

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

UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO
PULSANTE

VINICIUS COSSICH

CASCAVEL – Paraná - Brasil
2021

VINICIUS COSSICH

**UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO
PULSANTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de mestre em engenharia agrícola, área de concentração em recursos hídricos e saneamento ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Antônio Vilas Boas

CASCADEL – Paraná - Brasil

2021

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

Cossich, Vinicius
UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR
GOTEJAMENTO PULSANTE / Vinicius Cossich; orientador Marcio
Antônio Vilas Boas. -- Cascavel, 2021.
55 p.

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

1. Controle estatístico de processo. 2. Irrigação em alta
frequência. 3. Intervalo de irrigação. 4. Emissor
autocompensante. I. Vilas Boas, Marcio Antônio, orient. II.
Título.

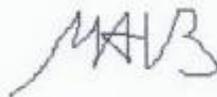
Revisora de Normas, Português e Inglês: Silvana de Araújo Vaillões

Data das revisões: 29 de outubro de 2021.

VINICIUS COSSICH

Uniformidade de aplicação em sistemas de irrigação por gotejamento pulsante

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



Orientador(a) - Marcio Antonio Vilas Boas

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, 04 de agosto de 2021.

BIOGRAFIA

Vinicius Cossich nasceu em 02 de fevereiro de 1993, na cidade de Maringá, Paraná, Brasil e cursou Engenharia Elétrica na Universidade Estadual de Maringá, campus Maringá, durante os anos de 2012 e 2018. Em 2019, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI), na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Campus de Cascavel, nível mestrado, na área de concentração de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, orientado pelo professor Dr. Marcio Antônio Vilas Boas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me oferecido disposição e saúde para chegar até aqui.

Ao meu orientador, Márcio Antônio Vilas Boas, pela amizade, orientação e paciência durante toda a pesquisa.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI), pela oportunidade de realização desse curso.

Aos membros da banca de avaliação, pelas importantes contribuições para a melhoria do presente trabalho.

Agradeço aos demais alunos do PGEAGRI, que, de alguma forma, contribuíram com o meu aprendizado e desenvolvimento deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO PULSANTE

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi investigar a aplicação pulsante na irrigação por gotejamento, avaliando os valores de pressão e vazão, por meio da utilização de análises de variância (ANOVA), a fim de comparar o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) com o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC). Dessa forma, utilizou-se a análise dos gráficos de controle de Shewhart, classificando o processo com o índice de capacidade de processo. O experimento foi conduzido em laboratório, baseado em dois sistemas distintos, com e sem emissores autocompensantes. Para cada um desses sistemas, foram realizados 25 testes, com pressão constante e bombeamento controlado por temporizadores. Foram simulados quatro tempos de pulso distintos para os dados do teste: 6 aplicações de 2 minutos, 4 aplicações de 3 minutos, 2 aplicações de 6 minutos e 1 aplicação de 12 minutos, totalizando 8 tratamentos. Para ambos os emissores, os valores de pressão na linha de distribuição não sofreram alteração com a variação dos tempos de pulso. A vazão do sistema com emissores normais permaneceu constante com aplicação pulsante até um pulso mínimo de 3 minutos. Já a vazão do sistema com emissores autocompensantes, permanece constante independentemente do tempo de pulso. Para o sistema com gotejadores normais, o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) foi mais sensível na comparação de médias que o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD). Entretanto, o CUD foi mais sensível na análise de controle estatístico por meio do gráfico de controle de Shewhart que o CUC. A diminuição dos tempos de pulso não alterou o comportamento sob controle do sistema de irrigação com gotejadores normais. Todos os tratamentos com gotejadores normais foram classificados como excelentes tanto para o CUC quanto para o CUD. Existe um comportamento diretamente proporcional entre a média dos valores dos coeficientes de uniformidade e o índice de capacidade de processo, com coeficiente de determinação para regressão linear de 88,9%, para CUC, e 89,3%, para CUD. Os sistemas de irrigação com gotejadores autocompensantes são classificados como excelentes e bom, de acordo com o CUC e CUD, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: Controle estatístico de processo. Irrigação em alta frequência. Intervalo de irrigação. Emissor autocompensante.

APPLICATION UNIFORMITY IN PULSE DRIP IRRIGATION SYSTEMS

ABSTRACT

The objective of this work was to investigate pulsed application in drip irrigation, evaluating the pressure and flow values using analysis of variance (ANOVA), comparing the distribution uniformity coefficient (DUC) with the Christiansen uniformity coefficient (CUC) using Shewhart control charts, and ranking the process using the process capability index. The experiment was conducted in a laboratory setting with two different systems, one with and another without self-compensating emitters. Each of these systems underwent 25 tests for each treatment, with constant pressure and pumping controlled by timers. For the test data, four different pulse times were simulated: six applications of two minutes, four applications of three minutes, two applications of six minutes, and one application of 12 minutes, for a total of eight treatments. The pressure values in the distribution line did not change with the pulse time variation for either emitter. The flow rate of the system with standard emitters remained constant with pulse application until a minimum pulse of three minutes. The flow rate of the system with self-compensating emitters remained constant regardless of the pulse time. Christiansen's coefficient of uniformity (CUC) was more sensitive in the comparison of means for the dripper system than the distribution uniformity coefficient (DUC). However, the DUC was more sensitive than the CUC in the statistical control analysis using the Shewhart control chart. The reduction in pulse times had no effect on the behavior of the irrigation system with normal standard drippers under control. All treatments with standard drippers were rated excellent for both CUC and DUC. The average of the uniformity coefficient values and the process capability index have a directly proportional behavior, with a linear regression determination coefficient of 88.9% for CUC and 89.3% for DUC. According to CUC and CUD, irrigation systems with self-compensating drippers are classified as excellent and good, respectively.

KEYWORDS: Statistical process control, high frequency irrigation, irrigation interval, self-compensating emitter;

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo Geral	14
2.2 Objetivos específicos	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Conjuntura da irrigação no Brasil e no mundo	16
3.2 Irrigação localizada	16
3.3 Uniformidade de aplicação na irrigação	18
3.3.1 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)	19
3.3.2 Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)	19
3.4 Análises de variância e testes de comparações múltiplas	20
3.5 Controle estatístico de qualidade	21
3.5.1 Normalidade de dados	22
3.5.2 Autocorrelação	22
3.5.3 Gráficos de controle de Shewhart	23
3.5.4 Índice de capacidade do processo	24
3.6 Irrigação por gotejamento pulsante	26
3.7 Característica dos emissores na irrigação por gotejamento	27
3.7.1 Relação pressão x vazão do emissor	27
3.7.2 Modelos de emissores na irrigação por gotejamento	28
3.8 Referências	30
4 MATERIAL E MÉTODOS	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6 CONCLUSÕES	53
7 REFERÊNCIAS	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação do gotejador segundo o coeficiente de variação.....	18
Tabela 2 - Critérios para classificação do CUC e do CUD	20
Tabela 3 - Valores mínimos recomendados da capacidade de um processo.....	25
Tabela 4 - Análise da qualidade da água	34
Tabela 5 - Análise da descritiva dos valores de pressão.....	39
Tabela 6 - Análise da descritiva dos valores de vazão e pressão média (gotejador normal)	43
Tabela 7 - Comparação múltipla de dados de vazão (gotejador normal).....	43
Tabela 8 - Análise da descritiva dos valores de vazão e pressão media (gotejador autocompensante)	44
Tabela 9 - Análise da descritiva dos valores de CUD e CUC	46
Tabela 10 - Índice de Capacidade do Processo (gotejadores normais)	51
Tabela 11 - Índice de Capacidade do Processo (gotejadores autocompensantes)	52

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Exemplo de gráfico de normalidade	22
FIGURA 2 - Exemplo de gráfico de normalidade	23
FIGURA 3 - Relação entre variação de vazão e variação de pressão.....	28
FIGURA 4 - Croqui do sistema de irrigação por gotejamento em bancada	35
FIGURA 5 - Quadro de comando e diagrama elétrico.....	35
FIGURA 6 - Box-plot dos valores de pressão no sistema de irrigação com gotejador normal	41
FIGURA 7 - Box-plot dos valores de pressão no sistema de irrigação com gotejador autocompensante	42
FIGURA 8 - Gráfico de intervalos das pressões e Box-plot dos valores de vazão (gotejador normal)	44
FIGURA 9 - Gráfico de intervalos das pressões e Box-plot dos valores de vazão (gotejador autocompensante)	45
FIGURA 10 - Gráfico de intervalos do CUD e Gráfico de intervalos do CUC	47
FIGURA 11 - Box-plot do CUD e Box-plot do CUC	47
FIGURA 12 - Gráficos de controle de Shewhart para CUD	49
FIGURA 13 - Gráficos de controle de Shewhart para CUC	50

1 INTRODUÇÃO

Segundo a FAO (2017), a irrigação, se bem planejada e executada, possibilita o aumento da produção, o aumento da eficiência no uso da água, tanto em quantidade quanto em qualidade e regularidade, aumenta a diversidade de culturas, contribuindo significativamente para o fomento da produção agropecuária e, conseqüentemente, para o próprio PIB do país.

Dentre os métodos de irrigação, a localizada destaca-se, pois, além da maior eficiência do uso da água comparada à irrigação por aspersão e superfície, ela é recomendada para terrenos menores e acidentados (VILAS BOAS, 2016). Em função desses e de outros fatores, a irrigação localizada tem grande potencial para pequenos agricultores (DAUDA *et al.*, 2009).

