

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ CAMPUS CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DESENVOLVIMENTO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM PIVÔ CENTRAL
EXPERIMENTAL

FÉLIX AUGUSTO PAZUCH

CASCAVEL-PARANÁ

AGOSTO DE 2021

FÉLIX AUGUSTO PAZUCH

**DESENVOLVIMENTO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM PIVÔ CENTRAL
EXPERIMENTAL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

Orientador: Dr. Marcio Antonio Vilas Boas

Coorientador: Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira

CASCADEL-PARANÁ

AGOSTO DE 2021

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Pazuch, Félix

DESENVOLVIMENTO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM PIVÔ CENTRAL EXPERIMENTAL / Félix Pazuch; orientador Marcio Antonio Vilas Boas; coorientador Carlos Eduardo Camargo Nogueira. -- Cascavel, 2021.

80 p.

Tese (Doutorado Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, 2021.

1. Irrigação. 2. Pivô central. 3. Automação e controle. 4. Controle Estatístico de Processos. I. Vilas Boas, Marcio Antonio, orient. II. Nogueira, Carlos Eduardo Camargo, coorient. III. Título.

FELIX AUGUSTO PAZUCH

DESENVOLVIMENTO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM PIVÔ CENTRAL EXPERIMENTAL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, linha de pesquisa Recursos Hídricos, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Marcio Antonio Vilas Boas

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Maurício Guy de Andrade

Universidade Federal do Paraná (UFPR)



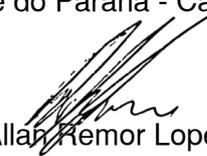
Jian Pires Frigo

Universidade Federal da Integração Latino-Americana (Unila)



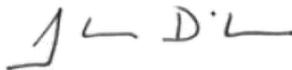
Flávio Gurgacz

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Allan Remor Lopes

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Jonathan Dieter

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Cascavel, 16 de agosto de 2021.

BIOGRAFIA RESUMIDA

Félix Augusto Pazuch, brasileiro, natural de Medianeira, Paraná, é tecnólogo em Manutenção Industrial, grau outorgado em solenidade na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Medianeira, casado, pai e segundo filho na ordem cronológica de nascimento de seus dois irmãos. Possui experiência na área comercial de alimentos, em manutenção e montagem de computadores, na construção civil, em manutenção industrial e em docência técnica e de ensino médio.

O Projeto do Trabalho de Conclusão de Curso, intitulado Aplicação de Sistema Supervisório em Freio Mecânico Automatizado, foi publicado em formato de livro, processo realizado por intermédio e convite da editora. Frequentou e concluiu o curso especial de formação de docentes, com equivalência em licenciatura em Física, curso oferecido pela Faculdade Pólis das Artes, Embu das Artes, São Paulo.

O título de Mestre foi conquistado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura da Universidade Estadual Oeste do Paraná, campus Cascavel, com a defesa da dissertação intitulada Desenvolvimento de uma Ferramenta Computacional para o Dimensionamento de Sistema Fotovoltaicos Isolados e Interligados à Rede. A ferramenta computacional desenvolvida, o FOTODIM - Dimensionamento de Sistema Fotovoltaicos, possui registro, na modalidade de programa de computador, no Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

Educação não transforma o mundo.
Educação transforma as pessoas.
Pessoas transformam o mundo.

Paulo Freire

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais, meus guias, conselheiros, braços direitos da minha caminhada, que nunca deixaram de me apoiar e principalmente de acreditar em meus ideais;

Aos meus irmãos, que sempre dispostos, participaram e colaboraram com a realização deste projeto;

À minha esposa, minha fiel companheira e amiga, por sempre perseverar mesmo quando eu não o fazia, pelas noites em claro que dedicou a nossa filha e por sua compreensão por minhas ausências;

À minha filha, por tornar minha vida muito mais significativa, ao seu afago e, que apesar de sua idade, ser compreensiva com os momentos de ausência do pai;

Aos meus dois avôs que tanto me inspiraram com suas histórias de vida e atitudes, e que hoje nos acompanham em outro plano;

Aos colegas, servidores e professores da Unioeste que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste projeto;

Por fim, a Deus por nunca ter me abandonado e por vezes me carregado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os profissionais da educação, professores, gestores e colegas, que direta e indiretamente participaram e permitiram, por harmonia de suas ações, minha formação acadêmica;

Às pessoas públicas que intervieram, lutaram e investiram recursos públicos na educação, e assim ampliaram as oportunidades de qualificação profissional em instituições públicas;

Em especial, agradeço pelas ações, pelos conselhos e pela persistência dos meus orientadores e coorientadores ao projeto;

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná, aos seus gestores que trabalham para a manutenção, expansão e ao fomento da pós- graduação na instituição;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola que, por consequência da dedicação do corpo docente e da coordenação, fez surgir a oportunidade de participar de sua história;

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura por ter concedido as instalações do programa para a realização dos ensaios;

À Senninger®, por gentilmente ter cedido os produtos de irrigação, equipamentos fundamentais para a realização do projeto;

Por fim, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, agradeço pela bolsa de estudo e pela iniciativa e sensibilidade em prorrogar o tempo de vigência.

DESENVOLVIMENTO, CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM PIVÔ CENTRAL

EXPERIMENTAL

RESUMO

Neste trabalho um pivô central experimental, automatizado com a plataforma Arduino, foi desenvolvido e construído para atender de forma integral às aspirações do projeto. O dimensionamento da linha lateral do pivô desenvolvido foi realizado com base nos resultados de ensaios de distribuição, alcance e vazão, conduzidos com o modelo de spray selecionado e consulta ao manual técnico. O processo de validação do equipamento desenvolvido ocorreu durante ensaios de avaliação do coeficiente de uniformidade aplicando água (C_{UH}). Entre os ensaios de avaliação, foram realizadas modificações no dimensionamento da linha lateral para melhorar a eficiência do equipamento. Após a validação do equipamento desenvolvido, ensaios de uniformidade aplicando fertilizante diluído na água utilizada para irrigação foram realizados para avaliar a correlação entre a variável altura de lâmina (variável preditora) e a variável condutividade elétrica (variável resposta) e se os valores de C_{UH} da lâmina aplicada têm influência sobre os valores de C_{UH} da condutividade elétrica, nas condições adotadas para a realização dos ensaios. O desempenho individual dos sprays durante os ensaios de uniformidade, durante a calibração do equipamento e nos ensaios para aplicação de fertilizante, foi avaliado utilizando o Controle Estatístico de Processos (CEP), adotando o gráfico de controle \bar{x} e R. Assim, o processo de avaliação de cada spray foi obtido pelo valor da capacidade do processo (C_p). Os valores de C_{UH} resultantes dos ensaios de uniformidade com aplicação de água, durante o processo de validação do equipamento, estabilizaram em 84% nas condições e características adotadas para os ensaios, valor que corresponde aos disponíveis na bibliografia em operações com pivôs centrais comerciais. Nos ensaios com aplicação de fertilizante, a média entre os ensaios também alcançou 84%, nas condições e características adotadas para os ensaios. Os valores de C_p para os ensaios de calibração apontam alta probabilidade do equipamento resultar em valores de coeficiente abaixo de 80%, o que não é desejável para pivôs centrais. Estes valores de C_p podem estar atrelados às modificações realizadas na linha lateral entre os ensaios de validação que resultaram em altos valores de amplitude dos dados de lâmina d'água. Ocorreu o oposto para os ensaios com fertilizante, em que foram mantidas as configurações da linha lateral e os valores de C_p apontaram baixa probabilidade do pivô central com coeficientes abaixo do desejável. Dos ensaios com fertilizante, apenas três ensaios apresentaram correlação significativa, após a identificação de possíveis *outliers* e os coeficientes de uniformidade da condutividade elétrica variaram entre 98 e 99%, diferente dos valores de coeficiente de uniformidade para a lâmina de solução que variaram entre 78 e 88%. Diante dos resultados apresentados, não se rejeita a hipótese nula, ou seja, as variáveis lâmina e condutividade elétrica são independentes nas condições adotadas para os ensaios. O modelo de emissor utilizado nas configurações que foi testado e teve melhor desempenho sob pressões a partir de 1 e abaixo com distancimento entre bocais de 3,25 m. Nessas condições, o perfil da lâmina aplicada pelo pivô central aproxima-se da média aplicada e melhora a uniformidade do pivô central, assim, o C_{UH} pode chegar a valores próximos a 90%. Os gráficos de controle e a capacidade do processo são ferramentas excelentes para a agricultura irrigada e o monitoramento do comportamento da lâmina no tempo pode ser utilizado como predição para aumentar o poder de decisão e realização de ensaios de uniformidade.

Palavras-chave: Irrigação por aspersão, spray, correlação, controle estatístico de processos, Arduino.

DEVELOPMENT, CONSTRUCTION AND VALIDATION OF AN EXPERIMENTAL CENTRAL PIVOT

ABSTRACT

Along this research, an experimental central pivot, automated with Arduino's platform, was developed and built to meet the whole project's purposes. The developed sideline dimensioning of the pivot was carried out based on the results of distribution, as well as range and flow tests, using the selected spray model and consulting the technical manual. The validation process of the developed equipment took place during tests to evaluate the coefficient of uniformity by applying water (C_{UH}). There were some changes among the evaluation tests regarding sideline sizing to improve the equipment efficiency. After the developed equipment has been validated, uniformity tests were carried out to apply fertilizer diluted in water used for irrigation to evaluate the correlation between water depth variable (predictive variable) and the electrical conductivity variable (response variable) and whether the C_{UH} values of the applied water depth had influenced on C_{UH} electrical conductivity values, under the adopted conditions to accomplish the tests. The individual performance of the sprays during uniformity tests, as well as the equipment calibration and in fertilizer application tests was evaluated by the Statistical Process Control (SPC), adopting the \bar{x} and R control graph. Thus, the evaluation process of each spray was obtained by the process capacity value (C_p). The C_{UH} values obtained from the uniformity tests with water application, during the equipment validation process, stabilized at 84% under the conditions and characteristics adopted for the tests, a value that corresponds to those available in bibliography in operations with commercial central pivots. The average among the tests also reached 84% in the tests with fertilizer application under the conditions and characteristics adopted for them. The C_p values for the calibration tests have suggested a high probability of the equipment, whose result for coefficient values was below 80%, which is not suitable for central pivots. These C_p values may be associated to some changes that have been made in sideline among the validation tests that resulted in high amplitude values of water depth data. The opposite occurred for the fertilizer tests, in which the sideline configurations were kept and the C_p values showed a low probability of the central pivot with coefficients below the suitable level. Taking into account all the fertilizer tests, only three of them showed significant correlation, after identifying possible outliers, and the uniformity coefficients of electrical conductivity ranged from 98 to 99%, different from the uniformity coefficient values for the solution depth, which ranged from 78 to 88%. According to the obtained results, the null hypothesis was not rejected, that is, water depth and electrical conductivity variables are independent under the conditions adopted for the studied tests. The transmitter model that was tested and used in the configurations performed better under pressures from below 1 to 1, whose distance between nozzles was 3.25 m. Under these conditions, the water depth profile, applied by the central pivot, approaches the applied average, and improves central pivot uniformity, thus, the C_{UH} can reach values around 90%. Control charts and process capability are excellent tools for irrigated agriculture, and monitoring water depth behavior over time can be used as prediction to increase decision-making power and carry out uniformity tests.

Keywords: Irrigation by sprinkler, spray, correlation, statistical process control, Arduino

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 Pivô Central, descrição, cenários e expansão.....	4
3.2 Avaliação de sistemas de irrigação.....	6
3.3 Desempenho dos sprays em pivôs centrais.....	7
3.4 Arduino em projetos de irrigação.....	10
3.5 Controle Estatístico de Processos.....	10
3.5.1 Controle Estatístico de Processos na irrigação.....	11
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
4.1 Local do estudo.....	13
4.2 Estrutura metálica do pivô central desenvolvido.....	14
4.3 Características do sistema hidráulico.....	15
4.4 Painel de controle desenvolvido.....	17
4.5 Ensaios de vazão x pressão.....	18
4.6 Ensaios de distribuição e alcance.....	20
4.7 Distribuição dos sprays sob a linha lateral.....	22
4.8 Caracterização dos ensaios de uniformidade.....	23
4.8.1 Aplicação de água.....	23
4.8.2 Aplicação de fertilizante.....	27
4.9 Controle Estatístico de Processos.....	28
4.9.1 Gráficos de controle.....	28
4.9.2 Capacidade do processo.....	29
4.10 Validação da hipótese formulada.....	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
5.1 Gráficos de contorno.....	32
5.2 Ensaios de uniformidade para aplicação de água.....	34
5.2.1 Gráficos de controle.....	34
5.2.2 Perfil do coeficiente de uniformidade.....	37

5.2.3 Ensaio após ajustes na linha lateral	38
5.3 Ensaios de uniformidade com aplicação de fertilizante.....	41
5.3.1 Gráficos de controle	41
5.3.2 Perfil dos coeficientes de uniformidade	43
5.3.3 Correlação de Pearson e ANOVA.....	45
5.4 Ensaio com aplicação de lâmina d'água não inferior a 15 mm	49
6 CONCLUSÕES.....	52
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
REFERÊNCIAS	55
ANEXO A.....	59
ANEXO B.....	61
ANEXO C	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Materiais utilizados na usinagem e soldagem das peças do pivô central	15
Tabela 2 Comportamento da vazão e do coeficiente de descarga do bocal de 1,59 mm sob variação de pressão	19
Tabela 3 Diâmetro dos bocais utilizados, pressões sob os bocais e distância da posição do bocal ao ponto pivô.....	23
Tabela 4 Avaliação dos coeficientes de uniformidade para pivô central, obtidos utilizando a Equação 2	25
Tabela 5 Diâmetro dos bocais utilizados, pressões sob os bocais e distância da posição do bocal ao ponto pivô após alterações.....	27
Tabela 6 Avaliação dos valores de capacidade de processo (Equação 6)	29
Tabela 7 Classificação dos coeficientes das correlações de Pearson.....	30
Tabela 8 Classificação dos valores de coeficiente de variação.....	33
Tabela 9 Valores de coeficiente e da lâmina média aplicada para ensaios que realizaram e não realizaram sangria do ar	39
Tabela 10 Resultado das correlações de Pearson (r), classificação dos coeficientes e valor t calculado	46
Tabela 11 Resultados da aplicação da ANOVA e da regressão linear aplicadas às variáveis dos ensaios	47
Tabela 12 Resultados das correlações de Pearson (r), classificação dos coeficientes e valor t calculado após identificação de possíveis outliers	48
Tabela 13 Resultados da ANOVA e regressão linear aplicados aos ensaios identificados com possíveis outliers.....	48
Tabela Ib Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 0,5 bar	61
Tabela IIb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 0,5 bar equipado com bocal de 3 mm	61
Tabela IIIb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 0,75 bar	62
Tabela IVb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 1 bar.....	62
Tabela Vb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 1,25 bar.....	62
Tabela VIb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 1,5 bar.....	63
Tabela VIIb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 1,75 bar	63
Tabela VIIIb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 2 bar.....	63
Tabela XIXb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 2,25 bar	64
Tabela Xb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 2,5 bar.....	64
Tabela Ic Descrição dos produtos utilizados no pivô central experimental e os custos envolvidos na sua construção.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Representação gráfica de um sistema de irrigação por pivô central	4
Figura 2 Local de instalação e realização dos ensaios com o pivô central experimental desenvolvido.....	13
Figura 3 Componentes estruturais do pivô central com legendas que fazem referência às informações da Tabela 1	14
Figura 4 Linha lateral do pivô central desenvolvido.....	16
Figura 5 Painel de controle desenvolvido para o pivô central experimental	17
Figura 6 Gráfico da variação da vazão do bocal de 1,59 mm sob variações de pressão	19
Figura 7 - Layout dos coletores durante os ensaios de distribuição e alcance	21
Figura 8a - Imagem realizada durante ensaio de uniformidade durante a aplicação de água e	
Figura 8b - Representação gráfica em 2D das distâncias adotadas para o layout inicial dos coletores	26
Figura 9 Gráfico de controle do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 0,5 bar	34
Figura 10 Gráfico de controle dos grupos de coletores atendidos pelo spray sob 0,75 bar ..	35
Figura 11 Gráfico de controle do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 1,2 bar	35
Figura 12 Gráfico de controle do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 1,8 bar	36
Figura 13: Gráfico de controle do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 0,5 bar (bocal 3 mm)	36
Figura 14 Gráfico do perfil dos valores de coeficientes encontrados durante os ensaios de uniformidade utilizando cinco sprays	38
Figura 15 Perfil da lâmina d'água aplicada com o pivô central.....	40
Figura 16 Gráfico de controle para os valores da lâmina média e da amplitude média do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 0,45 bar	41
Figura 17 Gráfico de controle para os valores da lâmina média e da amplitude média do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 1,8 bar	42
Figura 18 Gráfico de controle para os valores da lâmina média e da amplitude média do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 2 bar	42
Figura 19 Gráfico de controle para os valores da lâmina média e da amplitude média do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 0,65 bar (bocal 3 mm)	43
Figura 20 Gráfico da comparação entre os valores de coeficiente da lâmina d'água e da condutividade aferidas nos coletores	44
Figura 21 Perfil da lâmina de solução aplicada com o pivô central	45
Figura 22 Perfil da lâmina d'água aplicada no ensaio com altura de lâmina não inferior a 15 mm	50

Figura Ia - gráfico de contorno para o spray sob 0,5 bar e Figura Ib - gráfico de contorno para o spray sob 0,5 bar equipado com bocal de 3 mm.....	59
Figura IIa - gráfico de contorno para o spray sob 0,75 bar e Figura IIb - gráfico de contorno para o spray sob 1 bar.....	59
Figura IIIa - gráfico de contorno para o spray sob 1,25 bar e Figura IIIb - gráfico de contorno para o spray sob 1,5 bar.....	59
Figura IVa - gráfico de contorno para o spray sob 1,75 bar e Figura IVb - gráfico de contorno para o spray sob 2 bar.....	60
Figura Va - gráfico de contorno para o spray sob 2,25 bar e Figura Vb - gráfico de contorno para o spray sob 2,5 bar.....	60

1 INTRODUÇÃO

Estabelecer uma conduta de manejo que contemple atividades desenvolvidas com o objetivo de monitorar periodicamente o consumo de energia, de água e da uniformidade de aplicação de sistemas irrigados por pivôs centrais é uma iniciativa que dissemina uma cultura de sustentabilidade e influencia práticas no desenvolvimento de ações que melhoram o desempenho do equipamento em irrigar a cultura.

Durante as operações com o pivô central, o consumo da energia elétrica é diretamente proporcional ao consumo de água, quanto maior a lâmina d'água aplicada, maior o período de operação. Então, aplicar apenas a lâmina requerida, de maneira uniforme, converte o investimento realizado, no sistema irrigado, em aumento na produtividade (MOHAMED et al., 2019).

No Brasil, para a irrigação, o horário reservado compreende entre as 9:30 horas de um dia, até as 6:00 horas do dia seguinte (BRASIL, 2002). Neste período, considerado noturno, não há incidência da radiação solar e tanto a ocorrência como a velocidade dos ventos são menos intensas quando comparadas ao período diurno e vespertino.

Realizar a rega da cultura em horários reservados, no caso do Brasil que é no período noturno, reduz o custo com o kWh e também da água, pois as perdas por evapotranspiração nesse período são desprezíveis (TARJUELO et al., 2000), e frente às flutuações do custo do kWh, uma das maneiras de se reduzir o valor da fatura de energia é transferir o máximo possível das operações da irrigação para horários onde são observadas vantagens tarifárias (GARCIA et al., 2018).

A ação do vento em sistemas irrigados por aspersão é prejudicial para a uniformidade de aplicação, e esta influência é agravada quando a linha lateral é equipada com sprays que têm por característica a formação de pequenas gotas. Dependendo do tamanho do diâmetro do bocal e da pressão de trabalho, ocorre a formação de uma névoa (PETERS; NEIBLING; STROH, 2015) que afeta a uniformidade do pivô, mesmo quando os sprays são instalados próximos ao solo (OKER et al., 2020).

O modelo da placa defletora do spray é outra variável que também influencia a uniformidade de aplicação do pivô central, fator observado em avaliações de uniformidade entre pivôs centrais equipados com modelos de sprays diferentes e em ensaios realizados com um mesmo pivô (SILVA, 2006; ORTÍZ, TARJUELO E JUAN et al., 2010).

Como uma de suas contribuições, o projeto teve como um de seus objetivos investigar a variação dos valores de coeficientes de uniformidade encontrados em pivôs equipados com sprays. A investigação ocorreu durante os ensaios de avaliação de

uniformidade de validação de um pivô central experimental, automatizado, desenvolvido e construído para atender, de maneira integral, às aspirações do projeto.

Os ensaios de uniformidade de aplicação, durante o processo de validação do equipamento, foram todos realizados no período noturno e em dias de ventos de baixa intensidade. O pivô central experimental foi desenvolvido com métodos e soluções alternativas para sua construção com o objetivo de reduzir o investimento inicial. A automação do equipamento seguiu o mesmo conceito, portanto, foi utilizada uma plataforma de prototipagem eletrônica de *hardware* livre, o Arduíno.

Levando em consideração o desempenho do pivô central equipado com sprays e aplicando apenas água, é possível que baixos coeficientes de uniformidade ou sua variabilidade entre as operações possam afetar a distribuição do fertilizante no solo, quando este é diluído em água.

Diante desta hipótese, este trabalho também teve como objetivo avaliar a correlação entre a altura de lâmina de solução, água mais fertilizante, aplicada ao longo da linha lateral de um pivô central experimental, e a condutividade da solução, utilizando sprays de placa defletora fixa ranhurada e também analisar se a variabilidade dos valores de coeficiente de uniformidade da aplicação da solução tem influência sobre os valores de coeficiente da uniformidade da condutividade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho foi desenvolver um pivô central experimental, com métodos e soluções alternativas de construção, automatizar o equipamento desenvolvido utilizando plataforma que oferecesse *hardware* de baixo custo e *software* livre bem como avaliar os coeficientes de uniformidade do equipamento desenvolvido para a aplicação de água e fertilizante.

2.2 Objetivos específicos

- Dimensionar a estrutura metálica, o sistema hidráulico e elétrico do pivô central;
- Realizar os processos de fabricação necessários para a montagem da estrutura metálica do pivô central e montagem da estrutura metálica do equipamento e da parte elétrica correspondente;
- Desenvolver o algoritmo para controlar e monitorar as ações do pivô central desenvolvido;
- Realizar ensaios para obter o coeficiente de descarga, a vazão, o raio de alcance e a uniformidade de aplicação de um spray equipado com placa defletora plana, ranhura e fixa, sob variações de pressão;
- Determinar a posição dos sprays sobre a linha lateral do pivô central desenvolvido e realizar os processos pertinentes para a sua instalação;
- Investigar as variáveis que influenciam na uniformidade de aplicação de um spray equipado com placa defletora plana, ranhura e fixa;
- Avaliar os sprays instalados na linha lateral individualmente utilizando gráficos de controle;
- Avaliar a correlação entre as variáveis altura de lâmina e condutividade elétrica aferidas nos coletores durante os ensaios de uniformidade;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Pivô Central, descrição, cenários e expansão

Uma das primeiras versões do pivô central surgiu em meados de 1948, sendo a primeira patente, relacionada com o equipamento, registrada em nome de Frank L. Zybach agricultor no Colorado, Estados Unidos, em 1952 (BERNARDO et al., 2006; JAVAID, 2011). O pivô central realiza a aplicação da lâmina d'água por um tubo suspenso (linha lateral) onde estão instalados os emissores (FRIZZONE et al., 2011). A linha lateral é suspensa por uma estrutura treliçada que é apoiada nas suas extremidades.

