

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
E AMBIENTAL**

DISSERTAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE
IRRIGAÇÃO COM MOVIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA E APLICAÇÃO
A TAXAS VARIÁVEIS PARA ÁREAS COM CULTIVO
DIVERSIFICADO DE OLERÍCOLAS**

THALISSA OLIVEIRA PIRES MAGALHÃES

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
E AMBIENTAL

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE
IRRIGAÇÃO COM MOVIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA E APLICAÇÃO
A TAXAS VARIÁVEIS PARA ÁREAS COM CULTIVO
DIVERSIFICADO DE OLERÍCOLAS**

THALISSA OLIVEIRA PIRES MAGALHÃES

Sob a orientação do Professor
Marinaldo Ferreira Pinto

e Coorientação do Professor
Marcus Vinicius Moraes De Oliveira

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do título de **Mestra em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental – PGEEAAmb, Área de Concentração em Sistemas Agrícolas.

Seropédica, RJ
Julho de 2023

“É permitida a cópia total ou parcial da Dissertação, desde que seja citado a fonte.”

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M188d Magalhães, Thalissa Oliveira Pires, 1994-
d DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE
IRRIGAÇÃO COM MOVIMENTAÇÃO AUTOMÁTICA E APLICAÇÃO A
TAXAS VARIÁVEIS PARA ÁREAS COM CULTIVO DIVERSIFICADO
DE OLERÍCOLAS / Thalissa Oliveira Pires Magalhães.
SEROPEDICA, 2023.
76 f.: il.

Orientador: Marinaldo Ferreira Pinto.
Coorientador: Marcus Vinicius Moraes de Oliveira.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro, PGAEAMB, 2023.

1. Agricultura de Precisão. 2. Microirrigação. 3.
Irrigação sob taxa variável. I. Pinto, Marinaldo
Ferreira, 1984-, orient. II. Oliveira, Marcus
Vinicius Moraes de , -, coorient. III Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. PGAEAMB. IV.
Título.

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

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E
AMBIENTAL

THALISSA OLIVEIRA PIRES MAGALHÃES

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Engenharia Agrícola e Ambiental**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental, na Área de Concentração em Sistemas Agrícolas.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 18/07/2023

Dr. Marinaldo Ferreira Pinto

(Orientador)

Dr. Murilo Machado de Barros

Dr. Ezequiel Saretta

Emitido em 18/07/2023

HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 64/2023 - PPGEAAMB (12.28.01.00.00.00.40)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 14/09/2023 11:21)

MARINALDO FERREIRA PINTO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
CoordCGEAA (12.28.01.00.00.00.35)
Matrícula: ####324#4

(Assinado digitalmente em 11/09/2023 13:25)

MURILO MACHADO DE BARROS
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.44)
Matrícula: ####506#5

(Assinado digitalmente em 19/09/2023 11:22)

EZEQUIEL SARETTA
ASSINANTE EXTERNO CPF: ####.###.079-##

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número: **64**, ano: **2023**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**, data de emissão: **11/09/2023** e o código de verificação: **17eeb96b17**

DEDICATÓRIA

“Não morremos quando partimos desse mundo. Só morremos quando deixamos de existir no coração daqueles que nos amam.”

*Ao meu irmão, Júnior (in memorian), te **dedico**.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, toda honra e toda glória, pois sem ele, nada seria possível.

Aos meus pais, Raimundo e Ângela, por todo apoio, incentivo e palavras de conforto nos momentos difíceis. Por escolherem sempre priorizar a educação. Por tanta contribuição em toda minha vida. Sou grata por tudo.

A Bianca, por ter escolhido me acompanhar nessa jornada tão importante para mim e fazer com que os fardos se tornassem mais leves e as conquistas ainda mais vitoriosas. Obrigada por tanto.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental (PGEAAMB) pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Marinaldo Ferreira Pinto por ter me orientando e contribuído para o meu desenvolvimento profissional. Agradeço por todo o ensinamento e por sanar tantas dúvidas que ocorreram durante a execução do projeto com paciência, zelo e humildade.

Ao professor Dr. Marcus Vinícius Moraes de Oliveira por me coorientar e agregar conhecimento ao meu projeto. Agradeço pelo tempo, dedicação e paciência.

Aos professores do PGEAAMB, pela colaboração no meu desenvolvimento profissional.

As meninas da Iniciação Científica, Olívia e Júlia, pela contribuição ao trabalho.

Ao GPASSA que me ajudou em diversos momentos durante todo o meu mestrado.

Ao Alojamento Feminino da Pós-Graduação. Definitivamente, todo aprendizado foi potencializado pela convivência com mulheres fortes e determinadas. Não tenho dúvidas que meu crescimento e amadurecimento foi imensamente maior por poder conviver com vocês durante esse período.

Aos amigos que me acompanharam no começo dessa jornada e aos amigos que ganhei durante essa experiência. Obrigada pelo incentivo e apoio. Aos meus amigos de infância: Gustavo, Elainne, Karine, Nathálya e Tadeu, obrigada por serem tão fundamentais desde sempre.

As minhas amigas e colegas, Laiza e Jéssica, por vivenciarmos essa experiência juntas. Obrigada pelas trocas e aprendizado.

Aos meus sogros, Marcilene e Gelsino, por direta e indiretamente serem essa rede de apoio na minha vida.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos e proporcionar a oportunidade de realizar a Pós-Graduação.

“Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.”

Josué 1:9

“Educação não transforma o mundo. Educação muda pessoas. Pessoas transformam o mundo.”

Paulo Freire

RESUMO

MAGALHÃES, Thalissa Oliveira Pires. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação de precisão (com movimentação automática) para áreas com cultivo diversificado de olerícolas.** 2023. 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental, Sistemas Agrícolas). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

O sistema de irrigação mais empregado na olericultura é a aspersão convencional, que tem como característica a aplicação de água uniforme, o que dificulta o manejo da irrigação em áreas de múltiplas culturas e/ou em estágios de desenvolvimento distintos. Nesse caso, o mais adequado é o uso de sistemas de irrigação que apliquem água conforme a variabilidade espacial. Visando atender essa variabilidade nos sistemas diversificados de olerícolas, este trabalho busca desenvolver e avaliar um sistema de irrigação, com movimentação automática, voltado à agricultura familiar. O projeto foi desenvolvido nos Laboratórios de Hidráulica e Irrigação e no Laboratório de Projetos de Máquinas Agrícolas do Departamento de Engenharia, do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. O protótipo é composto por um sistema de irrigação mecânico comandado eletronicamente, uma barra gotejadora, carretel enrolador e sistema eletrônico de controle. A barra gotejadora, ao se movimentar aplica água de forma individual às culturas, cujas lâminas são controladas por meio da velocidade de deslocamento e pela abertura de linhas laterais, controladas por válvulas de acionamento por pulsos elétricos. A movimentação da barra é efetuada por meio do carretel enrolador, que enrola ou libera a mangueira flexível de alimentação de água de forma automática. Quando a mangueira é enrolada pelo carretel, a barra se movimenta na direção final dos canteiros, aplicando metade da lâmina requerida. Na volta, a outra metade da lâmina é aplicada, finalizando a irrigação. O carretel enrolador possui um painel de controle eletrônico que comunica com o painel de controle existente na barra gotejadora permitindo a aplicação das lâminas de irrigação via acionamento ou fechamento das válvulas por pulsos elétricos. A avaliação da barra gotejadora consistiu na escolha dos emissores, determinação das lâminas de irrigação, avaliação hidráulica e mecânica da barra gotejadora, cálculo da área potencial irrigável e avaliação de custo de implantação do sistema. Na avaliação hidráulica da barra gotejadora, foi observado a aplicação de lâminas constantes e velocidades constantes e avaliação de lâminas variáveis entre e ao longo dos canteiros. Na avaliação mecânica foi observada a robustez e o desempenho do sistema. Por fim, na avaliação da área potencial irrigável e custo do sistema, foi calculado e comparado aos outros sistemas convencionais existentes no mercado. Todos os emissores apresentaram resultados satisfatórios, mas o emissor utilizado na avaliação foi o gotejador autocompensante. A barra gotejadora apresentou boa uniformidade e eficiência de aplicação tanto para lâminas constantes quanto para lâminas variáveis. Na avaliação mecânica foi observado o desalinhamento da estrutura e falta de robustez. A área potencial irrigável é de $360 \text{ m}^2\text{dia}^{-1}$ e o custo de R\$ 68.759,16 ha^{-1} , custo maior do que o custo médio de irrigação localizada do mercado. De acordo com os resultados obtidos, a técnica de acionamento das válvulas por pulsos elétricos foi capaz de entregar uma vazão equivalente e proporcionar lâminas variáveis. Para lâminas constantes, a barra gotejadora conseguiu se manter estável e uniforme. Por fim, a barra gotejadora conseguiu atender as necessidades do cultivo diversificado de olerícolas.

Palavras-chave: irrigação de precisão, microirrigação, agricultura familiar, desenvolvimento tecnológico, automação;

ABSTRACT

MAGALHÃES, Thalissa Oliveira Pires. **Development and evaluation of a precision irrigation system (with automatic movement) for areas with diversified olericultural cultivation.** 2023. 77p. Dissertation (Master in Agricultural and Environmental Engineering, Agricultural Systems). Institute of Technology, Department of Engineering, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

The irrigation system most used in horticulture is the conventional sprinkler, which is characterized by the application of uniform water, which makes it difficult to manage irrigation in areas with multiple crops and/or at different stages of development. In this case, the most appropriate is the use of irrigation systems that apply water according to spatial variability. Aiming to address this variability in the diversified systems of vegetable crops, this work seeks to develop and evaluate an irrigation system, with automatic movement, aimed at family agriculture. The project was developed at the Hydraulics and Irrigation Laboratories and at the Agricultural Machinery Project Laboratory of the Engineering Department of the Institute of Technology at the Federal Rural University of Rio de Janeiro. The prototype consists of an electronically controlled mechanical irrigation system, a drip bar, reel reel and electronic control system. The project was developed at the Hydraulics and Irrigation Laboratories and at the Agricultural Machinery Project Laboratory of the Engineering Department of the Institute of Technology at the Federal Rural University of Rio de Janeiro. The prototype consists of an electronically controlled mechanical irrigation system, a drip bar, reel reel and electronic control system. The dripper bar, when moving, applies water individually to the cultures, whose blades are controlled by means of the displacement speed and the opening of lateral lines, controlled by valves activated by electric pulses. The movement of the bar is carried out by means of the reel reel, which automatically winds or releases the flexible water supply hose. When the hose is wound onto the reel, the bar moves in the final direction of the beds, applying half of the required blade. On the way back, the other half of the blade is applied, completing the irrigation. The reel reel has an electronic control panel that communicates with the existing control panel on the dripper bar, allowing the application of irrigation blades by activating or closing the valves by electrical pulses. The evaluation of the dripper boom consisted of choosing the emitters, determining the irrigation depths, hydraulic and mechanical evaluation of the dripper boom, calculating the potential irrigable area and evaluating the cost of implementing the system. In the hydraulic evaluation of the dripper bar, the application of constant blades and constant speeds and evaluation of variable blades between and along the beds were observed. In the mechanical evaluation, the robustness and performance of the system were observed. Finally, in evaluating the potential irrigable area and cost of the system, it was calculated and compared to other conventional systems on the market. All emitters showed satisfactory results, but the emitter used in the evaluation was the self-compensating dripper. The drip bar showed good uniformity and application efficiency for both constant and variable depths. In the mechanical evaluation, the misalignment of the structure and lack of robustness were observed. The potential irrigable area is $360 \text{ m}^2\text{day}^{-1}$ and the cost is BRL 68,759.16 ha^{-1} , which is higher than the average cost of localized irrigation in the market. According to the results obtained, the technique of activating the valves by electric pulses was able to deliver an equivalent flow and provide variable blades. For constant blades, the drip bar was able to remain stable and even. Finally, the drip bar was able to meet the needs of diversified vegetable crops.

Keywords: precision irrigation, micro-irrigation, family farming, technological development, automation;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil da barra gotejadora	12
Figura 2 – A. Carretel enrolador; B. Moto-redutor e motor DC; C. Central de controle.....	16
Figura 3 – Correlação entre PWM e velocidade do motor.....	17
Figura 4 – Croqui do rolete de PVC	18
Figura 5 – Mecanismo de deslocamento de volta da barra gotejadora.....	19
Figura 6 – Barra gotejadora, carretel enrolador e o mecanismo de deslocamento de volta	20
Figura 7 – Esquemático de ligação dos componentes do painel de controle eletrônico da barra gotejadora	21
Figura 8 – Esquemático de ligação dos componentes da central de controle do carretel enrolador.....	22
Figura 9 – Fluxograma da programação implementada no painel de controle do carretel enrolador.....	23
Figura 10 – Fluxograma da programação implementada no painel de controle eletrônico da barra gotejadora	24
Figura 11 – A. Bancada de ensaio; B. central de controle do ensaio; C. Estação de controle do conjunto motobomba	27
Figura 12 – Croqui da calha e coletor de ensaio. 1: Calha; 2: Coletor.....	28
Figura 13 – Ensaio de calibração da válvula PGV-100 (HUNTER).....	29
Figura 14 – Correlação entre tempo relativo e lâmina relativa	31
Figura 15 – Croqui da área de avaliação do ensaio com o posicionamento da área de coleta	35
Figura 16 – Vazão equivalente em função do tempo relativo dos gotejadores não regulados. A: Emissor 1; B: Emissor 2; C: Emissor 3; D: Emissor 4; E: Média dos emissores.....	40
Figura 17 – Vazão equivalente em função do tempo relativo dos gotejadores autocompensantes. A: Emissor 1; B: Emissor 2; C: Emissor 3; D: Emissor 4; E: Média dos emissores.	42
Figura 18 – Vazão equivalente em função do tempo relativo dos microtubos. A: Emissor 1; B: Emissor 2; C: Emissor 3; D: Emissor 4; E: Média dos emissores.....	44
Figura 19 – Avaliação com lâmina constante (velocidade constante) (0,5 mm).....	46
Figura 20 – Avaliação com lâmina constante (velocidade constante) (1,5 mm).....	46
Figura 21 – Avaliação com lâmina constante (velocidade constante) (2,5 mm).....	47

Figura 22 – Comparativo entre a lâmina requerida e a lâmina aplicada. A: Posição 1; B: Posição 3; C: Posição 5.....	48
Figura 23 – Relação entre lâmina aplicada e lâmina requerida (I) entre canteiros e ao longo do canteiro	49
Figura 24 – Correlação entre a distância, velocidade e o PWM equivalente	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cultivos presentes no Módulo de Cultivo Orgânico Intensivo de Hortaliças e suas funcionalidades no sistema na Fazendinha Agroecológica Km 47, 2018	32
Tabela 2 – Lâminas de cada cultura e estágio de desenvolvimento inseridas no cartão de memória para a avaliação do sistema de irrigação (mm) em cada canteiro e sua respectiva posição	34
Tabela 3 – Lâmina requerida e velocidade correspondente para a avaliação de lâmina constante	36
Tabela 4 – Custo detalhado de implantação da barra gotejadora	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS.....	3
2.1	Objetivos específicos	3
3	REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1	Agricultura de Precisão.....	4
3.2	Microirrigação	5
3.3	Mecanização agrícola.....	6
3.4	Automação	6
3.5	Evapotranspiração.....	6
3.6	Irrigação por taxa variável	7
3.7	Sistemas diversificados.....	8
4	MATERIAL E MÉTODOS	9
4.1	Construção do protótipo.....	9
4.1.1	Concepção do projeto	9
4.1.2	Barra gotejadora	10
4.1.3	Carretel enrolador	15
4.1.4	Desenvolvimento do deslocamento automático de ida e volta da barra gotejadora	
	18	
4.2	Comunicação eletrônica do sistema de irrigação.....	20
4.2.1	Algoritmo utilizado para o ajuste de velocidade no carretel enrolador	22
4.2.2	Algoritmo de ajuste de tempo de acionamento utilizado na barra gotejadora....	23
4.3	Avaliação da barra gotejadora	25
4.3.1	Escolha dos emissores	25
4.3.2	Determinação das demandas hídricas das culturas	31
4.3.3	Avaliação hidráulica da barra gotejadora	34

4.3.4	Avaliação mecânica da barra gotejadora	37
4.3.5	Área potencial irrigável e avaliação de custo de implantação do sistema.....	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1	Escolha dos emissores	39
5.1.1	Gotejador não regulado (convencional)	39
5.1.2	Gotejador regulado (autocompensante).....	41
5.1.3	Microtubos.....	42
5.2	Avaliação hidráulica da barra gotejadora	45
5.2.1	Avaliação com lâmina constante (velocidade constante).....	45
5.2.2	Avaliação com lâmina variável ao longo e entre os canteiros.....	47
5.3	Avaliação mecânica da barra gotejadora	49
5.4	Área potencial irrigável e avaliação de custo de implantação do sistema	50
	CONCLUSÃO.....	53
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é considerada um setor importante da economia mundial, por contribuir significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB) e por fornecer segurança alimentar (Bwambale et al., 2022). Entretanto, as condições meteorológicas e ambientais, oferta e demanda de alimentos e épocas de reprodução de safras e limitações do ambiente de cultivo podem influenciar na eficiência (Osinga et al, 2022). Por isso, é importante a utilização de técnicas, métodos e tecnologia para ampliar a oferta de alimentos e aumentar a eficiência na agricultura. Com a expansão tecnológica, conceitos da Agricultura de Precisão (AP) surgem como solução e estão se difundindo no setor agrícola.

A região Sudeste detém a maior parcela de produção de frutas e hortaliças do Brasil, totalizando em 40,87% da produção total (KIST; CARVALHO; BELLING, 2022). As olerícolas pertencem a segunda maior cadeia de produção do estado do Rio de Janeiro em relação ao faturamento bruto, perdendo apenas para bovinocultura, sendo produzida predominantemente pela agricultura familiar (EMATER-RIO, 2020). O sistema de irrigação mais empregado na olericultura é aspersão convencional, que tem como característica a aplicação de água uniforme, o que dificulta o manejo da irrigação em áreas com diversas culturas e/ou em estágios de desenvolvimento distintos (Lopes et. al, 2016). Entretanto, as hortas são ambientes muito dinâmicos, porque apresentam elevada variabilidade espacial de consumo hídrico. A variabilidade espacial nos campos influencia o teor de água do solo, devido ao tipo de solo e topografia, sendo recomendado ajustar a taxa de irrigação de acordo as necessidades (DE LARA et al., 2018). A aplicação dos conceitos de agricultura de precisão vem como alternativa para atender essa variabilidade (Abioye et. al, 2020).

A agricultura de precisão, em particular, permite que os agricultores economizem recursos preciosos sem sujeitar as plantas à deficiência hídrica (Bwambale et al., 2022) e é uma excelente técnica de economia de água para maximizar o rendimento e fornecer água no local desejado com base nas necessidades hídricas da cultura (Abioye et. al, 2020). Atualmente, não se dispõe de tecnologias de irrigação voltada para esse setor de forma plena. Para que se tenha o manejo racional da irrigação nessas áreas é necessário que sejam desenvolvidas tecnologias voltadas para esta condição, além de ser de fácil utilização e que não atrapalhem os tratos culturais.

Com isso, outros sistemas se mostram alternativas promissoras na olericultura. Para Frizzzone et al (2012), a microirrigação favorece o desenvolvimento e produção das plantas,

reduz mão de obra, consumo de energia e água, além de facilitar as práticas culturais. A irrigação por gotejamento aumenta a produtividade do consumo hídrico e uso do solo e é eficiente no uso de fertilizantes (MOURSY et al., 2023). Ainda assim, a irrigação por gotejamento não consegue atender a variabilidade espacial das necessidades hídricas das culturas. Por isso, é importante o uso de técnicas para aprimorar o uso dos recursos hídricos sem que a eficiência da irrigação seja afetada.

Juntamente com outras ferramentas tecnológicas, a automação da irrigação é um fator determinante para o seu manejo e operação na agricultura familiar, tendo em vista que reduz a mão de obra na operação do sistema de irrigação, fazendo com o que o agricultor tenha mais tempo para outras atividades. Além disso, pode proporcionar melhorias na eficiência de aplicação de água e energia elétrica (Cunha e Rocha, 2015; Alvarenga et al., 2014), uma vez que permite a prática de irrigações noturnas que aliado a redução do volume de água aplicado reduz os custos com energia elétrica. Aliado a automação, a mecanização agrícola com aplicação de insumos em taxas variadas, talvez tenha sido a área do conhecimento que mais se desenvolveu. No entanto, poucos estudos foram feitos sobre irrigação de precisão (SOUZA; RODRIGUES, 2022).

