

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ADRIANO HENRIQUE BLUM SANTANA

FELIPPE MORAES PEREIRA

JOÃO PAULO ISTCHUK

**REDE MESH DE CONTROLADORES PID PARA BICOS DE PULVERIZAÇÃO
DE IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS**

CURITIBA

2022

**ADRIANO HENRIQUE BLUM SANTANA
FELIPPE MORAES PEREIRA
JOÃO PAULO ISTCHUK**

**REDE MESH DE CONTROLADORES PID PARA BICOS DE PULVERIZAÇÃO
DE IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS**

**PID controller mesh network for pulverization nozzles of agricultural
implements**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Eletrônica
do Curso de Bacharelado em Engenharia
Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal
do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Hermes Irineu Del Monego

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Sens Chang

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ADRIANO HENRIQUE BLUM SANTANA
FELIPPE MORAES PEREIRA
JOÃO PAULO ISTCHUK**

**REDE MESH DE CONTROLADORES PID PARA BICOS DE PULVERIZAÇÃO
DE IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Eletrônica
do Curso de Bacharelado em Engenharia
Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal
do Paraná.

Data de aprovação: 14/dezembro/2022

Hermes Irineu Del Monego
Título Prof. Dr
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Bruno Sens Chang
Título Prof. Dr
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carmen Caroline Rasera
Título Prof. Dr
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Joao Luiz Rebelatto
Título Prof. Dr
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2022**

Dedicamos este trabalho a todos que possuem
paixão por engenharia e por desenvolver novas
tecnologias.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos os professores de nossa instituição, e membros da coordenação de curso pela dedicação empregada no nosso ensino, nos garantindo uma formação de qualidade e nos capacitando para atuar como engenheiros eletrônicos. A faculdade não foi um período fácil nas nossas vidas, muito pelo contrário, todos os semestres nos deparamos com desafios cada vez mais difíceis, exigindo muito esforço, horas de estudo, e desgaste. Entretanto, acreditamos que muito disso foi necessário para que possamos enfrentar os problemas práticos e o dia a dia no mercado de trabalho e encerramos nosso ciclo na graduação nos sentindo muito bem preparados após cursar em uma universidade de qualidade altíssima.

Em especial, agradecemos a nossos orientadores, Prof. Dr. Bruno Sens Chang e Prof. Dr. Hermes Irineu Del Monego pela confiança na equipe e sábios conselhos.

Agradecemos em especial também os professores João Luiz Rebelatto, Nilson Bueno Kominek, Thomaz Milton Navarro Verastegui, Rafael Eleodoro de Goes, Rubens Eduardo Garcia Machado, Daniel Rossato De Oliveira, Antonio Carlos Wulf Pereira De Melo, Carmen Caroline Rasera, Carlos Marcus Gomes Da Silva Cruz e Raimundo Ronilson Leal Do Rosario, por serem professores excelentes e serem peças indispensáveis para alimentar a nossa sede pelo aprendizado e pelos desafios da engenharia e da ciência.

Registramos também aqui a nossa gratidão a equipe da IoTtag pelo auxílio indispensável na elaboração e execução deste trabalho.

Aos nossos familiares que foram pacientes conosco e nos apoiaram durante o desenvolvimento deste trabalho e durante a faculdade.

A todos os amigos que nos deram apoio e conselhos em momentos difíceis durante a faculdade.

"A ciência pode nos fascinar e nos entreter,
mas é a engenharia que muda o
mundo."(ASIMOV, Isaac, 1988)

RESUMO

Este trabalho propõe um sistema eletrônico para a aplicação de fertilizantes e defensivos por implementos agrícolas. O sistema é capaz de controlar a taxa de aplicação do líquido em cada bico de pulverização, de forma independente, com o acionamento de válvulas por controladores PID. Cada controlador atua em malha fechada com seu respectivo fluxômetro. O sistema possui, ainda, um dispositivo mestre que coordena os controladores por meio de uma rede sem fio em arquitetura *mesh*. O trabalho é destinado à fabricação de fertilizadores e pulverizadores agrícolas.

Palavras-chave: controle pid; rede mesh; sensores e atuadores; esp 32; iso 11783.

ABSTRACT

This work proposes an electronic system for the application of fertilizers and pesticides by agricultural implements. The system is capable of controlling the application rate of the liquid in each spray nozzle, independently, where the valve control is provided by PID controllers. Each controller operates in a closed loop with its respective flowmeter. The system also has a master device, which coordinates the controllers via wireless network in a mesh architecture. The project is intended for the manufacturing of fertilizers and agricultural sprayers.

Keywords: pid control; mesh network; sensors and actuators; esp 32; iso 11783.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de Microcontrolador.	22
Figura 2 – ESP-WIFI-MESH Topologia.	23
Figura 3 – Tabela de Roteamento.	24
Figura 4 – Pacote de dados.	25
Figura 5 – Diagrama do protocolo ISOBUS.	26
Figura 6 – Exemplo de controle PWM.	28
Figura 7 – Diagrama PID.	29
Figura 8 – Curva de resposta em forma de S.	31
Figura 9 – Perfis de escoamento.	33
Figura 10 – Energia em fluido real.	34
Figura 11 – Bomba de diafragma.	36
Figura 12 – Conduite não uniforme.	37
Figura 13 – Restrição do escoamento	37
Figura 14 – Válvula de Globo.	40
Figura 15 – Válvula de Agulha.	40
Figura 16 – Motor de passo unipolar.	41
Figura 17 – Motor de passo bipolar.	42
Figura 18 – Diagrama do sistema projetado.	45
Figura 19 – Fonte ATX utilizada no protótipo.	46
Figura 20 – ESP32 WROOM-32.	47
Figura 21 – <i>Driver</i> A4988 para motor de passo.	48
Figura 22 – Sensor fim de curso TCST2103.	48
Figura 23 – Circuito comparador de tensão.	49
Figura 24 – <i>Layout</i> do <i>hardware</i> da válvula.	51
Figura 25 – Circuito controlador PWM.	52
Figura 26 – <i>Transceiver</i> CAN TJA1050.	52
Figura 27 – Diagrama funcional do <i>transceiver</i> CAN TJA1050.	53
Figura 28 – <i>Layout</i> da placa ECU.	54
Figura 29 – STM32 Nucleo F302R8.	55
Figura 30 – Motor de Passo 20BYJ-46.	57

Figura 31 – Acoplador flexível 5x8.	57
Figura 32 – Fluxômetro YF-S401.	58
Figura 33 – Sensor de pressão HK1100C.	59
Figura 34 – Curva de conversão do sensor HK1100C.	59
Figura 35 – Bomba de água CF-2201A.	60
Figura 36 – Tela AFS Pro 700 na configuração de colheitadeira.	61
Figura 37 – Diagrama de blocos funcionais do código da ECU.	63
Figura 38 – Diagrama de blocos funcionais do código das válvulas.	65
Figura 39 – Diagrama de blocos funcionais do <i>software</i> do simulador de GPS.	66
Figura 40 – Visão geral do sistema.	68
Figura 41 – Descrição dos componentes da válvula montada.	69
Figura 42 – Descrição da seção de controle.	70
Figura 43 – Funcionamento do fim de curso.	71
Figura 44 – Explicação da interface gráfica.	77
Figura 45 – Tela para configuração do PID.	78
Figura 46 – <i>Software</i> simulador GPS.	79

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva de resposta do PID de uma única válvula em diferentes setpoints.	73
Gráfico 2 – Curva de resposta do PID de uma válvula ao ligar o sistema.	73
Gráfico 3 – Curva de resposta do PID de uma única válvula ao aumentar o <i>setpoint</i> .	74
Gráfico 4 – Curva de resposta do PID de uma única válvula ao diminuir o <i>setpoint</i> .	74
Gráfico 5 – Perturbações percebidas por uma válvula ao fechar as demais.	75
Gráfico 6 – Perturbações percebidas por uma válvula ao fechar ou abrir duas das outras.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de componentes para a montagem da válvula	50
Tabela 2 – Tabela de componentes para a montagem da ECU.	53
Tabela 3 – Tabela de componentes para a montagem do simulador GPS.	56
Tabela 4 – Tabela de materiais para a válvula	58
Tabela 5 – Tabela de materiais que compõe o sistema hidráulico.	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau da planta (primeiro método).	31
Quadro 2 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico (segundo método).	32

LISTAGEM DE CÓDIGOS FONTE

Listagem 1 – Implementação PID.	72
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

CAN	Controller Area Network
DMA	Direct Memory Access
ECU	Electronic Control Unit
ESP-IDF	Espressif IoT Development Framework
ESP-MDF	Espressif Mesh Development Framework
GPS	Global Positioning System
HTTP	HyperText Transfer Protocol
I2C	Inter-Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
IOT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
JSON	JavaScript Object Notation
MAC	Media Access Control
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
OSI	Open System Interconnection
PID	Proportional Integrative Derivative
PSRAM	Pseudo-Static Random Access Memory
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
SAE	Society Automotive Engineers
SDK	Software Development Kit

SMD	Surface-mount Device
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random Access Memory
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
WMN	Wireless mesh network

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Considerações iniciais	19
1.2	Objetivos	19
1.2.1	Objetivo geral	19
1.2.2	Objetivos específicos	19
1.3	Justificativa	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	Microcontroladores	22
2.2	Rede Mesh	23
2.2.1	ESP-WIFI-MESH	23
<u>2.2.1.1</u>	<u>Tabelas de Roteamento</u>	<u>24</u>
<u>2.2.1.2</u>	<u>Pacote ESP-WIFI-MESH</u>	<u>24</u>
<u>2.2.1.3</u>	<u>Desempenho</u>	<u>25</u>
2.3	ISOBUS	25
2.3.1	Task Controller	26
2.3.2	Terminal Virtual	26
2.4	Barramento CAN	26
2.5	Protocolo J1939	27
2.6	Sensor de pressão piezoresistivo	27
2.7	Sensor de fluxo de Efeito Hall	27
2.8	Controle PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>)	28
2.9	Controle PID	28
<u>2.9.0.1</u>	<u>Regra de Sintonia de Ziegler-Nichols</u>	<u>30</u>
2.10	Controle de Fluxo	32
2.10.1	Numero de Reynolds	32
2.10.2	Perda de carga	33
2.11	Máquinas de Fluxo	34
2.11.1	Bombas de diafragma	35
2.11.2	Vazão	36
2.11.3	Pressão e vazão	37

2.11.4	Válvulas	39
2.11.5	Válvulas de Regulagem	39
2.11.5.1	<u>Válvulas de globo</u>	39
2.11.5.2	<u>Válvulas de agulha</u>	40
2.12	Motor de passo	40
3	METODOLOGIA	43
3.1	Requisitos de sistema	43
3.1.1	Válvula	43
3.1.2	Tela ISOBUS	43
3.1.3	Fluxo de água	43
3.1.4	ECU	44
3.1.5	Simulador GPS	44
3.1.6	Sistema proposto	44
3.2	Hardware	45
3.2.1	Alimentação do sistema	45
3.2.2	Válvula	46
3.2.2.1	<u>Microcontrolador</u>	46
3.2.2.2	<u>Controle do motor de passo</u>	47
3.2.2.3	<u>Sensor de fim de curso</u>	48
3.2.2.4	<u>Lista de componentes</u>	49
3.2.2.5	<u>Layout</u>	50
3.2.3	ECU	51
3.2.3.1	<u>Microcontrolador</u>	51
3.2.3.2	<u>Controle de PWM</u>	51
3.2.3.3	<u>Transceiver CAN TJA1050</u>	52
3.2.3.4	<u>Lista de componentes</u>	53
3.2.3.5	<u>Layout</u>	54
3.2.4	Simulador GPS	55
3.2.4.1	<u>Lista de componentes</u>	55
3.2.4.2	<u>Layout</u>	56
3.3	Materiais	56
3.3.1	Válvula	56

3.3.1.1	<u>Motor de Passo</u>	56
3.3.1.2	<u>Registro de Gás</u>	57
3.3.1.3	<u>Acoplador</u>	57
3.3.1.4	<u>Fluxômetro</u>	57
3.3.1.5	<u>Lista de materiais</u>	58
3.3.2	Sistema hidráulico macro	58
3.3.2.1	<u>Sensor de pressão</u>	59
3.3.2.2	<u>Bomba D'Água</u>	60
3.3.2.3	<u>Materiais diversos</u>	60
3.3.3	Lista de materiais	60
3.3.4	Monitor AFS Pro 700	61
3.4	Firmware	62
3.4.1	ECU	62
3.4.2	Válvulas	64
3.4.3	Simulador de GPS	66
4	RESULTADOS	68
4.1	Visão geral de montagem	68
4.1.1	Válvula	68
4.1.2	Controle	69
4.2	Fim de curso	70
4.3	Controle PID	71
4.4	Controle de pressão	76
4.5	Interface com a tela ISOBUS	76
4.6	Simulador GPS	78
4.7	Operação	79
5	CONCLUSÃO	81
5.0.1	Trabalhos futuros	81
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

O trabalho a seguir compreende a elaboração e o desenvolvimento de um sistema de controle para implemento agrícola sem fio, com controle independente por válvula de aplicação.

Por se tratar de um projeto onde sua real aplicação é em um ambiente no qual os alunos não têm acesso, e também, por muitas vezes necessitar de componentes específicos e de custo elevado (como, por exemplo, válvula de pulverização), a solução abordada contará com algumas simplificações para provar a solução em protótipo.

Pretende-se, ao final do trabalho, obter uma prévia do que seria o sistema real, com todo o *hardware* e parte mecânica confeccionada pelos alunos. No entanto, espera-se que para uma aplicação no cenário real do protótipo, aperfeiçoamentos e adaptações sejam necessários para garantir que o objetivo do projeto seja atingido.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um hardware capaz de realizar o controle de aplicação de fertilizantes através de um controlador PID, onde cada válvula é independente e se comunica com o sistema mestre através de comunicação sem fio em uma rede mesh.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver uma placa de circuito impresso que contenha um microcontrolador, circuitos de acionamento para controle de motor de passo, e circuito de entrada analógica para leitura de sensores;
- Desenvolver uma placa de circuito impresso que contenha um microcontrolador, um transceptor CAN, circuito de entrada analógica para leitura de sensor de pressão e uma saída de potência para uma bomba DC.
- Projetar e desenvolver um software embarcado para controle PID de uma malha fechada com um fluxômetro e uma válvula, incluindo comunicação com o dispositivo mestre através de rede sem fio com protocolo mesh.
- Projetar e desenvolver um software embarcado para comunicação CAN respeitando a norma da ISOBUS (ISO 11783), capaz de enviar comandos aos controladores dos nós da rede sem fio com protocolo mesh.

1.3 Justificativa

A agricultura de precisão é um conceito de gerenciamento do campo onde a prática de aplicação de insumos, como fertilizantes, corretivos, pesticidas, sementes, água entre outros são realizados no tempo, local e intensidade corretas. Esta técnica permite uma utilização mais racional dos insumos, com potencial de benefícios econômicos e ambientais (BASSOI, 2019).

Com o avanço da tecnologia no campo através da agricultura 4.0, e a constante busca por redução de custos e otimização das culturas, a agricultura de precisão traz o conceito de aplicação de fertilizantes a taxa variável, onde cada trecho de um talhão, ou porção de terra, é mapeado conforme a necessidade de determinado produto, e essa informação é utilizada como referência para implementos agrícolas e dispositivos montados nas máquinas que são capazes de controlar a quantidade de produto aplicado em tempo real (WERNER, 2007).

Tipicamente, um implemento agrícola de pulverização pode conter dezenas de bicos, agrupados em seções, com 2 ou mais bicos. O controle da taxa de aplicação do produto é feito em uma válvula proporcional que regula o fluxo de líquido para todas as seções simultaneamente, e cada seção tem uma segunda válvula capaz de cortar ou deixar passar o líquido. Esse sistema de precisão pode apresentar alguns problemas, tais como: caso ocorra entupimento ou falha de um dos bicos de pulverização, a ECU (Unidade de Controle Eletrônica) do implemento não é capaz de detectar; o controle da taxa de aplicação é feito de forma global, ou seja, assume-se que todos os bicos têm o mesmo fluxo de produto em determinado instante, gerando desperdícios de insumos; a necessidade da utilização de chicotes elétricos longos e com muitos fios caso o implemento seja composto de inúmeros sensores e atuadores; a quantidade de sensores e atuadores é limitada fisicamente pelo número de entradas e saídas da ECU, assim como a capacidade de processamento da mesma, elevando o seu custo.

Esta proposta se propõe a trazer avanços tecnológicos quando comparado a outras soluções existentes no mercado. Uma das soluções existentes é o Sistema de pulverização seletiva *WeedSeeker* da Trimble Agricultura (TRIMBLE, 2022) que realiza o controle bico a bico automático através de sensores ópticos, os quais identificam o verde das ervas daninhas e aplicam o defensivo somente nas localizações específicas.

Outra solução é a *IntelliSpray* da New Holland (HOLLAND, 2022) o fabricante oferece um produto que realiza o controle de fluxo dos bicos por largura de pulsos (PWM), garantindo, segundo o fabricante, taxa constante de aplicação e pressão. O sistema oferece ainda o monitoramento dos bicos e alerta de mau funcionamento para os operadores, além de compensação da taxa de aplicação devido à variação de velocidade em curvas.

A abordagem proposta apresenta vantagens sobre os produtos existentes no mercado atualmente: como o menor custo da ECU, pois haverá menos entradas e saídas, logo menor capacidade de processamento; não haverá necessidade de cabeamentos longos da ECU até os atuadores e sensores; maior número de malhas de controle através do processamento distribuído nos controladores individuais, resultando em um aumento de precisão na aplicação do

produto e sensibilidade a falhas. Além disso, planeja-se o desenvolvimento de uma ECU genérica capaz de controlar diversos tipos de implementos se utilizada em conjunto com outros tipos de controladores sem fio.

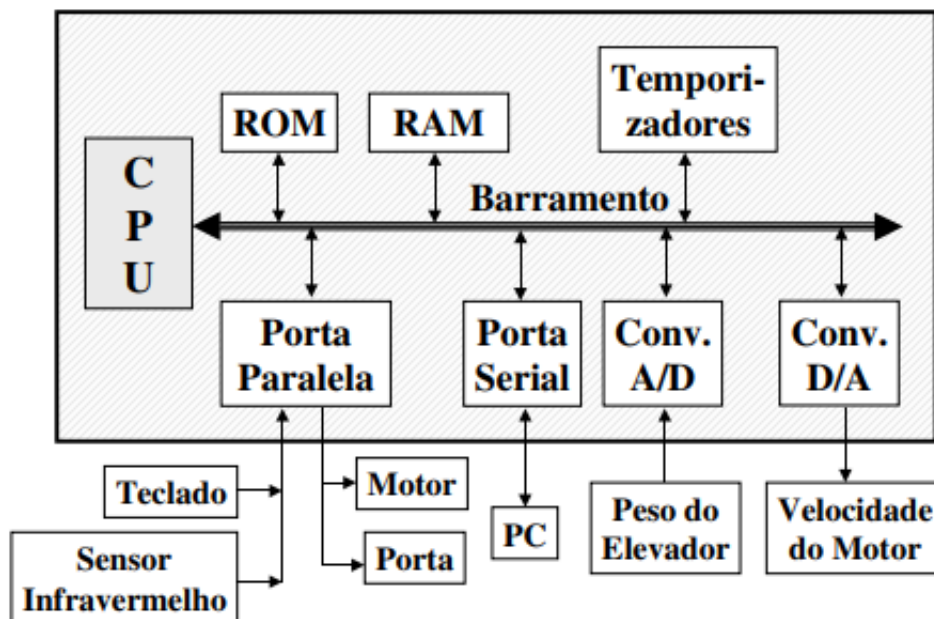
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Microcontroladores

Microcontroladores podem ser definidos como um simples microprocessador ao qual foi incorporado uma série de periféricos, tais como: Memória ROM, memória RAM, porta serial, conversores analógicos e digitais, dentre outros, visando realizar as mais diversas aplicações.

É importante ressaltar a diferença entre o microprocessador e o microcontrolador: O microprocessador é dedicado a sistemas que realizam grandes operações de processamento sobre dados; oferece uma série de modos de acesso, além de operações em ponto-flutuante. Já o microcontrolador a finalidade principal é o controle digital, pois oferece uma infinidade de recursos destinados a operar sistemas de controle com tamanho físico reduzido (ZELENOVSKY; MENDONÇA, 2005).

Figura 1 – Exemplo de Microcontrolador.



Fonte: Adaptado de (ZELENOVSKY; MENDONÇA, 2005).

Na figura 1 pode-se observar uma ilustração de um microcontrolador aplicado para controlar um elevador. Cabe destacar que os microcontroladores acumulam todos os blocos da área hachurada figura em um único circuito integrado, garantindo uma série de vantagens como:

- Menor tamanho do controlador;
- Menor consumo de energia;
- Reduções de tempo de projeto e custos; e

- Facilidade de manutenção e confiabilidade.

