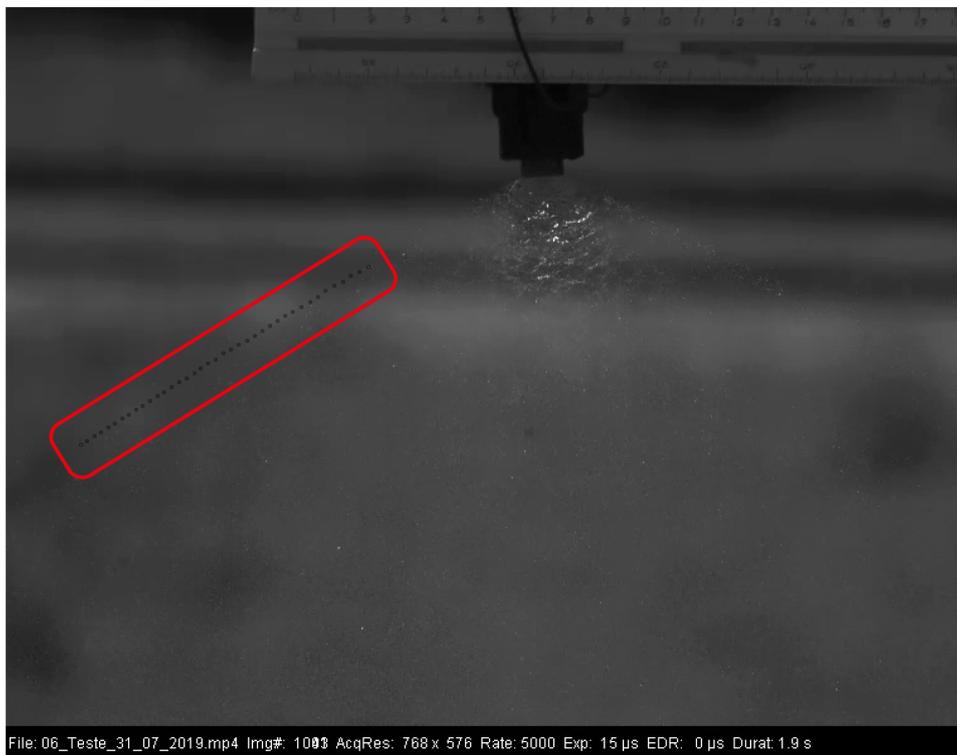


Figura 36: *Frame* destacando a trajetória completa da gota mapeada.

gota observada [*pixels*] e  $x_1$  e  $y_1$  são as coordenadas finais da gota observada [*pixels*].

Portanto, substituindo-se os parâmetros da Tabela 4 na Equação 11, calcula-se a distância percorrida, conforme mostra a Equação 12.

$$\begin{cases} d = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} \\ d = \sqrt{(356 - 290)^2 + (56 - 210)^2} \\ d = 167,55 \text{ pixels} \end{cases} \quad (12)$$

Dessa forma, é possível obter a distância percorrida pela gota no sistema métrico a partir da correspondência anteriormente obtida, como mostra a Equação 13.

$$\begin{cases} 1 \text{ cm} \rightarrow 15 \text{ pixels} \\ X \text{ cm} \rightarrow 167,55 \text{ pixels} \end{cases} \quad (13)$$

Sendo assim, da Equação 13 conclui-se que o valor de  $X$  vale  $11,17 \text{ cm}$ , ou seja, a distância percorrida pela gota entre os *frames* 1003 e 1041 da gravação é de  $11,17 \text{ cm}$ . Além disso, a partir da taxa de aquisição de imagens de  $5000 \text{ frames/s}$  configurada, é possível verificar que o tempo de cada *frame* é de  $0,0002 \text{ segundos}$ . Portanto, no intervalo de  $38 \text{ frames}$  avaliado, o tempo que a gota observada levou para percorrer a distância de  $11,17 \text{ cm}$  foi de  $0,0076 \text{ segundos}$ . Ademais, com os valores de distância (convertido para metros) e tempo da trajetória (em segundos), é possível calcular a velocidade desenvolvida pela gota através da Equação 14.

$$\begin{cases} v = \frac{d}{t} \\ v = \frac{0,1117}{0,0076} \\ v = 14,70 \text{ m/s} \end{cases} \quad (14)$$

Dessa forma, verifica-se que a velocidade desenvolvida pela gota é de aproximadamente  $14,70 \text{ m/s}$ . Com o valor da distância percorrida, é possível calcular e comparar o valor de velocidade modelada pela Equação 6. Para tanto, serão utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 5.

Parâmetro	Valor utilizado
$Q_1$	$1,00 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
$A_1$	$7,85 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$
$\rho$	$1000 \text{ kg/m}^3$
$\Delta P$	$-1,99 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
$g$	$9,81 \text{ m/s}^2$
$\Delta h$	$0,1117 \text{ m}$

Tabela 5: Coordenadas dos pontos inicial e final da trajetória da gota.

Destaca-se que os parâmetros foram obtidos mediante avaliação específica do sistema de pulverização em estudo. Isso significa que os ensaios foram realizados com o sistema regulado para a pressão de trabalho de  $3,0 \text{ bar}$ . Mediante esta pressão, a vazão dos bicos de pulverização utilizados no sistema é de  $0,6 \text{ L/min}$ , que convertidos equivalem ao

valor de  $1,00 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ . É importante ressaltar que o valor de vazão individual de cada bico foi obtido a partir do catálogo do fabricante e comprovado experimentalmente em testes de funcionamento realizados com os sensores de vazão do sistema.

Além disso, a área das tubulações do sistema por onde o fluido escoar é de  $1/2''$  ou  $7,85 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ . Por fim, foi utilizado o valor de  $9,81 \text{ m/s}^2$  para gravidade local  $g$ ,  $1000 \text{ kg/m}^3$  para a densidade da água  $\rho$  e o valor de  $-1,99 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  para  $\Delta P$ , diferença entre a pressão atmosférica de  $101.000 \text{ Pa}$  e pressão de  $3,0 \text{ bar}$  ou  $300.000 \text{ Pa}$  do sistema.

Logo, utilizando-se destes valores (Tabela 5), é possível calcular a velocidade que as gotas deveriam desenvolver ao saírem dos bicos de pulverização até de fato atingirem as linhas de plantação. O resultado obtido pode ser observado na Equação 15.

$$\begin{cases} v_2 = \sqrt{\left(\frac{Q_1}{A_1}\right)^2 - \frac{2}{\rho}\Delta P - 2g\Delta h} \\ v_2 = \sqrt{\left(\frac{1,00 \cdot 10^{-5}}{7,85 \cdot 10^{-7}}\right)^2 - \left(\frac{2}{1000} \cdot -1,99 \cdot 10^5\right) - (2 \cdot 9,81 \cdot 0,1117)} \\ v_2 = 23,62 \text{ m/s} \end{cases} \quad (15)$$

Porém, comparando-se os resultados obtidos experimentalmente (Equação 14) e por meio de cálculos (Equação 15), infere-se que existem perdas significativas devido às forças externas que atuam sobre as gotas. Logo, é possível afirmar que a perda de velocidade na trajetória da gota observada é de aproximadamente  $8,93 \text{ m/s}$ , ou seja, a velocidade desenvolvida sofre uma redução de cerca de 40% do valor modelado sem interferências externas (Equação 6).

Sendo assim, é possível afirmar que para a situação em que o sistema opera à pressão de  $3,0 \text{ bar}$ , a equação que determina a relação entre o atraso espacial e a distância dos bicos às plantas (altura da barra de pulverização) pode ser simplificada conforme mostra a Equação 16.

$$t_h = \frac{\Delta h}{0,6 \cdot v_2} \quad (16)$$

Ressalta-se a importância de verificar o comportamento da velocidade, isto é, sua redução para outras faixas de pressão do sistema. Ainda, destaca-se que não foi possível calcular os valores de aceleração das gotas (Equação 8) devido ao desconhecimento das variáveis  $m$ , massa da gota de água do sistema de pulverização,  $A$ , valor da área da gota no cálculo da força devido à pressão do sistema ( $F_J$ ) e  $k$ , constante da força de resistência do ar, que também depende da forma do corpo e de sua área da secção transversal ( $F_A$ ).

Por fim, o último atraso avaliado neste trabalho diz respeito ao atraso mecânico de acionamento dos relés que compõem as placas de acionamento dos bicos de pulverização do pulverizador agrícola automatizado. Dessa forma, sabendo-se das especificações dos relés utilizados ( $12 \text{ V}$ ,  $10 \text{ A}$ ), foram consultados *datasheets* de diferentes fabricantes e conclui-se que o atraso mecânico de acionamento dos relés é de  $10 \text{ ms}$ .

Os demais atrasos do sistema, apresentados na seção de modelagem híbrida do pulverizador automatizado, são desconhecidos ou não puderam ser obtidos. Isto se deve ao fato da impossibilidade de realização de alguns ensaios práticos e até mesmo da indefinição de algumas tecnologias a serem utilizadas no protótipo final. Sendo assim, para fins de simulação, conforme será apresentado na próxima seção, serão utilizados os atrasos de aquisição de imagem ( $t_{ac}$ ), pré-processamento de imagem ( $t_{pp}$ ), processamento de imagem ( $t_p$ ), acionamento das válvulas ( $t_v$ ) e altura da barra de pulverização ( $t_h$ ) obtidos neste Capítulo. Para os demais atrasos serão utilizados valores para que não possuem embasamento teórico ou prático na atual fase do projeto.

### 3.4 Modelo descrito em simulador

Com o intuito de avaliar a modelagem realizada para o sistema, é necessário realizar simulações que descrevem, a partir da configuração de parâmetros, o comportamento do pulverizador agrícola. Para tanto, foi utilizada a *toolbox* StateFlow do Simulink, ferramenta integrada ao *software* Matlab. Destaca-se que a natureza do modelo é em malha aberta, ou seja, o valor da saída não realimenta o sistema e qualquer ação nos parâmetros de entrada afetam sua saída. A Figura 37 apresenta o modelo do sistema na ferramenta de simulação, conforme representado na Figura 14.

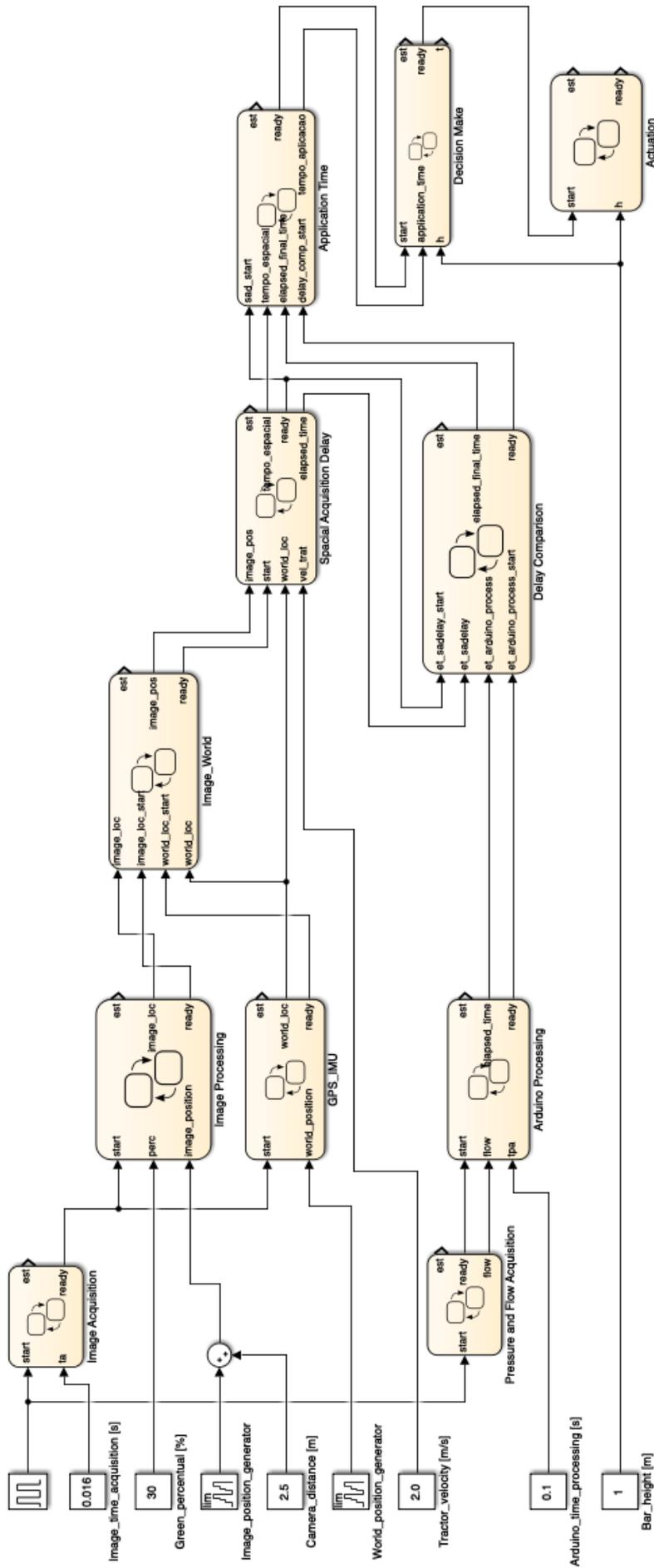
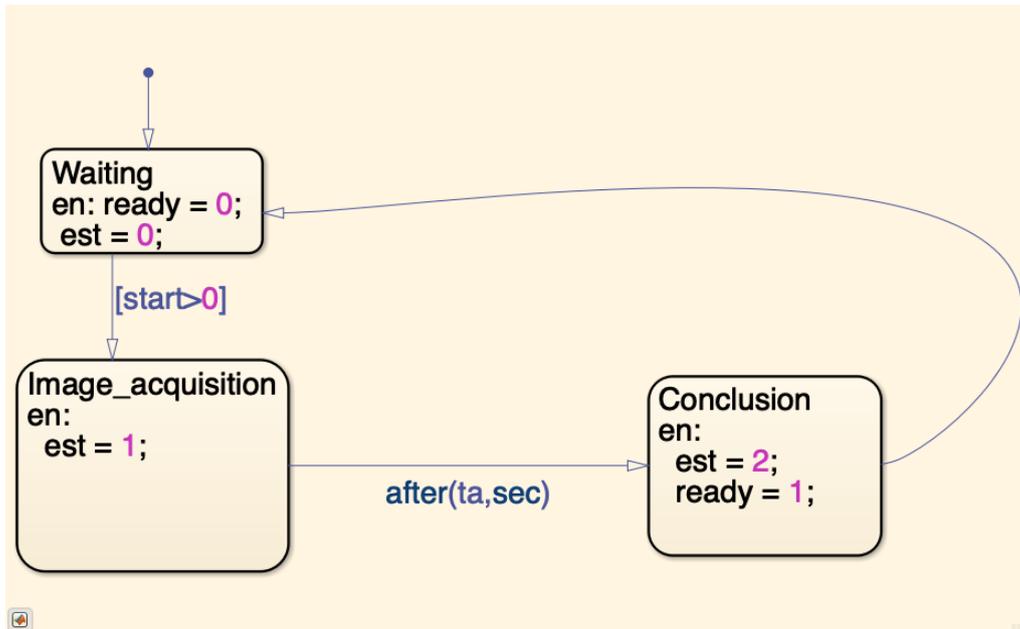
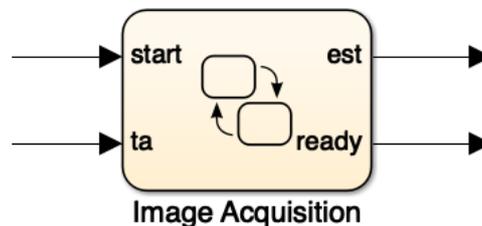


Figura 37: Modelo do sistema de pulverização em ferramenta de simulação.

Analogamente a lógica de apresentação dos blocos ilustrada na etapa de modelagem, serão apresentadas a seguir as máquinas de estado que compõem cada uma das etapas do sistema completo. Sendo assim, a Figura 38a apresenta o bloco de aquisição de imagem, que contém os estados *Waiting*, *Image acquisition* e *Conclusion*.



(a) Fluxo detalhado dos estados de aquisição de imagem.



(b) Entradas e saídas do bloco de estados de aquisição de imagem.

Figura 38: Máquina de estados de aquisição de imagem.

A partir da Figura 38a verifica-se que a mudança de estados ocorre na execução da função *after*. Tal função permite que a transição seja temporal, ou seja, ocorra após determinado intervalo de tempo. Portanto, como parâmetros recebe primeiramente um valor de tempo que deve estar presente no conjunto dos números reais e, por fim, a escala da unidade de tempo desejada (*usec*, *msec*, *sec*).

É importante destacar que para todas as máquinas de estados que serão apresentadas a seguir, utiliza-se o estado inicial *Waiting* para sincronização do sistema. Isso ocorre, pois no simulador utilizado, uma vez iniciada a simulação, todos os estados iniciais de todos os blocos são chamados, iniciando, então, todas as máquinas de estado, o que não é desejado e, em virtude disso, faz-se necessária tal sincronização.

Ainda, no *software* de simulação é necessário definir o tipo das variáveis que estão

sendo utilizadas na máquina de estados. Neste trabalho são utilizados três tipos de variáveis: variáveis de entrada (*input data*), variáveis de saída (*output data*) e, por fim, variáveis locais (*local data*). Como o próprio nome sugere, as variáveis de entrada são informações advindas de outros blocos do sistema completo, as variáveis de saída são informações disponibilizadas a outros blocos do sistema completo e, por fim, as variáveis locais são informações temporárias utilizadas apenas internamente à máquina de estados em questão.

Assim, da Figura 38a visualizam-se as variáveis *est*, que armazena o valor de identificação dos estados, *ta*, que representa o tempo de aquisição da imagem, *start*, que é a variável de condição para inicialização e sincronização da máquina de estados no sistema e, por fim, a variável *ready*, que determina se as ações desta máquina foram concluídas para que possa ser liberada a chamada do próximo bloco de estados. Deste modo, a Tabela 6 apresenta as variáveis utilizadas por este bloco e seus respectivos tipos.

Nome	Tipo
start	<i>input data</i>
ta	<i>input data</i>
est	<i>output data</i>
ready	<i>output data</i>

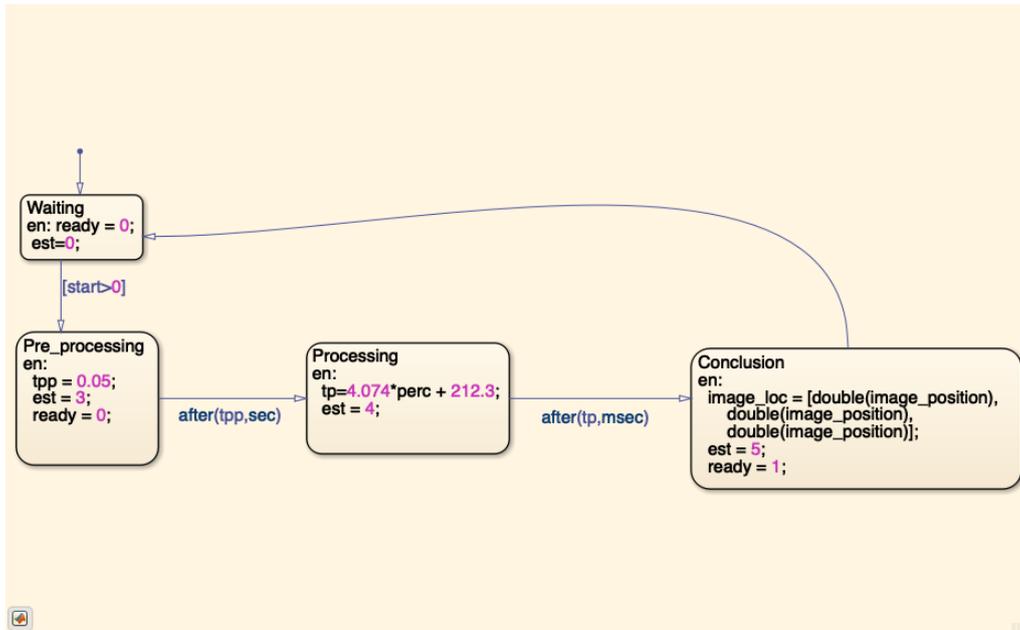
Tabela 6: Tabela das variáveis do bloco de aquisição de imagem e seus respectivos tipos.

Logo, a Figura 38b apresenta o bloco simplificado que contém internamente a máquina de estados de aquisição de imagem, onde é possível visualizar suas entradas e saídas, conforme supracitado.

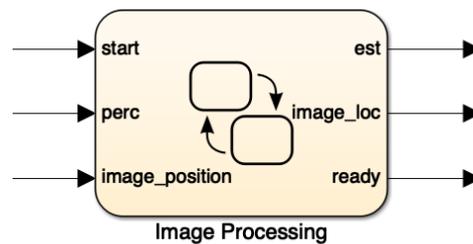
De forma análoga, apresentam-se os estados internos do bloco de processamento de imagens na Figura 39a, onde é possível observar o fluxo de funcionamento da máquina de estados. Logo, a máquina inicia mediante à condição imposta à variável *start*, informação advinda do bloco de aquisição de imagens, ou seja, uma vez que a aquisição seja concluída, o bloco de processamento de imagens é iniciado.

Como procedimento inicial do bloco de processamento de imagens, ocorre o pré-processamento, onde é obtido o valor do percentual de pixels verdes presentes na imagem. Decorrido o tempo de pré-processamento (*tpp*), a máquina passa para o estado de processamento, que é onde de fato são executados os algoritmos de identificação de linhas de plantação. Nesse estado verifica-se o tempo de processamento em função do percentual obtido na etapa de pré-processamento.

Logo, uma vez que o tempo associado ao processamento é atingido, a informação de localização da imagem (*image\_loc*) é obtida e o estado de conclusão é alcançado. Enquanto a variável *est* representa a identificação do estado, a variável *ready* autoriza a continuação da sequência de funcionamento do sistema. A Tabela 7 apresenta todas as variáveis envolvidas na máquina de estados em questão e seus respectivos tipos.



(a) Fluxo detalhado dos estados de processamento de imagem.



(b) Entradas e saídas do bloco de estados de processamento de imagem.

Figura 39: Máquina de estados de processamento de imagem.