Entretanto, a simples aplicação da automação não resolve totalmente o problema em ambientes com a dinâmica das hortas de agricultura familiar, principalmente quando se utiliza sistemas fixos, sejam aspersão convencional ou gotejamento, pois exige que os sistemas sejam desmontados durante as práticas de preparo do solo, o que se torna um inconveniente, além questões de variabilidade já citadas anteriormente. Diante do exposto, a aplicação dos conceitos de Agricultura de Precisão combinados com as tecnologias atuais e a irrigação mecanizada podem proporcionar um sistema robusto, de alto desempenho que consiga atender a demanda da variabilidade espacial do consumo hídrico das culturas, totalmente voltada para as necessidades da agricultura familiar.

2 OBJETIVOS

Desenvolver e avaliar um sistema de irrigação de aplicação variável de acordo com a variabilidade espacial das necessidades hídricas das culturas, voltado para a agricultura familiar.

2.1 Objetivos específicos

- Desenvolver um sistema hidráulico/eletrônico que realize a aplicação de água a taxas variáveis, de acordo com a variabilidade espacial da necessidade hídrica das culturas no ambiente de cultivo;

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Agricultura de Precisão

A agricultura possui grande influência econômica e social, além de utilizar um recurso vital para a humanidade, a água. Sendo assim, várias mudanças tecnológicas têm sido implantadas no setor agrícola, buscando otimizar a produção das culturas e minimizar desperdícios, danos a equipamentos, custos excessivos por superdimensionamento de projeto, desuniformidade no desenvolvimento da lavoura, entre outros. Hoje, entre as várias tecnologias que interessam o setor agrícola, a Agricultura de Precisão surge como um importante fenômeno devido ao seu impacto sobre produtos, serviços, processos e modelos de negócios (Bentivoglio et al, 2022). Para Daltozo et al (2017), a AP pode ser definida como uma prática agrícola, que faz uso de tecnologia de informação, baseada no princípio da variabilidade espacial e temporal. Silva et al (2020), acrescenta que o surgimento da agricultura de precisão oferece vantagens relacionadas à sustentabilidade, qualidade dos produtos, menor impacto ambiental e maior lucratividade. A AP engloba um conjunto de avanços que combina sensores, sistemas de informação e gerenciamento de informações para aprimorar o cultivo (Madhumathi et al, 2021) e soluções que verificam o estado nutricional das plantas, agilizando a aplicação de nutrientes (HOSS et al, 2020).

Segundo Borges et al (2020), a agricultura de precisão permite identificar a distribuição espacial dos atributos geográficos, solo e produtividade vegetal, o que auxilia na tomada de decisões. A AP aliada a eletrônica, pode mudar a agricultura para a agricultura digital, garantindo a otimização e o manejo dos recursos em todo o sistema agrícola (BENTIVOGLIO et al, 2022). De modo a reduzir erros e realizar um melhor manejo da agricultura, baseado em uma abordagem científica e validação moderna, combinando o conhecimento convencional com tecnologias de informação para um sistema inteligente de produção agrícola (SILVA e al, 2020). A tecnologia aplicada aos sistemas de produção industrial, comercial e agrícola tem proporcionado às empresas segurança financeira e aos consumidores confiabilidade dos produtos, garantindo a harmonia e a satisfação de ambos (COSTA et al, 2020). Por fim, a pesquisa científica na agricultura de precisão é importante para o futuro da alimentação e agricultura por adaptar os insumos e lidar com a variabilidade espacial no campo (HIGGINS et al., 2023).

3.2 Microirrigação

A microirrigação caracteriza-se por aplicar água com baixa vazão, alta frequência, próximo ou dentro da zona radicular, via sistemas de baixa pressão, podendo utilizar a água como veículo de fertilizantes e outros produtos químicos (Frizzone et al, 2012). Segundo Testezlaf (2017), as principais culturas que empregam esse método de irrigação são as frutíferas em geral, flores e plantas ornamentais e as olerícolas. A sua utilização também se faz presente em projetos paisagísticos de jardins e residências. Para Baiamonte (2018), diversos fatores que podem apresentar alta variabilidade espacial, influenciam a difusão da microirrigação, como o preço da água e da cultura, o custo dos equipamentos, as características físico-hídricas do solo e o regime de precipitação.

Para Campos Júnior (2022), uma das vantagens da irrigação por gotejamento, quando bem manejada, é o aumento da eficiência do uso dos recursos hídricos, porque a aplicação de água ocorre na zona radicular da cultura, diminuindo a perda por ET e por escoamento superficial. A irrigação por gotejamento com alta eficiência no uso da água tem sido amplamente utilizada em áreas áridas e semiáridas para aliviar o estresse hídrico (Lin et al, 2022). Ferrarezi et al (2020), acrescentam que esse sistema aumenta o rendimento e a qualidade da cultura, maximizando a lucratividade. Além disso, pode reduzir os requisitos de irrigação, aumentar as capacidades de gerenciamento de água, reduzir a operação e os tamanhos de tubulação devido às pequenas vazões (Baiamonte, 2018).

A irrigação por gotejamento fornece água de forma lenta e uniformemente à raiz de uma cultura por meio de um tubo de gotejador. Esse sistema reduz a salinidade do solo na zona das raízes da cultura e melhorando o rendimento da cultura (Du et al., 2023). Segundo Ferrarezi et al (2020), a irrigação por gotejamento possui potencial de alta eficiência, resultando em economia de água quando comparada à irrigação por aspersão. Entretanto, a obstrução dos emissores é um dos maiores problemas na microirrigação, podendo impedir que tais benefícios sejam atingidos (PEREIRA, 2022). Apesar de todas as vantagens da microirrigação, nenhum método de irrigação é adequado para todos os tipos de solo, de cultura, topografia e etc. A escolha do método deve ser baseada em critérios das condições gerais do ambiente de cultivo e da cultura a ser irrigada. A microirrigação possui maior potencial quando (a) a água possui disponibilidade limitada; (b) solo arenoso, pedregoso e a topografia irregular; (c) a cultura sensível a pequenas variações de umidade (FRIZZONE, 2017).

3.3 Mecanização agrícola

A mecanização agrícola simplifica e reduz o trabalho pesado, compensa a escassez de mão de obra, aumenta a produtividade e pode contribuir para a mitigação das ameaças relacionadas ao clima (RAHMAN et al., 2021). Com a expansão dos subsídios para compra de máquinas agrícolas, o grau de mecanização agrícola vem aumentando (YANG et al., 2022). Os serviços de mecanização agrícola aumentam a eficiência da produção agrícola e facilitam da transferência de mão de obra e reduz o uso de animais de tração (CANTOU et al., 2023). A mecanização está no centro do desenvolvimento agrícola, relacionado ao aumento da produtividade de fertilizantes, sementes melhoradas e irrigação. Embora, nota-se que os pequenos agricultores não podem se beneficiar da mecanização (BELTON et al., 2021).

A expansão da mecanização na agricultura familiar se torna relevante por garantir técnicas adequadas de manejo do solo, da água, processamento de produtos agrícolas e ainda diminui o esforço manual do pequeno produtor garantindo o aumento da produtividade (OLIVEIRA; PEREIRA, 2010).

3.4 Automação

A automação é qualquer sistema capaz de tomar decisões sem a intervenção humana. Normalmente utiliza-se sensores e processadores previamente programados, acarretando soluções rápidas e econômicas em diversos setores, inclusive na agricultura (PINTO, 2010). A automação é a forma de controlar sistemas e equipamentos de maneira mais eficiente, controlando fatores que interferem no crescimento da planta, assim como é possível ler dados de sensores, utilizando-os para possíveis tomadas de decisão (LOUREIRO et al., 2018).

3.5 Evapotranspiração

A evapotranspiração (ET) é um fator importante tanto no ciclo hidrológico quanto na irrigação, estimativa do rendimento das culturas e gestão ambiental (AMANI; SHAFIZADEH-MOGHADAM, 2023). As necessidades hídricas das culturas estão ligadas à evapotranspiração da cultura que integra a transpiração das culturas e a evaporação do solo (MIRA-GARCIA et al., 2021). Há estudos onde a união de métodos e tecnologias são utilizados para aumentar a eficiência da irrigação. A evapotranspiração (ET), sensores de umidade do solo e tecnologias

de irrigação inteligente baseadas em plantas são utilizadas para programar eventos de irrigação considerando o clima, as condições de umidade do solo e o estado hídrico da planta (KUMAR et al., 2023). Para muitas aplicações, utiliza-se a evapotranspiração da cultura (ETc) e o coeficiente da cultura (DAS et al., 2023). Para Chen et al. (2022), a quantificação dos fatores na evapotranspiração pode aumentar a precisão da estimativa do consumo de água do solo. A evapotranspiração de referência pode ser estimada usando modelos matemáticos, como o modelo da FAO-56 Penman–Monteith.

3.6 Irrigação por taxa variável

De acordo Gaso, Berger e Ciganda (2019), as propriedades do solo das áreas agrícolas são muito heterogêneas e, como resultado, as condições de cultivo das culturas são altamente variáveis. Tradicionalmente, essa variabilidade do solo e da cultura eram ignoradas, de modo que a água era aplicada da maneira mais uniforme possível (DACCACHE et al, 2015). Daccache et al (2015) ainda acrescentam que, como os solos são comumente heterogêneos, a irrigação uniforme, pode condicionar algumas áreas ao déficit e/ou excesso de irrigação, acarretando ineficiência do uso da água. Sendo assim, a irrigação por taxa variável (ITV) é uma solução considerável por considerar a variabilidade espaço-temporal do campo. Além de fornecer a quantidade variável de água para uma área específica seguindo as necessidades hídricas da cultura (KAMYSHOVA et al, 2022).

O sistema de irrigação a taxa variável demonstrou fornecer melhor eficiência no uso da água, enquanto aumenta o rendimento das culturas. Este sistema utiliza taxas adequadas para cada zona de manejo de irrigação (GOBBO et al, 2019). Para Mendes et al (2019), a irrigação a taxa variável é a capacidade de variar espacialmente a profundidade de aplicação de água em um campo para lidar com diferentes tipos de solos, culturas e outras condições.

Portanto, é importante buscar eficientes estratégias de gestão de irrigação de menor consumo hídrico, de modo que não impacte os rendimentos das culturas ou o seu desenvolvimento. De acordo Irmak et al (2021), os métodos existentes devem ser avaliados, melhorados e implementados, especialmente em regiões com limitação de água para aumentar a produtividade das culturas e proteger a sustentabilidade dos recursos hídricos. O sistema de ITV pode economizar até 25% de água, com o mesmo rendimento, seguindo o critério de capacidade de retenção de água espacialmente variáveis, uso de água nas culturas ou tipo de culturas (MCCARTHY et. al, 2023).

3.7 Sistemas diversificados

A crescente produção de alimentos derivado crescimento populacional e revolução industrial gerou impactos ambientais indesejáveis, como perda de biodiversidade, degradação e contaminação do solo, água, ar e alimentos por pesticidas (ALLETO; VANDEWALLE; DEBAEKE, 2022). A diversificação das culturas surge como estratégia para diminuir os impactos e a dependência dos insumos agrícolas.

Os sistemas de produção de hortaliças apresentam uma ampla gama de culturas. A diversificação traz benefícios ao meio ambiente e à produtividade agrícola. Isso permite que esses sistemas lidem com riscos e incertezas envolvidos na produção (BURBANO-FIGUEROA et al., 2022). O cultivo diversificado reduz insumos externos, pode melhorar a fertilidade do solo e interromper os ciclos de ervas daninhas e doenças, aumentando os rendimentos, além de proporcionar uma renda mais estável e diversificada para o agricultor (NASCIMENTO; VILLEGRAS; CANTERO-MARTÍNEZ, 2023). As projeções de mudanças climáticas indicaram futuros desafios espaço-temporais para a estabilidade da produção ao longo do tempo, especialmente para sistemas agrícolas menos diversificados (CARCEDO et al., 2022).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O projeto foi desenvolvido nos Laboratórios de Hidráulica e Irrigação e no Laboratório de Projetos de Máquinas Agrícolas do Departamento de Engenharia, pertencente ao Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). A execução do projeto ocorreu em três etapas: a) construção do protótipo; b) comunicação eletrônica do sistema de irrigação e, c) avaliação da barra gotejadora.

4.1 Construção do protótipo

4.1.1 Concepção do projeto

O protótipo é composto por uma barra gotejadora móvel, mangueira flexível, carretel enrolador e sistema eletromecânico para a sua movimentação no campo. A barra gotejadora móvel tem comprimento máximo de seis metros, composta em estrutura PVC (Policloreto de vinila) e metálica, uma linha principal (responsável por aplicar a maior lâmina ao longo da barra) e quatro linhas de derivação de um metro de comprimento (responsáveis por fazer ajuste das lâminas inferiores à lâmina máxima em cada canteiro individualmente). Cada linha de derivação possui três linhas laterais com quatro gotejadores de mesma vazão, permitindo a aplicação da água próxima à superfície do solo. Na entrada de cada linha de derivação há uma válvula de comando elétricos, permitindo o controle do fluxo de água nas linhas individualmente.

O carretel enrolador é responsável pelo deslocamento da barra gotejadora e o ajuste da velocidade de deslocamento. O deslocamento de ida e volta da barra gotejadora ocorre automaticamente, sendo a metade da lâmina requerida aplicada na ida e metade na volta. Isso evitará que o agricultor necessite desenrolar a mangueira do carretel e posicionar o sistema no final da área, como ocorre com os modelos de autopropelidos disponíveis no mercado.

Sendo assim, o sistema eletromecânico de movimentação da barra gotejadora possui uma mangueira flexível, estruturas de sustentação com rodas, a fim de permitir o deslocamento ocasionado pelo enrolamento/liberação da mangueira flexível. O deslocamento ocorre quando o carretel enrolador faz a liberação ou enrolamento da mangueira de alimentação de água permitindo que a barra se move para o final ou início dos canteiros. Junto ao carretel enrolador há uma central de controle eletrônica composta por microcontrolador, ponte H (responsável por

alterar o sentido de rotação do motor), motor DC (para enrolar e/ou desenrolar a mangueira flexível), moto-redutor (responsável por reduzir a velocidade do motor), módulo SD (para ler as lâminas requeridas para a aplicação) e módulo radiofrequência para comunicar com o painel de controle existente na barra gotejadora. Por meio dos microcontroladores, é realizada a calibração em campo e de acordo com as culturas disponíveis, identificar as lâminas para determinar a velocidade de deslocamento e o tempo de acionamento das válvulas.

Visando atender a variabilidade ocorrente em ambas as direções, a barra gotejadora aplica a lâmina em cada canteiro individualmente, podendo também alterar a sua aplicação ao longo do canteiro, caso a necessidade hídrica da cultura seja alterada. O ajuste das lâminas entre canteiros ocorre por meio da relação entre as lâminas de cada canteiro e a lâmina máxima entre eles. Adicionalmente, essas lâminas são reguladas pela técnica de acionamento por pulsos das válvulas solenoides. Enquanto isso, o ajuste ao longo dos canteiros é efetuado pela velocidade de deslocamento de deslocamento da barra, calculada automaticamente pelo sistema de controle, com base na vazão das linhas laterais e espaçamento entre elas.

4.1.2 Barra gotejadora

A construção do protótipo foi iniciada na parte estrutural da barra gotejadora, seguindo por sua parte hidráulica, mecânica e eletrônica. A parte estrutural da barra gotejadora possui material PVC e metálico, comprimento máximo de seis metros, dividida em quatro seções de aplicação de lâmina de irrigação, atendendo a quatro canteiros simultaneamente de 1,20 m de largura ou seis canteiros de 1,00 m de largura.

A barra gotejadora possui uma tomada de água que é alimentada por meio da mangueira flexível de $\frac{1}{2}$ " (Tramontina), que está conectada ao carretel enrolador. A tomada de água é composta por um filtro de tela de $\frac{3}{4}$ " (Amanco) (120 mesh e vazão de $5 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$), a fim de evitar a obstrução dos emissores, e um manômetro (Conec-Rio) para a aferição da pressão de entrada da barra. Após a tomada de água, a barra possui uma linha principal em PVC de 32 mm (Amanco), que é responsável por conduzir água até as linhas de derivação e por fim, até as linhas laterais (FRIZZONE et al., 2012).

A linha principal alimenta quatro linhas de derivação, que são tubos que suprem as linhas laterais a partir das linhas principal. Na entrada de cada linha de derivação, há uma válvula solenoide (PGV-100, HUNTER), responsável por regular a lâmina a ser aplicada individualmente em cada canteiro. O volume de água na chegada das válvulas atende a maior

lâmina entre canteiros e é constante até que as culturas ao longo dos canteiros mudem. Cada canteiro é irrigado por três linhas laterais, de 1,00 m de comprimento e quatro emissores de mesma vazão, espaçados a 0,25 m entre si, formando uma faixa molhada na superfície de aplicação. As linhas laterais são tubos sobre os quais os emissores estão instalados, que tem como função conduzir água das linhas de derivação até os emissores (FRIZZONE et al., 2012). As linhas de derivação (Figura 1 (2)) e laterais (Figura 1 (7)) possuem material de polietileno de 16 mm.

O número de linhas laterais, largura dos canteiros e carreadores foram definidos seguindo como exemplo a área de produção de olerícolas do Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA), conhecido como Fazendinha Agroecológica Km 47, que é uma área de produção animal e vegetal, resultado da parceria entre a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa – Agrobiologia e Solos), Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro (Pesagro-RJ), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e Colégio Técnico da UFRRJ (CTUR) (EMBRAPA, 2023). Na área de produção de olerícolas da Fazendinha Agroecológica Km 47, cada canteiro possui três fileiras de cultivo, com dimensões de 1,20 m de largura e 0,40 m de espaçamento entre canteiros (carreadores), ou seja, 1,20 m x 0,40 m.

A barra gotejadora possui duas estruturas de sustentação e cada uma se encontra a 1,60 m da tomada de água (ponto central da barra gotejadora). A estrutura de sustentação da barra gotejadora tem formato triangular duplo (estruturas idênticas paralelas 0,20 m entre si), a fim de ganhar maior resistência, unidas por eixos metálicos, com 0,30 m de comprimento e um par de rodas acoplados em cada estrutura (Figura 1 (6)). A estrutura de sustentação possui base metálica com 1,00 m de comprimento e 0,80 m de altura do solo. As rodas possuem material plástico de 0,15 m de diâmetro externo e largura de 0,025 m e suportam até 30 kg cada. A linha principal (Figura 1 (1)) é sustentada por tubos metálicos que são unidos por curvas de mesmo material. A linha principal está a 1,00 m de altura do solo. A barra gotejadora pode ser observada na Figura 1.



1: Linha principal; 2: Linha de derivação; 3: Válvula solenoide; 4: Tomada de água; 5: Painel de controle; 6: Estrutura de sustentação; 7: Linha lateral; 8: Carretel.

Figura 1 – Perfil da barra gotejadora

Para atender ao critério da variabilidade espacial existente nas hortas, a vazão na linha principal será correspondente a maior lâmina necessária entre os quatro canteiros. O ajuste das lâminas entre os demais canteiros será efetuado por meio lâmina relativa (l_r), que é a relação entre as lâminas individuais de cada canteiro e a lâmina máxima entre eles. A Equação da obtenção da lâmina relativa (l_r) pode ser observada na Equação 1.

$$l_{r(1,2,3,4)} = \frac{l_{(1,2,3,4)}}{l_{max}} \quad (1)$$

em que:

$l_{r(1,2,3,4)}$ – Lâmina relativa (adimensional) (l_{r1} para canteiro 1, l_{r2} para canteiro 2, l_{r3} para canteiro 3 e l_{r4} para canteiro 4);

$l_{(1,2,3,4)}$ – Lâminas individuais (mm) (l_1 para canteiro 1, l_2 para canteiro 2, l_3 para canteiro 3 e l_4 para canteiro 4);

l_{max} – Lâmina máxima entre os quatro canteiros naquele ponto (mm).