2.2 Rede Mesh

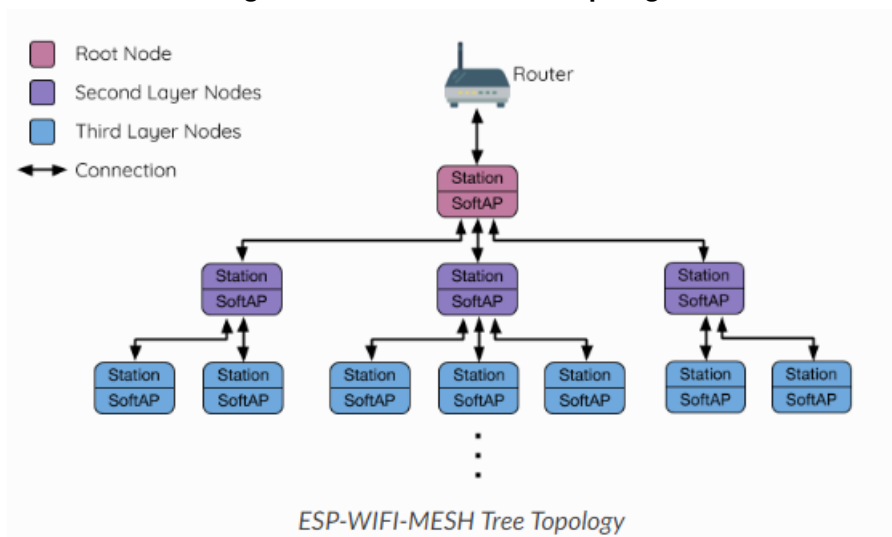
As redes *mesh*, ou WMN (*Wireless Mesh Network*) são redes de comunicação sem fio que consistem de nós que são capazes de transmitir pacotes entre si e criar um caminho até o destino final. As redes *mesh* são redes organizadas, autoconfiguráveis, e conseguem suprir uma capacidade alta de conectividade com robustez e baixo custo de implementação. As WMN são a maneira mais eficiente de tecnologia sem fio, quando comparada com tecnologias semelhantes (K.C, 2016) .

2.2.1 ESP-WIFI-MESH

ESP-WIFI-MESH é um protocolo de rede construído acima da infraestrutura *Wi-Fi* que combina redes sem fio individuais em uma única rede. Por ser um protocolo baseado em *mesh*, permite que cada nó da rede se conecte com outros nós, resultando em múltiplas conexões abaixo deste mesmo nó e, simultaneamente, mantendo apenas uma única conexão com estações acima (ESPRESSIF, 2022a).

Esta configuração transmite a ideia de uma topologia em árvore, conforme ilustra a imagem 2.

Figura 2 – ESP-WIFI-MESH Topologia.



Fonte: Adaptado de (ESPRESSIF, 2022a).

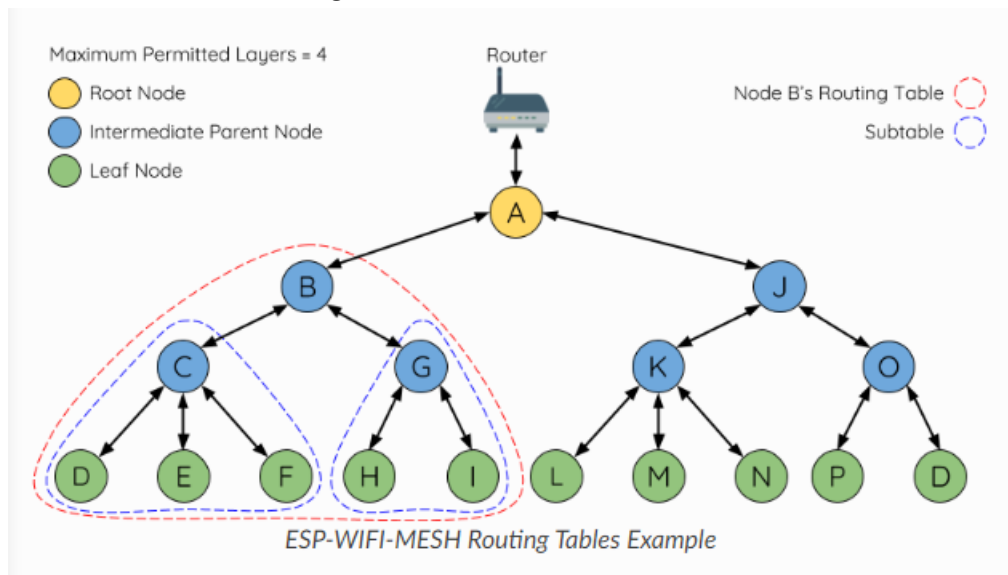
Este protocolo de rede permite que os nós transmitam dados para outros nós através de saltos múltiplos (*multiple hop*), ou seja, as estações podem transmitir pacotes de outras estações servindo como pontes. Esta característica permite afirmar que existe um caminho de

camada física entre quaisquer dois nós da rede. Vale ressaltar que o ESP-WIFI-MESH permite apenas um nó raiz, o qual serve como interface entre a estrutura *mesh* e a rede externa.

2.2.1.1 Tabelas de Roteamento

Cada nó da rede *mesh* mantém uma tabela de roteamento individual, permitindo o correto roteamento de seus dados. A tabela de roteamento de um nó em específico consiste no endereço MAC de todos os nós pertencentes a sua sub-rede. As tabelas são divididas internamente em sub-tabelas, cada uma correspondente a uma sub-rede, como exemplifica a tabela de roteamento na figura 3.

Figura 3 – Tabela de Roteamento.

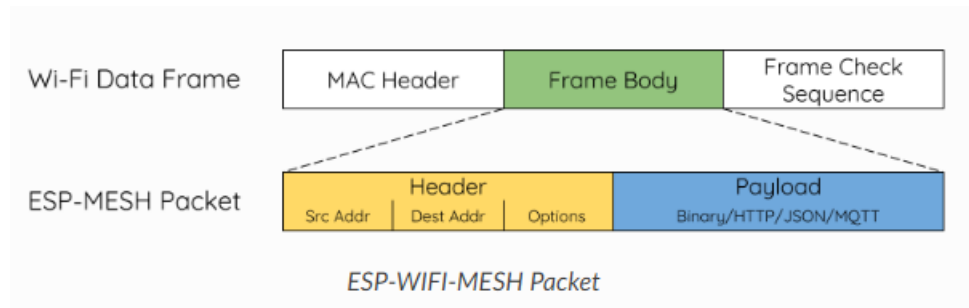


Fonte: Adaptado de (ESPRESSIF, 2022a).

2.2.1.2 Pacote ESP-WIFI-MESH

Os pacotes da rede ESP-WIFI-MESH estão totalmente contidos no corpo do *data frame* do Wi-Fi. Estes pacotes serão transmitidos através de saltos na rede *Wi-Fi* por meio de diferentes *frames*, como ilustra a figura 4.

Figura 4 – Pacote de dados.



Fonte: Adaptado de (ESPRESSIF, 2022a).

O cabeçalho, *Header*, contém o endereço MAC da origem e do destino, bem como informações de outros grupos de transmissão ou pacotes originados de redes externas. O *payload* contém os dados da aplicação, que poderão ser informações binárias ou dados codificados como HTTP, MQTT e JSON.

2.2.1.3 Desempenho

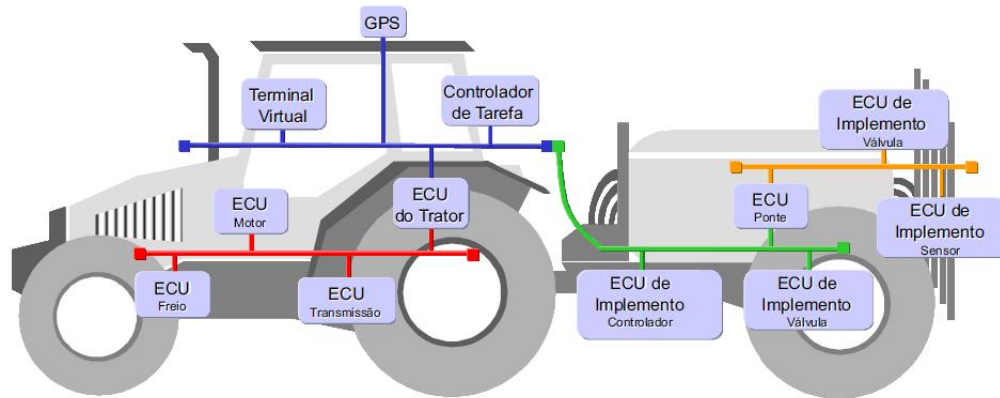
O desempenho de uma rede ESP-WIFI-MESH pode ser avaliado com base nas seguintes métricas:

- **Tempo de construção da Rede:** Tempo necessário para construir a rede do zero - < 60 segundos;
- **Tempo de cura:** Tempo necessário para a rede se recompor após haver a quebra de um dos nós - 5 a 10 segundos;
- **Latência por salto:** O tempo gasto para transmitir um dado entre nós vizinhos - 10 a 30 milissegundos.

2.3 ISOBUS

A tela ISOBUS é a interface homem-máquina mais utilizada para a comunicação entre implementos agrícolas e as ECUs presentes em um trator. Geralmente possui uma tela sensível ao toque, mas pode ter botões em alguns casos. A ISOBUS é um protocolo de aplicação que trabalha sobre o protocolo de comunicação J1939 através do meio físico de uma rede CAN. A tela ISOBUS pode possuir diversos aplicativos e funções diferentes dependendo de seu fabricante, sendo as mais importantes para o projeto em questão: o servidor controlador de tarefas com suporte a corte de seções e o servidor de terminal virtual. Através do barramento CAN e o protocolo ISOBUS, a tela se comunica com as ECUs do trator e aos implementos conectados a ele. A figura 5 ilustra o protocolo ISOBUS em um trator agrícola:

Figura 5 – Diagrama do protocolo ISOBUS.



Fonte: Adaptado de USP¹.

2.3.1 Task Controller

O servidor controlador de tarefas em um sistema ISOBUS é o responsável por enviar comandos para as ECUs dos implementos, de modo a controlar, dentre outras funções dependendo da necessidade do implemento, o acionamento das seções e *setpoint* de aplicação. O controlador de tarefas pode também monitorar as taxas de aplicação de produtos, a fim de desenhar mapas de cobertura e taxa de aplicação na interface gráfica da tela ISOBUS.

2.3.2 Terminal Virtual

O terminal virtual em um sistema ISOBUS é o responsável por exibir e controlar a interação do usuário com as diferentes interfaces homem-máquina fornecidas pelos implementos. Essas interfaces têm o objetivo de configuração de implementos, bem como de acionamento de funções específicas, e monitoramento de variáveis e valores de sensores.

2.4 Barramento CAN

CAN (*Controller Area Network*) é um protocolo de comunicação serial síncrono, especificado na norma ISO11898, a qual estabelece como a informação trafega entre os dispositivos de uma rede. Seguindo o modelo de camadas OSI, define as duas camadas mais baixas: Enlace de dados e física. Este padrão de comunicação é *carrier-sense*, isto é, o transceptor CAN simultaneamente, em que transmite uma mensagem, também monitora o barramento. É também *multiple-access*, permitindo o acesso ao barramento por todos os nós da rede, realizando detecção de colisão e arbitração por meio do campo identificador da mensagem, o qual definirá a prioridade na transmissão. Uma característica importante do barramento CAN é a lógica inversa

¹ Disponível em: <http://www.usp.br/portaliobiosistemas/?p=4823> Acesso em 14 dez. 2022

dos estados: bit 1 para sinalizar barramento livre e bit 0 para barramento ocupado (CORRIGAM, 2002)..

2.5 Protocolo J1939

O protocolo J1939 é um conjunto de padrões definidos pela SAE (Society Automotive Engineers), composto por 5 camadas do modelo de rede OSI, amplamente empregado em sistemas ISO11783 ou ISOBUS, o qual estabelece uma série de padrões para redes de dados seriais com fins de controle e comunicação em tratores e implementos agrícolas (11783, 2022).

A camada física do protocolo J1939 é definida pelo padrão CAN e descreve a interface elétrica do barramento. A camada de dados descreve as regras para construção da mensagem, acesso ao barramento e detecção de erros. A camada de aplicação define o dado específico contido em cada mensagem enviada através da rede. O J1939 utiliza o padrão de mensagem CAN estendido com 29 bits de identificação de fonte e destino (WILFRIED, 2008).

2.6 Sensor de pressão piezoresistivo

O sensor de pressão piezoresistivo consiste em um dispositivo com uma fina membrana de silício monocristalino capaz de sofrer deformações acima e abaixo. Este movimento causa uma mudança na resistividade do material semiconductor, que pode ser facilmente medida. Este tipo de sensor é amplamente utilizado nos mais variados projetos, seja em aplicações automotivas, aeroespaciais ou até medicinais (SINGH *et al.*, 2002).

2.7 Sensor de fluxo de Efeito Hall

O efeito Hall consiste no aparecimento de uma tensão elétrica, bem como uma corrente elétrica contínua, em um material condutor quando submetido a um campo magnético. A tensão do efeito Hall surge perpendicularmente à direção de condução da corrente, devido à força magnética que atua sobre a corrente em razão da manifestação do campo magnético (RAMSDEN, 2011).

Um dos sensores de fluxo que utilizam o efeito Hall como princípio de funcionamento é o de modelo YF-S201, considerado um dos dispositivos mais comuns, confiáveis, baratos e precisos, sendo utilizado em muitas aplicações de medições de fluxo de líquidos (LALNUNTHARI; THANGA, 2017).

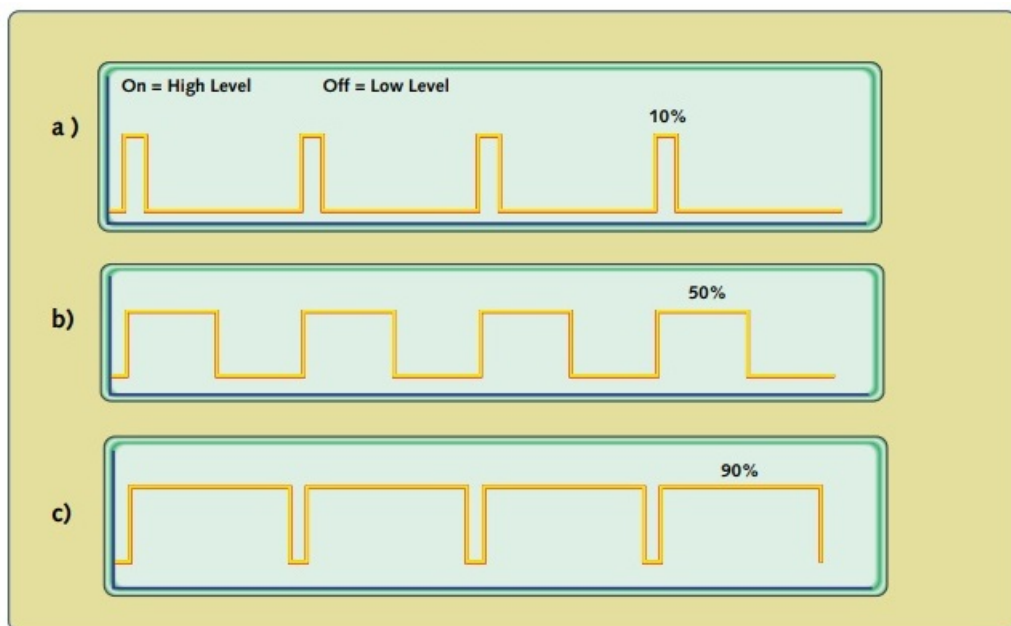
O sensor é composto por um corpo plástico com um rotor e um sensor Hall. Quando o líquido flui pelo rotor, a velocidade do rotor é alterada de forma diretamente proporcional, e o sensor Hall entrega na sua saída pulsos correspondentes ao fluxo do líquido.

2.8 Controle PWM (*Pulse Width Modulation*)

Modulação por Largura de Pulso é uma poderosa técnica de controle de circuitos analógicos por meio de um sinal digital. Esta técnica possui uma variedade de aplicações, desde medições e comunicações até controle de potência e conversões.

PWM é uma maneira de codificar digitalmente os níveis do sinal analógico através da relação entre o tempo ativo do sinal e do tempo não ativo do sinal digital (*duty cycle*) de uma onda quadrada modulante, a qual entrega para a carga analógica uma série de níveis altos e baixos (BARR, 2001).

Figura 6 – Exemplo de controle PWM.



Fonte: Adaptado de (BARR, 2001).

Observa-se na figura 6 um exemplo de controle PWM. Na situação a), caso a alimentação analógica seja de 9V e o *duty cycle* do PWM seja de 10% será percebida na carga analógica uma tensão equivalente de 0,9V.

2.9 Controle PID

O controle Proporcional-Integrativo-Derivativo é, atualmente, a estratégia de controle mais utilizada em problemas de controle de processos. Pode ser entendido como um controlador que considera o presente, o passado e futuro do erro (ARAKI, 2009).

A ação de controle proporcional-integral-derivativo combina as vantagens individuais das três ações de controle. A equação (1) representa tal controlador:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_i}{T_i} \int e(t) dt + K_d T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Função de transferência dada por:

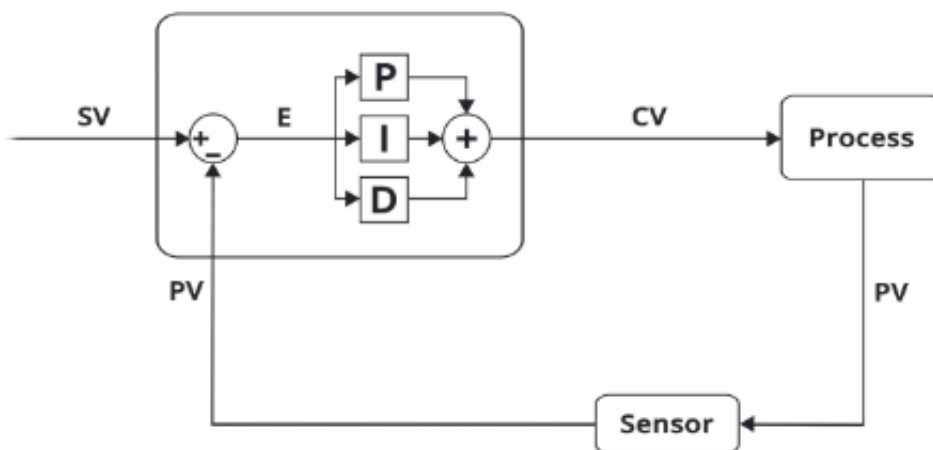
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{T_i s} + K_d T_d s \quad (2)$$

Onde K_p é o ganho proporcional; K_i o ganho integrativo e K_d o ganho derivativo (OGATA, 2011).

O termo integral oferece um erro estacionário nulo entorno do *setpoint* da variável controlada, além de filtrar ruídos de alta frequência. No entanto, oferece uma resposta lenta na correção do erro. Por outro lado, o termo proporcional responde imediatamente ao erro, mas não oferece exatidão em relação ao *setpoint*. O termo derivativo combate o problema do erro do transiente e se baseia na predição do futuro (KNOSPE, 2006).

Em termos mais simples, o controlador calcula os ganhos Proporcional (**P**), Integral (**I**) e Derivativo (**D**) e multiplica cada parâmetro pelo erro E, o que nada mais é do que a variável do processo (**PV**) menos o *setpoint* (**SV**). Então, todos os parâmetros calculados são somados e produzem a variável de controle (**CV**), conforme ilustrado na figura 7.

Figura 7 – Diagrama PID.



Fonte: Adaptado de Realpars².

Uma das grandes vantagens do controlador PID está na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle, sobretudo em projetos onde o modelo matemático da planta não é conhecido. Logo, métodos analíticos de projeto não podem ser aplicados.

² Disponível em: <https://realpars.com/pid-tuning/>. Acesso em 26 nov. 2022

Geralmente, a sintonia dos controladores PID é realizada em campo, portanto, diversos métodos de ajuste foram propostos pela literatura, como métodos de sintonia automática *on-line*, além de estruturas modificadas como I-PD ou PID com vários graus de liberdade (OGATA, 2011).