No vão inicial do pivô central (Figura 1), a estrutura treliçada é apoiada por duas torres: uma fixa e a outra móvel. A torre fixa é o ponto pivô do equipamento que oferece suporte para que as demais torres móveis realizem movimento circular em relação ao ponto pivô. A última torre inicia uma reação de avanço em cadeia de forma progressiva para o centro, com isso, as mesmas podem realizar o giro completo ou parcial, isso depende do tamanho, do formato e das condições da área de cultivo (BISCARRO, 2009).

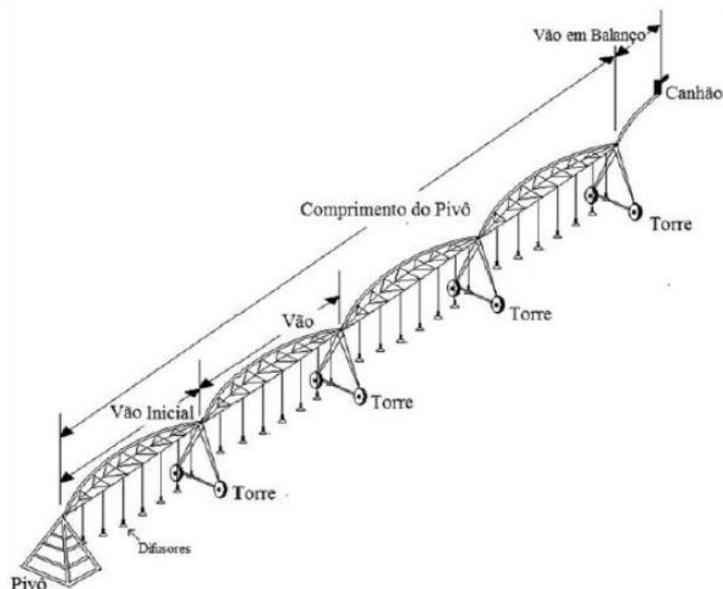


Figura 1 Representação gráfica de um sistema de irrigação por pivô central
Fonte: Biscaro (2009)

O mapeamento nacional de pivôs centrais de 2014, realizado em conjunto pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), identificou 19.892 equipamentos que ocupam 1,275 milhão de hectares (Mha).

Os resultados do mapeamento apontam crescimento de 43,3% da área irrigada por pivôs centrais em relação ao ano de 2006 (IBGE, 2006).

No mesmo período, o mesmo que compreende os anos de 2006 a 2014, a participação do consumo de energia elétrica do setor agropecuário partiu de 16,1% em 2006 para 20,5% em 2014 (BEN, 2015). Parte deste aumento pode ser justificado pela modernização sofrida no setor agropecuário em todas as áreas, não apenas na irrigação.

No ano de 2017, a área irrigada por pivôs centrais era de aproximadamente 1,394 Mha, o que correspondia a aproximadamente 20% da área total irrigada, 119 mil de hectares a mais que 2014, e o cenário de expansão para 2030 (projeção 2015-2030) prevê aumento da área irrigada por pivôs centrais para 2,885 Mha, um crescimento de 107% para o setor, em comparação a 2017 (ANA, 2017).

É importante ressaltar que o aumento da demanda de energia, ocasionada por parte do aumento da área irrigada por pivôs centrais, destaca o quanto é importante discutir sobre métodos racionais para o consumo de energia elétrica. Moraes et al. (2014) destacam que a agricultura é altamente dependente de energia elétrica para aumentar a produtividade e assim atender às necessidades do mercado.

Turco et al. (2009) descrevem que o custo com a energia elétrica é uma das variáveis mais sensíveis no custo final da irrigação, e que a possibilidade de escassez de energia e de água, aliada à rápida elevação dos custos de produção, pressiona e acelera o interesse para o uso racional desses.

Embora as práticas racionais de consumo da energia elétrica, em tempos onde o valor do kWh é fator importante no balanço final da safra em áreas irrigadas, sejam um assunto de pauta que carece de ação conjunta, o aumento do consumo do principal insumo da agricultura irrigada alcançou valores ainda mais expressivos.

A retirada de água do período que compreende os anos de 1995 a 2016 passou de 100 m³.s⁻¹ para 969 m³.s⁻¹, o que corresponde a 46,2% do total de água retirada no Brasil em 2016, enquanto o consumo urbano, segundo o registro em 2016, é de 488,3 m³.s⁻¹, praticamente a metade da irrigação (ANA, 2016).

No mesmo cenário apresentado pela Agência Nacional das Águas (período 2015 a 2030) acompanhando o crescimento da área irrigada (6,95 para 10,09 Mha), a retirada de água, que em 2016 era de 969 mil L.s⁻¹, prevê que no ano de 2030 a irrigação alcance 1,338 milhões L.s⁻¹ (ANA, 2017).

Deste aumento, a irrigação por pivôs centrais passará de 177,327 mil L.s⁻¹ em 2015, para 361,260 mil L.s⁻¹ em 2030, o que corresponde a um acréscimo de mais de 100%, deixando os pivôs centrais apenas atrás do Arroz-Convencional e igualado às demais culturas e aos sistemas de irrigação na retirada de água em 2030 (ANA, 2017).

É notável que pelos dados contidos nos relatórios citados, o crescimento da irrigação por pivô central aumenta não só o consumo de água mas também o de energia elétrica, logo, é de suma importância implementar métodos de manejo condizentes com a sustentabilidade ambiental.

3.2 Avaliação de sistemas de irrigação

A avaliação de sistemas de irrigação, seja realizada em laboratório ou no campo, se concentra geralmente na aferição da quantidade de água aplicada, ou seja, em registrar qual a lâmina d'água que se está aplicando por área, a quantidade de água infiltrada e se a quantidade aplicada está atendendo às variáveis do solo e da cultura, como a Irrigação Real Necessária (IRN) e a Capacidade Real de Água no Solo (CRA).

Os equipamentos avaliados em laboratório têm por finalidade verificar se as características do produto, como vazão e pressão de serviço, estão dentro do especificado pelo fabricante. Nos tubos gotejadores, por exemplo, se a vazão entre os gotejadores estiver fora de um limite estabelecido, essa vai comprometer a produtividade da cultura.

Mas esta prática fica restrita aos laboratórios credenciados, como é o caso do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Engenharia de Irrigação (INCTEI) que, embora não exista legislação vigente no Brasil a respeito da certificação de equipamentos para irrigação, o laboratório situado no Campus Luíz de Queiros - ESALQ/USP divulga os resultados dos ensaios realizados.

No campo, as avaliações dos sistemas de irrigação permitem ao agricultor conhecer qual parcela de sua área de cultivo está em deficit ou sofrendo com estresse hídrico, portanto, sem um diagnóstico correto do sistema, é impossível se irrigar a cultura de forma adequada. Os custos operacionais do sistema irrigado estão diretamente ligados ao custo final do produto, logo, irrigar de forma uniforme garante que a instalação do sistema converta o investimento em aumento dos lucros da propriedade.

Os parâmetros que influenciam a uniformidade de aplicação de água podem ser avaliados em um sistema por pivô central, e são variados, já que os mesmos podem obter informações a partir das condições meteorológicas, velocidade de deslocamento das torres móveis, topografia da área irrigada, dimensionamento da linha lateral entre outros.

Valín et al. (2012) e Islam (2017) destacam que os esforços para aumentar eficiência do pivô central têm sido focados no aumento da uniformidade de aplicação da água, no controle dos impactos ambientais, tais como perdas operacionais excessivas de água e

fertilizantes, e na redução do consumo de energia através da redução da pressão de operação.

3.3 Desempenho dos sprays em pivôs centrais

Emissores tipo spray utilizados em sistema de irrigação pivô central, se comparados aos demais modelos de emissores disponíveis, têm maior probabilidade de serem afetados por condições climáticas durante as operações da irrigação, devido às características físicas da gota formada. Mas, mesmo levando em consideração essa vulnerabilidade, o surgimento dos sprays melhorou os valores de coeficiente de uniformidade de aplicação, atribuídos ao pivô central (PETERS; NEIBLING; STROH, 2015).

O MESA, Mid Elevation Sprinkler Application, ou Spray Instalado à Média Elevação refere-se aos sprays instalados geralmente a meia altura, entre o solo e a linha lateral, já o LESA, Low Elevation Sprinkler Application, ou Spray Instalado à Baixa Elevação, refere-se aos sprays posicionados mais distantes da linha lateral, a aproximadamente 0,3 m do solo (CHAKRABORTY, KHOT, PETERS, 2020).

Devido à proximidade da configuração LESA com o solo, um melhor valor de uniformidade pode ser encontrado nesta configuração, mas a vulnerabilidade quanto às condições climáticas durante as operações, em média, apresenta valores entre 79 a 85% de coeficiente de uniformidade radial (CU_r) para as duas configurações (SCHNEIDER, 2000; PETERS; NEIBLING; STROH, 2015).

As siglas MESA e LESA na bibliografia referem-se apenas à distância do spray em relação ao solo e o espaçamento entre os sprays é individual para cada projeto e não recebe uma denominação específica. Durante o dimensionamento da linha lateral de um pivô central, um dos objetivos é definir o posicionamento dos emissores que podem alcançar a melhor uniformidade possível durante a aplicação de água. Muitos fatores podem afetar a uniformidade em pivôs centrais, como a ausência de manutenção preventiva dos equipamentos, as condições climáticas, a execução do projeto, entre outros, motivos pelos quais é possível se explicar a variabilidade de valores de coeficientes de uniformidade disponíveis na bibliografia para pivôs centrais equipados com sprays.

Oliveira et al. (2004) realizaram ensaios de avaliação de uniformidade em onze pivôs centrais no Oeste do estado da Bahia, Brasil. O coeficiente de uniformidade foi determinado utilizando o método do coeficiente de uniformidade radial (CU_r). Todos os pivôs centrais estavam equipados com sprays, mas a altura de instalação não foi informada. Os valores de

coeficiente para os pivôs avaliados por Oliveira et al. (2004) variaram entre 67,6 a 92,4%, cuja média de CU_r para os pivôs ensaiados é igual a 83%.

Mohamed et al. (2019), ao avaliarem a uniformidade de distribuição de seis pivôs centrais utilizando o CU_r , onde foram implantados pivôs equipados com sprays próximos ao solo (LESA), encontraram valores de coeficiente que variaram entre 80 e 89%. Oker et al. (2020) também utilizaram a altura de instalação correspondente ao LESAs e encontraram valor igual a 83,3% para o coeficiente de uniformidade da média ponderada (C_{UH}) para o ensaio realizado, método diferente ao utilizado por Mohamed et al., (2019), mas que corresponde aos valores da bibliografia. Valores entre 80 e 90% geralmente são avaliados como de “moderados a bons” entre os métodos CU_r e C_{UH} .

A variabilidade da uniformidade também pode ser relacionada à tecnologia de placa defletora que equipa o spray. Ortiz, Tarjuelo e Juan et al. (2010) compararam o desempenho entre sprays de placa rotativa (RSPS) e de placa fixa (FSPS), as duas ranhuradas. Os dois modelos de spray foram instalados em um único pivô, com os modelos separados por vão, e em cada vão, os sprays foram instalados em diferentes alturas e distânciamentos. Para placas rotativas, o valor de CU_r ficou entre 90 e 95% e para os de placa fixa entre 80 e 85%. Os autores descrevem que os emissores de placa fixa foram mais susceptíveis à velocidade do vento.

Silva (2006) realizou dez ensaios de uniformidade utilizando o mesmo pivô central: o pivô foi equipado com FSPS de placa lisa em cinco ensaios, e em outros cinco com FSPS de placa ranhurada. Os dois modelos foram instalados a 3,9 m do solo (MESA), espessados a 1,5 m, todos sob 1,4 bar. Os bocais utilizados variavam entre 2,75 a 6 mm de diâmetro ao longo da linha lateral. Os valores de coeficiente de uniformidade da média ponderada (C_{UH}) variaram entre 68% e 90% para placa ranhurada e entre 86 a 96% para placa lisa, enquanto a lâmina aplicada por ensaio variou entre 12,1 e 17,2 mm.

A baixa uniformidade e alta variabilidade dos valores encontrados nos ensaios utilizando placa fixa ranhurada, segundo Silva (2006), são atribuídas aos tipos de placa defletora utilizada, que também provocam maior escoamento superficial quando comparadas às placas fixas lisas, se o solo não estiver protegido por cobertura vegetal a fim de evitar o impacto das gotas, isso para solos mediterrâneos.

Ouazaa et al. (2015), nos ensaios de uniformidade, utilizaram FSPS de placa ranhurada, quando instalados a 2 metros do solo (MESA), espessados a 5,56 m, todos sob 1,38 bar. Os diâmetros de bocal variavam de 2,2 a 8,7 mm ao longo da linha lateral. Aplicando uma altura de lâmina entre 6,4 a 8,5 mm, os valores de C_{UH} variaram entre 77,4 e 87%. Para Ouazaa et al. (2015), a principal variável que interferiu na uniformidade foi a velocidade do vento.

Li et al. (2020) utilizaram o mesmo modelo de FSPS que Ouazaa et al. (2015), mas adotaram configuração diferente: os emissores foram instalados a 1,6 m do solo (MESA), espessados a 2,88 m, todos sob 1,03 bar. O diâmetro dos bocais também variavam ao longo da linha lateral. Ao ser aplicada uma altura de lâmina entre 1,5 a 10,9 mm, os valores de C_{UH} variaram entre 64,3 a 73,5%. Li et al. (2020) comentam que a alteração da altura da lâmina de água entre os ensaios e o tamanho dos coletores utilizados prejudicou a uniformidade dos ensaios.

Hui, Zheng e Yan (2021) avaliaram a uniformidade de aplicação do FSPS do mesmo modelo utilizado por Ouazaa et al. (2015) e Li et al. (2020), acima e abaixo da cultura do milho, em dois ensaios: um durante o estágio vegetativo da sexta folha (V6) e o outro durante o pendoamento (VT).

Acima da cultura, o valor de C_{UH} tanto no estágio V6 quanto no estágio VT foi igual a 78,1%, diferente dos valores encontrados abaixo da cultura que são de 73,5 e 58,6% para V6 e VT, respectivamente, quando foi aplicada a mesma altura de lâmina (32,7 mm). A configuração da instalação dos sprays adotada por Hui, Zheng e Yan (2021) é igual à configuração utilizada por Li et al. (2020), a diferença é que Hui, Zheng e Yan (2021) utilizaram apenas um diâmetro de bocal em todos os emissores.

Dong-yu, Hai-jun, Lian-hao (2020) utilizaram o mesmo modelo de spray que Ouazaa et al. (2015), Li et al. (2020) e Hui, Zheng e Yan (2021), o qual foi instalado a 1,6 m do solo em apenas um vão do pivô central. Os autores realizaram dois ensaios de avaliação para a uniformidade do pivô e aplicaram uma lâmina de solução (água+nitrogênio) inferior a 10 mm em ambos os ensaios, cujos valores de C_{UH} encontrados foram 81 e 78%.

Dong-yu, Hai-jun, Lian-hao (2020) descrevem que sprays de placa ranhuradas rotativas, instalados em outro vão do pivô central, apresentaram valores de coeficientes significativamente maiores que os sprays de placa fixa nos ensaios realizados, porém, os valores inferiores de coeficiente do spray de placa fixa tiveram baixa influência na eficiência do uso da água e do nitrogênio, este diluído em água, o que não afetou significativamente o desempenho do equipamento quando comparado aos resultados dos sprays de placa ranhurada rotativa.

A variabilidade dos valores de coeficientes encontrados na bibliografia demonstra a complexidade que envolve o dimensionamento da linha lateral de um pivô central. É evidente que a velocidade do vento afeta a uniformidade, mas as características de instalação, como altura de instalação (MESA ou LESA), espaçamento, pressão de trabalho e diâmetro do bocal são individuais para cada marca e modelo de spray e projeto. Assim, o desafio é encontrar a melhor configuração de instalação que entregue o melhor desempenho ao equipamento.

3.4 Arduíno em projetos de irrigação

O Arduíno é uma plataforma de prototipagem eletrônica programável de software livre. A versatilidade que a plataforma apresenta são pontos importantes para a pesquisa, quando está em fase desenvolvimento e execução do projeto, pois a plataforma permite modificações rápidas no projeto. O baixo custo da plataforma quando comparado aos demais produtos similares disponíveis no mercado e a variedade de módulos compatíveis com o Arduíno disponíveis para diferentes aplicações são outros atrativos da plataforma.

Gunawan et al. (2019) e Kunal et al. (2019) realizaram estudo semelhante com o Arduíno na irrigação. Manobras que antes eram realizadas manualmente em um reservatório comunitário de água, compartilhado por produtores rurais, foram substituídas por um sistema automatizado controlado por Arduíno, que envia dados aos dispositivos móveis dos produtores como a umidade do solo. Os dados enviados aos dispositivos móveis dos agricultores aumentaram o poder de decisão e a redução do consumo d'água.

Spinelli, Gottesman e Deenik (2019) conseguiram substituir e reduzir os custos de um equipamento, uma central meteorológica controlada pelo software Crop Manage, utilizando a plataforma Arduíno como um dos substitutos do projeto original. O projeto é um programa do governo, que ajuda os agricultores no poder de decisão no momento da irrigação. O programa tem como um dos objetivos preservar o recurso hídrico da região.

Os resultados de alguns exemplos recentes de trabalhos publicados comprovam que a plataforma Arduíno tem capacidade de controlar sistemas de irrigação e até mesmo de substituir equipamentos de maior valor agregado. Projetos que utilizaram a plataforma Arduíno em sistema de irrigação mecanizada, especificamente em pivôs centrais, foram encontrados somente no trabalho de Sobenko et al. (2018), que utilizaram a plataforma Arduíno no desenvolvimento de um novo conceito de aspersores utilizados em pivo central.

Sobenko et al. (2018) desenvolveram um aspersor que varia o diâmetro do bocal. Comercialmente, os bocais são intercambiáveis e o controle da vazão é em sistemas de pressão constante, realizados com a troca do bocal por outro de diâmetro maior ou menor. No caso do aspersor de Sobenko et al. (2018), a variação do diâmetro do bocal é realizada por um mecanismo íris, o mesmo é controlado pelo Arduíno.

3.5 Controle Estatístico de Processos

O Controle Estatístico de Processos (CEP) é uma poderosa coleção de ferramentas de resolução de problemas, útil na obtenção da estabilidade do processo e na melhoria da

capacidade a partir da redução da variabilidade. É um dos maiores desenvolvimentos tecnológicos do século vinte, pois se baseia em sólidos princípios, é de fácil uso, tem impacto significativo e pode ser aplicado a diversos processos (MONTGOMERY, 2017).

Quando corretamente aplicado, o CEP permite que o processo funcione de forma consistente, previsível e que atinja uma alta qualidade, com baixo custo e oferece uma linguagem comum para gerenciar o desempenho do processo construindo um ambiente no qual todos os indivíduos desejam melhora contínua na qualidade (ESPINOZA et al., 2019).

Para atingir a estabilidade de processos, faz-se necessário abordar a situação de maneira científica, buscando fundamentos para que as tomadas de decisões sejam baseadas em dados e fatos do que se deseja atingir dentro do processo de objetivo do estudo (CARPINETTI, 2010; ABATI et al., 2016). Quando um processo é dito estável, o mesmo pode apresentar variações, mas esta variação é consistente e previsível, além de ser utilizada para estabelecer limites de controle (SCHMIDT; WALKER; PEARSON, 2018).

Das ferramentas do CEP, o gráfico de controle é, provavelmente, o mais sofisticado tecnicamente. Ele é um artifício para se descrever, de maneira precisa, o que se entende por controle estatístico; baseia-se na suposição de normalidade e pode ser utilizado de várias maneiras (MONTGOMERY, 2017).

Os gráficos de controle permitem avaliar a distribuição, a variabilidade dos dados e a qualidade do processo adotado para os ensaios. O gráfico de controle utiliza linhas de controles, uma central, que é o valor alvo do estudo, uma linha superior e outra inferior. De modo geral, se os pontos dos gráficos não excederem as linhas de controle, inferior e superior, e se não apresentarem qualquer tendência, o processo é considerado como dentro do controle estatístico.

3.5.1 Controle Estatístico de Processos na irrigação

Os primeiros relatos da aplicação do Controle Estatístico de Processos (CEP) na irrigação são encontrados nos estudos desenvolvidos na área de concentração de recursos hídricos do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Agrícola. Nos estudos desenvolvidos no programa, o Controle Estatístico de Processos foi aplicado na irrigação localizada, na aspersão e na microaspersão. O controle da uniformidade de aplicação no tempo foi utilizado na aplicação da água, fertilizantes e águas residuais.

Foram avaliados sistemas na irrigação por gotejamento (JUCHEN et al., 2013; KLEIN et al., 2015; HERMES et al., 2015; HAUPHENTAL et al., 2018; LOPES et al., 2019; LOPES et al., 2020; LOPES et al., 2021), na microaspersão (ANDRADE et al., 2017) e na aspersão

convencional (FRIGO et al., 2013). Dentre os projetos que utilizaram o CEP para avaliar o desempenho dos sistemas de irrigação, já houve a utilização de água, fertilizante e água residuária. Em todos os projetos, o feedback dos autores foi positivo diante da versatilidade da ferramenta para a avaliação dos sistemas irrigados. Há um consenso entre as conclusões dos trabalhos, que utilizaram o CEP, de que a ferramenta é capaz de identificar falhas nos processos adotados para os ensaios de avaliação, quando elas ocorrem.

Também, segundo os autores citados, os resultados do CEP, integrados aos resultados dos métodos utilizados para a avaliação do coeficiente de uniformidade do sistema irrigado, aumentam o poder de decisão do operador quando se faz necessária a intervenção no sistema para corrigi-lo ou para certificar o bom desempenho e a avaliação do sistema de irrigação. Até a presente data, não há registros de trabalhos que utilizaram o CEP na avaliação de sistemas na irrigação mecanizada, em pivôs centrais, como é o caso da proposta deste projeto.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local do estudo

O pivô central foi instalado em uma área experimental no campus da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, localizada na Rua Universitária, nº 1619, Bairro Universitário, campus Cascavel, Paraná. A área experimental estava sob os cuidados do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, que gentilmente cedeu o local para a realização das atividades do projeto. O local de instalação do pivô central fica na parte de trás do Laboratório de Protótipos (Figura 2). As dimensões da área experimental permitiram que o pivô se deslocasse 1/8 da sua capacidade total de área irrigada.