Entretanto, a aplicação da lâmina em cada canteiro é controlada pelo tempo de acionamento (t_a), que é o tempo que cada válvula permanecerá ligada em seu ciclo até atender a lâmina requerida pelos canteiros. Mas, para obter o tempo de acionamento, primeiramente é necessário obter o tempo relativo (t_r), que é a resultante entre a lâmina relativa (l_r) na equação ajustada da válvula solenoide (Equação 2).

$$t_{r(1,2,3,4)} = 1,054l_r - 0,2567 \quad (2)$$

em que:

$t_{r(1,2,3,4)}$ – Tempo relativo de abertura no ciclo (adimensional);

$l_{r(1,2,3,4)}$ – Lâmina relativa (adimensional) (l_{r1} para canteiro 1, l_{r2} para canteiro 2, l_{r3} para canteiro 3 e l_{r4} para canteiro 4);

O tempo relativo é obtido após a escolha dos emissores e a obtenção da equação de calibração da válvula solenoide, descritos nos itens 4.2 e 4.3. Adicionalmente, o tempo de acionamento (t_a) é a resultante do tempo relativo e o ciclo de funcionamento de trinta segundos (ciclo determinado para que a barra não passe por uma cultura sem irrigá-la) (Equação 3).

$$t_{a(1,2,3,4)} = t_{r(1,2,3,4)} \times 30 \quad (3)$$

em que:

$t_{a(1,2,3,4)}$ – Tempo de acionamento (s);

t_r – Tempo relativo (adimensional).

Cada válvula possui um tempo de acionamento individualizado, mas para o canteiro que possui a lâmina máxima requerida, a válvula permanecerá constantemente aberta até que a lâmina requerida mude. O ciclo de funcionamento é de trinta segundos de irrigação, a fim de garantir que não haverá cultura sem receber a lâmina requerida.

Apesar do ajuste entre canteiros buscar atender a variabilidade existente nas hortas, ainda não é o suficiente devido a variabilidade existente ao longo do canteiro. Isso ocorre por que os sistemas de produção de hortaliças apresentam uma ampla gama de culturas (Burbano-Figueroa et al., 2022). É muito comum ocorrer a variação da produção de culturas entre canteiros e ao longo dele. A variação ao longo do canteiro pode ocorrer por culturas idênticas, mas em estágios de desenvolvimento diferentes ou até mesmo por outros tipos de cultura, alterando a sua necessidade hídrica. O ajuste das lâminas por meio da velocidade de deslocamento ocorre conforme apresentado a Equação 4.

$$v = \frac{Q}{e \times l_{max}} \quad (4)$$

em que:

V – Velocidade ($m s^{-1}$);

Q – Vazão da linha lateral ($m^3 s^{-1}$);

e – Espaçamento entre linhas laterais (m); e,

l_{max} – Lâmina máxima de água a ser aplicada (m).

Análogo a equação do tempo relativo (t_r), a velocidade da barra é ajustada para atender a lâmina máxima entre os canteiros naquele ponto. Esta é recalculada a cada mudança de cultura ou fase de desenvolvimento das plantas. A identificação da mudança de lâmina requerida ocorre por meio da posição da cultura, em metros. Para isso, é necessário que ocorra uma calibração prévia da área de irrigação antes que o sistema de irrigação comece a irrigar. Sendo assim, as lâminas e as posições são inseridas no cartão de memória do carretel enrolador. Ou seja, a barra

inicia o seu deslocamento na posição zero, e à medida que a cultura ao longo do canteiro muda, sua lâmina requerida mudará e consequentemente, a velocidade de deslocamento. Sendo assim, quanto maior for a lâmina a ser irrigada, menor a velocidade de deslocamento.

Para o cálculo da distância, o tempo é contado quando o sistema se inicia e usa a velocidade de deslocamento atual como base (Equação 5).

$$d_{(t)} = d_{(t-1)} + v \times \Delta t \quad (5)$$

em que:

d – Distância atual (m);

V – Velocidade inserida no cartão ($m.s^{-1}$);

Δt – Variação entre o tempo inicial e o tempo final (s).

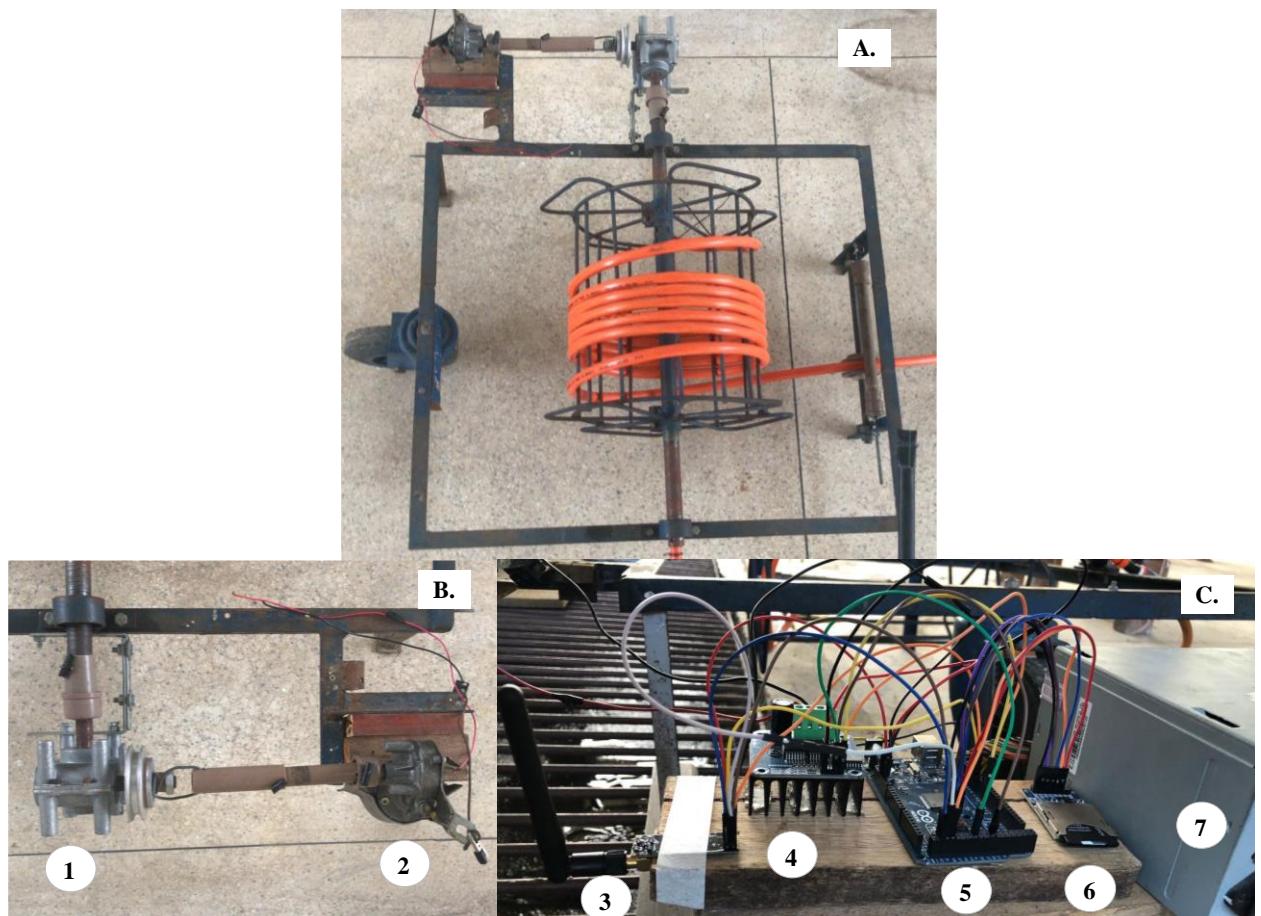
4.1.3 Carretel enrolador

A barra é ligada a um carretel enrolador de mangueira que fica posicionado na extremidade final dos canteiros, sendo responsável pela conexão entre a captação de água e o seu abastecimento, assim como o deslocamento da barra e o controle de velocidade. O carretel é composto por um motor de corrente contínua de 12 V (Bosch), 72 rotações por minuto (RPM), moto-redutor 1:25 (Redupar), que é utilizado como redutor de velocidade do motor elétrico, e uma central de controle eletrônica. A central de controle eletrônica é composta por uma fonte de 12 V, microcontrolador (Arduíno mega 2560), módulo para leitura e escrita em cartão SD, módulo driver Ponte H, modelo BTS7960 (comunicação IBT_2), que permite alterar o sentido de rotação do motor e o módulo de radiofrequência NRF24l01 (Nordic Semiconductors), utilizado como emissor de dados para a barra gotejadora.

O deslocamento da barra gotejadora ocorre automaticamente, proporcionando a aplicação da metade da lâmina requerida na ida e metade na volta. Adicionalmente, o carretel enrolador efetua a liberação e o enrolamento da mangueira de alimentação de água de forma automática.

A estrutura do carretel enrolador é em ferro, com chassi quadrado e eixo cilíndrico no centro (Figura 2A). O carretel possui uma central de controle eletrônica (Figura 2C) que controla o motor (Figura 2B (2)), sendo esse ajuste no sentido de rotação e na sua velocidade. Na central de controle eletrônica, por meio do microcontrolador (Figura 2C (5)), o módulo de

cartão SD (Figura 2C (6)), lê as lâminas requeridas e a distância de mudança de lâminas, que são previamente inseridas pelo usuário, e automaticamente, faz o cálculo da velocidade para atender a lâmina máxima. Com a velocidade identificada, o módulo Ponte H, faz a alteração do sentido de rotação do motor, que enrolará a mangueira flexível até o fim do canteiro e simultaneamente, o módulo de radiofrequência enviará as lâminas relativas (I_r) calculadas para o painel de controle eletrônico da barra gotejadora. O perfil do carretel enrolador pode ser observado na Figura 2.



1: Moto-redutor; 2: Motor DC; 3: Módulo radiofrequência; 4: Ponte H; 5: Microcontrolador; 6: Módulo SD; 7: Fonte de alimentação.

Figura 2 – A. Carretel enrolador; **B.** Moto-redutor e motor DC; **C.** Central de controle.

O controle da Ponte H é realizado pelo PWM (Modulação por Largura de Pulso) no microcontrolador e, que consiste na geração de uma onda quadrada na frequência de 980 Hz, que pode ser controlada na percentagem do tempo em que a onda permanece em nível lógico alto (IFSC, 2023). Esse tempo, chamado de *Duty Cycle* (Ciclo de trabalho), consegue alterar a potência do motor, que interfere diretamente na velocidade, que é o mecanismo de ajuste de velocidade.

Para relacionar a velocidade e o PWM, foi realizada uma curva de calibração considerando cinco valores de PWM e as velocidades correspondentes foram calculadas por meio da distância e tempo de deslocamento, conforme Equação 6.

$$v = \frac{d}{t} \quad (6)$$

em que:

v – Velocidade correspondente (ms^{-1});

d – Distância (m);

t – Tempo (s);

Os valores de PWM utilizados foram 55, 128, 155, 205 e 255. O PWM trabalha na faixa de 0 a 255, onde 0 é a condição em que o motor está desligado e 255 é o valor em que o motor atinge a sua velocidade máxima (Figura 3). O comportamento resultante da calibração é linear, com o valor de R^2 próximo a 1. Sendo assim, para cada lâmina máxima (l_{\max}) identificada ao longo do canteiro, a velocidade é reduzida por meio do PWM encontrado.

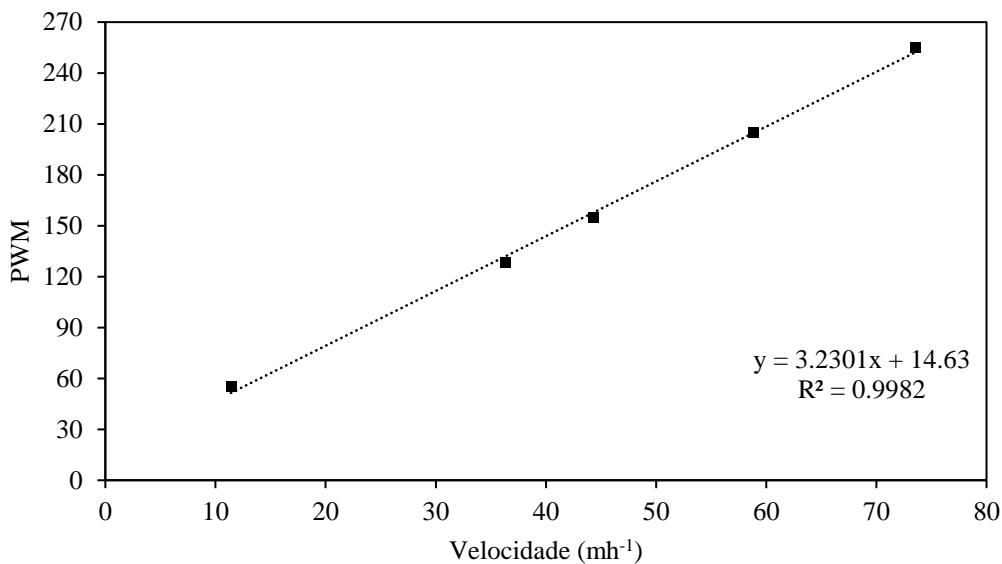


Figura 3 – Correlação entre PWM e velocidade do motor

A velocidade máxima da barra gotejadora é de 71 mh^{-1} e a mínima é de 11 mh^{-1} . Essas velocidades foram consideradas para identificar a faixa de trabalho da barra gotejadora, onde as lâminas requeridas variam de 0,5 mm a 2,5 mm. Entretanto, a barra gotejadora pode aplicar

até o dobro dessas lâminas, porque as lâminas são aplicadas de forma parcial, sendo metade na ida e metade na volta.

4.1.4 Desenvolvimento do deslocamento automático de ida e volta da barra gotejadora

O deslocamento automático de ida da barra gotejadora ocorre por meio do carretel enrolador. O carretel enrolador fica fixo na posição final do canteiro e a mangueira flexível puxa a barra na direção do carretel. O mecanismo de volta ocorre de forma similar, entretanto no sentido oposto. Ou seja, para que a barra volte a posição inicial dos canteiros de forma automática, é necessário que haja uma estrutura fixa na extremidade inicial do canteiro para puxar a barra quando esta estiver na posição final (posição próxima ao carretel).

Essa estrutura é um rolete de PVC, de 50 mm de diâmetro e 50 cm de comprimento, com dois rolamentos (um em cada extremidade do tubo) e na parte interna do tubo, entre os rolamentos, passa um tubo de PVC de 25 mm e 70 cm de comprimento. Nas extremidades do tubo de 50 mm foi encaixado tampões de PVC de mesmo diâmetro, a fim de criar uma barreira limitante para a corda (a corda é responsável por puxar a barra na direção do rolete). O rolete de PVC fica preso a um cavalete de madeira a um metro de distância da posição inicial da barra gotejadora. Entretanto, somente a estrutura não permite o deslocamento de volta da barra. Para que isso ocorra, uma corda de nylon de 8 mm é presa ao centro da barra gotejadora no sentido oposto da mangueira flexível. A corda presa à barra passa pelo rolete de PVC e é presa ao eixo cilíndrico do carretel. Outro ponto importante é que a corda é presa em uma extremidade do eixo cilíndrico carretel, oposta a extremidade que a mangueira flexível é enrolada. Isso permite que uma gire no sentido contrário da outra. Ou seja, quando a mangueira flexível puxa a barra, a corda é desenrolada e não traciona a barra no sentido oposto e quando a barra retorna à posição inicial, a mangueira é desenrolada (e a corda enrolada pelo carretel), gerando tração e puxando a barra gotejadora na sua direção. O croqui do rolete de PVC pode ser observado na Figura 4.

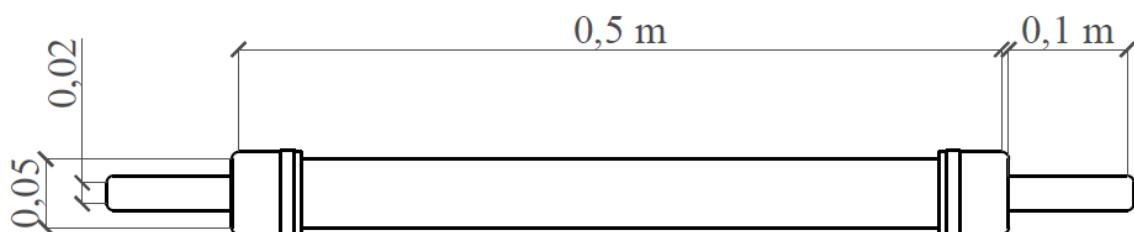


Figura 4 – Croqui do rolete de PVC

Na Figura 5 é apresentado o mecanismo de deslocamento da barra gotejadora, composta pelo cavalete, o rolete de PVC e a barra gotejadora, para maior visualização do mecanismo de deslocamento da barra.



Figura 5 – Mecanismo de deslocamento de volta da barra gotejadora

Na Figura 6, observa-se todos os componentes do sistema. Nota-se que para que esse deslocamento ocorra, o rolete de PVC fixado no cavalete devem estar posicionados antes da posição inicial de irrigação da barra gotejadora, enquanto o carretel enrolador deve estar posicionado na outra extremidade. Também é possível observar que no eixo cilíndrico do carretel, a mangueira e a corda estão em paredes opostas e enquanto a mangueira está totalmente desenrolada (condição da posição inicial da barra), a corda está enrolada.



Figura 6 – Barra gotejadora, carretel enrolador e o mecanismo de deslocamento de volta

4.2 Comunicação eletrônica do sistema de irrigação

No centro da barra gotejadora há um painel eletrônico composto por uma fonte de alimentação regulável DC (Hikari), modelo HF-3203S, utilizada para ajustar a tensão de 127 V a 24 V para a alimentação das válvulas solenoides, microcontrolador (Arduíno mega 2560), módulo relé 5V, utilizado para o controle do tempo de acionamento das válvulas solenoides, fonte ajustável 3,3 V a 5 V, para alimentação do módulo relé e o módulo NRF24l01 (Nordic Semiconductors), que é um módulo que permite a comunicação via radiofrequência de 2,4 GHz

e taxa de transmissão de 250Kbps ao ar livre. O módulo de radiofrequência foi utilizado na barra gotejadora como receptor de dados do carretel. Na Figura 7, pode ser observado o esquemático de ligação dos componentes do painel eletrônico da barra gotejadora, realizado no Software Fritzing.

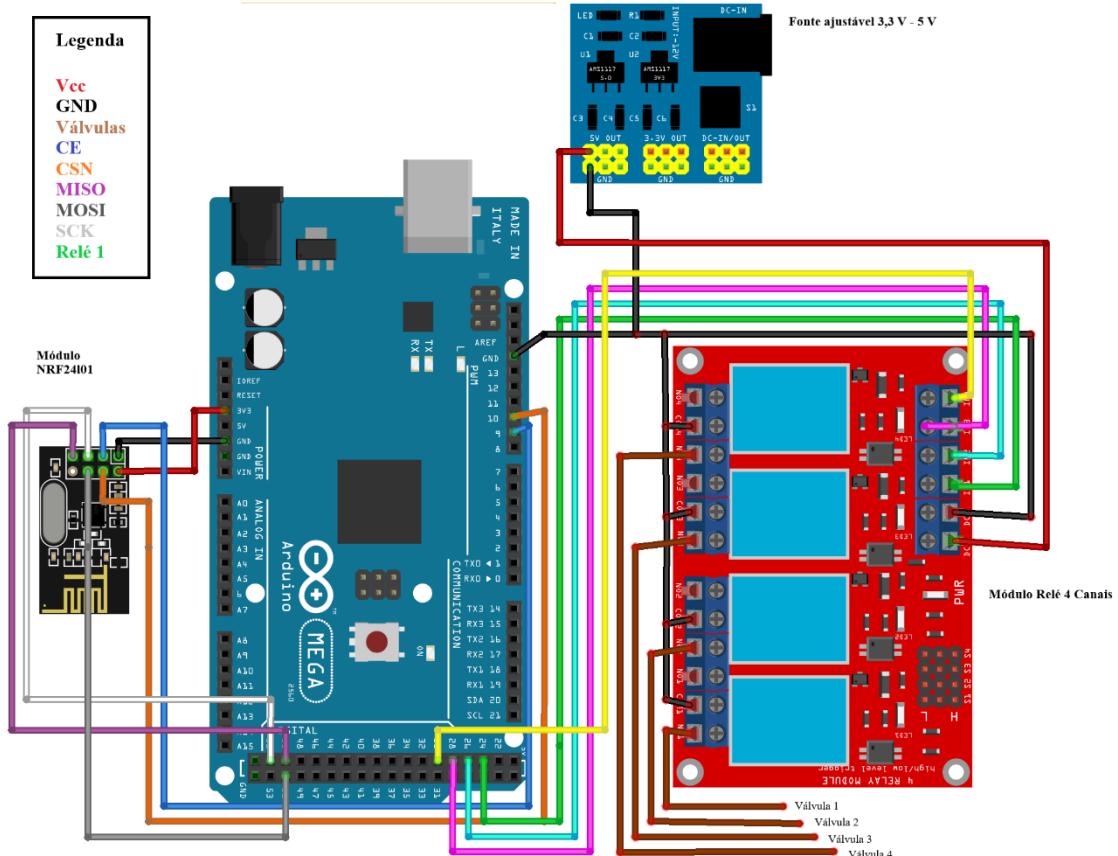


Figura 7 – Esquemático de ligação dos componentes do painel de controle eletrônico da barra gotejadora

O esquemático de ligação dos componentes da central do controle do carretel, realizado no Software Fritzing, pode ser observado na Figura 8.