Dos métodos de irrigações localizadas, destaca-se o gotejamento. Entre suas características, há: maior eficiência no uso de água, maior produtividade, maior eficiência na adubação, maior eficiência no controle fitossanitário, não interferência nas práticas culturais, adaptação a solos e topografia, utilização com água salina ou em solos salinos e economia de mão de obra (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

A irrigação por gotejamento caracteriza-se pela aplicação da água diretamente sobre a região radicular, em pequenas intensidades (2 a 20 L h⁻¹), porém, com alta frequência, mantendo a umidade do solo próxima à capacidade de campo (OMOFUNMI; ILESANMI; ORISABINONE, 2019).

Essa característica favorece a aplicação de água na irrigação na forma de pulsos. A irrigação por gotejamento pulsante envolve a aplicação de pequenos incrementos de água várias vezes por dia em vez de aplicar uma quantidade maior por uma duração maior. Diante disso, segundo Lamm *et al.* (2007), é defendida por muitos pesquisadores como um procedimento para melhorar a umidade da superfície do solo na agricultura.

No entanto, essa técnica de manejo pode comprometer a uniformidade de aplicação na irrigação. Lozano *et al.* (2020), por exemplo, em seu estudo envolvendo solos arenosos inclinados, aferiu que, em uma aplicação de 5 minutos, a uniformidade reduz de 93% para 65%.

Em função dessa possível queda na uniformidade de aplicação com a irrigação pulsante, uma alternativa está na utilização de gotejadores autocompensantes. Keller e Blisner (1990) citam que, dentre as características para uma melhor qualidade, é importante que o emissor tenha uma relação vazão versus pressão favorável, que resulta em vazões uniformes. Entretanto, Dias *et al.* (2004) ressaltam a importância de mais pesquisas sobre resistência de gotejadores à obstrução, sob diferentes condições de manejo, objetivando maior segurança para fornecer opções mais confiáveis aos irrigantes.

Visto a possibilidade e a necessidade de investigação da uniformidade de aplicação na irrigação por gotejamento sobre a prática de aplicação pulsante, o controle estatístico da qualidade é uma ferramenta interessante a ser utilizada. Para Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010), o controle estatístico da qualidade está adaptado à avaliação de sistemas de irrigação, uma vez que são compostos por gráficos de controle e pelo controle estatístico do processo, que procura manter variáveis dentro de limites ou padrões pré-estabelecidos por normas técnicas, buscando que determinado processo se comporte de forma adequada. Os gráficos de controle têm a capacidade de monitorar o processo e sinalizar aos analistas a necessidade de investigá-lo e ajustá-lo, conforme o tamanho dos desvios encontrados (WALTER *et al.*, 2013).

Vários autores utilizaram as ferramentas estatísticas do controle de qualidade do processo em um sistema de irrigação por gotejamento. Hermes *et al.* (2015; 2014; 2013), Klein *et al.* (2015) e Juchen, Suszek e Vilas Boas (2013), por exemplo, utilizaram o índice de capacidade do processo e os gráficos de controle, de maneira que revelaram o potencial da capacidade de monitorar o controle da irrigação dentro dos limites satisfatórios, além de contribuírem para o monitoramento do processo da irrigação.

Sendo assim, visto a possibilidade de utilizar o estudo de controle estatístico de qualidade, ainda desconhecido na investigação em questão, o objetivo deste trabalho foi avaliar os valores de pressão e vazão, utilizando análises de variância (ANOVA), a fim de comparar o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) com o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC). Para isso, foi utilizada a análise dos gráficos de controle de Shewhart, a fim de classificar o processo usando o índice de capacidade de processo; dessa forma, foi possível diagnosticar os efeitos de diferentes configurações de irrigação pulsante sob a influência de emissores autocompensantes no comportamento da uniformidade de distribuição em sistema de irrigação por gotejamento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da aplicação pulsante em um sistema de irrigação por gotejamento com e sem emissores autocompensantes.

2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, destacam-se:

Mapear o comportamento da pressão do sistema com a variação dos tempos de pulso.

Identificar qual o tempo de pulso mínimo sem que ocorra a alteração da vazão média do sistema.

Comparar qual coeficiente de uniformidade, entre o coeficiente de uniformidade de Christiansen e o coeficiente de uniformidade de distribuição, é mais criterioso para identificar mudanças na uniformidade de distribuição com a variação de tempos de pulso.

Avaliar se a diminuição dos tempos de pulso altera o comportamento sobre controle do sistema de irrigação por gotejamento.

Encontrar quais tratamentos são classificados como excelentes em função do índice de capacidade de processo, de acordo com Keller e Bliesner (2009).

Determinar a relação entre os coeficientes de uniformidade e o índice de capacidade de processo para os dois sistemas de irrigação investigados, a partir do coeficiente de determinação para regressão linear.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A irrigação consiste em uma prática agrícola importante para quase todas as regiões e clima do planeta; isso porque representa um sistema artificial de abastecimento de água para as plantações quando o fornecimento hídrico natural não é suficiente para suprir as necessidades das plantas (GOMES, 2013).

Entretanto, a prática da irrigação apenas se torna um instrumento eficiente para o aumento de produtividade quando projetada de maneira criteriosa e precisa. Para isso, é necessária a atenção ao uso otimizado dos recursos hídricos juntamente com o foco na produtividade e qualidade final do produto (MAZZER *et al.*, 2008).

Ao considerar esse cuidado com a adequação do sistema irrigante, Gomes (2013) divide a forma de aplicação de água em duas categorias: a irrigação por superfície e a irrigação pressurizada. Na irrigação por superfície, a água chega às plantas de forma direta por escoamento sobre a superfície do terreno cultivado; já na irrigação pressurizada, a água é conduzida até a planta por meio de condutos forçados.

Com base numa divisão mais específica dos sistemas de irrigação, considerando sua maneira de aplicação, Andrade e Brito (2006) subdividem em quatro métodos: superfície, aspersão, localizada e subirrigação. Segundo os autores, o motivo para essa gama de divisões em sistemas irrigantes é a grande variação de clima, solo, culturas, disponibilidade de água e condições socioeconômicas pelas quais todo o conjunto deve ser adaptado.

O Natural Resources Conservation Service (NRCS) National Engineering Handbook (NEH) descreve esses quatro sistemas de irrigação, citados acima, da seguinte forma (WALLER & YITAYEW, 2016): a irrigação por superfície é aplicada por gravidade por meio da superfície do solo por alagamento ou pequenos canais (bacias, bordas, canteiros, sulcos, riachos, corrugações). A irrigação por aspersão é aplicada no ponto de uso por um sistema de bicos (aspersores ou pulverizadores acionados por impacto e engrenagem) com água fornecida aosaspersores pela superfície e tubulações enterradas, ou por ambos. A irrigação localizada ou microirrigação é aplicada no ponto de utilização por meio de dispositivos de descarga de baixa pressão e baixo volume (ou seja, emissores de gotejamento, emissores de fonte de linha, micropulverizadores e aspersores, gravidade e borbulhadores de baixa pressão), fornecidos por tubulações de superfície de pequeno diâmetro ou enterradas. Já na subirrigação, a água é disponibilizada para o sistema radicular da cultura por dutos enterrados no solo, funcionando como um lençol freático controlado. Cada método de irrigação e sistema de irrigação tem aplicabilidade, capacidade e limitações do local específico.

3.1 Conjuntura da irrigação no Brasil e no mundo

Calcula-se que, no começo do século XX, toda área irrigada mundial estava próxima de 40 milhões de hectares. Em 1950, esse valor subiu para 160 milhões de hectares; assim, de acordo com a FAO (2013), a área irrigada no mundo chegava a 310 milhões de hectares, sendo que 70% desse total estavam localizados na Ásia, o que equivalia a 35% das terras cultivadas naquele continente. A China é o país com a maior área irrigada do mundo, 62,4 milhões de hectares, seguida pela Índia e pelos Estados Unidos, com 61,9 e 28,4 milhões de hectares, respectivamente.

Os países do continente americano com mais de 1 milhão de área equipada para irrigação são o México (6,4 milhões), Brasil (4,4 milhões), Chile (1,9 milhões), Argentina (1,7 milhões) e Peru (1,7 milhões).

O Brasil possuía, em 2006, uma superfície territorial de 851 milhões de hectares e utilizava com agricultura cerca de 333,6 milhões de hectares, sendo 60,6 milhões ocupados com lavouras, 160 milhões com pastagens e 100 milhões de matas e florestas (IBGE, 2012). De acordo com dados do Censo Agropecuário de 2017 (IBGE, 2017), o número de estabelecimentos que fizeram uso da técnica aumentou 52,6% em comparação com 2006. Nesses 11 anos, a área total irrigada também cresceu em números parecidos: 47,6%. São mais de 550 mil estabelecimentos e área total de 6,7 milhões de hectares. Desses estabelecimentos, 25,3% correspondem à irrigação por gotejamento; 22,6% por rega manual; 21,0% sob aspersão convencional; 18,9% em microaspersão e 12,0% com outros métodos.

Estudo realizado pelo ATLAS (2017) estimou que o país possuía uma área adicional irrigável de cerca de 76,19 milhões de hectares, que foi classificado em 21,8Mha em terras de alta aptidão, 25,86Mha em média aptidão e 28,52Mha em baixa aptidão. Sendo assim, analisando a magnitude de tais dados e comparando com países que hoje fazem uso intensivo dessa técnica, fica evidente que o Brasil possui condições pedológicas, hídricas e topográficas, para crescer no campo da agricultura irrigada.