2.9.0.1 Regra de Sintonia de Ziegler-Nichols

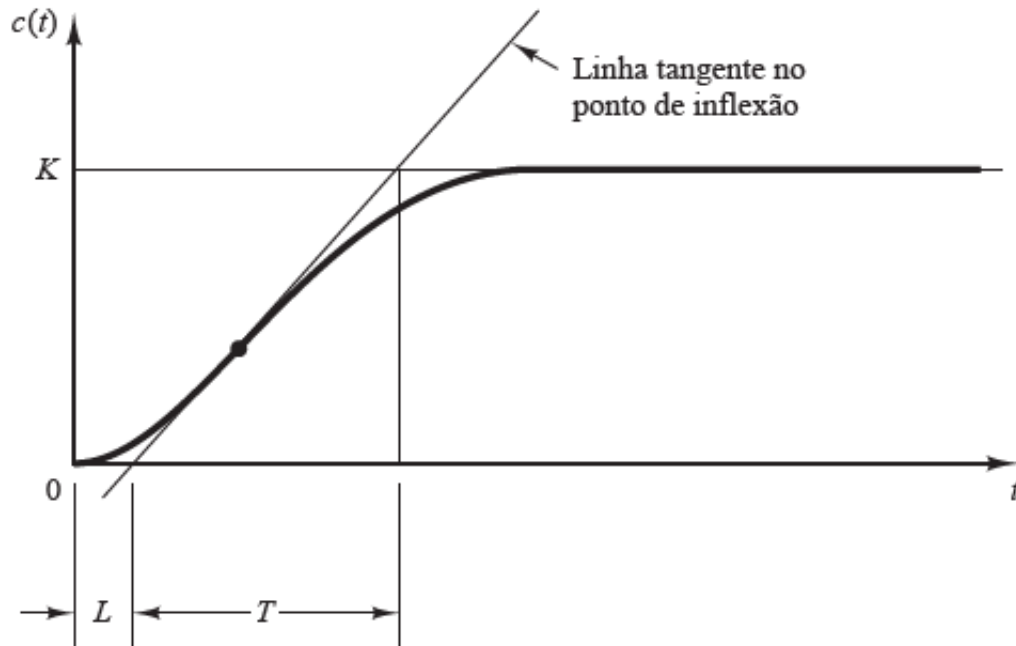
Ziegler e Nichols propuseram uma forma de ajuste de controlador PID para casos em que não é conhecido o modelo matemático da planta. Esta regra baseia-se na resposta experimental do sistema ao degrau ou no ganho proporcional K_p . Estes parâmetros de ajuste devem satisfazer à especificação de desempenho proposta pelo projeto.

O método consiste em propor um conjunto de valores para K_p , T_i e T_d , de modo que provoquem uma estabilidade do sistema, mesmo que apresente um sobressinal (*overshoot*) grande na resposta ao degrau. Estes valores de ganhos são estimativas iniciais dos parâmetros ideais, devendo ser realizado um ajuste fino para que se obtenha valores definitivos e um comportamento adequado para o projeto.

Segundo Ogata (2011, p.523), existem dois métodos de sintonia de Ziegler-Nichols:

- **Primeiro Método:** obtém-se experimentalmente a resposta ao degrau unitário da planta. Caso a curva resposta possua um formato de 'S', este método poderá ser aplicado. Este comportamento pode ser caracterizado por duas constantes: o atraso L e constante de tempo T . Estas constantes são definidas a partir da intersecção de uma reta tangente que passa pelo ponto de inflexão da curva, conforme a figura 8.

Figura 8 – Curva de resposta em forma de S.



Fonte: Adaptado de (OGATA, 2011).

O primeiro método na regra de Ziegler-Nichols sugere escolher os valores de K_p , T_i e T_d para a função de transferência do controlador da equação (2) de acordo com o quadro 1 abaixo:

Quadro 1 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau da planta (primeiro método).

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0,9T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2T/L$	$2L$	$0,5L$

Fonte: Adaptado de (OGATA, 2011).

- **Segundo Método:** O segundo método consiste em zerar o ganho integral e derivativo e aumentar o ganho proporcional, K_p até que a saída esteja em um padrão de oscilação sustentada, encontrando, assim, o ganho crítico K_{cr} e o período crítico P_{cr} . A partir deste ponto Ziegler-Nichols sugerem escolher os parâmetros do controlador conforme quadro 2 abaixo:

Quadro 2 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico (segundo método).

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$P_{cr}/1,2$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fonte: Adaptado de (OGATA, 2011).

2.10 Controle de Fluxo

O controle de fluxo é uma necessidade crítica em muitas plantas industriais. Em alguns casos, a medição precisa do fluxo é tão importante que pode fazer diferença entre prejuízo e lucro para o empreendimento. Em outros casos, uma falha na medição pode causar sérios danos e até resultados desastrosos.

A maioria dos instrumentos de medição determinam o fluxo baseado na velocidade de deslocamento do fluido ou na variação da sua energia cinética. A velocidade do líquido depende da diferença de pressão que força o fluido através do conduíte, para casos onde a seção transversal do conduíte se mantém constante. Neste caso, a velocidade média é a própria indicação da vazão (SURESH, 2014).

2.10.1 Numero de Reynolds

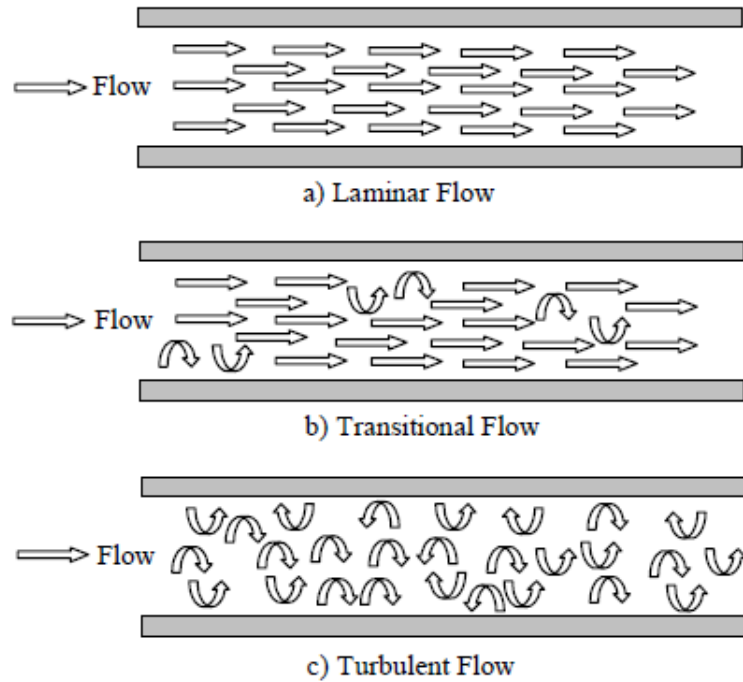
O número de Reynolds expressa uma relação entre as forças internas e as forças viscosas de um determinado fluido. Este termo serve como critério para definir o perfil de velocidade de um escoamento em uma tubulação: Laminar; Turbulento e Transitório (HUGHES, 2015). Este número pode ser expresso como se segue:

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} \quad (3)$$

Onde v é a velocidade do fluido em metro por segundo; D é o diâmetro interno da tubulação em metro; ρ é a densidade do fluido em quilograma por metro cúbico e μ é viscosidade do fluido em pascal-segundo.

O número de Reynolds é adimensional e para valores baixos, as forças viscosas predominam e as forças inerciais causa efeitos pequenos, isto é, determinam um perfil de escoamento laminar (figura 9). Para valores altos, o escoamento é turbulento, desenhando um padrão de velocidade altamente complexo em todas as direções, tendendo a desenvolver uma velocidade média em direção do fluxo.

Figura 9 – Perfis de escoamento.



Fonte: Adaptado de (HUGHES, 2015).

2.10.2 Perda de carga

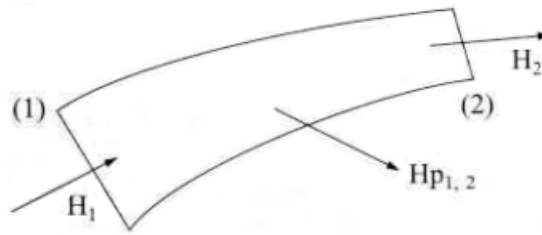
Primeiramente, "carga", representada pela letra H , pode ser expressa como a energia por unidade de peso. Como o próprio nome sugere, este termo relaciona formas de energia a qual um escoamento está submetido, logo:

$$H = \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z \quad (4)$$

Onde p/γ representa a carga de pressão; $v^2/2g$ representa a carga cinética e z a carga potencial.

Define-se perda de carga como a energia perdida por unidade de peso entre dois pontos do escoamento.

Figura 10 – Energia em fluido real.



Fonte: Adaptado de (BRUNETTI, 2008).

Conforme ilustrado na figura 10, H_1 e H_2 são denominados cargas totais e $H_{p1,2}$ é denominado perda de carga. Neste exemplo, nota-se que para um escoamento de fluido real sempre haverá decréscimo de energia no sentido do fluxo, ou seja, a carga total a montante é sempre maior que a carga a jusante. Tais perdas podem ser interpretadas como uma dissipação de energia provocada pela existência de atrito na meio que o líquido flui (BRUNETTI, 2008). Baseado no perfil de escoamento do fluido é possível classificar as perdas de carga em dois tipos:

- **Perda de carga distribuída:** Este tipo de perda ocorre em trechos de conduítes longos, pois o atrito ocorre de forma distribuída;
- **Perda de carga locais ou singulares:** Estas perdas ocorrem em locais em que o fluido sofre perturbações bruscas no escoamento, como, por exemplo: válvulas, mudanças de direção, alargamentos, etc.

2.11 Máquinas de Fluxo

Máquina de fluxo é qualquer dispositivo introduzido no escoamento de um fluido capaz de fornecer ou retirar energia do mesmo na forma de trabalho. Quando o trabalho é fornecido, esta máquina é denominada "bomba", e quando a energia é retirada, é denominada "turbina" (BRUNETTI, 2008).

Bombas são definidas como máquinas geratrizes capazes de realizar deslocamento de um líquido por escoamento. Ela transforma o trabalho mecânico que recebe da sua fonte de alimentação em energia, transmitida ao líquido em forma de energia de pressão e cinética (MACINTYRE, 1997).

A forma como é feita a transformação do trabalho em energia hidráulica e cedida ao fluido, aumentando a pressão e/ou a velocidade, permitem classificar as bombas como:

- Bombas de deslocamento positivo ou volumógenas
- Turbobombas
- Bombas especiais

Em sistemas de escoamento com bombas, a carga produzida pela mesma é proporcional à necessidade de superar a perda de carga provocada pelo sistema. A taxa de fluxo do sistema depende das características da máquina e do somatório das perdas majoritárias e minoritárias. Sendo assim, a carga produzida pela bomba não é constante e sim variável de acordo com fluxo do sistema, sendo importante realizar um ajuste na bomba para que se torne adequada ao projeto (FOX; PRITCHARD, 2010).

A presença de uma máquina de fluxo em um sistema fluídico, mais especificamente uma bomba, provoca o aumento da energia, acarretando variações na carga de pressão, carga potencial e carga cinética, conforme relação abaixo (5):

$$H_M = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (5)$$

Onde $p_2 - p_1$ representa a diferença de pressão dado em pascal; γ o peso específico dado em Newton por metro cúbico; $z_2 - z_1$ a diferença de alturas dado em metro e $v_2^2 - v_1^2$ a diferença de velocidades medidas em metros por segundo.

A potência de uma máquina pode ser escrita como:

$$N = \gamma Q H_M \quad (6)$$

Onde γ representa o peso específico do fluido; Q a vazão em volume e H_M a carga fornecida pela bomba.

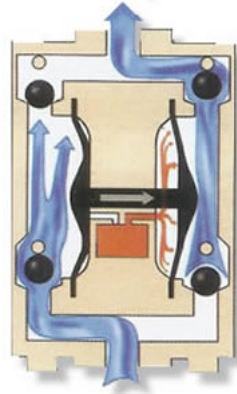
A equação da energia de um sistema fluídico considerando as perdas de carga e a presença de uma bomba pode ser escrita como:

$$H_1 + H_M = H_2 + H_{p1,2} \quad (7)$$

2.11.1 Bombas de diafragma

As bombas de diafragma (figura 11), classificada como de deslocamento positivo, funcionam pela ação de compressão de um diafragma, obtida pelo movimento alternativo de um sistema excêntrico, proveniente de uma fonte pulsativa exterior. Uma vantagem deste tipo de máquina é o fato de não haver contato com o fluido que está sendo bombeado e sistema de acionamento, eliminando riscos de vazamentos, corrosão e demais óbices.

Figura 11 – Bomba de diafragma.



Fonte: Adaptado de TECHNOPUMP ³.

2.11.2 Vazão

Segundo Brunetti (2008), define-se vazão em volume Q como o volume de fluido que atravessa uma certa seção do escoamento por unidade de tempo, conforme a equação abaixo:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (8)$$

Existe uma relação importante entre vazão em volume e a velocidade do fluido, onde a vazão Q pode ser reescrita em função da área A da seção transversal do conduíte e da distância s percorrida pelo fluido:

$$Q = \frac{sA}{t}$$

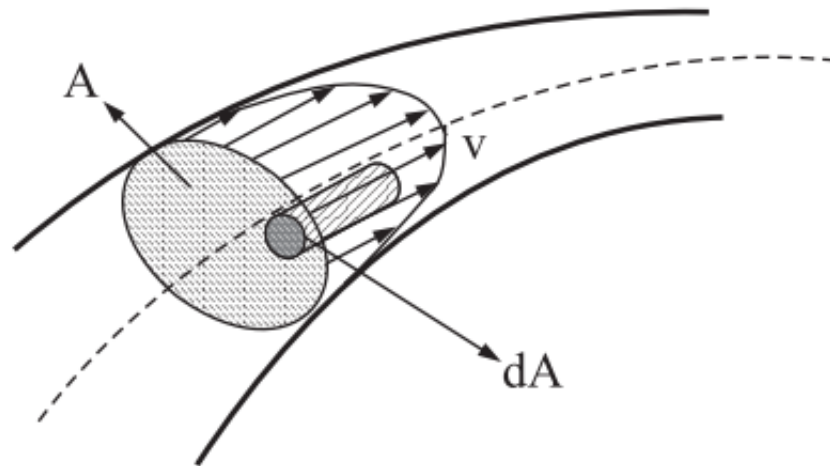
como $\frac{s}{t} = v$ então:

$$Q = vA \quad (9)$$

Sabe-se, porém, que o escoamento não é linear na maioria dos casos. Na prática, a seção não é uniforme, conforme ilustrado na figura 12.

³ Disponível em: <https://www.technopump.com.br/bomba-de-diafragma.htm>. Acesso em 26 nov. 2022

Figura 12 – Conduite não uniforme.



Fonte: Adaptado de (BRUNETTI, 2008).

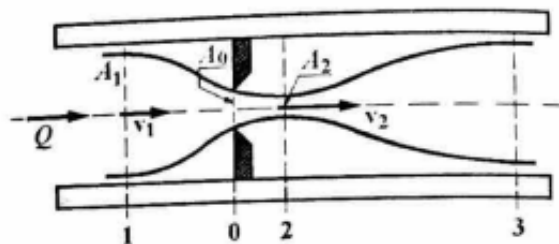
Percebe-se, portanto, que a velocidade v não é a mesma em todos os pontos da seção. Deste modo, para se obter uma relação mais adequada à prática, toma-se uma área infinitesimal da seção dA e uma velocidade genérica v , donde surge uma expressão para velocidade média:

$$v_m = \frac{1}{A} \int_A v dA \quad (10)$$

2.11.3 Pressão e vazão

Segundo Linsingen (2003), uma aplicação fundamental da equação de Bernoulli em sistemas hidráulicos, é a que permite descrever como se comporta o escoamento através de um orifício em uma canalização, construindo uma redução brusca do escoamento, conforme ilustrado na figura 13.

Figura 13 – Restrição do escoamento



Fonte: Adaptado de (LINSINGEN, 2003).

Neste tipo de escoamento, onde há uma restrição do tipo canto vivo, as linhas de corrente que convergem do orifício não retornam bruscamente à posição horizontal, mas sim gradualmente, o que permite afirmar que a menor seção do escoamento se situe um pouco após o orifício, constituindo a chamada *vena contracta* A_2 .

Aplicando a equação de Bernoulli para o sistema ilustrado, considerando que a maior variação de velocidade ocorre entre as seções 1 e 2 (logo, a maior transferência de energia) e tornando-se a área A_0 muito menor que a entrada e, $A_1 \gg A_2$, tem-se:

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \quad (11)$$

Visto que $A_1 \gg A_2$, a velocidade na entrada é muito menor que na *vena contracta*. Considerando ainda que, em regime permanente, $Q = vA$ e utilizando a equação de Bernoulli para exprimir a relação de dependência entre vazão, queda de pressão no orifício e área da *vena contracta*:

$$Q = A_2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (12)$$

Teoricamente falando, a área da seção 2 A_2 é de difícil determinação e não é considerada útil para o dimensionamento do orifício. Logo, é conveniente que a equação (12) seja escrita em função de A_0 , o que é possível utilizando-se o Coeficiente de Contração C_C , estabelecido como 0.61 para $A_0 \ll A_1$.

Além disso, em fluidos reais, o atrito faz com que a velocidade do jato na *vena contracta* seja ligeiramente inferior à estabelecida pela equação de Bernoulli. Para corrigir essa diferença, é empregado o Coeficiente de Velocidade C_V , obtido empiricamente na ordem de 0.98.

A combinação destes coeficientes recebe o nome de Coeficiente de Descarga C_d . Obtido empiricamente, este valor depende da geometria da restrição e das características do escoamento. Na prática, este coeficiente fica na faixa de 0.60 a 0.80, desde que os elementos de controle sejam considerados de canto vivo.

Desta forma, segundo Linsingen (2003), pode-se escrever a **equação da vazão**, que estabelece uma dependência da vazão em função do orifício e da queda de pressão nele:

$$Q = C_d A_2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (13)$$

2.11.4 Válvulas

Segundo Macintyre (1997, p.597), válvulas são dispositivos destinados a controlar o escoamento de fluidos em um encanamento. Existe uma grande variedade de tipos de válvulas, específicas para determinadas operações e aplicações, a depender ainda das propriedades químicas do fluido, assim como temperatura e pressão.

Tais dispositivos são generalizados para todos que atendam às definições acima, porém, a depender do autor, faz-se uma distinção entre *registros* e *válvulas*, sendo a última considerada para operações automáticas, comandadas pelo efeito de variação de pressão, vazão ou por qualquer outra razão definida no projeto. Outros autores consideram o *registro* como dispositivos operados manualmente e meramente destinados à utilização em águas potáveis.

2.11.5 Válvulas de Regulagem

São válvulas ideais para controle de escoamento devido ao estrangulamento que causam na tubulação, além de permitirem um bloqueio total do fluxo. A seguir, alguns tipos de válvula de regulagem:

2.11.5.1 Válvulas de globo

O nome segue a referência do formato do seu corpo. Possui uma haste rosqueável com alargamento para controlar a passagem de fluido pelo orifício. Podem trabalhar com vedação do orifício de passagem em qualquer posição e acarretam fortes perdas de carga, mesmo com abertura máxima. A figura 14 apresenta o diagrama de uma válvula de globo padrão.

Figura 14 – Válvula de Globo.



Fonte: Adaptado de JEFFERSON ⁴.

2.11.5.2 Válvulas de agulha

Quando uma válvula de globo possui a extremidade da haste com um formato afilado, denomina-se *válvula de agulha* (figura 15). As válvulas de agulha são muito utilizadas para uma regulagem fina de descarga (MACINTYRE, 1997).

Figura 15 – Válvula de Agulha.



Fonte: Adaptado de ISOVAL ⁵.

2.12 Motor de passo

Motores de passo preenchem um espaço único no mundo do controle por motor. Normalmente, estes motores são aplicados em impressoras e máquinas CNC. As inúmeras ca-

⁴ Disponível em: <https://www.jefferson.ind.br/conteudo/valvula-globo.html>. Acesso em 26 nov. 2022

⁵ Disponível em: <https://www.isoval.com.br/valvula-agulha>. Acesso em 26 nov. 2022

racterísticas comuns de motores de passo fazem deles ideias para estes tipos de aplicações (CONDIT RESTON; JONES, 2004). As características mais comuns são:

- **Sem escovas:** Escovas e comutadores de motores convencionais criam problemas indesejáveis como, dentre outras falhas, arcos elétricos;
- **Independentes da carga:** motores de passo rodam em velocidades determinadas pelo projeto, independente da carga acoplada, desde que não exceda sua capacidade de torque;
- **Posicionamento em malha aberta:** O rotor move-se em passos, ou seja, de maneira quantizada. Logo, é possível saber a posição do rotor a todo instante, desde que não exceda sua capacidade de torque;
- **Rotor estacionário:** capaz de manter o rotor estacionário;
- **Resposta:** resposta rápida para iniciar o movimento, parar e reverter a rotação.