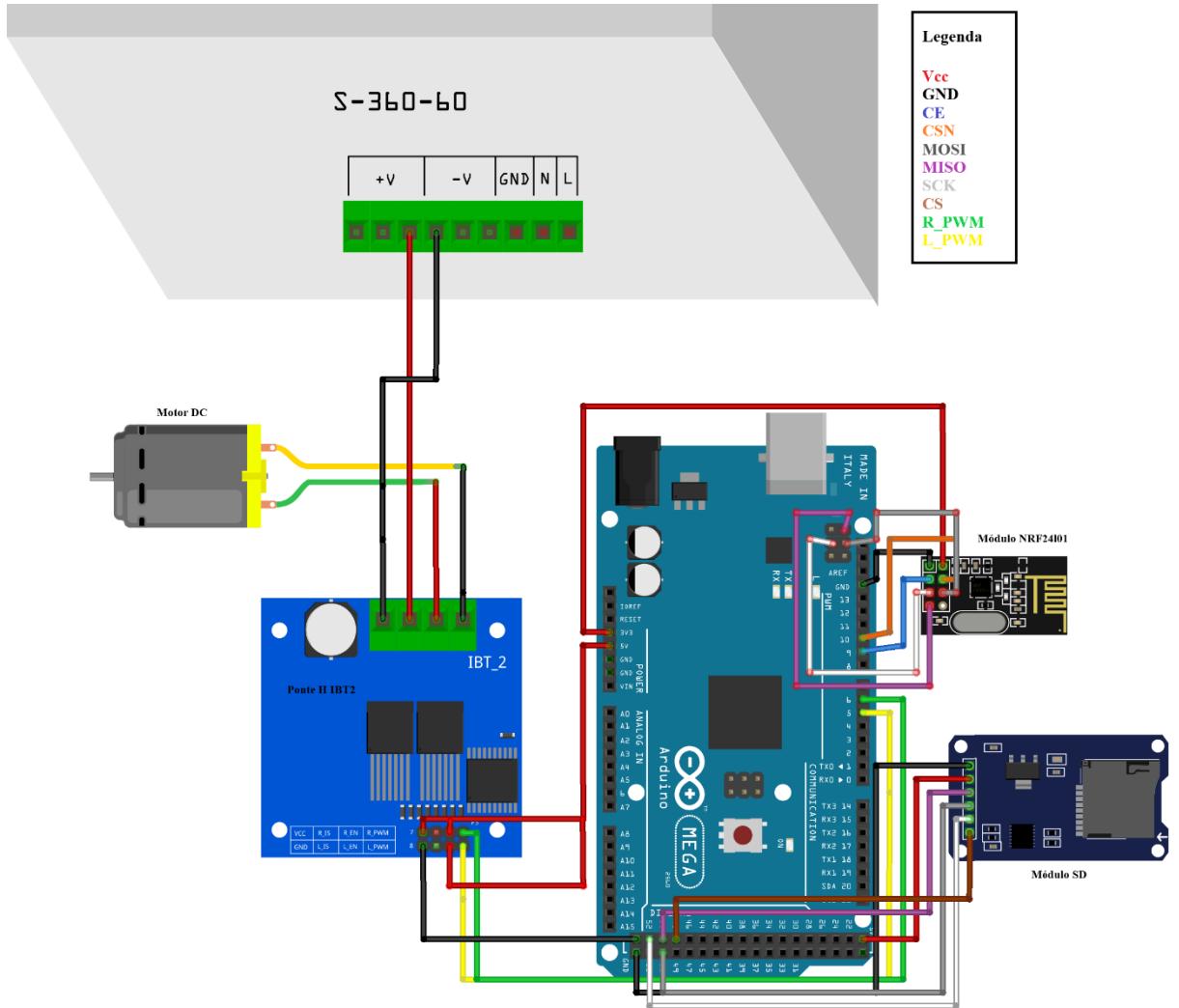


Figura 8 – Esquemático de ligação dos componentes da central de controle do carretel enrolador

4.2.1 Algoritmo utilizado para o ajuste de velocidade no carretel enrolador

Todo o sistema de comunicação se inicia no carretel enrolador. O algoritmo do carretel está subdividido em quatro funções, sendo estas: leitura das lâminas requeridas e posição das culturas no cartão de memória; cálculo da lâmina máxima; emissão de dados via radiofrequência; e cálculo do PWM para o ajuste da velocidade. Quando o algoritmo é iniciado, as lâminas requeridas, suas posições e as posições de alteração das lâminas são identificadas. Para isso, também é contado o tempo de inicialização do sistema. Em seguida, a velocidade é calculada e posteriormente, a lâmina máxima é obtida, assim como as lâminas relativas. As lâminas relativas são enviadas à barra gotejadora e o PWM correspondente a velocidade é calculado. Simultaneamente, a distância percorrida da barra é atualizada automaticamente com os valores de velocidade e tempo de inicialização do algoritmo.

A posição de alteração das lâminas é a distância em metros que as novas lâminas requeridas estão posicionadas. Quando a distância percorrida for igual a posição das novas culturas (dm), um novo ciclo no algoritmo é iniciado. Ou seja, todo o processo de leitura no cartão de memória, obtenção da velocidade, da lâmina máxima, lâminas relativas, envio de dados para a barra gotejadora e obtenção do PWM correspondente são redefinidos de acordo com as novas lâminas.

Quando a distância for igual ou imediatamente maior que 20 (comprimento do canteiro), o sentido de rotação da barra é alterado de modo que o carretel desenrolará a mangueira flexível e a fará a irrigação aplicando a metade da lâmina requerida em cada ponto até retornar na posição inicial. Entretanto, a distância agora é decrescente e quando a distância for igual a zero (posição inicial do canteiro), não haverá rotação em nenhum sentido, pois o PWM será zero e a irrigação daqueles canteiros estará finalizada. Quando a barra alcançar a posição inicial, a irrigação na área de cultivo será finalizada. Na Figura 9, pode ser observado o fluxograma do algoritmo implementado para o ajuste da velocidade no carretel enrolador.

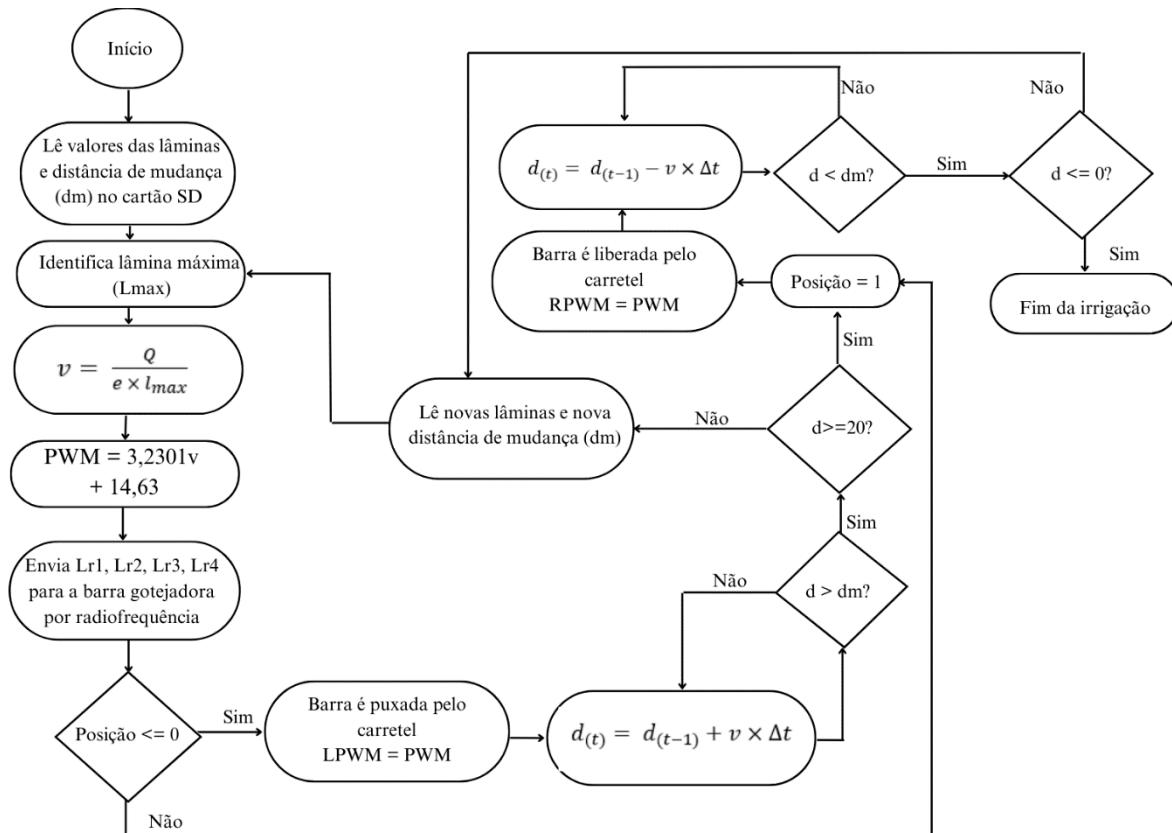


Figura 9 – Fluxograma da programação implementada no painel de controle do carretel enrolador

4.2.2 Algoritmo de ajuste de tempo de acionamento utilizado na barra gotejadora

O fluxograma da programação implementada no painel de controle eletrônico da barra gotejadora é ilustrado na Figura 10. Ao iniciar o algoritmo, inicia-se a contagem do tempo de inicialização e aguarda as informações das lâminas relativas (l_r) do carretel. Quando as lâminas relativas são recebidas, é identificada a lâmina máxima. Em seguida, o tempo relativo é calculado (t_r) e posteriormente é calculado o tempo de acionamento (t_a) de cada válvula que aplicará a lâmina requerida para cada canteiro.

Um novo tempo também é contabilizado após o recebimento das informações vindas do carretel. A diferença entre o tempo de inicialização do algoritmo e o tempo de recebimento dos dados enviados pelo carretel é utilizada como parâmetro condicional do tempo de acionamento das válvulas. Ou seja, esse parâmetro é utilizado para garantir que o tempo de acionamento não ultrapasse o tempo real de funcionamento do sistema. Quando o tempo ultrapassa o ciclo de trinta segundos, todo o algoritmo é reiniciado e o processo é repetido até que novos dados sejam recebidos.

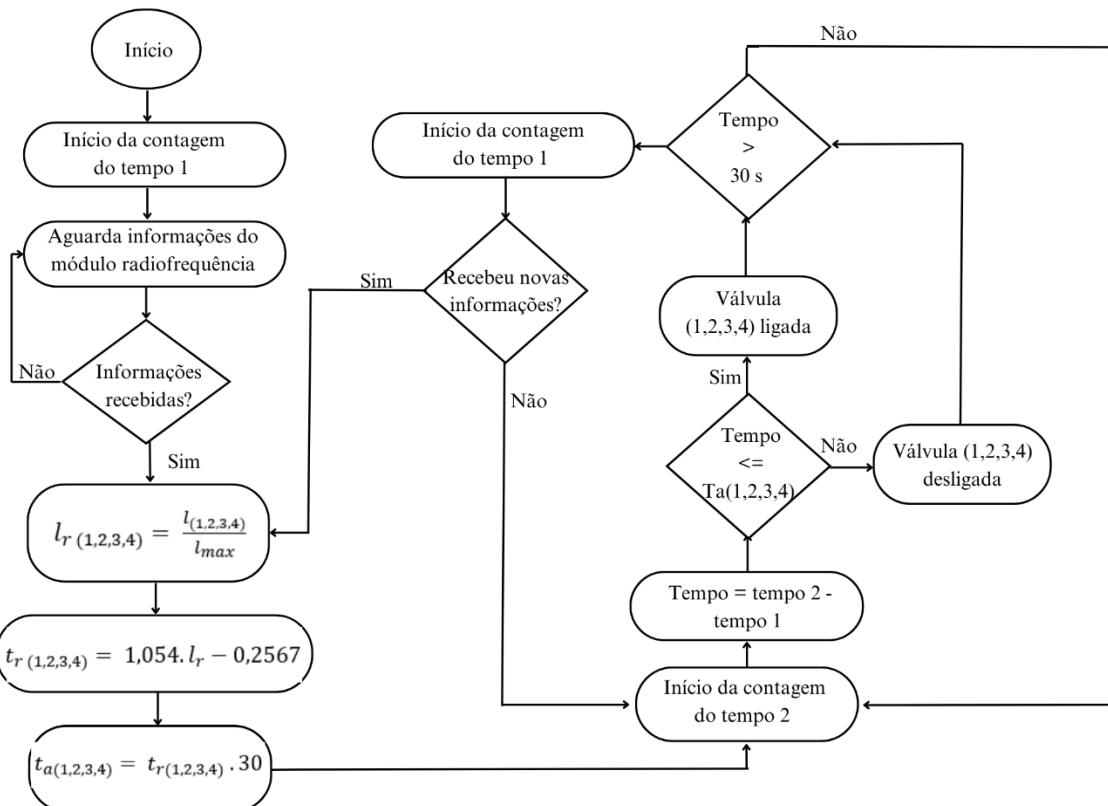


Figura 10 – Fluxograma da programação implementada no painel de controle eletrônico da barra gotejadora

4.3 Avaliação da barra gotejadora

A avaliação do sistema de irrigação está agrupada em (a) escolha dos emissores; (b) determinação das lâminas de irrigação; (c) avaliação hidráulica da barra gotejadora; (d) avaliação mecânica da barra gotejadora e (e) área potencial irrigável e avaliação de custo de implantação do sistema. A escolha dos emissores consiste na avaliação de três grupos de emissores a fim de analisar qual possuiu o melhor desempenho e qual supre melhor os critérios de funcionamento do sistema. A avaliação hidráulica da barra gotejadora consiste em avaliar se o sistema consegue atender aos critérios de variabilidade existente nas hortas. A avaliação mecânica analisará a robustez e o desempenho do sistema. Por fim, a avaliação da área potencial irrigável do sistema de irrigação e a avaliação de custo tem como objetivo apresentar o investimento construtivo da barra e comparar a outros sistemas existentes no mercado.

4.3.1 Escolha dos emissores

Para determinar o emissor, com o objetivo de avaliar o funcionamento do acionamento por pulsos a ser utilizado na barra gotejadora, foram executados ensaios com três tipos de emissores, sendo estes: gotejador não regulado (convencional), gotejador regulado (autocompensante) e microtubos. Os gotejadores não regulados possuem regime de fluxo turbulento, são de fácil obstrução e de fácil construção (Frizzone et al, 2012). Para o ensaio do gotejador não regulado, foi escolhido o gotejador do tipo On line, modelo Gotejador FT On Line (Amanco), com uma vazão nominal de quatro litros por hora e pressão de trabalho de 10 mca. Os gotejadores autocompensantes possuem fluxo turbulento ou transitório e apresentam vazões relativamente constantes dentro dos limites especificados de pressão (Frizzone et al, 2012). Para o ensaio dos gotejadores regulados, foi utilizado o gotejador autocompensante da fabricante Netafim, modelo botão gotejador PCJ, com vazão de quatro litros por hora e intervalo de pressão de serviço de 5 a 40 mca. Os microtubos são gotejadores de longo percurso. Possuem vazão controlada pela pressão, diâmetro e comprimento (Frizzone et al, 2012). Os microtubos utilizados foram do tipo espuague, da fabricante Plasnova, de diâmetro nominal de 8 mm e diâmetro interno de 1 mm.

Para a realização dos ensaios, foi simulado uma linha lateral de um metro, seguindo os critérios construtivos da barra. Na linha lateral, foram utilizados quatro emissores, do seu respectivo grupo e quatro coletores, um para cada emissor (Figura 11A). Foi utilizada uma

válvula solenoide de $\frac{3}{4}$ ", 12 VDC. O tempo de coleta total de cada ensaio foi estimado em cinco minutos, correspondendo a cinco ciclos de um minuto. O tempo foi controlado por um microcontrolador (Arduíno Uno), com auxílio de um módulo relé (Figura 11B). Também foi utilizado um computador para a inserção da programação e um cronômetro para acompanhar o tempo de ensaio. A bancada de ensaio era composta por uma motobomba 5 CV de potência (WEG) controlada por um inversor de frequência de modelo CFW10 (WEG) (Figura 11C), filtro de tela (Amanco), com o diâmetro de $\frac{3}{4}$ " e 120 mesh, regulador de pressão e manômetros no início e no final da linha para aferir a pressão de serviço do sistema, sendo a pressão de serviço de 10 mca. No caso dos microtubos, não foi utilizado o conjunto motobomba e sim uma caixa d'água elevada a 3 m acima da linha lateral.

No final de cada ensaio, os volumes dos coletores eram pesados a fim de adquirir a vazão equivalente do emissor. A vazão equivalente foi obtida conforme Equação 7.

$$q = \frac{m}{n_c \times t_c} \quad (7)$$

em que:

q – Vazão equivalente do emissor (Lh^{-1});

m – Massa do coletor (L);

n_c – Número de ciclos (adimensional);

t_c – Tempo do ciclo (h);

Para cada emissor, foram realizadas cinco repetições de ensaio, em dias diferentes para avaliar as condições de funcionamento, em horários de menor demanda elétrica, a fim de minimizar a variação da pressão por quedas de tensão na rede elétrica. Também foi realizada a correlação entre a vazão relativa dos emissores e o ciclo de tempo de funcionamento. Na Figura 11A, podemos observar como foi montada a bancada de ensaio dos emissores.



Figura 11 – A. Bancada de ensaio; **B.** central de controle do ensaio; **C.** Estação de controle do conjunto motobomba

4.3.1.1 Calibração do sistema de controle das lâminas entre canteiros

Após a etapa de seleção dos emissores, foi realizado um ensaio de calibração da válvula solenoide instalada na barra gotejadora. As válvulas de caracterização dos emissores foram válvulas diferentes das válvulas que compõem a barra. A válvula utilizada foi a solenoide PGV-100 (HUNTER) e os emissores utilizados foram do grupo dos gotejadores autocompensantes. O objetivo foi realizar a calibração do sistema de controle das lâminas entre os canteiros e obter a equação das lâminas individuais necessária em cada canteiro em relação ao tempo relativo.

O ensaio foi realizado na barra gotejadora, utilizando as quatro válvulas de controle. Entretanto, na amostragem, cada válvula atendeu apenas a uma linha lateral. A coleta da massa

de água foi realizada por calhas de 1,00 m de comprimento e coletores. As calhas têm a função de simular a faixa molhada de aplicação e os coletores de receber a massa escoada pelas calhas. As calhas possuem material PVC e diâmetro de 0,1 m. São divididas em duas partes de 0,50 m e posicionadas de forma inclinada, a fim de aumentar a velocidade de escoamento para o coletor, que se encontra abaixo do centro da calha. O croqui da calha e o coletor pode ser observado na Figura 12.

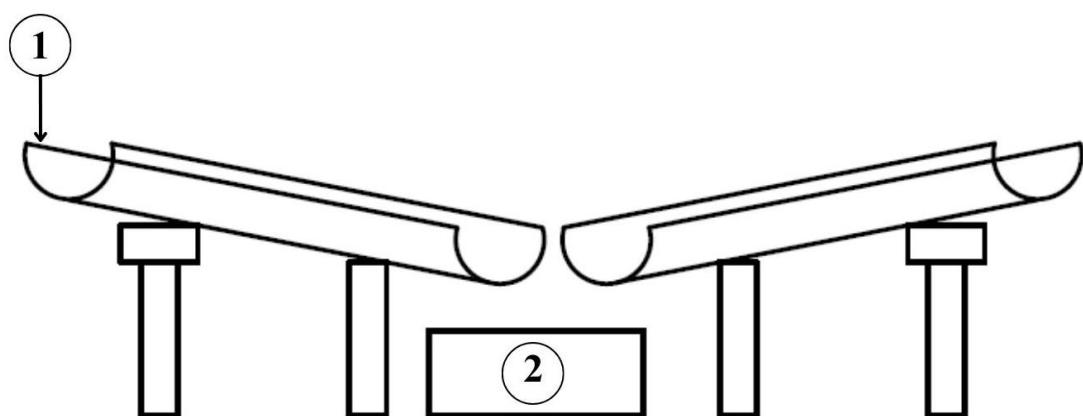


Figura 12 – Croqui da calha e coletor de ensaio. 1: Calha; 2: Coletor.