3.2 Irrigação localizada

Na irrigação localizada, a água é aplicada no pé da planta visando molhar especificamente a área do solo onde se encontra o sistema radicular da planta. Para isso, a água é conduzida sob baixas pressões até emissores específicos que mantêm o solo com um alto teor de umidade (BISCARO, 2014).

Segundo Testezlaf (2017), em função do tipo de emissor utilizado, os sistemas de irrigação localizada podem ser classificados em: Irrigação por gotejamento, Irrigação por microaspersão, Irrigação por borbulhamento, Irrigação por exsudação.

A irrigação por gotejamento aplica água na forma de gotas por uma fonte pontual, denominado gotejador. Esses operam com pressões que variam entre 50 e 200 kPa, com vazões na ordem de 0,5 a 12 L h⁻¹ (TESTEZLAF, 2017).

Irrigação por microaspersão caracteriza-se pela aplicação numa fração do volume de solo onde estão as raízes das plantas, de forma circular ou em faixa contínua, realizada por aspersores de pequenas dimensões. Nesse sistema, as pressões variam de 100 a 300 kPa, e as vazões de 30 a 200 L h⁻¹ (TESTEZLAF, 2017).

A irrigação por borbulhamento assemelha-se a emissores de pequeno orifício usados em gotejadores, de maneira que a diferença está no fato da vazão ser maior. Em sua aplicação, é criada uma área molhada inundada ao redor do pé da cultura, promovendo, assim, a infiltração (TESTEZLAF, 2017).

Já a irrigação por exsudação, compreende os sistemas de irrigação que utilizam uma tubulação porosa para transpirar a água pelos seus poros; a água exsudada produz uma faixa umedecida de solo que é contínua ao longo das linhas de irrigação (TESTEZLAF, 2017).

Ao considerar as vantagens da irrigação localizada, Bernardo (1995) cita que economia de água e alta uniformidade na aplicação são características desse método, pois, com aplicações em pequenas quantidades, porém, com alta frequência, permitem-se menores perdas por evaporação e arraste quando comparadas a sistemas por aspersão.

Entretanto, segundo Oliveira *et al.* (2016), apenas a uniformidade não é suficiente para atingir a eficácia da irrigação. O manejo da irrigação é igualmente importante, principalmente em sistemas de microirrigação.

Os sistemas de irrigação localizada possuem limitações que dificultam a sua utilização. Um dos empecilhos mais frequentes são os entupimentos ocorridos pela má qualidade da água e a deterioração das linhas de polietileno, que, com o tempo, podem ser danificadas por roedores (TESTEZLAF, 2017).

Segundo o autor, se projetado inadequadamente, pode ocorrer acúmulo de sais na superfície do solo, baixa eficiência na uniformidade de distribuição dos emissores em áreas declivosas e limitação do crescimento radicular da planta em função de pequenos volumes de solo umedecido.

Sendo assim, de acordo com Mazzer *et al.* (2008), pensando na necessidade do uso consciente da água, é visível o crescente desenvolvimento de pesquisas na área de irrigação, colocando novos modelos que conciliem eficiência e baixo custo. Entretanto, segundo a autor, a realização de testes para verificação do seu funcionamento, quando utilizado no campo, é de extrema necessidade.

3.3 Uniformidade de aplicação na irrigação

A NBR ISO 7749-2 (ABNT, 2000), a partir de ensaios no campo de distribuição de água, estabelece a metodologia para cálculo de coeficientes que qualificam a uniformidade de aplicação da água na irrigação. Dessa forma, baixos valores percentuais indicam baixos níveis de uniformidade de distribuição de água; por outro lado, um coeficiente de distribuição de 100% representa uma uniformidade perfeita sobre a área de ensaio.

Para o cálculo desse percentual no dimensionamento de um projeto de irrigação por gotejamento, utiliza-se um critério analítico. Keller e Karmeli (1974) estabelecem uma fórmula estatística (Equação 1), em função das condições hidráulicas de funcionamento dos emissores e da qualidade do gotejador.

$$C_U = 100 \left\{ 1 - 1,27 \frac{v}{\sqrt{N_e}} \right\} \frac{q_{\min}}{q_{\text{med}}} \quad \text{Eq. 01}$$

Em que: C_U - Coeficiente de uniformidade de projeto, em %. v - Coeficiente de variação de fabricação do gotejador. N_e - Número de emissores por planta. q_{\min} - Vazão mínima de projeto dos gotejadores da unidade do sistema. q_{med} - Vazão média de projeto dos gotejadores da unidade do sistema.

O coeficiente de variação (C.V.) é obtido a partir dos valores das vazões medidas em uma amostra dos gotejadores a empregar no projeto, por meio da relação estatística:

$$\text{C.V.} = \frac{\alpha}{q_{\text{med}}} \quad \text{Eq. 02}$$

Sendo: α - O desvio padrão das vazões amostrais; q_{med} - Vazão média dos gotejadores;

O valor do C.V. deve ser fornecido pelo fabricante e, quanto mais alto for o valor do coeficiente de variação, menor será a qualidade do emissor. Na Tabela 1, é indicada a classificação dos gotejadores, estabelecida por Solomon (1977), segundo o coeficiente de variação do emissor.

Tabela 1 - Classificação do gotejador segundo o coeficiente de variação.

Coeficiente do gotejador (v)	Qualidade
< 0,05	Excelente
0,05 a 0,07	Médio
0,07 a 0,11	Discreto
0,11 a 0,15	Mal
> 0,15	Péssimo

Fonte: (SOLOMON, 1977).

Mesmo sendo base para cálculo da uniformidade de aplicação de água na irrigação, a equação proposta por Keller e Karmeli é substituída por modelos matemáticos mais práticos para serem usados em dados coletados em campo. Dois coeficientes amplamente utilizados são o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD).

3.3.1 Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

Criado por Christiansen (1942), é considerado por muitos o principal parâmetro que descreve a uniformidade de irrigação. Com esse coeficiente, é possível aferir a uniformidade de aplicação com base na média dos desvios absolutos em relação à média dos valores coletados de precipitação, segundo a Equação 3:

$$CUC = 100 \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_{med}|}{n - x_{med}} \right\} \quad \text{Eq. 03}$$

Em que: CUC - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, em %; x_i - Valores individuais do volume de água contidos nos coletores, em mm; x_{med} - Média geral dos valores dos volumes de água coletados, em mm; n - Número de coletores na área de ensaio.

3.3.2 Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)

Juntamente com o CUC, outro índice de uniformidade frequentemente utilizado é o coeficiente de distribuição (CUD), apresentado inicialmente por Merriam e Keller (1978). A equação relaciona a média das 25% menores lâminas coletadas com a média geral das lâminas coletadas, como pode ser visto na Equação 4 (BERNARDO, 1995).

$$CUD = 100 \left(\frac{x_{25}}{x_{med}} \right) \quad \text{Eq. 04}$$

Em que: CUD - Coeficiente de uniformidade de distribuição, em %; x_{25} - Média do menor quartil dos volumes de água contidos nos coletores, mm; x_{med} - Média geral dos valores dos volumes de água coletados, em mm.

Com as duas equações em mãos, torna-se possível avaliar o percentual calculado e classificar a eficiência do sistema de irrigação. Para isso, adotou-se a divisão desenvolvida por Keller e Bliesner (2009), a qual é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Critérios para classificação do CUC e do CUD

Classificação	CUC (%)	CUD (%)
Excelente	> 90	> 90
Bom	85 – 90	85 – 90
Aceitável	78 – 85	65 – 85
Ruim	< 78	< 65

Fonte: (KELLER E BLIESNER, 2009)

3.4 Análises de variância e testes de comparações múltiplas

Comparações múltiplas de médias permitem que se efetive a análise de quais são as médias diferentes, a fim de estimar em que grau elas são diferentes. Dessa forma, é possível avaliar a significância estatística das diferenças entre médias, usando um conjunto de intervalos de confiança, um conjunto de testes de hipóteses ou ambos. Os intervalos de confiança permitem-lhe avaliar a significância prática das diferenças entre as médias, além da significância estatística (MINITAB, 2020).

A seleção do método de comparação múltipla apropriado depende da inferência desejada. Dentre os fatores a serem considerados, estão o tipo de variável estudada, o número de grupos comparados, a relação entre esses grupos e a normalidade de seus dados. Partindo do pressuposto de que os dados das variáveis dependentes deste estudo são quantitativos e com mais de 2 grupos, a escolha dos métodos estatísticos foi feita com base na natureza paramétrica e não paramétrica dos dados. Nesse sentido, as análises indicadas para estudo foram a One - Way ANOVA e o Kruskal-Wallis.

A análise de variância (ANOVA) é utilizada para a análise de dados paramétricos. Na ANOVA, assume-se que a variável dependente é normalmente distribuída e que existe uma variância aproximadamente igual entre grupos. A ANOVA é uma técnica estatística que pode comparar mais de dois grupos (MINITAB, 2020). O p-valor calculado é utilizado para decidir a conclusão do teste. Se o valor de p for inferior a 0,05, a hipótese será de diferença estatisticamente significativa (A hipótese nula é rejeitada). Se o valor de p for acima de um 0,05, a hipótese será de diferença insignificante ou a hipótese nula é aceita. Se a ANOVA produzir uma diferença estatisticamente significativa, os testes de comparação múltiplas são usados para comparar dentro dos grupos (MINITAB, 2020).