Figura 2 Local de instalação e realização dos ensaios com o pivô central experimental desenvolvido

Fonte: Google Earth (2021)

Os obstáculos que contornavam a área experimental onde foram realizados os ensaios com o pivô central experimental, tanto os obstáculos verdes quanto os artificiais, se comportaram como bloqueadores do vento que incidiam no local de ensaios. Desta forma, os obstáculos colaboraram para que os ensaios fossem realizados sem a presença de vento. Quando havia a presença de vento, os ensaios eram cancelados.

Todas as atividades realizadas com o pivô central experimental, como os ensaios de uniformidade, ocorreram em período noturno. A decisão em realizar os ensaios em período noturno foi motivada pelo fato de que a ocorrência de vento neste período é menor quando comparada ao período diurno, bem como a velocidade. Outra motivação foi a ausência da radiação solar, mitigando assim a evapotranspiração das amostras.

4.2 Estrutura metálica do pivô central desenvolvido

O design da estrutura metálica do pivô foi desenvolvido em ambiente virtual. A ferramenta utilizada para realizar a tarefa foi o Tinkercad, de propriedade da Autodesk™. O material adotado para a estrutura metálica do pivô central foi o aço SAE 1020. Os tubos utilizados para a construção da linha lateral foram adquiridos em aço galvanizado. O custo do aço galvanizado é mais elevado quando comparado ao aço SAE 1020, porém, o pivô central é utilizado para a aplicação de água e fertilizante e independentemente do fertilizante, este acelera processos de corrosão em materiais metálicos sem proteção.

Antes de adquirir os materiais para iniciar a construção do pivô central, foram avaliadas, em *software*, as cargas que a estrutura iria ter que suportar, e se a mesma resistiria a essas cargas. As avaliações foram realizadas no ambiente virtual do *software* Ftool, edição básica, versão 4.0. As avaliações da estrutura metálica foram acompanhadas pelo professor Me. Jorge Augusto Wissman, membro titular do corpo de docentes do curso de Engenharia Civil da Unioeste, campus Cascavel, Paraná.

Na Figura 3 é apresentado um croqui dos componentes estruturais do pivô central desenvolvido e as respectivas legendas dos materiais utilizados com referência à Tabela 1.

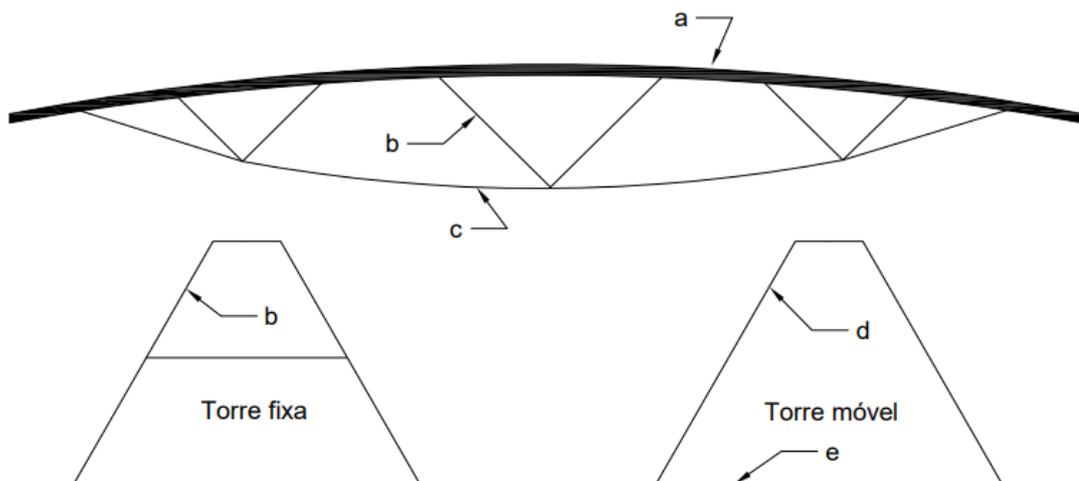


Figura 3 Componentes estruturais do pivô central com legendas que fazem referência às informações da Tabela 1

Fonte: Autor

As dimensões dos materiais utilizados no design do pivô central, nas simulações de cargas e posteriormente adquiridos, estão descritas na Tabela 1. O custos relacionados à estrutura metálica estão descritos na Tabela 1c do Anexo C.

Tabela 1 Materiais utilizados na usinagem e soldagem das peças do pivô central

itens	Materiais	Dimensões
a	Tubo galvanizado	6 m x 60 mm x 3 mm
b	Cantoneira	6 m x 38 mm x 38 mm x 3 mm
c	Cabo de aço	40 m x 3,17 mm
d	Viga "U"	6 m x 150 mm x 50 mm x 3 mm
f	Tubo retangular	2 m x 150 mm x 3 mm

Fonte: Autor

Os processos de usinagem, soldagem e pintura foram realizados no Laboratório de Máquinas Agrícolas, Tratores e Motores, da Unioeste, campus Cascavel, Paraná, de responsabilidade do professor Dr. Flávio Gurgacz, membro titular do corpo de docentes do curso de Engenharia Agrícola e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, também da Unioeste, campus Cascavel, Paraná.

4.3 Características do sistema hidráulico

O reservatório utilizado para os ensaios tinha a capacidade de 1m³ e foi instalado em mesmo nível ao local de instalação do conjunto motobomba a uma distância de aproximadamente 1 metro. A interligação entre o reservatório e a motobomba foi realizada utilizando tubo PVC de 2". A motobomba utilizada para a pressurização do sistema é fabricada pela empresa Famac, modelo FCA-K, com pressão máxima de 34 mca, equipada com motor de indução, trifásico com 5cv de potência elétrica. O modelo é recomendado para a irrigação e para fluidos com presença de sólidos.

O local de instalação da torre central do pivô se encontrava a 12 metros de distância do conjunto motobomba, e nesta interligação também foi utilizado tubo PVC de 2". O desnível entre o conjunto motobomba e a torre central era desprezível.

As saídas para os sprays foram perfuradas, sobre o tubo galvanizado, com diâmetro de 3/4". Em todas as perfurações foram conectados goosenecks de entrada e saída de 3/4". Para que fosse possível a conexão dos goosenecks sobre o tubo galvanizado, luvas de aço galvanizado com rosca interna de 3/4" foram posicionadas sobre as perfurações realizadas no tubo galvanizado e fixadas utilizando solda tipo MIG. Os sprays foram posicionados a 1,20 metro com referência ao solo, a medida foi aferida da base da placa defletora ao solo. A decisão da altura de instalação dos sprays foi baseada nas diretrizes da norma 11545 de 2016 da ABNT, que orienta aos operadores que a distância entre o topo do coletor e a descarga do spray deve ser de no mínimo 1 metro, sendo que 1,20 m fica dentro do especificado.

Outra motivação para a definição da altura da instalação dos sprays foi em relação à ergonomia durante a instalação dos sprays e ajuste da pressão sobre os sprays, bem como no monitoramento das pressões durante os ensaios. As conexões entre os sprays e *goosenecks* foram realizadas utilizando mangueiras de $\frac{3}{4}$ ". Válvulas tipo esfera foram instaladas entre as mangueiras e os sprays para ajustar e fixar os valores das pressões sobre os sprays, as quais foram aferidas por um manômetro analógico tipo Bourdon instalado entre o spray e a válvula tipo esfera.

Na Figura 4, é possível visualizar os detalhes das instalações dos sprays descritos.



Figura 4 Linha lateral do pivô central desenvolvido
Fonte: Autor

Os sprays foram instalados no início e no final da linha lateral, onde havia um manômetro para a aferição durante os ensaios. Nos demais, a pressão foi ajustada durante a instalação e verificada antes de realizar cada ensaio. O modelo de spray utilizado nos ensaios foi o super spray de cor preta da Senninger®.

O modelo foi equipado com placa defletora fixa, plana, de 36 ranhuras médias. A máxima pressão admitida sobre o bocal do super spray é de 2,76 bar e a mínima de 0,41 bar. Os bocais disponíveis são intercambiáveis, ou seja, é possível alterar o diâmetro do bocal sem ser necessária a substituição total do spray. Os diâmetros de bocais disponíveis, para o modelo de spray utilizado, variaram de 1.59 mm a 10.32 mm. Os *goosenecks*, as mangueiras de descida, os bocais e os sprays foram gentilmente cedidos pela Senninger®.

Os custos relacionados ao sistema hidráulico estão descritos na Tabela I do Anexo C. Os custos dos equipamentos da marca Senninger® utilizados no pivô central são: os sprays, as mangueiras de descida, os *goosenecks* e os pesos não são apresentados na Tabela Ic do Anexo C.

4.4 Painel de controle desenvolvido

O modelo selecionado para o projeto do pivô central foi Arduíno UNO R3, que é uma placa de microcontrolador baseada no chip ATmega 380. Possui quatorze pinos de entrada ou saída digitais e seis entradas analógicas. O Uno R3 usa uma memória flash de 32 KB com 0,5 KB usada para carregamento de inicialização, 2 KB de SRAM e 1 KB de EEPROM (memória pronta para uso programável apagável eletricamente).

Na Figura 5, o painel de controle do pivô central contém, na parte inferior à esquerda, as contadoras do motoredutor; à direita, na parte inferior, estão a contadora e o relé de sobrecarga da motobomba, ao centro, na parte inferior, o está o disjuntor termomagnético de 20 ampéres curva C e na parte superior do painel, estão as botoeiras de pulso, o visor de led e ao fundo estão a placa de Arduíno e o módulo de relés de impulso.



Figura 5 Painel de controle desenvolvido para o pivô central experimental
Fonte: Autor

No modo automático da operação, o operador determina qual o tempo, em minutos, entre os acionamentos do motoredutor e o sentido de rotação da torre móvel, horário ou

anti-horário. Neste modo de operação, quatro botoeiras são necessárias para realizar as ações, o enter altera entre as opções, tempo entre acionamentos da motobomba e o sentido de rotação. A botoeira up e down acrescentam ou diminuem o tempo em minutos para o acionamento do motoredutor e alternam entre o sentido de rotação, horário ou anti-horário.

O algoritmo desenvolvido para controlar o pivô central permite ao usuário operar o equipamento em modo manual ou automático. Ao ser energizado o painel de controle, no visor de lcd 16x2, é visível ao operador “modo de operação” na primeira linha e “manual” na segunda linha, se o modo de operação manual é o desejado, basta o operador pressionar enter que as opções deste modo ficam disponíveis, se a desejada for automático, basta ao operador pressionar up ou down para alterar as opções de operação.

No modo de operação manual, é disponível ao operador acionar os motores do equipamento de maneira individual. O motor acoplado à bomba pode ser acionado pressurizando a linha hidráulica bem como o motoredutor movimentando a torre móvel para o sentido horário ou anti-horário. O motor acoplado à bomba tem 5 cv e o motor acoplado ao redutor da torre móvel tem $\frac{1}{4}$ cv de potência elétrica.

O avanço da torre móvel é controlado por um sensor magnético que envia um sinal digital ao Arduíno quando reconhece umas das pastilhas de ímã instaladas na roda movida. A posição das pastilhas permite a cada acionamento do motoredutor que a torre móvel se desloque 0,25 m em média. A tração é realizada apenas em uma das rodas. O sinal digital para desligar ou ligar os motores do pivô central parte da placa do Arduíno ao módulo de relés de impulso que é alimentado por fonte CC individual.

O custos relacionados ao sistema elétrico e de comando do pivô central estão descritos na Tabela Ic do Anexo C.

4.5 Ensaio de vazão x pressão

Com o pivô em modo manual, após a estabilização da pressão desejada, um coletor milimetrado, com capacidade para 5 L, foi posicionado sob o spray, de modo que a parede inferior interna do recipiente tocasse na parte inferior do spray, evitando que o choque da água com a parede inferior lateral do recipiente resultasse em perdas do fluído. Apenas uma saída da linha lateral foi utilizada, as demais foram obstruídas.

Após transcorridos dez segundos, o fluxo de água foi interrompido utilizando a válvula tipo esfera, a mesma utilizada para ajustar e fixar a pressão desejada, e a motobomba foi desligada. Para cada pressão fixada, o ensaio foi repetido três vezes. Dos

três valores obtidos e convertidos em L/h, foi calculada a média amostral, cujo resultado foi tomado como vazão do spray para a pressão ensaiada.

De posse de todos os valores médios de vazão, utilizando o software Excel, os dados foram organizados (Tabela 2) e posteriormente submetidos a um teste de qualidade para ajuste da curva, o R^2 .

Tabela 2 Comportamento da vazão e do coeficiente de descarga do bocal de 1,59 mm sob variação de pressão

Pressão sob o spray (bar)	Vazão (L/h)	Coefficiente de descarga (adimensional)
0,5	55,8	0,7885
0,75	70,56	0,8141
1	89,52	0,8945
1,25	103,2	0,9223
1,5	120,96	0,9869
1,75	132	0,9971
2	137,52	0,9717
2,25	145,44	0,9688
2,5	156	0,9859

Fonte: Autor

A linha de tendência que mais se adequou à curva do gráfico foi a linear resultando em um R^2 igual a 0,9728. No gráfico da Figura 6 é possível observar o comportamento da vazão em relação à variação da pressão sob o spray.

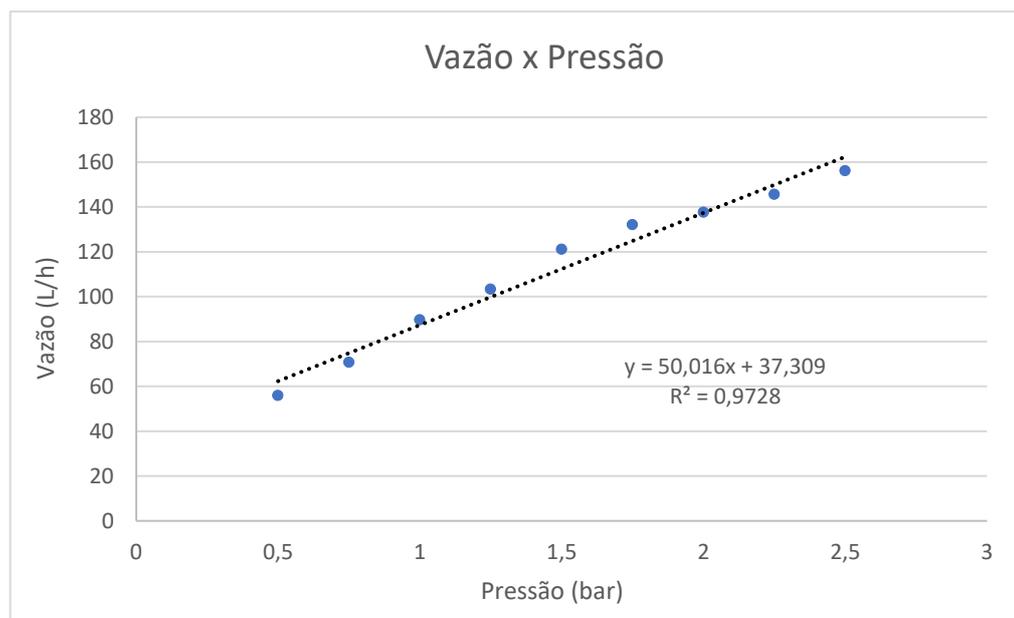


Figura 6 Gráfico da variação da vazão do bocal de 1,59 mm sob variações de pressão

Fonte: Autor

Para o próximo ensaio de vazão, a pressão foi acrescida de 0,25 bar, e o mesmo procedimento foi aplicado para a pressão anterior, e aplicado para a nova pressão ajustada. Os ensaios iniciaram em 0,5 bar e terminaram em 2,5 bar, máxima pressão obtida pelas configurações do sistema hidráulico.

Foi calculado o coeficiente de descarga (Equação 1) do spray para cada pressão fixada nos ensaios de vazão. O coeficiente de descarga foi determinado com o objetivo de conhecer o seu comportamento variando a pressão sem alterar o diâmetro do bocal.

$$C_d = \frac{q}{A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

C_d - coeficiente de descarga (adimensional);

q - vazão do aspersor em m³.s⁻¹;

A - área do bocal em m²;

g - aceleração da gravidade em m.s⁻¹;

H - pressão sobre o bocal em mca.

Após conhecer o comportamento da vazão do spray sob a diferença de pressão, os ensaios para conhecer a distribuição e o alcance do spray na altura instalada foram iniciados.

4.6 Ensaios de distribuição e alcance

No catálogo de produtos da Senninger, o espaçamento máximo entre os bocais é especificado em duas alturas de instalação: a 1,80 m e a 2,74 m do solo, as alturas permitem o espaçamento máximo em 3 metros entre sprays. Como a altura definida para os ensaios foi de 1,20 m, foram realizados ensaios para conhecer o alcance do spray e a distribuição da água para a altura fixada.

O layout do método radial foi adotado para realizar os ensaios de distribuição e de alcance. Cada raio de coletor foi espaçado em 0,25 m a partir do spray, até que o último coletor alcançasse uma distância de 2 metros do spray. A estrutura do bocal spray, responsável por manter a placa defletora suspensa, foi posicionada de modo que cortasse o “x” ao meio, formado pelos raios. Desta forma, haveria um “v” de coletores para cada lado do spray (Figura 7).

Após organizar os coletores sob o solo, a motobomba foi ligada no modo manual, e a pressão ajustada utilizando a válvula tipo esfera e a aferição foi realizada com manômetro analógico tipo Bourdon. Durante o ajuste da pressão, o mesmo recipiente utilizado nos ensaios de vazão foi utilizado para armazenar a água e impedir que a água chegasse aos coletores. O tempo do ensaio era iniciado após a retirada do recipiente.

O volume de água foi aferido utilizando uma proveta milimetrada, com capacidade de 1000 ml. A proveta era dividida em 500 marcações. Após encerrar o procedimento adotado, a pressão era acrescida de 0,25 bar, e o mesmo procedimento, aplicado para a pressão anterior, era aplicado para a nova pressão ajustada. Os ensaios iniciaram em 0,5 bar e terminaram em 2,5 bar.

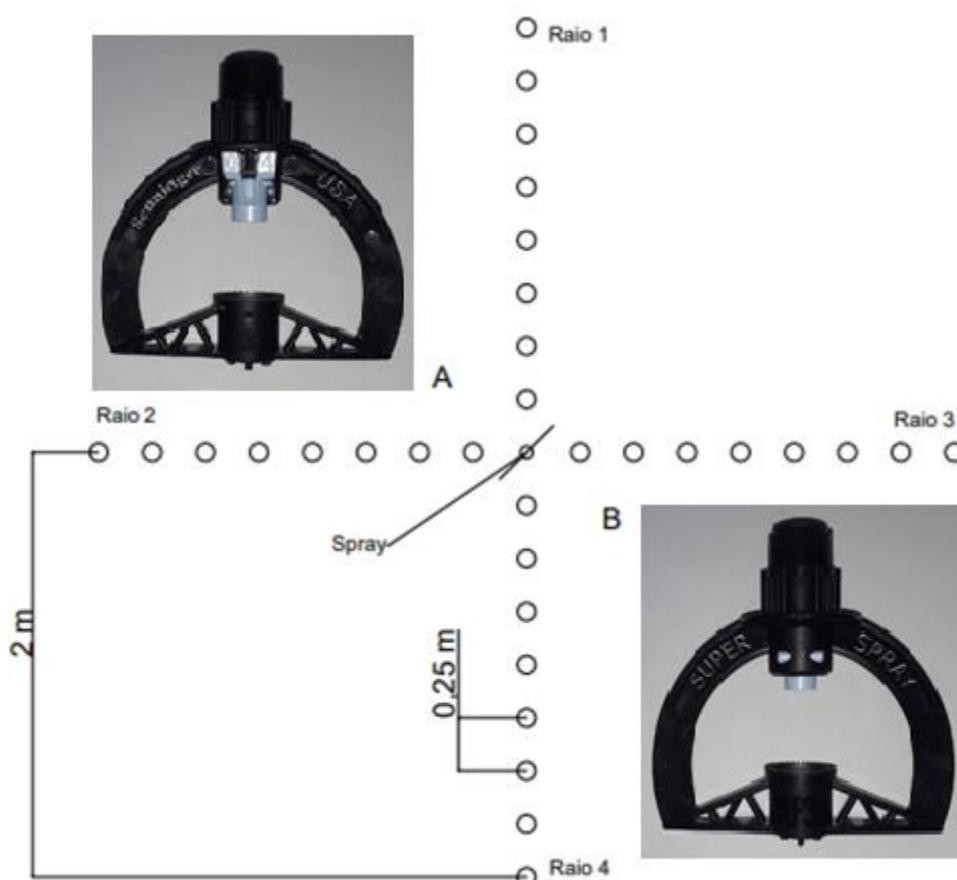


Figura 7 - Layout dos coletores durante os ensaios de distribuição e alcance
Fonte: Autor

Os ensaios de distribuição e alcance foram realizados após as 18:00 horas para evitar a ação da radiação solar e do vento nas amostras. Houve dias em que não foi possível realizar os ensaios devido ao procedimento adotado, pois mesmo após as 18:00 horas, havia incidência de vento, desta forma, os ensaios foram realizados em dias distintos.

A presença ou não de vento era monitorada constantemente utilizando um anemômetro portátil.

Após finalizar todos os ensaios planejados, um gráfico de contorno foi construído para cada valor de pressão ajustada para o spray, utilizando o *software* Minitab. Os gráficos de contorno e as tabelas com os respectivos valores estão em anexo. O método de interpolação utilizado, no Minitab, para a construção dos gráficos de contorno foi o inverso do quadrado da distância.

A distribuição e o alcance da água para a altura de instalação do spray adotada para os ensaios foi diferente entre os lados do spray para algumas pressões. A lateral por onde se retira o bocal intercambiável (lado A) tem tendência em concentrar a água próxima ao spray. Devido a esta peculiaridade, este lado do spray foi instalado direcionado para a torre móvel, desta maneira, pode-se compensar a diferença de volume conveniente pela concentração de água, devido à maior velocidade, quando comparada ao lado B.

Para iniciar os ensaios de uniformidade realizados durante o processo de validação do equipamento desenvolvido, o alcance efetivo do spray para pressões acima de 1 bar foi fixado em 1,5 m. Sob 0,75 bar, foi fixado um alcance de 1,25 m e para 0,5 bar o alcance foi fixado em 1 metro.

4.7 Distribuição dos sprays sob a linha lateral

Após análise dos dados obtidos nos ensaios de vazão, distribuição e alcance, realizados com o modelo *super spray* da Senninger®, iniciou-se uma nova fase do projeto formada pela decisão da localização da instalação dos sprays e pela quantidade de sprays a serem instalados na linha lateral durante os ensaios de uniformidade. Para determinar a variação da pressão entre os sprays que mantivessem uma vazão constante ao longo da linha lateral, foi utilizado o *software Autocad*, versão para estudantes, para esboçar e prever o movimento relativo dos sprays ao ponto pivô e consulta ao manual de dimensionamento de laterias de pivô central da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (SILVA; AZEVEDO, 1998).