Para a calibração do sistema de controle de lâminas relativas, o tempo relativo (t_r) variou em percentuais de 10% a 100% (em intervalos de 10%), com a finalidade de obter uma relação entre lâmina e tempo relativo. Cada percentual foi executado em cinco ciclos de tempo, totalizando em dois minutos e meio, sendo o ciclo de funcionamento das válvulas de trinta segundos, similar aos ensaios de escolha dos emissores. A estrutura do ensaio pode ser observada na Figura 13.



Figura 13 – Ensaio de calibração da válvula PGV-100 (HUNTER)

Após a coleta das massas correspondentes aos percentuais de lâminas, as médias das massas foram obtidas e o volume médio foi calculado conforme a Equação 8.

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (8)$$

em que:

V – Volume (cm^3);

m – Massa (g);

ρ – Massa específica (gcm^{-3}).

Após a obtenção do volume, foi realizado o cálculo da lâmina correspondente (Equação 9).

$$l = \frac{V}{C_c \times e_{ll}} \quad (9)$$

em que:

l – Lâmina (mm);

V – Volume (L);

C_c – Comprimento da calha (m);

e_{ll} – Espaçamento entre linhas laterais (m).

O comprimento das calhas é de 1,00 m e o espaçamento entre linhas laterais é de 0,40 m. Posteriormente, foi gerada a curva de relação entre o tempo relativo e as lâminas relativas, ou seja, a lâmina proporcional ao percentual de tempo de acionamento da válvula. Para isso, primeiramente foi realizada uma média entre os quatro canteiros para cada intervalo de tempo (10% a 100%). Por fim, foi feita uma relação entre o cada intervalo e o valor total (Equação 10).

$$\text{Média relativa da lâmina} = \frac{\text{Média da lâmina}_{\{10\%[\dots]100\%}\}}{\text{Média da lâmina}_{100\%}} \quad (10)$$

em que:

Média relativa da lâmina (adimensional);

Média da lâmina $\{10\%[\dots]100\%\}$ (adimensional);

Média da lâmina $_{100\%}$ (adimensional).

Na Figura 14 é apresentada a relação entre o tempo relativo e a média relativa da lâmina. A Equação resultante é a equação da obtenção de tempo relativo utilizado na calibração das válvulas e ajuste do seu tempo resposta. Como a curva apresentou um resultado satisfatório e um bom valor de R^2 , a equação de T_r pode ser usada com segurança. Entretanto, os valores acima de 80% não foram considerados para a equação. Isso ocorre porque a partir desses valores, o relativo se torna constante em função da lâmina relativa e consequentemente diminuiria a eficiência da curva. Em termos de funcionamento da barra, o tempo de resposta da válvula é de 20% do ciclo. Sendo assim, a válvula que ficar constantemente aberta, está na verdade em 80% de funcionamento.

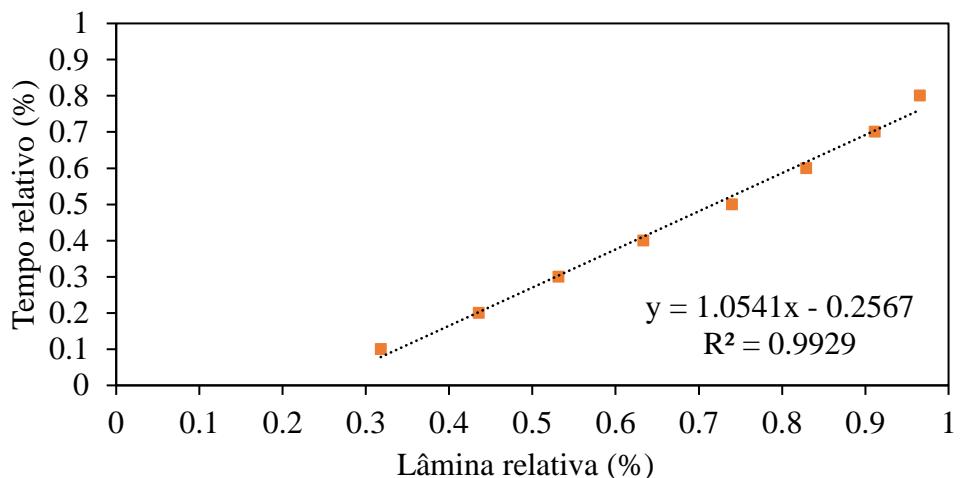


Figura 14 – Correlação entre tempo relativo e lâmina relativa

A aferição da pressão na entrada do carretel e na tomada de água da barra gotejadora também foi realizada com o objetivo de determinar a perda de carga na mangueira flexível e se essa perda de carga aumenta quando a mangueira é enrolada. A perda de carga foi determinada de acordo a Equação 11.

$$hf = PC - PB - z \quad (11)$$

em que:

hf – Perda de carga na mangueira flexível (mca);

PC – Pressão na entrada do carretel (mca);

PB – Pressão na entrada barra gotejadora (mca);

z – Altura do manômetro em relação ao solo (m).

4.3.2 Determinação das demandas hídricas das culturas

Para realizar a avaliação do sistema de irrigação em laboratório, foram simuladas as necessidades hídricas de culturas cultivadas na região. A obtenção das lâminas necessárias dessas culturas ocorreu por meio de estudos prévios e revisão de literatura. O estudo de Silva (2019), intitulado por Desempenho Agroecônomico de um Módulo de Cultivo Orgânico Diversificado de Hortaliças com Foco no Balanço de Nitrogênio, ofereceu dados como as

culturas cultivadas na Fazendinha Agroecológica Km 47, que foi uma área estudada para definir parâmetros construtivos da barra gotejadora, assim como período de cultivo, área cultivada etc.

Segundo Silva (2019), na Fazendinha Agroecológica Km 47, os cultivos no módulo são divididos em ciclos cultivos de outono/inverno e cultivos de primavera/verão. A autora ainda acrescenta que a maioria das culturas são cultivadas entre o período sazonal outono/inverno, porque no período de outubro a março, primavera/verão, as condições climáticas na região são limitadas para o cultivo de hortaliças. Na Tabela 1, pode-se observar as culturas cultivadas no ano de 2018 na Fazendinha Agroecológica Km 47.

Tabela 1 – Cultivos presentes no Módulo de Cultivo Orgânico Intensivo de Hortaliças e suas funcionalidades no sistema na Fazendinha Agroecológica Km 47, 2018.

Cultivo	Nome científico	Funcionalidade
Acelga	Beta vulgaris var. cicla	GR/ DE
Alface-americana	Lactuca sativa L., cv. Angelina	GR/ DE
Alface-crespa	Lactuca sativa L., cv. Vera	GR/ DE
Alface-crespa vermelha	Lactuca sativa L., cv. Red fire	GR/ DE
Alface-lisa	Lactuca sativa L., cv. Regina 2000	GR/ DE
Alface-romana	Lactuca sativa L., cv. Branca de Paris	GR/ DE
Banana	Musa paradisiaca L.	GR/ DE
Batata-doce	Ipomoea batatas L., var. locais	GR/DE
Bertalha	Basella alba L., var. Local	GR/ DE / PS
Beterraba	Beta vulgaris L., var. Early Wonder Tall Top	GR/ DE
Bucha	Luffa aegyptiaca L. var. Local	GR/ DE/ PS
Campim elefante	Pennisetum purpureum Schumach., cv. Cameroon	PB/ DE
Capim Limão	Cymbopogon citratus (DC) Stapf.	GR / DE/ AI / CP
Capuchinha	Tropaeolum majus L. var. Anã Sortida	GR/DE
Cebolinha	Allium fistulosum L., var. local	GR/ DE
Cenoura	Daucus carota L., var. Brasília	GR/ DE
Chicória	Cichorium endívia L., cv. Elysee	GR/ DE
Coentro	Coriandrum sativum L.	IA/ GR/ DE
Couve	Brassica oleracea L., var. acephala DC.	GR/ DE
Crotalária juncea	Crotalaria juncea L.	PB/ AD/ IA
Crotalária spectabilis	Crotalaria spectabilis L.	PB/ AD/ IA
Cúrcuma	Curcuma longa L.	GR/ DE
Espinafre	Spinacia oleracea L., var. Nova Zelândia	GR/ DE
Feijão comum	Phaseolus vulgaris var. BRS Campeiro	GR / DE
Feijão de porco	Canavalia ensiformis	PB/AD
Feijão fava	Phaseolus lunatus L. cv. rajada vermelha	GR / PB/ AD
Feijão guandu	Cajanus cajan, L. cv. Mandarim	GR / PB/ AD
Feijão Vagem	Phaseolus vulgaris L., var. Alessa e var. Novirex	GR/ DE
Flemingea	Flemingia macrophylla Willd	PB/ AD

Funcho	Foeniculum vulgare Mill	GR/ DE / AI
Gengibre	Zingiber officinale Willd	GR/ DE
Gergelim preto	Sesamum indicum L.	GR/ DE
Girassol	Helianthus annuus L.	AI
Gliricidia	Gliricidia sepium (Jacq.)	PB/ AD
Laranja	Citrus sinensis L.	GR/ DE
Manjericão	Ocimum basilicum L.	GR/ DE / AI
Maxixe	Cucumis anguria L.	GR/ DE
Milho	Zea Mays L., cv. BRS Caatingueiro	PB/GR/ DE
Mucuna cinza	Mucuna pruriens L.	PB/ AD/PS
Mungo	Vigna radiata L.	GR/ DE
Nirá	Allium tuberosum Rottl. Ex Spreng	GR/ DE
Palmeira Real	Archontophoenix cunninghamii H. Wendl. & Drude	DE/CP
Pepino	Cucumis sativus, L. var. Racer	GR/ DE
Pimenta biquinho	Capsicum chinense L.	GR/ DE / PS
Pimentão chapéu de bispo	Capsicum baccatum var. Local	GR/ DE
Quiabo	Abelmoschus esculentus L. Moench	GR/ DE
Rabanete	Raphanus sativus L., var. Vip Crimson	GR/ DE
Rúcula	Eruca sativa Mill., var. Astro	GR/ DE
Salsa	Petrosolium sativum Hoffm, var. Lisa Preferida	GR/ DE
Taioba	Xanthosoma taioba E. G. Gonç.	GR/ DE
Téfrosia	Tefrosia cinapou L.	AI/ DE/ CP
Tomate Cereja	Solanum lycopersicum L., var. Cereja, cv. Perinha	GR/ DE
Vertiver	Vetiveria zizanioides L.	CP / PB
Zínia	Zinnia elegans Jacq	AI / CP / OS

AD: adubação; AI: atração de inimigos naturais; CP: compor paisagem; DE: diversificação de espécies; GR: geração de renda; PB: produção de biomassa; PS: produção de sementes.

Fonte: Silva, 2019.

Com base nessas informações, foram obtidos os coeficientes das culturas (K_c) de cenoura, alface, pepino, rabanete, vagem, chicória e bortalha, e a evapotranspiração de referência (ET₀). A ET₀ considerada foi do primeiro dia do mês de março, do ano de 2018. Já os coeficientes das culturas (K_c) foram obtidos seguindo o boletim da Organização para a Alimentação e Agricultura (FAO, 1998). O K_c da fase de desenvolvimento e da fase final foram calculados de acordo a curva do K_c . A evapotranspiração da cultura (ET_c), calculada posteriormente, é a resultante do coeficiente da cultura e da evapotranspiração de referência (Equação 12).

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (12)$$

em que:

ET_c – Evapotranspiração da cultura (mm.d^{-1});

K_c – Coeficiente da cultura (adimensional);

ET_o – Evapotranspiração de referência (mm.d^{-1}).

A ET_c resultante da Equação 12 é a própria lâmina requerida pelos canteiros. Mas a metodologia utilizada para simular cada cultura e o seu canteiro e posição correspondentes foi por sorteio. Quatro canteiros foram simulados com culturas diferentes entre eles e ao longo deles. Foi calculado o K_c em cada fase das culturas escolhidas (cenoura, alface, pepino, rabanete, vagem, chicória e bortalha) e foram posicionadas por sorteio. O objetivo do sorteio foi aumentar a variabilidade espacial das lâminas requeridas. As culturas, suas fases de desenvolvimento, posição e canteiro e a lâmina a ser aplicada (ET_c) podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Lâminas de cada cultura e estágio de desenvolvimento inseridas no cartão de memória para a avaliação do sistema de irrigação (mm) em cada canteiro e sua respectiva posição

	Canteiro 1		Canteiro 2		Canteiro 3		Canteiro 4	
	Cultura	ET _c	Cultura	ET _c	Cultura	ET _c	Cultura	ET _c
Posição 1	Cenoura (I)	3,26	Alface (I)	3,26	Pepino (I)	2,79	Rabanete (I)	3,26
Posição 2	Cenoura (III)	4,89	Alface (III)	4,66	Pepino (III)	4,66	Rabanete (III)	4,19
Posição 3	Cenoura (IV)	4,42	Vagem (I)	2,33	Chicória (I)	3,26	Bortalha (IV)	4,63

(I): Fase inicial, K_c inicial; (II): Fase de desenvolvimento, K_c médio; (III): fase reprodutiva, K_c médio; (IV): fase de maturação, K_c final.

4.3.3 Avaliação hidráulica da barra gotejadora

Com o objetivo de avaliar o desempenho hidráulico da barra gotejadora, foram realizados ensaios nos Laboratórios de Hidráulica e Irrigação. Na condução do ensaio, foram distribuídos coletores de área conhecida no campo e simuladas diferentes lâminas de aplicação, correspondentes às culturas a serem avaliadas, sendo medidos os volumes coletados e calculada a lâmina em cada coletor (similar a calibração do sistema de controle das lâminas entre canteiros), comparando a lâmina requerida e a lâmina aplicada. Com os dados obtidos por meio dos ensaios foram calculados os Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC), coeficientes de variação (CV) e a Eficiência de Aplicação (Ea) e o grau de adequação para as lâminas variáveis.

Na direção transversal ao deslocamento da barra, foram posicionados quatro coletores, cada um correspondendo a um canteiro e recebendo a aplicação de uma linha lateral. Na direção

longitudinal ao deslocamento da barra, foram posicionados calhas e coletores em três pontos, com espaçamento de dois metros para cada ponto. No total, foram utilizados doze coletores, sendo quatro medidos simultaneamente e três posições diferentes, sendo na posição 1, posição 2 e posição 3. O croqui da área de avaliação do ensaio com o posicionamento da área de coleta pode ser observado na Figura 15.

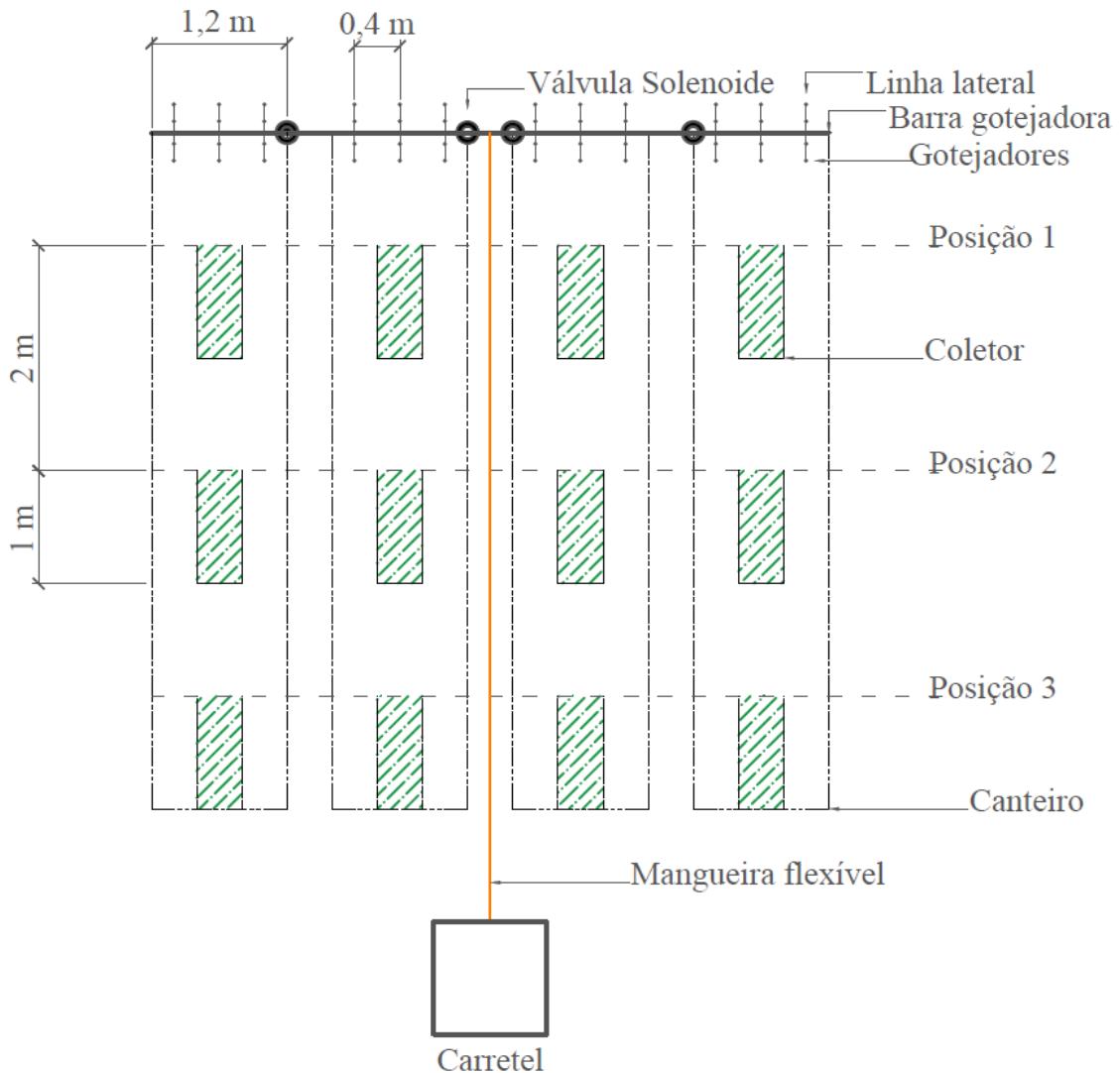


Figura 15 – Croqui da área de avaliação do ensaio com o posicionamento da área de coleta

4.3.3.1 Avaliação com lâmina constante (velocidade constante)

A avaliação da barra gotejadora com lâminas fixas e velocidade fixa teve como objetivo verificar se a barra conseguiria manter estabilidade e atender aos critérios de uma única cultura. Para isso, foram determinadas três lâminas, variando de 0,5 mm a 2,5 mm (com intervalo de 1,00 mm entre elas) e calculada a velocidade necessária para a aplicação de cada lâmina

requerida, também foi realizado o teste estatístico de análise de variância. Para cada lâmina, foram realizadas cinco repetições. As lâminas requeridas e suas velocidades correspondentes podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Lâmina requerida e velocidade correspondente para a avaliação de lâmina constante

l _{requerida} (mm)	Velocidade (mh ⁻¹)
0,5	71
1,5	26
2,5	16

Com as lâminas requeridas previamente determinadas, no final dos ensaios eram coletadas as massas, calculadas as lâminas e realizada a avaliação da uniformidade de aplicação. A avaliação da uniformidade de aplicação foi realizada por meio do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC). O CUC utilizado pode ser observado na Equação 13.

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |l_i - l|}{n} \right) \times 100 \quad (13)$$

em que:

CUC – Coeficiente de uniformidade de Christiansen (%);

l_i – Lâmina aplicada em cada ponto (mm);

l – Média das lâminas aplicadas (mm);

n – Número de lâminas analisadas.