Há uma série desses testes, dentre eles, o teste Tukey, que é utilizado para mostrar comparações entre cada par de grupos a um nível significativo de 0,05 (MINITAB, 2019). Se a diferença média entre dois grupos é maior do que o do teste de Tukey, são considerados estatisticamente significativos (MINITAB, 2019).

Quando as variáveis estudadas representam uma distribuição não-normal, são utilizadas ferramentas estatísticas para dados não paramétricos, como é o caso de Kruskal-Wallis ANOVA (MINITAB, 2020), ao nível de significância (α) de 5%. Posterior ao teste de

Kruskal-Wallis, são executados testes de comparações múltiplas, a partir do teste de Mann-Whitney ao nível de significância de 5%, os quais permitiram uma comparação simultânea entre todos os resultados obtidos e a verificação de quais parâmetros apresentaram comportamentos diferenciados entre as diferentes frequências de aplicação (MINITAB, 2020).

3.5 Controle estatístico de qualidade

De acordo com Ribeiro e Caten (2012), a qualidade de um produto ou serviço está vinculada à menor variabilidade possível em torno de suas especificações. Segundo Montgomery (2016), essas especificações são diversas, como físicas, sensoriais ou de orientação temporal.

Nesse contexto, o controle estatístico de processo (CEP) é uma técnica estatística voltada à produção que busca a redução da variabilidade dessas características de qualidade citadas, favorecendo, assim, a melhoria em produtividade, confiabilidade e custo do que está sendo produzido.

Na prática, o CEP opera com inspeção por amostragem, ao longo do processo, objetivando encontrar causas especiais, ou seja, comportamentos que não são naturais e que prejudicam a qualidade do produto ou serviço. Ressaltam, ainda, que processos que apresentam apenas causas comuns são percebidos como estáveis ou sob controle, pois apresentam sempre a mesma variabilidade ao longo do tempo.

Diante dessas definições, no início da década de 20, ainda no começo dos estudos de controle de qualidade, o Dr. Walter Shewhart desenvolveu uma técnica simples, mas poderosa para fazer a distinção entre causas comuns e causas especiais: as cartas de controle do processo, ou também conhecidas, gráficos de controle.

Dentre suas características, os gráficos de controle têm a capacidade de detectar falhas no decorrer de um processo em tempo real. Sendo assim, quando a falha for detectada, o processo é parado, atribui-se uma causa à falha, resolve-se o problema e só então o processo é retomado (KLEIN, 2013).

Os gráficos de controle, quando utilizados para analisar dados remetentes do passado, são limitados, uma vez que, ao se atribuir causas ou não a uma falha ocorrida anteriormente, o processo não foi parado. Dessa forma, a hipótese de gerar gráficos plotando os valores no decorrer do tempo permitiria recalcular os limites de controle e averiguar falhas (MONTGOMERY, 2009).

Entretanto, para uma análise confiável dos gráficos de controle, aconselha-se que os dados tenham uma distribuição normal, a fim de que os limites calculados demonstrem pontos fora de controle estatístico. Nesse sentido, o índice de capacidade de processo surge como uma ferramenta útil.

O estudo da capacidade de processo reflete a aptidão que o processo tem de manufaturar produtos cuja variação inerente esteja dentro da faixa de tolerância especificada pelo fabricante do produto (BORGES *et al.*, 2008).

3.5.1 Normalidade de dados

Para a aplicação das ferramentas fornecidas pelo controle estatístico de qualidade, há a necessidade de que os dados apresentem distribuição normal, por meio do teste de Anderson-Darling (MONTGOMERY, 2009).

A Figura 1 apresenta o modelo de gráfico utilizado para o teste de normalidade. A normalidade é definida quando o p-valor é maior do que 0,05. Em caso de uma distribuição não normal dos dados, existe a possibilidade da utilização da transformação do tipo box-cox.

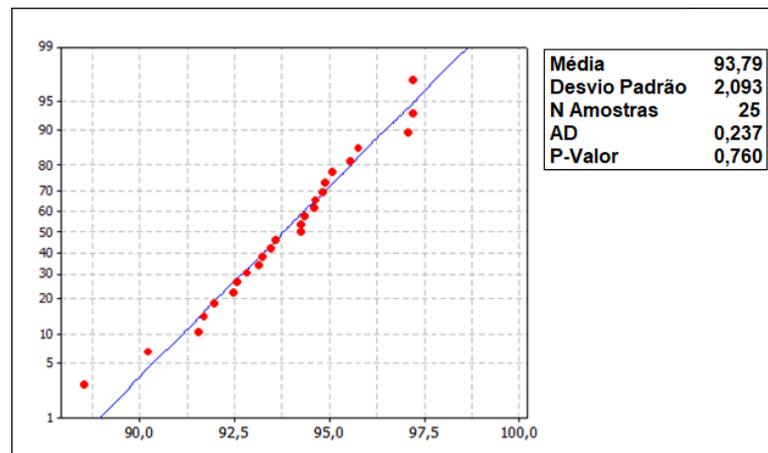


FIGURA 1 - Exemplo de gráfico de normalidade

3.5.2 Autocorrelação

Os dados a serem analisados, além de apresentarem normalidade, devem possuir independência entre si, para que possa ser feita a análise de controle estatístico de qualidade (MONTGOMERY, 2009). A presença de autocorrelação nos dados analisados compromete o desempenho da técnica, podendo confundir causas especiais com as comuns do processo.

Para Costa, Epprescht e Carpinetti (2004), a autocorrelação não impossibilita a aplicação da análise de controle estatístico de qualidade, apenas alerta para a ocorrência de enganos diante dos resultados por eles apresentados.

A verificação da independência dos dados é possível de ser feita por meio do gráfico de autocorrelação, por exemplo, a da Figura 2. As linhas tracejadas representam os limites equivalentes à do desvio padrão e, quando eles são excedidos pelas barras verticais

correspondentes às amostras coletadas, significa que os dados apresentam autocorrelação (MONTGOMERY, 2009).

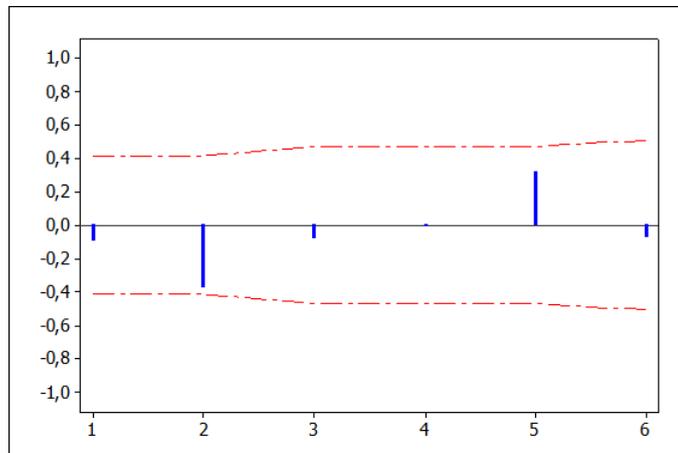


FIGURA 2 - Exemplo de gráfico de normalidade

3.5.3 Gráficos de controle de Shewhart

Devido à sua simplicidade de interpretação, os gráficos de controle mais conhecidos são o de Shewhart, sendo aplicado em situações em que a amostra consiste em apenas uma única unidade (MONTGOMERY, 2016)

Segundo Montgomery (2009), tais gráficos de controle possuem uma linha central (LM), representando o valor médio das características da qualidade em função do número de amostras ou do tempo, e outras duas linhas, as quais correspondem aos limites superior (LSC) e inferior de controle (LIC), calculadas pelas seguintes expressões:

$$LSC = \bar{\bar{X}} + 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad \text{Eq. 05}$$

$$LM = \bar{\bar{X}} \quad \text{Eq. 06}$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad \text{Eq. 07}$$

Em que: $\bar{\bar{X}}$ - Média das médias; \bar{R} - Média das amplitudes dos dados; d_2 - Uma constante igual a 1,128 para $n = 2$, considerando-se medidas individuais, de acordo com a tabela descrita por Montgomery (2009).

Tendo o gráfico de controle em mãos, Werkema (1996) sugere alguns passos para análise das cartas de controle, que consiste em verificar se todos os pontos estão dentro dos limites de controle e se apresentam configuração não aleatória. Caso uma das condições não forem satisfeitas, conclui-se que o processo está fora do estado de controle estatístico.

Para Montgomery (2009), essa configuração não aleatória ocorre quando há um comportamento sistemático, por exemplo, ter 8 ou mais pontos em um mesmo lado da linha central, com tendências crescentes, decrescentes ou cíclicas.

Se essas duas condições forem satisfeitas, pode-se afirmar que o processo está sob controle estatístico; o próximo passo é avaliar a capacidade do processo.

Hermes *et al.* (2010) utilizaram gráficos de controle em sua pesquisa, cujo objetivo foi verificar o efeito da qualidade da água combinada com diferentes cargas hidráulicas na uniformidade de aplicação de um sistema de irrigação por gotejamento.

Frigo *et al.* (2014) utilizaram dados de uniformidade de distribuição de água em um sistema de irrigação por aspersão, em que foram aplicados os gráficos de controle de Shewart, de maneira que foi possível verificar que o vento tem influência direta sobre o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).