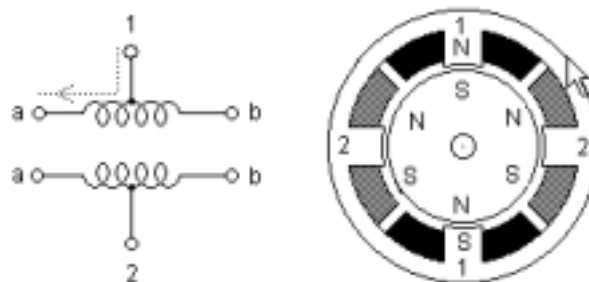
Existem três tipos básicos de motores de passo:

- **Ímã permanente**
- **Relutância variável**
- **Híbrido**

O estator, parte estacionária do motor de passo, possui múltiplos enrolamentos. Tais aspectos diferenciam os motores sob um ponto de vista elétrico. Sob a perspectiva elétrica e de controle, motores de relutância variável são distantes dos outros tipos. Ambos motores do tipo ímã permanente e híbridos podem ser construídos seja com enrolamentos unipolares, bipolares ou bifilares.

- **Unipolar:** motores unipolares (figura 16) são compostos por dois enrolamentos, cada um com um centro de derivação, e possuem de 5 a 6 fios. Neste tipo de configuração, as metades de enrolamentos são paralelas entre si, logo uma metade atua como polo norte e a outra como polo sul.

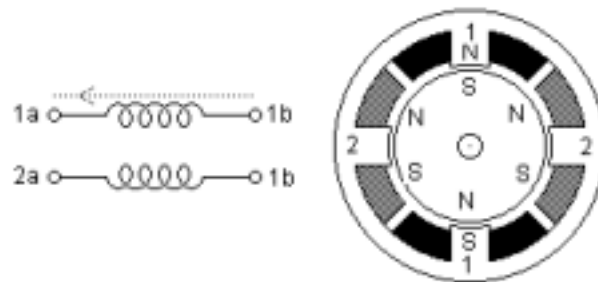
Figura 16 – Motor de passo unipolar.



Fonte: Adaptado de (CONDIT RESTON; JONES, 2004).

- **Bipolar:** motores bipolares (figura 17) são compostos por dois enrolamentos e 4 fios. Não possuem derivação central. Uma das vantagens deste tipo de motor é que produzem maior torque, quando comparado a um unipolar de mesma dimensão, uma vez a corrente flui por todo o enrolamento. Como desvantagem, este modelo requer controle mais complexos. Neste cenário, a corrente flui em ambos os sentidos do enrolamento, ou seja, é um motor bidirecional.

Figura 17 – Motor de passo bipolar.



Fonte: Adaptado de (CONDIT RESTON; JONES, 2004).

3 METODOLOGIA

3.1 Requisitos de sistema

Para alcançar o objetivo proposto, primeiro foi levantado a necessidade dos subsistemas do projeto. Uma vez que os subsistemas foram identificados, foi então analisado cada subsistema individualmente, com as suas particularidades de montagem e requisitos funcionais.

3.1.1 Válvula

Para simular um implemento agrícola, foi utilizado água como líquido do protótipo. Partindo dessa definição, primeiramente, foi necessário um mecanismo capaz de controlar o fluxo de água eletronicamente e sob demanda. Utilizando os conhecimentos adquiridos ao longo do curso da engenharia, foi escolhido desenvolver uma malha de controle utilizando a técnica PID. Para isso, é necessário controlar a variável de processo (abertura da válvula), ao mesmo tempo em que se monitora a vazão instantânea daquela válvula. Para atuador do registro, foi utilizado um motor de passo.

Desta forma, levantou-se os requisitos estruturais da válvula: um registro de água, um motor de passo acoplado ao registro, um medidor de fluxo e uma placa controladora, responsável por comunicar com a central do sistema via rede *mesh* e realizar o controle da válvula individualmente. Também foi identificado a necessidade de um sensor fim de curso para o sistema se o registro está totalmente fechado.

3.1.2 Tela ISOBUS

Toda interação do usuário é feita a partir da tela de operação ISOBUS. As funções da tela são: reportar o estado do sistema ao usuário, como, por exemplo, o estado de cada válvula, pressão do sistema e vazão atual. A tela também é responsável por coletar as informações de entrada, como *setpoints* de pressão e fluxo, e enviar para a ECU, que executa de fato os comandos necessários. Para isso, a tela deve possuir as funcionalidades necessárias para que este desenvolvimento seja possível.

3.1.3 Fluxo de água

O sistema precisa de um reservatório de água, ligado a uma bomba d'água, responsável por pressurizar a água e direcioná-la com pressão até as válvulas.

3.1.4 ECU

O sistema necessita de uma placa central de controle, que recebe os comandos do usuário via monitor ISOBUS, servindo como ponte de comunicação entre as válvulas e a tela de operação. Como o padrão ISOBUS funciona através do protocolo CAN, nessa placa de controle também é necessário ter comunicação com a interface CAN, além de comunicação via rede *mesh* com as placas de controle das válvulas. Outro requisito da ECU é manter a pressão do sistema constante, realizando a regulagem da tensão na bomba d'água através de um controle PWM.

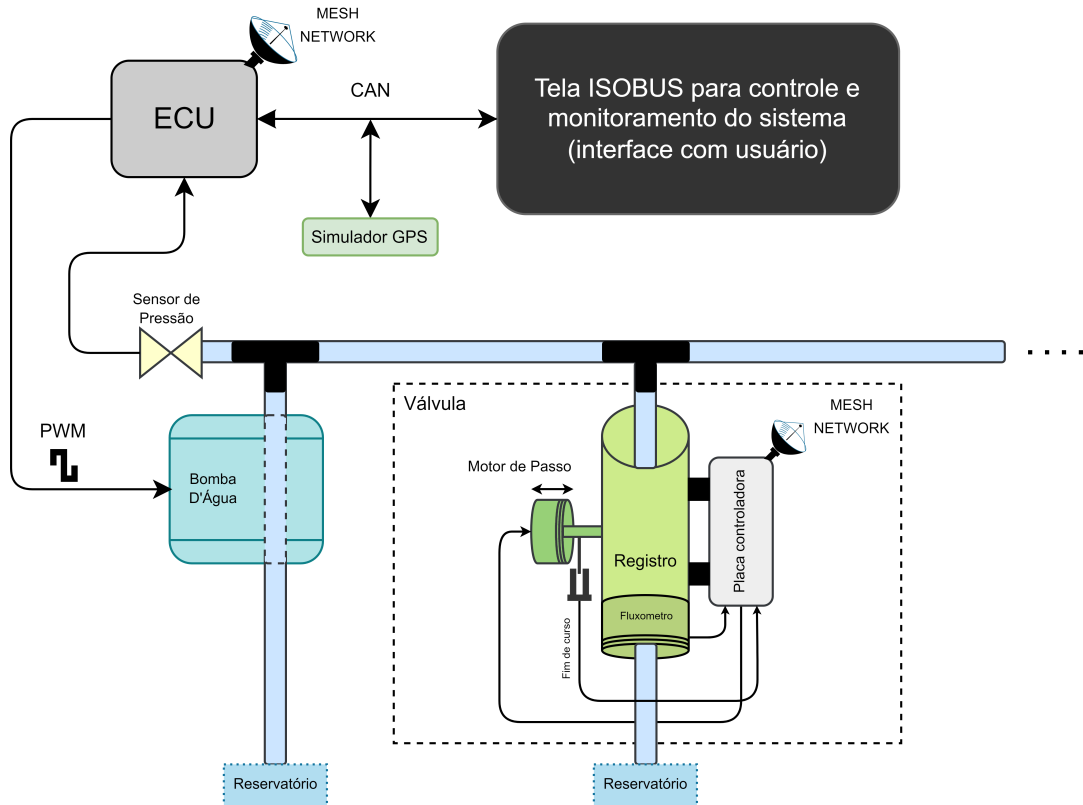
3.1.5 Simulador GPS

Foi necessário também um simulador de GPS para que a ECU e a tela ISOBUS tenham conhecimento da velocidade e da posição do trator, para fins de mapeamento da vazão em função da área.

3.1.6 Sistema proposto

A partir dos itens de requisitos, chegou-se ao sistema proposto mostrado na figura 18. O sistema na figura contém apenas uma válvula, para fins de visualização. Em um sistema real de implemento agrícola, é possível ter dezenas de válvulas. Para o nosso sistema em protótipo, serão utilizadas 4 válvulas simultaneamente, como prova de conceito.

Figura 18 – Diagrama do sistema projetado.



Fonte: Autoria própria (2022).

3.2 Hardware

Com o levantamento dos requisitos eletrônicos da ECU e da válvula, pode-se então descrever os circuitos necessários para realizar as funções propostas neste trabalho.

Para o desenvolvimento do *layout* da PCB e dos esquemáticos dos circuitos, o *software* utilizado foi o EasyEDA.

3.2.1 Alimentação do sistema

O sistema possui um cabo de alimentação que distribui a tensão de 12V para a ECU, para as placas controladoras das válvulas e também para a tela de monitoramento.

A fonte utilizada para o protótipo é uma fonte ATX (figura 19) de computador. A potência da fonte não foi uma preocupação grande, uma vez que o sistema não possui consumo elevado. A fonte utilizada possui potência de saída de 200W na alimentação de 12V, sendo mais que suficiente para operar o sistema com folga.

Figura 19 – Fonte ATX utilizada no protótipo.



Fonte: A autoria própria (2022).

Tanto a ECU quanto as placas controladoras possuem um conversor linear LM7805 para alimentar alguns sub-circuitos e também os microcontroladores.

3.2.2 Válvula

A partir das definições do item (3.1.1), foram projetados os sub-circuitos necessários para a válvula do projeto.

3.2.2.1 Microcontrolador

O microcontrolador escolhido para a válvula é o ESP32, devido ao seu poder de processamento. O ESP32 da empresa chinesa ESPRESSIF (ESPRESSIF, Shanghai, China), é um microcontrolador muito utilizado em projetos de controle, especialmente na área de IOT (*Internet Of Things*), além de outras aplicações sem fio em razão de sua robustez e confiabilidade. Ele conta com módulo *Wi-Fi* e *Bluetooth*, integrados no mesmo chip, além de uma série de outros periféricos. Além disso, o ESP32 também possui uma ampla disponibilidade de aplicações e material de pesquisa, bem como uma variedade de Kits de Desenvolvimento de *Softwares* (SDK's), preço competitivo e alto poder de processamento. Para a válvula será utilizado o kit de desenvolvimento ESP32-WROOM-32 (figura 20).

Figura 20 – ESP32 WROOM-32.



Fonte: Página de compra da Amazon⁶.

Dados técnicos: Microcontrolador de 32-Bits com dois núcleos de processamento, 520KB de SRAM, 448KB de ROM interna, e 16KB de SRAM com o RTC (*Real-Time Clock*). Frequência da CPU ajustável entre 80MHz até 240Mz. *Wi-Fi* 2.4GHz; protocolo 802.11b/g/n com taxa de bit de até 150Mbps, antena PCB integrada de saída de 20dBm. *Bluetooth* e *Bluetooth Low Energy*; periféricos como sensor Hall, sensor de toque capacitivo, *Ethernet*, SPI, UART, I2C e CAN; Tensão de entrada 3 a 3,6V e corrente mínima fornecida de 500mA (ESPRESSIF, 2022b).

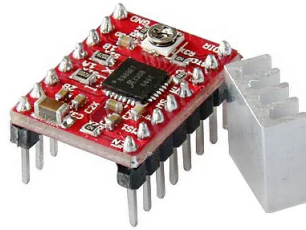
Como foi utilizado o kit de desenvolvimento, o circuito para a parte do microcontrolador é simples, pois todo o circuito auxiliar necessário para funcionamento do chip ESP32 já está presente na placa de desenvolvimento.

3.2.2.2 Controle do motor de passo

O microcontrolador do circuito da válvula deve também realizar o controle do motor de passo. Para isso, foi utilizado o *driver* A4988 (figura 21), capaz de realizar o controle de *microstepping* do motor, com acionamento por ponte H interna (ALLEGROMICROSYSTEMS, 2014).

⁶ Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/desenvolvimento-ESP-WROOM-32-processador-microcontrolador-compat%C3%ADvel/dp/B07WCG1PLV>>. Acesso em 03 dez. 2022

Figura 21 – Driver A4988 para motor de passo.



Fonte: Adaptado de ByteFlop⁷.

3.2.2.3 Sensor de fim de curso

É importante que o sistema saiba quando o registro se encontra totalmente fechado, de maneira independente ao fluxômetro, e dependente apenas à posição do motor. A solução adotada para o projeto foi o uso de um sensor fim de curso óptico, modelo TCST2103 (figura 22).

Figura 22 – Sensor fim de curso TCST2103.



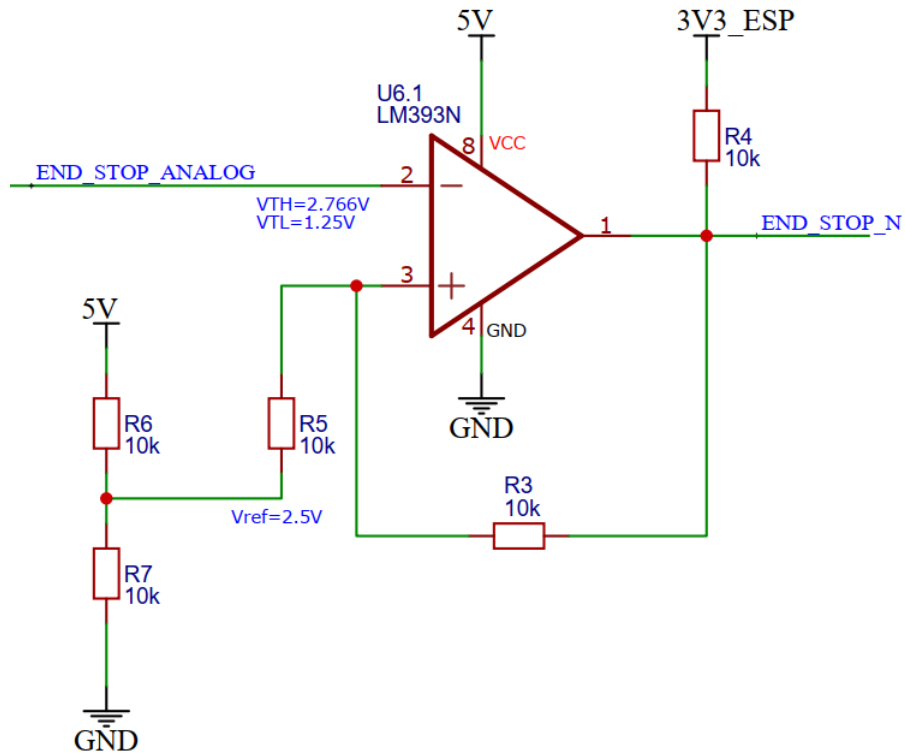
Fonte: Adaptado de AutoCoreRobotica⁸.

A saída do sensor, entretanto, é uma saída analógica que depende do nível de luz obstruída no percurso do diodo óptico. Para esta aplicação, essa saída foi convertida para digital, indicando se há ou não, presença do obstáculo. Para isso, foi ligado ao circuito do sensor óptico um comparador LM393. O circuito comparador (figura 23) também conta com realimentação positiva para efeitos histerese, a fim de evitar falsas interrupções durante o transitório.

⁷ Disponível em: <<https://www.byteflop.com.br/driver-motor-de-passo-a4988>>. Acesso em 03 dez. 2022

⁸ Disponível em: <<https://www.autocorerobotica.com.br/foto-interruptor-tcst2103>>. Acesso em 03 dez. 2022

Figura 23 – Circuito comparador de tensão.



Fonte: Autoria própria (2022).

Após medições do sensor com o osciloscópio em laboratório, observou-se que a tensão a partir de 2,5V garantia uma boa obstrução do sensor. O valor definido da histerese, através da realimentação positiva, foi de 2,766V para o limiar de ativação e de 1,25V para o limiar de desativação.

3.2.2.4 Lista de componentes

A lista completa de componentes para a montagem do hardware da válvula consta na tabela 1.

Tabela 1 – Tabela de componentes para a montagem da válvula

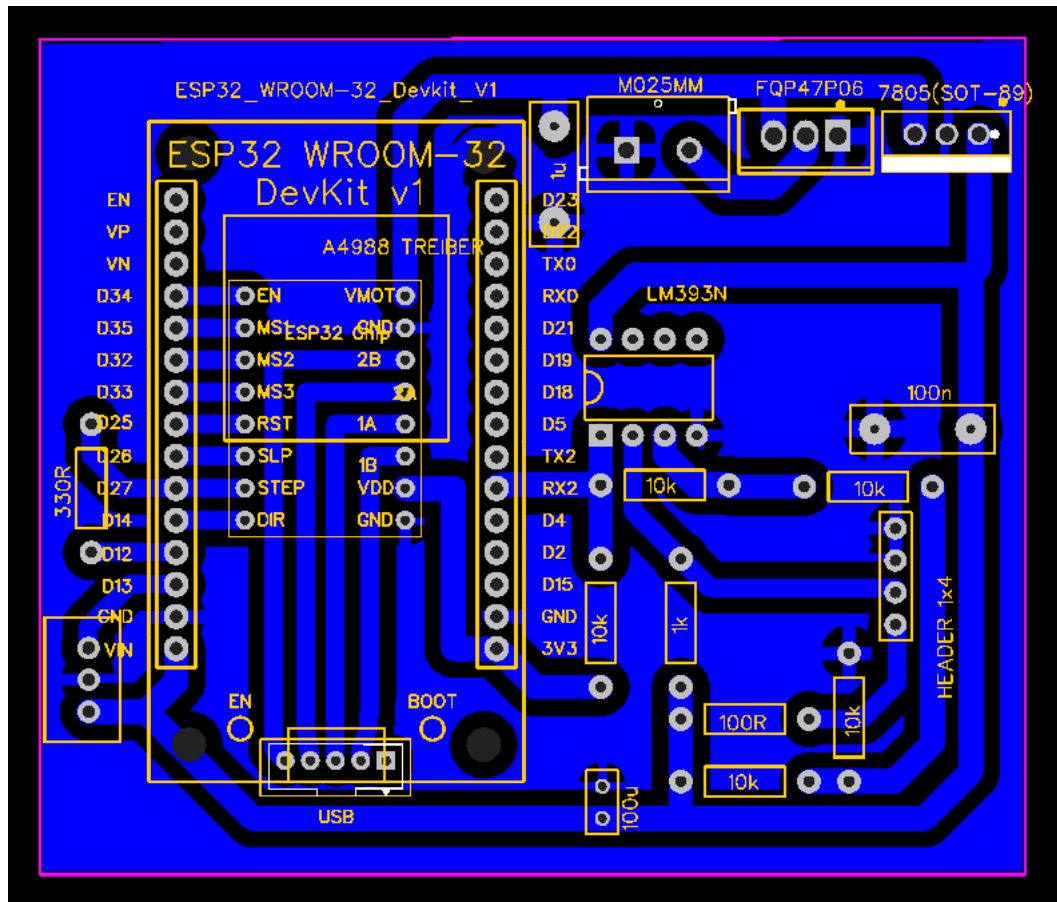
Nome	Quantidade
Capacitor 1uF	1
Capacitor 100nF	1
Capacitor 100uF	1
Header 2.54mm 1x4 macho	1
Conector JST-XH 3P	1
Borne 2.5mm	1
100 Ω	1
1k Ω	1
10k Ω	5
330 Ω	1
Regulador LM7805	1
ESP32 WROOM	1
Driver A4988	1
Conector JST-B5B-PH-KL	1
Comparador LM393N	1

Fonte: Autoria própria (2022).

3.2.2.5 Layout

O *layout* da válvula (figura 24) foi feito exclusivamente no *layer* inferior da placa.

Figura 24 – Layout do hardware da válvula.



Fonte: Autoria própria (2022).

3.2.3 ECU

A partir do item (3.1.4), foram definidas as necessidades de *hardware* da ECU.

3.2.3.1 Microcontrolador

O microcontrolador escolhido para a ECU também foi ESP32, porém, foi utilizado o kit de desenvolvimento WROVER. O kit de desenvolvimento ESP32 modelo WROVER acumula todas as características do modelo WROOM, porém disponibiliza uma maior capacidade de memória, integrando 4MB de SPI flash externa com 8MB PSRAM.