4.3.3.2 Avaliação com lâmina variável ao longo e entre os canteiros

No caso da avaliação da aplicação das lâminas variáveis com as velocidades variáveis, o objetivo dos ensaios foi verificar se o sistema consegue atender a variabilidade espacial das necessidades hídricas das culturas, que é o objetivo proposto no projeto. Similar aos ensaios de avaliação com lâmina constante e velocidade constante, foram realizadas cinco repetições dos ensaios. Após a coleta dos volumes e o cálculo das lâminas aplicadas, foi realizada uma relação entre a lâmina requerida e a lâmina aplicada, a fim de obter um coeficiente de uniformidade relativo. A lâmina resultante (I), relação entre lâmina requerida (l_{req}) e lâmina aplicada (l_a), pode ser observada na Equação 14.

$$I = \frac{l_a}{l_{req}} \quad (14)$$

em que:

I – Relação entre lâmina aplicada e lâmina requerida (adimensional);

l_a – Lâmina aplicada (mm);

l_n – Lâmina requerida (mm).

Por meio dessa relação é possível avaliar a aplicação da lâmina requerida e o quanto próximo ou não a lâmina aplicada está da lâmina requerida. Quando o valor é inferior a 1, implica dizer que a cultura foi subirrigada e quando o valor ultrapassa a 1, aquele ponto foi irrigado a mais do que o necessário. Além disso, o CUC para a relação entre a lâmina aplicada e a lâmina requerida foi realizado para avaliar a uniformidade de aplicação considerando a variabilidade espacial da necessidade hídrica das culturas.

4.3.4 Avaliação mecânica da barra gotejadora

Na avaliação mecânica da barra gotejadora, a velocidade de deslocamento foi medida e o desempenho mecânico foi observado. Assim como o mecanismo de deslocamento de volta da barra. Para isso, a velocidade foi medida metro a metro durante o deslocamento de ida (sem estar acoplado o mecanismo de volta) de avaliação. No mecanismo de volta, foi verificado se a velocidade era compatível com a anterior. O objetivo foi verificar se a velocidade variava ou se mantinha constante durante o trajeto, também foi observado se a velocidade seria alterada com o mecanismo de volta. Na parte de desempenho, foi analisada a parte de robustez e a linearidade do deslocamento. Foram realizadas cinco repetições desses ensaios.

4.3.5 Área potencial irrigável e avaliação de custo de implantação do sistema

Para avaliar a área potencial irrigável, foram consideradas as dimensões de projeto da barra gotejadora (seis metros da barra e vinte metros de comprimento dos canteiros). Para o cálculo de irrigação por unidade de área, foi considerado o de 8 horas por dia de irrigação e a lâmina máxima de 5 mm. A avaliação de custo do sistema de irrigação considera todos os produtos e serviços utilizados para concepção do projeto e construção do protótipo com o objetivo de gerar o custo por unidade de área, que é o custo de implantação do projeto pela quantidade de área irrigada. Esse projeto é comparado aos sistemas de irrigação por

gotejamento fixo e por aspersão na mesma área e os seus pontos positivos e negativos foram avaliados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Escolha dos emissores

5.1.1 Gotejador não regulado (convencional)

Os resultados dos ensaios estão agrupados por emissores. Na Figura 16A a 16D, pode ser observado o comportamento dos emissores 1 a 4, respectivamente. A média do emissor é apresentada Figura 16E. Observa-se que em todas as repetições, os emissores se comportaram de forma linear. Apesar de ocorrer pequenas variações nos tempos de 10% a 30%, em todos os emissores e em todas as repetições, nos percentuais maiores, a dispersão diminuiu. Essa variação pode ocorrer por conta da pressão, já que são gotejadores sensíveis a variação de pressão e como o tempo de funcionamento ao longo do ciclo aumentou, consequentemente, a pressão manteve-se mais constante e por isso a dispersão diminuiu. No tempo máximo, pode-se perceber que a vazão do gotejador se iguala a vazão declarada pelo fabricante.

Ainda assim, pode-se dizer que as variações foram muito pequenas e não são suficientes para comprometer o uso do emissor no sistema, já que todos os gotejadores não regulados apresentaram boas correlações entre si, com valores de R^2 muito próximos a 1, demonstrando que os dados estão próximos da linha de regressão ajustada. Isso quer dizer que a técnica de acionamento por pulsos das válvulas consegue apresentar uma vazão equivalente em função do tempo relativo e desta forma, ocorre a variação da lâmina entre os canteiros. Apesar da vazão das linhas laterais não alterarem, essa técnica consegue promover uma vazão equivalente, por gerar um volume de água por sessão de tempo.

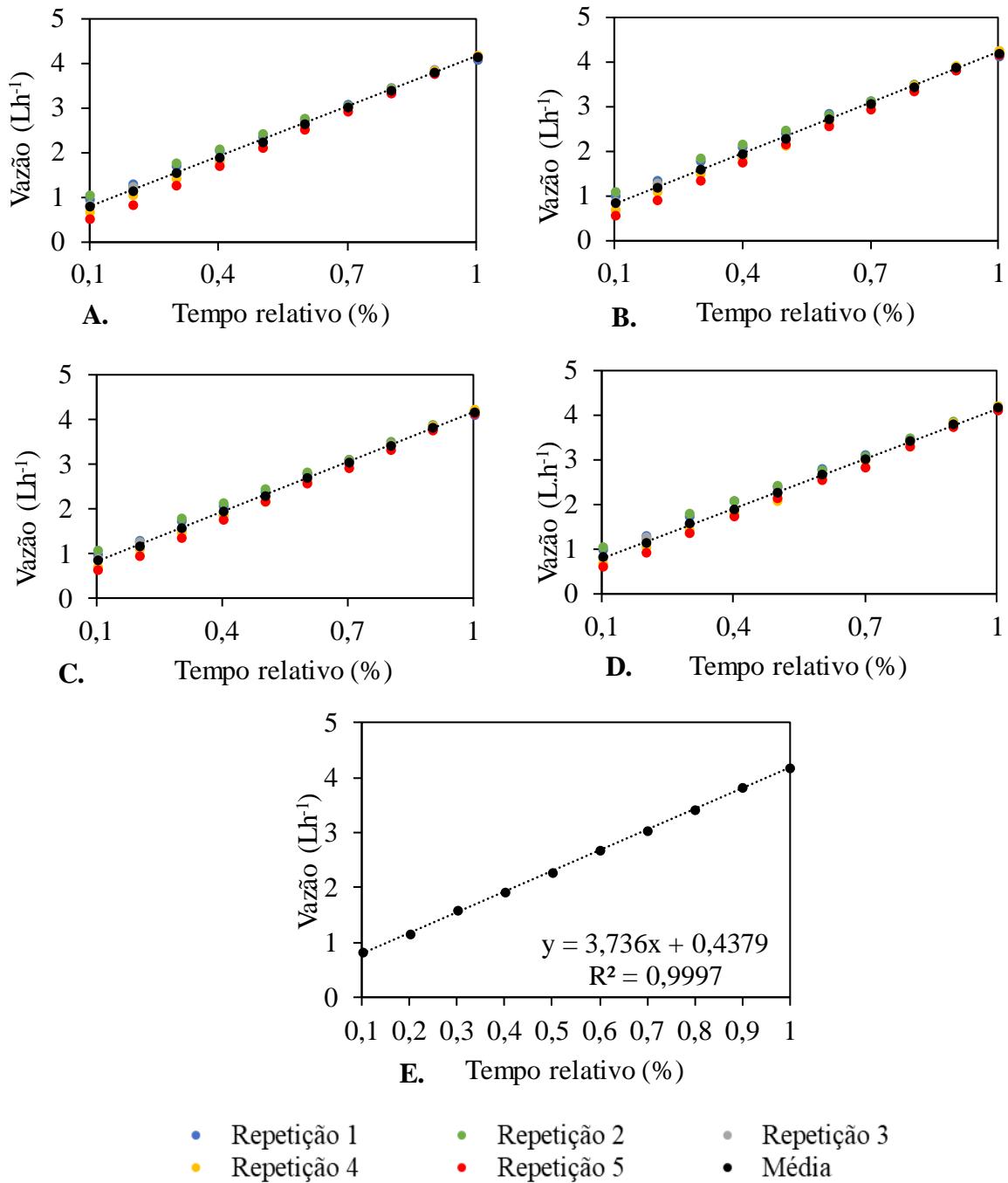


Figura 16 – Vazão equivalente em função do tempo relativo dos gotejadores não regulados. A: Emissor 1; B: Emissor 2; C: Emissor 3; D: Emissor 4; E: Média dos emissores.

Outro fator percebido na condução do ensaio foi a variação da tensão da rede elétrica. Alguns dos ensaios desses emissores foram realizados em horários de maior demanda elétrica, ocorrendo sobrecarga e queda de tensão na rede. Devido a essa oscilação, houve variação da pressão de serviço fornecida pela motobomba.

5.1.2 Gotejador regulado (autocompensante)

Esses gotejadores foram propostos na tentativa de sanar os problemas de oscilação de pressão na rede causadas pela queda de tensão, já que estes tentariam manter a vazão independente da variação de pressão. Os resultados dos ensaios dos gotejadores autocompensantes são apresentados na Figura 17. Todos os emissores apresentaram resultados satisfatórios, com valores de R^2 próximos a 1. O emissor 4 (Figura 17D) apresentou dispersão nos tempos de 50% e 60%, ambos na repetição 3, mas no decorrer da mesma repetição, o emissor manteve seu comportamento de forma linear. Na Figura 17E, pode-se observar a vazão equivalente em função do tempo relativo dos gotejadores autocompensantes. Análogo aos gotejadores não regulados, os gotejadores autocompensantes mantiveram comportamento linear e pouca dispersão, com valores de R^2 muito próximos a 1, demonstrando que os dados estão próximos da linha de regressão ajustada. Como os resultados foram satisfatórios, pode-se afirmar que a técnica de acionamento por pulsos das válvulas conseguiu variar a lâmina em função do volume de água aplicado e do tempo relativo.

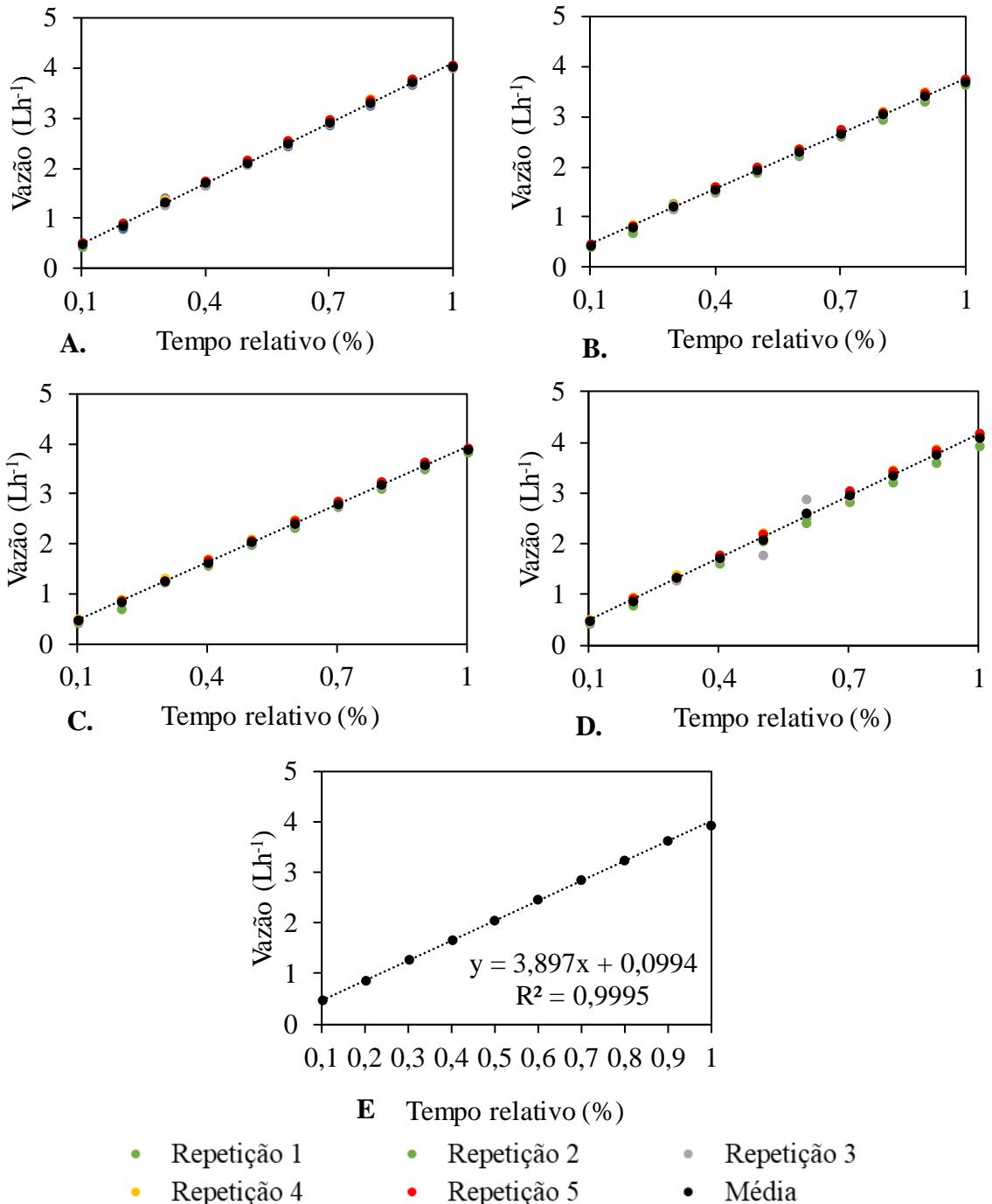


Figura 17 – Vazão equivalente em função do tempo relativo dos gotejadores autocompensantes. A: Emissor 1; B: Emissor 2; C: Emissor 3; D: Emissor 4; E: Média dos emissores.

5.1.3 Microtubos

Com base nos resultados, pode-se observar que a média da vazão equivalente em função do tempo relativo dos microtubos (Figura 18) se apresenta de forma similar aos outros emissores, com resultado satisfatório e comportamento linear. Além disso, esses emissores

apresentam grandes vantagens em sua utilização, por dispensar o sistema motobomba e consequentemente não sofrer variações devido à queda de tensão na rede e ainda podem operar com pequenas pressões de serviço. Também apresentam fácil instalação e possuem menor custo, quando comparados aos gotejadores.

Os ensaios dos microtubos apresentaram também um resultado satisfatório, com R^2 muito próximo a 1. Na repetição 1, ocorreu variação em todos os emissores, entre 20% a 40%. Em todos os emissores houve pequena instabilidade, que geralmente ocorreram, nos tempos de 30% e 40%. Essa instabilidade pode se dar porque os microtubos são altamente sensíveis às de pressão e possuem maiores riscos de obstrução (FRIZZONE et al., 2012). Para Alves et al. (2015), a qualidade da água, diâmetro de passagem, velocidade do fluxo e características físicas construtivas são diferenciais fatores potenciais de entupimento dos emissores. Entretanto, há controvérsias. O risco de obstrução não é uma característica intrínseca dos microtubos. Barros et al. (2020) alega que no caso dos microtubos, a obstrução física ocorre com a deposição de areia que se concentra nas entradas dos emissores e conectores, devido a velocidade muito baixa ou próximas a zero nesses locais. Campos Júnior (2022) contribui no caso dos gotejadores, a obstrução também é uma das problemática, já que pode ocorrer de forma parcial ou total, reduzindo na uniformidade de distribuição de água.

No caso de obstrução de emissores, em campo, há agentes químicos, físicos e biológicos que podem ocasionar esse evento. Mas há métodos de minimizar tais problemáticas. Os fatores biológicos podem ser controlados com cloração e com a filtragem mínima de 120 mesh, espera-se que apenas partículas de pequena granulometria e agentes químicos possam resultar em risco de obstrução (PEREIRA, 2022).

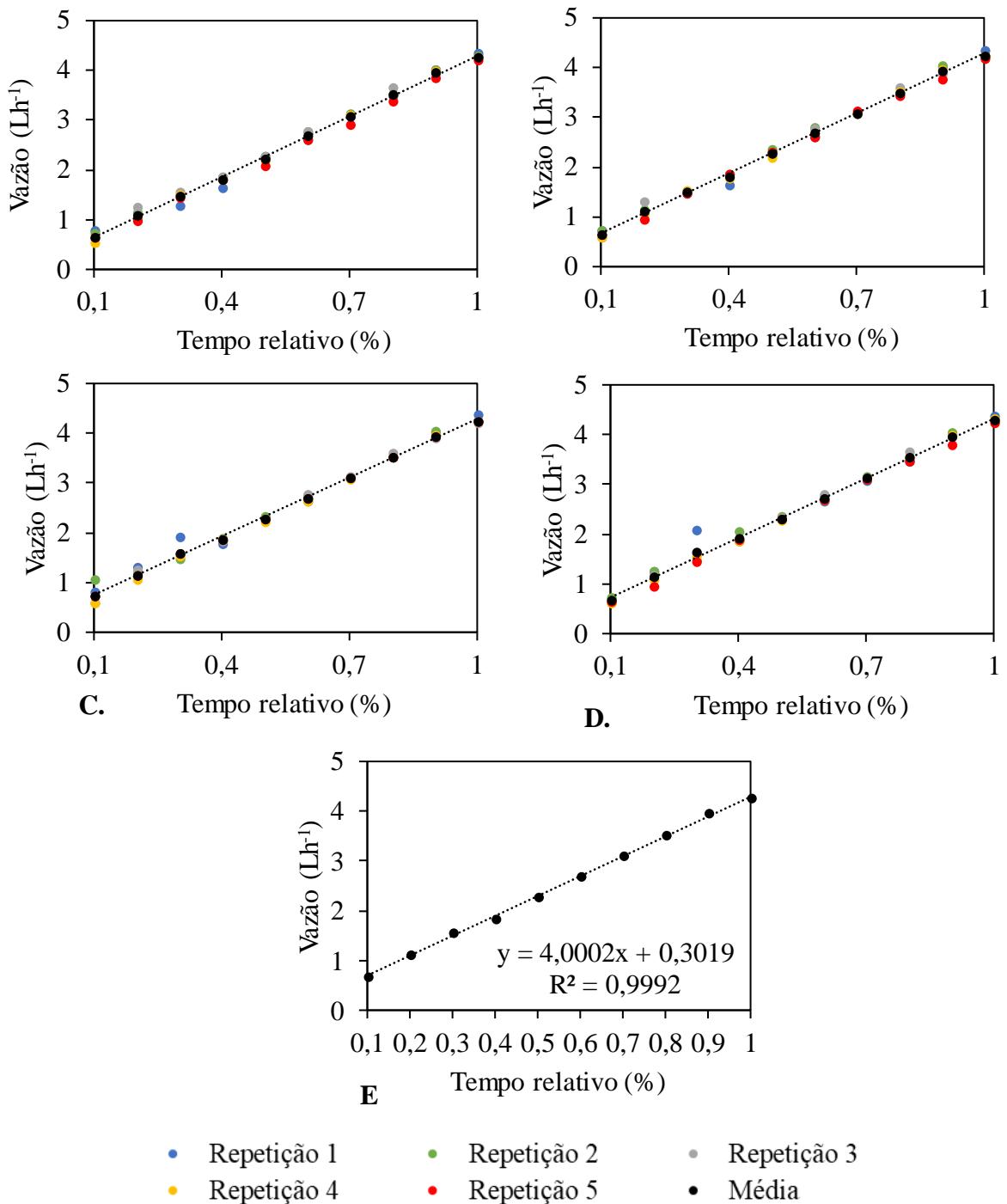


Figura 18 – Vazão equivalente em função do tempo relativo dos microtubos. A: Emissor 1; B: Emissor 2; C: Emissor 3; D: Emissor 4; E: Média dos emissores.

Todos os emissores dos três grupos atingiram as vazões especificadas pelos fabricantes. Considerando o R^2 médio dos tipos de emissores, o gotejador não regulado apresentou o maior R^2 médio, no valor de 0,9997 e o que apresentou o menor valor foi o microtubo, com R^2 médio de 0,9992. Entretanto, a diferença é mínima e os resultados de todos os grupos podem ser

considerados satisfatórios, o que implica na maior flexibilidade da barra gotejadora, tendo em vista que os tipos de emissores apresentados podem ser utilizados na barra gotejadora.

Cada tipo de emissor tem suas características, pontos positivos e negativos dependendo do ambiente e da cultura da ser irrigada. Ainda assim, a viabilidade do projeto é de fato aumentada por conseguir adaptar a estrutura de acordo a necessidade do agricultor. A barra além de atender quatro ou seis canteiros, a depender das dimensões, pode também utilizar três tipos de emissores, onde um deles dispensa o conjunto motobomba e pode utilizar a energia gravitacional para alimentar o sistema.