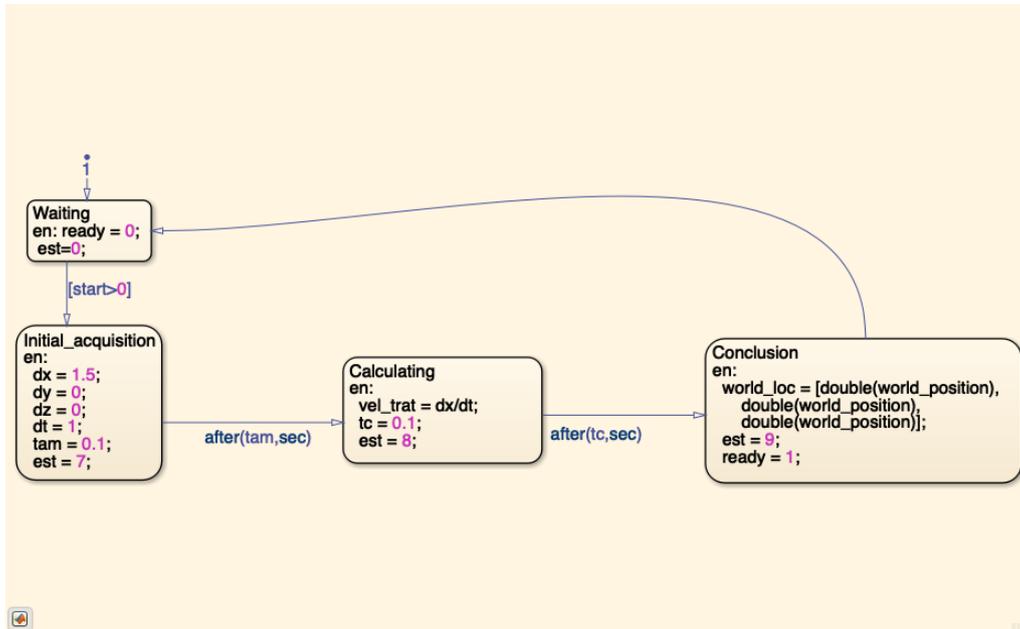
Nome	Tipo
start	<i>input data</i>
perc	<i>input data</i>
image_position	<i>input data</i>
tp	<i>local data</i>
tpp	<i>local data</i>
est	<i>output data</i>
image_loc	<i>output data</i>
ready	<i>output data</i>

Tabela 7: Tabela das variáveis do bloco de processamento de imagem e seus respectivos tipos.

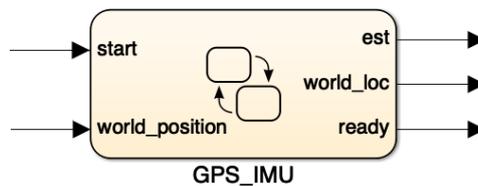
De forma simplificada, a Figura 39b apresenta o bloco de processamento de imagem com as entradas e saídas inerentes a esta máquina de estados.

Paralelamente, a máquina de estados GPS e IMU é ativada por meio da variável *start*, que inicialmente realiza a aquisição de dados de GPS e IMU. O tempo para transmissão

das informações, isto é, o tempo de amostragem, é representado pela variável *tam*, que possui valor hipotético, ou seja, sem embasamento teórico ou prático, como pode ser visto na Figura 40a.



(a) Fluxo detalhado dos estados GPS e IMU.



(b) Entradas e saídas do bloco de estados GPS e IMU.

Figura 40: Máquina de estados GPS e IMU.

Dessa maneira, o estado de estimativa é alcançado e, a partir dele, é obtida a velocidade de deslocamento do conjunto trator-pulverizador. O tempo para que a transição entre o estado de estimativa e o de conclusão (atraso de *hardware* devido ao cálculo de velocidade do trator) ocorra (*tc*) ainda é desconhecido e para a simulação em destaque foi adotado o valor de 0,1 s. Por fim, no estado de conclusão as informações de localização global são disponibilizadas (*world\_loc*) e a variável *ready* informa ao sistema que as etapas do bloco GPS e IMU foram concluídas. A Tabela 8 contém as variáveis envolvidas e o seu tipo correspondente.

Assim, para o sistema, o bloco de GPS e IMU é visto conforme mostrado na Figura 40b, tendo como entrada a variável *start* e *world\_position* (posição da planta em relação ao sistema de referência global) e saídas as variáveis *est*, *world\_loc* e *ready*.

Uma vez disponíveis as informações do bloco de processamento de imagem e de GPS e IMU, é possível executar o bloco de transformação imagem-mundo (*Image\_World*).

Nome	Tipo
start	<i>input data</i>
world_position	<i>input data</i>
dt	<i>local data</i>
dx	<i>local data</i>
dy	<i>local data</i>
dz	<i>local data</i>
tc	<i>local data</i>
tam	<i>local data</i>
vel_trat	<i>local data</i>
est	<i>output data</i>
world_loc	<i>output data</i>
ready	<i>output data</i>

Tabela 8: Tabela das variáveis do bloco GPS e IMU e seus respectivos tipos.

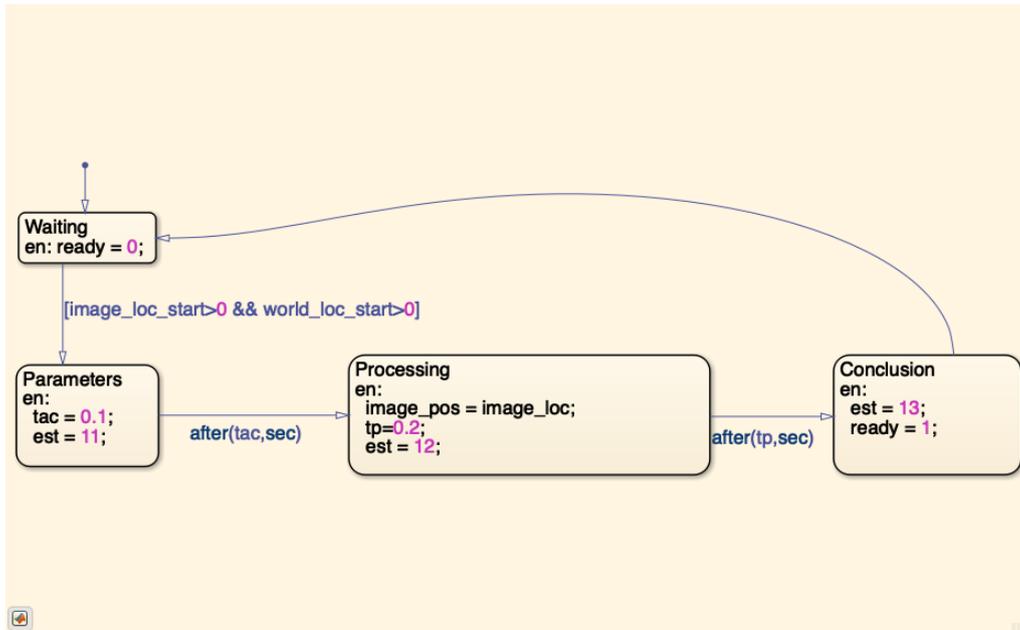
Em virtude disso, é possível observar na Figura 41a que o bloco em análise possui duas condições de entrada, isto é, a máquina só é ativada se o processamento de imagens é concluído (*image\_loc\_start*) e, ainda, se os dados provenientes do bloco GPS e IMU estão disponíveis (*world\_loc\_start*).

Sendo assim, satisfeitas as duas condições, a máquina de estados de transformação imagem-mundo inicia o estado *Parameters*, onde são atribuídos os parâmetros de instalação da câmera no sistema. Transcorrido o tempo associado a este estado (*tac*), o estado de processamento é alcançado e nele são executados os algoritmos que realizam de fato a transformação em discussão. A transição que representa a conclusão desta execução e, conseqüentemente, leva a máquina ao estado de conclusão, também está associada a um atraso temporal, simbolizado pela variável *tp*. Estas e as demais variáveis e seus respectivos tipos são apresentados na Tabela 9.

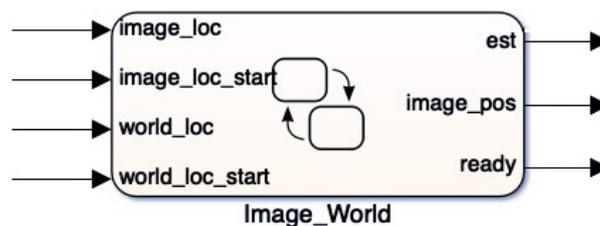
Nome	Tipo
image_loc	<i>input data</i>
image_loc_start	<i>input data</i>
world_loc	<i>input data</i>
world_loc_data	<i>input data</i>
tp	<i>local data</i>
tac	<i>local data</i>
est	<i>output data</i>
image_pos	<i>output data</i>
ready	<i>output data</i>

Tabela 9: Tabela das variáveis do bloco de transformação imagem-mundo e seus respectivos tipos.

Assim, o bloco de transformação imagem-mundo é visto pelo sistema com suas referidas entradas e saídas como mostra a Figura 41b.



(a) Fluxo detalhado dos estados de transformação imagem-mundo.



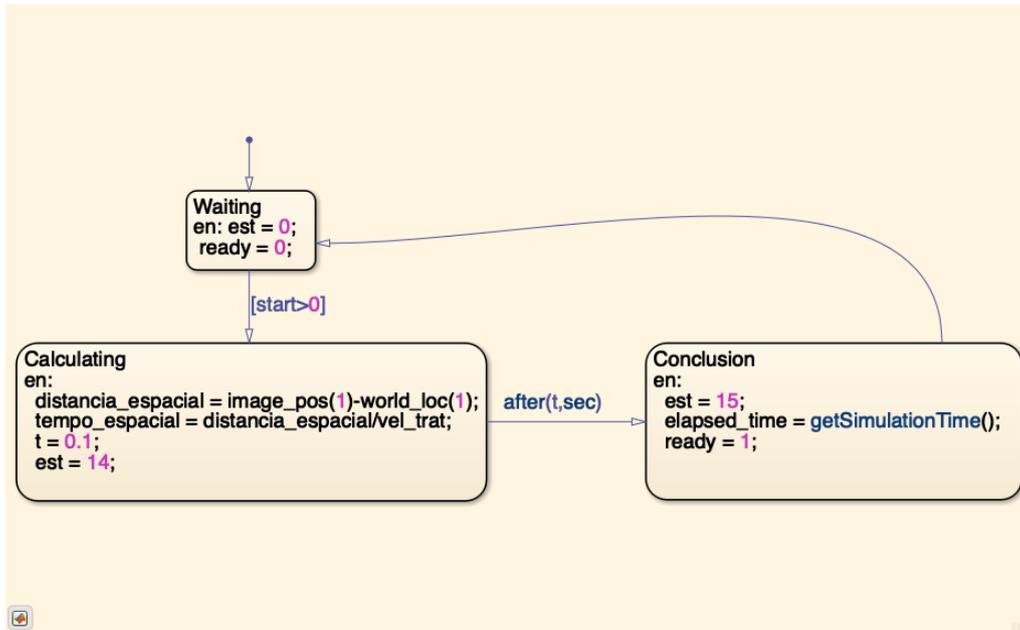
(b) Entradas e saídas do bloco de estados de transformação imagem-mundo.

Figura 41: Máquina de estados de transformação imagem-mundo.

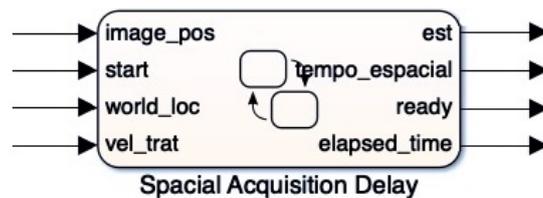
À vista disso, concluída a etapa de transformação imagem-mundo, é possível determinar o atraso espacial de aquisição, já explicado no capítulo anterior. Dessa forma, como pode ser visto na Figura 42a, no estado *Calculating* são realizadas as estimativas para verificar a distância entre o conjunto trator-pulverizador e o ponto em que devem ser aplicados os defensivos agrícolas e também, a partir da velocidade do conjunto trator-pulverizador (assumida constante), o tempo que levará para que este alcance o ponto de aplicação. Após a realização das estimativas ( $t$ ), o estado de conclusão da máquina de estados é atingido e o tempo decorrido pelas etapas até este momento no sistema é capturado pela função *getSimulationTime()*.

A Tabela 10 apresenta o nome das variáveis e os tipos associados a cada uma delas para o bloco *Spacial Acquisition Delay*. Além disso, na Figura 42b observa-se o conjunto de entradas e saídas para este bloco.

Para as próximas etapas do sistema, são necessários os dados advindos do fluxo que



(a) Fluxo detalhado dos estados de transformação imagem-mundo.



(b) Entradas e saídas do bloco de estados de atraso espacial de aquisição.

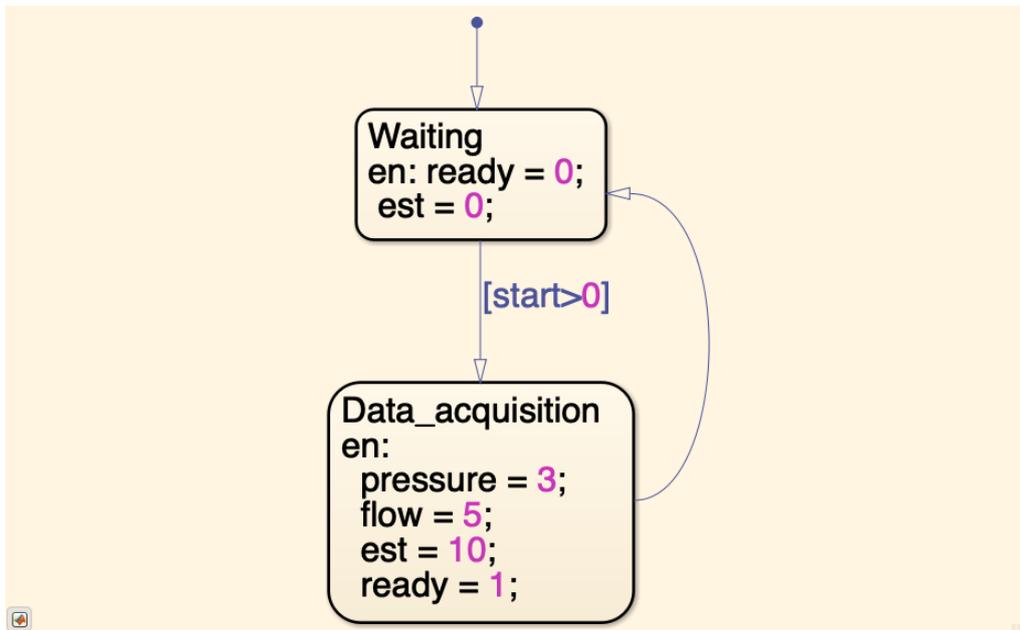
Figura 42: Máquina de estados de atraso espacial de aquisição.

Nome	Tipo
start	<i>input data</i>
world_loc	<i>input data</i>
image_pos	<i>input data</i>
vel_trat	<i>input data</i>
distancia_espacial	<i>local data</i>
t	<i>local data</i>
est	<i>output data</i>
ready	<i>output data</i>
tempo_espacial	<i>output data</i>
elapsed_time	<i>output data</i>

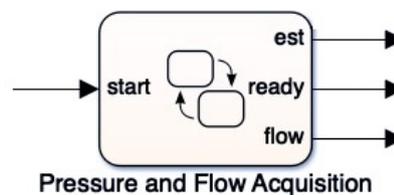
Tabela 10: Tabela das variáveis do bloco de atraso espacial de aquisição e seus respectivos tipos.

se inicia na aquisição de dados de pressão e vazão, que ocorre simultaneamente, de forma

paralela, à aquisição de imagem. Portanto, percebe-se, a partir da Figura 43a, a presença das variáveis de armazenamento de pressão e vazão (*pressure* e *flow*), as variáveis de identificação do estado (*est*) e as variáveis de sincronização (*start* e *ready*). Logo, as variáveis de entrada, locais e saídas com seus respectivos tipos são mostrados na Tabela 11.



(a) Fluxo detalhado dos estados de aquisição de dados de pressão e vazão.



(b) Entradas e saídas do bloco de estados de aquisição de dados de pressão e vazão.

Figura 43: Máquina de estados de aquisição de dados de pressão e vazão.

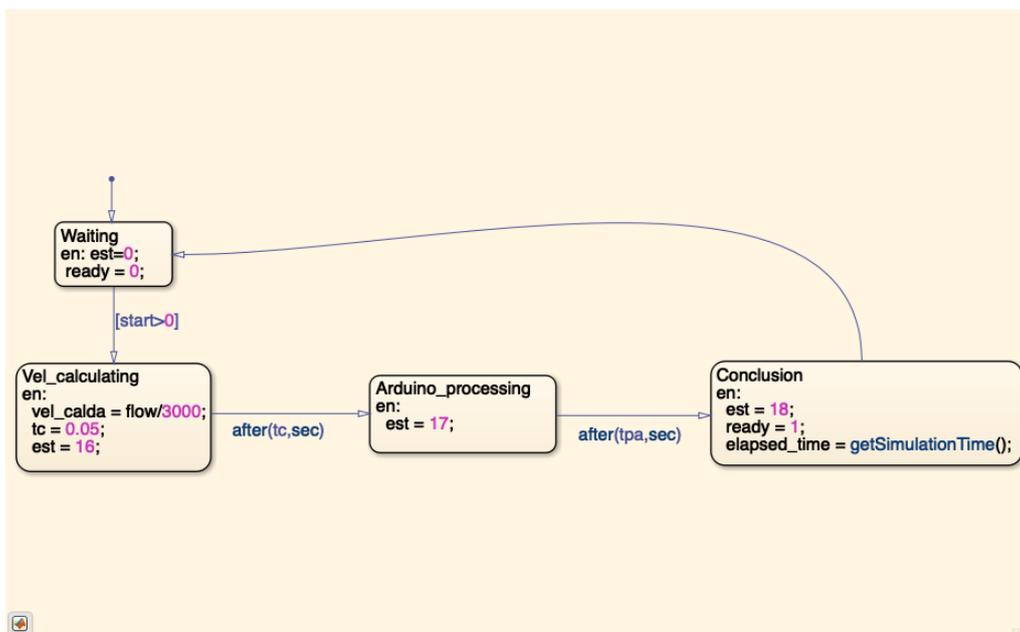
Nome	Tipo
start	<i>input data</i>
pressure	<i>local data</i>
est	<i>output data</i>
ready	<i>output data</i>
flow	<i>output data</i>

Tabela 11: Tabela das variáveis do bloco de pressão e vazão e seus respectivos tipos.

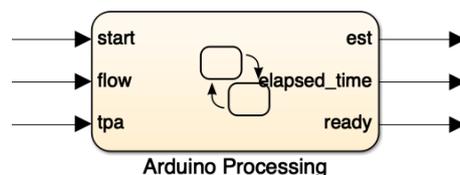
Conforme dito anteriormente, a máquina de estados em questão conta com a etapa de

aquisição dos dados possui atrasos desprezíveis por se tratar de um sinal elétrico constantemente presente na linha de dados. Sendo assim, a Figura 43b apresenta o bloco de aquisição de pressão e vazão com suas respectivas entradas e saídas. Destaca-se que, a variável de pressão não está sendo utilizada pelos blocos posteriores e, portanto, não é configurada como variável de saída para as simulações que serão apresentadas.

Realizada a coleta de dados de pressão e vazão, o bloco de processamento do Arduino (microcontrolador utilizado para etapa de controle) é ativado e o estado de cálculo de velocidade da calda inicia, conforme mostrado na Figura 44a. Após o processamento das informações ( $tc$ ), o Arduino realiza os processos necessários para verificar as ações de controle e interface do sistema. Na conclusão deste processamento, isto é, após transcorridos  $tpa$  segundos, o estado de conclusão, utilizando-se da função *getSimulationTime*, coleta o tempo despendido pelas etapas até o momento e dispensa a necessidade de implementação do bloco de atraso de processamento do controlador presente na seção de modelagem do sistema do capítulo anterior.



(a) Fluxo detalhado dos estados de processamento do Arduino.



(b) Entradas e saídas do bloco de estados de processamento do Arduino.

Figura 44: Máquina de estados de processamento do Arduino.

Deste modo, a Tabela 12 apresenta as variáveis envolvidas na máquina de estados e seus respectivos tipos, enquanto a Figura 44b ilustra a simplificação do bloco com as

entradas e saídas, conforme visualizado pelo modelo do sistema completo.

Nome	Tipo
start	<i>input data</i>
flow	<i>input data</i>
tpa	<i>input data</i>
tc	<i>local data</i>
vel_calda	<i>local data</i>
est	<i>output data</i>
ready	<i>output data</i>
elapsed_time	<i>output data</i>

Tabela 12: Tabela das variáveis do bloco de processamento do Arduino e seus respectivos tipos.

Com os atrasos dos fluxos paralelos de aquisição de pressão e vazão e visão espacial obtidos, faz-se necessária comparação de modo a verificar qual apresenta maior valor e, portanto, deve ser considerado nas próximas etapas do sistema. Para tanto, o bloco de comparação de atraso inicia apenas quando os atrasos são disponibilizados pelos dois fluxos. Assim, após a condição ser satisfeita, inicia-se o processo de comparação e aquele possuir maior valor é atribuído à variável *elapsed\_final\_time*, conforme visualizado na Figura 45a.

Destaca-se que, na condição dos tempos serem iguais, não há diferença na atribuição que será realizada. Logo, na construção do modelo apresentado definiu-se que para esta condição, o atraso adotado é o atraso referente ao fluxo que contém o processamento por parte do Arduino.

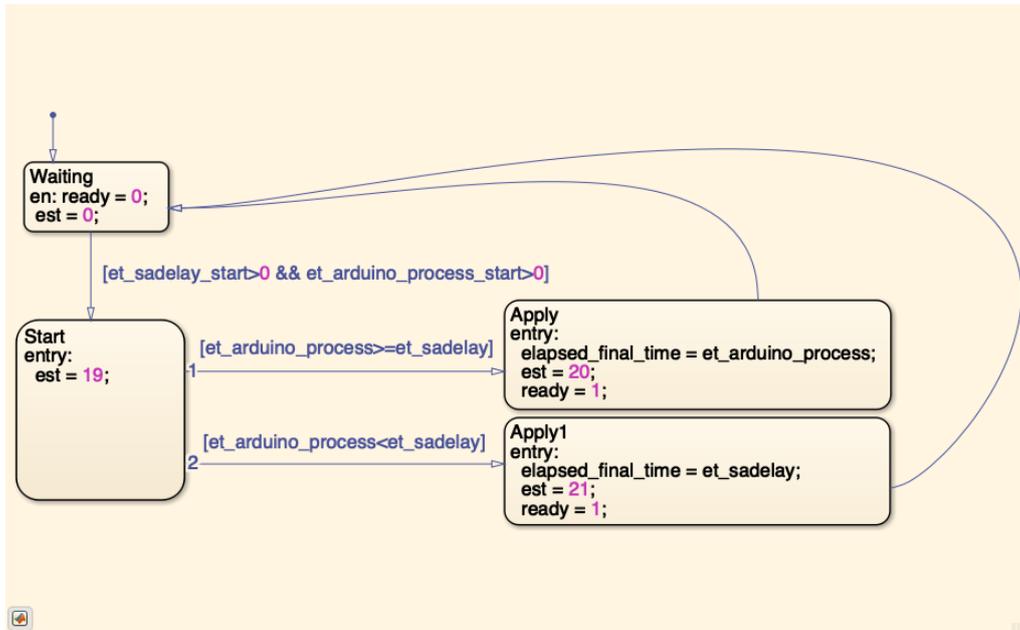
Portanto, as variáveis do bloco de comparação de atrasos e a definição de seus referidos tipos são apresentados na Tabela 13.