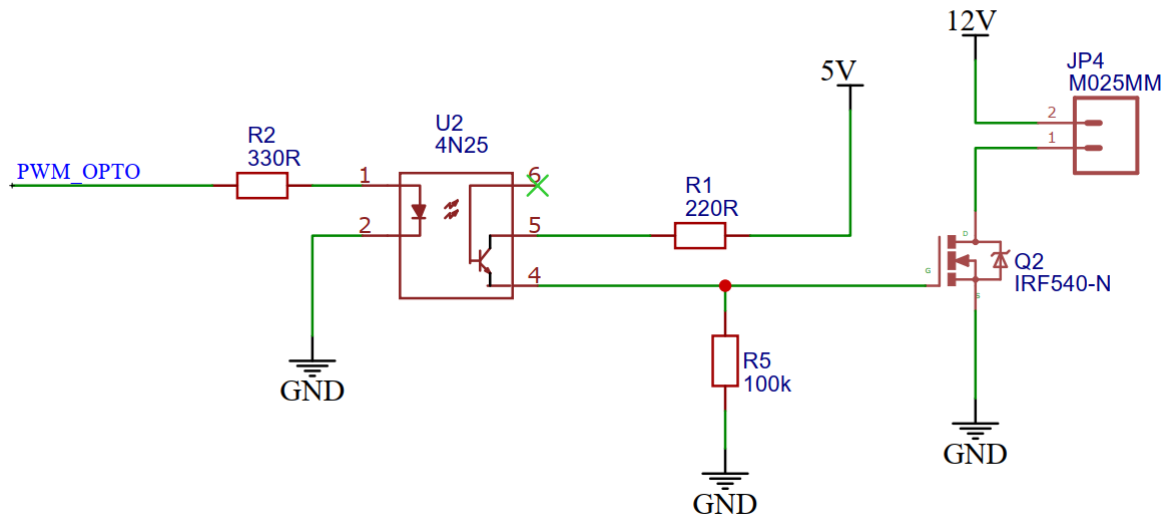
Como a ECU é responsável por gerenciar toda a rede *mesh*, e lidar com todo o protocolo ISOBUS, é interessante que ela possua uma alta capacidade de memória.

3.2.3.2 Controle de PWM

Para o controle de PWM, a solução adotada foi realizar o acionamento com transistor do tipo MOSFET, com alta capacidade de corrente e baixa resistência interna de condução.

O transistor escolhido foi o IRF540 operando em regime de chaveamento. Em conjunto com o IRF540, foi utilizado também um opto-acoplador 4N25, uma vez que a ativação no *gate* do IRF540 necessita de uma tensão maior que 4V. O opto-acoplador serve para traduzir a tensão do microcontrolador (3,3V) para uma tensão maior de ativação do IRF540 (5V).

Figura 25 – Circuito controlador PWM.

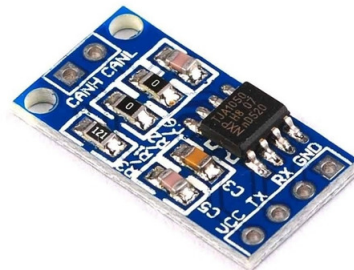


Fonte: Autoria própria (2022).

3.2.3.3 Transceiver CAN TJA1050

Apesar do ESP32 já possuir um periférico de controlador CAN, ainda é necessário transcever o barramento para o protocolo serial, por questões de compatibilidade elétrica. Para essa função, foi escolhido o transceiver TJA1050 (figura 26).

Figura 26 – Transceiver CAN TJA1050.



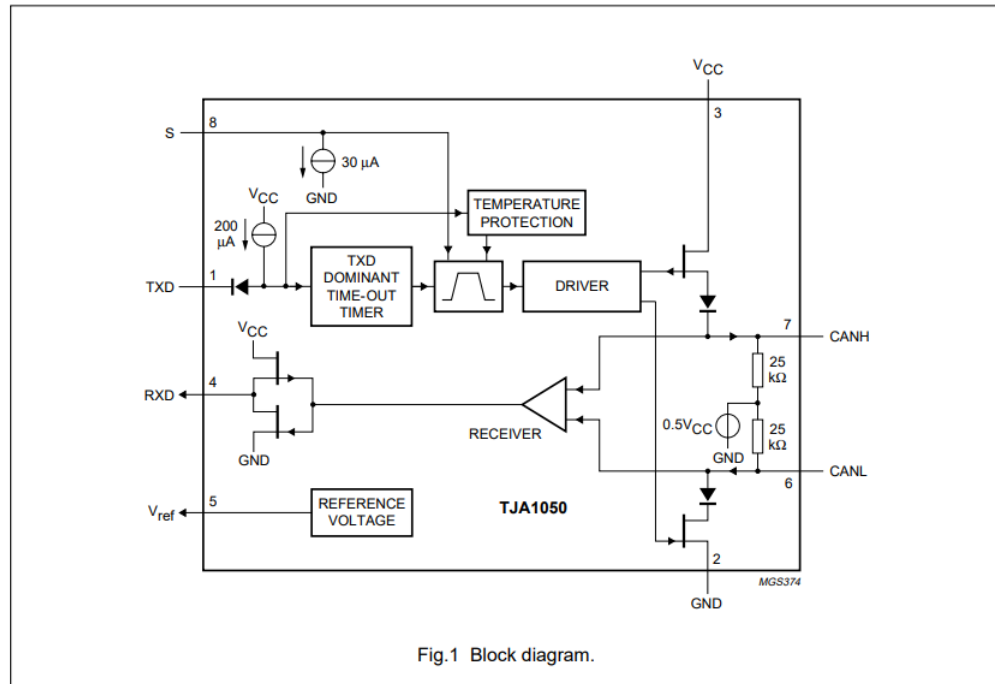
Fonte: Adaptado de AutoCoreRobotica⁹.

Na figura 27 consta o diagrama funcional do dispositivo, de acordo com o seu *datasheet*.

⁹ Disponível em: <<https://www.autocorerobotica.com.br/modulo-transceiver-can-tja1050>>. Acesso em 03 dez. 2022

Figura 27 – Diagrama funcional do *transceiver* CAN TJA1050.

BLOCK DIAGRAM



Fonte: Adaptado de NXP¹⁰.

3.2.3.4 Lista de componentes

A lista completa de componentes para a montagem da placa da ECU é apresentada na tabela 2.

Tabela 2 – Tabela de componentes para a montagem da ECU.

Nome	Quantidade
Capacitor 1uF	1
Capacitor 100nF	1
Capacitor 100uF	1
Header 2.54mm 1x3 macho	1
Borne 2.5mm	3
Transistor IRF540-N	1
Resistor 220Ω	1
Resistor 330Ω	1
Resistor 100kΩ	2
Resistor 33kΩ	1
Regulador LM7805	1
Optoacoplador 4N25	1
Conversor CAN TJA1050	1
ESP32 WROOVER	1

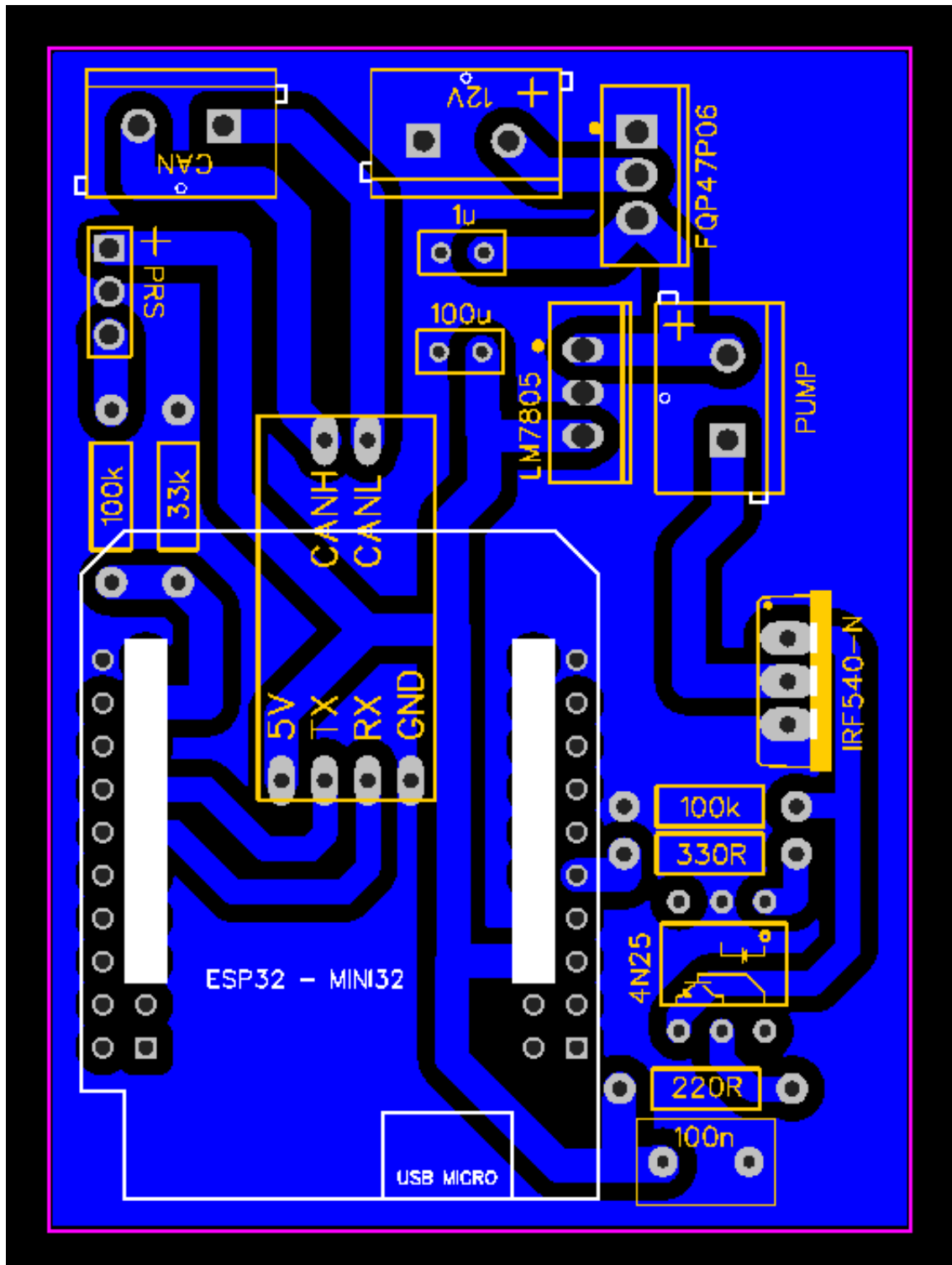
Fonte: Autoria própria (2022).

¹⁰ Disponível em: <<https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/TJA1050.pdf>>. Acesso em 03 dez. 2022

3.2.3.5 Layout

O *layout* da ECU (figura 28) foi feito exclusivamente no *layer* inferior da placa.

Figura 28 – *Layout* da placa ECU.



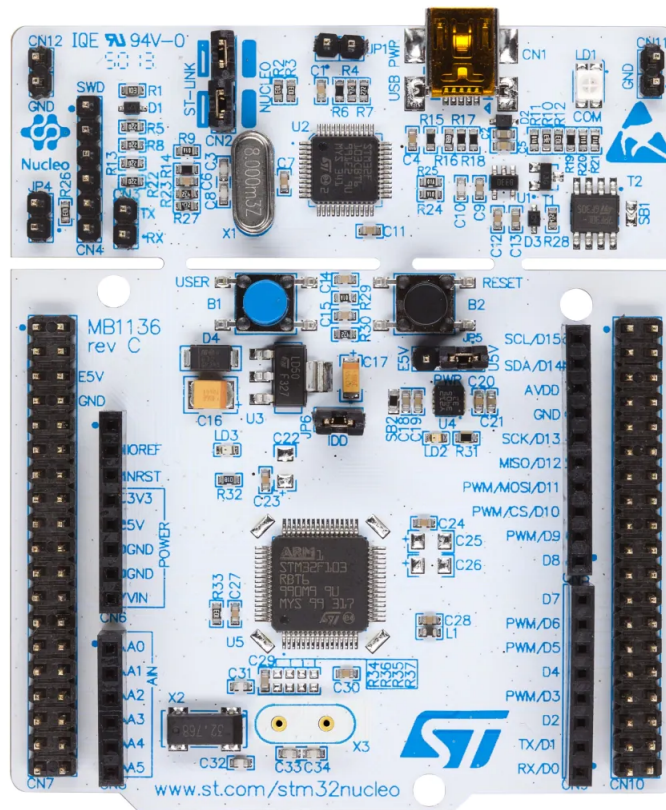
Fonte: Autoria própria (2022).

3.2.4 Simulador GPS

Para o simulador GPS, foi utilizado o kit de desenvolvimento STM32 Nucleo F302R8 (figura 29). A decisão de escolha foi por conta desse material já estar disponível no acervo dos alunos, e por ser um microcontrolador que cumpre os requisitos necessários, mas poderia ter sido escolhido uma opção mais barata e simples de microcontrolador.

O simulador é capaz de enviar dados de velocidade, direção e posição no barramento CAN, e também na porta serial. A entrada de direção e velocidade deve ser feita por dois potenciômetros distintos.

Figura 29 – STM32 Nucleo F302R8.



Fonte: Adaptado de ST¹¹.

3.2.4.1 Lista de componentes

A lista de componentes para o simulador GPS está mostrada na tabela 3.

¹¹ Disponível em: <<https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f302r8.html>>. Acesso em 03 dez. 2022

Tabela 3 – Tabela de componentes para a montagem do simulador GPS.

Nome	Quantidade
Potenciômetro 10k Ω	2
Conversor CAN TJA1050	1
STM32 Nucleo F302R8	1

Fonte: Autoria própria (2022).

3.2.4.2 Layout

Devido a baixa quantidade e simplicidade de componentes, a placa do simulador de GPS foi montada em uma placa universal perfurada.

3.3 Materiais

Aqui serão descritos os materiais utilizados para a confecção do protótipo do sistema. Os materiais escolhidos neste trabalho são materiais de fácil acesso comercializados amplamente no mercado de protótipos de eletrônica, com exceção da tela AFS PRO 700.

3.3.1 Válvula

Optou-se por confeccionar uma válvula eletrônica própria, utilizando um registro, um motor de passo, e um fluxômetro, além da parte eletrônica de controle inteligente.

3.3.1.1 Motor de Passo

Para o controle de fluxo, foi decidido por usar um motor de passo, devido ao seu preciso controle digital. O motor de passo escolhido foi o modelo 20BYJ-46 (figura 30). Esse modelo é amplamente utilizado no mercado de prototipagem de eletrônica, juntamente com o 28BYJ-48. A principal diferença entre os dois é que na versão 28BYJ-48, as bobinas são alimentadas com 5V, enquanto na versão 20BYJ-46, são alimentadas com 12V. Optou-se por utilizar o modelo 28BYJ-46 para utilizar a alimentação de 12V diretamente da fonte para o motor.

Figura 30 – Motor de Passo 20BYJ-46.



Fonte: Adaptado de MercadoLivre¹².

3.3.1.2 Registro de Gás

Para o controle do fluxo, optou-se por utilizar um registro tipo agulha convencional. Os registros tipo agulha possuem uma melhor precisão no controle de fluxo, como já discutido anteriormente.

3.3.1.3 Acoplador

Foi utilizado um acoplador flexível (figura 31) para acoplar o registro de gás ao motor de passo.

Figura 31 – Acoplador flexível 5x8.



Fonte: Autoria própria (2022).

3.3.1.4 Fluxômetro

O fluxômetro escolhido foi o sensor de fluxo YF-S401 (figura 32). O YF-S401 opera em uma tensão de 5V e gera como saída um pulso de frequência correspondente à vazão do líquido, seguindo a equação (14). O fluxo máximo é de 5L/min, e pressão máxima de 1,75MPa,

¹² Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1885095363-motor-12v-ar-condicionado-flap-encoder-aletas-20byj46-_JM> . Acesso em 26 nov. 2022

de acordo com as informações disponíveis no *datasheet*¹³.

$$F = (98 \times Q) \quad (14)$$

Figura 32 – Fluxômetro YF-S401.



Fonte: A autoria própria (2022).

3.3.1.5 Lista de materiais

Na tabela (4) encontram-se os materiais utilizados para uma unidade de válvula confeccionada.

Tabela 4 – Tabela de materiais para a válvula

Material	Quantidade
Motor de Passo 20BYJ-46	1
Registro de gás tipo agulha (espigão 1/4")	1
Fluxometro YF-S401	1
Acoplamento Flexível 5x8mm	1
Tábua de Madeira MDF	1
Placa de controle	1

Fonte: A autoria própria (2022).

3.3.2 Sistema hidráulico macro

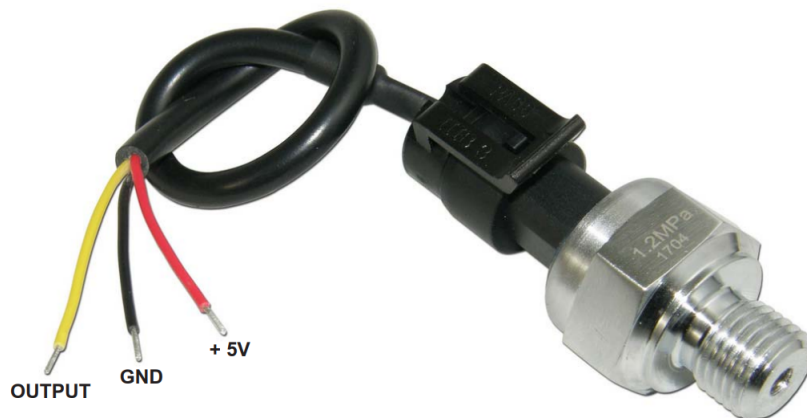
Para as demais partes hidráulicas do sistema, foram identificados os materiais a seguir para cumprir os requisitos de projeto.

¹³ Disponível em <<https://www.epitran.it/ebayDrive/datasheet/YF-S401.pdf>>. Acesso em 28 nov. 2022

3.3.2.1 Sensor de pressão

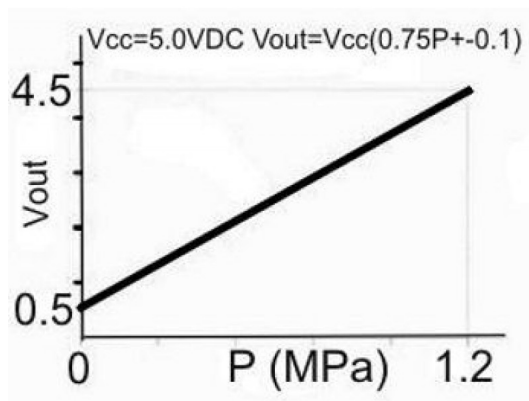
O sensor de pressão escolhido para o projeto foi o transdutor de pressão HK1100C (figura 33). Possui intervalo de medição entre 0 a 174 PSI, que condiz com a bomba d'água utilizada. O transdutor converte pressão em um valor de tensão correspondente, de maneira linear, que corresponde à curva na figura 34.

Figura 33 – Sensor de pressão HK1100C.



Fonte: Adaptado de isweek.com¹⁴.

Figura 34 – Curva de conversão do sensor HK1100C.



Fonte: Autoria própria (2022).

¹⁴ Disponível em: <<https://www.isweek.com/Uploads/20171010/59dc31481d5fc.pdf>>. Acesso em 26 nov. 2022

3.3.2.2 Bomba D'Água

Para pressurizar o sistema, a bomba 12V modelo CF-2201A (figura 35) atua em conjunto com a ECU para manter a pressão constante.

Figura 35 – Bomba de água CF-2201A.



Fonte: Adaptado de MercadoLivre¹⁵.

3.3.2.3 Materiais diversos

Também foram utilizados alguns outros materiais genéricos ao longo da prototipagem do sistema, como, por exemplo, adaptadores de mangueira, fita veda rosca.

3.3.3 Lista de materiais

Na tabela 5 constam os materiais da parte hidráulica do sistema.

¹⁵ Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1176881525-bomba-dagua-solar-alta-presso-12v-110-psi-a-mais-forte-_JM>. Acesso em 26 nov. 2022

Tabela 5 – Tabela de materiais que compõe o sistema hidráulico.

Material	Quantidade
Sensor de pressão HK1100C	1
Bomba D'Água CF-2201A	1
União Tipo T para Mangueira 1/4"	5
Tábua de Madeira MDF (2m)	1
Mangueira 1/4"(10m)	1

Fonte: Autoria própria (2022).

3.3.4 Monitor AFS Pro 700

O monitor AFS Pro 700 da Case IH (figura 36), é um computador de bordo utilizado em máquinas agrícolas. Com um display de 10,4 polegadas, tela colorida, touchscreen e compatível com o padrão ISOBUS, este monitor pode ser utilizado para controle de implementos agrícolas. O equipamento foi emprestado por uma empresa, em parceria com os alunos, para auxiliar no desenvolvimento do trabalho.

Figura 36 – Tela AFS Pro 700 na configuração de colheitadeira.



Fonte: Adaptado de CaseIH (2017).