Para avaliação de sistemas de irrigação, o gráfico de controle de Shewhart já é muito utilizado. Entretanto, para Silva *et al.* (2016), a sua utilização não é viável para todos os processos, mas é um caminho organizado para determinar onde os problemas estão e para encontrar maneiras de resolvê-los.

3.5.4 Índice de capacidade do processo

De acordo com Costa *et al.* (2005), o índice de capacidade do processo é um parâmetro adimensional que mensura o processo no quanto consegue atender às especificações.

Esse parâmetro adimensional, como apresentado por Tamagi *et al.* (2016), é dividido em capacidade de processo (C_p) e o desempenho de processo (C_{pk}). No cálculo de C_p com ambas as limitações, tanto a inferior quanto a superior, utiliza-se a equação 08:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{LSC - LIC} \quad \text{Eq. 08}$$

Em que: LIE – Limite inferior de especificações; LSE - Limite superior de especificações; LIC - Limite inferior de confiança; LSC - Limite superior de confiança;

É visível que o índice C_p relaciona aquilo que se deseja produzir com a variabilidade natural do processo. Já o índice de desempenho de processo C_{pk} , diferentemente do C_p , pode ser interpretado como uma medida de capacidade real do processo; isso porque, considerando-se o valor da média do processo, permite avaliar se está sendo capaz de atingir o valor nominal de especificação. Por definição, o desempenho de processo é definido como $C_{pk} = \text{Min} \{C_{pu}, C_{pl}\}$, em que os estimadores de C_{pu} e C_{pl} são, respectivamente, definidos pelas Equações 9 e 10:

$$C_{pu} = \frac{LSE - \bar{X}}{3\hat{\sigma}} \quad \text{Eq. 09}$$

$$C_{pl} = \frac{\bar{X} - LIE}{3\hat{\sigma}} \quad \text{Eq. 10}$$

Para análise dos valores calculados de C_p , Montgomery (2016) classifica a capacidade do processo de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Valores mínimos recomendados da capacidade de um processo

	Especificações bilaterais	Especificações unilaterais
Processos existentes	1,33	1,25
Novos processos	1,50	1,45
Segurança, força, parâmetro crítico, processo existente	1,50	1,45
Segurança, força, parâmetro crítico, processo novo	1,67	1,60

Fonte: Montgomery (2016).

Dessa forma, considerando, por exemplo, os valores mínimos recomendados para sistemas novos de irrigação, temos que, para $C_p \geq 1,50$, o processo é capaz ou adequado; se variar entre $1 \leq C_p < 1,50$, o processo é aceitável e, caso $C_p < 1$, o processo é incapaz ou inadequado.

Já quanto ao índice C_{pk} , pode ser interpretado como uma medida da capacidade real do processo. O desempenho é incapaz se $C_{pk} < 1$ é aceitável; se $1 \leq C_{pk} \leq 1,45$; e é capaz se $C_{pk} \geq 1,45$. Se $C_{pk} < C_p$, o processo está fora do ponto de especificação.

Por fim, para verificar se a irrigação é capaz de se manter sob controle em relação ao limite inferior de especificação, os valores de C_{pl} devem estar acima de 1,45.

Klein *et al.* (2013) utilizaram índice de capacidade de processo a fim de validar a uniformidade de distribuição em um sistema de fertirrigação por gotejamento sobre efeito de diferentes concentrações de NPK e diferentes pressões de entrada.

Nunes *et al.* (2018) basearam-se em um sistema de irrigação por gotejamento em uma horta urbana, em Cascavel/PR, para calcular a uniformidade de distribuição de água sobre diferentes cargas hidráulicas, de maneira que verificaram, a partir de índices de capacidade de processo, que todos os casos testados foram classificados como uniformes e adequados.

Mercante *et al.* (2014) afirmam que, para o processo de irrigação, a utilidade do índice de capacidade mostra o quanto os parâmetros envolvidos atendem aos objetivos de uma irrigação racional.

3.6 Irrigação por gotejamento pulsante

Segundo Azevedo *et al.* (1993), o coeficiente de cultivo (K_c), que leva em consideração dados climáticos, vem sendo amplamente utilizado para determinar as necessidades hídricas das culturas. Entretanto, para os autores, o teor de água disponível no solo, a textura, o volume de solo molhado, entre outros, são variáveis que deveriam ser consideradas a fim de uma melhor eficiência de aplicação de água no solo para que esta seja disponibilizada por completo para a cultura.

Nesse contexto, a irrigação por gotejamento destaca-se, pois caracteriza-se pela aplicação da água diretamente sobre a região radicular, em pequenas intensidades (2 a 20 L h⁻¹), porém, com alta frequência, mantendo a umidade do solo próxima à capacidade de campo (OMOFUNMI; ILESANMI; ORISABINONE, 2019).

Essa característica da irrigação por gotejamento permitiu a aplicação de água na irrigação de forma intermitente ou na forma de pulsos. A referência mais antiga encontrada, citando esse termo, data do ano de 1973, quando Jack Keller e David Karmeli, em seu estudo intitulado "TRICKLE IRRIGATION DESIGN PARAMETERS", apresentam que aplicação mais frequente pode, por exemplo, aumentar o rendimento da cultura.

Outros estudos vieram em sequência com investigações mais focadas, por exemplo, Pizarro (1987), que apresentou o conceito com a análise da necessidade de se aplicar uma pequena lâmina d'água com um emissor de vazão muito alta. Para isso, foi indicada a irrigação em pulso, ou seja, intermitentemente, com uma duração muito curta de cada aplicação, na ordem de vários minutos e espaçando cada aplicação.

A irrigação por gotejamento pulsante, que, dentre várias definições, envolve a aplicação de pequenos incrementos de água várias vezes por dia, em vez de aplicar uma quantidade maior por uma duração maior, tem sido defendida como um procedimento para melhorar a umidade da superfície do solo na agricultura (LAMM, 2007).

Libardi (2005) afirma que existe carência de estudos da dinâmica da água em condições não-saturadas ou em aplicações por pulso. Entretanto, estudos vêm sendo realizados a fim de entender o comportamento da aplicação intermitente na irrigação por gotejamento.

Nascimento *et al.* (2013), por exemplo, concluíram, em sua pesquisa, que o uso da aplicação pulsante com a redução na velocidade da frente de umidade proporcionou um maior tempo de oportunidade para extração da água pela cultura. Já Zamora *et al.* (2019), observaram, em seu trabalho, que plantas irrigadas por pulsos apresentam maior massa seca e fresca, maior teor de água na parte aérea e na raiz, maior índice de produção de massa na parte aérea, sendo capaz de manter a qualidade comerciável da cultura.

Analisando também o consumo de água, Levin *et al.* (1979) constataram, em seus estudos, que, com irrigação contínua, provocou-se uma perda de 26% de água por percolação profunda e que o mesmo volume aplicado com pulso resultou em perda de apenas 12% de água, sem afetar a distribuição horizontal da umidade no perfil do solo.

Leite *et al.* (2005) comentam que a irrigação localizada viabiliza a exploração agrícola em regiões com solos arenosos profundos, como é o caso de 47% do total de terras do semiárido brasileiro, antes considerados inviáveis com irrigação por superfície.

Karam *et al.* (1994) complementam que a irrigação pulsante, nesse caso, pode melhorar a eficiência de aplicação da irrigação, permitindo que a água permaneça por mais tempo movendo-se pelo perfil do solo. Isso porque, em solos com essas características, o manejo da água deve ser feito de maneira a evitar ao máximo as perdas por percolação profunda, visto que são solos com baixa capacidade de retenção de água.

No entanto, também existem problemas provenientes dessa técnica, por exemplo, pontuados por Lozano *et al.* (2020), em seu estudo envolvendo solos arenosos inclinados, de maneira que descobriu que, quanto menor o tempo do pulso de irrigação, pior é a uniformidade de distribuição. Segundo ele, isso ocorreu porque, à medida que o volume de água aplicado, durante as fases de enchimento e esvaziamento, aumenta, os valores dos indicadores de desempenho da irrigação diminuem.

3.7 Característica dos emissores na irrigação por gotejamento

3.7.1 Relação pressão x vazão do emissor

Keller e Karmeli (1974); Keller e Blisner (1990) citam que, dentre as características para uma melhor qualidade, é importante que o emissor tenha uma relação vazão versus pressão favorável, resultando em vazões uniformes. A Equação 11 expressa a relação vazão versus pressão, para emissores:

$$q = kp^x \quad \text{Eq. 11}$$

Em que: q - Escoamento do gotejador, em L h⁻¹; k - Coeficiente específico de cada emissor; p - Pressão disponível na entrada do gotejador, kPa; x - Expoente do emissor, caracterizando o escoamento no gotejador;

O valor do expoente de descarga “ x ” caracteriza o regime de escoamento e pode sofrer variação de 0 a 1,0. Quanto mais próximo de zero for o valor de x , menor será a sensibilidade do emissor à variação de pressão (ABREU *et al.*, 1987). Um exemplo de gotejadores com baixo valor de expoente de descarga são os que utilizam tecnologia autocompensante.

Entretanto, quando x é próximo a 1, o emissor apresenta alta sensibilidade à variação de pressão e o regime de escoamento é denominado laminar. O gráfico da Figura 3 apresenta como é a variação da vazão em função do x .