Os emissores escolhidos para a avaliação do sistema de irrigação foram os gotejadores autocompensantes, justamente por sua propriedade de compensar a vazão mesmo com a variação de pressão. Como a região onde os ensaios foram realizados possui instabilidade na rede elétrica, a utilização desse emissor foi o meio de minimizar os problemas que poderiam ocorrer por consequência disso. A perda de carga na mangueira é de 0,2 mca e não altera quando a mangueira é enrolada. Isso pode acontecer pelo fato da vazão ser muito baixa. Mas as variações de pressão por queda de tensão são recorrentes. Por fim, mesmo que o gotejador autocompensante tenha sido considerado o melhor para a avaliação, devido as dificuldades do ambiente, os ensaios comprovam que o agricultor tem maior variabilidade de opções de emissores e pode usá-lo de acordo com as suas necessidades em campo.

5.2 Avaliação hidráulica da barra gotejadora

5.2.1 Avaliação com lâmina constante (velocidade constante)

Nas Figuras 19 a 21, são apresentadas as avaliações com lâmina e velocidade constantes com as lâminas de 0,5 mm, 1,5 mm e 2,5 mm, respectivamente. Para cada lâmina, também é apresentada a média da lâmina aplicada pela barra gotejadora e o coeficiente de variação (CV). Para a lâmina de 0,5 mm (Figura 19), o CUC variou de 94% a 97% entre as repetições. Segundo Mantovani (2001), os valores de CUC acima de 90% são considerados como excelente e o mínimo aceitável é de 80% para irrigação localizada (FRIZZONE et al., 2012). O coeficiente de variação (CV) para a lâmina de 0,5 mm foi de 4,65%. A média das lâminas aplicadas entre as cinco repetições foi de 0,52 mm, 4% a mais do que a lâmina requerida.

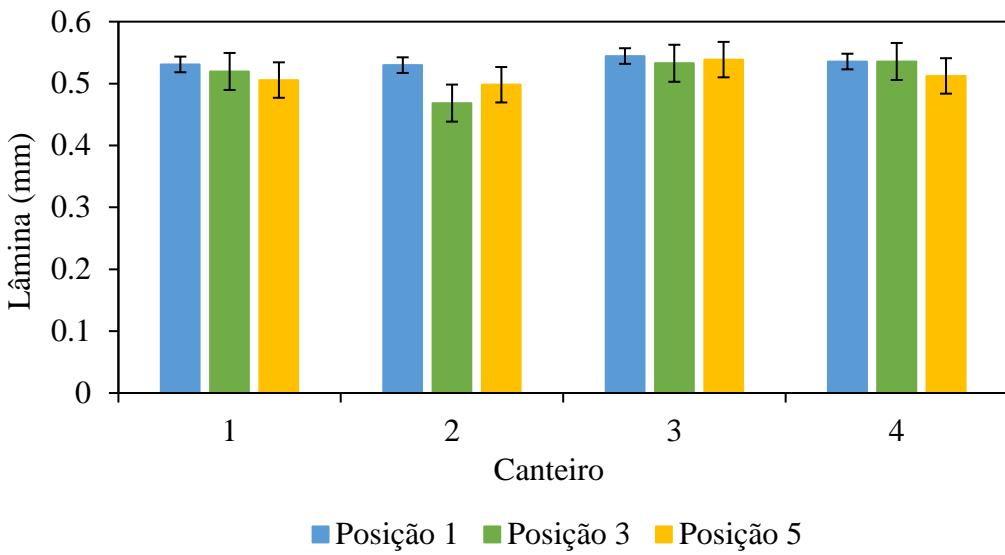


Figura 19 – Avaliação com lâmina constante (velocidade constante) (0,5 mm)

Na Figura 20, é apresentada lâmina aplicada em cada posição e canteiro, sendo a lâmina requerida de 1,5 mm. O CUC variou de 96% a 98% nas repetições, valor considerado excelente na irrigação localizada. O CV para essa lâmina foi de 2,29%. A média entre as lâminas aplicadas foi de 1,41 mm, 94% da lâmina requerida.

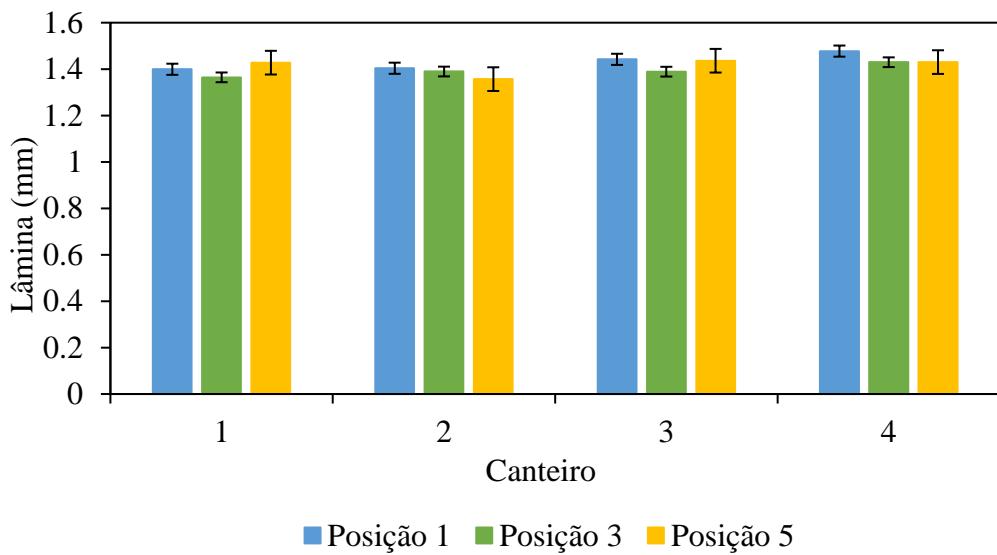


Figura 20 – Avaliação com lâmina constante (velocidade constante) (1,5 mm)

Na Figura 21, é apresentada lâmina aplicada em cada posição e canteiro, sendo a lâmina requerida de 2,5 mm. O CUC variou de 97% a 98% nas repetições, valor considerado excelente na irrigação localizada, análoga as outras lâminas. O CV para essa lâmina foi de 4,11%. A

média entre as lâminas aplicadas foi de 2,6 mm, 4% aplicado a mais do que a lâmina requerida. Na análise de variância foi possível perceber que o CUC não é influenciado pela lâmina.

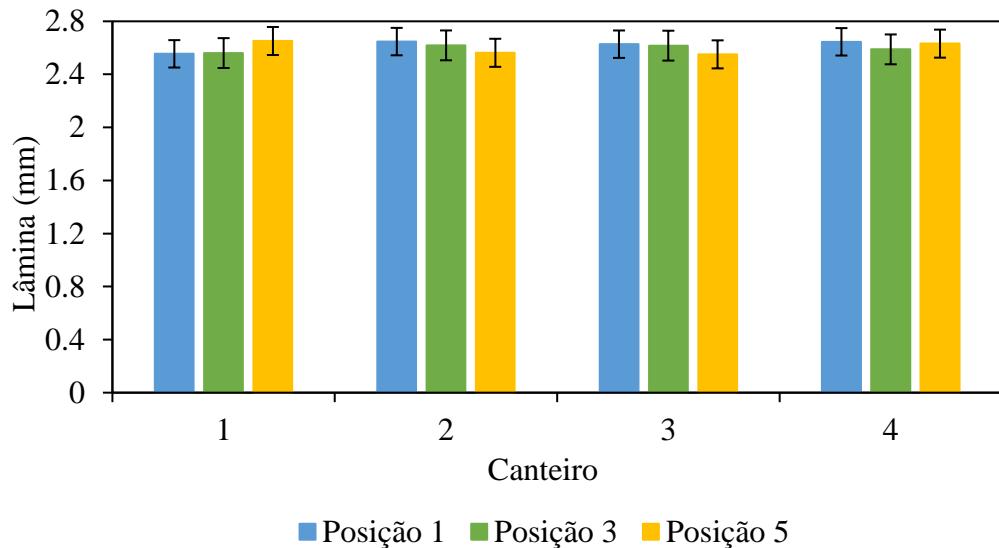


Figura 21 – Avaliação com lâmina constante (velocidade constante) (2,5 mm)

5.2.2 Avaliação com lâmina variável ao longo e entre os canteiros

Na Figura 22, é apresentada a avaliação com lâmina variável ao longo dos canteiros na posição 1, 3 e 5, respectivamente. Na posição 1 (Figura 22A), a lâmina aplicada foi maior que a lâmina requerida em todos os canteiros. Na posição 3 (Figura 22B), ocorreu maior variação. Nos canteiros 1 e 3, a lâmina aplicada foi maior que a lâmina requerida. No canteiro 2, a lâmina aplicada foi igual a requerida e no canteiro 4, a lâmina aplicada foi menor que a requerida. Na posição 5 (Figura 22C), todos os canteiros, exceto o canteiro 2, aplicaram lâminas superiores à lâmina requerida.

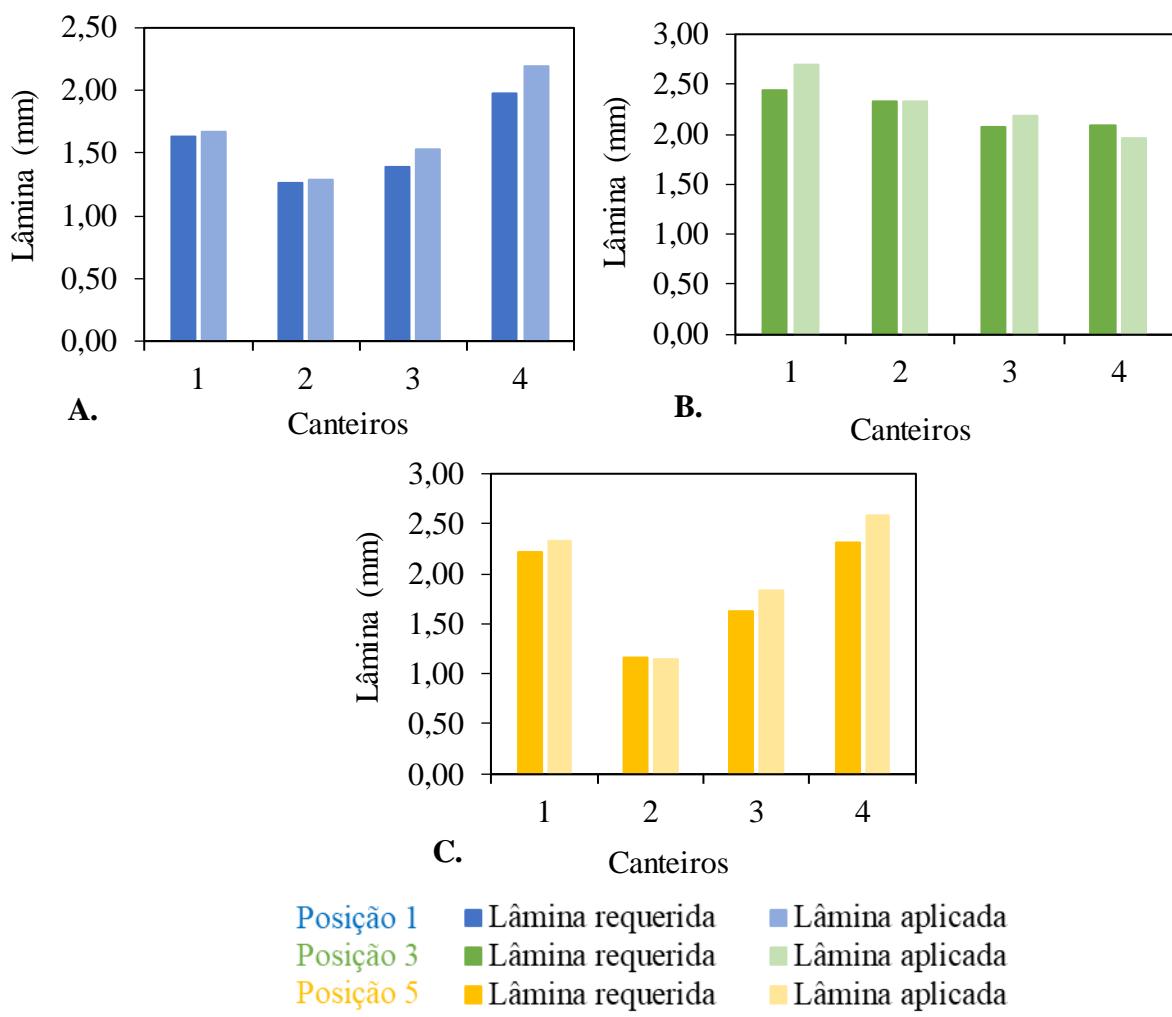


Figura 22 – Comparativo entre a lâmina requerida e a lâmina aplicada. A: Posição 1; B: Posição 3; C: Posição 5.

Na Figura 23 é apresentada a relação entre a lâmina aplicada e lâmina requerida (I). Nessa situação, quando os valores ultrapassam a 1, significa dizer que a barra aplicou mais do que o necessário. Quando o valor da relação é menor do que 1, significa dizer que a área molhada ficou em déficit de irrigação.

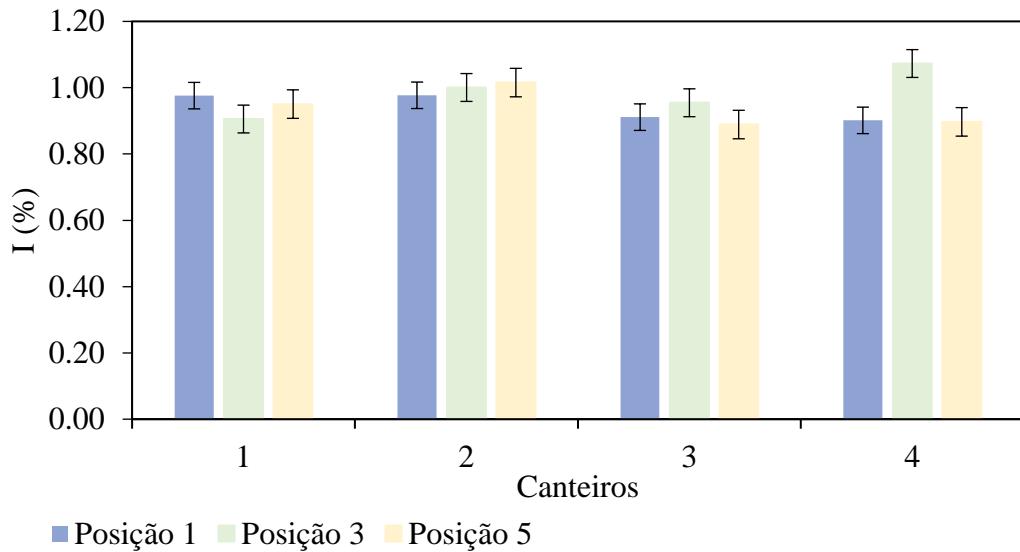


Figura 23 – Relação entre lâmina aplicada e lâmina requerida (I) entre canteiros e ao longo do canteiro

A relação entre a lâmina aplicada e requerida média das cinco repetições dos ensaios foi de 105%. Isso significa dizer que, em média, a lâmina aplicada foi maior que a requerida em 5%.

A eficiência de aplicação (Ea) dos ensaios com lâminas variando ao longo e entre canteiros 94% e o grau de adequação foi de 75%. Para um grau de adequação de 100%, onde todas as lâminas receberiam o mínimo requerido, a Ea seria de 88,3%. Para graus de adequação recomendados pela literatura (Mantovani (2001); Frizzone (2012)), as eficiências de aplicação seriam de 93% e 89,2%, respectivamente. O CUC variou de 93% a 96%. A literatura recomenda que o CUC para irrigação por gotejamento deve ser no mínimo de 80% (Mantovani (2001); Frizzone (2012)). Os valores obtidos foram bem acima do mínimo aceitável. O CV foi de 5,4% entre as repetições.

5.3 Avaliação mecânica da barra gotejadora

Quando o mecanismo de volta da barra gotejadora foi acoplado, foram obtidos valores diferentes de velocidade máxima. A velocidade máxima da barra gotejadora (com o mecanismo de volta da barra acoplado) foi de 61 mh^{-1} , enquanto a velocidade máxima sem o mecanismo era de 71 mh^{-1} . Para adequar a velocidade com o mecanismo de volta, será necessário reajustar a curva de relação entre a velocidade e PWM. Apesar de apresentar alteração na velocidade máxima com o mecanismo agregado à barra gotejadora, entre as repetições houve pequenas

alterações de velocidade, apresentando uniformidade. Essa uniformidade mostra que o ajuste de velocidade é confiável e pode ser usado como método de variação de lâminas ao longo dos canteiros. Na Figura 24, pode-se observar a velocidade a cada metro percorrido e o PWM equivalente.

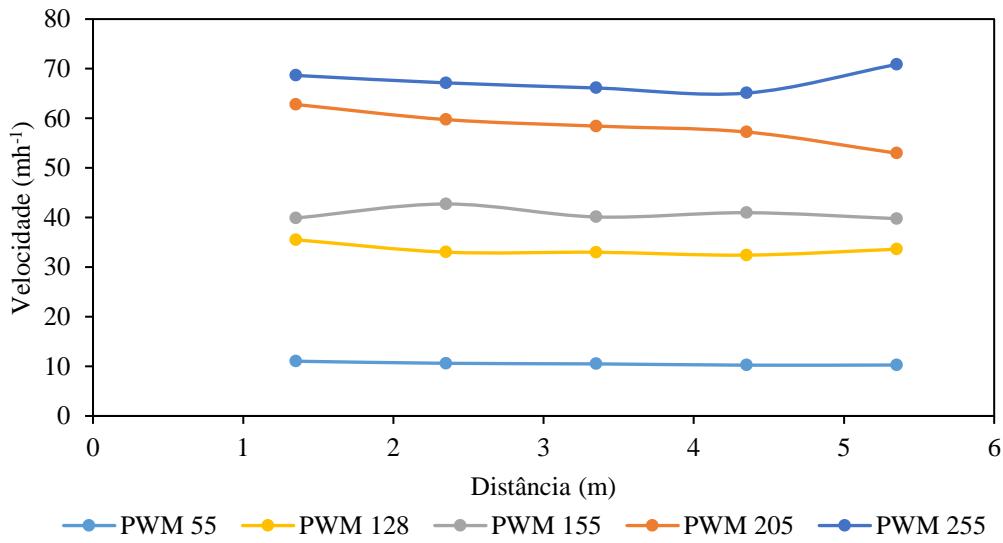


Figura 24 – Correlação entre a distância, velocidade e o PWM equivalente

A velocidade no PWM 55 manteve-se constante durante todo o trajeto. À medida que o PWM foi aumentando, houve pequenas oscilações na velocidade. No PWM 255, no último ponto da distância, a velocidade foi um pouco maior do que no decorrer do trajeto, mas se manteve uniforme nos outros pontos.

Outro ponto observado foi o desalinhamento na movimentação da barra. Possivelmente, a estrutura da barra em PVC pode ser um dos fatores e as rodas plásticas também. Como a estrutura é em PVC, torna a barra leve e quando o carretel puxa a barra em sua direção, a barra tem a tendência a desalinear com o passo da mangueira. Ainda assim, houve ensaios em que a barra desalinhava na outra direção.

Durante os ensaios também foi observado que a estrutura que sustenta o rolete e o carretel devem ficar a pelo menos 1,00 m de distância da barra (quando a barra está na extremidade). Isso porque quando a barra está muito próxima as estruturas de movimentação, é gerado o efeito de torção, causando deformação no centro da barra (onde a baixa é puxada).

5.4 Área potencial irrigável e avaliação de custo de implantação do sistema

A área potencial irrigável da barra gotejadora é de $360 \text{ m}^2\text{dia}^{-1}$. Na Tabela 4 é apresentado o custo de implantação do sistema, onde inclui todos os materiais construtivos da barra e do carretel.