Nome	Tipo
et_arduino_process	<i>input data</i>
et_sadelay	<i>input data</i>
et_arduino_process_start	<i>input data</i>
et_sadelay_start	<i>input data</i>
est	<i>output data</i>
ready	<i>output data</i>
elapsed_time_final	<i>output data</i>

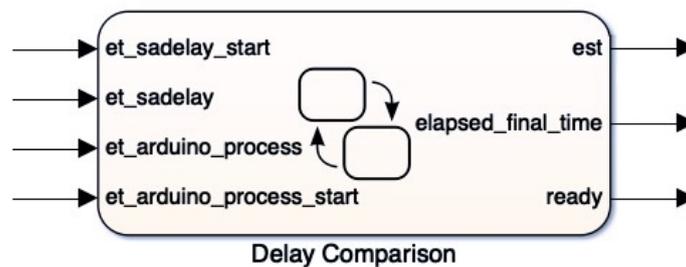
Tabela 13: Tabela das variáveis do bloco de comparação de atrasos do sistema e seus respectivos tipos.

Para o modelo completo do sistema, o bloco *Delay Comparison*, assim como os demais, é visto apenas como um conjunto de entradas e saídas, como mostra a Figura 45b.

Dando seguimento ao modelo do sistema, após a comparação de atrasos e obtenção da variável *tempo\_espacial* é possível calcular o tempo para a aplicação do produto. Isto



(a) Fluxo detalhado dos estados de comparação de atrasos.



(b) Entradas e saídas do bloco de estados de comparação de atrasos.

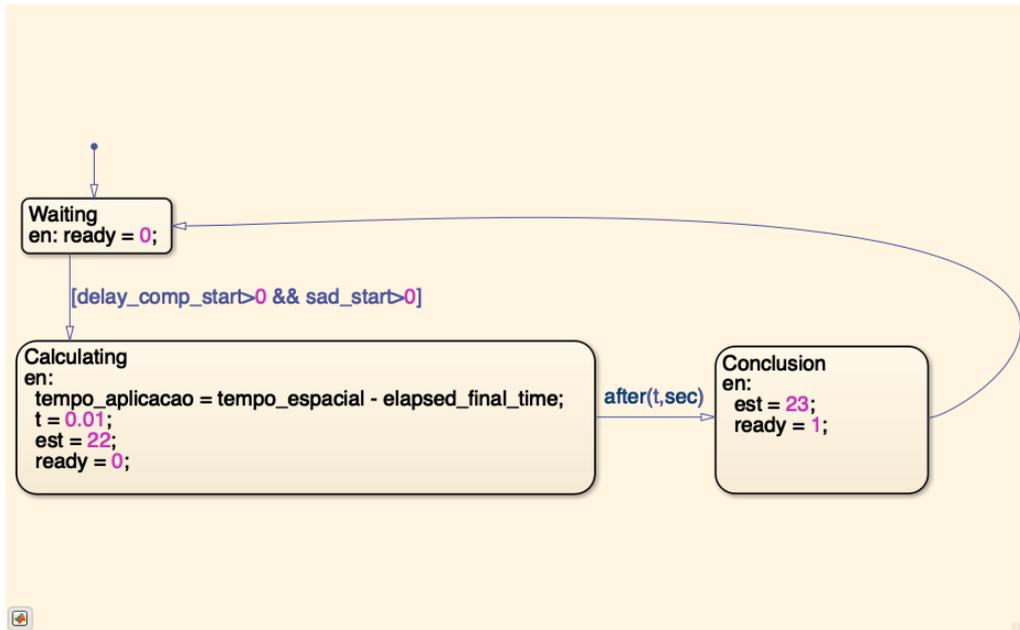
Figura 45: Máquina de estados de comparação de atrasos.

ocorre pois existe atraso entre a aquisição dos dados e a efetiva tomada de decisão pelo sistema. Dessa forma, são descontados os atrasos do sistema do tempo que inicialmente havia disponível (nas etapas de aquisição) até o ponto de aplicação. Portanto, a Figura 46a mostra que após satisfeitas as condições mencionadas, o tempo até o ponto de aplicação é calculado e armazenado na variável *tempo\_aplicacao*.

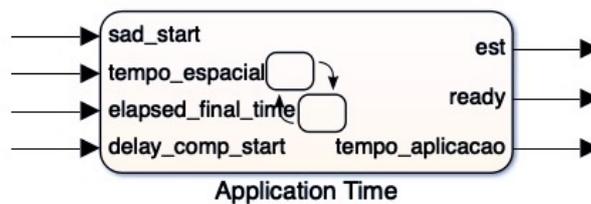
Assim, transcorrido o tempo de 0,01 s após a realização das estimativas, o estado de conclusão é alcançado (estado identificado por 23) e a tomada de decisão no próximo bloco pode ser realizada. Logo, a Tabela 14 apresenta as variáveis e os tipos envolvidos no bloco de tempo de aplicação.

Conforme mostrado nos outros blocos de máquinas de estado do sistema, a Figura 46b apresenta o bloco *Application Time* em alto nível, abordando apenas suas entradas e saídas.

Na tomada de decisão, conhecer o tempo disponível até o ponto de aplicação é fundamental. Portanto, após o bloco de tempo de aplicação fornecer este importante dado,



(a) Fluxo detalhado dos estados de tempo de aplicação.



(b) Entradas e saídas do bloco de estados de tempo de aplicação.

Figura 46: Máquina de estados de tempo de aplicação.

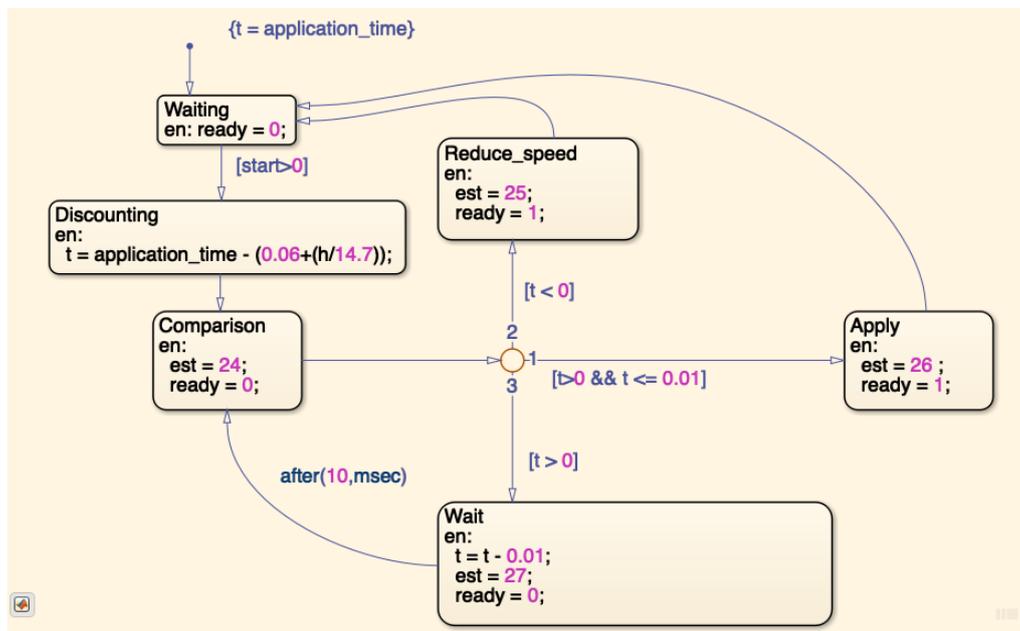
Nome	Tipo
sad_start	<i>input data</i>
delay_comp_start	<i>input data</i>
tempo_especial	<i>input data</i>
elapsed_final_time	<i>input data</i>
t	<i>local data</i>
est	<i>output data</i>
ready	<i>output data</i>
tempo_aplicacao	<i>output data</i>

Tabela 14: Tabela das variáveis do bloco de tempo de aplicação e seus respectivos tipos.

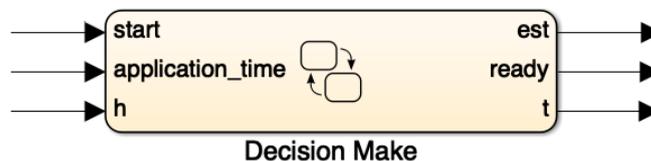
o bloco de tomada de decisão pode ser acionado. Na máquina de estados de tomada de decisão avalia-se qual deverá ser a ação a ser realizada pelo bloco de atuação, isto é, se deve ou não ser realizado o acionamento das válvulas solenoide.

Dessa forma, inicialmente é descontado do tempo disponível até a aplicação o tempo necessário para o acionamento das válvulas em função da altura  $h$  da barra de

pulverização. Em outras palavras, é necessário que os comandos para abertura ou fechamento das válvulas ocorram com antecedência de modo que os produtos sejam aplicados adequadamente nas plantas. A Figura 47a apresenta a máquina de estados do bloco de tomada de decisão.



(a) Fluxo detalhado dos estados de tomada de decisão.



(b) Entradas e saídas do bloco de estados de tomada de decisão.

Figura 47: Máquina de estados de tomada de decisão.

Sendo assim, após a etapa *Discounting*, o estado de comparação é alcançado e verifica-se qual é a condição da variável  $t$ . Recapitulando, se o valor da variável  $t$  for negativo significa que não há tempo hábil para a aplicação, se o tempo for nulo deve ser enviado o comando para as válvulas imediatamente e, ainda, se o tempo for positivo deve ser aguardado até que se torne nulo e ocorra o envio do comando. Percebe-se que na máquina de estados apresentada na Figura 47a é inserida uma tolerância de  $0,01\text{ s}$  para o comando de aplicação, pois dificilmente o tempo calculado será exatamente igual a zero.

Sendo assim, no estado *Wait* o valor de  $t$  é decrementado em  $10\text{ ms}$  a cada iteração e no momento em que a variável  $t$  satisfizer a condição de ser superior a zero e inferior ou igual a  $0,01\text{ s}$ , o comando para as válvulas é enviado pela variável *ready*.

Outro fator a ser considerado é que, mesmo no caso do tempo ser negativo, o comando para as válvulas é enviado (isto é, atribui-se o valor 1 para a variável *ready*). Tal fator ocorre, pois no sistema real a válvula normalmente permite a passagem do fluido (nor-

malmente aberta) e, ainda que sejam enviados sinais atrasados para o sistema de atuação, é preferível que haja a aplicação do produto em locais desnecessários do que se deixe de aplicar em locais necessários.

Contudo, a Tabela 15 apresenta as variáveis utilizadas pelo bloco de tomada de decisão e seus tipos. Ressalta-se que a variável  $t$  para este bloco foi declarada como variável de saída, pois é de interesse na simulação que ela seja analisada de forma mais precisa.

Nome	Tipo
start	<i>input data</i>
application_time	<i>input data</i>
h	<i>input data</i>
est	<i>output data</i>
ready	<i>output data</i>
t	<i>output data</i>

Tabela 15: Tabela das variáveis do bloco de tomada de decisão e seus respectivos tipos.

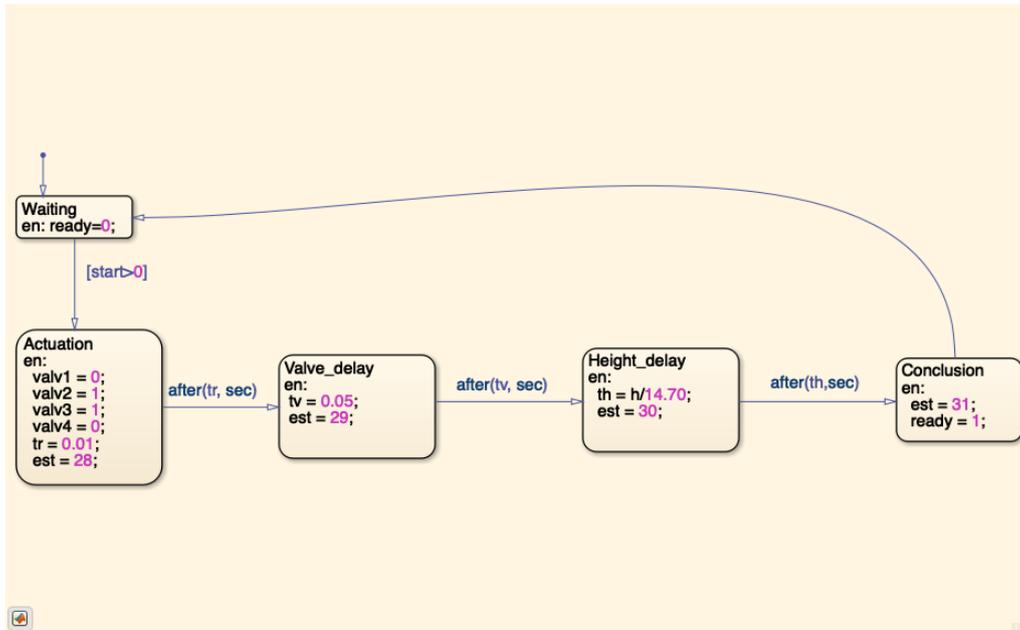
Concluindo a implementação em *software* da máquina de estados de tomada de decisão, a Figura 47b ilustra as entradas e saídas deste bloco.

Como última máquina de estados do sistema está o bloco de atuação, que modela o sistema de atuação das válvulas e o atraso espacial de altura entre o conjunto trator-pulverizador e as plantas. Portanto, uma vez satisfeita a condição de *start* do sistema (advinda do bloco de tomada de decisão), é realizada a seleção das válvulas solenoides, conforme mostra a Figura 48a.

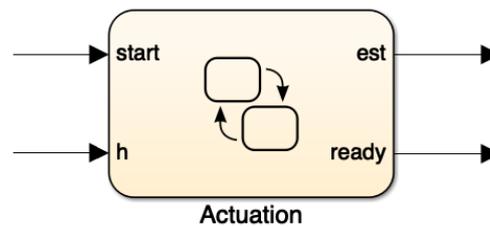
Como é de se esperar, atrasos estão associados ao acionamento dos relés que compõem o circuito eletrônico de acionamento ( $tr$ ) e à mecânica da válvula solenoide em si ( $tv$ ). Portanto, mediante a realização da seleção das válvulas, o estado de atraso mecânico (*Valve\_delay*) é alcançado até que transcorra o tempo que envolve a completa abertura ou fechamento das válvulas ( $tv$ ). Assim, o estado *Height\_delay* é alcançado e o atraso temporal de altura ( $th$ ) é atribuído. Por fim, decorrido  $th$ , o estado de conclusão determina o final da máquina e, conseqüentemente, da simulação.

As variáveis envolvidas na máquina de estados de atuação são apresentadas com seus respectivos tipos na Tabela 16, onde *valve1*, *valve2*, *valve3* e *valve4* representam o estado de válvulas do sistema de pulverização. Além disso, na Figura 48b é ilustrado o bloco de atuação em alto nível.

É importante destacar que após a tomada de decisão e, portanto, ativação do bloco de atuação, não há possibilidade de alteração no sinal de comando, uma vez que tratam-se de atrasos físicos não controlados. Em outras palavras, pode-se dizer que no caso de ocorrência de eventualidades que impliquem na alteração do tempo/distância até aplicação, não é possível reverter os comandos enviados às válvulas solenoide.



(a) Fluxo detalhado dos estados de atuação.



(b) Entradas e saídas do bloco de estados de atuação.

Figura 48: Máquina de estados de atuação.

Nome	Tipo
start	<i>input data</i>
h	<i>input data</i>
valv1	<i>local data</i>
valv2	<i>local data</i>
valv3	<i>local data</i>
valv4	<i>local data</i>
th	<i>local data</i>
tr	<i>local data</i>
tv	<i>local data</i>
est	<i>output data</i>
ready	<i>output data</i>

Tabela 16: Tabela das variáveis do bloco de atuação do sistema e seus respectivos tipos.

### 3.5 Resumo do Capítulo

O presente capítulo apresentou uma breve descrição do protótipo que vem sendo desenvolvido no projeto AutoCERES, que é base para a construção do modelo em estudo

neste trabalho. Ainda, foram abordadas todas as etapas que compõem o modelo dinâmico híbrido e análises a respeito dos atrasos do sistema. Por fim, foi apresentado o modelo descrito no *software* Matlab e as variáveis de entrada e saída de cada bloco de estados.

Portanto, após a modelagem do sistema no simulador e análise dos atrasos, faz-se necessário avaliar aspectos de comportamento das máquinas de estados e suas referidas variáveis. Sendo assim, no próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir de simulações com o modelo híbrido implementado.

## 4 RESULTADOS

Após o desenvolvimento da modelagem do sistema apresentado na metodologia em plataforma compatível com simulação de sistemas dinâmicos híbridos, serão apresentados neste capítulo os resultados obtidos a partir das simulações realizadas.

### 4.1 Simulações

Após a etapa de modelagem do sistema em *software*, é possível realizar simulações para verificar o comportamento das máquinas de estados que compõem o modelo do pulverizador, visando verificar a capacidade do sistema em gerar uma resposta de acionamento a tempo para a correta aplicação dos agrotóxicos. Dessa forma, nessa seção serão apresentadas as simulações realizadas de modo que seja possível avaliar a evolução dos estados em cada máquina, a sincronia entre as máquinas e ainda, variações na etapa de tomada de decisão. Vale destacar que para as simulações realizadas foram avaliados os parâmetros tempo de aquisição de imagem, percentual de verde presente nas imagens de entrada, distância entre bicos de pulverização e posicionamento das câmeras, velocidade conjunto trator-pulverizador, altura da barra de pulverização e tempo de processamento do Arduino.

Para inicialização do sistema foi utilizado o bloco degrau (*step*) do *software* Matlab, que representa a aquisição de uma imagem no sistema. Nesse momento, as máquinas de estado *Image Acquisition* e *Pressure and Flow Acquisition* são ativadas. Para melhor acompanhamento dos estados neste capítulo, a Tabela 17 apresenta os estados do modelo e seus respectivos identificadores.

Assim, a Figura 49 mostra a evolução dos estados para o bloco de aquisição de imagem. É possível observar que no momento de ocorrência do degrau (eixo  $x = 1$ ), mostrado pela curva magenta pontilhada, o estado 1 é alcançado e, após aproximadamente  $0,017 s$ , a máquina passa para o estado 2, conforme mostra a curva azul contínua. Sendo assim, verifica-se que o funcionamento do bloco de aquisição de imagem apresenta o comportamento esperado. Destaca-se que, a partir da janela *Cursor Measurements*, é possível visualizar com maior precisão os instantes de tempo da simulação, pois a partir da correta

Identificador do Estado	Estado	Máquina
0	Waiting	-
1	Image_Acquisition	Aquisição de imagem
2	Conclusion	Aquisição de imagem
3	Pre_processing	Processamento de imagem
4	Processing	Processamento de imagem
5	Conclusion	Processamento de imagem
7	Initial_acquisition	GPS e IMU
8	Calculating	GPS e IMU
9	Conclusion	GPS e IMU
10	Data_acquisition	Aquisição de dados de pressão e vazão
11	Parameters	Transformação imagem-mundo
12	Processing	Transformação imagem-mundo
13	Conclusion	Transformação imagem-mundo
14	Calculating	Atraso espacial de aquisição
15	Conclusion	Atraso espacial de aquisição
16	Vel_calculating	Processamento do Arduino
17	Arduino Processing	Processamento do Arduino
18	Conclusion	Processamento do Arduino
19	Start	Comparação de atrasos
20	Apply	Comparação de atrasos
21	Apply1	Comparação de atrasos
22	Calculating	Tempo de aplicação
23	Conclusion	Tempo de aplicação
24	Comparison	Tomada de decisão
25	Reduce_speed	Tomada de decisão
26	Apply	Tomada de decisão
27	Wait	Tomada de decisão
28	Actuation	Atuação
29	Valve_delay	Atuação
30	Height_delay	Atuação
31	Conclusion	Atuação

Tabela 17: Tabela com o mapeamento dos estados do modelo e seus respectivos identificadores.

configuração dos cursores 1 e 2, é definido o intervalo que se deseja medir.

Da mesma forma, a Figura 50 apresenta o comportamento do bloco *Pressure and Flow Acquisition*. Como esta máquina apresenta apenas um estado e não existem atrasos envolvidos, no instante de tempo em que o degrau muda de valor, a variável *est* passa a ser 10, valor de identificação do estado em questão.

Mostrado o comportamento das máquinas de aquisição de imagem e de pressão e vazão, é necessário avaliar a sincronização destes blocos, uma vez que são máquinas que devem ser processadas de forma paralela. Nesse sentido, a Figura 51 apresenta o gráfico onde é possível visualizar que no instante de 1 s ocorre a ativação simultânea das

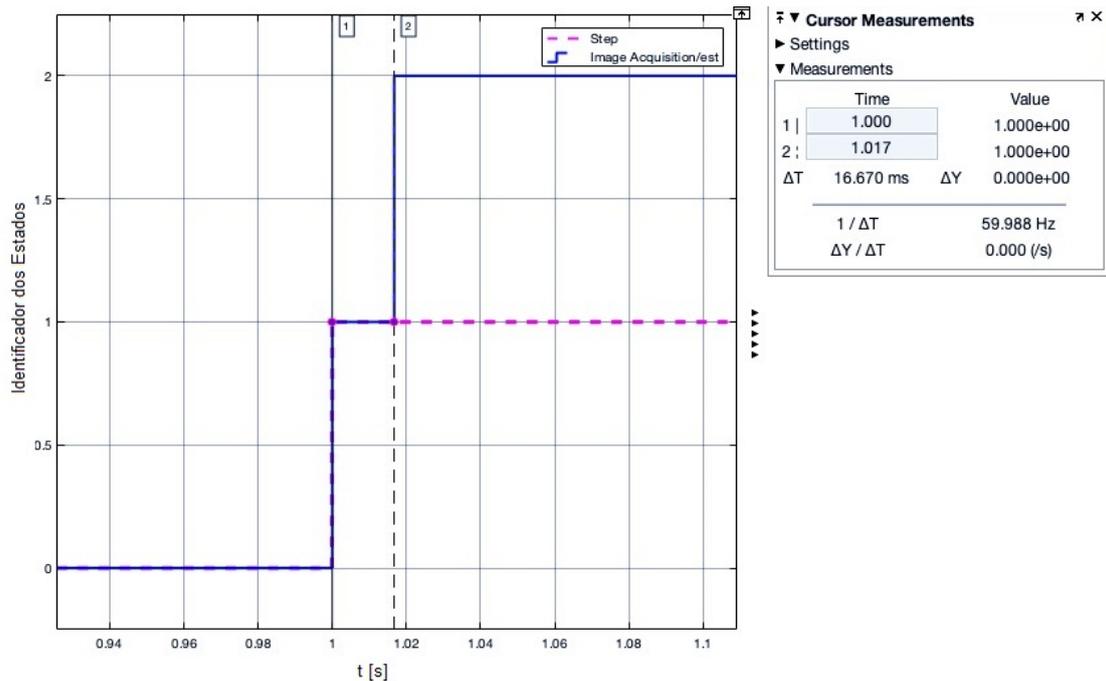


Figura 49: Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *Image Acquisition*.