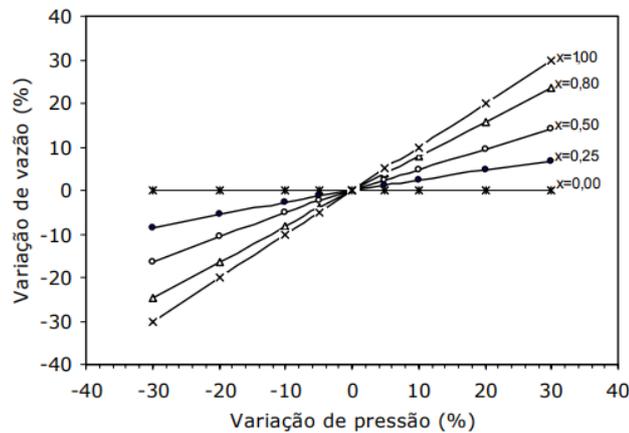


FIGURA 3 - Relação entre variação de vazão e variação de pressão
Fonte: <http://www.leb.esalq.usp.br/>

A grande maioria dos emissores no mercado tem valores de x menores de 0,6 e, quando os emissores são mais próximos de 0, são mais caros (ANDRADE, 2005).

3.7.2 Modelos de emissores na irrigação por gotejamento

A aplicação de água na irrigação por gotejamento só é possível se o fluido conduzido pela rede de tubos instalados passar pelos gotejadores, que, normalmente, apresentam orifício de pequeno tamanho (0,75 - 1,40mm); ademais, devem produzir a perda de carga necessária para atingir a pressão atmosférica da saída, conseguindo baixas vazões de descarga (2,0 – 8,0 L/h) (ALMEIDA, 2009).

Segundo Testezlaf (2017), diante dessa premissa, a opção de aumentar a seção transversal do fluxo do emissor, pensando em diminuir problemas com entupimento, acaba sendo um entrave, já que esse aumento, na maioria das vezes, eleva a vazão dos emissores. Sendo assim, métodos diferenciados para a redução de pressão aparecem, divididos basicamente entre duas vertentes: quanto ao seu formato e quanto a mecanismos instalados em seu processo de fabricação.

No que se refere ao formato dos emissores, quatro modelos são apresentados pelo autor: microtubo capilar, com labirinto integrado, tipo orifício e fitas gotejadoras.

O microtubo capilar tem como característica o gotejador de longo percurso, ou seja, um pedaço de tubo com diâmetro interno reduzido, variando de 0,5 a 1,5 mm, que são inseridos diretamente na linha lateral. Quanto ao seu funcionamento, vale ressaltar que a pressão diminui quanto maior for o comprimento do microtubo, sendo assim, para garantir a

uniformidade de aplicação dentro da linha lateral, é preciso reduzir o seu comprimento ao longo da linha lateral (TESTEZLAF, 2017). Diante dessa necessidade, Alves *et al.* (2012) acrescentam que esse tipo de emissor é indicado para locais com diferenças significativas de desníveis topográficos.

Os gotejadores com labirinto integrado também são gotejadores de longo percurso, entretanto, são concentrados em pequenas peças, que têm, em seu formato, como o próprio nome diz, um labirinto. Isso confere uma maior uniformidade e menor susceptibilidade a danos mecânicos (TESTEZLAF, 2017).

Um terceiro modelo de gotejador é o tipo orifício. Nesses gotejadores, a pressão é dissipada em função da vazão ser dividida por uma série de aberturas no emissor. Sendo assim, é importante que os orifícios tenham diâmetros reduzidos, o que acaba gerando um escoamento turbulento (TESTEZLAF, 2017).

Por fim, as fitas gotejadoras são tubos que possuem perfurações ou dispositivos hidráulicos fundidos na própria parede do tubo, sendo, dessa forma, tubos contínuos. Podem ser diferenciados de acordo com o número de seções de fluxo (câmaras simples ou duplas) e com relação aos próprios sistemas já citados de controle de vazão (orifício, labirinto e capilar) (TESTEZLAF, 2017).

Já no que se refere à tecnologia instalada no processo de fabricação, ocorre a divisão de emissores não compensados e autocompensantes. Os emissores não compensados são gotejadores que não apresentam nenhuma tecnologia para controle de pressão do sistema, dessa forma, evidenciam variação da vazão com a mudança da pressão de serviço. Já os emissores autocompensados, são os que possuem dispositivos internos capazes de equilibrar as variações de pressão. Diante disso, esse processo de amortecimento fornece aproximadamente a mesma vazão para um intervalo de pressão de operação (TESTEZLAF, 2017).

3.8 Referências

- ABREU, J. M. H.; LOPEZ, J. R.; REGALADO, A. P.; HERNANDEZ, J. F. G. El Riego localizado. **Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrárias**, 1987.
- ALMEIDA, O. A. **Entupimento de emissores na irrigação localizada. Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical**. Cruz das almas: Embrapa Mandioca e fruticultura Tropical 2009.
- ALVES, D.G.; PINTO, M.F.; SALVADOR, C.A.; ALMEIDA, A.C.S.; ALMEIDA, C.D.G.C. de; BOTREL, T.A. Modelagem para o dimensionamento de um sistema de micro irrigação utilizando micro tubos ramificados. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 2, p. 125-132, fev., 2012.
- ANDRADE, L. **Avaliação Hidráulica e de resistência a tração de dois modelos de mangueiras gotejadoras**. Orientador: João Carlos Cury Saad. 2005. 76 f. Dissertação Agronomia (Irrigação e Drenagem) - FCA, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.
- ANDRADE, C. L. T.; BRITO, R. A. L. **Métodos de Irrigação. EMBRAPA Milho e Sorgo**. Sistemas de Produção, 1 ISSN 1679-012 Versão Eletrônica - 2ª Edição: dez. 2006.
- ATLAS IRRIGAÇÃO: **Uso da água na agricultura irrigada. Agência Nacional de Águas**. - Brasília: ANA, 2017. 86 p. il. ISBN 978-85-8210-051-6.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 7749-2**: equipamentos de irrigação agrícola - aspersores rotativos. Parte 2: Uniformidade de distribuição e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, jan. 6 p., 2000.
- AZEVEDO, P.V.; RAMANA RAO, T.V.; AMORIM NETO, M.S.; PEREIRA, J.R.C.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. e MACIEL, G.F. Necessidades hídricas cultura do algodoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28. n.7, p.863-870, julho, 1993.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa: editora: UFV, 1995.
- BISCARO, G. A. **Sistema de irrigação localizada**. Dourados: Ed. UFGD, 2014.
- BORGES, R. C.; FERREIRA, E. B.; OLIVEIRA, M. S. Estudo do padrão de não-aleatoriedade “sequência” controle estatístico do processo. **Gest. Prod.**, São Carlos, v. 16, n. 3, p. 414-421, jul.-set. 2009
- CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California, 1942.
- COSTA, A. F. B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. 2ª. Ed. São Paulo: Atlas, 2005.
- FAO – **Food and Agriculture Organization of the United Nations. Update of the Digital Global Map of Irrigation Areas to Version 5**. Institute of Crop Science and Resource Conservation Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Germany, 2013.
- FRIGO, J. P. **Controle estatístico da qualidade na irrigação por aspersão**. Orientador: . 2014. 43f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.
- GOMES, H. P. **Sistema de irrigação: Eficiência energética**. João Pessoa: Editora da UFPB, 2013.

- HERMES, E. **Efeito da carga hidráulica e qualidade de água na uniformidade de sistema de irrigação por gotejamento**. Orientador: Marcio Antônio Vilas Boas. 2010. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2010.
- IBGE. **Censo Agropecuário de 2006: Segunda Apuração**. Instituto brasileiro de geografia e estatística. Rio de Janeiro, IBGE, 2012.
- IBGE. **Censo Agropecuário 2017: Resultado definitivo**. Instituto brasileiro de geografia e estatística. Rio de Janeiro, IBGE, 2017.
- KARAM, N.S.; NIEMIERA, A.X. Cyclic sprinkler irrigation and pre-irrigation substrate water content affect water and N leaching from containers. **J. Environ. Hort.**, 12(4):198-202. December 1994.
- KLEIN, M. R. **Controle estatístico de qualidade de irrigação e fertirrigação por gotejamento na cultura da uva**. Orientador: Marcio Antônio Vilas Boas. 2013. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.
- KELLER, J. KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **ASAE Transactions**, v. 17, n. 4, p. 678-684, 1974.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and Trickle Irrigation**. Utah State University: Chapman-Hall Publishers, 1990.
- LAMM, R. F; CAMP, C. R. 13. **Subsurface drip irrigation**. Local: Nakayama (Editors) 2007.
- LOZANO, D., RUIZ, N., BAEZA, R., CONTRERAS, J.I., GAVILÁN, P. Effect of pulse drip irrigation duration on water distribution uniformity. **Water**, Switzerland, v.12, n. 8, p. 2276, August, 2020.
- LEVIN, I.; VAN ROOYEN, P. C.; VAN ROOYEN, F. C. The effect of discharge rate and intermittent water application by point source irrigation on the soil moisture distribution pattern. **Soil Science Society American Journal**, South Africa, v.43, n.1, p.8-16, January, 1979.
- LEITE, A. P; AMARAL, F. C. S; SILVA, F. H. B. B; PARAHYBA, R. B. V. Aplicando o SiBCTI. *In*: Fernando Cezar Saraiva do Amaral. (Org.). **Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação Enfoque na Região Semiárido**. 1 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. p. 189-218.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 344p.
- MAZZER, H. R.; PLETSCH, T. H.; CRUZ, R. L.; VILAS BOAS, M. A.; OLIVEIRA, E. F. Avaliação do desempenho do micro aspersor Amanco em bancada de testes. **Irriga**, Botucatu, v.13, n.3, p. 426-437, setembro, 2008.
- MERCANTE, E; VILAS BOAS, M. A; SILVA, B.B; KLEIN, M. R. Utilização de gráficos de controle estatístico na irrigação. **Rev. Eletrônica Mestr. Educ. Ambient.**, Rio Grande-RS, v. Especial, n., p.13, mai0., 2014.
- MERRIAN, J. L.; KELLER, J. **Farm Irrigation System Evaluation: a guide for management 3rd**. Ed. Logan: Utah State University, 1978.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Estatistical Quality Control**. Arizona: Elm Street Publishing, 2009.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

MINITAB. **O que fazer com dados não normais**. 2020. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/19/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/what-to-do-with-nonnormal-data/>. Acesso em: 27 outubro de 2021.