3.4 Firmware

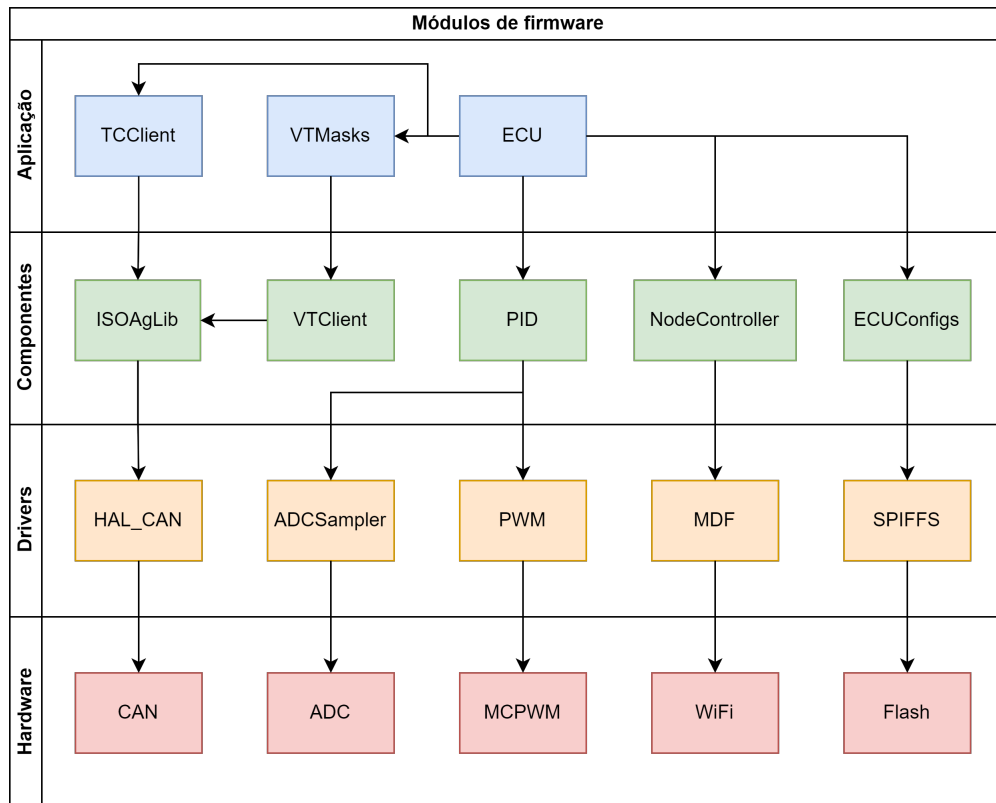
Para o desenvolvimento dos programas embarcados no hardware da ECU e da válvula, foi utilizada a IDE (*Integrated Development Environment*) gratuita *Visual Studio Code*, juntamente com o *software* adicional para a mesma, necessário para a compilação de binários para os microcontroladores utilizados, fornecido pela própria fabricante dos processadores (Espressif), e os pacotes de desenvolvimento de *firmware* ESP-IDF (*Espressif IoT Development Framework*) e ESP-MDF (*Espressif Mesh Development Framework*).

A fim de que a ECU e as válvulas possam desempenhar diversas funções de maneira ágil e eficiente, a utilização de um sistema operacional de tempo real se torna indispensável. Um sistema como esse permite ao processador executar vários trechos de código diferentes em rápida sucessão, de forma em que aparentam executar em paralelo em uma escala de tempo de segundos. Visto que o microcontrolador utilizado possui dois núcleos de processamento, a coordenação destes núcleos para o acesso aos recursos compartilhados, como periféricos e memória RAM, é crítica para o bom funcionamento do sistema, e um sistema operacional embarcado é capaz de prover ferramentas como semáforos para auxiliar nesta questão. O pacote ESP-IDF inclui o sistema operacional de tempo real FreeRTOS, e portanto este foi o sistema utilizado no desenvolvimento dos *softwares* embarcados para este trabalho.

3.4.1 ECU

Os principais blocos funcionais que compõem o código da ECU estão dispostos na figura 37.

Figura 37 – Diagrama de blocos funcionais do código da ECU.



Fonte: Autoria própria (2022).

Seguindo a sequência da figura 37, na camada de aplicação, temos três principais blocos. O primeiro deles, nomeado TCClient, implementa o cliente do *Task Controller*, definido pelo padrão ISOBUS. Esse cliente é responsável por tratar os comandos vindos do *Task Controller Server*, rodando dentro da tela ISOBUS, bem como configurar e monitorar o estado do implemento ao nível das variáveis definidas por esse padrão, como o descritor do implemento, que contém as informações de geometria, como a distância da barra de pulverização do engate do trator e largura de cada faixa de pulverização, e capacidades do dispositivo, como o número de seções controláveis e o *setpoint* de aplicação de produto.

O próximo bloco de aplicação, chamado VT Masks, refere-se ao conjunto de telas (ou máscaras na nomenclatura da ISOBUS) que compõem a interface gráfica exibida ao usuário pela tela ISOBUS, através do terminal virtual, responsável pelo tratamento de eventos como o pressionar de um botão na interface, ou a digitação de um novo valor em um campo editável. Por último na camada de aplicação encontra-se o bloco ECU. Este é encarregado da inicialização de todos os demais componentes, e do monitoramento dos estados e configurações do sistema como um todo.

Em verde estão representados os componentes intermediários do código, também chamados de *middlewares*, implementam funcionalidades comuns do sistema, no sentido de que

não estão diretamente ligados a aplicação específica do mesmo. A ISOAgLib¹⁶ é uma biblioteca de código aberto que surgiu com o intuito de fomentar o desenvolvimento de novos produtos em conformidade com o padrão ISOBUS, e foi utilizada no código para gerenciar toda a carga de trabalho necessária para manter as comunicações com outros dispositivos ISOBUS no barramento CAN pelo protocolo J1939, como, por exemplo, com o monitor ISOBUS utilizado. Ela também oferece interfaces que facilitam a implementação do cliente do controlador de tarefas e também do cliente do terminal virtual e as suas máscaras. O bloco intitulado VTClient é responsável pelo controle de qual tela está sendo exibida no momento no terminal virtual da tela ISOBUS, repassando os comandos entre a implementação da máscara ativa e a ISOAgLib.

Como o próprio nome já deixa claro, o componente PID é o que implementa o cálculo e gerencia as variáveis necessárias para o controle PID de um processo, nesse caso a pressurização constante do fluido no sistema de pulverização. NodeController é o bloco que cuida da conexão e gerenciamento da distribuição de comandos para as válvulas conectadas através da rede *mesh*, guardando informações de cada uma como seu *setpoint* e valor medido atual. Todas as configurações não voláteis, como os valores dos *setpoints* imputados pelo usuário no sistema, bem como os parâmetros de *tuning* do PID das válvulas e da malha de controle de pressão, são conduzidas pelo módulo ECUConfigs.

No nível de *drivers*, temos em destaque o HAL_CAN, camada de abstração que adapta a interface da ISOAgLib ao *hardware* do microcontrolador utilizado. O ADCSampler que fornece acesso facilitado ao ADC do microcontrolador, realizando a leitura por DMA (*Direct Memory Access*) do periférico e então calculando automaticamente a média de centenas de amostras a fim de evitar ruído de alta frequência no sinal. A implementação do controle PWM é abstraída pelo bloco de *driver* de mesmo nome. O MDF foi considerado como um *driver* do sistema por ser encarregado de todo o gerenciamento da conexão de rede *mesh* nas camadas mais baixas de acesso ao meio e transporte de dados. A SPIFFS é um *driver* de sistema de arquivos que pode ser utilizado para gerenciar facilmente o uso da memória flash interna do processador como armazenamento de dados.

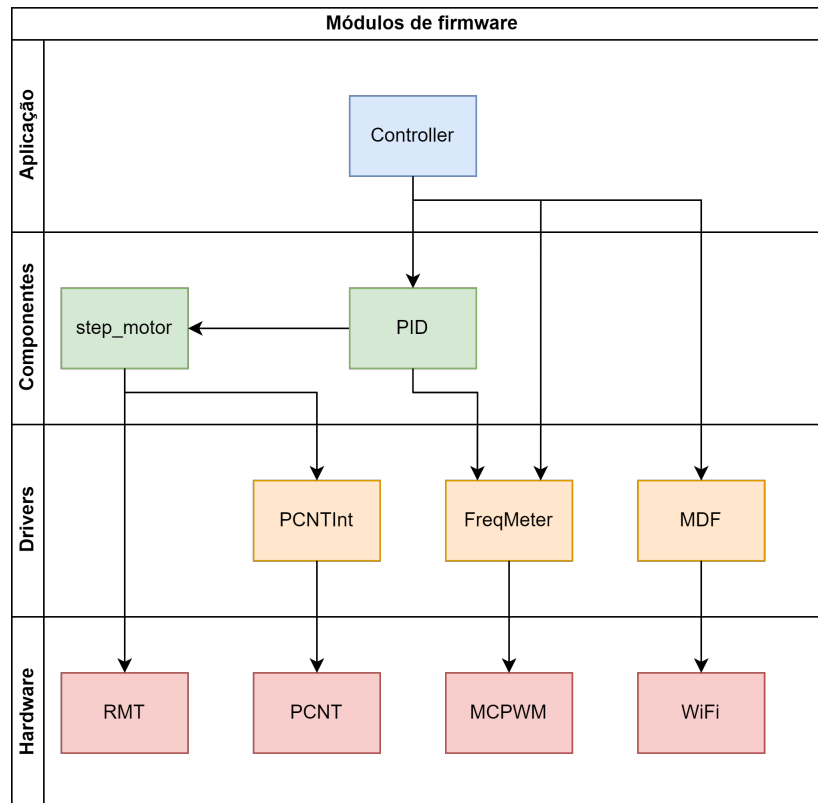
Por último temos a camada de *hardware*, ilustrando os periféricos do processador, que são controlados por cada um dos respectivos *drivers*, que por sua vez, são utilizados pelos *middlewares* e que fornecem as funcionalidades necessárias ao código de aplicação.

3.4.2 Válvulas

Os principais blocos funcionais que compõem o código das válvulas estão dispostos na figura 38.

¹⁶ Disponível em <https://github.com/Meisterschulen-am-Ostbahnhof-Munchen/ISOAgLib>

Figura 38 – Diagrama de blocos funcionais do código das válvulas.



Fonte: Autoria própria (2022).

Por desempenhar uma função mais específica de controle de acionamento de atuador e leitura de sensor, além da comunicação na rede *mesh*, o *firmware* das válvulas é mais simples do que o da ECU, possuindo apenas um componente de aplicação chamado Controller, responsável por todo o tratamento de comandos vindos da ECU, como o gerenciamento de variáveis e inicialização dos demais componentes.

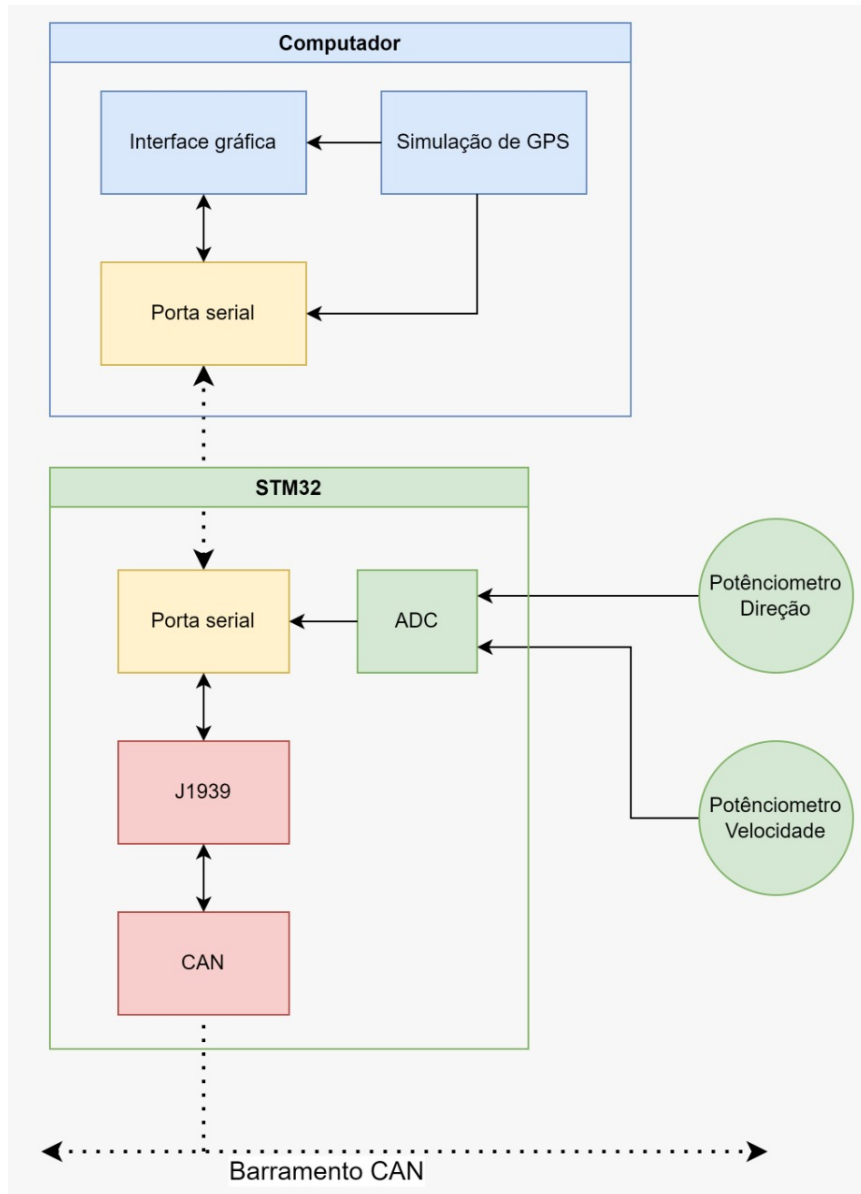
Na camada de *middlewares*, temos o mesmo componente PID já mencionado na descrição do código da ECU, mais um bloco *middleware* que também faz papel de *driver* chamado *step_motor*, sendo capaz de acionar um motor de passo por meio de dois periféricos do processador, um para gerar os pulsos de controle, e outro para contabilizar os passos automaticamente.

O bloco *step_motor* também desempenha o papel de *driver* para o periférico RMT, configurando-o de acordo para que gere pulsos de step automaticamente. Já o *driver* PCNTInt, configura o periférico contador de pulsos PCNT para gerar interrupções após detectar que o sinal de step já produziu o número configurado de pulsos, e também é utilizado como referência da posição atual do motor a partir do fim de curso. Para a medição de frequência, o bloco FreqMeter configura o periférico de controle PWM (MCPWM) para o modo de captura de largura de pulsos, fornecendo também uma média das últimas dezenas de medidas de largura de pulso, proporcionando precisão de tempo, e por consequência de frequência, na escala de micro-segundos.

3.4.3 Simulador de GPS

Os principais blocos funcionais que compõem o código do *software* simulador de GPS e do *firmware* do microcontrolador estão dispostos na figura 39 abaixo.

Figura 39 – Diagrama de blocos funcionais do *software* do simulador de GPS.



Fonte: Autoria própria (2022).

O *software* do computador foi adaptado de um projeto de código livre destinado ao piloto automático de tratores chamado AgOpenGPS¹⁷, é responsável por apresentar uma interface gráfica amigável, com uma visualização espacial do trator e do implemento acoplado em um mapa virtual, tendo a capacidade de marcar no mesmo os locais onde o implemento pulverizou o solo. Com base nos dados de aceleração e ângulo do volante, enviados através da porta serial

¹⁷ Disponível em <https://github.com/farmerbriantee/AgOpenGPS>

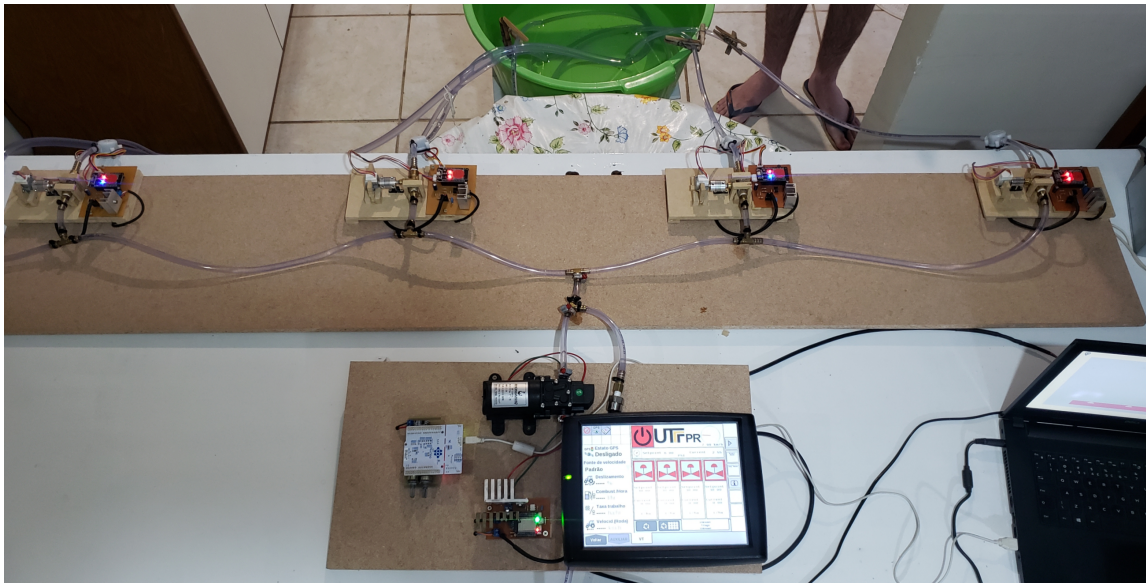
pelo *firmware* rodando no STM32, o computador calcula o vetor de direção e as respectivas coordenadas e velocidade atuais do trator simulado, devolvendo essas informações através da porta serial para o *firmware*, que as formata no protocolo J1939 e repassa para o barramento CAN. A informação de aceleração e ângulo do volante são coletadas pelo do periférico de ADC do microcontrolador, a partir de dois potenciômetros.

4 RESULTADOS

4.1 Visão geral de montagem

A figura 40 mostra a visão geral de montagem, após a conclusão do protótipo.

Figura 40 – Visão geral do sistema.

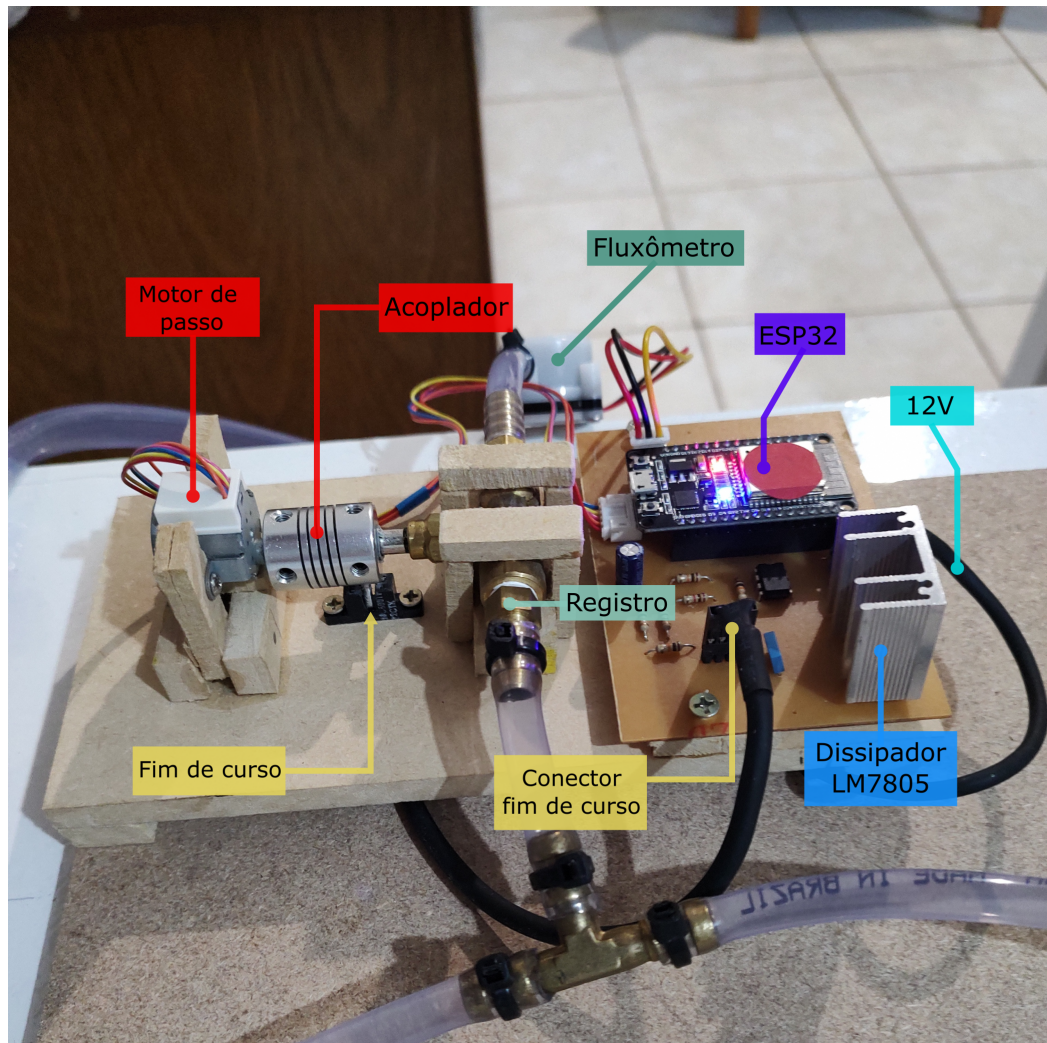


Fonte: Autoria própria (2022).