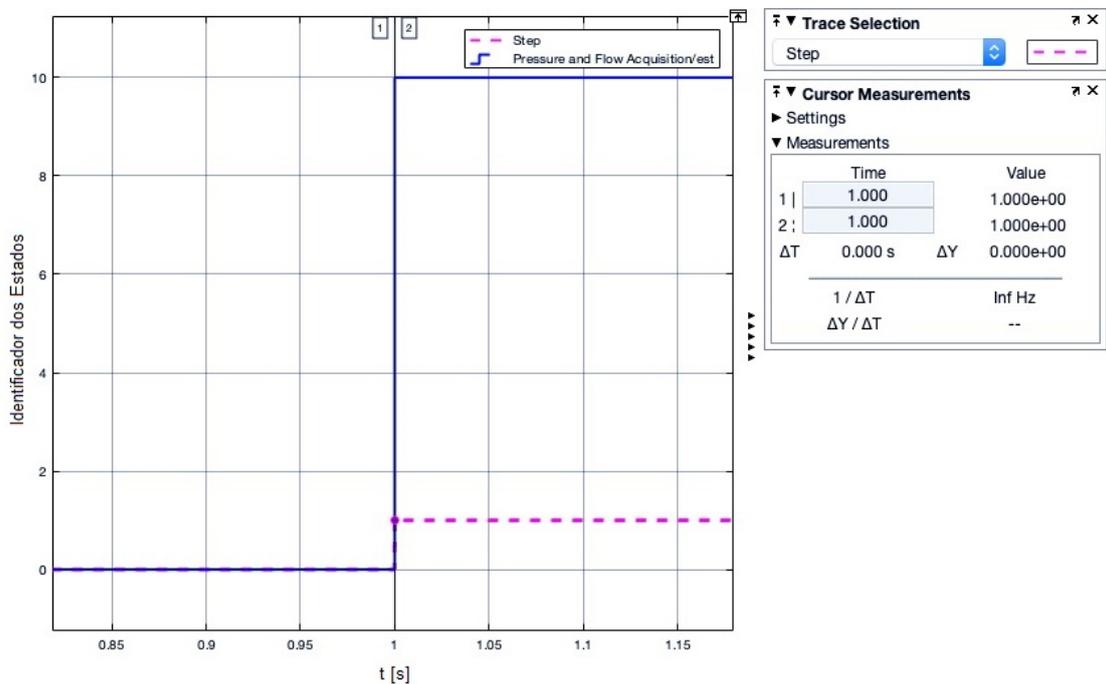


Figura 50: Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *Pressure and Flow Acquisition*.

máquinas de estado.

Continuando a análise das simulações, verifica-se na Figura 52 que a máquina *Image Processing* iniciou apenas após a conclusão da aquisição de imagem. Em outras palavras, pode-se dizer que a variável *ready* possibilitou o controle de ativação desta máquina e,

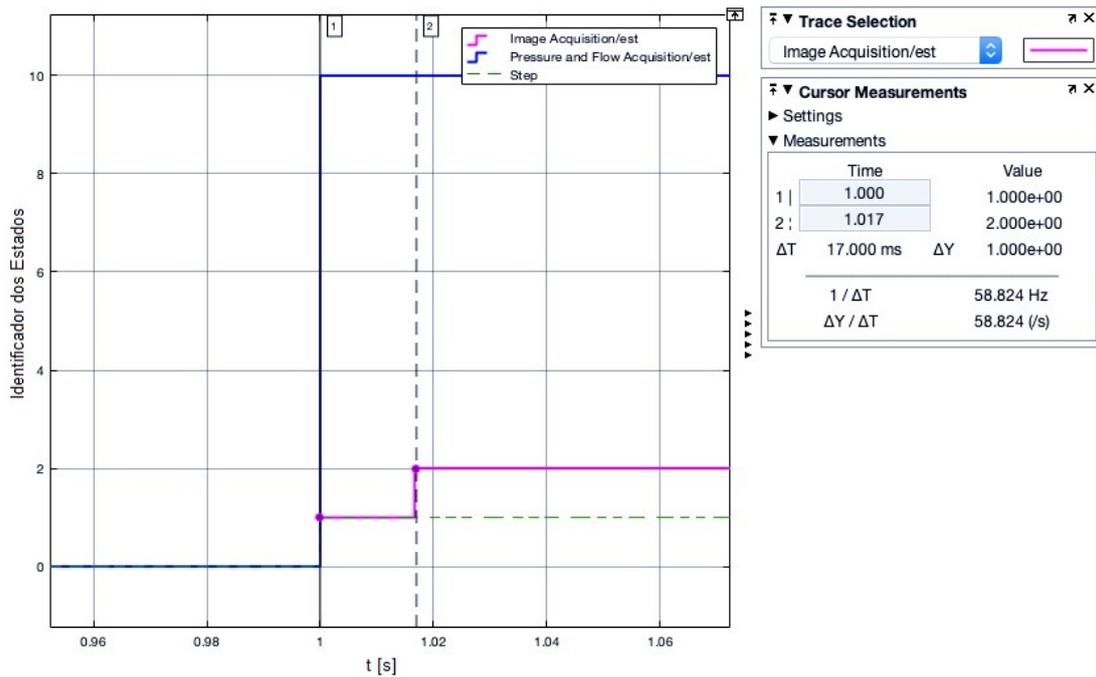


Figura 51: Gráfico de visualização da sincronização entre máquinas de aquisição.

ainda, que seu início possui atraso de aproximadamente 0,017 s, exatamente o tempo necessário para a aquisição de imagem.

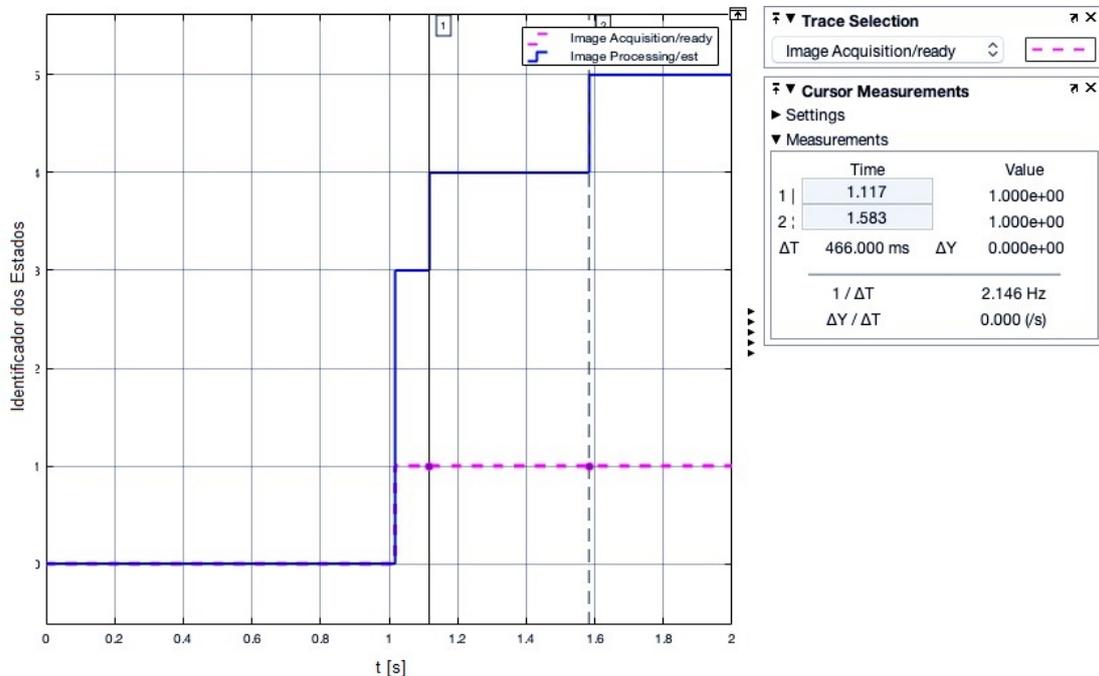


Figura 52: Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *Image Processing*.

Logo, da Figura 52 percebe-se também a evolução dos estados e os atrasos que ocorrem nas etapas de processamento das imagens. Como exemplo, destaca-se o intervalo de 466 ms ( $\Delta T$  da caixa *Cursor Measurements*) entre os estados 4 e 5, valor correspondente

à solução da equação que descreve o tempo de processamento em virtude do percentual de pixels verdes na imagem (50% neste caso).

Da mesma forma, uma vez concluída a aquisição de imagem, ocorre o processo de fusão de dados de localização pelo bloco *GPS\_IMU*. À vista disso, é mostrada na Figura 53 a evolução dos estados para este bloco, onde ressalta-se o intervalo de 0,1 s entre os estados, conforme configurado na etapa de modelagem em *software* do sistema.

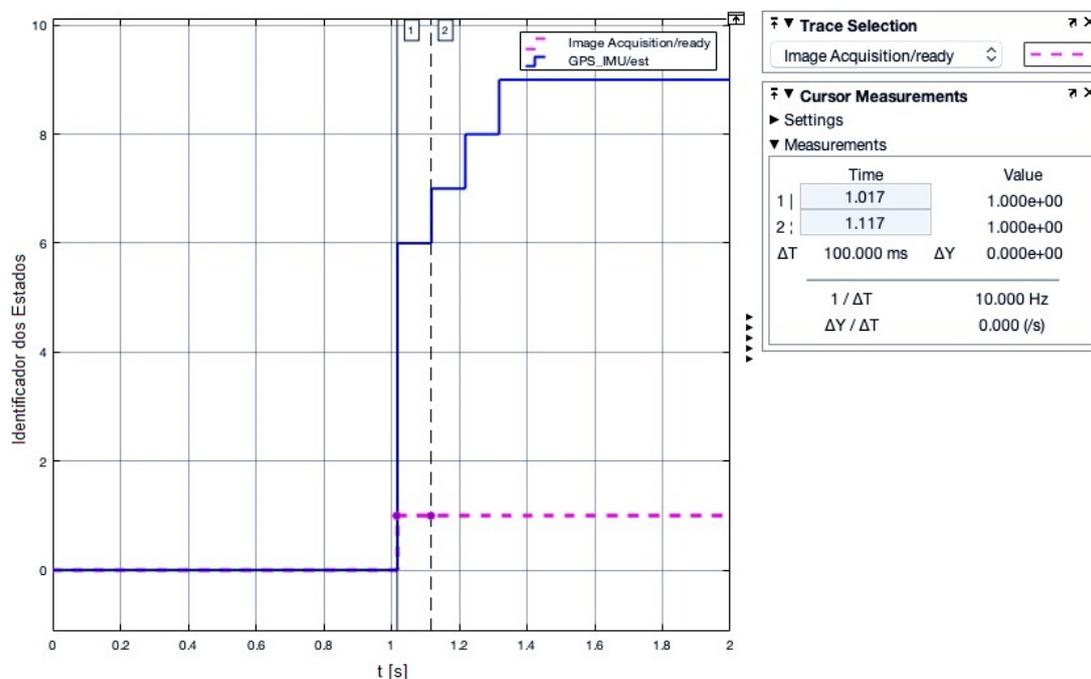


Figura 53: Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *GPS\_IMU*.

Entretanto, durante o processamento de imagem, ocorre de forma paralela a coleta de informações de GPS e IMU, conforme dito anteriormente. Para verificar se as máquinas de fato são ativadas simultaneamente, a Figura 54 apresenta o comportamento dos estados mediante modificação da variável *ready* no instante  $t = 1,017$  s.

Logo, a partir da Figura 54, percebe-se que o paralelismo ocorre conforme esperado, isto é, a evolução dos estados das duas máquinas em análise inicia no mesmo instante de tempo. Outro fator a ser considerado é que, com os atrasos definidos para o modelo, a máquina de processamento de imagem necessita de maior intervalo de tempo até sua conclusão.

Nesse sentido, a etapa de transformação imagem-mundo só pode ser acionada quando as duas informações estiverem disponíveis. Como os sensores possuem diferentes frequências de resposta no sistema em tempo real, são adotados os últimos valores adquiridos pelos sensores. Em outras palavras, pode-se dizer que caso os dados de GPS e IMU sejam disponibilizados três vezes a cada ciclo único de processamento de imagem, os dois primeiros valores são descartados e apenas o último é considerado. Portanto, na Figura 55 percebe-se que a evolução dos estados da máquina *Image-World* só ocorre após

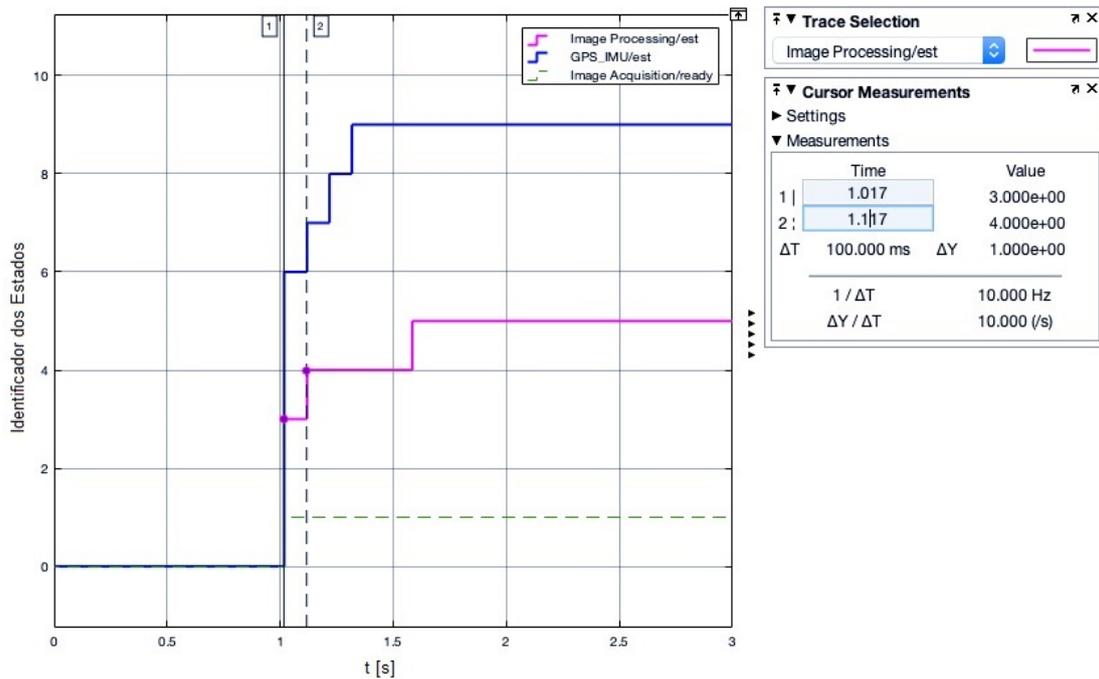


Figura 54: Gráfico de visualização da sincronização entre máquinas de processamento de imagem e GPS e IMU.

as variáveis *ready* das máquinas *Image Processing* e *GPS\_IMU* forem superiores a zero, condição imposta na etapa de modelagem.

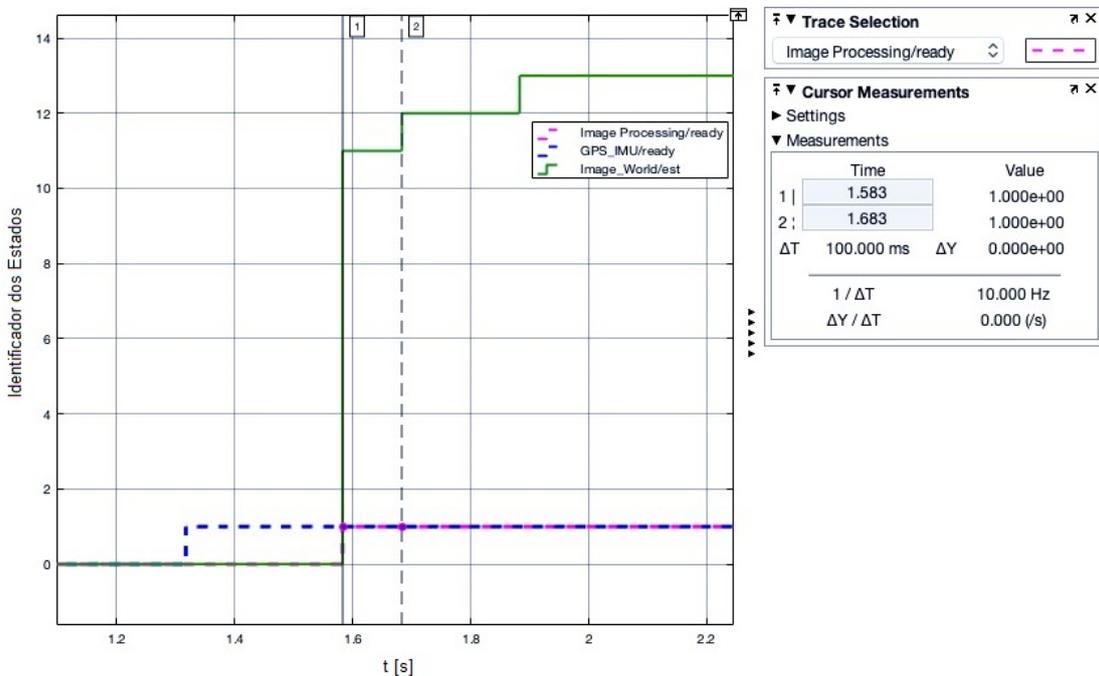


Figura 55: Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *Image-World*.

Após a conclusão a transformação imagem-mundo, inicia-se a máquina de estados *Spacial Acquisition Delay*, conforme pode ser observado na Figura 56.

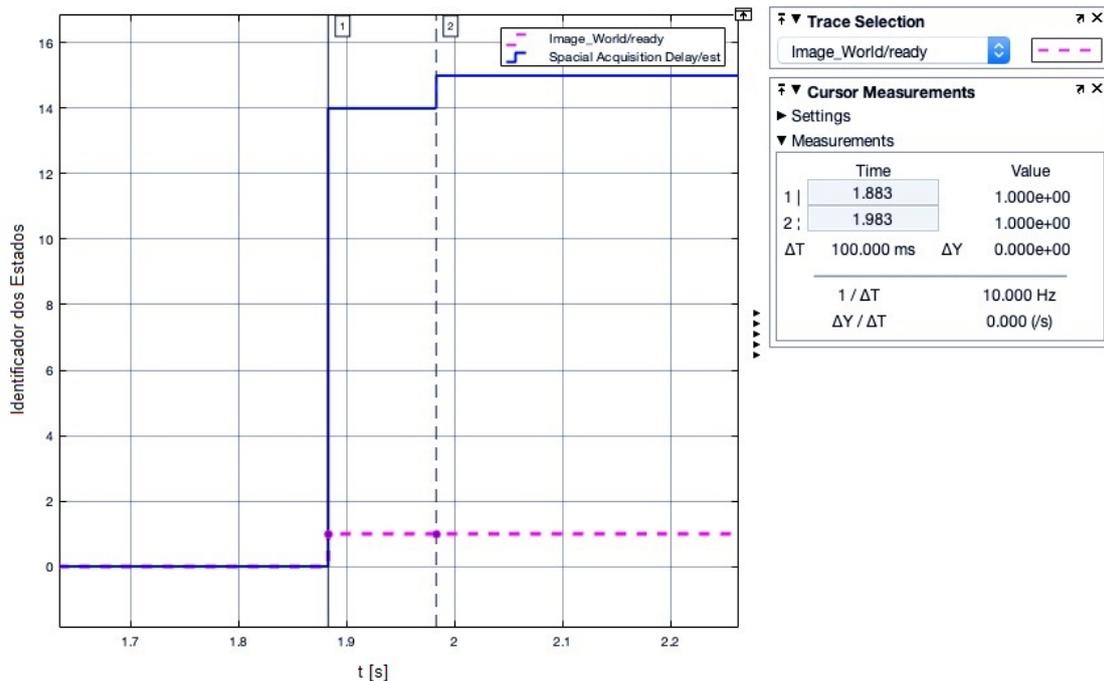


Figura 56: Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *Spatial Acquisition Delay*.

Esta máquina conta com apenas dois estados (14 e 15) e, como uma de suas saídas, fornece o valor da variável *tempo\_especial*, isto é, o tempo calculado a partir da distância a ser consumida até o ponto de aplicação. O resultado obtido na simulação para esta variável é apresentado na Figura 57.

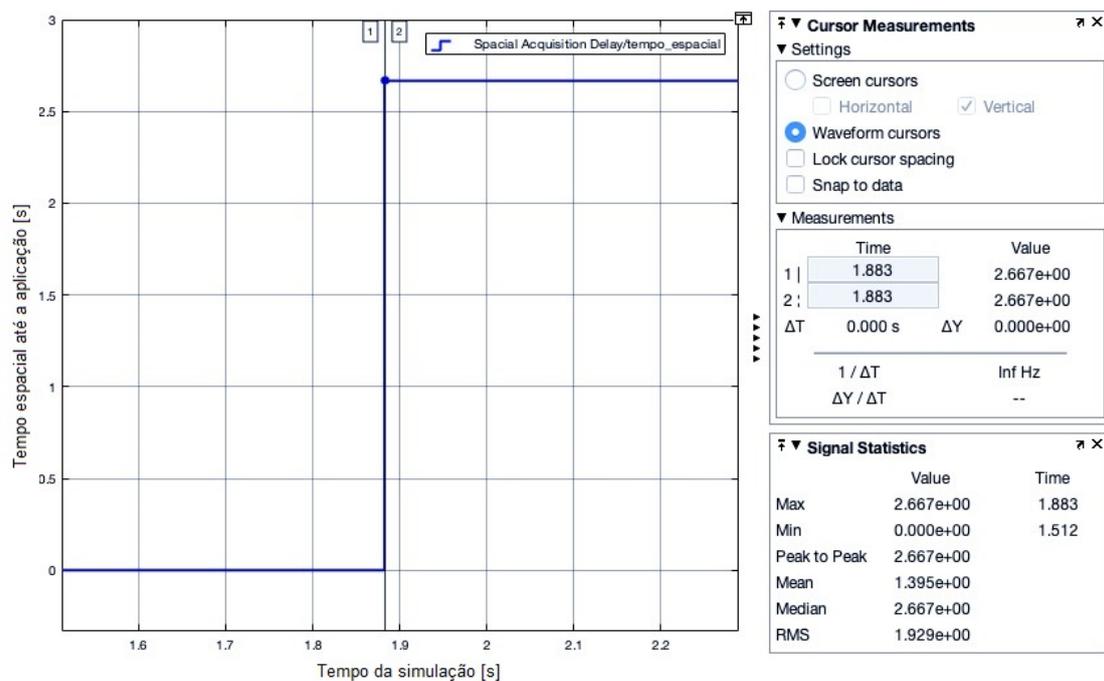


Figura 57: Gráfico de visualização da variável *tempo\_especial* da máquina *Spatial Acquisition Delay*.