MINITAB. **Uso de múltiplas comparações para avaliar diferenças entre médias do grupo**. 2019. Disponível em: <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/anova/supporting-topics/multiple-comparisons/using-multiple-comparisons-to-assess-differences-in-means/>. Acesso em: 27 outubro de 2021.

NASCIMENTO, T; AZEVEDO, C. A. V; NETO, J. D; LIMA, V. L. A; WANDERLEY, J. A. C. Velocidade da frente de umidade em Neossolo Quartzarênico sob irrigação intermitente por gotejamento. **Revista Verde**, Mossoró, v. 8, n. 2, p. 41-48, abr./jun., 2013.

NUNES, T. Z. **Controle de qualidade de irrigação e fertirrigação por gotejamento em horta urbana**. Orientador: Marcio Antônio Vilas Boas. 2018. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2018.

OLIVEIRA, E. V.; ARRAES, F. D. D.; TORRES, W. L. V.; SOUZA, S. A.; VIEIRA, W. L. Desempenho de Sistemas de Irrigação por Microaspersão e estimativa da demanda hídrica para diferentes fruteiras no município de Iguatu – CE, **Revista Conexões - Ciência e tecnologia**, Fortaleza, v. 10, n. 2, p. 40-46, julho, 2016.

OMOFUNMI, O. E.; ILESANMI, O. A.; ORISABINONE, T. Performance evaluation of hydraulic parameters of a developed drip irrigation system. **Malaysian Journal of Civil Engineering**, Oye-Ekiti - Nigeria, v. 31, n. 2, p. 9-16, July, 2009.

PERBONI, A.; JOSÉ, J. V.; ULLMANN, M. N.; SOCCOL, O. J.; FRIZZONE, J. A. Geoestatística e simulações condicionais aplicadas a ensaios de uniformidade de aspersão convencional. **Irriga**, Botucatu, v.19, n. 01, p.115-129, janeiro, 2014.

PIZARRO, C. F. **Riegos localizados de alta frecuencia**. Madrid: Mundi-Prensa, 1987.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. S. T. **Cartas de Controle para Variáveis, Cartas de Controle para Atributos, Função de Perda Quadrática, Análise de Sistemas de Medição**. Série monográfica Qualidade-Control Estatístico do Processo. Porto Alegre, RS. 2012.

SILVA, P. F.; DANTAS NETO, J.; MATOS, R. M.; LIMA, S. C.; SANTOS, D. B. Statistical process control in self compensating emitters using water at different saline concentrations. **African Journal of Agricultural Research**, Campina Grande, PB, v. 11, n. 30, p. 2736-2743, Julho, 2016.

SOLOMON, K. **Performance comparison of different emitter types**. Proc. 7th Int. Agric. Plastics Congr., San Diego, California, pp. 97-102.1977.

TAMAGI, J. T; URIBE-OPAZO, M. A; JOHANN, J. A.; VILAS BOAS, M. A. Uniformidade de distribuição de água de irrigação por aspersores compensantes e não compensantes em diferentes alturas. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 4, p. 631-647, out./dez., 2016.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. Campinas: Unicamp/FEAGRI, 2017.

WALLER, P.; YITAYEW, M. **Irrigation and Drainage Engineering**. Arizona/USA. Springer International Publishing Switzerland, 2016.

WERKEMA, M. C. C. **Avaliação da qualidade de medidas**. 1. ed. Belo Horizonte: FCO, 1996.

ZAMORA, V.R.O; SILVA, M.M; SILVA, G.F; SANTOS JÚNIOR, J.A; MENEZES, D; MENEZES, S.M. Pulse drip irrigation and fertigation water depths in the water relations of coriander. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.37, n.1, January-March 2019.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios de irrigação ocorreram no município de Maringá – PR (latitude 23° 25' 38" Sul, longitude 51° 56' 15" Oeste, altitude média de 551 metros), em laboratório, sem a influência de fatores externos, como radiação solar e vento.

Para a realização do experimento, foi montada uma bancada de irrigação por gotejamento composta por uma motobomba de $\frac{3}{4}$ CV, um filtro de tela Inox 1" 120 mesh, tubulação de derivação de polietileno 32 mm, quatro linhas laterais de 20 metros de comprimento com 16mm. Para os ensaios, utilizaram-se 2 gotejadores da marca IRRITEC, modelo iDrop normal, vazão de 4 L.h-1, e modelo iDrop PC – PCDS – gotejador autocompensante, vazão de 6 L.h-1.

Além disso, todo o sistema foi montado sem qualquer desnível e foi mantido um espaçamento de 0,2 metros entre os emissores. A pressão foi medida no início e no final da tubulação principal com dois manômetros Bourbon com glicerina de 0 a 6 bar. Para coleta da água proveniente dos gotejadores, foram utilizados coletores plásticos e, posteriormente, pesada em uma balança digital de precisão 1g, capacidade 10Kg, marca CASAFLEX, a fim de medir a vazão. A água utilizada nos ensaios era oriunda da companhia de abastecimento do Paraná (Sanepar).

Na Tabela 4, estão representados os registros sobre as características da água distribuída pela Sanepar, nos meses de junho, julho e agosto, quando foram feitas as coletas.

Tabela 4 - Análise da qualidade da água

	Média de junho	Média de julho	Média de agosto	Mínimo / Máximo Permitido	Portaria N5/17 MS:199
Cor Aparente	2,47	2,50	2,50	15,00	uH-Um-Cor
Turbidez	0,23	0,20	0,23	5,0	NTU
Cloro residual	0,94	0,91	0,88	0,2 a 5,0	mg//L
Flúor	0,77	0,80	0,79	0,6 a 1,1	Mg/L F
Coliformes totais	0	0	0	Ausente	-

Fonte: (SANEPAR, 2020).

A Figura 4 ilustra o layout do sistema de irrigação por gotejamento.

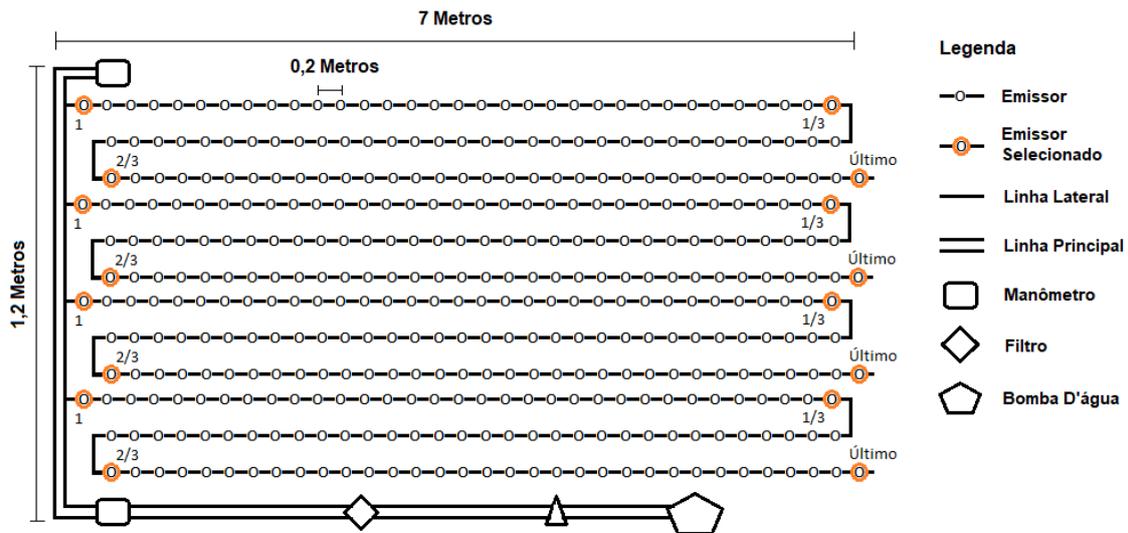


FIGURA 4 - Croqui do sistema de irrigação por gotejamento em bancada
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o acionamento do motor, foi montado um quadro de comando responsável por fazer a partida direta do motor, bem como controlar o tempo de funcionamento da bomba. Para isso, foi utilizado um disjuntor 2 Disjuntores Monopolar Weg 25A, responsável por proteger o motor em caso de variações na rede elétrica; um Contator 12A, responsável pela programação do sistema de acionamento; e um rele de sobrecarga 5,6-8A, responsável por desligar o sistema caso a motobomba apresente alguma sobrecarga. Na Figura 5, tem-se uma foto do quadro de comando e do seu respectivo diagrama elétrico.