Foram instalados cinco sprays ao longo da linha lateral. O primeiro spray foi, inicialmente, instalado a 3 metros de distância do ponto pivô, e regulada uma pressão igual a 0,5 bar, no segundo spray, a pressão foi 0,75 bar, no terceiro, de 1,2 bar, no quarto 1,8 e no último 2,5 bar. Durante as fases de cálculo, foi notado que a vazão do spray instalado no final da linha lateral estava um pouco abaixo da vazão necessária, logo, havia a necessidade de se adicionar mais um spray na mesma posição.

Como o objetivo do estudo é avaliar os sprays individualmente, apenas um spray foi mantido na posição. Após alguns ensaios, foi constatado que a vazão do spray instalado mais próximo da torre móvel estava muito abaixo da média dos demais e que seria necessário substituir o bocal para outro de diâmetro maior para manter a estratégia do estudo, que é avaliar cada spray.

Foi decidido instalar um bocal de 3 mm de diâmetro no quinto spray instalado. Esta medida não é padrão do fabricante, com o diâmetro do bocal de 3 mm, obtido pelo processo de usinagem. No diâmetro adotado para o bocal, a vazão necessária para o ponto de instalação, teoricamente, era alcançada em baixa pressão a 0,5 bar, isso era desejável, pois haveria uma boa margem se caso fosse necessário elevar a pressão.

Foram realizados ensaios individuais com o spray equipado com o bocal de 3 mm, seguindo os mesmos procedimentos adotados para o bocal de 1,59 mm, apenas aplicando sob o spray a pressão de 0,5 bar, pressão necessária para atender a vazão na posição. Na pressão descrita, o spray equipado com bocal de 3 mm alcança uma área com 4 m de diâmetro. Enquanto, os ensaios de uniformidade com o pivô central foram iniciados com os sprays organizados ao longo da linha lateral com as pressões e distâncias do ponto pivô apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 Diâmetro dos bocais utilizados, pressões sob os bocais e distância da posição do bocal ao ponto pivô

Posição	Distância ponto pivô (m)	Pressão sob o bocal (bar)	Diâmetro do bocal (mm)
1	4	0,5	1,59
2	6,25	0,75	1,59
3	9	1,2	1,59
4	12	1,8	1,59
5	15,5	0,5	3

Fonte: Autor

4.8 Caracterização dos ensaios de uniformidade

4.8.1 Aplicação de água

Foram realizados 28 ensaios de uniformidade com o pivô central ao se aplicar apenas água, a fim de garantir que o número de pontos necessários para utilizar o modelo

de gráficos de controle atende o requisito mínimo recomendado, que é entre 20 e 25 amostras (MONTGOMERY, 2017, p. 165).

Em todos os ensaios realizados, o temporizador do pivô central foi ajustado para aplicar uma lâmina média de 6 mm, deslocando a torre móvel a uma velocidade de 14 m/h. Foi decidido aplicar este valor de lâmina, pois o tempo necessário para os ensaios atendia às aspirações do planejamento do projeto. Durante a realização dos ensaios, o pivô central consumia em média 750 L de água. A área efetivamente irrigada, que recebia em média 6 mm, tinha aproximadamente 254,5 m².

As avaliações de uniformidade da aplicação de água foram realizadas seguindo os procedimentos e orientações da Norma 11545 de 2016 da Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT. O coeficiente de uniformidade foi calculado utilizando a Equação 2 de Chirstiansen, modificada por Heermann e Hein (1968).

$$C_{UH} = 100 * \left[1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n |V_i - V_{MP}| * S_i}{\sum_{i=1}^n V_i * S_i} \right) \right] \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

C_{UH} - é o coeficiente de uniformidade de Heerman e Hein, em porcentagem;

n - é o número de coletores utilizados na análise de dados;

i - é o número designado para identificação de um coletor em particular, normalmente começando com o coletor localizado com $i = n$, para o último coletor considerado;

V_i - é o volume de água coletada no i -ésimo coletor, em centímetros cúbicos ou milímetros;

S_i - é a distância do i -ésimo coletor ao ponto pivô, em metros;

V_{MP} - é o volume médio ponderado (massa ou coluna d'água) da água coletada, em centímetros cúbicos ou milímetros (Equação 3).

A Equação 3 é utilizada para determinar o volume médio ponderado de água coletada.

$$V_{MP} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i * S_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad \text{Eq. (3)}$$

A norma 11545 de 2016 da ANBT orienta utilizar o gráfico do perfil da lâmina aplicada para identificar as possíveis causas para valores de coeficientes abaixo do valor

previsto em projeto e que os locais ao longo da lateral, onde a lâmina aplicada é 10% maior ou menor que a lâmina média, sejam investigados para determinar a causa da variação.

Para auxiliar na orientação da avaliação do pivô central, sendo que, o equipamento se trata de um protótipo e não há um valor pré-determinado de coeficiente (C_{UH}), foi adotado o método de interpretação dos valores de coeficiente da Universidade de Minnesota que é apresentado na Tabela 4. O método utiliza a mesma equação da norma ABNT 15545 de 2016 para calcular o coeficiente (C_{UH}).

O equipamento utilizado é um protótipo que auxilia na orientação da avaliação do pivô central e não há um valor pré-determinado de coeficiente (C_{UH}). Assim, foi adotado o método de interpretação dos valores de coeficiente da Universidade de Minnesota, apresentado na Tabela 4, o qual utiliza a mesma equação da norma ABNT 15545 de 2016 para calcular o coeficiente (C_{UH}).

Tabela 4 Avaliação dos coeficientes de uniformidade para pivô central, obtidos utilizando a Equação 2

Coeficientes de uniformidade	Interpretação
90-100%	Excelente, não é necessária nenhuma ação.
85-90%	Bom, não é necessária nenhuma ação.
80-85%	Moderado, não é necessária nenhuma ação no momento, mas o sistema deve ser monitorado para elevar o coeficiente.
Abaixo de 80%	Ruim, melhorias são necessárias.

Fonte: Adaptado da Universidade de Minnesota (2021)

Durante os ensaios, a aplicação de água teve como objetivo melhorar a eficiência de aplicação do pivô central com a alteração da pressão sob os sprays, como no distanciamento entre eles e em relação ao ponto pivô. No início dos ensaios, 30 coletores foram utilizados para cobrir a área molhada efetiva do pivô central. O primeiro coletor foi posicionado a 2,5 e o último a 17 metros de distância do ponto pivô.

A Figura 8a exibe os coletores durante um dos ensaios realizados, já a Figura 8b exibe um desenho 2D com as distâncias entre os coletores e o ângulo de abertura entre os dois raios de coletores. A distância entre os dois raios no final das linhas de coletores é de 3 metros.

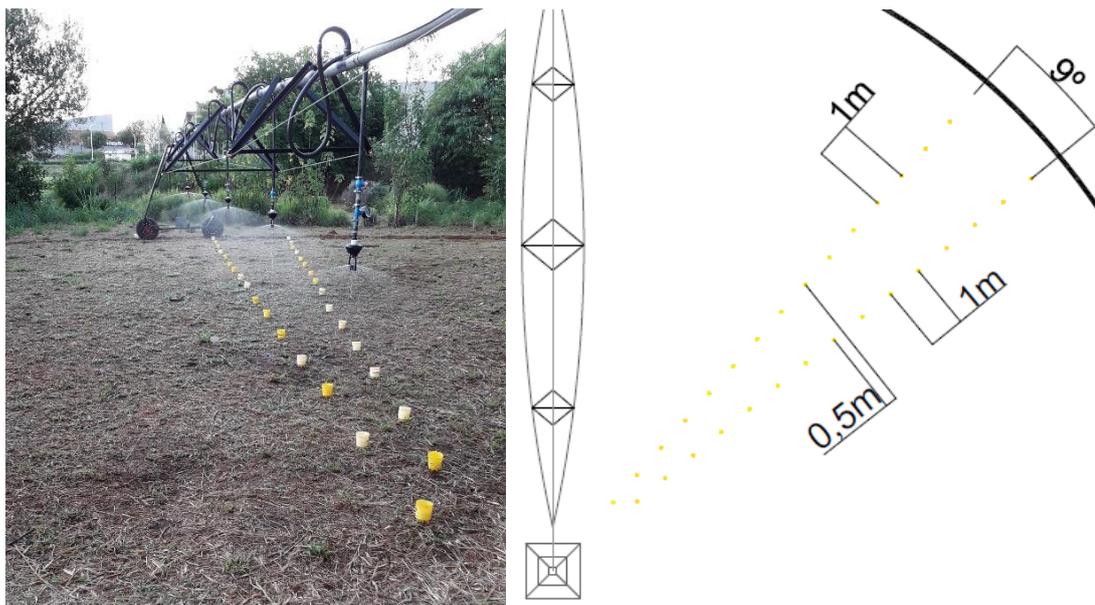


Figura 8a - Imagem realizada durante ensaio de uniformidade durante a aplicação de água e Figura 8b - Representação gráfica em 2D das distâncias adotadas para o layout inicial dos coletores

Fonte: Autor

Para o monitoramento da lâmina aplicada por spray, foi identificada a quantidade de coletores atendidos por cada spray. Partindo-se do ponto pivô, o primeiro e o segundo alcançavam cinco coletores cada um, os outros dois seguintes alcançavam seis coletores cada e o último spray alcançava oito coletores.

Devido às modificações realizadas a fim de melhorar a uniformidade do pivô, durante os ensaios de calibração, foi decidido retirar dois coletores, os mais próximos do ponto pivô. Este manejo reduziu a quantidade de coletores dos dois sprays mais próximos do ponto pivô passando para quatro coletores cada spray. Na nova configuração, o primeiro coletor foi posicionado a 4 metros e o último a 17,5 metros do ponto pivô para cobrir toda a área molhada efetiva do pivô central.

Após realizar os vinte e oito ensaios, o spray instalado mais próximo do ponto pivô foi retirado com base nos dados e relatórios resultantes. Os quatro sprays resultantes foram reorganizados para a realização de mais seis ensaios, utilizando apenas água, e dos ensaios com aplicação de fertilizante.

Para cobrir a área molhada destes ensaios foram utilizados vinte e seis coletores: o primeiro coletor posicionado a 5 metros e o último a 17,5 metros do pivô, a fim de também cobrir toda a área molhada efetiva do pivô central. Na Tabela 5, as pressões e distâncias dos pontos pivôs adotados são apresentadas para realizar mais seis ensaios com aplicação apenas de água e para iniciar os ensaios de uniformidade com aplicação de fertilizante.

Tabela 5 Diâmetro dos bocais utilizados, pressões sob os bocais e distância da posição do bocal ao ponto pivô após alterações

Posições	Distâncias ponto pivô (m)	Pressão sob o bocal (bar)	Diâmetros do bocal (mm)
1	6,25	0,5	1,59
2	8,75	1,8	1,59
3	11,75	2	1,59
4	15,25	0,65	3

Fonte: Autor

4.8.2 Aplicação de fertilizante

As avaliações de uniformidade da aplicação de fertilizante também foram realizadas seguindo os procedimentos e orientações da Norma 11545 de 2016 da Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT com o temperizador do pivô central ajustado para aplicar uma altura de lâmina média igual a 6 mm. Foi utilizado 0,8 kg de fertilizante granulado mineral misto por ensaio, diluído diretamente no reservatório de água. O fertilizante continha 4% de nitrogênio (N), 14% de fósforo (P_2O_5), 8% de potássio (K20) e outros elementos como cálcio, magnésio e enxofre. Em todos os ensaios, o reservatório foi preenchido com 1 m³ de água, ou seja, sua capacidade máxima.

A quantidade de fertilizante adotada para os ensaios foi motivada devido ao número de ensaios e às orientações do fabricante para evitar uma possível saturação do solo. Não foram realizadas análises do solo que recebeu o fertilizante. A cada início de novo ensaio o reservatório era higienizado para garantir para cada ensaio o mesmo volume de solução com a mesma quantidade de fertilizante diluído.

Nos ensaios com aplicação de fertilizante, antes de iniciar um novo ensaio, a sangria do sistema hidráulico foi realizada com a motobomba ligada, os bocais dos sprays eram retirados e aguardava-se até que a água apresentasse fluxo não turbulento. A presença de bolhas de ar nos sistemas hidráulico foi verificada por tubos de material transparente, utilizados para conectar os sprays na mangueira de descida. Esta atividade foi realizada para permitir as mesmas condições entre os ensaios.

O volume de solução do coletor foi aferido utilizando-se uma proveta milimetrada, com capacidade de 1000 ml. A condutividade da solução foi aferida com um condutímetro portátil. As aferições do volume do coletor e da condutividade foram realizadas em campo.

Durante o período da realização dos ensaios, a pressão ajustada sob os sprays instalados nas posições 2 e 3 não sofreu variação. O mesmo ocorreu para a pressão sob os

sprays instalados nas posições 1 e 4, o valor da pressão se manteve constante durante a realização dos ensaios.

4.9 Controle Estatístico de Processos

4.9.1 Gráficos de controle

O modelo de gráfico de controle \bar{x} e R , utilizado neste trabalho, apresenta os resultados em dois gráficos para o mesmo grupo de dados. Um dos gráficos tem como valor alvo a média geral do valor médio do grupo de dados e o outro o valor médio da amplitude do grupo de dados. O gráfico da amplitude amostral é utilizado como referência, se algum ponto do gráfico ultrapassar a linha superior (LSC) ou a inferior de controle (LIC), significa que existem anormalidades com os dados (MONTGOMERY, 2017).

Os limites de controle do gráfico \bar{x} são calculados como se segue:

$$\text{LSC} = \bar{\bar{x}} + A_2\bar{R}$$

$$\text{Linha central} = \bar{\bar{x}} \quad \text{Eq.(4)}$$

$$\text{LIC} = \bar{\bar{x}} - A_2\bar{R}$$

Em que $\bar{\bar{x}}$ é a média geral do valor médio entre as amostras de cada grupo de dados, A_2 é um valor tabelado e \bar{R} é a amplitude média entre os grupos. Já os limites de controle do gráfico R são calculados como se segue:

$$\text{LSC} = D_4\bar{R}$$

$$\text{Linha central} = \bar{R} \quad \text{Eq.(5)}$$

$$\text{LIC} = D_3\bar{R}$$

Os valores de D_4 e D_3 são encontrados em tabela específica. Cada ponto do gráfico representa um ensaio realizado que corresponde ao grupo de coletores atendidos pelo spray. A quantidade de coletores atendidos por cada spray foi identificada para o monitoramento da lâmina aplicada por spray.

Montgomery (2017, p.165) orienta que se o gráfico da amplitude (o gráfico \bar{R}) apresentar pontos fora das linhas de controle, estes devem ser descartados e posteriormente é preciso refazer o gráfico. Os pontos fora dos limites de controle podem ser ignorados desde que respeitado o mínimo de pontos necessários para construir um gráfico de controle, entre 20 e 25 pontos (MONTGOMERY, 2017 p.165).

4.9.2 Capacidade do processo

Existe uma forma para estimar a quantidade de pontos do gráfico \bar{x} , após estabelecidos os valores de limite superior e inferior, que vão afetar o desempenho do processo. Para o caso em estudo, esses pontos são os grupos de coletores que apresentarão a média de lâmina superior ou inferior aos limites estabelecidos para o gráfico da média amostral (\bar{x}). O valor que representa a capacidade do processo é definido utilizando a Equação 6 (MONTGOMETY, 2017).

$$C_p = \frac{LSC - LIC}{6\sigma} \quad \text{Eq. (6)}$$

O desvio padrão (σ) do processo pode ser estimado utilizando a Equação 7 (MONTGOMERY, 2017).

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad \text{Eq. (7)}$$

O valor adimensional da capacidade do processo (C_p) é avaliado seguindo o que descreve a Tabela 6.

Tabela 6 Avaliação dos valores de capacidade de processo (Equação 6)

C_p (adimensional)	Probabilidade de produzir pontos não conformes com o processo
> 1	Baixa
= 1	Moderada
< 1	Alta

Fonte: Adaptado Montgomery (2017)

O valor d_2 é definido por tabela específica que leva em consideração o tamanho da amostra ou grupo.

4.10 Validação da hipótese formulada

A correlação de Pearson foi aplicada para os dados tanto da lâmina aplicada como da condutividade, os quais foram obtidos em cada ensaio realizado. Para cada coeficiente de Pearson (r) obtido foi calculado o valor t utilizando a Equação 8. O valor t calculado para cada ensaio foi comparado ao valor crítico da tabela t -Student para $n-2$ graus de liberdade e 5% de confiança. A cada ensaio realizado, foram obtidos 26 dados (n) para lâmina e condutividade, assim resultante em 24 graus de liberdade.

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad \text{Eq. (8)}$$

Gráficos de dispersão foram utilizados para avaliar tanto o ajuste dos dados ao modelo linear como os resultados da aplicação da análise de variância (ANOVA) aos dados. A lâmina de solução aferida nos coletores foi utilizada como variável preditora e a condutividade aferida nos coletores como variável resposta. Com a intenção de detectar possíveis *outliers* que poderiam interferir nos resultados da correlação de Pearson e da ANOVA, intervalos de predição a 95% de confiança foram calculados e inseridos aos gráficos de dispersão.

Os pontos do gráfico que ultrapassaram o intervalo de predição foram identificados como possíveis *outliers*. Os dados correspondentes aos pontos identificados foram retirados da relação de dados ao ensaio em específico, portanto, a correlação de Pearson e a ANOVA foram realizadas novamente.

Os coeficientes de correlação de Pearson, obtidos para os dados do ensaios, foram classificados utilizando a metodologia de Cohen (1988), apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 Classificação dos coeficientes das correlações de Pearson

Intervalo	Classificação
0,10 a 0,29	Baixa
0,30 a 0,49	Média
0,50 a 1	Alta

Fonte: Cohen (1988)

As hipóteses formuladas foram as seguintes:

H_0 - a variação da altura da lâmina não tem influência nos valores de condutividade da amostra;

H_1 - a variação da altura da lâmina tem influência nos valores de condutividade da amostra;

Se a variação da altura da lâmina não influenciar a distribuição do fertilizante, aceita-se a hipótese nula, caso contrário, a hipótese nula é rejeitada (H_0) e a influência da variação da altura da lâmina sobre a distribuição do fertilizante é confirmada com 5% de confiança.

Antes de avaliar a correlação dos dados, os mesmos foram aplicados ao teste de normalidade de Anderson-Darling, e os conjuntos de dados resultaram em valor p menor que 5%, transformados pelo método de transformação de Jhonson.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Gráficos de contorno

No gráfico de contorno construído para o spray sob 0,5 bar (Anexo A), é possível notar qual foi a concentração de água aplicada. Na região superior do gráfico, sobre eixo y positivo, e na região esquerda do gráfico sobre o eixo x negativo há uma maior lâmina aplicada, quando comparada às demais regiões do gráfico, dando ênfase à região sobre o eixo y positivo. Sobre o eixo x negativo, o alcance do spray chegou a três coletores, diferente dos demais eixos que alcançaram quatro coletores.

No gráfico de contorno do Spray sob 0,75 bar (Anexo A) observa-se uma melhor distribuição da água e aumento da área molhada, mas ainda há concentração de água, similar ao gráfico do Spray sob 0,5 bar. Nos demais gráficos de contorno construídos para os sprays equipados com o bocal de 1,59 mm também ocorre concentração, sendo que nos gráficos dos Sprays sob 0,5 e 0,75 bar a concentração ocorre com maior intensidade.

Faci et al. (2001) relatam que sprays de placa fixa têm a tendência de concentrar a água em um ou mais pontos da área molhada e advertem que esta característica aumenta a probabilidade de escoamento superficial do solo. Mohamed et al. (2019) descrevem que sprays de placa fixa ranhuradas têm a distribuição da água afetada em baixa pressão e que a distribuição melhora em pressões maiores.

Entre as pressões avaliadas com o spray equipado com o bocal de 1,59 mm, a melhor distribuição de água e raio de alcance iniciaram a partir de 1 bar com ênfase para as pressões 1,5 e 1,75 bar. Após 1,75 bar, o raio de alcance do spray diminuiu consideravelmente, com ênfase sobre o eixo x negativo, enquanto na pressão avaliada que a sucede é de 2 bar. É muito provável que se a pressão fosse aumentada até o limite recomendado pelo fabricante (2,76 bar), o raio iria diminuir. Salienta-se que este comportamento foi observado ao se avaliar o spray com o bocal número 4 de diâmetro igual a 1,59 mm.

Pode ser observado nos gráficos de contorno para o bocal de 1,59 mm (Anexo A) na região sobre o eixo x positivo que há uma boa distribuição de água, com poucas ocorrências de concentração quando comparada com as demais áreas do gráfico, isso para todas as pressões avaliadas.

O gráfico de contorno para o spray equipado com o bocal de 3 mm tem características muito parecidas com as apresentadas no gráfico de contorno do spray sob 0,5 bar equipado com o bocal de 1,59 mm, por exemplo, na região sobre o eixo y positivo,

há uma grande concentração de água quando comparada com os outros eixos, isso para os dois gráficos.

O Super Spray não apresentou boa distribuição de água nos coletores nas duas condições de bocal mas com a mesma pressão aplicada. O que difere os dois gráficos em demasia é o raio de alcance nos eixos de coletores de, aproximadamente, 1 metro para o bocal de 1,59 mm e de aproximadamente 2 metros para o bocal de 3 mm, ou seja, um resultado que é praticamente o dobro.

Com a intenção de conhecer e comparar a uniformidade de aplicação entre os lados do spray, foi determinado a média das vazões coletadas dos raios do lado A e do lado B separadamente, bem como o coeficiente de variação. As médias das vazões coletadas dos raios do lado A e do lado B separadamente bem como os coeficientes de variação foram determinados para que se conhecesse e comparasse a uniformidade de aplicação entre os lados do spray. Nas Tabelas em anexo correspondentes aos gráficos de contorno que foram construídos, pode-se notar uma diferença significativa de alcance e na média da vazão entre os lados do spray sob 0,5 bar.

Para os valores de coeficiente de variação (Anexo B), desconsiderando o lado A no ensaio sob 2 bar onde o coeficiente de variação é considerado médio (Tabela 8), os demais valores de coeficiente de uniformidade são considerados de alto a muito alto (PIMENTEL-GOMES, 2009).

Tabela 8 Classificação dos valores de coeficiente de variação

Coeficientes de Variação (%)	Classificação
CV < 10	Baixo
10 < CV < 20	Médio
20 < CV < 30	Alto
CV > 30	Muito alto

Fonte: Pimentel-Gomes (2009)

Os valores destacados nas Tabelas do Anexo B são iguais ao alcance considerado para a instalação dos sprays na linha lateral do pivô. Apenas os valores destacados foram utilizados para determinar a vazão média e o coeficiente de variação.