Tabela 4 – Custo detalhado de implantação da barra gotejadora

Carretel				
Descrição	Quantidade	Valor Unitário (R\$)	Valor Total (R\$)	Percentual
Motor Bosch 12V 72RPM	1	341,10	341,10	13,78%
Moto-redutor Redupar 1:25	1	179,00	179,00	7,23%
Módulo SD	1	9,40	9,40	0,38%
Módulo Ponte H	1	60,00	60,00	2,42%
Módulo Radiofrequência NR24I01	1	40,00	40,00	1,62%
Microcontrolador Arduíno Mega 2560	1	180,00	180,00	7,27%
Fonte de alimentação 12V	1	40,00	40,00	1,62%
Cartão SD	1	19,41	19,41	0,78%
Kit jumper	1	19,90	19,90	0,80%
Rolamento 6000zz	2	5,00	10,00	0,40%
Adaptador para caixa d'água 25 mm	1	16,00	16,00	0,65%
Porcas e parafusos	12	2,00	24,00	0,97%
Barra Chata - 19,05mm x 3,17mm 6M	1	22,00	22,00	0,89%
Roda plástica	8	3,50	28,00	1,13%
Mangueira jardim 1/2" 20m com engate	1	75,00	75,00	3,03%
Adaptador para mangueira 1/2"	1	2,00	2,00	0,08%
Custo total do carretel			1.065,81	
Barra gotejadora				
Tubo PVC 32 mm 6m	1	25,00	25,00	1,01%
Tê 32mm x 1" marrom	1	6,50	6,50	0,26%
Tê 32 mm x 3/4" marrom	4	6,50	26,00	1,05%
Niple 3/4"	4	2,50	10,00	0,40%
Curva 3/4"	4	8,00	32,00	1,29%
Tubo aço zinorado 3/4" 6m	2	65,00	130,00	5,25%
Roda plástica para carrinho	8	3,50	28,00	1,13%
Barra de aço roscada 1/8"	1	6,00	6,00	0,24%
Porcas e parafusos	1	25,00	25,00	1,01%
Painel Control box	1	60,00	60,00	2,42%
Módulo relé 4 canais	1	35,00	35,00	1,41%
Microcontrolador Arduíno Mega 2560	1	180,00	180,00	7,27%
Kit jumper	2	19,90	39,80	1,61%
Fonte de alimentação 24V	1	40,00	40,00	1,62%

Válvula PGV-100 Hunter	4	220,00	880,00	35,55%
Módulo Radiofrequência NR24l01	1	40,00	40,00	1,62%
Regulador de tensão 5V	1	24,00	24,00	0,97%
Filtro de tela 3/4" Amanco	1	40,00	40,00	1,62%
Adaptador para mangueira 1/2"	1	2,00	2,00	0,08%
Tubo PVC 25 mm	2	19,90	39,80	1,61%
Cabo para alimentação das válvulas (m)	8	2,50	20,00	0,81%
Manômetro	1	56,00	56,00	2,26%
Tê 3/4" roscável	6	7,00	42,00	1,70%
Gotejador autocompensante 4 litros/hora Netafim	48	0,54	25,92	1,05%
Conexões diversas	1	100,00	100,00	4,04%
Tê para mangueira 1/2"	24	2,50	60,00	2,42%
Custo total da barra gotejadora				1.409,52
Custo total do sistema				2.475,33

Nota-se que o valor final da barra gotejadora é de R\$ 2.475,33, o que proporciona um custo por unidade de área da barra gotejadora é de R\$ $6,87\text{m}^{-2}$ (R\$ $68.759,16\text{ha}^{-1}$). Ainda assim, há alguns meios de diminuir o custo de implantação da barra gotejadora. Pode-se perceber que as válvulas são responsáveis por 35,55% do valor total do sistema. Possivelmente, a utilização de outros modelos existentes no mercado pode aumentar a flexibilidade quanto aos tipos de válvulas, além de impactar positivamente no custo final. Outra possibilidade seria aumentar a velocidade do motor. Se a velocidade do motor e o comprimento da mangueira flexível fossem maiores, a área irrigável seria maior e o custo de irrigação não aumentaria de forma significativa.

CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que:

- A barra gotejadora conseguiu atender a variabilidade espacial das necessidades hídricas das culturas.
- O acionamento das válvulas por pulsos elétricos permitiu a aplicação de lâminas variáveis.
- O ajuste da velocidade de deslocamento permitiu variar as lâminas ao longo dos canteiros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Recomenda-se a continuação dos estudos para que benefícios em potenciais possam ser agregados à barra gotejadora, tais como:

- Substituir a estrutura de sustentação da barra de PVC para metal pode melhorar o desempenho mecânico, tornar a estrutura mais rígida, aumentando a robustez.
- Aumentar a velocidade do motor e a área irrigada pode diminuir o custo de implantação do sistema. Assim como avaliar a possibilidade de utilizar outras válvulas.
- Possibilidade de aplicar fertilizantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abioye, E. A.; Abidin, M. S. Z.; Mahmud; M. S. A.; Buyamin, S.; Ishak, M. H. I.; Rahman, M. K. I. A.; Otuze, A. O.; Onotu, P.; Ramli, M. S. A. 2020. **A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation.** Computers and Electronics in Agriculture. 173, 105441. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105441>.
- Alletto, L.; Vandewalle, A.; Debaeke, P. 2022. **Crop diversification improves cropping system sustainability: An 8-year on-farm experiment in South-Western France.** Agricultural Systems. 200, 103433. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103433>.
- Alvarenga, A. C.; Ferreira, V. H.; Fortes, M. Z. 2014. **Energia solar fotovoltaica: uma aplicação na irrigação da agricultura familiar.** Sinergia, São Paulo, v. 15, n. 4, p. 311-318.
- Alves, D. G.; Pinto, M. F.; Molle, B.; Tomas, S.; Mouheb, N. A.; Botrel, T. A. 2015. **Sensibilidade dos microtubos à obstrução por agentes físicos.** Revista Brasileira de Agricultura Irrigada. V.9, n.4, 193-203. [DOI: 10.7127/rbai.v9n400310](https://doi.org/10.7127/rbai.v9n400310).
- Amani, S.; Shafizadeh-Moghadam, H. 2023. **A review of machine learning models and influential factors for estimating evapotranspiration using remote sensing and ground-based data.** Agricultural Water Management. 284, 108324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108324>.
- Baiamonte, G. 2018. **Advances in designing drip irrigation laterals.** Agricultural Water Management. 199, 157-174. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.015>.
- Baiamonte, G. 2018. **Explicit relationships for optimal designing rectangular microirrigation units on uniform slopes: The IrriLab software application.** Computers and Electronics in Agriculture. 153, 151-168. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.005>.
- Barros, N. S.; Neves, E.; Brum, E. V. P.; Cetrulo, T. B. 2020. **Causas e soluções para desobstrução de emissores no método de irrigação localizada.** Enciclopédia Biosfera. 17, 32, 201. [DOI: 10.18677/EnciBio_2020B16](https://doi.org/10.18677/EnciBio_2020B16).
- Belton, B.; Ganhar, M. T.; Zhang, X.; Filipski, M. 2021. **The rapid rise of agricultural mechanization in Myanmar.** Food Policy. 101, 102095. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102095>.
- Bentivoglio, D.; Bucci, G.; Belletti, M.; Finco, A. 2022. **A theoretical framework on network's dynamics for precision agriculture technologies adoption.** Revista de Economia e Sociologia Rural. 60(4), e245721. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.245721>.
- Borges, L. F.; Bazzi, C. L.; Souza, E. G. de.; Magalhães, P. S. G.; Michelon, G. K. 2020. **Web software to create thematic maps for precision agriculture.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, 55, e00735. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.00735>

Borssoi, A. L., Vilas Boas, M. A., Reisdörfer, M., Hernández, R. H., Follador, F. A. **Water application uniformity and fertigation in a dripping irrigation set.** Engenharia Agrícola, v. 32, n. 4, p. 718-726, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000400011>.

Burbano-Figueroa, O.; Sierra-Monroy, A.; David-Hinestrosa, A.; Whitney, C.; Borgemeister, C.; Luedeling, E. 2022. **Farm-planning under risk: An application of decision analysis and portfolio theory for the assessment of crop diversification strategies in horticultural systems.** Agricultural Systems. 199, 103-409. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103409>.

Bwambale, E.; Abagale, F. K.; Anornu, G. K. 2022. **Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review.** Agricultural Water Management. 260, 107324. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>.

Campos Júnior, J. E. **Sensibilidade de obstrução por partículas sólidas de emissores contínuos integrados a fita gotejadora.** Tese (Doutorado em Ciências) – USP/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, p. 107, 2022.

Cantou, X.; Luo, X.; Razzaq, A.; Huang, Y.; Erfanian, S. 2023. **Can agricultural mechanization services narrow the income gap in rural China?.** Heliyon. 9, 13367. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13367>.

Carcedo, A. J. P.; Bastos, L. M.; Yadav, S.; Mondal, M. K.; Jagadish, S. V. K.; Kamal, F. A.; Sutradhar, A.; Vara Prasad, P. V.; Ciampitti, I. 2022. **Assessing impact of salinity and climate scenarios on dry season field crops in the coastal region of Bangladesh.** Agricultural Systems. 200, 103-428. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103428>.

Du, Y.; Liu, X.; LinZhang.; Zhou, W. 2023. **A irrigação por gotejamento em terras agrícolas salino-alcalinas controla a salinidade do solo e melhora o rendimento das culturas: evidências de uma meta-análise global.** Science of The Total Environment. 880, 163-226. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163226>.

Chen, QW.; Liu, MJ.; Lyu, J.; Li, G.; Otsuki, K.; Yamanaka, N.; Du, S. 2022. **Characterization of dominant factors on evapotranspiration with seasonal soil water changes in two adjacent forests in the semiarid Loess Plateau.** Journal of Hydrology. 613, 128427. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128427>.

Costa, E.; Martins, M. B.; Vedruscolo, E. P.; Silva, A. G.; Zoz, T.; Binotti, F. F. S.; Witt, T. W.; Seron, C. C. 2020. **Greenhouses within the Agricultura 4.0 interfaces.** Revista Ciência Agronômica. 51, 20207703. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200089>.

Cunha, K. C. B.; Rocha, R. V. 2015. **Automação no processo de irrigação na agricultura familiar com plataforma arduino.** Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar v. 01, n. 02, p. 62-74.

Dacache, A.; Knox, J. W.; Weatherhead, E. K.; Daneshkhah, A.; Hess, T. M. 2015. **Implementing precision irrigation in a humid climate – Recent experiences and on-**

going challenges. Agricultural Water Management. 147, 135-143.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.11.017>.

Dalttozo, F., Foguesatto, C., Silva, L. 2017. **Agricultura de precisão: inovação para a produção mundial de alimentos e otimização de insumos agrícolas.** Revista Tecnologia e Sociedade. 13(29), 146-161.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=496654016011>.

Das, S.; Baweja, S. K.; Raheja, A.; Gill, K. K.; Sharda, R. 2023. **Development of machine learning-based reference evapotranspiration model for the semi-arid region of Punjab, India.** Journal of Agriculture and Food Research. 13, 100640.
<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100640>.

De Lara, A.; Khosla, R.; Longchamps, L. 2018. **Characterizing Spatial Variability in Soil Water Content for Precision Irrigation Management.** Agronomy. 8, 59.
<https://doi.org/10.3390/agronomy8050059>.

EMATER-RIO. **Relatório de atividades.** 81p. 2020. Disponível em:
<https://www.emater.rj.gov.br/relatorioatividadecorr20.pdf>.

EMBRAPA. **Fazendinha Agroecológica km 47.** 2023. Disponível em:
<https://www.embrapa.br/agrobiologia/fazendinha-agroecologica/sobre>.

Ferrarezi, R. S.; Geiger, T. C.; Greenidge, J.; Dennery, S.; Weiss, S. A.; Vieira, G. H. S. 2020. **Microirrigation Equipment for Okra Cultivation in the U.S. Virgin Islands.** HortScience. 55(7), 1045-1052. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI15021-20>.

Frizzone, J. A. **Os métodos de irrigação.** 2017. Escola Superior “Luiz de Queiroz” – USP. Disponível em:
https://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/disciplinas/Frizzone/LEB_1571/TEXTO_COMPLEMENTAR_1 - METODOS_DE_IRRIGACAO.pdf. Acesso: 30 de junho de 2023.

Frizzone, J. A.; Freitas, P. S. L.; Rezende, R.; Faria, M. A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão.** 1. Ed. Maringá: Eduem, 2012. 356p. ISBN 978-85-7628-460-4.

Gasó, D. V.; Berger, A. G.; Ciganda, V. S. 2019. **Predicting wheat grain yield and spatial variability at field scale using a simple regression or a crop model in conjunction with Landsat images.** Computers and Electronics in Agriculture. 159, 75-83.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.02.026>.

Gobbo, S.; Lo Presti, S.; Martelo, M.; Panunzi, L.; Berti, A.; Morari, F. 2019. **Integrating SEBAL with in-Field Crop Water Status Measurement for Precision Irrigation Applications—A Case Study.** Remote Sensing. 2069, 11-17.
<https://doi.org/10.3390/rs11172069>.

Higgins, V.; Van Der Velden, D.; Bechtet, N.; Bryant, M.; Battersby, J.; Belle, M.; Klerkx, L. 2023. **Deliberative assembling: Tinkering and farmer agency in precision agriculture implementation.** Journal of Rural Studies. 100, 103023.
<https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.103023>.

Hoss, D. F.; Luz, G. L.; Lajús, C. R.; Moretto, M. A.; Tremea, G. A. 2020. **Multispectral aerial images for the evaluation of maize crops**. Ciência e Agrotecnologia. 44, 004920. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202044004920>.

Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC. **Microcontroladores – Técnico**. Disponível em: https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_6_-_Microcontroladores_-_T%C3%A9cnico. Acesso: 14 de abril de 2023.

InstaAgro. **Kit De Irrigação Familiar Por Gotejamento Kifnet - 500 M² - Netafim**. 2023. Disponível em: <https://www.instagro.com/kit-de-irrigac-o-familiar-por-gotejamento-kifnet-500-m-netafim>. Acesso: 30 de junho de 2023.

Irmak, S.; Sharma, V.; Haghverdi, A.; Jhala, A.; Payero, J. O.; Drudik, M. 2021. **Maize Crop Coefficients under Variable and Fixed (Uniform) Rate Irrigation and Conventional and Variable Rate Fertilizer Management in Three Soil Types**. Agricultural Water Management. 243, 106-489. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106489>.

Kamyshova, G.; Osipov, A.; Gataullin, S.; Korchagin, S.; Ignar, S.; Gataullin, T.; Terekhova, N.; Suvorov, S. 2022. **Artificial Neural Networks and Computer Vision's-Based Phytoindication Systems for Variable Rate Irrigation Improving**. IEEE Access. 10, 8577-8589. <https://10.1109/ACESSO.2022.3143524>.

Kist, B. B.; Carvalho, C.; Beling, R. R. **Anuário Brasileiro de HORTI & FRUTI**. Santa Cruz do Sul: Gazeta Santa Cruz, 2022. 60 p. ISSN 2178-0897.

Kumar, V.; Singh, C. D.; Rao, K. V. R.; Kumar, M.; Rajwade, Y. A.; Babu, B. Singh, K. 2023. **Evaluation of IoT based smart drip irrigation and ETc based system for sweet corn**. Smart Agricultural Technology. 5, 100248. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100248>.

Lavanholi, R. **Relações entre características geométricas de gotejadores e dinâmica de obstrução**. Tese (Doutorado em Ciências) – USP/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, p. 106, 2019.

Lin, X.; Wang, Z.; Li, J. 2022. **Spatial variability of salt content caused by nonuniform distribution of irrigation and soil properties in drip irrigation subunits with different lateral layouts under arid environments**. Agricultural Water Management. 266, 107-564. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107564>.

LojaPivot. **Kit irrigação automatizada para 1800 Metros - RAIN BIRD**. 2023. Disponível em: https://www.lojapivot.com.br/kit-de-irrigacao-automatizada-rainbird/p?idsku=84295462&gad=1&gclid=Cj0KCQjwwISIBhD6ARIsAESAAmp4FkBxM4dibIbTLcnJTUVV7vkhSkMgHO4YY3XhovME6jyP6Rdr7vfAaAltOEALw_wcB. Acesso em: 30 de junho de 2023.

Lopes, P. R.; Rezende, A. P. C.; Crespi, D.; Galata, R. F.; Silva, F. X.; Cruz, M. S. S.; Santos, J.D.; Kageyama, P. Y. **Princípios e ferramentas para o desenho e manejo de hortas agroecológicas: experiências do projeto assentamentos agroecológicos no extremo sul da Bahia**. Retrato de assentamentos, v.19, n.1, p.175-207, 2016.

Loureiro, J. F.; Brito, R. C.; Favarim, F.; Todt, E. 2018. **Automação de estufa agrícola integrando hardware livre e controle remoto pela internet.** Revista de Computação aplicada ao agronegócio. 1, 1, 38-55. ISSN - 2595-7848.

Madhumathi, R.; Arumuganathan, T.; Shruthi, R. 2022. **Internet of Things in Precision Agriculture: A Survey on Sensing Mechanisms, Potential Applications, and Challenges.** Intelligent Sustainable Systems. 213. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2422-3_42.

Mantovani, E. C. **Avalia: Programa de Avaliação da Irrigação por Aspersão e Localizada.** Viçosa, MG: UFV. 2001.

McCarthy, A.; Foley, J.; Raedts, P.; Hills, J. 2023. **Field evaluation of automated site-specific irrigation for cotton and perennial ryegrass using soil-water sensors and Model Predictive Control.** Agricultural Water Management. 277, 108098. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108098>.

Mendes, W. R.; Araújo, F. M.; Dutta, R.; Heeren, D. M. 2019. **Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing.** Expert Systems with Applications. 124, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.01.043>.

Mira-Garcia, A. B.; Vera, J.; Conejero, W.; Conesa, M. R.; Ruiz-Sanchez, M. C. 2021. **Evapotranspiration in young lime trees with automated irrigation.** Scientia Horticulturae. 288, 110396. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110396>.

Moursy, M. A. M.; Elfetyany, M.; Meleha, A. M. I.; El-Bialy, M. A. 2023. **Productivity and profitability of modern irrigation methods through the application of on-farm drip irrigation on some crops in the Northern Nile Delta of Egypt.** Alexandria Engineering Journal. 62, 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.06.063>.

Nascimento, G.; Villegas, D.; Cantero-Martínez, C. 2023. **Crop diversification and digestate application effect on the productivity and efficiency of irrigated winter crop systems.** European Journal of Agronomy. 148, 126-873. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126873>.

Oliveira, M. G. C.; Pereira, R. M. 2010. **Importância da mecanização na agricultura familiar brasileira.** EMBRAPA. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/869390/1/spmg.pdf>.

Osinga, S. A.; Paudel, D.; Mouzakitis, S. A.; Athanadiadis, I. N. 2022. **Big data in agriculture: Between opportunity and solution.** Agricultural Systems. 195, 103928. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103298>.

Pereira, D. J. S. **Obstrução de gotejadores por interações entre carbonato de cálcio e partículas sólidas: laboratório e campo.** Tese (Doutorado em Ciências) – USP/Escuela Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, p. 79, 2022.

Pinto, M. F. **Desenvolvimento de um sistema para o controle do pH da água para irrigação localizada.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – USP/Escuela Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, p. 83, 2010.

Rahman, M.; Ali, R.; Oliver, M. H.; Hanif, A.; Uddin, Z.; Hasan, T. U.; Saha, K. K.; Islam, H.; Moniruzzaman. 2021. **Farm mechanization in Bangladesh: A review of the status, roles, policy, and potentials.** Journal of Agriculture and Food Research. 6, 100225. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100225>.

Silva, A. O.; Silva, B. A.; Souza, C. F.; Azevedo, B. M.; Bassoi, L. H.; Vasconcelos, D. V.; Bonfim, G. V.; Juarez, J. M.; Santos, A. F.; Carneiro, F. M. 2020. **Irrigation in the age of agriculture 4.0: management, monitoring and precision.** Revista Ciência Agronômica. 51, 20207695. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200090>.

Silva, L. O. **Desempenho agroecônomico de um módulo de cultivo orgânico diversificado de hortaliças com foco no balanço de nitrogênio.** Seropédica – RJ, 2019.

Souza, S. A.; Rodrigues, L. N. 2022. **Irrigation management zone strategies impact assessment on potential crop yield, water and energy savings.** Computers and Electronics in Agriculture. 201, 107-349. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107349>.

Testezlaf, R. **Irrigação: Métodos, sistemas e aplicações.** Campinas: Unicamp/FEAGRI, 2017.

Yang, Z. Zhu, Y.; Zhang, J. Li, X.; Ma, P.; Sun, J.; Sun, Y.; Ma, J.; Li, N. 2022. **Comparison of energy use between fully mechanized and semi-mechanized rice production in Southwest China.** Energy. 245, 123270. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123270>.