Ainda na Figura 57, é possível observar que no instante  $t = 1,883$  s, é atribuído para a variável *tempo\_espacial* o valor de 2,667, conforme mostra a janela *Signal Statistics*. Tal valor corresponde ao tempo transcorrido desde o início da simulação.

A seguir, será apresentada a saída da máquina de estados *Arduino Processing*. Logo, a Figura 58 apresenta o sinal de *ready* advindo do bloco *Pressure and Flow Acquisition* e a correta evolução dos estados para a máquina em destaque.

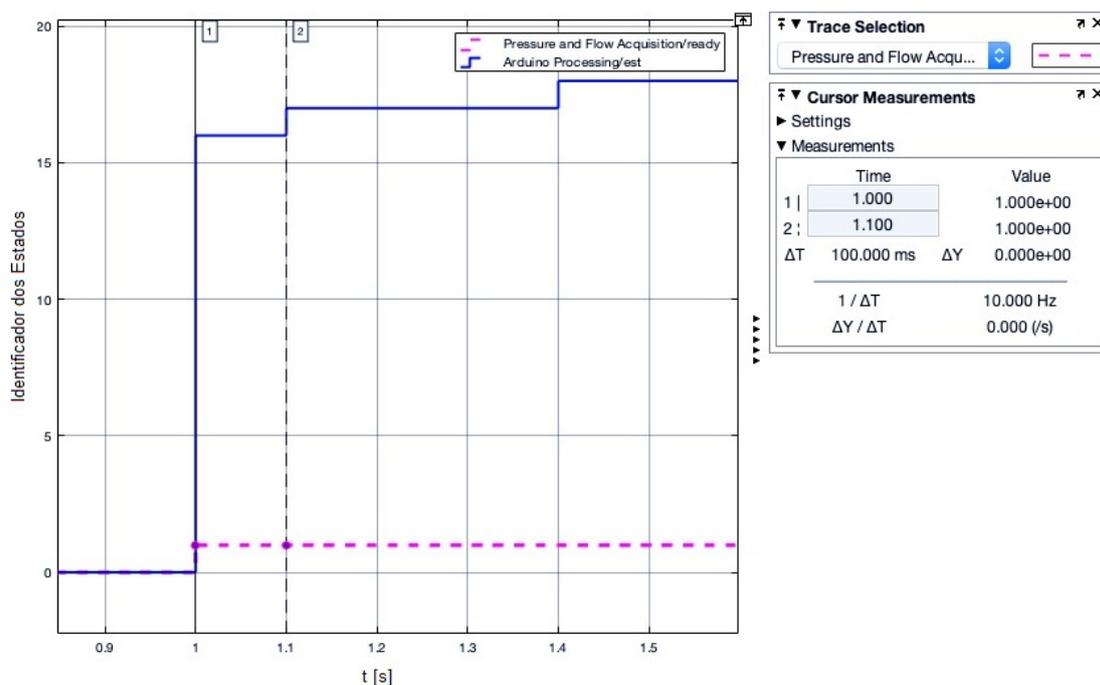


Figura 58: Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *Arduino Processing*.

Conforme dito anteriormente, é necessário comparar qual dos fluxos iniciados pela entrada degrau apresenta maior atraso temporal. Para tanto, na Figura 59 é apresentada a saída do bloco *Delay Comparison*, onde observa-se que o estado 21 (estado em que há atribuição para a variável *elapsed\_final\_time*) só é alcançado quando as variáveis *ready* dos blocos *Arduino Processing* e *Spacial Acquisition Delay* são superiores a zero.

Ainda, na Figura 59 identifica-se, a partir da caixa *Cursor Measurements*, que o intervalo de tempo entre em que variáveis *ready* é de 0,583 s, o que significa que para os parâmetros adotados, o atraso do fluxo de aquisição de imagem supera o atraso do fluxo de aquisição de pressão e vazão em aproximadamente 0,583 s e deve ser o atraso considerado para o tempo de aplicação.

Nesse contexto, a Figura 60 ilustra que, com as informações de comparação de atraso e atraso até o ponto de aplicação disponíveis, a máquina *Application Time* é disparada e ocorre a evolução dos seus estados.

Logo, a variável de saída *tempo\_aplicacao* é entrada no bloco *Decision Make* e fornece a informação temporal para verificação das ações a serem tomadas mediante lógica

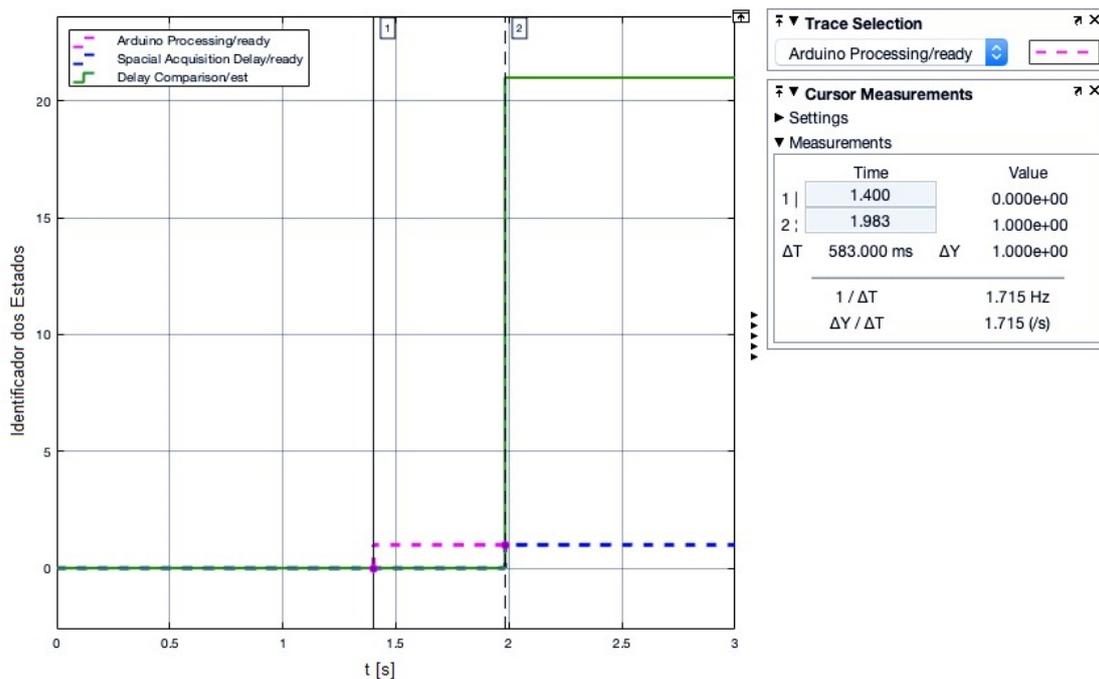


Figura 59: Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *Delay Comparison*.

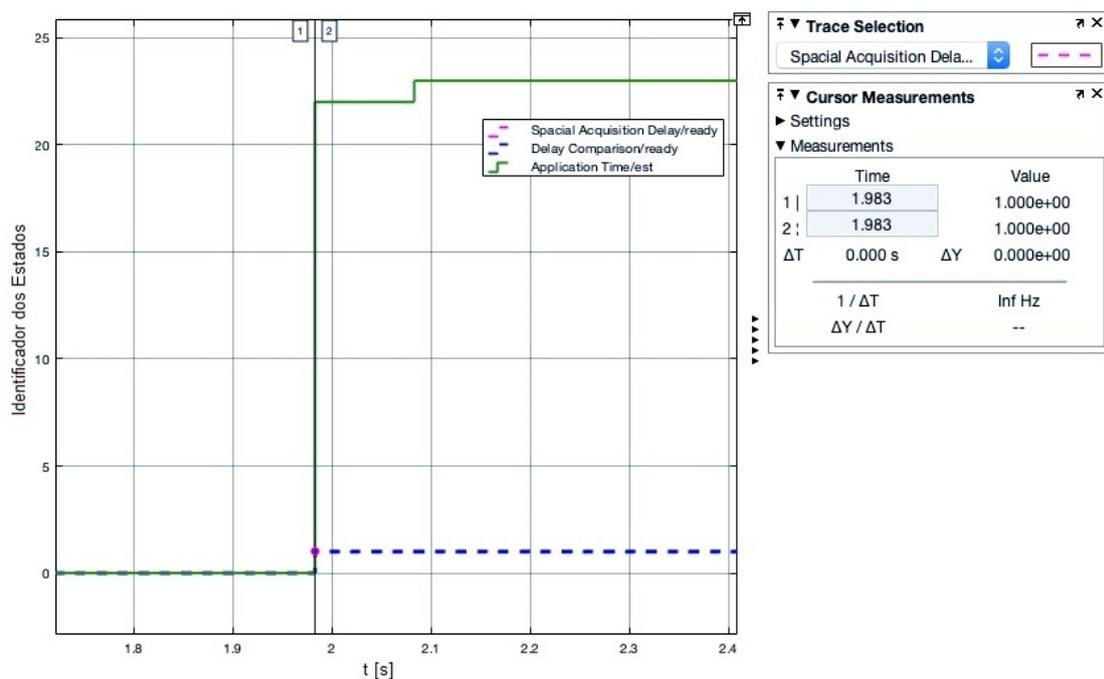


Figura 60: Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *Application Time*.

implementada. Na Figura 61 é possível observar, a partir da caixa *Signal Statistics*, que o valor atribuído para a variável em questão é próximo de 0,684 s.

Sendo assim, após ser descontado da variável *tempo\_aplicacao* o atraso referente às válvulas e à diferença de altura entre os bicos de pulverização e as plantas (0,3 s neste caso), avalia-se a variável *t* de modo a ser realizada a tomada de decisão. Portanto, a

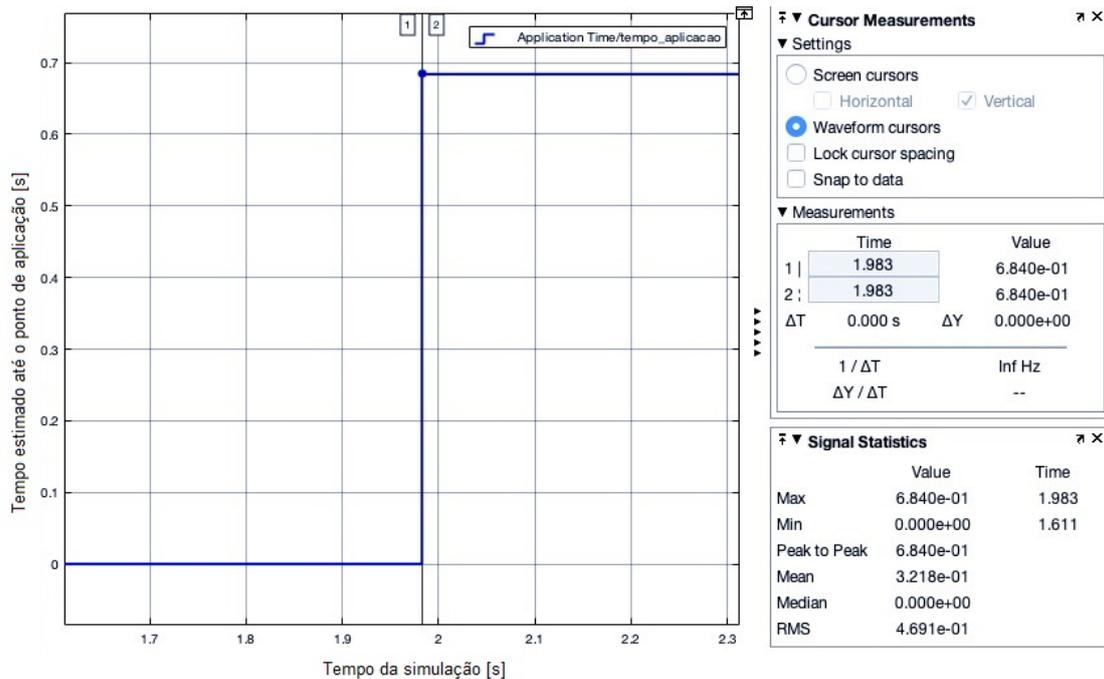


Figura 61: Gráfico de visualização da variável *tempo\_aplicacao* da máquina *Application Time*.

Figura 62 aborda o comportamento da variável *t*, que representa o tempo disponível até o ponto ideal para a correta aplicação, após o bloco *Decision Make* ser acionado.

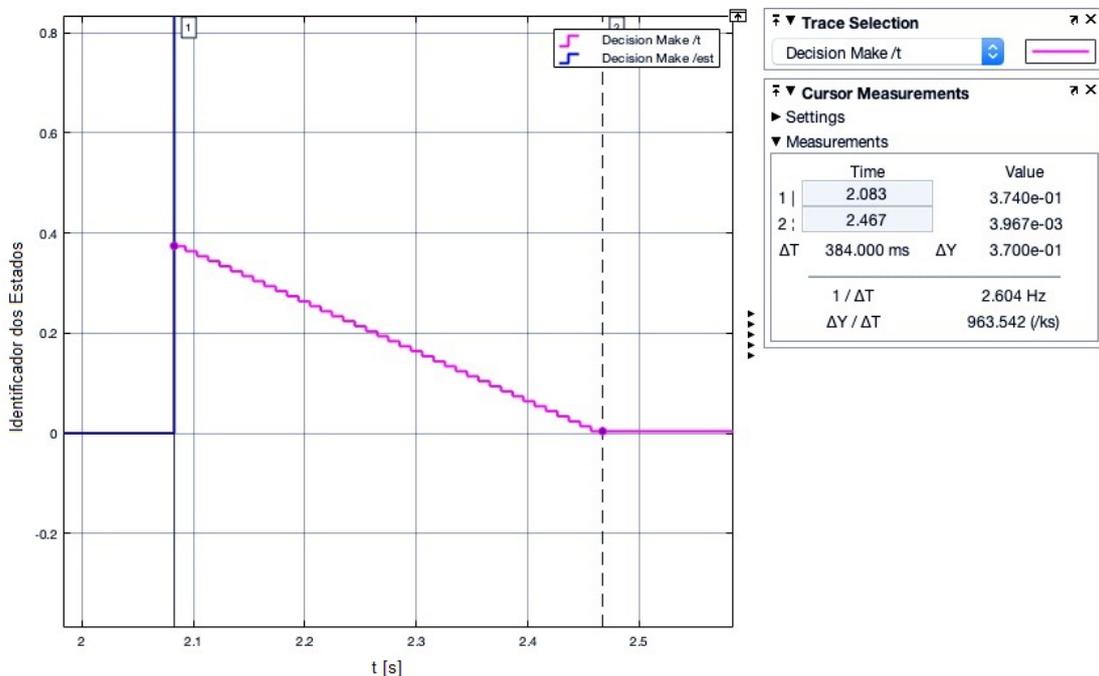


Figura 62: Gráfico de visualização da variável *t* da máquina *Decision Make*.

Como o valor inicial de *t* é superior a zero, de acordo com a lógica programada faz-se necessário decrementar o valor de *t*. A Figura 63 mostra a variação dos estados da

máquina, onde percebe-se que o ciclo de decremento da variável  $t$  ocorre até que a tolerância estipulada seja atingida.

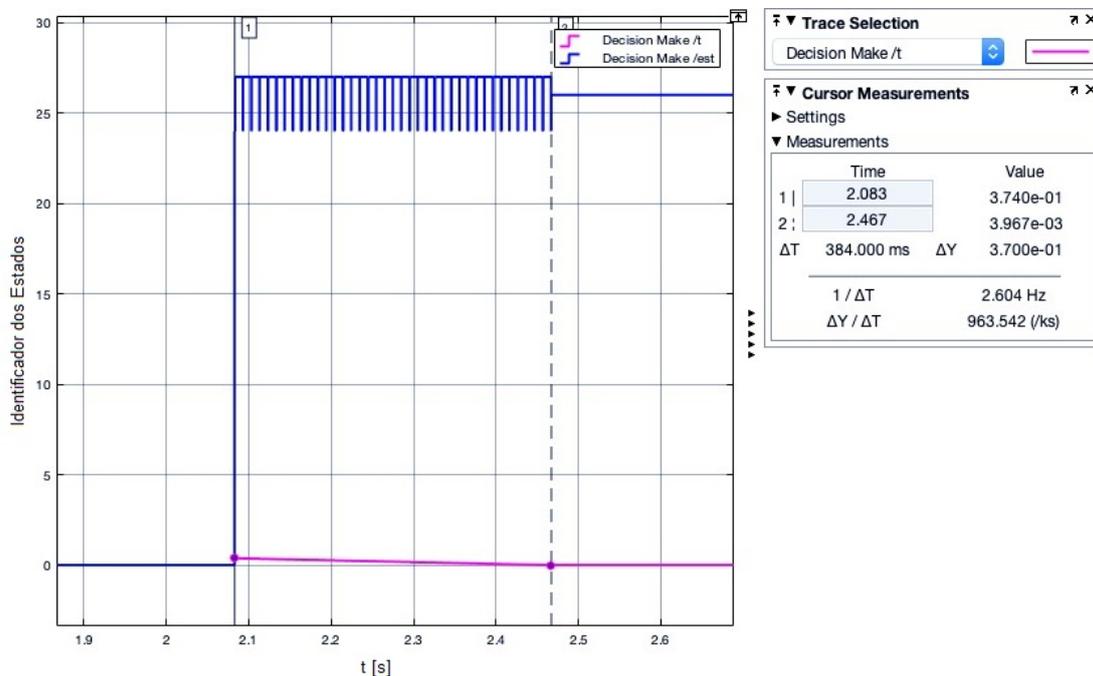


Figura 63: Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *Decision Make* para  $t$  positivo.

Ainda, outro importante resultado de simulação a ser ilustrado é quando o resultado para a variável  $t$  é negativo, isto é, quando o estado 25 é alcançado. Para tanto, a Figura 64 apresenta a saída da variável  $est$  e o valor da variável  $t$ .

Mediante gráfico apresentado na Figura 64, é possível visualizar na caixa *Signal Statistics* que o valor de  $t$  para esta simulação foi de  $-0,115$  s e, ainda, que não há mudança nos estados ou variação de  $t$ , como era de se esperar. Tal fator representa a incapacidade do pulverizador de realizar a seleção de bicos de pulverização de maneira que a aplicação ocorra corretamente, o que significa que a distância entre as câmeras e o sistema de atuação deve ser aumentada ou que a velocidade do trator deve ser reduzida.

No entanto, conforme explicado anteriormente, ainda que a aplicação ocorra de forma incorreta, opta-se por enviar o sinal de comando para o bloco *Actuation*. Portanto, a Figura 65 apresenta a evolução dos estados para a máquina em destaque.

Ainda, na Figura 66 é possível observar o atraso total do modelo de aproximadamente  $1,767$  s, isto é, o intervalo de tempo entre a entrada degrau (*step*) e a conclusão de aplicação dos produtos defensivos (variável de saída *ready* do bloco *Actuation*).

Concluídas as simulações de comportamento e sincronia dos blocos de estados que compõem o sistema, faz-se necessário avaliar como a máquina de estados completa se comporta na situação em que a entrada imposta a ela é pulsada, isto é, quando se tem imagens sendo carregadas de forma cíclica na entrada do sistema. Dessa forma, foi subs-

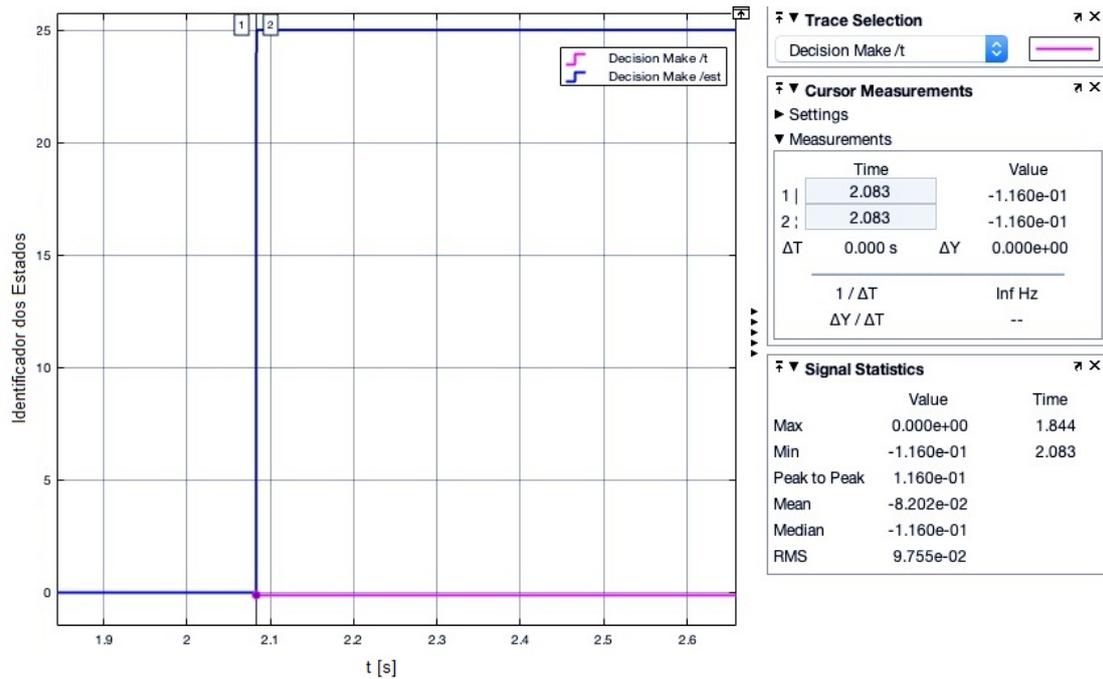


Figura 64: Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *Actuation* para  $t$  negativo.