5.2 Ensaio de uniformidade para aplicação de água

5.2.1 Gráficos de controle

Os gráficos de controle construídos para os valores de lâmina aplicada por spray, durante os ensaios, seguem apresentados nas Figuras 9, 10, 11, 12 e 13. Comentários pertinentes aos comportamentos dos gráficos de controle podem ser iniciados quando se discute a proximidade dos pontos nos gráficos da amplitude média. Em todos os gráficos, os pontos estão muito próximos das linhas de controle superior e inferior do gráfico. A proximidade dos pontos das linhas de controle, superior e inferior, não necessariamente classifica o processo como fora do controle estatístico, mas é evidente que existem pontos tedenciosos o que não é o ideal para gráficos de controle. Este comportamento nos pontos dos gráficos da amplitude quanto aos valores de lâmina d'água reflete nos elevados índices de coeficientes de variação e nos valores de coeficiente de uniformidade, encontrados nos ensaios de distribuição e alcance realizados (Anexo B).

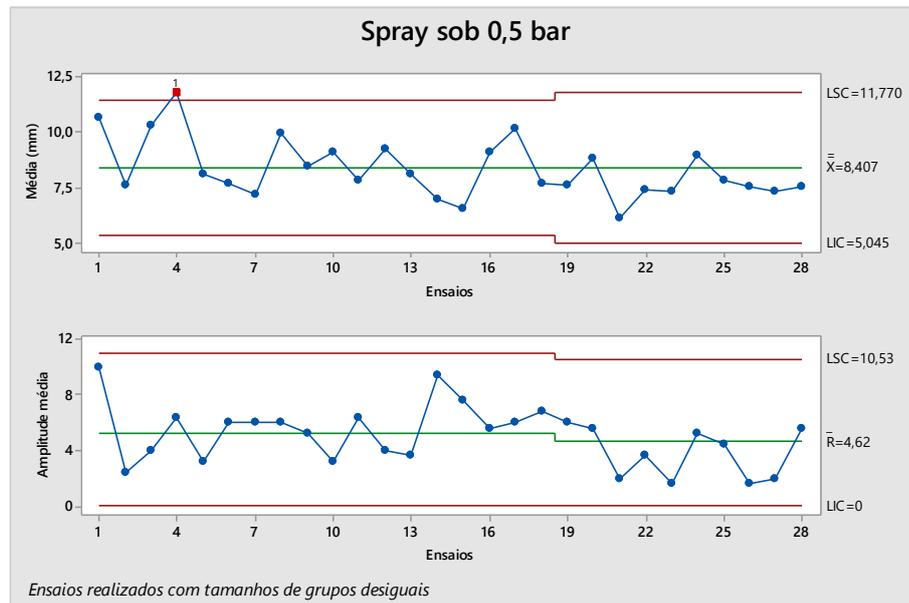


Figura 9 Gráfico de controle do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 0,5 bar
Fonte: Autor

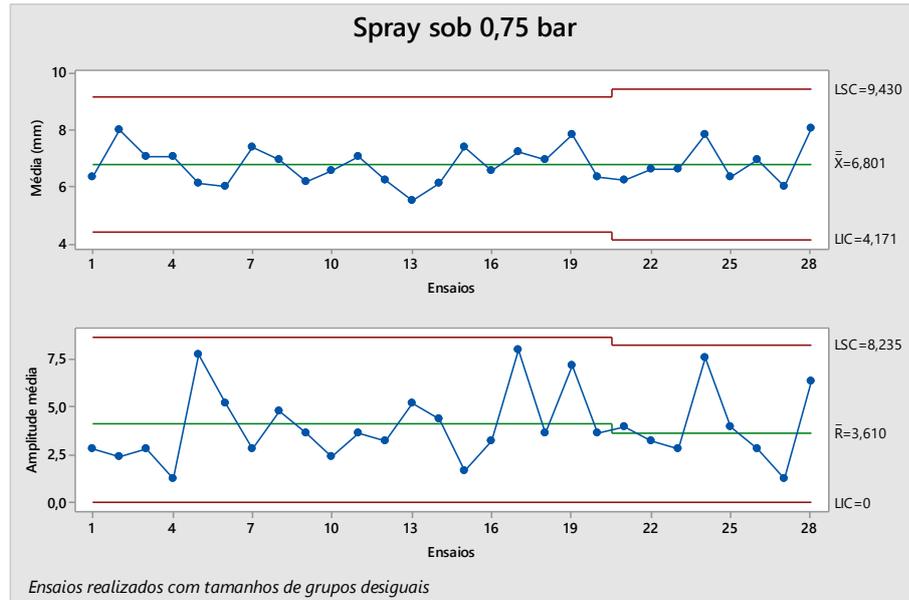


Figura 10 Gráfico de controle dos grupos de coletores atendidos pelo spray sob 0,75 bar
Fonte: Autor

Os gráficos do valor médio apresentaram pontos mais próximos da linha central quando comparados aos gráficos da amplitude média, este comportamento é o mais desejável para gráficos de controle. Considerando os ensaios realizados com o pivô central, as distâncias entre os sprays e a pressão sobre eles eram alteradas para alcançar a melhor uniformidade do equipamento, logo, existe uma boa dispersão dos pontos nos gráficos da média dos subgrupos para todas as pressões avaliadas.

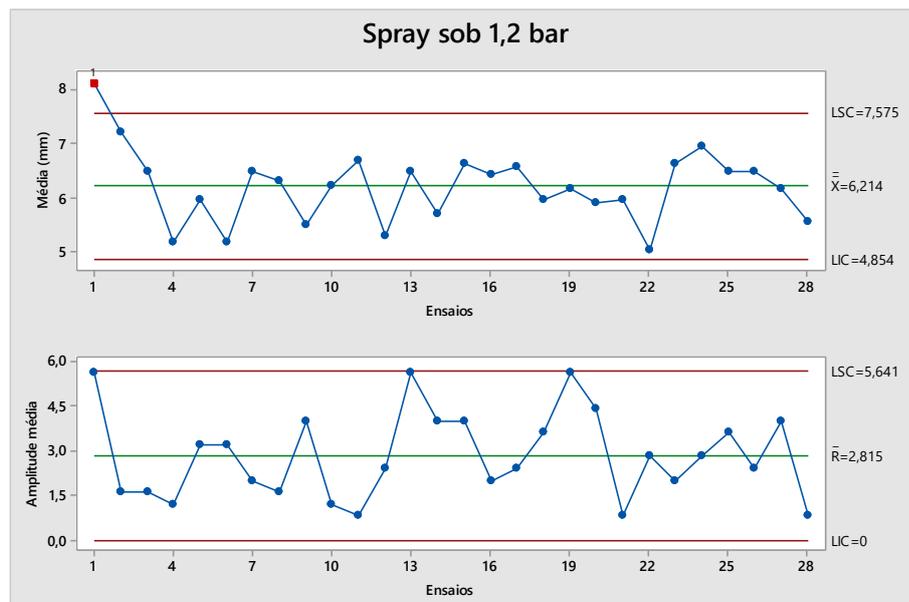


Figura 11 Gráfico de controle do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 1,2 bar
Fonte: Autor

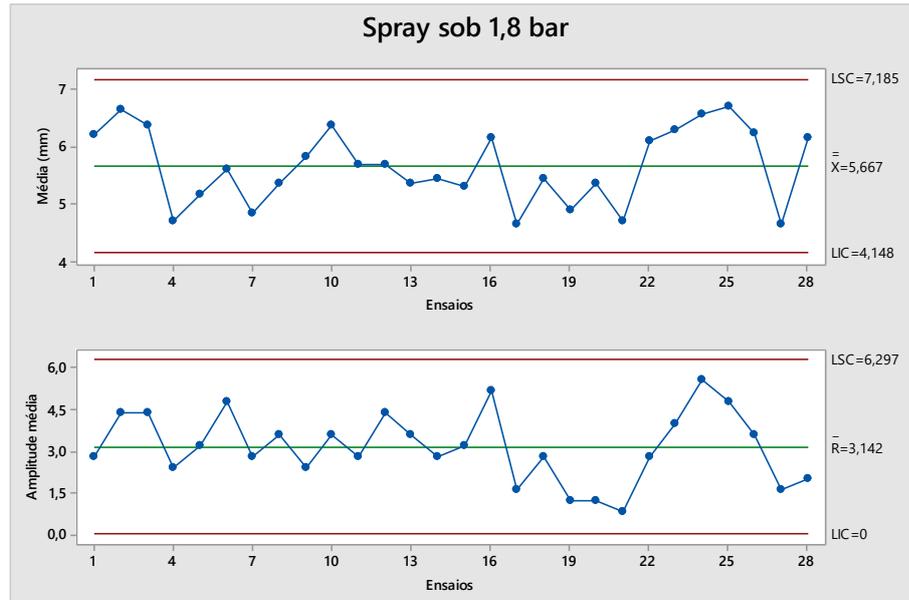


Figura 12 Gráfico de controle do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 1,8 bar
Fonte: Autor

Considerando ainda que estes gráficos de controle são resultados do processo de validação do equipamento desenvolvido, os pontos que ultrapassaram os limites superiores de controle, para o spray sob 0,5 e 1,2 bar, não classificam o processo de avaliação como fora do controle estatístico.

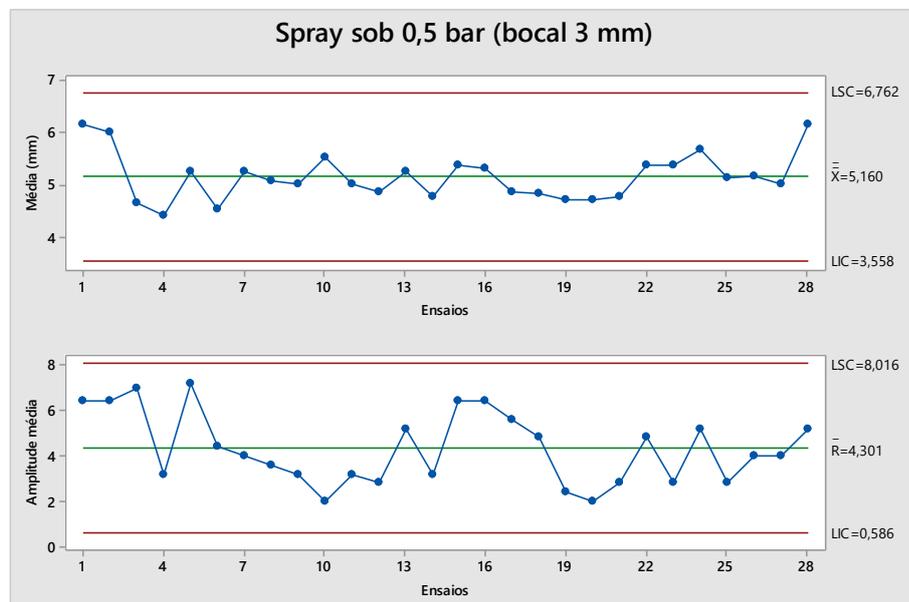


Figura 13: Gráfico de controle do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 0,5 bar (bocal 3 mm)
Fonte: Autor

O razoável desempenho observado nos gráficos \bar{x} foi afetado pela alta amplitude das amostras, observada nos gráficos R. A amplitude das amostras interferiu nos valores da capacidade do processo, os quais para todos os gráficos resultaram em valores menores que 1. Tal resultado classifica o processo com alta probabilidade de produzir pontos não conformes com o processo (Tabela 6).

A lâmina média aplicada pelos sprays durante os ensaios pode ser conferida no gráfico da média dos grupos, o valor de $\bar{\bar{X}}$ da linha central dos gráficos. O spray ensaiado sob 0,5 bar aplicou uma lâmina média, durante os ensaios, igual a 8,407 mm, considerado como o maior valor entre os demais sprays. Para os demais sprays utilizados durante os ensaios que estavam sob 0,75, 1,2, 1,8 e 0,5 bar (bocal 3 mm), as lâminas médias foram 6,801, 6,214, 5,667, 5,160 mm, respectivamente.

Considerando a lâmina média aplicada durante os ensaios, que foi igual a 6,45 mm e uma margem de 10% acima e abaixo (NBR 15545, 2016) da lâmina média, o spray sob 0,5 bar está acima da margem considerada, e o spray sob 0,5 bar (bocal 3 mm) e sob 1,8 bar está abaixo da margem considerada.

5.2.2 Perfil do coeficiente de uniformidade

No gráfico da Figura 14, a linha azul representa a variação do coeficiente de uniformidade de aplicação do pivô central durante os ensaios realizados. As linhas 90, 85 e 80% representam os limites da avaliação da uniformidade de distribuição baseadas na avaliação da Universidade de Minnesota (Tabela 2).

O maior valor de coeficiente dentre os ensaios foi encontrado no 4º ensaio com coeficiente igual a 86,0454%, o que classificaria o pivô com boa uniformidade e o menor valor de uniformidade foi resultado do 4º ensaio realizado que foi igual a 70%. Nestas condições, classificaria-se o pivô com uma uniformidade ruim com valores de coeficiente abaixo de 80%,.

A maioria dos ensaios apresentaram uniformidade abaixo de 80%. Após alcançar uniformidade de 86,0454%, as alterações no equipamento foram realizadas com o objetivo de alcançar uniformidades acima de 85%, mas sem sucesso, mesmo retornando às configurações do 4º ensaio, a uniformidade continuava deficiente e a causa desta incógnita era até então desconhecida

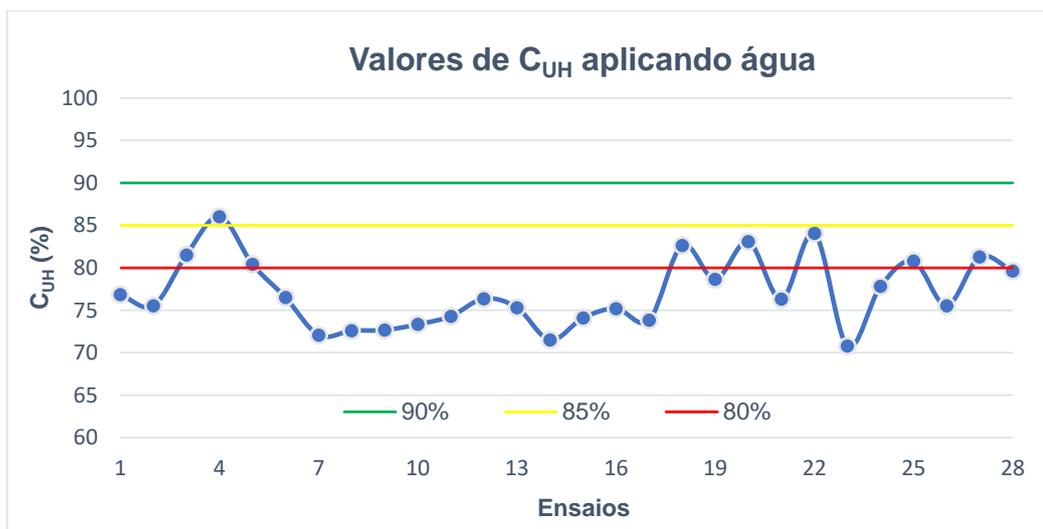


Figura 14 Gráfico do perfil dos valores de coeficientes encontrados durante os ensaios de uniformidade utilizando cinco sprays
Fonte: Autor

Após o 17^a ensaio, a uniformidade do equipamento apresentou melhora, mas ainda assim manteve a configuração do equipamento do 18^o ensaio, não era possível repetir o mesmo valor de uniformidade nos ensaios posteriores.

5.2.3 Ensaio após ajustes na linha lateral

Com o objetivo de melhorar a uniformidade do pivô central, alterações foram realizadas, dos cinco sprays utilizados foram mantidos apenas quatro, afastando a área molhada do ponto pivô. As alterações foram realizadas com o objetivo de melhorar a uniformidade do pivô central. Vale ressaltar que dos cinco sprays utilizados apenas quatro foram mantidos o que conseqüentemente afastou a área molhada do ponto pivô. Após os ajustes, vinte e seis coletores foram utilizados nos ensaios; o posicionamento do primeiro coletor foi transferido para 5 metros de distância do pivô e 2 metros mais distante quando comparado aos ensaios anteriores.

Um spray sob 0,41 bar substituiu o spray sob 0,75 bar, que foi retirado. A pressão sob o spray que estava operando a 1,2 foi elevada para 1,8 bar, já o spray que estava sob 1,6, a pressão foi elevada para 2 bar e a pressão sob o bocal de 3 mm foi elevada para 0,65 bar (Tabela 5).

A Tabela 9 apresenta os valores de uniformidade resultantes dos seis ensaios realizados bem como da lâmina média coletada em cada ensaio e se houve ou não a

realização da sangria do ar do sistema hidráulico, atividade esta que não foi realizada durante os ensaios utilizando cinco sprays.

Tabela 9 Valores de coeficiente e da lâmina média aplicada para ensaios que realizaram e não realizaram sangria do ar

Ensaio	C_{UH}	Lâmina média coletada	Sangria do ar
1	86,3748	6,003184713	Não realizada
2	88,0778	6,22611465	Não realizada
3	86,7753	5,780254777	Não realizada
4	84,6707	5,875796178	Realizada
5	84,016	5,955414013	Realizada
6	84,3548	5,940715336	Realizada

Fonte: Autor

Durante os ensaios, foram utilizados cinco sprays e também durante os três ensaios foram utilizados quatro sprays, e a sangria do ar não foi realizada (Tabela 9). O comportamento do fluxo da água foi acompanhado por tubos transparentes utilizados para conectar os componentes hidráulicos acima do spray. Foi verificado que o ar presente na linha hidráulica não era expulso por completo durante os ensaios, e a água apresentava um fluxo turbulento.

É provável que, devido ao diâmetro dos bocais da maioria dos sprays, o tempo demandado para a expulsão do ar do sistema hidráulico tenha sido maior, quando comparado aos bocais de diâmetro maior. Isso pode ter provocado a oscilação dos valores de uniformidade mesmo com a manutenção da configuração do equipamento e da organização dos coletores. Para o spray que sofreu modificação no bocal, de original 1,59 para 3 mm, o ar era expulso em um período de tempo menor.

Nos três últimos ensaios realizados utilizando quatro sprays, onde foi realizada a sangria do ar, o coeficiente de uniformidade manteve-se estável, com variações apenas nas casas decimais, e o mesmo comportamento foi apresentado para o valor da lâmina média aplicada (Tabela 9). A média do C_{UH} entre os três ensaios realizados com quatro sprays ficou igual a 84,323%, ao se avaliar o equipamento com uniformidade moderada. Os ensaios realizados sem a sangria do ar obtiveram melhor média de C_{UH} , igual a 87,076, classificando a uniformidade do equipamento como boa.

Em uma situação em que o pivô completaria uma volta para irrigar toda a capacidade de área do equipamento e a avaliação da uniformidade de aplicação ter sido realizada em diferentes pontos, poderíamos encontrar diferentes valores de C_{UH} se os sprays instalados no pivô central estivessem equipados com bocal de 1,59 mm. Outra suposição é a de que o

ar presente na linha hidráulica, em quantidade desconhecida, pode melhorar a eficiência de aplicação, com base nos dados da Tabela 9.

O gráfico da Figura 15 apresenta o perfil da lâmina aplicada ao longo da linha lateral do último ensaio quando foi realizada a sangria do ar, que resultou em uma uniformidade igual a 84,2821%. A maioria dos pontos está fora da margem dos 10% (NBR 15545, 2016), com destaque para os coletores mais próximos do ponto pivô, que correspondem aos coletores atendidos pelo spray sob 0,41 bar.

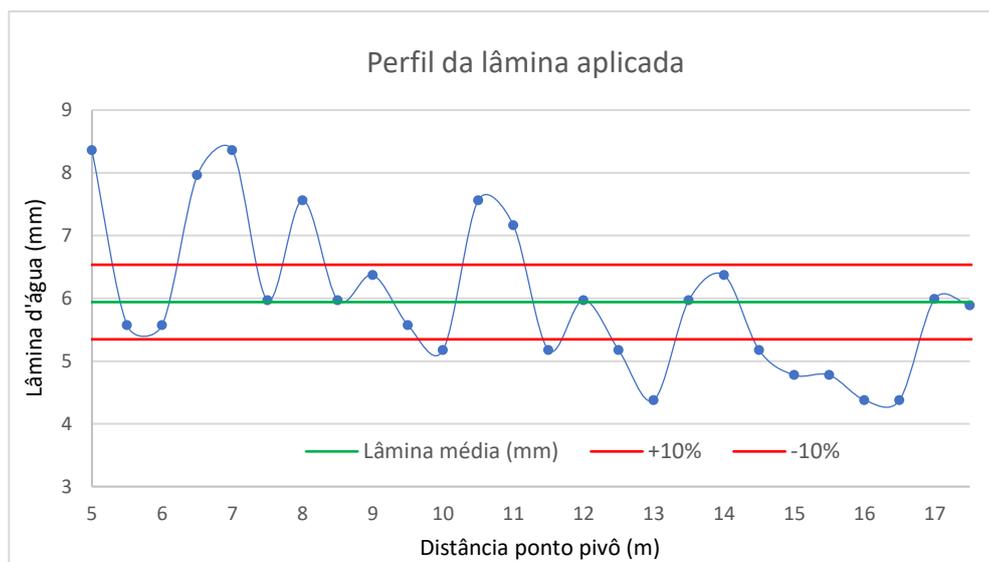


Figura 15 Perfil da lâmina d'água aplicada com o pivô central
Fonte: Autor

Do coletor posicionado a 14,5 metros até o coletor posicionado a 16,5 metros do ponto pivô há uma sequência decrescente da altura da lâmina. Estes coletores fazem parte do grupo que são atendidos pelo spray sob 0,65 bar equipado com bocal de 3 mm, e o mais próximo do ponto pivô estava posicionado a 14 metros, enquanto o mais distante estava posicionado a 17 metros. Este comportamento do perfil da lâmina na região atendida pelo spray sob 0,65 bar (bocal 3 mm) pode ser explicado ao se observar o gráfico de contorno em anexo. O spray sob 0,65 bar equipado com bocal de 3 mm concentra a água nos limites da área molhada, comportamento que se refletiu nos ensaios em movimento.

O mesmo perfil da lâmina observado para o spray sob 0,65 bar é observado para o spray sob 0,5 bar equipado com bocal de 1,59 mm. Há uma maior lâmina d'água nos coletores atendidos pelo spray sob 0,5 bar devido à proximidade com o ponto pivô que isto acentua a diferença da lâmina aplicada entre os sprays, mas é evidente a similaridade do perfil entre os sprays.

O coletor posicionado a 7 metros do ponto pivô sofreu sobreposição em demasia dos sprays sob 0,5 e 1,8, o que foi observado durante a operação com o pivô central e

confirmado ao se analisar o perfil da lâmina. Os coletores posicionados entre os sprays sob 1,8 e 2 bar também sofreram sobreposição além do necessário o que afastou os pontos da margem de 10%.

5.3 Ensaios de uniformidade com aplicação de fertilizante

5.3.1 Gráficos de controle

Os gráficos de controle utilizados para monitorar a lâmina média e a amplitude média da lâmina aplicada por spray são apresentados nas Figura 16, 17, 18 e 19.