4.1.1 Válvula

A válvula foi montada utilizando peças de madeiras para fixação de alguns materiais. O ajuste preciso, principalmente do posicionamento do motor de passo e do fim de curso, é essencial para o funcionamento correto do sistema, uma vez que a resposta do controle de fluxo possui uma dependência direta com a integridade mecânica.

Figura 41 – Descrição dos componentes da válvula montada.

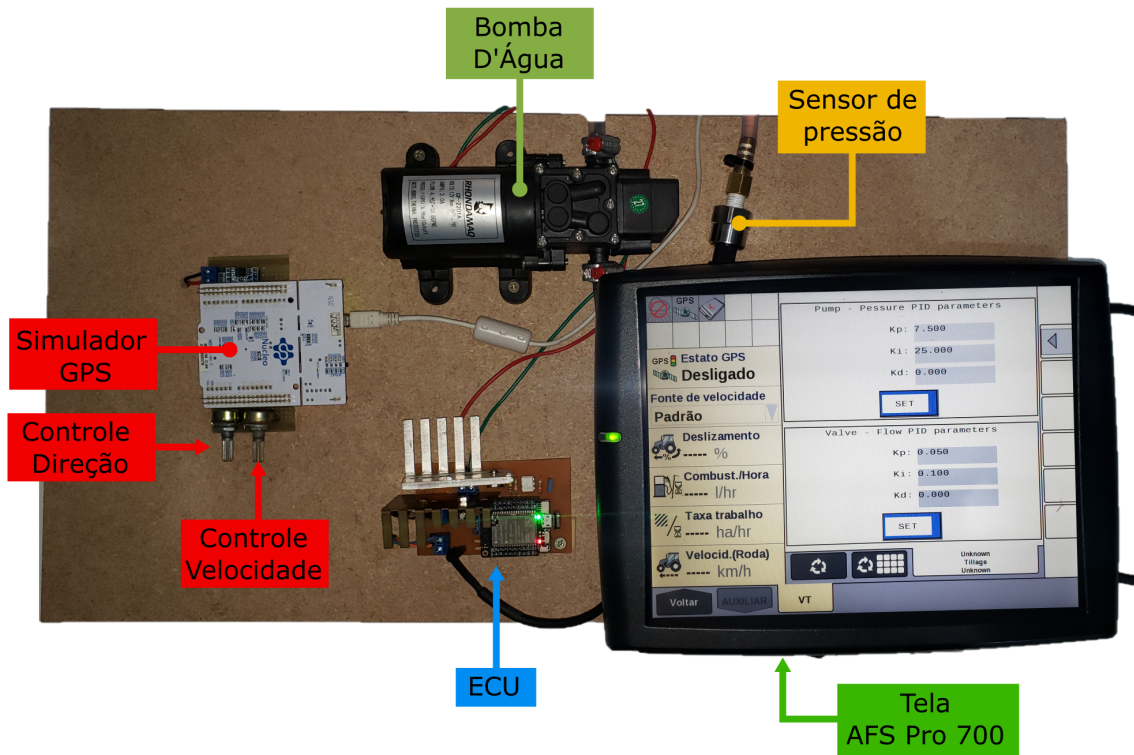


Fonte: Autoria própria (2022).

4.1.2 Controle

A montagem de alguns itens foi realizada de maneira conjunta, compondo uma seção de controle e interação do usuário. Essa seção inclui: bomba d'água, simulador GPS, ECU, tela e sensor de pressão, como mostra a figura 42.

Figura 42 – Descrição da seção de controle.

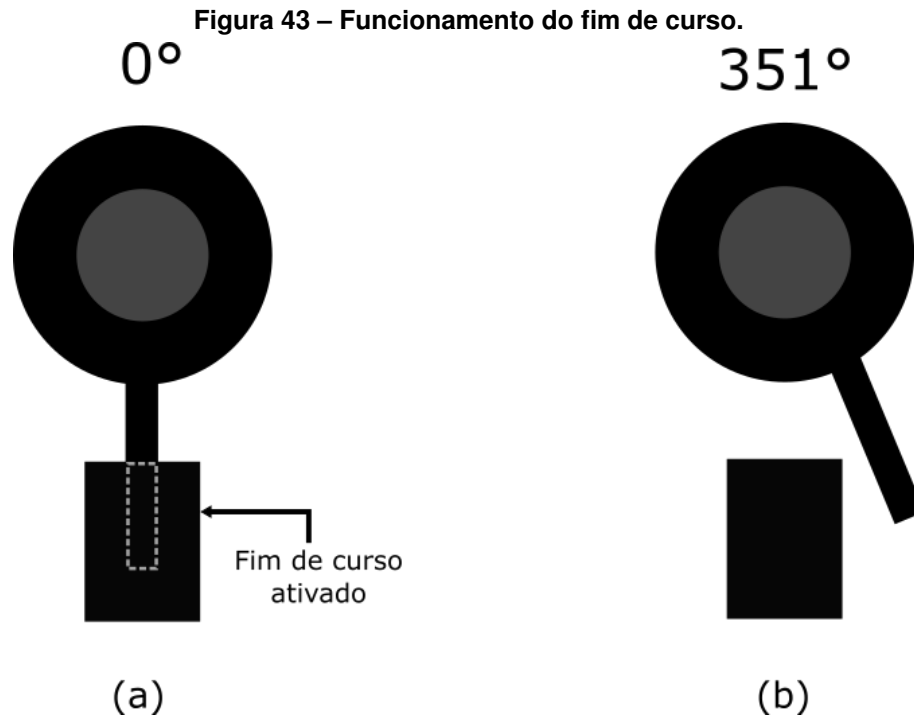


Fonte: Autoria própria (2022).

É nessa seção que o usuário pode interagir com o simulador, controlando velocidade e direção através dos potenciômetros, e pode também interagir com o monitor AFS Pro 700, permitindo que algumas ações sejam executadas pelo sistema.

4.2 Fim de curso

O fim de curso foi implementado limitando o motor para exercer no máximo 351° devido a forma como a detecção de fim de curso foi concebida. Como foi observado na prática que o registro abre por inteiro com uma volta e meia, ou seja, 540° , essa limitação foi tolerada, uma vez que não teria um impacto grande no funcionamento do sistema e não iria prejudicar os objetivos almejados, implantando apenas uma limitação métrica de vazão.



Fonte: Autoria própria (2022).

Na figura 43, a letra (a) está representando o motor em sua posição inicial, que é a válvula totalmente fechada.

Ao ligar a válvula, antes mesmo dela se conectar na rede *mesh*, os motores de passo são comandados a fechar o registro até que se encontre o fim de curso. A partir deste momento, o *firmware* sabe a referência de posição e o sistema pode operar corretamente.

Existe então uma limitação por *software* do quanto o motor pode girar, representado na figura 43 (b), totalizando aproximadamente 351°, ou então 2000 passos do motor, para que haja a ativação do fim de curso apenas na posição de registro fechado, não confundindo o referencial do sistema.

4.3 Controle PID

Para o ajuste dos parâmetros de controle PID, uma técnica inspirada no segundo método de Ziegler-Nichols, discutido na subseção 2.9.0.1, foi empregada. Os parâmetros eram inseridos no sistema através de uma interface gráfica no terminal virtual da tela ISOBUS, para agilizar o processo de sintonia, e então aplicados ao sistema, observando-se as características de *overshoot* e tempo de acomodação a cada iteração, realizando ajuste fino dos ganhos de acordo.

A execução do cálculo da variável de controle por PID é feita a cada 200 milissegundos, com uma implementação na linguagem de programação C++, como mostra a listagem 1. Esta abordagem foi utilizada, pois apresenta bom desempenho sem comprometer a precisão dos resultados.

Listagem 1 – Implementação PID.

```

1  double PIDImpl::calculate( double setpoint , double pv )
2  {
3      // Calculate error
4      double error = setpoint - pv;
5
6      // Proportional term
7      double Pout = _Kp * error;
8
9      // Integral term
10     _integral += error * _dt;
11     double Iout = _Ki * _integral;
12
13     // Derivative term
14     double derivative = (error - _pre_error) / _dt;
15     double Dout = _Kd * derivative;
16
17     // Calculate total output
18     double output = Pout + Iout + Dout;
19
20     // Restrict to max/min
21     if( output > _max )
22         output = _max;
23     else if( output < _min )
24         output = _min;
25
26     // Save error to previous error
27     _pre_error = error;
28
29     return output;
30 }

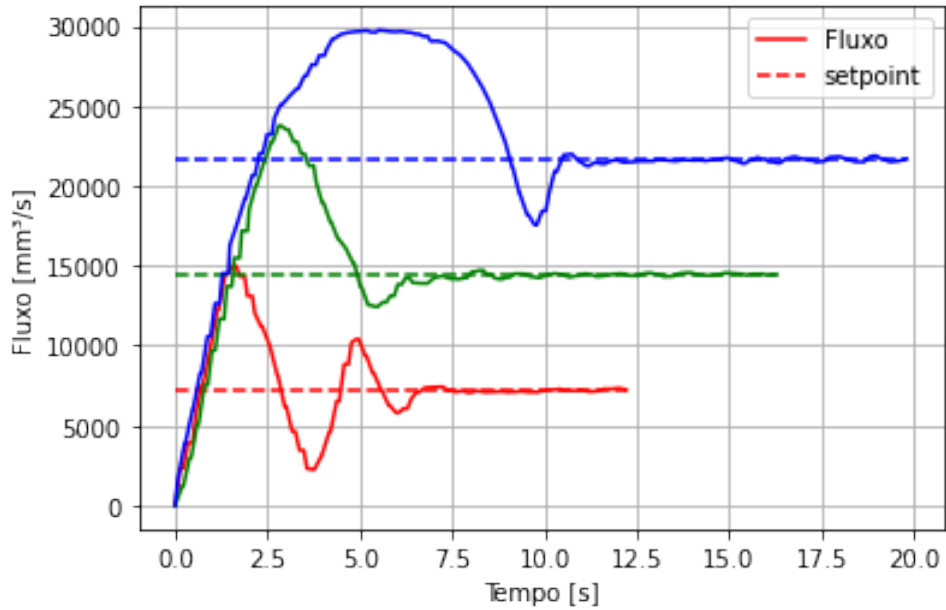
```

Fonte: Github¹⁸.

Foram executados vários testes de resposta do sistema a situações que simulam a utilização real, bem como casos de cenários desfavoráveis. O primeiro cenário seria a abertura de uma única válvula a partir da posição completamente fechada. Este caso é considerado desfavorável, pois é quando ocorre a maior pressão no sistema, tornando a resposta de fluxo à abertura da válvula muito rápida. O gráfico 1 mostra a resposta do fluxo ao longo do tempo nessa situação, para diferentes valores de *setpoint*.

¹⁸ Disponível em: <<https://gist.github.com/bradley219/5373998>>. Acesso em 26 nov. 2022

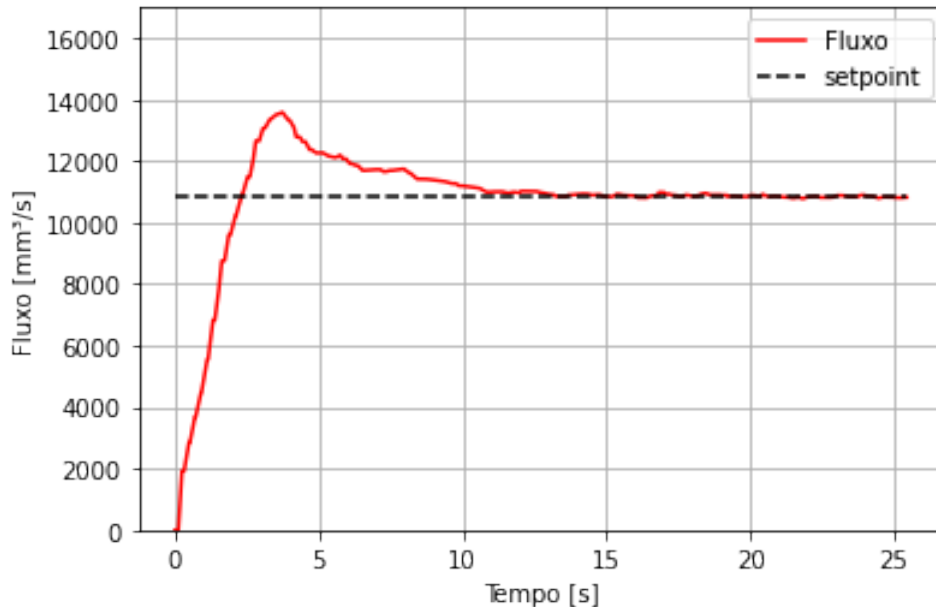
Gráfico 1 – Curva de resposta do PID de uma única válvula em diferentes setpoints.



Fonte: Autoria própria (2022).

Uma situação mais usual seria o momento em que o sistema é ligado, e todas as válvulas são ativadas simultaneamente, começando a abrir para atingir o seu respectivo *setpoint*. O gráfico 2 mostra o fluxo ao longo do tempo medido em uma das válvulas nesse cenário.

Gráfico 2 – Curva de resposta do PID de uma válvula ao ligar o sistema.

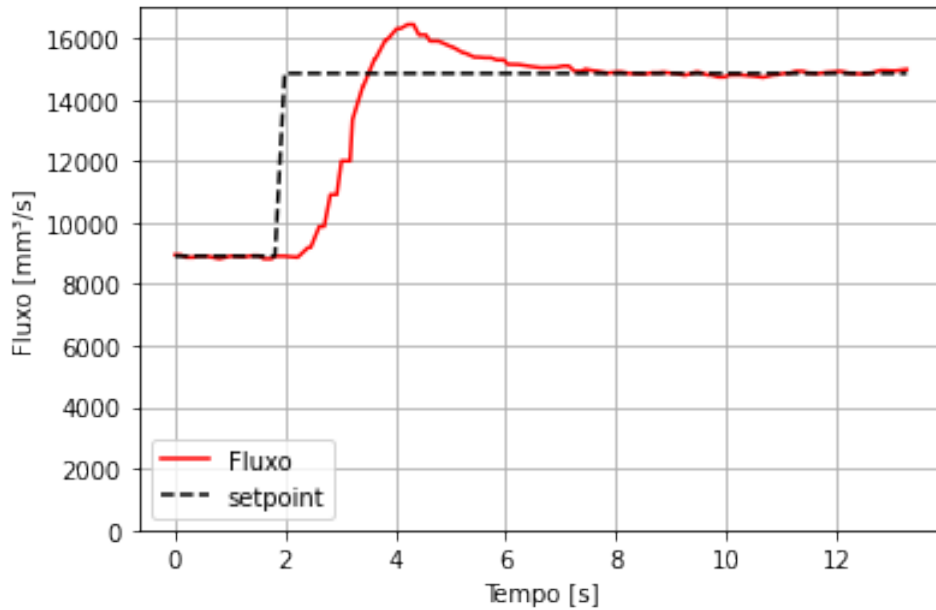


Fonte: Autoria própria (2022).

Durante a operação normal o *setpoint* pode variar por dois principais motivos. O primeiro seria uma variação de velocidade do trator, onde o *setpoint* de fluxo deve ser ajustado para que a taxa de aplicação de volume por área seja mantida. Nesse caso a variação do *setpoint* é

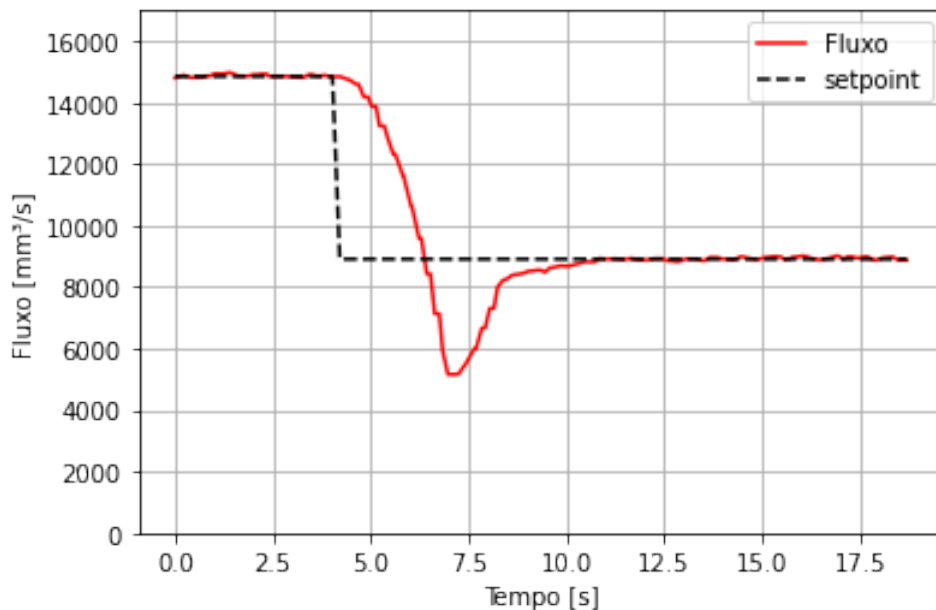
gradual e não é percebida de forma significativa. O segundo motivo é a passagem de uma zona de aplicação para outra, onde a prescrição da taxa de aplicação de produto é diferente. Nessa situação o *setpoint* varia de forma abrupta, e esse cenário foi simulado tanto para o caso de aumento do *setpoint*, como para o caso onde ele diminui, e é apresentado nos gráficos 3 e 4, respectivamente.

Gráfico 3 – Curva de resposta do PID de uma única válvula ao aumentar o *setpoint*.



Fonte: Autoria própria (2022).

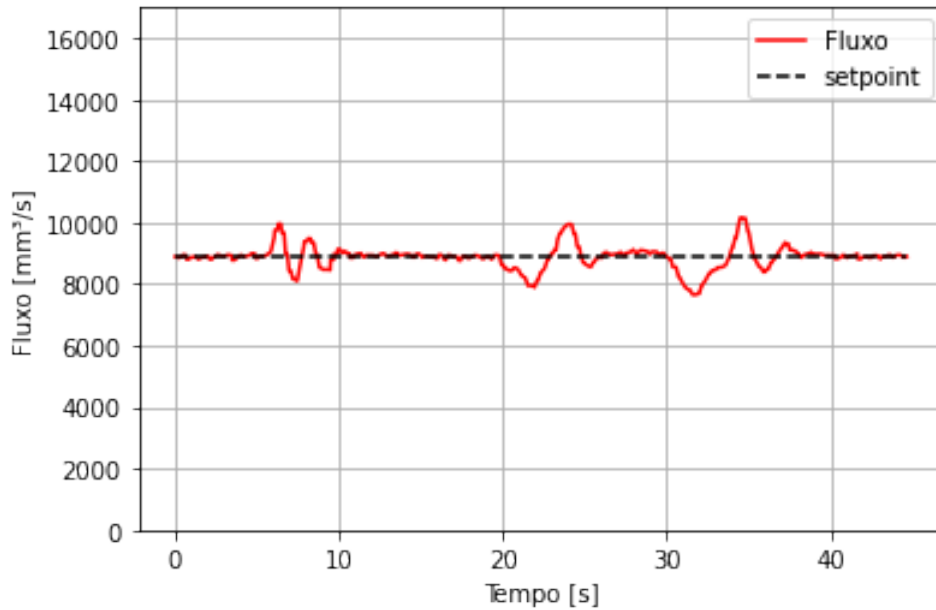
Gráfico 4 – Curva de resposta do PID de uma única válvula ao diminuir o *setpoint*.



Fonte: Autoria própria (2022).

Outra operação usual é o fechamento de uma ou mais das válvulas enquanto o resto permanece funcionando. Isso ocorre quando o trator com a barra de pulverização acaba passando por cima de uma área que já foi previamente pulverizada. Nesse cenário o fluxo em uma das válvulas foi monitorado enquanto as demais eram totalmente fechadas ou abertas, e está disposto no gráfico 5.