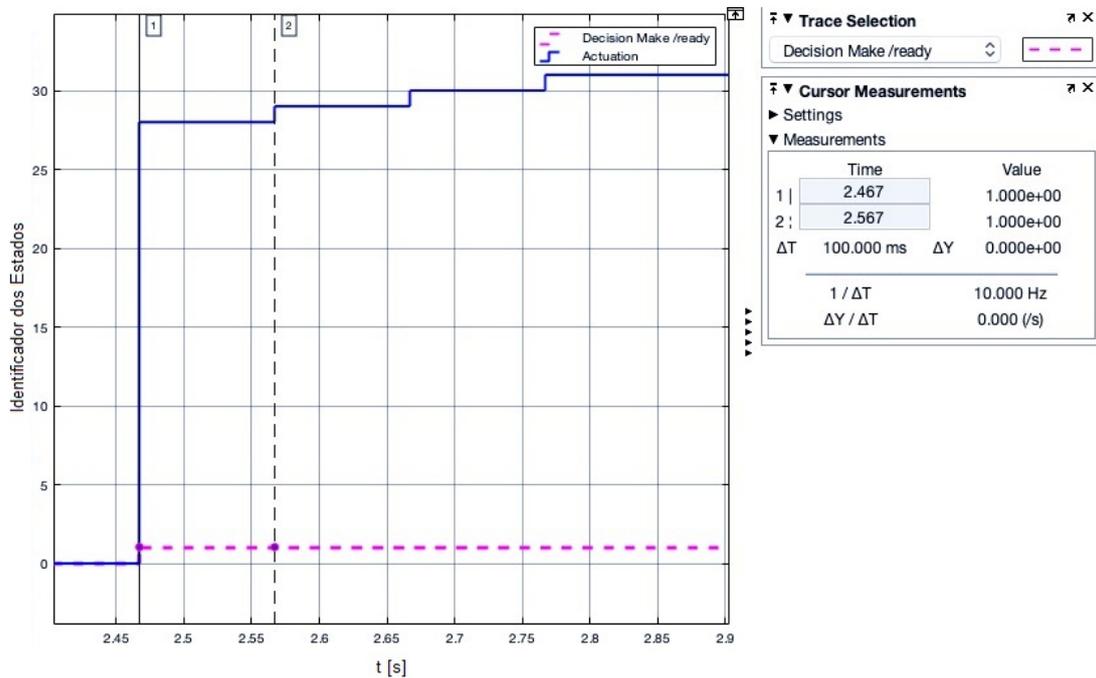


Figura 65: Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *Actuation*.

tituída a entrada *step* do sistema por uma entrada do tipo *pulse generator* com período de 0,03 *segundo*, inferior ao tempo de um ciclo completo da maioria das máquinas do sistema.

Sendo assim, foi verificado que os blocos de estados comportam tal entrada e realizam o processamento das informações mediante disponibilidade. Em outras palavras, pode-se

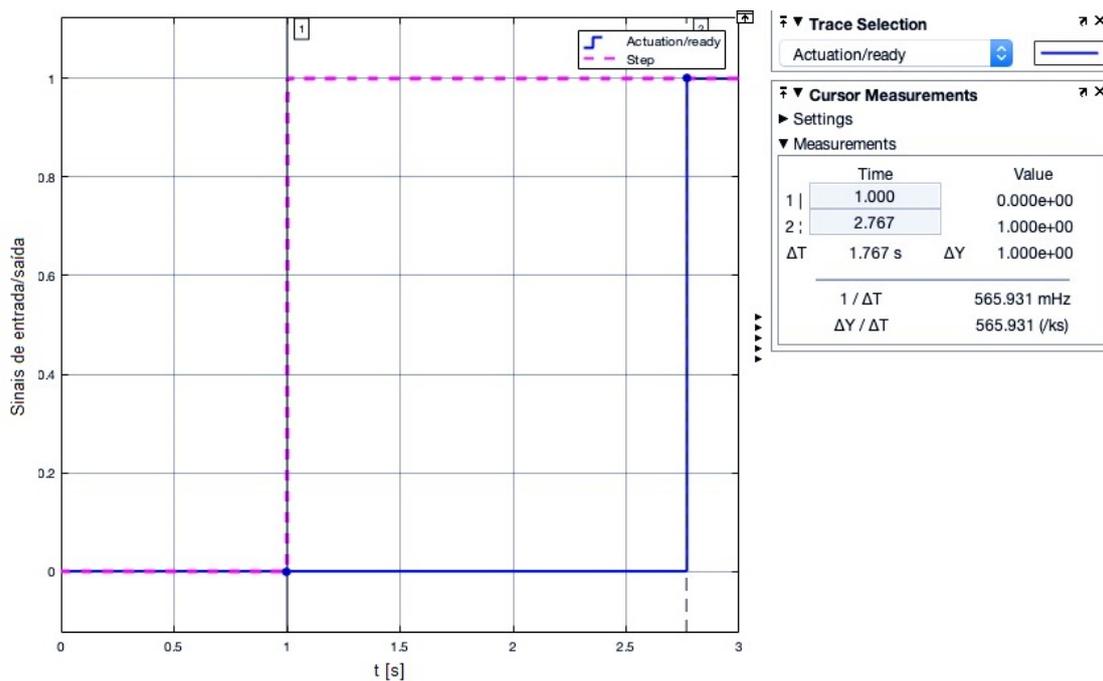


Figura 66: Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *Actuation*.

dizer que uma vez que os blocos encontram-se em processamento e uma nova requisição chega, esta é armazenada até que seja concluído o processo atual, isto é, até que a variável *ready* disponibilize a execução do bloco seguinte e libere a máquina para a entrada de um novo processamento.

Para exemplificar o comportamento abordado, a Figura 67 mostra que o bloco de aquisição de imagem (curva azul do gráfico) possui atraso inferior ao bloco de processamento de imagem (curva rosa). Tal fator significa que a frequência com que as imagens são aquisitadas é superior ao tempo necessário para seu respectivo processamento.

Outro fator a ser observado é que mesmo diante de novas imagens disponibilizadas para processamento, os estados de *Image Processing* continuam sua evolução sem que ocorram interrupções. Além disso, na eventualidade em que mais de uma imagem é disponibilizada para o processamento, apenas a última é considerada, ou seja, as imagens intermediárias são descartadas do sistema. No exemplo em questão, a cada aquisição de duas imagens, apenas uma delas é processada.

Além disso, na saída do bloco de tomada de decisão também é possível observar o desenvolvimento dos estados e do tempo até a aplicação mediante o comportamento cíclico a que o sistema foi submetido, como mostra a Figura 68.

Afim de avaliar a sensibilidade do sistema mediante variação de parâmetros, foram simulados alguns cenários no modelo híbrido elaborado. Sendo assim, os valores iniciais utilizados como parâmetros no modelo são apresentados na Tabela 18.

Neste cenário, o sistema apresenta tempo hábil para aplicação dos defensivos agrícolas, como mostra a Figura 69. Portanto, a seguir serão expostas situações limite

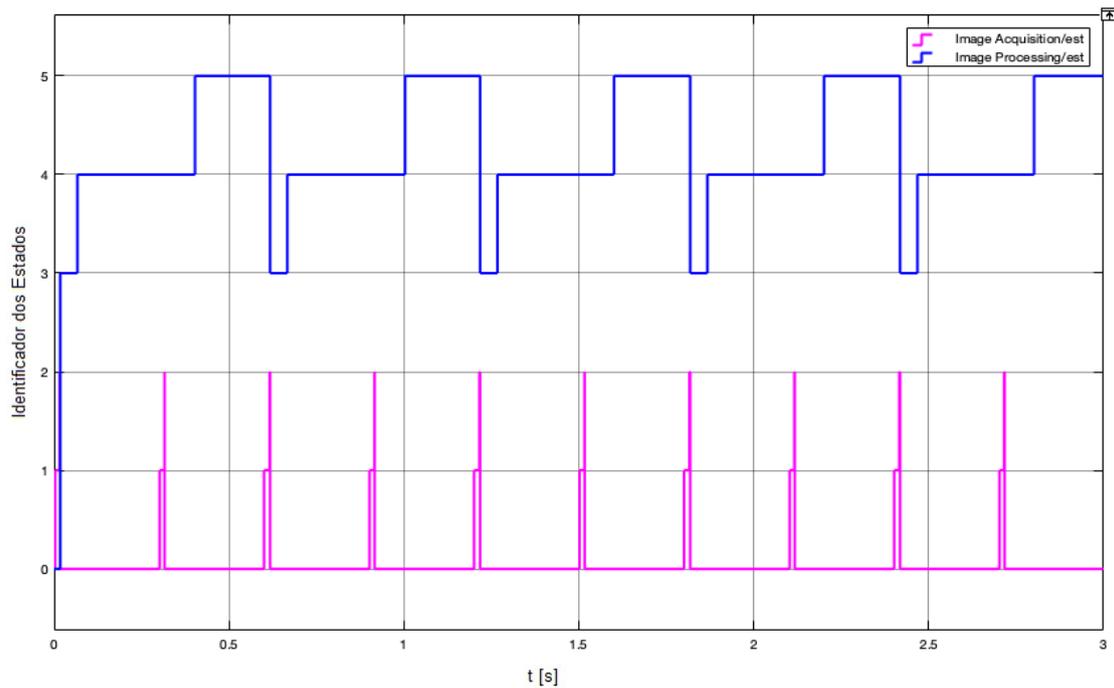


Figura 67: Gráfico de visualização da evolução dos estados das máquinas *Image Acquisition* e *Image Processing* para uma entrada cíclica.

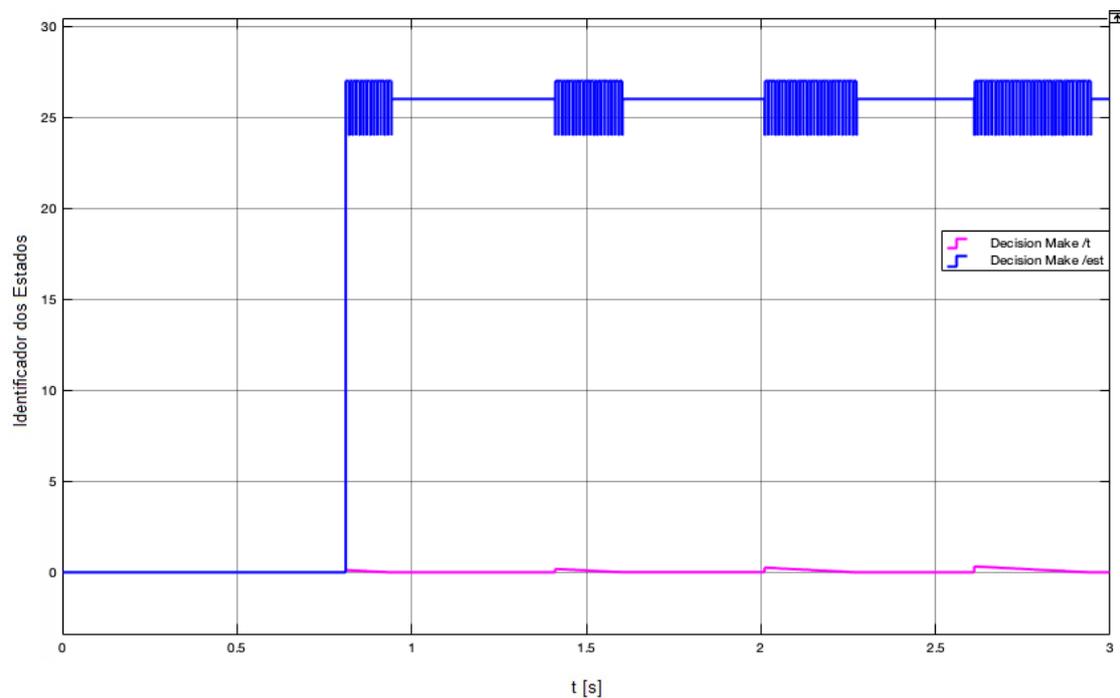


Figura 68: Gráfico de visualização da evolução dos estados da máquina *Decision Make* e da variável  $t$  para uma entrada cíclica.

em que o sistema não consegue processar as informações a tempo de realizar a correta aplicação.

Primeiramente, será avaliada a influência do tempo de aquisição de imagens da câmera utilizada, o parâmetro (*Image\_time\_acquisition*). Esse cenário representa a utilização de

Parâmetro	Valor
Image_time_acquisition	0,0167 s
Green_percentual	30,0 %
Camera_distance	2,5 m
Tractor_velocity	2,0 m/s
Bar_height	1,0 m
Arduino_time_processing	0,1 s

Tabela 18: Parâmetros iniciais utilizados no cenário de avaliação da sensibilidade do modelo.

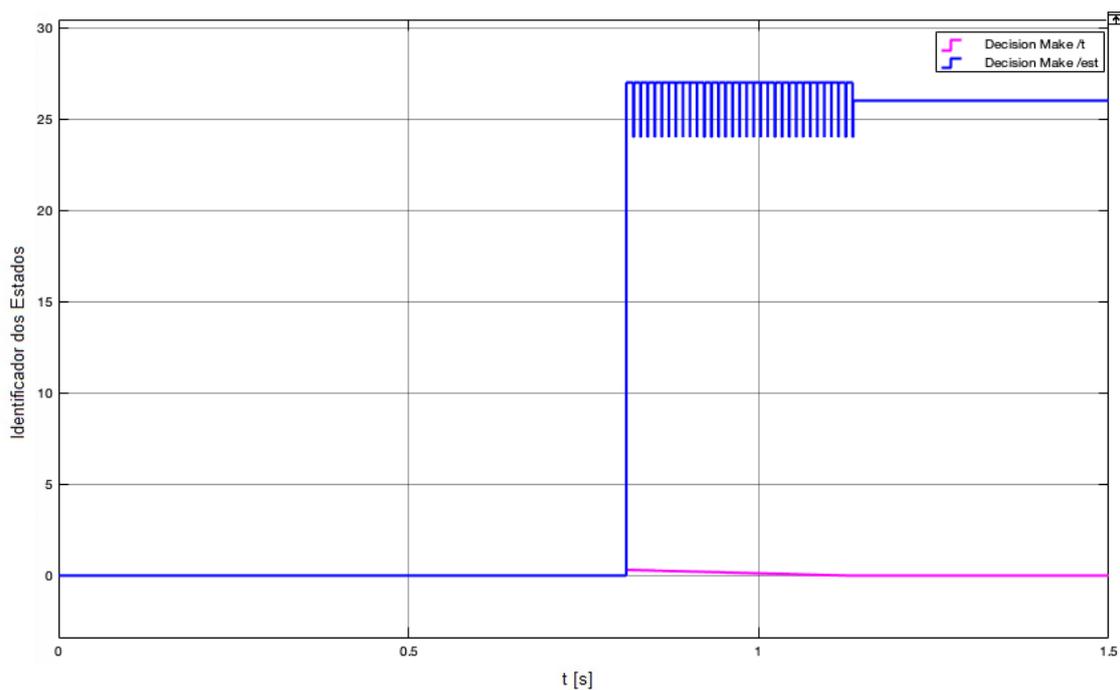


Figura 69: Gráfico de saída da máquina *Decision Make* e da variável  $t$  para a condição imposta no cenário inicial.

outros modelos de câmera para a aquisição de imagens, isto é, câmeras que possuam frequência de aquisição diferentes de  $60 \text{ frames/s}$ . Logo, para tempos de aquisição de imagem inferiores a  $0,0167 \text{ s}$ , não haverá alterações na tomada de decisão do sistema, uma vez que apenas haverá maior descarte de imagens na etapa de processamento.

No entanto, é necessário avaliar o impacto do parâmetro em questão para câmeras que possuem frequência de aquisição inferiores a  $60 \text{ frames/s}$ . Dessa forma, foram realizadas simulações até encontrar o valor limite para que o sistema tenha tempo hábil para a aplicação. Assim, as câmeras devem possuir taxa de aquisição de imagem superior a  $20 \text{ frames/s}$  ou tempo de aquisição inferior a  $0,05 \text{ s}$ , como mostra a Figura 70.

Da mesma forma, será avaliado o impacto do percentual de *pixels* verdes presentes nas imagens (*Green\_percentual*). Destaca-se que para valores inferiores aos 30% do cenário inicial, haverá aumento no tempo hábil para aplicação dos produtos agrotóxicos. Em

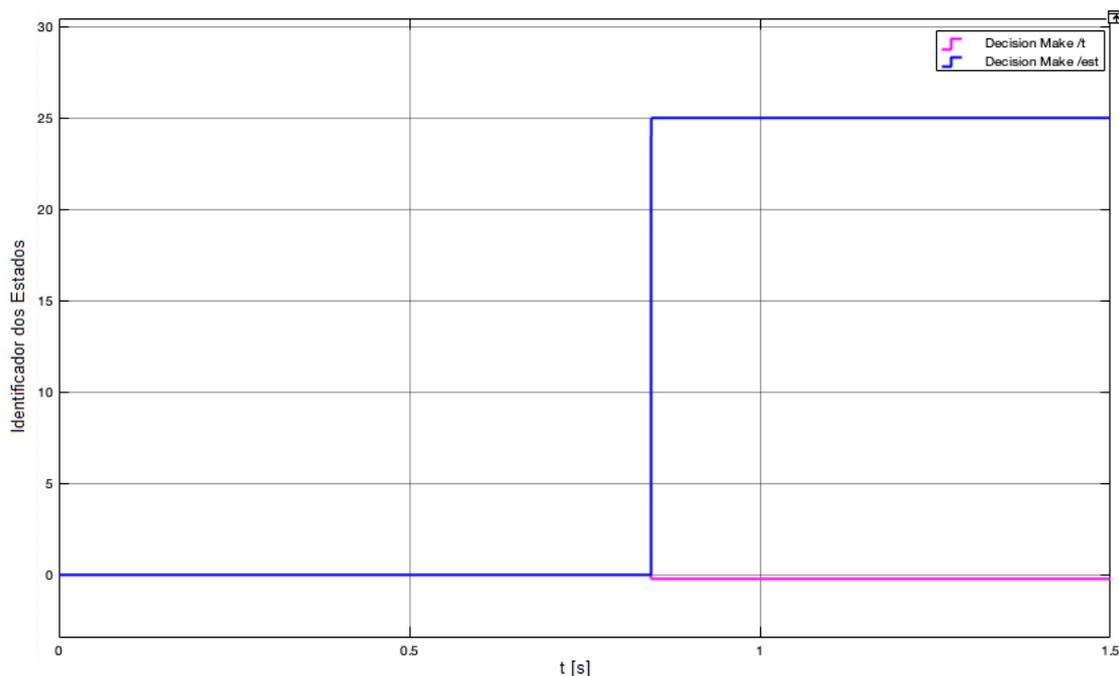


Figura 70: Gráfico de saída da máquina *Decision Make* e da variável  $t$  para  $Image\_time\_acquisition = 0,05 s$ .

contrapartida, é esperado que um aumento neste percentual possa acarretar na alteração da tomada de decisão do sistema. Portanto, considerando cenários em que há aumento no percentual de verde nas imagens, foi verificado que a variável não impacta na saída do sistema. Ou seja, foram testados valores de 30% a 99% de percentual de verde na imagem e o sistema continuou performando conforme desejado (Figura 71).

A análise realizada para o parâmetro *Camera\_distance* avalia a distância à frente que os dispositivos de aquisição de imagem estarão observando em relação à posição do trator. Portanto, distâncias superiores à  $2,5 m$  darão ao sistema maior tempo para tomada de decisão, sendo necessário avaliar valores de distância inferiores ao ajustado no cenário inicial. Dessa forma, quanto menor for a distância de visualização das plantas (campo de visão), menor será o tempo hábil do sistema para decisão sobre a aplicação dos agrotóxicos. Logo, após a realização de simulações, verificou-se que para este cenário a distância mínima para que a aplicação ocorra da forma correta é de  $1,86 m$ , como observa-se na Figura 72.

Avaliando-se a velocidade do trator (*Tractor\_velocity*), é esperado que quanto menor for esta velocidade, maior será o tempo hábil para aplicação de agroquímicos. Por conseguinte, pretende-se avaliar aqui o limite de velocidade que o trator pode desenvolver sem que a tomada de decisão do sistema seja prejudicada. Isto posto, foi constatado a partir de simulações que a velocidade máxima que o trator pode atingir no cenário observado deve ser de até  $2,69 m/s$  ( $9,684 km/h$ ). A Figura 73 apresenta o gráfico de saída para o valor de velocidade destacado.

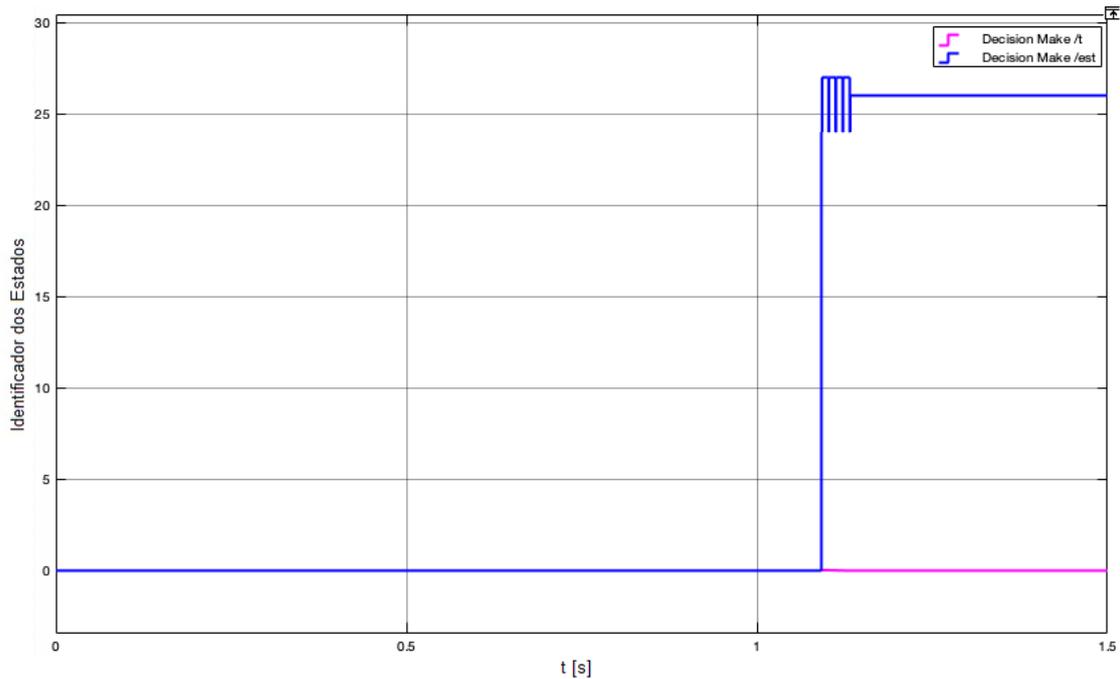


Figura 71: Gráfico de saída da máquina *Decision Make* e da variável  $t$  para  $Green\_percentual = 99\%$ .