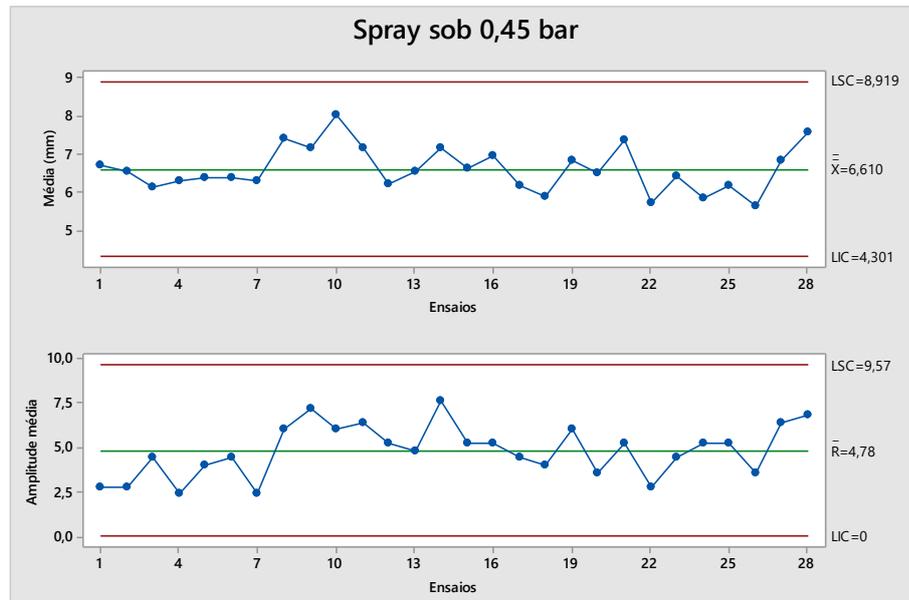


Figura 16 Gráfico de controle para os valores da lâmina média e da amplitude média do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 0,45 bar

Fonte: Autor

A lâmina média aplicada durante os ensaios realizados por spray é igual ao valor da linha central dos gráficos na posição superior e a amplitude média do valor da lâmina entre os coletores do grupo é o valor da linha central do gráfico da posição inferior.

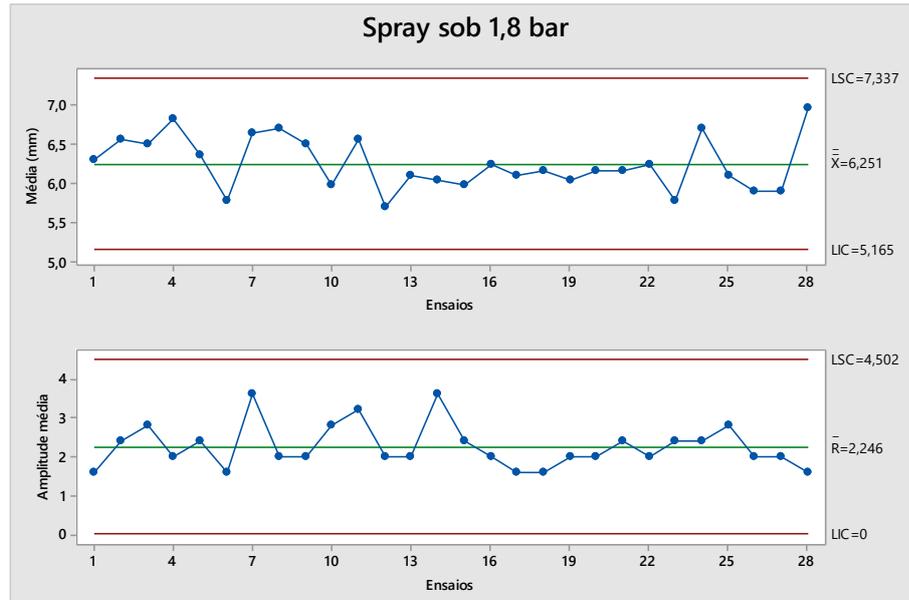


Figura 17 Gráfico de controle para os valores da lâmina média e da amplitude média do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 1,8 bar
 Fonte: Autor

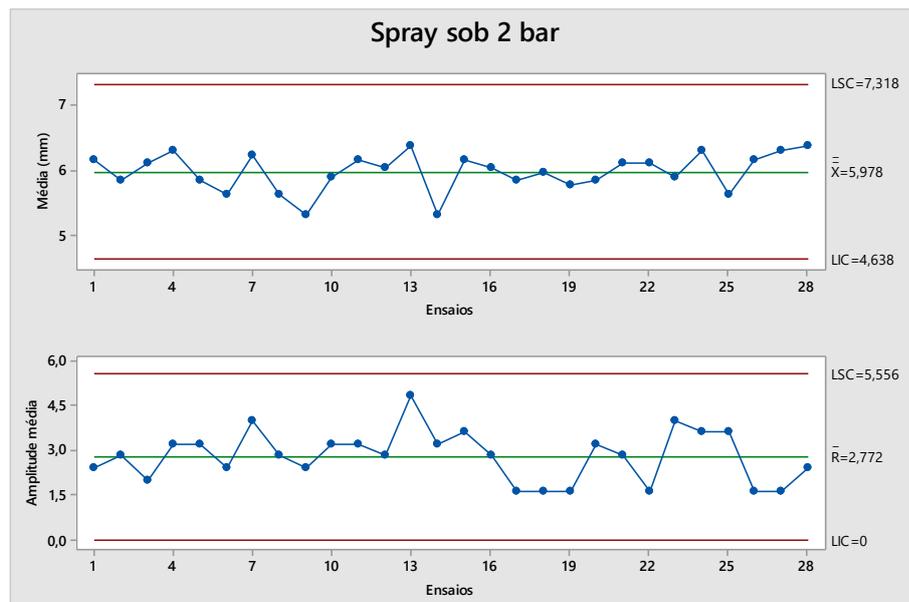


Figura 18 Gráfico de controle para os valores da lâmina média e da amplitude média do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 2 bar
 Fonte: Autor

A lâmina média aplicada durante os ensaios realizados é igual 6,06 mm e o spray sob 0,45 bar, o mais próximo do ponto pivô, aplicou a maior lâmina média entre os sprays (6,610 mm) e que está dentro da margem dos 10% (NBR 15545, 2016) que é de $\pm 0,606$ mm (6,666 e 5,454). A Figura 16, referente ao spray sob 0,45 bar, foi também a que apresentou os gráficos de controle da média e o da amplitude da lâmina aplicada com dados mais distantes da linha central, dentre os gráficos de controle apresentados.

O spray mais distante do ponto pivô aplicou a menor lâmina média, igual a 5,396 mm (Figura 19), um pouco abaixo da margem dos 10%, mas foi o que apresentou pontos mais próximos da linha central para o gráfico da média da lâmina aplicada entre os sprays, ou seja, o mesmo para os valores maiores do gráfico da amplitude média.

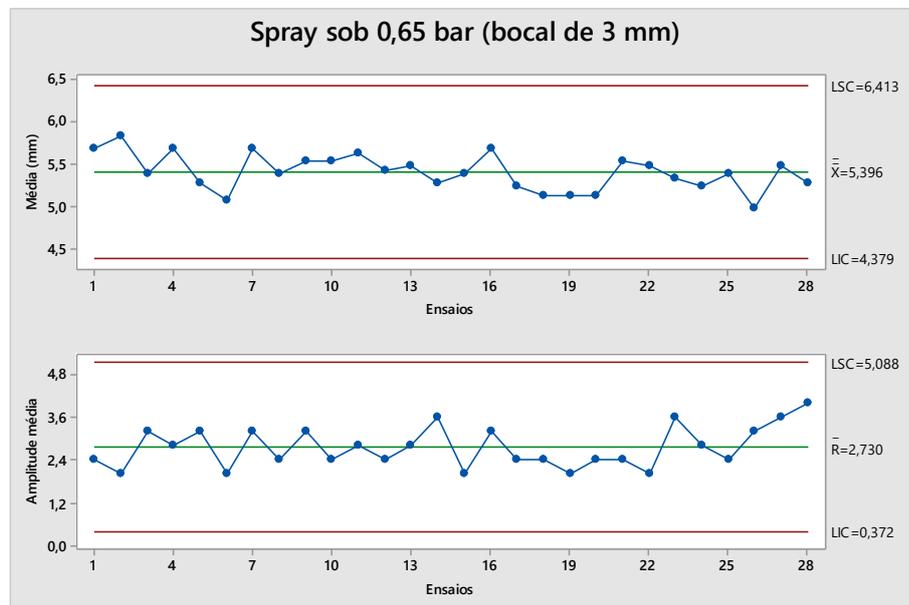


Figura 19 Gráfico de controle para os valores da lâmina média e da amplitude média do grupo de coletores atendidos pelo spray sob 0,65 bar (bocal 3 mm)
Fonte: Autor

Os valores da capacidade do processo (C_p) para os gráficos de controle ficaram abaixo de 1, ao serem avaliados os limites utilizados nos gráficos com baixa probabilidade de gerar pontos não conformes com o processo. Os gráficos de controle do spray sob 0,45, 1,8 e 2 bar resultaram em valores de C_p iguais a 0,4079, 0,4076 e 0,4076, respectivamente, para o spray sob 0,65 bar (bocal 3 mm) ficou igual a 0,3141.

5.3.2 Perfil dos coeficientes de uniformidade

Os coeficientes de uniformidade (C_{UH}) para a lâmina aplicada e da condutividade aferida nos coletores são apresentados na Figura 20. O gráfico (Figura 20) representa os limites que avaliam o coeficiente de uniformidade da lâmina aplicada, por linhas de cores distintas, conforme apresentado na Tabela 4. Os coeficientes da uniformidade da condutividade (μS) não recebem a mesma avaliação que a lâmina aplicada, apenas foram inseridos no gráfico para fins de comparação.

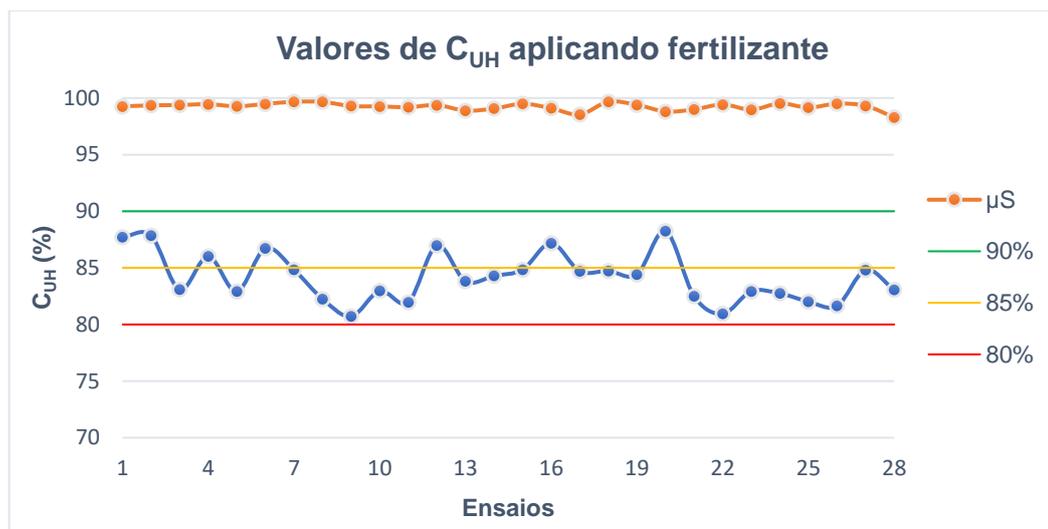


Figura 20 Gráfico da comparação entre os valores de coeficiente da lâmina d'água e da condutividade aferidas nos coletores
Fonte: Autor

Dos vinte e oito ensaios realizados, sete resultaram em coeficientes avaliados como bons (85 a 90%) e vinte e um resultaram em moderados (80 a 85%). O maior valor de coeficiente foi obtido no ensaio vinte que é igual a 88,2466%. A média dos vinte e oito coeficientes de uniformidade da aplicação da água resultantes dos ensaios realizados é igual a 84,1767%. Este valor fica entre 80 e 85% ao se avaliar o desempenho da uniformidade dos ensaios realizados como moderado.

A uniformidade da condutividade aferida nos coletores ficou entre 98,2928 e 99,6676%, mantendo-se consideravelmente estável entre os ensaios realizados, com variação máxima da média menor que 1%, logo, não revela qualquer relação com as mudanças de uniformidade da lâmina aplicada. A hipótese formulada de que a variação da uniformidade de aplicação da lâmina pode interferir na uniformidade do fertilizante pode então ser rejeitada e concluir que, nas condições em que foram realizados os ensaios, a uniformidade da lâmina aplicada não tem relação com a uniformidade de distribuição do fertilizante.

Na Figura 21, é apresentado o perfil médio da lâmina, ao longo da linha, aplicada durante os ensaios. Os pontos dos gráficos representam a lâmina média aferida em cada coletor utilizado nos ensaios. As linhas vermelhas representam o valor de lâmina 10% acima e abaixo da lâmina média (6,07 mm). Os pontos que ficaram acima de 6,677 e abaixo de 5,463 mm são passíveis de investigação, conforme orienta a NBR 15545.

Do ponto posicionado a cinco metros até o ponto a 7 metros do ponto pivô, todos são atendidos apenas pelo spray sob 0,41 bar e todos ultrapassaram os limites dos 10%. O mesmo ocorre para os sprays sob 0,65 bar (bocal 3 mm), do ponto posicionado a 14 metros

até o ponto a 17,5 metros do ponto pivô são atendidos por ele, a maioria dos pontos ultrapassa os limites dos 10%.

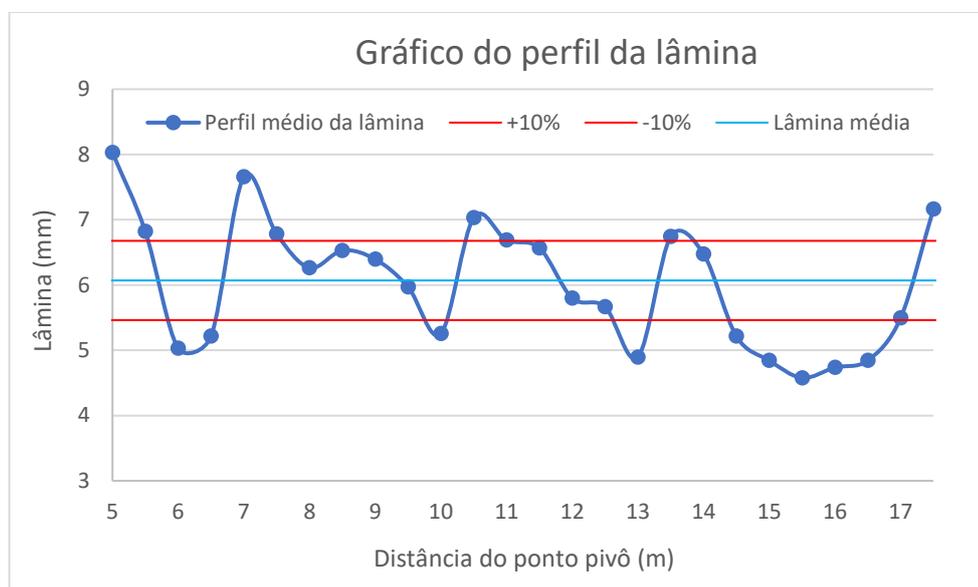


Figura 21 Perfil da lâmina de solução aplicada com o pivô central
Fonte: Autor

Faci et al. (2001) e Mohamed et al. (2019) descrevem que sprays equipados com placas fixas ranhuradas podem ter seus desempenhos afetados em baixas pressões, portanto, podem ocorrer pontos de concentração de água na área molhada pelo spray que afetem as uniformidades desses pontos.

5.3.3 Correlação de Pearson e ANOVA

Os coeficientes resultantes das correlações de Pearson realizadas para as variáveis dos ensaios e os valores t calculados estão apresentados na Tabela 10. Para 24 graus de liberdade ($n-2$) e 5% de confiança, o valor crítico da tabela bicaudal de t-Student é igual a 2,064.

Os valores de correlação positiva, com destaque na Tabela 10, são referentes aos ensaios 1 e 2, que são avaliados com correlação média. Os valores t calculados para os dois ensaios ficaram acima do valor crítico tabelado, evidenciando que a correlação entre as variáveis são significativas a 5% de confiança.

As correlações negativas que podem ser destacadas na Tabela 10 referem-se aos ensaios 10 e 25, classificados com correlação alta e média, respectivamente, mas apenas o

valor t do ensaio dez ficou acima do valor crítico tabelado, evidenciando que, para este ensaio, a correlação é significativa a 5% de confiança.

Tabela 10 Resultado das correlações de Pearson (r), classificação dos coeficientes e valor t calculado

Ensaio	Coefficientes da Correlação de Pearson (r)	Classificação do coeficiente de Pearson	Valor t (t-Student $\alpha=0,05, n-2= 2,064$)
1	0,4753	Média	2,6466
2	0,4142	Média	2,23
3	0,0837	Baixa	0,4117
4	0,1206	Baixa	0,5953
5	-0,3838	Média	-2,0365
6	0,1484	Baixa	0,7353
7	-0,1264	Baixa	-0,6244
8	-0,1885	Baixa	-0,9405
9	-0,0746	Baixa	-0,3667
10	-0,5850	Alta	-3,5341
11	0,2999	Baixa	1,5402
12	-0,0642	Baixa	-0,3151
13	0,0502	Baixa	0,0246
14	-0,0964	Baixa	-0,4746
15	0,1355	Baixa	0,6701
16	-0,0745	Baixa	-0,3683
17	0,1088	Baixa	0,5366
18	-0,0688	Baixa	-0,3381
19	-0,2347	Baixa	-1,1829
20	0,1440	Baixa	0,7132
21	0,0888	Baixa	0,4371
22	0,2521	Baixa	1,2765
23	0,2937	Baixa	1,5055
24	0,1484	Baixa	0,7356
25	-0,3355	Média	-1,745
26	0,0415	Baixa	0,2038
27	0,1531	Baixa	0,7591
28	0,2711	Baixa	1,38

Fonte: Autor

A Tabela 11 apresenta os resultados da ANOVA aplicados às variáveis dos ensaios. Os ensaios 1, 2 e 10, destacados na Tabela 10, retornaram valores P menores que o nível de confiança de 5% (0,05) e valor F maior que o tabelado, o que confirma a correlação das variáveis e o bom ajuste ao modelo de regressão linear. O ensaio 25, destacado na Tabela 4 por apresentar correlação negativa avaliada como média, apresentou valores na ANOVA acima de 0,05 para o valor P e valor abaixo do tabelado para o valor F.

Em dezoito gráficos de dispersão havia pontos que ultrapassaram as linhas do intervalo de predição (IP), os quais foram identificados como possíveis *outliers*. Os dados das variáveis correspondentes aos pontos identificados foram retirados da tabela de valores

e as correlações de Pearson foram novamente realizadas, e o mesmo ocorreu com os dados submetidos à ANOVA. Se algum possível *outlier* fosse novamente identificado, o procedimento era novamente realizado.

Tabela 11 Resultados da aplicação da ANOVA e da regressão linear aplicadas às variáveis dos ensaios

Ensaio	Valor F ($F_{\alpha:0,05, v_1, v_2} = 4,26$)	Valor P	R ² (%)	R ² ajustado (%)
1	7,00	0,014	22,6	19,4
2	4,97	0,035	17,2	13,7
3	0,17	0,684	0,7	0,0
4	0,35	0,557	1,5	0,0
5	4,15	0,053	14,7	11,2
6	1,22	0,280	4,8	0,9
7	0,39	0,538	1,6	0,0
8	0,88	0,356	3,6	0,0
9	0,07	0,792	0,3	0,0
10	11,99	0,002	33,3	30,5
11	2,63	0,118	9,9	6,1
12	0,01	0,916	0,0	0,0
13	0,06	0,808	0,3	0,0
14	0,23	0,639	0,9	0,0
15	1,01	0,325	4,0	0,0
16	0,14	0,716	0,6	0,0
17	0,45	0,510	1,8	0,0
18	0,11	0,738	0,5	0,0
19	1,40	0,248	5,5	1,6
20	0,51	0,483	2,1	0,0
21	0,47	0,501	1,9	0,0
22	1,63	0,214	29,4	26,3
23	1,17	0,290	4,9	0,7
24	0,17	0,680	0,8	0,0
25	3,05	0,094	11,3	7,6
26	0,04	0,840	0,2	0,0
27	0,58	0,455	2,3	0,0
28	1,90	0,180	7,4	3,5

Fonte: Autor

Na Tabela 12 são apresentados os resultados das correlações de Pearson, as quais são aplicadas aos ensaios que apresentaram possíveis *outliers*. Os ensaios 3, 13 e 18 têm 22 graus de liberdade e os demais ensaios apresentaram 23 graus de liberdade.

Tabela 12 Resultados das correlações de Pearson (r), classificação dos coeficientes e valor t calculado após identificação de possíveis outliers

Ensaio	Correlação de Pearson (r)	Classificação do Coeficiente de Pearson	Valor t	t-Student $\alpha:0,05, n-2$
1	0,382	Média	2,0249	2,069
3	0,36	Média	1,8903	2,069
4	0,147	Baixa	0,7280	2,074
6	0,066	Baixa	0,3240	2,069
7	-0,142	Baixa	-0,7027	2,069
8	0,088	Baixa	0,4327	2,069
9	-0,05	Baixa	-0,2452	2,069
10	-0,685	Alta	-4,6061	2,069
13	0,071	Baixa	0,3487	2,074
15	0,099	Baixa	0,4873	2,069
16	-0,116	Baixa	-0,5721	2,069
17	0,048	Baixa	0,2354	2,074
20	0,087	Baixa	0,4278	2,069
22	0,542	Alta	3,1595	2,069
23	0,22	Baixa	1,1048	2,069
24	0,087	Baixa	0,4278	2,069

Fonte: Autor

Na Tabela 13 são apresentados os valores resultados da ANOVA aplicada aos ensaios após a identificação dos possíveis *outliers*. Os valores tabelados de F são diferentes entre os ensaios devido à diferença de graus de liberdade.