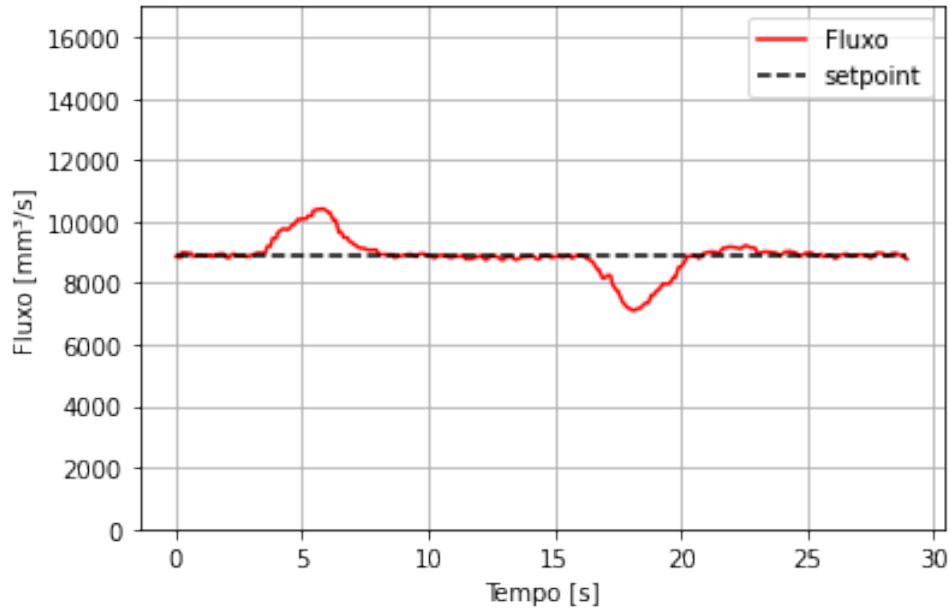
Gráfico 5 – Perturbações percebidas por uma válvula ao fechar as demais.



Fonte: Autoria própria (2022).

Um caso um pouco mais desfavorável ao sistema seria o fechamento simultâneo de duas ou mais válvulas enquanto outras permanecem funcionando, o que também foi simulado, e os resultados são apresentados no gráfico 6.

Gráfico 6 – Perturbações percebidas por uma válvula ao fechar ou abrir duas das outras.



Fonte: Autoria própria (2022).

4.4 Controle de pressão

O controle de pressão, também implementado via uma malha PID, funcionou como esperado durante os primeiros testes do projeto. Infelizmente, após alguns dias de ajustes e execução, as medições apresentaram instabilidade, medindo-se apenas a pressão mínima ou a pressão máxima. Foi concluído que o sensor apresentou falha e não media a pressão corretamente, impossibilitando testes subsequentes e levantamento de dados dessa parte do projeto.

Devido ao custo do sensor, somado com o tempo de entrega de uma nova peça, essa parte do projeto foi invalidada.

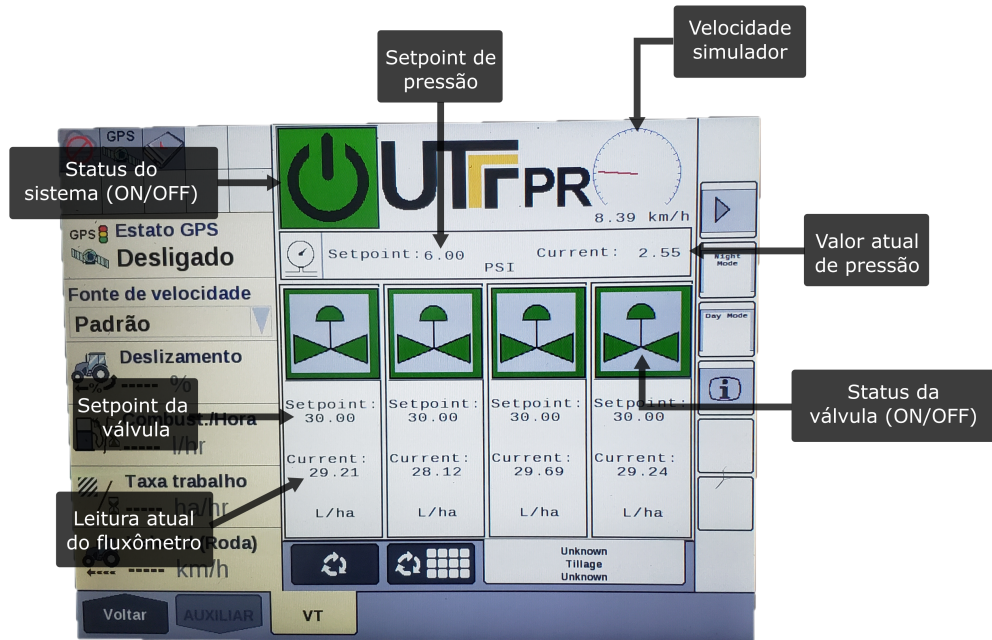
Entretanto, dada a ótima estabilidade da malha PID dos motores, a pressão não constante no sistema não foi um problema para o restante dos testes. Em um sistema real e prático, porém, essa seria uma implementação indispensável.

4.5 Interface com a tela ISOBUS

A interface gráfica do sistema é apresentada ao usuário através da função de terminal virtual da tela ISOBUS, a qual permite a ECU desenhar elementos como botões, imagens e textos. O protótipo desenvolvido apresenta uma tela principal, contendo um botão para ligar ou desligar o sistema juntamente com a bomba, botões para ligar ou desligar cada uma das válvulas individualmente, informação de fluxo atual, bem como o valor de pressão no sistema e velocidade do veículo. Além disso, a tela permite a edição dos valores de configuração dos

setpoints de taxa de aplicação em litros por hectare e também de pressão ideal. A figura 44 mostra as interfaces da tela principal com o usuário.

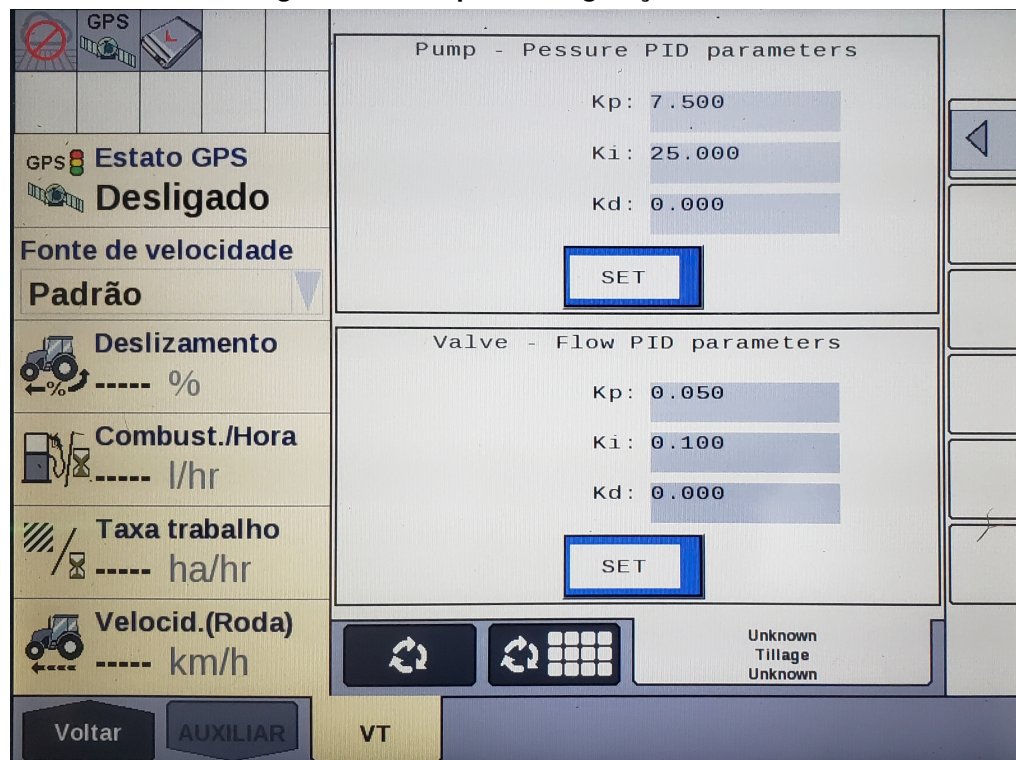
Figura 44 – Explicação da interface gráfica.



Fonte: Autoria própria (2022).

O sistema ainda possui uma tela adicional (figura 45), utilizada para o desenvolvimento do projeto, onde é possível configurar os ganhos dos controladores PID do fluxo para as válvulas e de pressão para a bomba.

Figura 45 – Tela para configuração do PID.



Fonte: Autoria própria (2022).

4.6 Simulador GPS

O *software* utilizado como simulador de GPS reflete o estado das válvulas na barra de pulverização, e apresenta na tela do computador a velocidade e direção do trator (figura 46). Com essa simulação, é possível ver como o protótipo funcionaria num cenário real, onde a aplicação do implemento está mapeada.

Figura 46 – Software simulador GPS.



Fonte: Autoria própria (2022).

4.7 Operação

Ao ligar uma válvula, a primeira ação é a procura do seu fim de curso, girando o motor no sentido anti-horário, até a ativação do sensor. Uma vez que isso acontecer, a válvula está apta a se conectar na rede *mesh*. Ao conectar na rede, a placa controladora da válvula então estabelece conexão com o nó raiz da rede *mesh* (ECU). A ECU então envia para a válvula as informações de *setpoint* de aplicação e também dos coeficientes PID.

A válvula então aguarda por mais comandos da ECU. Caso haja uma desconexão da rede, a válvula irá fechar o registro, caso aberto, e ficar em um estado de reconexão, até que se conecte novamente.

A ECU, por sua vez, envia para a tela ISOBUS a máscara com os botões, diálogos existentes, e toda a interface gráfica do implemento como um todo, via interface CAN. A tela então desenha esses elementos, mostrando ao usuário o estado do sistema. Sempre que há uma mudança de estado de representação do sistema, como, por exemplo, uma mudança de estado da válvula ou então uma mudança de fluxo, a ECU envia para a tela a nova informação a ser desenhada. Ao mesmo tempo que, sempre que há uma nova interação do usuário com algum botão do sistema, a tela envia para a ECU o respectivo comando. Isso significa que a tela está sempre reportando o status mais atual do sistema, incluindo valores de fluxo, e velocidade do GPS, por exemplo.

Inicialmente, todas as válvulas estão desligadas, assim como a bomba de pressão. O botão superior, de liga/desliga, dá início ao funcionamento do sistema, ligando a bomba e também liberando as válvulas, para que atinjam o *setpoint* configurado.

Os valores de *setpoint* e coeficientes PID ficam salvos na memória *flash* da ECU, ou seja, salvos em memória não-volátil. Esses valores são atualizados tanto nas válvulas quanto na memória *flash* sempre que houver uma alteração por parte do usuário, via interface da tela ISOBUS.

O simulador GPS é responsável principalmente pelo envio da velocidade, controlada por um potenciômetro. O *setpoint* mostrado na tela ISOBUS é dado em litros por hectare, mas o *setpoint* dentro da válvula é em mm^3/s . Isso significa que o fluxo deve ser ajustado proporcionalmente com a velocidade instantânea, para que atinja-se a mesma vazão sobre a área. Se o trator acelerar, para que a vazão permaneça a mesma, é necessário aumentar o fluxo de aplicação das válvulas. O mesmo vale para o caso do trator frear, onde agora será necessário diminuir o fluxo. Sempre que há uma mudança de *setpoint*, a ECU envia para as válvulas o novo *setpoint* de aplicação.

Ao comandar o botão de liga/desliga para o estado ligado, as válvulas se abrem, procurando atingir o *setpoint* desejado. Caso a válvula esteja comandada para abertura, o botão representando cada válvula passa de vermelho para verde. Ao clicar no botão, é possível individualmente fechar cada válvula. Também é possível alterar individualmente o *setpoint* de cada válvula, ao pressionar sobre o texto *setpoint* e digitar um novo valor. Caso haja a desconexão de uma válvula no sistema, o ícone da válvula ficará cinza.

5 CONCLUSÃO

Um sistema eletrônico para controle da aplicação de fertilizantes ou defensivos por implementos agrícolas foi elaborado, capaz de controlar a taxa de aplicação do líquido em cada bico de pulverização de maneira independente, acionando motores de passo ligados a válvulas do tipo agulha e monitorando o fluxo. A comunicação entre válvulas e a ECU se deu por meio de uma rede sem fio baseada em *Wi-Fi* com topologia *mesh*. Para a simulação de um ambiente real de utilização do sistema, foi utilizada uma bomba DC para pressurização e circulação do líquido, assim como um *software* de simulação de posicionamento GPS para emular a movimentação do trator pelo campo. A interface com o usuário foi feita por uma tela compatível com a norma ISOBUS, onde é possível visualizar os dados de taxa atual de aplicação, bem como alterar a configuração dos *setpoints*, e ligar e desligar o sistema e cada uma das válvulas individualmente.

O sistema apresentou um tempo de resposta para abertura ou fechamento total de uma válvula muito alto se comparado a sistemas baseados em bobinas solenoides. Porém, sistemas com solenoides não seriam capazes de dosar o fluxo de forma contínua e com baixo consumo de energia, como o sistema apresentado com base em motores de passo e registros. Propõe-se a utilização de motores com maior capacidade de torque, para que não haja a necessidade de caixa de redução, aumentando a velocidade de rotação. Outra vantagem da utilização de motores com maior torque é a possibilidade da troca do tipo de registro, visto que uma das dificuldades encontradas durante a elaboração do protótipo foi o torque insuficiente do motor para atuar em um determinado tipo de válvula. Válvulas que necessitam de menos voltas para abertura total também são uma opção. É esperado que com tais ajustes o tempo de abertura e fechamento das válvulas seja reduzido a ponto de tornar o sistema viável na operação prática.

O controle PID se provou viável, conseguindo manter a variável de processo, ou o fluxo, estável mesmo em situações adversas como altos níveis de pressão, bem como na presença de interferências externas e internas, relacionadas a outras válvulas ou até mesmo a bomba ligadas ao mesmo sistema de distribuição hidráulico. No que se refere a medição da variável de processo, o tipo de fluxômetro utilizado converte o fluxo de líquido para uma frequência, e a medição da mesma pelo microcontrolador pode se tornar um limitante no cálculo da variável de controle, visto que a frequência de cálculo depende da frequência de amostragem da variável de processo.

5.0.1 Trabalhos futuros

Apesar dos testes terem sido efetuados com um número reduzido de nós de rede, a topologia *mesh* apresentou baixa latência e capacidade suficiente para manutenção das comunicações entre várias válvulas e a ECU, trafegando comandos para atualização de *setpoints* e parâmetros de PID, leituras de sensores e estado de variáveis sem atrasos perceptíveis. Traba-

lhos futuros podem explorar em maior detalhe o desempenho da rede neste tipo de aplicação, levantando mais dados sobre latências, confiabilidade e número máximo de nós, bem como trazer otimizações no código de forma a tornar a comunicação mais eficiente.

Devido ao mal funcionamento do sensor de pressão durante a etapa de levantamento de resultados, trabalhos futuros podem ainda explorar os efeitos de operar o sistema com uma pressão constante, ao contrário de deixá-la sem nenhum tipo de controle.

A nível de hardware, o sistema proposto neste trabalho não cumpre os requisitos em um cenário prático, para tal deve-se levar em consideração o isolamento do sistema das intempéries, pois em campo pode ocorrer chuva e intenso acúmulo de poeira ou outros contaminantes sobre o implemento. O tamanho físico das placas e também do conjunto hidráulico da válvula deve ser reduzido, o que pode ser alcançado com a elaboração de placa de circuito com duas ou mais camadas de cobre, uso de componentes de montagem superficial (SMD), bem como uma modelagem mecânica adequada para o posicionamento do conjunto hidráulico juntamente com motor e sensor óptico. No cenário de laboratório, foi utilizada uma fonte de 12V estável e assumindo que a tensão de entrada se mantém fixa neste valor. No caso de uma bateria de trator ou máquina agrícola, o circuito de alimentação deve ser muito mais robusto, resistindo as variações de tensão na entrada e também a possíveis ruídos.

REFERÊNCIAS

- 11783, I. Tractors and machinery for agriculture and forestry - serial control and communication data network. 2022. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/38209.html>>. Acesso em: 23 nov. 2022.
- ALLEGROMICROSYSTEMS. **DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection**. 2014. Disponível em: https://www.pololu.com/file/0J450/a4988_DMOS_microstepping_driver_with_translator.pdf. Acesso em: 05 Dez. 2022.
- ARAKI, M. **PID control**. 2009. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=RF1xDAAQBAJ>. Acesso em: 23 nov. 2022.
- BARR, M. **Pulse width modulation**. 2001. Disponível em: https://homepage.cem.itesm.mx/carbajal/Microcontrollers/ASSIGNMENTS/readings/ARTICLES/barr01_pwm.pdf. Acesso em: 23 nov. 2022.
- BASSOI, L. H. e. a. **Agricultura de precisão e agricultura digital**. 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1121544/1/AgriculturaPrecisaoAgriculturaDigital.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2022.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2008. ISBN 978-85-7605-182-4. Acesso em: 24 ago. 2022.
- CASEIH. **ADVANCED FARMING SYSTEMS**. 2017. Disponível em: <https://www.caseih.com/northamerica/en-us/products/advanced-farming-systems/displays/afs-pro-700>. Acesso em: 23 nov. 2022.
- CONDIT RESTON; JONES, D. W. Stepping motors fundamentals. **Microchip Inc. Publication AN907**, p. 1–22, 2004. Disponível em: <https://www.bristolwatch.com/pdf/stepper.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2022.
- CORRIGAM, S. Introduction to the controller area network (can). 2002. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/an/sloa101b/sloa101b.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2022.
- ESPRESSIF. **ESP-WIFI-MESH**. 2022. Disponível em: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/api-guides/esp-wifi-mesh.html>. Acesso em: 03 dez. 2022.
- ESPRESSIF. **ESP32-WROOM-32 Datasheet**. 2022. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 30 nov. 2022.
- FOX, R. M.; PRITCHARD, P. A. **Introduction to Fluid Mechanics**. [S.l.]: USA: John Wiley & Sons, Inc, 2010. ISBN 9780470547557. Acesso em: 27 nov. 2022.
- HOLLAND, N. New holland intellispray. 2022. Disponível em: <https://www.newhollandrochester.com/precision-farming/new-holland-intellispray>. Acesso em: 23 nov. 2022.
- HUGHES, T. A. **Measurement and Control Basics**. [S.l.]: ISA: The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2015. ISBN 978-0-876640-14-2. Acesso em: 26 nov. 2022.
- K.C, K. **Wireless mesh network: A survey**. 2016. Acesso em: 23 nov. 2022.

- KNOSPE, C. **PID control**. 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Carl-Knospe/publication/3207700_PID_control/links/542c19bf0cf29bbc126b32f6/PID-control.pdf. Acesso em: 23 nov. 2022.
- LALNUNTHARI, J.; THANGA, H. H. **Dependence of hall effect flow sensor frequency on the attached inlet and outlet pipe size**. 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8307842>. Acesso em: 23 nov. 2022.
- LINSINGEN, I. v. **Fundamentos de sistemas hidráulicos**. [S./]: Editora da UFSC, 2003. Acesso em: 24 ago. 2022.
- MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. [S./]: LTC, 1997. Acesso em: 26 nov. 2022.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. [S./]: Pearson Prentice Hall, 2011. ISBN 978-85-4301-375-6. Acesso em: 04 dez. 2022.
- RAMSDEN, E. **Hall-effect sensors: theory and application**. 2011. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=R8VAjMitH1QC>. Acesso em: 23 nov. 2022.
- SINGH, R. *et al.* **A silicon piezoresistive pressure sensor**. 2002. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/994611>. Acesso em: 23 nov. 2022.
- SURESH, N. e. a. Raspberry PI based liquid flow monitoring and control. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 3, n. 7, p. 122–125, 2014. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/41616968/RASPBERRY_PI_BASED_LIQUID_FLOW_MONITORING_AND_CONTROL-with-cover-page-v2.pdf. Acesso em: 24 nov. 2022.
- TRIMBLE. Sistema de pulverização seletiva weedseeker. 2022. Disponível em: <https://agro.trimble.com.br/product/sistema-de-pulverizacao-localizada-weedseeker>. Acesso em: 23 nov. 2022.
- WERNER, V. e. a. **Aplicação de fertilizantes a taxa variável em agricultura de precisão variando a velocidade de deslocamento**. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000600016>. Acesso em: 23 nov. 2022.
- WILFRIED, V. **A Comprehensive Guide to J1939**. 2008. Acesso em: 23 nov. 2022.
- ZELENOVSKY, R.; MENDONÇA, A. **Microcontroladores: programação e projeto com a família 8051**. [S./]: MZ Editora Ltda., 2005. ISBN 8587385127. Acesso em: 29 nov. 2022.