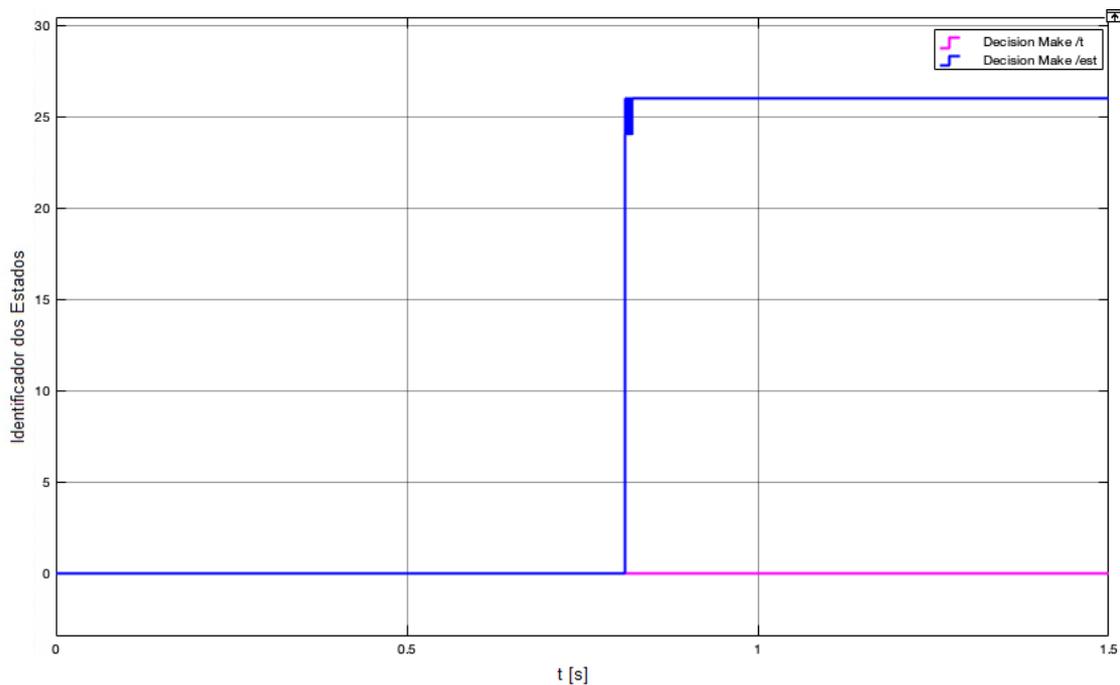


Figura 72: Gráfico de saída da máquina *Decision Make* e da variável  $t$  para  $Camera\_distance = 1,86\ m$ .

Ainda, em relação a altura da barra de pulverização (*Bar\_height*), que determina a distância entre os bicos de pulverização e as plantas, espera-se que quanto menor for sua altura, menor será o tempo necessário para as gotas atingirem o solo. Nesse sentido, foram avaliadas situações em que há acréscimo no valor da altura da barra de pulverização. À

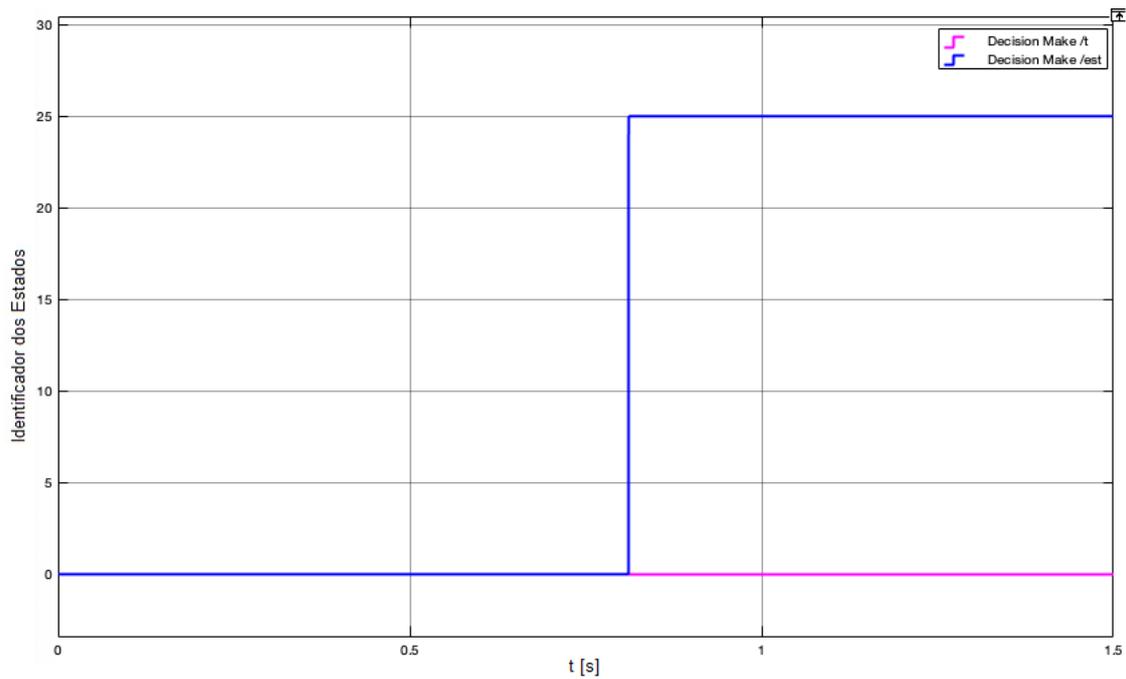


Figura 73: Gráfico de saída da máquina *Decision Make* e da variável *t* para *Tractor\_velocity* = 2,69 m/s.

vista disso, a partir de algumas simulações no modelo desenvolvido, verificou-se que o valor limite de altura da barra para as condições impostas no cenário inicial é de 2,04 m, como mostra a Figura 74.

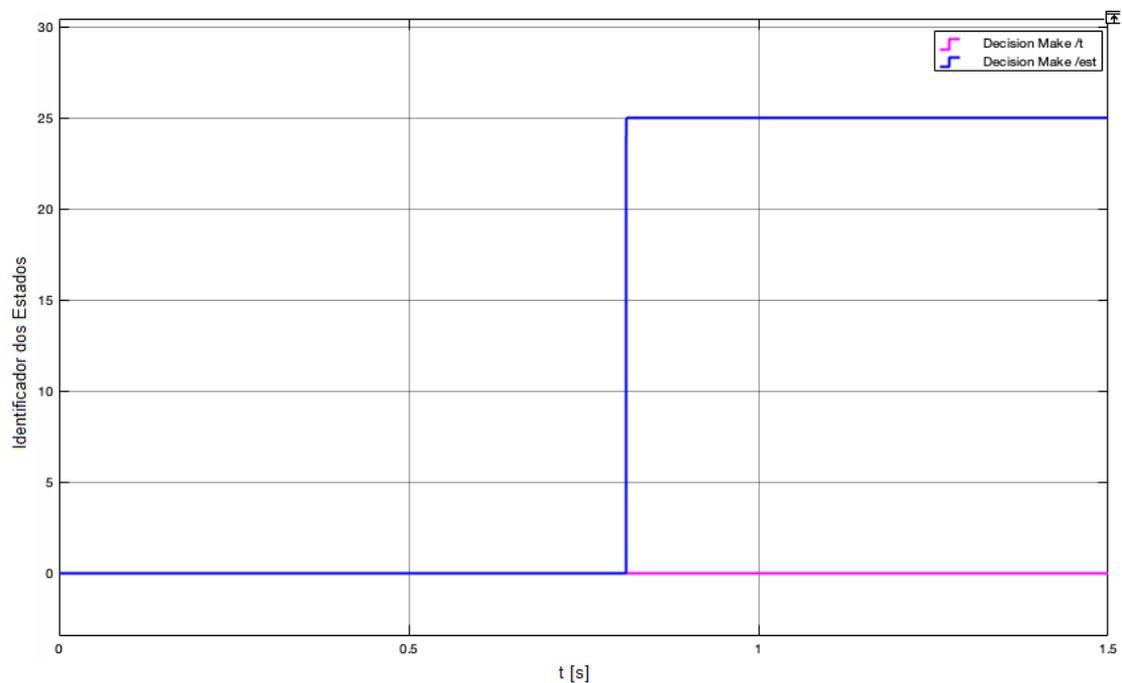


Figura 74: Gráfico de saída da máquina *Decision Make* e da variável *t* para *Bar\_height* = 2,04 m.

Por fim, é avaliada a variável *Arduino\_time\_processing*, que diz respeito ao tempo de

processamento do microcontrolador Arduino no sistema. É válido lembrar que este fluxo ocorre em paralelo ao processamento de imagens e só haverá mudanças significativas no comportamento do sistema caso o valor do fluxo que se inicia na aquisição de dados de pressão e vazão supere temporalmente o fluxo do processamento de imagens. Portanto, foram realizadas simulações no cenário apresentado e foi verificado que o tempo de processamento do Arduino não deve ultrapassar o valor de  $0,82\text{ s}$ . Na Figura 75 é apresentada a saída do sistema para nessa situação.

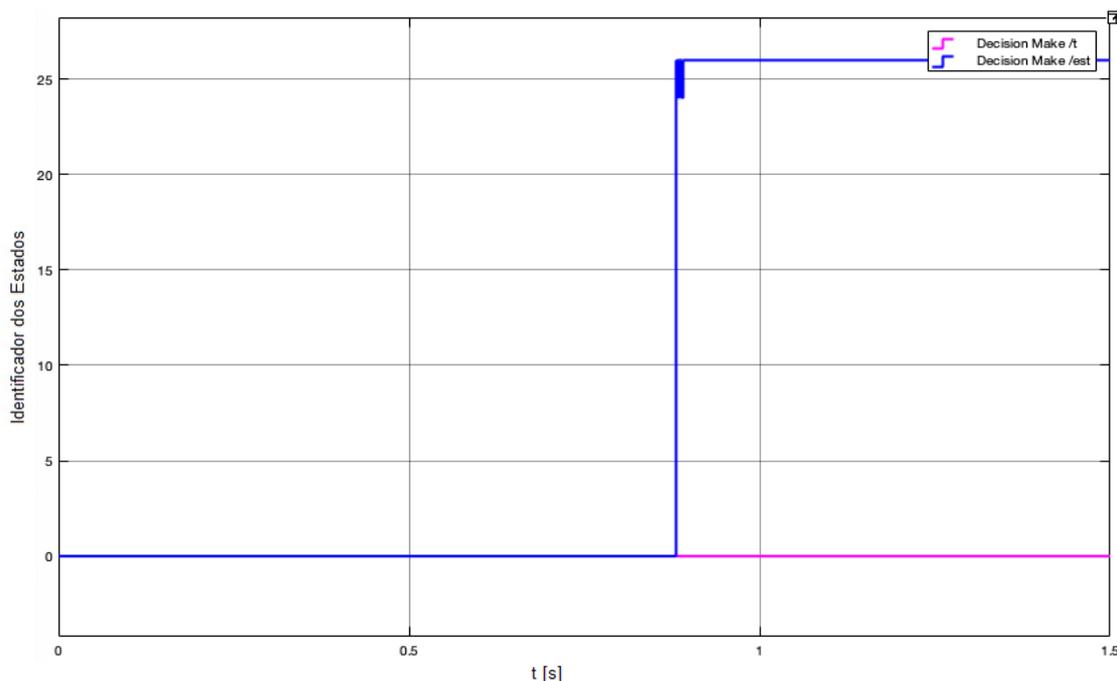


Figura 75: Gráfico de saída da máquina *Decision Make* e da variável  $t$  para  $Arduino\_time\_processing = 0,82\text{ s}$ .

De forma a resumir os valores obtidos nas simulações, a Tabela 19 apresenta os limites encontrados para cada parâmetro analisado.

Parâmetro	Intervalo
Image_time_acquisition	$< 0,05\text{ s}$
Green_percentual	$1 - 99\%$
Camera_distance	$\geq 1,86\text{ m}$
Tractor_velocity	$< 2,69\text{ m/s}$
Bar_height	$< 2,04\text{ m}$
Arduino_time_processing	$\leq 0,82\text{ s}$

Tabela 19: Limites dos parâmetros obtidos para o cenário de avaliação da saída do modelo.

É importante destacar que os parâmetros foram analisados individualmente para o cenário apresentado, ou seja, cada parâmetro avaliado foi sendo incrementado até que o sistema não fosse mais capaz de realizar a aplicação da calda em tempo hábil, enquanto

os demais parâmetros não foram alterados. Por isso, ainda que alguns dos parâmetros ultrapassem seus limites e prejudiquem o funcionamento do sistema, é possível utilizar-se dos demais de modo a compensar os atrasos e propiciar a correta aplicação dos produtos agrícolas. Por isso, a seguir serão apresentados dois cenários em que a compensação corrige a aplicação.

No primeiro cenário o parâmetro *Camera\_distance* foi configurado para o valor de  $1,5\text{ m}$ , levando o sistema à condição de inabilidade temporal para aplicação. Para corrigir tal situação, a velocidade do trator (*Tractor\_velocity*) foi reduzida para  $1,6\text{ m/s}$  ( $5,76\text{ km/h}$ ), realizando a compensação e permitindo ao sistema a correta aplicação. A Figura 76 apresenta a saída do sistema com tais configurações.

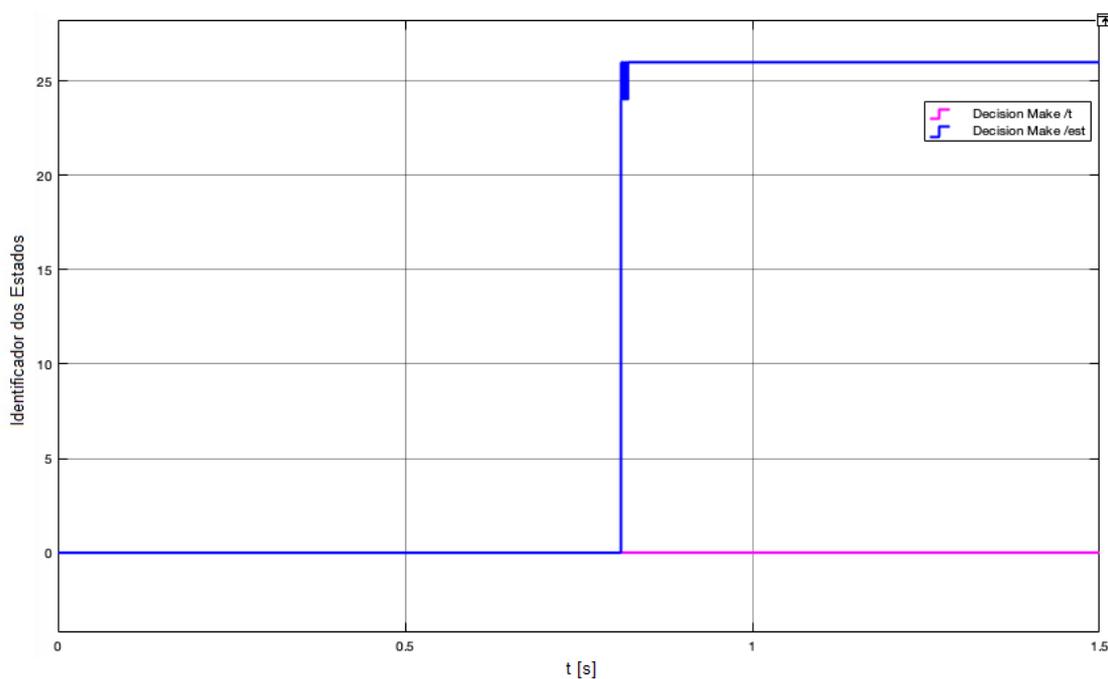


Figura 76: Gráfico de saída da máquina *Decision Make* e da variável  $t$  para  $Camera\_distance = 1,5\text{ m}$  e  $Tractor\_velocity = 1,6\text{ m/s}$ .

Por fim, no segundo cenário foi alterada a velocidade do trator (*Tractor\_velocity*) para o valor de  $3,0\text{ m/s}$ , superior ao valor limite de velocidade levantado. Como é de se esperar, sem a realização da compensação, a tomada de decisão do sistema foi prejudicada. Logo, o valor de *Bar\_height* foi reduzido e o de *Camera\_distance* ampliado, de maneira que houvesse a compensação suficiente para a correta aplicação dos agroquímicos, como mostra a Figura 77.

Diversos outros cenários podem ser simulados e avaliados para verificar tanto o comportamento esperado para o conjunto trator-pulverizador no ambiente real quando para auxiliar na viabilidade de determinadas escolhas no projeto de sistemas de pulverização automatizados, o que é a grande contribuição para o desenvolvimento desses sistemas.

Para finalizar os resultados alcançados com o modelo híbrido construído, foram reali-

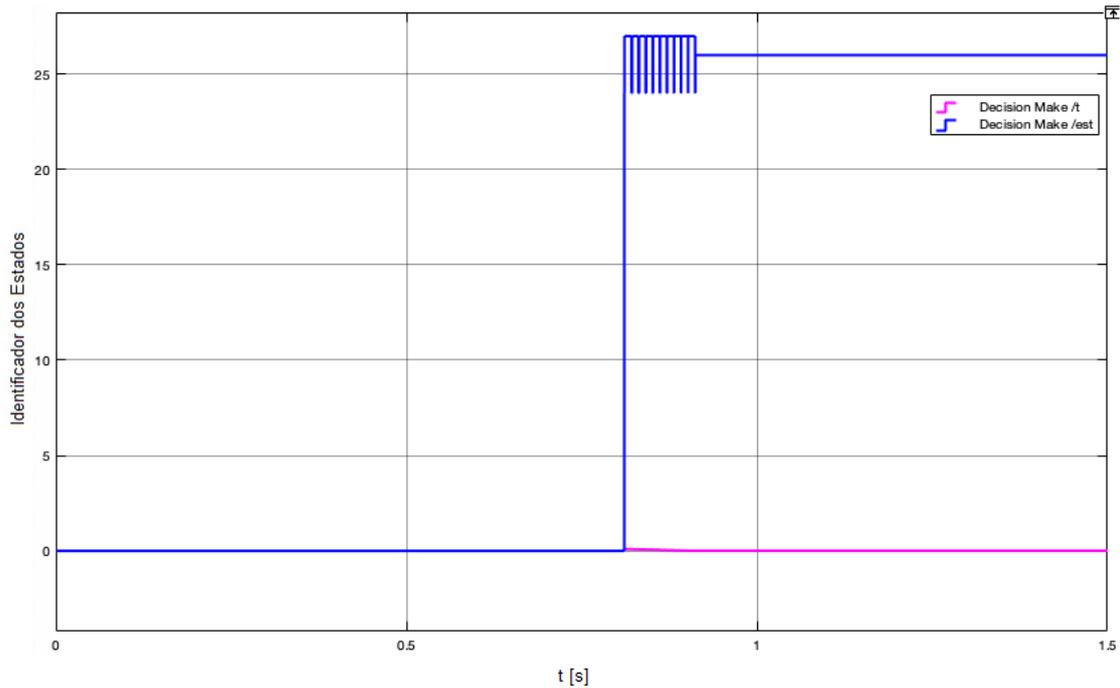


Figura 77: Gráfico de saída da máquina *Decision Make* e da variável  $t$  para  $Tractor\_velocity = 3,0\text{ m/s}$ ,  $Bar\_height = 0,5\text{ m}$  e  $Camera\_distance = 3,0\text{ m}$ .

zados algumas simulações com o intuito de avaliar a sensibilidade do sistema em relação a cada um dos parâmetros avaliados. É importante lembrar que as variações relativas ao fluxo de aquisição de imagem são válidas quando este fluxo supera o de aquisição de pressão e vazão e vice-versa.

A Tabela 20 apresenta os dados obtidos dada determinada variação nos parâmetros estudados. Como exemplo, uma variação de apenas  $-0,01\text{ s}$  no tempo de aquisição de imagem (*Image\_time\_acquisition*) reduz em  $0,01$  o atraso temporal total do sistema, enquanto uma variação de  $+0,25\text{ m/s}$  na velocidade do trator (*Trator\_velocity*) faz que o tempo até a aplicação seja reduzido em  $0,02\text{ s}$ .

Parâmetro	Variação	Variação [%]	Variação temporal [s]	Variação temporal [%]
Image_time_acquisition	$-0,01\text{ s}$	+60	$-0,01$	-2
Green_percentual	+1%	+1	$-0,004$	-1
Camera_distance	$-0,1\text{ m}$	-4	$-0,05$	-11
Trator_velocity	$+0,25\text{ m/s}$	+5	$-0,05$	-11
Bar_height	$+0,1\text{ m}$	+10	$-0,01$	-2
Arduino_time_processing	$+0,05\text{ s}$	+6	$-0,05$	-11

Tabela 20: Parâmetros iniciais utilizados no cenário de avaliação da sensibilidade do modelo.

É possível observar na Tabela 20 que os parâmetros de distância dos bicos até a câmera (*camera\_distance*) e de velocidade do trator (*trator\_velocity*) apresentam os maiores va-

lores de sensibilidade. Isto é, uma diminuição de apenas 4% no valor de distância da câmera gera um decréscimo de 11% no tempo disponível até o ponto de aplicação. O mesmo ocorre para o valor de velocidade do trator, onde um aumento de 5% impacta em uma diminuição de também 11% no tempo útil até a aplicação da calda.

## **4.2 Resumo do Capítulo**

Este capítulo apresentou os resultados obtidos a partir de simulações realizadas no modelo dinâmico híbrido construído para o sistema trator-pulverizador automatizado. O intuito foi avaliar se as saídas do modelo se comportavam conforme era o esperado em determinadas situações.

Além disso, foram avaliados diferentes cenários para verificar os impactos que a variação de determinados parâmetros causa na saída do sistema completo. Sendo assim, no Capítulo a seguir serão apresentadas as Considerações Finais deste trabalho.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao concluir este trabalho, percebe-se o grande potencial da modelagem de sistemas dinâmicos híbridos com a utilização da ferramenta de simulação *Simulink* do *software* Matlab. Embora o sistema de pulverização automatizado possua sinais de naturezas diferentes e que operam em frequências distintas, foi possível integrar as informações individuais de cada módulo e transformá-las em um conhecimento completo do sistema. Além disso, a ferramenta possibilitou a obtenção de sincronia dos módulos e consequente validação temporal do sistema.

Portanto, foi possível analisar e validar os valores limites para cada parâmetro no cenário abordado, isto é, que as câmeras a serem utilizadas devem possuir tempo de aquisição de imagem inferior a  $0,05\text{ s}$ , a distância entre a percepção das plantas e sistema de acionamento não deve ser inferior a  $1,86\text{ m}$ , a velocidade do trator não deve ultrapassar de  $2,69\text{ m/s}$ , a altura da barra de pulverização deve se manter abaixo de  $2,04\text{ m}$  e, ainda, que o tempo de processamento do Arduino não deve ser superior a  $0,82\text{ s}$ . Além disso, a partir do modelo é possível validar valores limites para diversos outros cenários.

Sendo assim, é possível afirmar que a grande contribuição deste trabalho para a comunidade científica diz respeito à possibilidade de modelar sistemas dinâmicos híbridos por meio de ferramentas simples e intuitivas. Já para a comunidade científica que estuda agricultura e pulverizadores, destaca-se a distribuição do conhecimento relativo às dinâmicas e atrasos inerentes aos sistemas agrícolas. Por fim, para o projeto AutoCERES, a maior contribuição é a possibilidade de simular parâmetros que auxiliem nas tomadas de decisão de projeto durante a construção e o aperfeiçoamento do protótipo em desenvolvimento.

Como trabalhos futuros, é sugerida a realização de ensaios em válvulas solenoides normalmente abertas (NA), para que seja possível avaliar se o tempo de resposta destas em comparação às normalmente fechadas é inferior e, portanto, reduz o atraso na aplicação dos agrotóxicos. Além disso, atrasos relativos aos modelos como a geometria de Ackerman, por exemplo, não foram obtidos devido à insuficiência de informações relativas aos tratores utilizados. Portanto, para continuação deste estudo, sugere-se aprofundar o conhecimento e obter os atrasos que ainda não foram modeladas e/ou são desconhecidos, além de avaliar a possibilidade de utilizar-se da metodologia de Sistemas Lógicos

Dinâmicos Mistos (sigla MLD, do inglês *Mixed Logical Dynamical Systems*).