Tabela 13 Resultados da ANOVA e regressão linear aplicados aos ensaios identificados com possíveis outliers

Ensaio	Valor F calculado	$F_{0,05, v1, v2}$	Valor P $\alpha = 0,05$	R ² (%)	R ² ajustado (%)
1	3,93	4,28	0,059	14,6	10,9
3	3,28	4,30	0,084	13	9
4	0,51	4,28	0,483	2,2	0,0
6	0,50	4,28	0,488	2,1	0,0
7	0,48	4,28	0,497	2,0	0,0
8	0,18	4,28	0,676	0,8	0,0
9	0,05	4,28	0,830	0,2	0,0
10	21,69	4,28	0,000	48,5	46,3
13	0,11	4,30	0,741	0,5	0,0
15	2,29	4,28	0,145	9,4	5,3
16	0,31	4,28	0,58	1,4	0,0
17	1,19	4,30	0,287	4,9	0,8
20	0,17	4,28	0,680	0,8	0,0
22	9,56	4,28	0,005	29,4	26,3
23	2,27	4,28	0,145	8,6	4,8
24	0,4	4,28	0,469	2,2	0,0

Fonte: Autor

Os resultados para o ensaio 24, entre os dezoito ensaios identificados como possíveis *outliers*, apresentaram as maiores alterações nos resultados da correlação e da ANOVA. Após a retirada dos dados referentes aos possíveis *outliers*, o coeficiente de Pearson do ensaio 22 (Tabela 12) foi avaliado como alto e o valor t ficou acima do valor crítico tabelado. O ensaio 1, na Tabela 12, manteve a mesma avaliação para o coeficiente de Pearson, apresentada na Tabela 10, mas após a identificação dos *outliers* o valor t ficou abaixo do valor crítico tabelado.

Os ensaios comentados na Tabela 12 recebem o mesmo destaque na Tabela 13. O ensaio 1, que havia apresentado valor P abaixo do nível de confiança, após a extração do possível *outlier*, ficou acima do nível de confiança. O mesmo ocorreu para o valor F. O ensaio 22, após retirar o possível *outlier*, retornou para um valor P abaixo do nível de confiança mostrando um bom ajuste ao modelo linear, e um alto valor F, acima do tabelado.

5.4 Ensaio com aplicação de lâmina d'água não inferior a 15 mm

Nos primeiros ensaios realizados com o pivô central aplicando lâmina não inferior a 15 mm, foram notadas algumas incongruências na configuração que se encontrava o equipamento. Algumas incongruências na configuração que se encontravam o equipamento foram notadas nos primeiros ensaios realizados com o pivô central, ao se aplicar lâmina não inferior a 15 mm. Ações foram realizadas para corrigir os problemas encontrados o que aumentou a área molhada do pivô central. Para cobrir toda a área com coletores, o primeiro foi posicionado a 4 metros e o último a 17,5 metros do ponto pivô, totalizando 28 coletores para realizar os ensaios de uniformidade ao se aplicar lâmina não inferior a 15 mm.

Devido aos problemas relatados anteriormente, os sprays que estavam muito próximos, realizando sobreposição excessiva, foram afastados o que alterou a distância dos sprays e coletores, reaproximando a área molhada do ponto pivô. A pressão em alguns sprays também foi alterada com o objetivo de aproximar o perfil da lâmina à média aplicada. Ao aumentar a distância entre os sprays, dois coletores a mais foram introduzidos no ensaio, sendo o primeiro coletor posicionado a 4 metros do ponto pivô.

Partindo-se do ponto pivô, o spray mais próximo foi mantido em 0,45 bar, o fabricante permite até a 0,41 bar, mas como foi utilizado manômetro analógico para aferição da pressão, foi decidido manter em 0,45 bar devido à precisão do manômetro e para manter uma faixa de segurança, caso ocorressem alterações na pressão durante os ensaios. Reduzir a pressão também iria reduzir o efeito de pulverização, efeito que já era conhecido,

mas a ação foi mantida, pois reduziriam a vazão e o comportamento do spray sob uma pressão menor seria conhecido na prática.

A pressão sob o spray seguinte, que estava sob 1,8 bar, não foi alterada. A pressão do penúltimo, que estava sob 2 bar, foi elevada para 2,2 bar. Devido ao número de coletores atendidos pelo último spray, equipados com bocal de 3 mm, que apresentaram lâmina abaixo da margem dos 10% (Figura 21); um segundo spray, sob 0,75 bar, foi instalado à mesma distância do ponto pivô com o objetivo de aproximar a lâmina dos referidos coletores à média aplicada.

O perfil da lâmina do pivô central após o ensaio com aplicação de lâmina superior a 15 mm é apresentado na Figura 22. Na região dos coletores atendidos pelo spray sob 0,45 bar, o comportamento foi semelhante ao ilustrado no gráfico de contorno (Anexo A) para o spray sob 0,5 bar. Há uma grande concentração de água nas extremidades da área molhada e uma redução da altura da lâmina d'água à medida que o coletor se aproxima do spray.

Os valores da lâmina dos coletores atendidos pelos sprays sob 0,45 bar e pelo conjunto de sprays no final da lateral, um sob 0,65 (bocal de 3 mm) e o outro sob 0,75 bar, em sua grande maioria, estão fora da região dos 10%, mesmo que algum dos pontos esteja estejam próximos das margens dos 10%, isto representa um forte desvio da média devido à escala do gráfico.

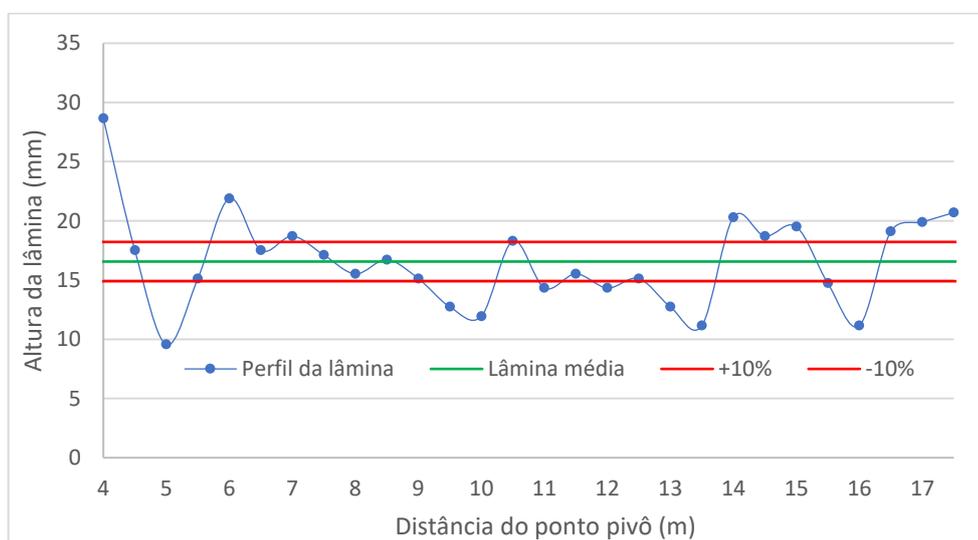


Figura 22 Perfil da lâmina d'água aplicada no ensaio com altura de lâmina não inferior a 15 mm

Fonte: Autor

O coeficiente de uniformidade do ensaio é de 81,93% com uma lâmina média aplicada igual a 16,73 mm. O valor de C_{UH} obtido para o ensaio em questão não altera a

classificação da uniformidade do pivô, pois o valor médio para o ensaios ao se aplicar uma lâmina média de aproximadamente 6 mm também fica entre 80 e 85%. Para este ensaio, quando se aplicou uma lâmina não inferior a 15 mm, a sangria de ar do sistema hidráulico foi realizada.

O perfil da lâmina (Figura 22) na região dos coletores atendidos pelos sprays sob 1,8 e 2,2 bar, que inicia no ponto 6,5 aos 13,5 m do ponto pivô, se assemelha ao comportamento na maioria dos pontos dentro da margem dos 10% ou muito próximos a ela. Se apenas considerarmos os coletores atendidos por estes sprays, o valor da uniformidade de aplicação fica igual a 87,9120%.

6 CONCLUSÕES

O coeficiente de descarga do bocal de 1,59 mm de diâmetro iniciou em 0,7885 sob 0,5 bar e terminou em 0,9829 sob 2,5 bar. O maior valor de coeficiente de descarga foi encontrado quando o spray estava sob 1,75 bar, que foi igual a 0,9971. O bocal apresentou variação maior no coeficiente de descarga quando ensaiado sob pressões abaixo de 1 bar. Esses resultados demonstram que o spray utilizado neste trabalho tem melhor desempenho sob pressões a partir de 1 bar.

Os ensaios realizados com altura de instalação abaixo do recomendado pelo fabricante, que é de 1,80 e 2,74 m do solo, resultaram em valores de coeficientes semelhantes aos registrados na bibliografia citada no trabalho, indicando normalidade nos ensaios de uniformidade.

Para a obtenção de bons valores de C_{UH} na altura de instalação adotada, que é de 1,20 m do solo, recomenda-se adotar espaçamento entre os sprays utilizados no trabalho a 3,25 de distância, quando equipados com bocal de 1,59 mm de diâmetro sob pressões a partir de 1 bar.

Quando o spray é submetido a pressões abaixo de 1 bar, a tendência é que a água seja concentrada e não ocorra o efeito spray, ou seja, a água não é pulverizada, e este é um dos propósitos do produto. Os coeficientes de uniformidade obtidos nos ensaios, para as lâminas aplicadas, correspondem à bibliografia citada no trabalho, porém, a uniformidade e o desempenho do pivô central podem ser elevados se for considerado submeter o modelo de sprays utilizado no trabalho apenas sob pressões acima de 1 bar.

O modelo de gráfico de controle utilizado para avaliar os sprays, individualmente, se adequou ao propósito imposto. A ilustração da amplitude e da média dos dados de lâmina dos grupos de coletores em gráficos em um mesmo quadro auxilia na interpretação do comportamento do equipamento no tempo e no coeficiente de uniformidade, diminuindo a quantidade necessária de gráficos e tabelas para representar e avaliar uma quantidade considerável de dados.

Os problemas enfrentados com a concentração da lâmina d'água na área molhada pelos sprays sob pressões abaixo de 1 bar influenciaram na amplitude dos dados, na uniformidade de aplicação e dificultaram o dimensionamento da linha lateral do pivô central.

A hipótese nula da correlação entre a variação da altura da lâmina e a distribuição do fertilizante neste trabalho foi aceita, nas condições do ensaio. Não foram encontradas evidências suficientes para que a hipótese nula fosse rejeitada.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Recomenda-se que a seleção de modelos de emissores para equipar um pivô central seja realizada com base em estudos de campo que têm por objetivo conhecer as características físicas do solo, para que se evitem problemas com a erosão e o escoamento superficial.

O fluído que não é pulverizado pela placa defletora é despejado abaixo do spray, gerando pontos de lâmina consideravelmente maiores do que a média aplicada na área atendida pelo emissor. Indiferente do que isso pode causar à cultura irrigada, esta característica do spray interfere no coeficiente de uniformidade do equipamento. Neste caso, alterações no projeto do desenho estrutural da placa defletora poderiam diminuir o volume de água despejado abaixo do spray, os quais podem chegar a um volume próximo do que é pulverizado. Ranhuras da placa defletora de 36 ranhuras médias que equipavam os sprays, estavam alinhadas a estrutura do spray o que ocasionalmente interrompia a trajetória da água. As trinta e seis ranhuras médias da placa defletora, que equipavam os sprays, estavam alinhadas de acordo com a estrutura do spray e isso, ocasionalmente, interrompia a trajetória da água.

Devido aos relatos encontrados na bibliografia citada neste trabalho, a uniformidade de aplicação é muito vulnerável à velocidade do vento quando o pivô está operando com FSPS. Assim, a transferência do máximo possível das horas de operação do pivô central para o período noturno e se possível o cancelamento das atividades, se houver incidência de vento na região são ações que podem melhorar a uniformidade do equipamento.

A hipótese formulada neste trabalho foi testada nas condições estabelecidas para os ensaios bem como as conclusões foram embasadas nos resultados dos ensaios realizados. A correlação entre a variação da lâmina aplicada e a condutividade elétrica em diferentes alturas de lâmina e as diferentes concentrações de fertilizante das adotadas nos ensaios realizados não são conhecidas.

Gráficos de controle são excelentes ferramentas para o monitoramento da qualidade em sistemas irrigados. Pontos fixos de aferição de lâmina aplicada, em menor quantidade do que os utilizados para ensaios de uniformidade, podem ser utilizados para monitorar se os valores de lâminas aplicadas não ultrapassarem os valores dos limites de controle superior e inferior fixados em ensaio de uniformidade que resultaram em uniformidade acima de 85% e valor de capacidade de processo abaixo de 1.

O modelo de placa de Arduíno utilizado no trabalho foi instalado no mesmo quadro de comando que as contadoras que acionavam os motores do pivô central. Quando as

contadoras são acionadas, é normal que seja gerada uma vibração no local que elas estão instaladas, e a intensidade da vibração é proporcional ao tamanho da contadora. Esta vibração interferiu no funcionamento do Arduíno que, em determinados momentos, não respondia aos comandos das botoeiras nem ao algoritmo salvo na placa.

Diante deste problema as contadoras e o Arduíno foram instalados sobre arruelas de borracha para sanar o problema. Outra solução possível seria separar os dois componentes em quadros de comando distintos ou utilizar outro modelo de placa de Arduíno onde o circuito integrado seja soldado na placa e não encaixado como é o UNO R3. Mas, desconsiderando este inconveniente, o Arduíno funcionou de forma ininterrupta.

Os materiais utilizados para a construção do pivô central foram uma opção alternativa aos convencionais utilizados em pivôs centrais comerciais. Geralmente, a estrutura de um pivô central comercial é montada utilizando-se peças de aço galvanizado, por se tratar de um material mais resistente ao ambiente que é inserido. Levando-se em consideração o custo do aço carbono dos materiais para aplicar a proteção líquida e da mão de obra para a aplicação, ainda assim o custo inicial ficaria abaixo se fosse utilizado o aço galvanizado para montar o pivô central experimental.

REFERÊNCIAS

- ANA-AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas Irrigação**. Superintendência de planejamento de recursos hídricos (SPR). Ministério do Meio Ambiente, Brasil. 2017.
- ANA-AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: informe 2015**. Brasília, DF, 2016.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. Viçosa: UFV, 2006, 625 p.
- BEN. **Balanco Energético Nacional de 2014**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia, Governo Federal Brasileiro, 2015.
- BISCARO, GUILHERME AUGUSTO. **Sistemas de Irrigação por Aspersão**. Dourados, MS. Editora da UFGD, 2009, 134 p.
- CARPINETTI, L. C. R. **Gestão da Qualidade – Conceitos e Técnicas**. São Paulo, Atlas, 2010.
- CHAKRABORTY, M.; KHOT, L. V.; PETERS, R. T. Assessing suitability of modified center pivot irrigation systems in corn production using low altitude aerial imaging techniques. **Information Processing in Agriculture**, v. 7, p. 41-49, 2020.
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). **Hillsdale**, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.
- BRASIL. Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 3.890-A, de 25 de abril de 1961, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 5.899, de 5 de julho de 1973, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/l10438.htm. Acesso em: 30 de setembro de 2021.
- DONG-YU, CAI; HAI-JUN, YAN; LIAN-HAO, LI. Effects of water application uniformity using a center pivot on winter wheat yield, water and nitrogen use efficiency in the North China Plain. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 19, n. 9, p. 2326-2339, 2020.
- ESPINOZA, ALDAIR; GARCÍA, ROBERTO; SALGADO, YADIRA; URIBE, LUIS ALBERTO; CUAUTLE, LUIS. Ergonomic of a manual load in a car assembling company. **Springer International Publishing**, v. 791, p. 489-498, 2019.
- FACI, J. M., SALVADOR, R., PLAYA'N, E., & SOURELL, H. Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 127, n. 4, p. 224-236, 2001.
- FRIGO, J. P.; VILAS BOAS, M. A.; FRIGO, E. P.; HERMES, E.; TESSARO, E. Irrigação diurna e noturna em um sistema de aspersão convencional em Palotina-PR. **Irriga**, Botucatu, v. 18, p. 318-327, 2013.

GARCÍA, A., MÉRIDA; GARCÍA, E., FERNÁNDEZ; POYATO, P., CAMACHO; BARRIOS, J., MONTESINOS; DÍAZ, A., RODRÍGUEZ. Coupling irrigation scheduling with solar energy production in a smart irrigation management system. **Journal of Cleaner Production**, v. 20 p. 670-682, 2018.

GUNAWAN, G; SARI, MARLIANA; SURBAKTI, BENAR; GINTING, AGUSTIN. Design of automatic plant areas using humidity sensor based on internet of thing. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1361, p. 1-5, 2019.

HUI, X.; ZHENG, Y.; YAN, H. Water distributions of low-pressure sprinklers as affected by the maize canopy under a centre pivot irrigation system. **Agricultural Water Management**, v. 245, p. 106-646, 2021.

HAUPENTHAL, SONI WILLIAN; SIQUEIRA, JAIR ANTONIO CRUZ SIQUEIRA; TOKURA, LUCIENE KAZUE; NOGUEIRA, CARLOS EDUARDO CAMARGO; VILAS BOAS, MARCIO ANTONIO; NASCIMENTO, LAIS FERNANDA JUCHEM; ROCHA, EVERTON ORTIZ. Evaluation of a photovoltaic energy system applied to a drip irrigation system. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 8, p. 43-55, 2018.

HERMES, ELIANE; BOAS, MARCIO ANTONIO VILAS BOAS; RODRIGUES, LINEU NEIVA; MELO, ELOY LEMOS; GONÇALVES, MANOEL PENACHIO; LINS, MARCOS ARAÚJO; BERGER, JUSSARA SILVA. Process capacity index in drip irrigations with cassava wastewater processing. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 12, p. 1427-1433, 2015.

IBGE. **Estatísticas do Século XX**. Rio de Janeiro: IBGE, 2006, 577p.

ISLAM, ZAFAR; MANGRIO, ABDUL GHAFOR; AHMAD, MUHAMMAD MUNIR; AKBER, GHANI; MUHAMMAD, SHER; UMAIR, MUHAMMAD; YASKINA. Application and distribution of irrigation water under various sizes of center pivot sprinkler systems. **Pakistan Journal Agriculture Research**, v. 30, n. 1, p. 35-44, 2017.

JAVAID, A. Effects of bio-fertilizers combined with different soil amendments on potted rice plants. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 71, n. 1, p. 157-163, 2011.

JUCHEN, CARLOS ROBERTO; SUSZEK, FLORIANO LUIZ; VILAS BOAS, MARCIO ANTÔNIO. Irrigação por gotejamento para produção de alface fertirrigada com águas rejeitadas agroindustriais. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 1, p. 243-256, 2013.

KLEIN, MÁRCIO ROBERTO; BOAS, MARCIO ANTONIO VILAS; SUSZEK, FLORIANO LUIZ; SZEKUT; FALVIO DANIEL; MELLO, ELOY LEMOS; GOMES, BENEDITO, MARTINS; SILVA, BRUNO BONEMGERGER; ZUCULOTTO, THIAGO. Fertigation quality with drip irrigation system in grape orchard by using the process capability index. **Journal of Food, Agricultural & Environment**, v. 13, n. 2, p. 179-183, 2015.

KUNAL, KUMAR; HUSSAIN, AZHAR; SRINIVASAN, N; MAYAN, J, A. **Smart irrigation and tank monitoring system**. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 590, p. 1-7, 2019.

LI, Y.; HUI, X.; YAN, H.; CHEN, D. Effects of Travel Speed and Collector on Evaluation of the Water Application Uniformity of a Center Pivot Irrigation System. **Water**, v. 12, p. 1916, 2020.

LOPES, A. R.; VILAS BOAS, M. A.; PAZUCH, F. A.; CORTE, L. D.; OSTROSKI, D. A.; REMOR, M. B.; MOHR, F. B. M.; DOTTO, M.; ZANELLA, A. P.; CARVALHO, A. F. G.; FREDDO, A. R.; BERTOLDO, I. C.; PIROLA, K.; GIAROLA, C. M. Statistical Quality Control in Uniformity of Drip Irrigation With Different Slopes. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 16, p. 195-205, 2019.

LOPES, A. R.; VILAS BOAS, M. A.; PAZUCH, F., A.; OSTROSKI, D. A.; SCHMATZ, M., J. Control charts for monitoring drip irrigation with different hydraulic heads. **Revista Ambiente e Agua**, v. 15, p. 25-54, 2020.

LOPES, A. R.; VILAS BOAS, M. A.; GOMES, B. M.; PRATES, R. T. C.; PAZUCH, F. A.; CORTE, L. D. Drip fertigation quality monitoring using monopotassium phosphate on different slopes. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, p. 1-7, 2021

MOHAMED, A. Z.; PETERS, R. T.; ZHU, X.; SARWARA, A. Adjusting irrigation uniformity coefficients for unimportant variability on a small scale. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 1078-1083, 2019.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Rio de Janeiro, LTC, 7^a ed., 2017.

MORAES, MARIA J.; FILHO, DELLY OLIVEIRA; MANTOVANI, EVERARDO C.; MONTEIRO, PAULO M. B.; MENDES, ANDRÉ L. C.; DAMIÃO, JORGE H. A. C. Automação em sistema de irrigação tipo pivô central para economia de energia elétrica. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 6, p. 1075-1088, 2014.

OKER, T. E; KISEKKA, I.; SHESHUKOV, A. Y.; AGUILAR, J.; ROGERS, D. Evaluation of dynamic uniformity and application efficiency of mobile drip irrigation. **Irrigation Science**, v. 38, p. 17-35, 2020.

OLIVEIRA, A. S.; PEREIRA, F. A. C.; PAZ, V. P. S.; SANTOS, A. S. Avaliação do desempenho de sistemas pivô central na região oeste da Bahia. **Irriga**, Botucatu, v. 9, p. 126-135, 2004.

ORTI'Z, J. N.; JUAN, J. A.; TARJUELO, J. M. Analysis of water application uniformity from a centre pivot irrigator and its effect on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield. **Biosystems Engineering**, v. 105, p. 367-379, 2010.

OUAZAAA, S.; LATORREA, B.; BURGUETEA, J.; SERRETA, A.; PLAYÁNA, E.; SALVADOR, R.; PANIAGUAA, P.; ZAPATAA, N. Effect of the start–stop cycle of center-pivot towers on irrigation performance: experiments and simulations. **Agricultural Water Management**, v.147, p. 163-174, 2015.

PETERS, R. T.; NEIBLING, H.; STROH, R. C. Testing low energy spray application (LESA) in the Pacific Northwest. **Proceedings ASABE/IA irrigation symposium: emerging technologies for sustainable irrigation. A tribute to the career of terry Howell**, p. 1-8, California, USA, 2015.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. Piracicaba: Fealq, 15. ed., 2009.

SCHNEIDER, A. D. Efficiency and uniformity of the lepa and spray sprinkler methods: a review. **Transactions ASAE**, v. 43, p. 937-944, 2000.

SCHMIDT, ROBERT L.; WALKER, BRANDON S.; PEARSON, LAUREN N. Quality controls limits: Are we setting them too wide? **Clinica Chimica Acta**, v. 486, p. 329-334, 2018.

SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A. **Dimensionamento da lateral de irrigação o pivô central**. Planaltina-DF, Embrapa-CPAC, 1998.

SILVA, L. L. The effect of spray head sprinklers with different deflector plates on irrigation uniformity, runoff and sediment yield in a Mediterranean soil. **Agricultural Water Management**, v. 85, p. 243-252, 2006.