Nesse sentido, é necessário também verificar a perda de velocidade no escoamento em queda livre das gotas de pulverização para as demais pressões de operação do sistema. Destaca-se que alguns dados e modelos não puderam ser obtidos devido ao distanciamento social e situação de quarentena impostos pela pandemia causada pela COVID-19.

Por fim, é importante ressaltar que o Projeto AutoCERES possui grande potencial para comercialização, favorecendo tanto os agricultores com a redução nos custos de aquisição de equipamentos e aplicação de agrotóxicos, quanto a população no que tange a menor ingestão de alimentos com alto índice de agrotóxicos. É por esta razão, que existe a iniciativa de criar uma *startup* que possa acrescentar robustez ao sistema e levá-lo ao mercado.

## 5.1 Produção Científica

No decorrer deste trabalho, foram produzidos artigos que puderam ser publicados e apresentados em algumas conferências. No âmbito da construção do protótipo e avaliação de alguns parâmetros do sistema, foram produzidos os artigos:

- TERRA, FÁBIO P.; DA ROSA, GABRIELLE R. A.; PRADO, JARDEL J. P.; DREWS-JR, PAULO L. J.. A Low-Cost Prototype to Automate Agricultural Sprayers. IFAC-PapersOnline, v. 53, p. 15835-15840, 2020.
- TERRA, FÁBIO P.; NASCIMENTO, GUSTAVO H.; ROSA, GABRIELLE R. A.; DREWS-JR, PAULO L. J.. Autonomous Agricultural Sprayer using Machine Vision and Nozzle Control. Journal Of Intelligent & Robotic Systems, v. 102, p. 38, 2021.

Ademais, no que tange especificamente na modelagem de sistemas dinâmicos híbridos aplicados a pulverizadores agrícolas em barras, foco deste trabalho, foi publicado o seguinte artigo:

- ROSA, GABRIELLE R. A.; GONÇALVES, EDER M. N.; DREWS-JR, PAULO L. J.. Modelagem Dinâmica Híbrida Aplicada a Pulverizadores Agrícolas em Barras com Tecnologia de Aplicação Liga/Desliga. Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI, 2021, Virtual.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, K. de O.; HERNANDES, A. C.; BECKER, M. Simulação de um controlador neural para o estacionamento paralelo de um robô móvel. *VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, 2012.
- ARAUJO, E. de. Defesa por terra ou ar. *Cultivar Máquinas*, v. 28, p. 16–20, 2004.
- ARAUJO, N. Agrishow 2016 – jacto lança dois pulverizadores automotrizes. *Successful Farming*, 2016. Disponível em: [sfagro.uol.com.br/10520-2/amp/](http://sfagro.uol.com.br/10520-2/amp/).
- BERNARDI, A. C. de C. et al. *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. 1. ed. Brasília: Editora Globo, 2014. ISBN 9788570353528.
- Canal Agrícola. *Bico de Pulverização Cerâmico Magnojet AntiDeriva Duplo*. 2021. <https://www.canalagricola.com.br/bico-pulverizacao-magnojet-add>. Online; accessed 25 October 2021.
- CARRARA, M. et al. Spatially variable rate herbicide application on durum wheat in sicily. *Biosystems Engineering*, v. 87, p. 387–392, 04 2004.
- CASTANEDA, M. et al. Sizing optimization, dynamic modeling and energy management strategies of a stand-alone pv/hydrogen/battery-based hybrid system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013.
- CHANG, Y. K. et al. Development of color co-occurrence matrix based machine vision algorithms for wild blueberry fields. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2012.
- CHATTHA, H. et al. Variable rate spreader for real-time spot-application of granular fertilizer in wild blueberry. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 100, p. 70–78, 01 2014.
- DEERE, J. Tecnologia em agricultura de precisão. 2019. Disponível em: <https://www.deere.com.br/pt/tecnologia-de-produtos/agricultura-de-preciso/>.
- ESAU, T. et al. Machine vision smart sprayer for spot-application of agrochemical in wild blueberry fields. *Precision Agriculture*, v. 19, 01 2018.
- GARAY, J. R. B. *CyberSens: uma plataforma para redes de sensores em sistemas ciber-físicos*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, outubro 2012.

GRUTZMACHER, D. D. et al. Monitoramento de agrotóxicos em dois mananciais hídricos no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 6, p. 632–637, 2008.

HANKS, J. E.; BECK, J. L. Sensor-controlled hooded sprayer for row crops. *Weed Technology*, Cambridge University Press, v. 12, n. 2, p. 308–314, 1998.

HENZINGER, T. A. The theory of hybrid automata. *Springer*, 2000.

IBGE. Resultados do censo agro 2017. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. Disponível em: [https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo/\\_agro/resultadosagro/agricultura.html](https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo/_agro/resultadosagro/agricultura.html).

JACTO. Pulverizador agrícola: tudo o que você precisa saber. 2017.

LIU, J. et al. A hierarchical hybrid system model and its simulation. *38th IEEE Conference on Decision and Control*, 12 1999.

LYNCH, N. et al. Hybrid i/o automata. *Springer*, 2005.

MAPA. *Principais Conceitos e Expressões Utilizados na Agricultura de Precisão - AP*. [S.l.]: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2017. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/conceitos-relacionados-a-agricultura-de-precisao-1.pdf>. Acesso em 19/11/2018.

MERCALDI, H. V. *Automação de um sistema de pulverização para aplicação de agroquímicos a taxa variada usando injeção direta*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), 2012.

MILHORANCE, F. Brasil lidera o ranking de consumo de agrotóxicos. Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva, 2015. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/sociedade/saude/brasil-lidera-ranking-de-consumo-de-agrotoxicos-15811346>.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. do; COLAÇO, A. F. *Agricultura de Precisão*. 1. ed. São Paulo: Oficina dos Textos, 2015. ISBN 9788579752131.

NASCIMENTO, G. do et al. A perception system for an autonomous pesticide boom sprayer. In: *IEEE. Latin American Robotics Symposium (LARS)*. [S.l.], 2019.

NYLAND, N. M. Trabalho de Conclusão de Curso, *Sistema embarcado de baixo custo com geolocalização para realização de mapeamento da resistência à penetração e umidade do solo*. 2017. Bacharelado em Engenharia de Automação, Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

OTMIS, J. Controle bico a bico omni 700. 2017. Disponível em: <https://otmis.com.br/produto/controle-bico-a-bico/controle-bico-a-bico-omni-700>.

OZLUOYMAK, O. et al. Turkish journal of agriculture and forestry design, development, and evaluation of a target oriented weed control system using machine vision. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, v. 43, p. 164–173, 04 2019.

RIBEIRO, M. L. et al. Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar. *Química Nova*, v. 30, n. 3, p. 688–694, 2007.

SARAIVA, A. M.; CUGNASCA, C. E.; HIRAKAWA, A. R. Aplicação em taxa variável de fertilizantes e sementes. 2000.

SONY. *Diagonal 4.60mm (Type 1/4.0) 8M Pixel CMOS Image Sensor with Square Pixel for Color Cameras*. 2020. Disponível em: [https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet\\_IMX219\\_20140910.pdf](https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_IMX219_20140910.pdf). Acesso em 19/10/2020.

TERRA, F.; ROSA, G. da; DREWS, P. Evaluation of the pressure-flow relationship in a boom of an autonomous robotic agricultural sprayer. In: *2019 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2019 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2019 Workshop on Robotics in Education (WRE)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 228–233.

TERRA, F. P. et al. A low-cost prototype to automate agricultural sprayers. *International Federation of Automatic Control, 21<sup>st</sup> IFAC World Congress*, 2020.

TIAN, L.; REID, J.; HUMMEL, J. Development of a precision sprayer for site-specific weed management. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v. 42, 03 2000.

VIARURAL, B. Tractor mounted boom sprayer. 2018. Disponível em: <http://br.viarural.com/agricultura/pulverizacao-acessorios/jacto/barras-tres-pontos/barras-condor-pd-01.htm>.

VIEIRA, N. J. *Introdução aos Fundamentos da Computação: Linguagens e Máquinas*. 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2006. ISBN 9788522105083.

VONDRICKA, J.; HLOBEN, P.; LAMMERS, P. S. Optimization of direct nozzle injection system for site-specific herbicide application. In: . [S.l.: s.n.], 2007. v. 1.

WEBER, F. et al. A low cost system to optimize pesticide application based on mobile technologies and computer vision. In: *2018 Latin American Robotic Symposium, 2018 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2018 Workshop on Robotics in Education (WRE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 345–350.

ZHANG, Z. et al. Review of variable-rate sprayer applications based on real-time sensor technologies. Intech, 2018.

## APÊNDICE A FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Algumas definições fundamentais devem ser entendidas para que o projeto como um todo possa ser melhor compreendido pelo leitor. Logo, visando identificar os conceitos que sustentam o desenvolvimento deste trabalho, este capítulo tem por objetivo definir e explicar as principais tecnologias que envolvem o tema em estudo.

Dessa forma, inicialmente é realizada uma apresentação a respeito da agricultura de precisão e as tecnologias disponíveis associadas aos pulverizadores em barras. Também é apresentado nesse capítulo o conceito de máquinas de estados híbridas.

### A.1 Agricultura de Precisão

Em 2012, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), ao instituir a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão (CBAP), definiu a Agricultura de Precisão (AP) como “um sistema de gerenciamento agrícola baseada na variação espacial e temporal da unidade produtiva e visa ao aumento de retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização do efeito ao ambiente”.

Nesse contexto, foi estipulado que os objetivos da AP são “detectar, monitorar e manejar a variabilidade espacial e temporal dos sistemas de produção agropecuários buscando a sua otimização”. A variabilidade espacial se refere aos atributos relacionados à textura do solo, fertilidade, controle de pragas e produtividade, que possuem variabilidade espacial, i. e., apresentam valores diferentes nos diversos pontos da lavoura (MAPA, 2017).

Nesse sentido, Bernardi et al. (2014) resume os conceitos supracitados e define AP como sendo um sistema de gestão que leva em conta a variabilidade espacial do campo com o objetivo de obter um resultado sustentável social, econômico e ambiental. Logo, sabendo-se que a terra onde é realizado o cultivo não é uniforme, é necessária a atuação individual em cada porção conforme sua necessidade específica. (MAPA, 2017).

De acordo com Bernardi et al. (2014), uma máquina para agricultura de precisão é aquela que apoia na gestão da variabilidade espacial da lavoura, permitindo, por exemplo, a aplicação de insumos com tecnologia liga/desliga. Nesse contexto, Molin, Amaral e Colaço (2015) definem a aplicação liga/desliga (*on/off*) como sendo àquela em que

“válvulas de controle atuam desligando ou ligando o sistema de aplicação, sendo que durante os momentos de aplicação a taxa é constante”.

Portanto, primeiramente, a partir de mapeamento, sensores ou câmeras, é identificada a condição da lavoura. Em seguida, os dados coletados são interpretados e é realizado o planejamento da atuação a partir de análises agrônômicas. Por fim, é feita a atuação no campo, ou seja, aplicam-se os insumos necessários, por exemplo, na perspectiva de obter o resultado esperado (BERNARDI et al., 2014).

## A.2 Pulverizadores Agrícolas em Barras

Os pulverizadores agrícolas, como o próprio nome sugere, são dispositivos responsáveis por distribuir à lavoura partículas de caldas (misturas de água e agrotóxico) associadas tanto ao controle de pragas, quanto à fertilização de culturas.

Segundo Jacto (2017), os principais tipos de pulverizadores são os aéreos e os terrestres e ambos, desde que adequadamente regulados e operados, podem ser utilizados com sucesso na aplicação de agrotóxicos para o controle de pragas e doenças (ARAUJO, 2004).

Logo, no âmbito dos pulverizadores terrestres estão os modelos em barras. Esse tipo de pulverizador consiste em uma barra onde são inseridas múltiplas pontas de pulverização que, então, recebem a calda do produto e a distribuem às plantações, conforme mostra a Figura 78 (JACTO, 2017).



Figura 78: Pulverizador em barras tratorizado (VIARURAL, 2018).

Nas tecnologias apresentadas na Agricultura de Precisão (AP) surge a temática da pulverização de agrotóxicos com aplicação liga/desliga, isto é, aplicação de pesticidas somente nos locais onde se faz necessário. Para os pulverizadores em barras, a AP apresenta algumas possíveis soluções, como é o exemplo do controle por seções ilustrado na Figura 79.

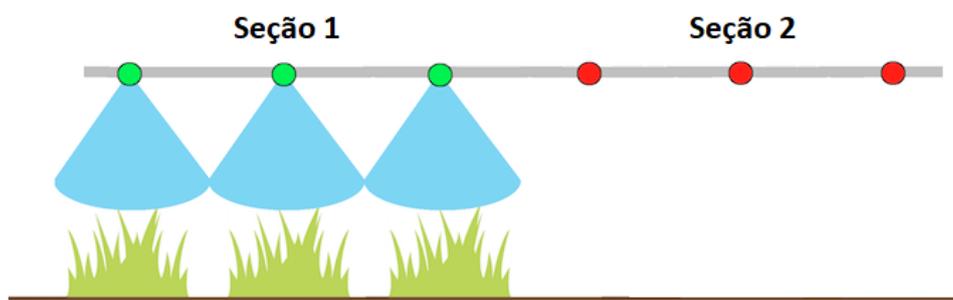


Figura 79: Controle por seções de pulverizador em barras, onde as cores verde e vermelho representam os bicos abertos ou fechados, respectivamente.

Esta tecnologia é discutida em Mercaldi (2012) e utilizada por algumas empresas, como é o caso da John Deere, que defende que a automatização do processo de abertura e fechamento das seções da barra reduz a fadiga do operador e a sobreposição do produto aplicado. Conseqüentemente, acaba por reduzir os custos e os impactos ambientais agregados (DEERE, 2019).

Sobremaneira, ainda que o sistema de seleção por seções apresente vantagens em relação aos sistemas convencionais, isto é, sistemas sem qualquer tipo de controle ou automação, o mesmo não supre a carência no que se refere a linhas de plantação com trechos de tamanhos inferiores aos das seções do pulverizador e também nos casos onde há falhas de continuidade nas próprias linhas das lavouras.

Sendo assim, surge o conceito de controle bico a bico, apresentado na Figura 80, no qual cada ponta de pulverização é controlada individualmente de acordo com a necessidade específica de cada plantação.

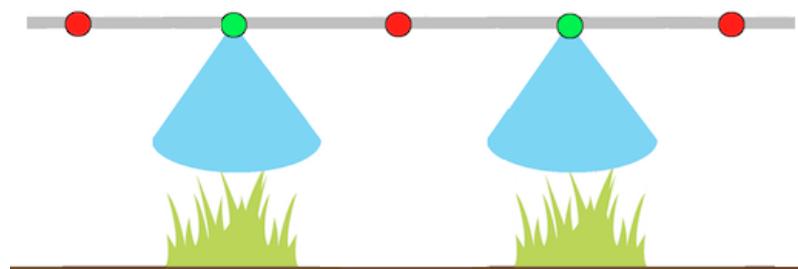


Figura 80: Controle bico a bico de pulverizador em barras. Cores verde e vermelho representam bicos abertos ou fechados, respectivamente.

Nesse sentido, o controle bico a bico abordado pode ser dividido em dois tipos, série ou paralelo, de acordo com a alimentação da calda no mesmo. Logo, nos sistemas paralelos cada bico de pulverização possui conexão própria com o tanque de armazenamento do fluido, enquanto nos sistemas em série uma mesma tubulação alimenta diversos bicos da barra do pulverizador, em uma configuração típica de linha tronco (*header*).

## APÊNDICE B DADOS DE TEMPO DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM

Pixels Verdes (%)	Tempo (ms)
0,64	263,89
0,84	260,04
0,89	263,99
10,40	315,32
11,90	303,55
11,99	310,35
14,36	319,99
15,17	327,77
15,24	342,83
15,27	342,58
15,60	319,05
15,80	312,41
15,85	303,91
15,93	321,05
16,16	318,28
16,30	337,92
16,36	327,30
17,08	340,29
17,72	336,21
18,05	342,42
18,08	357,10
18,13	340,45
18,36	331,57
18,74	343,24
18,80	341,37
19,00	347,00
19,07	341,49
19,18	337,31
19,22	337,84
19,27	344,99
19,37	351,39
19,38	330,37

Pixels Verdes (%)	Tempo (ms)
19,47	337,29
19,75	335,98
19,85	354,96
20,28	342,47
20,34	350,52
20,44	341,64
20,44	339,07
20,44	334,39
20,45	341,45
20,46	363,54
20,66	339,56
20,82	340,62
20,86	342,07
20,94	344,31
20,96	357,42
21,03	350,36
21,05	301,20
21,22	364,86
21,28	345,80
21,37	335,34
21,57	352,21
21,66	347,63
21,85	342,64
21,88	352,29
21,94	350,19
21,97	352,90
22,16	353,57
22,20	343,84
22,36	341,33
22,48	360,67
22,57	354,91
22,62	364,25
22,70	354,23
22,75	367,87
22,91	354,74
23,00	356,30
23,09	360,35
23,17	358,72
23,17	352,59
23,24	345,96
23,34	370,43
23,42	354,61
23,48	360,78
23,50	362,54
23,52	361,33
23,61	355,99

Pixels Verdes (%)	Tempo (ms)
23,69	361,86
23,75	365,66
23,77	357,25
23,85	359,37
23,85	356,73
23,87	361,33
23,87	359,98
23,92	363,02
24,05	350,31
24,06	356,85
24,08	354,25
24,12	378,72
24,21	366,50
24,29	351,73
24,33	336,54
24,35	368,44
24,45	368,89
24,48	362,66
24,54	372,59
24,56	362,76
24,57	355,73
24,66	363,15
24,68	370,75
24,70	356,72
24,72	349,12
24,83	367,78
24,83	361,90
24,84	332,34
24,88	360,63
24,93	360,58
25,08	369,64
25,21	360,69
25,28	359,08
25,30	370,10
25,40	380,20
25,42	385,73
25,42	361,76
25,49	347,66
25,54	356,75
25,54	381,41
25,63	373,58
25,69	360,41
25,76	362,14
25,94	376,21
25,94	375,63
26,08	374,16

Pixels Verdes (%)	Tempo (ms)
26,34	363,52
26,39	371,97
26,40	380,59
26,45	372,67
26,61	369,19
26,68	373,71
26,68	368,49
26,68	374,84
26,74	392,00
26,89	383,54
27,05	377,49
27,08	372,02
27,27	373,04
27,29	373,92
27,39	383,79
27,42	379,38
27,43	368,14
27,53	389,84
27,58	376,74
27,59	380,13
27,66	376,76
27,74	377,59
27,77	372,91
27,97	371,21
28,04	385,33
28,25	364,77
28,37	387,42
28,55	370,46
28,60	401,33
28,72	389,84
28,73	378,71
28,82	383,70
28,89	371,18
28,89	380,74
28,92	370,72
28,98	370,40
28,98	374,44
29,01	374,47
29,19	377,37
29,26	376,85
29,30	396,34
29,33	378,06
29,35	369,27
29,41	384,63
29,63	381,32
29,64	386,15

Pixels Verdes (%)	Tempo (ms)
29,64	379,47
29,76	388,35
29,79	388,76
29,92	379,30
30,02	382,80
30,07	389,78
30,12	382,20
30,17	380,71
30,20	373,52
30,38	391,04
30,43	365,75
30,45	375,55
30,48	378,24
30,54	396,44
30,58	393,58
30,69	403,84
30,71	390,17
30,85	394,32
31,00	367,76
31,01	388,73
31,11	381,63
31,21	402,83
31,25	385,00
31,30	387,75
31,36	347,67
31,46	388,77
31,50	394,84
31,53	391,23
31,54	388,48
31,55	387,16
31,71	389,50
31,75	395,71
31,79	399,13
31,85	384,03
32,16	399,21
32,24	399,97
32,41	405,65
32,43	412,48
32,48	399,03
32,50	403,95
32,55	396,40
32,56	395,44
32,59	394,73
32,66	392,02
32,73	390,98
32,76	401,47

Pixels Verdes (%)	Tempo (ms)
32,84	398,01
32,85	394,62
32,90	397,04
32,96	397,50
32,96	406,57
33,04	395,93
33,04	391,92
33,07	403,62
33,18	392,51
33,21	404,55
33,27	397,19
33,33	384,33
33,37	388,99
33,50	404,85
33,53	393,69
33,54	385,64
33,69	394,34
33,77	404,36
33,83	403,53
33,91	392,19
33,97	390,64
34,21	398,47
34,38	409,58
34,40	404,72
34,44	407,10
34,48	408,23
34,56	409,91
34,68	398,27
34,96	412,20
35,10	425,58
35,14	404,10
35,31	413,47
35,33	366,69
35,38	421,27
35,41	406,78
35,42	423,70
35,47	418,46
35,62	401,58
35,65	396,13
35,67	403,02
35,68	400,27
35,73	412,94
35,76	415,46
35,77	410,60
35,78	411,77

Pixels Verdes (%)	Tempo (ms)
35,87	408,98
36,34	403,54
36,42	408,89
36,52	411,14
36,56	425,05
36,58	404,12
36,58	415,33
36,63	409,18
36,64	416,57
36,64	412,25
36,86	417,25
36,90	418,29
36,97	403,66
37,04	411,42
37,27	427,91
37,34	413,49
37,56	403,33
37,59	405,87
37,59	412,21
38,06	407,18
38,22	403,59
38,29	407,70
38,32	427,65
38,83	426,68
38,90	416,52
39,28	422,90
39,67	425,72
39,76	427,87
40,11	436,51
40,47	372,56
40,50	434,08
40,62	433,97
41,00	424,61
41,02	422,12
41,04	436,82
41,14	425,51
41,51	426,42
41,54	427,20
41,70	441,45
41,77	435,59
41,83	430,58
41,84	490,65
42,44	440,95
42,45	444,03
43,15	430,16

Pixels Verdes (%)	Tempo (ms)
43,19	431,71
43,42	440,03
43,47	436,01
43,58	442,77
43,66	433,26
43,72	451,92
43,92	434,91
44,14	425,24
44,63	451,21
44,83	452,18
44,94	444,71
45,21	445,35
45,46	444,06
45,68	446,15
45,98	446,66
46,17	454,37
46,29	446,96
46,41	457,87
46,67	446,32
46,83	449,33
46,87	436,31
46,93	456,24
47,52	453,98
47,62	455,47
47,75	464,52
48,02	455,45
48,25	457,17
49,00	478,37
49,63	461,80
50,25	467,16
50,41	467,22
50,70	471,41
52,47	467,69
52,57	478,27
52,71	491,43
52,75	467,86
53,57	479,67
54,76	490,34
55,41	497,40
55,57	481,12
57,36	496,59
59,26	494,11