SPINELLI, GERARDO M.; GOTTESMAN, ZACH L.; DEENIK, JONATHAN. A low-cost Arduino-based datalogger with cellular modem and FTP communication for irrigation water use monitoring to enable access to Crop Manage. **Hardware X**, v. 6, p. 2-12, 2019.

SOBENKO, LUIZ R.; CAMARGO, ANTONIO P.; BOTREL, TARLEI A.; SANTOS, JEFERSON D. M.; FRIZZONE, JOSE A.; OLIVEIRA, MARCELO F.; SILVA, JORGE V. L. An iris mechanism for variable rate sprinkler Irrigation. **Biosystems engineering**, v. 175, p. 115-123, 2018.

TARJUELO, J. M.; ORTEGA, J. F.; MONTERO, J.; DE JUAN, J. A. Modelling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions. **Agricultural Water Management**, v. 43, p. 263-284, 2000.

TURCO, J. E. P.; RIZZATTI, G. D. S.; PAVANI, L. C. Custo de energia elétrica em cultura do feijoeiro irrigado por pivô central, afetado pelo manejo da irrigação e sistemas de cultivo. **Engenharia Agrícola**, v. 29, p. 311-320, 2009.

UNIVERSIDADE DE MINNESOTA. **Interpretação do Coeficiente de Uniformidade**. Acesso em: Abril de 2021. Disponível em: extension.umn.edu.

VALÍN, M. I. et al. DEPIVOT: A model for center-pivot design and evaluation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 87, p. 159-170, 2012.

ANEXO A

Neste anexo, são apresentados os gráficos de contorno, resultantes dos ensaios de distribuição e alcance realizados com o modelo de spray e nas condições adotadas neste trabalho.

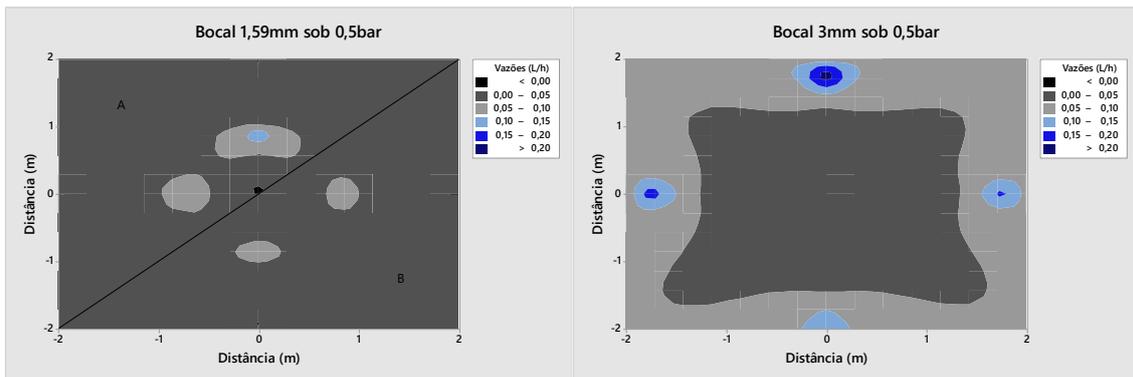


Figura 1a - gráfico de contorno para o spray sob 0,5 bar e Figura 1b - gráfico de contorno para o spray sob 0,5 bar equipado com bocal de 3 mm

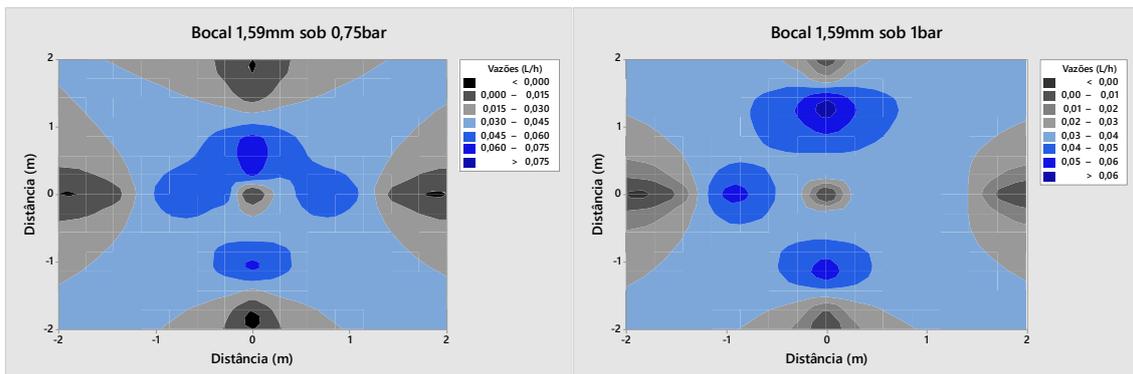


Figura 1la - gráfico de contorno para o spray sob 0,75 bar e Figura 1lb - gráfico de contorno para o spray sob 1 bar

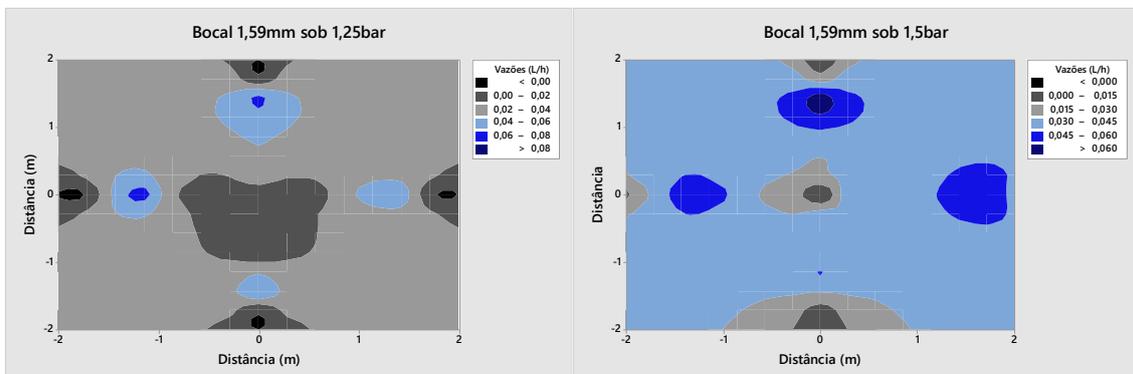


Figura 1lla - gráfico de contorno para o spray sob 1,25 bar e Figura 1llb - gráfico de contorno para o spray sob 1,5 bar

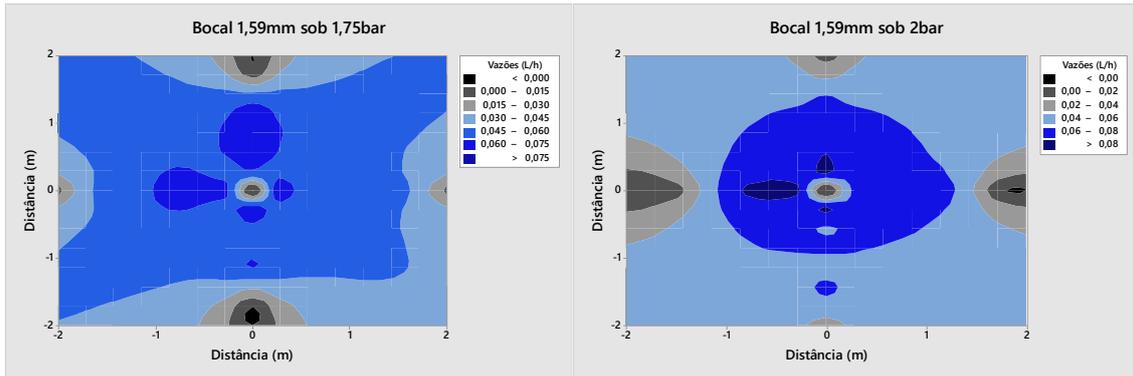


Figura IVa - gráfico de contorno para o spray sob 1,75 bar e Figura IVb - gráfico de contorno para o spray sob 2 bar

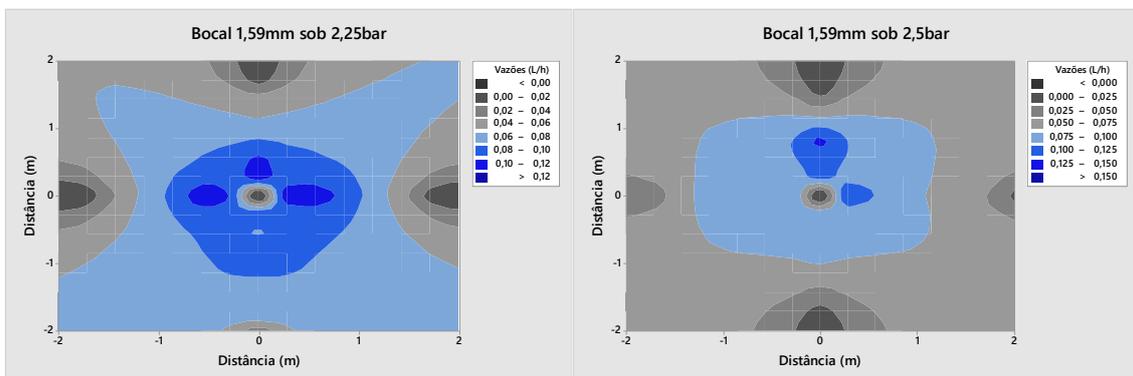


Figura Va - gráfico de contorno para o spray sob 2,25 bar e Figura Vb - gráfico de contorno para o spray sob 2,5 bar

ANEXO B

Neste anexo, são apresentados os valores tabelados dos resultados dos ensaios de distribuição e alcance realizados para os modelos de sprays e nas condições adotadas neste trabalho.

Tabela Ib Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 0,5 bar

Distância do spray (m)	Lado A		Lado B	
	Raio 1 (L.h ⁻¹)	Raio 2 (L.h ⁻¹)	Raio 3 (L.h ⁻¹)	Raio 4 (L.h ⁻¹)
0,25	<u>0,006</u>	<u>0,01</u>	<u>0,006</u>	<u>0,01</u>
0,5	<u>0,026</u>	<u>0,066</u>	<u>0,018</u>	<u>0,02</u>
0,75	<u>0,222</u>	<u>0,132</u>	<u>0,126</u>	<u>0,082</u>
1	0,002	0	<u>0,036</u>	<u>0,084</u>
1,25	0	0	0	0
1,5	0	0	0	0
1,75	0	0	0	0
2	0	0	0	0
Vazão média (L.h ⁻¹)	0,077		0,0475	
Desvio padrão	0,0852		0,0440	
CV (%)	110,6597		92,2128	

Tabela IIb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 0,5 bar equipado com bocal de 3 mm

Distância do spray (m)	Lado A		Lado B	
	Raio 1 (L.h ⁻¹)	Raio 2 (L.h ⁻¹)	Raio 3 (L.h ⁻¹)	Raio 4 (L.h ⁻¹)
0,25	<u>0,016</u>	<u>0,016</u>	<u>0,02</u>	<u>0,04</u>
0,5	<u>0,008</u>	<u>0,012</u>	<u>0,012</u>	<u>0,024</u>
0,75	<u>0,012</u>	<u>0,012</u>	<u>0,012</u>	<u>0,024</u>
1	<u>0,02</u>	<u>0,02</u>	<u>0,02</u>	<u>0,02</u>
1,25	<u>0,032</u>	<u>0,036</u>	<u>0,028</u>	<u>0,032</u>
1,5	<u>0,088</u>	<u>0,092</u>	<u>0,048</u>	<u>0,064</u>
1,75	<u>0,22</u>	<u>0,168</u>	<u>0,1</u>	<u>0,156</u>
2	<u>0,048</u>	<u>0,04</u>	<u>0,144</u>	<u>0,072</u>
Vazão média (L.h ⁻¹)	0,0525		0,051	
Desvio padrão	0,0615		0,0455	
CV (%)	117,1741		89,2648	

Tabela IIIb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 0,75 bar

Distância do spray (m)	Lado A		Lado B	
	Raio 1 (L.h ⁻¹)	Raio 2 (L.h ⁻¹)	Raio 3 (L.h ⁻¹)	Raio 4 (L.h ⁻¹)
0,25	<u>0,063</u>	<u>0,053</u>	<u>0,036</u>	<u>0,027</u>
0,5	<u>0,072</u>	<u>0,057</u>	<u>0,051</u>	<u>0,036</u>
0,75	<u>0,075</u>	<u>0,054</u>	<u>0,063</u>	<u>0,051</u>
1	<u>0,054</u>	<u>0,068</u>	<u>0,057</u>	<u>0,071</u>
1,25	<u>0,026</u>	<u>0,018</u>	<u>0,036</u>	<u>0,063</u>
1,5	0,003	0,003	0,006	0,023
1,75	0	0	0	0
2	0	0	0	0
Vazão média (L.h ⁻¹)	0,05385		0,049	
Desvio padrão	0,018577241		0,014514361	
CV (%)	34,49812656		29,6211443	

Tabela IVb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 1 bar

Distância do spray (m)	Lado A		Lado B	
	Raio 1 (L.h ⁻¹)	Raio 2 (L.h ⁻¹)	Raio 3 (L.h ⁻¹)	Raio 4 (L.h ⁻¹)
0,25	<u>0,034</u>	<u>0,033</u>	<u>0,032</u>	<u>0,032</u>
0,5	<u>0,038</u>	<u>0,042</u>	<u>0,034</u>	<u>0,036</u>
0,75	<u>0,046</u>	<u>0,054</u>	<u>0,039</u>	<u>0,044</u>
1	<u>0,059</u>	<u>0,066</u>	<u>0,04</u>	<u>0,059</u>
1,25	<u>0,069</u>	<u>0,036</u>	<u>0,042</u>	<u>0,059</u>
1,5	0,06	0,01	0,028	0,036
1,75	0,022	0	0,008	0,01
2	0,004	0	0	0,002
Vazão média (L.h ⁻¹)	0,045583333		0,040083333	
Desvio padrão	0,016908623		0,009922045	
CV (%)	37,09387022		24,7535417	

Tabela Vb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 1,25 bar

Distância do spray (m)	Lado A		Lado B	
	Raio 1 (L.h ⁻¹)	Raio 2 (L.h ⁻¹)	Raio 3 (L.h ⁻¹)	Raio 4 (L.h ⁻¹)
0,25	<u>0,04</u>	<u>0,028</u>	<u>0,012</u>	<u>0,026</u>
0,5	<u>0,04</u>	<u>0,03</u>	<u>0,012</u>	<u>0,026</u>
0,75	<u>0,044</u>	<u>0,036</u>	<u>0,036</u>	<u>0,03</u>
1	<u>0,044</u>	<u>0,06</u>	<u>0,04</u>	<u>0,036</u>
1,25	<u>0,068</u>	<u>0,084</u>	<u>0,056</u>	<u>0,06</u>
1,5	<u>0,068</u>	<u>0,044</u>	<u>0,052</u>	<u>0,064</u>
1,75	0,032	0,004	0,028	0,024
2	0,004	0	0,004	0,004
Vazão média (L.h ⁻¹)	0,048833333		0,035857143	
Desvio padrão	0,017256531		0,016704938	
CV (%)	35,33760713		46,58747578	

Tabela VIb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 1,5 bar

Distância do spray (m)	Lado A		Lado B	
	Raio 1 (L.h ⁻¹)	Raio 2 (L.h ⁻¹)	Raio 3 (L.h ⁻¹)	Raio 4 (L.h ⁻¹)
0,25	<u>0,0288</u>	<u>0,0216</u>	<u>0,012</u>	<u>0,026</u>
0,5	<u>0,0288</u>	<u>0,024</u>	<u>0,012</u>	<u>0,026</u>
0,75	<u>0,0336</u>	<u>0,0432</u>	<u>0,036</u>	<u>0,03</u>
1	<u>0,048</u>	<u>0,0408</u>	<u>0,04</u>	<u>0,036</u>
1,25	<u>0,0696</u>	<u>0,0624</u>	<u>0,056</u>	<u>0,06</u>
1,5	<u>0,0708</u>	<u>0,0528</u>	<u>0,052</u>	<u>0,064</u>
1,75	0,0216	0,0336	0,028	0,024
2	0,0024	0,012	0,004	0,004
Vazão média (L.h ⁻¹)	0,042766667		0,039771429	
Desvio padrão	0,017616074		0,012759276	
CV (%)	41,19113155		32,08151262	

Tabela VIIb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 1,75 bar

Distância do spray (m)	Lado A		Lado B	
	Raio 1 (L.h ⁻¹)	Raio 2 (L.h ⁻¹)	Raio 3 (L.h ⁻¹)	Raio 4 (L.h ⁻¹)
0,25	<u>0,064</u>	<u>0,068</u>	<u>0,06</u>	<u>0,072</u>
0,5	<u>0,064</u>	<u>0,06</u>	<u>0,068</u>	<u>0,052</u>
0,75	<u>0,076</u>	<u>0,52</u>	<u>0,076</u>	<u>0,052</u>
1	<u>0,068</u>	<u>0,058</u>	<u>0,062</u>	<u>0,044</u>
1,25	<u>0,044</u>	<u>0,068</u>	<u>0,076</u>	<u>0,044</u>
1,5	<u>0,056</u>	<u>0,028</u>	<u>0,044</u>	<u>0,056</u>
1,75	0,04	0	0,008	0,038
2	0,01	0	0	0,012
Vazão média (L.h ⁻¹)	0,058833333		0,058833333	
Desvio padrão	0,012889977		0,012134349	
CV (%)	21,90930988		20,62495571	

Tabela VIIIb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 2 bar

Distância do spray (m)	Lado A		Lado B	
	Raio 1 (L.h ⁻¹)	Raio 2 (L.h ⁻¹)	Raio 3 (L.h ⁻¹)	Raio 4 (L.h ⁻¹)
0,25	<u>0,086</u>	<u>0,063</u>	<u>0,06</u>	<u>0,084</u>
0,5	<u>0,057</u>	<u>0,069</u>	<u>0,068</u>	<u>0,092</u>
0,75	<u>0,063</u>	<u>0,078</u>	<u>0,076</u>	<u>0,086</u>
1	<u>0,062</u>	<u>0,066</u>	<u>0,062</u>	<u>0,077</u>
1,25	<u>0,051</u>	<u>0,077</u>	<u>0,076</u>	<u>0,044</u>
1,5	<u>0,065</u>	<u>0,042</u>	<u>0,044</u>	<u>0,012</u>
1,75	0,054	0,005	0,008	0,003
2	0,027	0	0	0
Vazão média (L.h ⁻¹)	0,064916667		0,06875	
Desvio padrão	0,011973139		0,023057734	
CV (%)	18,44386002		33,53852198	

Tabela XIXb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 2,25 bar

Distância do spray (m)	Lado A		Lado B	
	Raio 1 (L.h ⁻¹)	Raio 2 (L.h ⁻¹)	Raio 3 (L.h ⁻¹)	Raio 4 (L.h ⁻¹)
0,25	<u>0,112</u>	<u>0,1</u>	<u>0,112</u>	<u>0,094</u>
0,5	<u>0,108</u>	<u>0,124</u>	<u>0,116</u>	<u>0,076</u>
0,75	<u>0,088</u>	<u>0,096</u>	<u>0,108</u>	<u>0,096</u>
1	<u>0,064</u>	<u>0,072</u>	<u>0,08</u>	<u>0,096</u>
1,25	<u>0,056</u>	<u>0,06</u>	<u>0,068</u>	<u>0,076</u>
1,5	<u>0,046</u>	<u>0,036</u>	<u>0,044</u>	<u>0,072</u>
1,75	0,0012	0,008	0,012	0,076
2	0	0	0	0,028
Vazão média (L.h ⁻¹)	0,080166667		0,0865	
Desvio padrão	0,028367181		0,020978344	
CV (%)	35,38525722		24,25242059	

Tabela Xb Resultados dos ensaios de distribuição e alcance, spray sob 2,5 bar

Distância do spray (m)	Lado A		Lado B	
	Raio 1 (L.h ⁻¹)	Raio 2 (L.h ⁻¹)	Raio 3 (L.h ⁻¹)	Raio 4 (L.h ⁻¹)
0,25	<u>0,092</u>	<u>0,122</u>	<u>0,096</u>	<u>0,11</u>
0,5	<u>0,094</u>	<u>0,102</u>	<u>0,092</u>	<u>0,108</u>
0,75	<u>0,086</u>	<u>0,102</u>	<u>0,102</u>	<u>0,152</u>
1	<u>0,074</u>	<u>0,08</u>	<u>0,094</u>	<u>0,112</u>
1,25	<u>0,066</u>	<u>0,066</u>	<u>0,078</u>	<u>0,062</u>
1,5	<u>0,038</u>	<u>0,064</u>	<u>0,068</u>	<u>0,022</u>
1,75	0,016	0,05	0,032	0,008
2	0	0,02	0,032	0
Vazão média (L.h ⁻¹)	0,082166667		0,091333333	
Desvio padrão	0,022360002		0,032003788	
CV (%)	27,21298438		35,04064342	

ANEXO C

A descrição dos produtos utilizados na construção do pivô central experimental e os custos envolvidos no projeto são descritos na Tabela I. Os custos com os produtos da Senninger® não são descritos da tabela, pois os mesmos foram cedidos pela empresa.

Tabela Ic Descrição dos produtos utilizados no pivô central experimental e os custos envolvidos na sua construção

Descrição	Custo
Motobomba	R\$4.800,00
Motoredutor	R\$400,00
Material elétrico: cabos condutores para alimentação dos motores, quadro de comando, sistema de proteção para o sistema elétrico do pivô central e contadoras.	R\$437,00
Material eletroeletrônico: Arduíno UNO R3, jumper (macho x fêmea), módulo de relés, display LCD e botoeiras.	R\$150,00
Tubo galvanizado 2", conexões e fita veda rosca específica para rosca metálica	R\$1.283,00
Estrutura metálica em aço 1020: barras de cantoneira, viga "U", tubo retangular, cabo de aço, catracas para tensionamento do cabo de aço, porcas, parafusos e arruelas.	R\$720,00
Tubos de PVC 2", conexões, cola para PVC e folhas de lixa.	R\$645,00
Reservatório contendo duas caixas d'água de polietileno de média densidade com capacidade de 500 litros	R\$500,00
Peças automotivas: cubo (sem rolamento) para roda aro 13, parafusos de fixação, roda de ferro aro 13 e pneu 175/70R13.	R\$1.776,00
Usinagem: contratação de confexão de dois eixos em aço 1020, de acoplamento da roda dentada ao eixo movido e de acoplamento de roda dentada ao eixo de saída do motoredutor.	R\$285,00
Artefatos de borracha: aruela de borracha para absorver a vibração das contadoras, bucha de borracha para sustentar o tubo de subida para a linha lateral e conexão hidráulica entre a linha lateral e o tubo de saída da torre fixa.	R\$183,00
Material de consumo: eletrodos de solda, abraçadeiras de metal e de nylon, esmalte sintético, broca de metal para aço, serra copo de aço rápido, disco de corte para aço e de desbaste para solda.	R\$460,00
Total	R\$11.139,00

Fonte: Autor