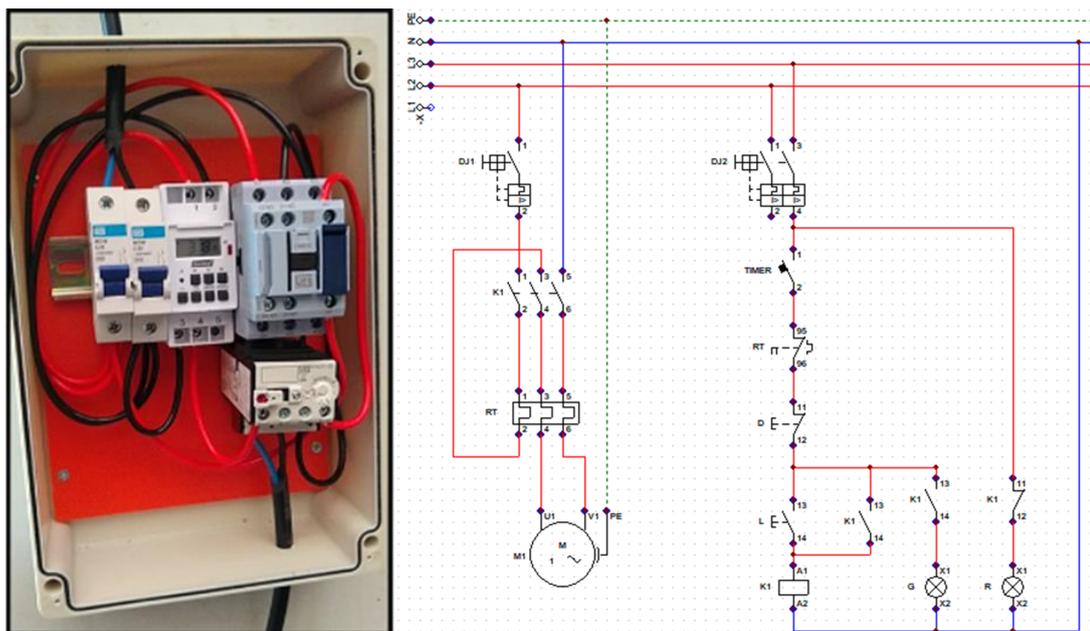


FIGURA 5 - Quadro de comando e diagrama elétrico
Fonte: Elaborada pelo autor.

A metodologia adotada para a coleta da vazão do sistema de irrigação por gotejamento foi realizada de acordo com Merriam e Keller (1978), em que foram usados 16 gotejadores, dispostos da seguinte forma: nas quatro linhas, localizadas a 1/3, a 2/3 do início da parcela e no primeiro e último gotejador da linha.

A vazão dos gotejadores foi mensurada pelo método gravimétrico, a fim de se obter maior precisão na determinação. Com o volume coletado nos emissores, durante 12 minutos, determinou-se a vazão dos emissores, conforme a Equação 01:

$$q = \frac{V}{1000 \times t} \times 60 \quad \text{Eq. 01}$$

Sendo: q- Vazão do gotejador, L/h; V- Volume da solução coletada, mL; t – Tempo de coleta, minutos;

O tempo de 3 minutos de coleta recomendado pela NBR 9261 (ABNT, 2006) não foi utilizado, pois a estratégia era que todos os tratamentos tivessem o mesmo tempo. Sendo assim, tirando o tratamento de uma aplicação de 12 minutos, todos apresentavam um tempo desligado entre duas aplicações de 25 minutos, sendo sua vazão contabilizada após o término dos 12 minutos.

Foram realizados 25 ensaios para os seguintes tratamentos:

- T1: 6 aplicações de 2 minutos com gotejador normal;
- T2: 4 aplicações de 3 minutos com gotejador normal;
- T3: 2 aplicações de 6 minutos com gotejador normal;
- T4: 1 aplicação de 12 minutos com gotejador normal;
- T5: 6 aplicações de 2 minutos com gotejador autocompensante;
- T6: 4 aplicações de 3 minutos com gotejador autocompensante;
- T7: 2 aplicações de 6 minutos com gotejador autocompensante;
- T8: 1 aplicação de 12 minutos com gotejador autocompensante;

A partir dos dados de vazão e pressão coletados, foram feitas análises de comparação estatística entre os tratamentos com base na natureza paramétrica e não paramétrica dos dados. Partindo do pressuposto de que todas as variáveis estudadas são do tipo quantitativas e comparam quatro tratamentos, as análises indicadas para estudo são a One - Way ANOVA e o Kruskal-Wallis.

Para apoiar a interpretação dos resultados obtidos, foram confeccionados os gráficos de intervalo, para dados paramétricos, e gráficos box-plot, para os não paramétricos.

Em sequência, foram calculados os Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC), proposto por Christiansen (1942), e de Distribuição (CUD), proposto por Merriam e Keller (1978), demonstrados nas Equações 2 e 3, respectivamente.

$$CUC = 100 \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_{med}|}{n - x_{med}} \right\} \quad \text{Eq. 02}$$

Em que: CUC - Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, em %; x_i - Valores individuais do volume de água contidos nos coletores, em mm; x_{med} - Média geral dos valores dos volumes de água coletados, em mm; n - Número de coletores na área de ensaio.

$$CUD = 100 \left(\frac{x_{25}}{x_{med}} \right) \quad \text{Eq. 03}$$

Em que: CUD - Coeficiente de uniformidade de distribuição, em %; x_{25} - Média do menor quartil dos volumes de água contidos nos coletores, mm; x_{med} - Média geral dos valores dos volumes de água coletados, mm.

Com os valores de CUC e CUD, foram realizadas as comparações, como citado anteriormente, entretanto, com o intuito de avaliar o comportamento sob controle no tempo e classificar a eficiência dos tratamentos propostos, foram feitos os gráficos de controle de Shewhart e o índice de capacidade de processo, respectivamente. Optou-se pela metodologia, proposta por Montgomery (2009), em que se faz necessária a normalidade dos dados analisados e a não autocorrelação entre eles.

Para a construção dos gráficos de controle, foi necessário calcular os limites superior de controle (LSC) e inferior (LIC) de especificação, obtidos pelas Equações 4 e 5, respectivamente:

$$LSC = \bar{\bar{X}} + 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad \text{Eq. 04}$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad \text{Eq. 05}$$

Em que: $\bar{\bar{X}}$ - Média das médias; \bar{R} - Média das amplitudes dos dados; d_2 - Uma constante igual a 1,128 para $n = 2$, considerando-se medidas individuais, de acordo com a tabela descrita por Montgomery (2009).

Para análise de capacidade de processo, optou-se pela metodologia proposta por Montgomery (2009), em que se calcula o índice de capacidade do processo (C_p), a partir da Equação 6:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{LSC - LIC} \quad \text{Eq. 06}$$

O desempenho de processo (C_{pk}) (processos unilaterais) e os índices de capacidade do processo (C_{pl} , C_{pu}), obtidos pelas Equações 7, 8 e 9, respectivamente:

$$C_{pk} = \text{Min} \{C_{pu}, C_{pl}\}, \quad \text{Eq. 07}$$

$$C_{pu} = \frac{LSE - \bar{X}}{3\hat{\sigma}} \quad \text{Eq. 08}$$

$$C_{pl} = \frac{\bar{X} - LIE}{3\hat{\sigma}} \quad \text{Eq. 09}$$

Em que: \bar{X} – Média do processo; LIE – Limite inferior de especificações; LSE - Limite superior de especificações; LIC - Limite inferior de confiança; LSC - Limite superior de confiança; $\hat{\sigma}$ – Desvio padrão estimado;

A classificação do processo para os valores de uniformidade propõe como capaz ou adequado aqueles com $C_p \geq 1,45$, haja vista que são processos considerados novos, com especificações unilaterais (MONTGOMERY, 2009). Pelo fato de a pesquisa utilizar especificação unilateral inferior para classificação da uniformidade, foi utilizado o valor de C_{pl} como referência.

Para a classificação dos coeficientes de uniformidade, foi utilizada a classificação proposta por Keller e Bliesner (2009).

As técnicas de comparação estatística, bem como os gráficos de controle de Shewhart e índice de capacidade do processo foram calculados utilizando o software MINITAB, versão 16.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A normalidade dos dados foi verificada para a determinação dos testes estatísticos que seriam empregados nas análises posteriores, se paramétricos ou não paramétricos. Portanto, foram realizados testes de normalidade de Anderson Darling. Os testes foram executados para os parâmetros de pressão na linha principal, vazão dos gotejadores e coeficientes de uniformidade.

Os valores de pressão analisados foram pressão inicial de entrada, pressão final de entrada, pressão inicial de saída e, por fim, pressão final de saída. Para todos esses parâmetros, o conjunto de dados apresentou desvio de normalidade, visto que o p-valor para todos os tratamentos ficou abaixo de 0,05 (Tabela 5). Assim, foi executado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis.

Tabela 5 - Análise da descritiva dos valores de pressão

Modelo de Emissor	Variável	Normalidade dos dados (p-Valor)	Min	1º Q	Mediana	3º Q	Max	Kruskal Wallis (p-Valor)	
Normal	Pressão inicial de entrada	T1	<0.005	11,9	12	12	12	12,3	0,320
		T2	<0.005	12	12	12	12,1	12,5	
		T3	<0.005	11,9	12	12	12,05	12,2	
		T4	<0.005	11,9	12	12	12,1	12,3	
	Pressão final de entrada	T1	<0.005	11,9	12	12	12	12,3	0,316
		T2	<0.005	12	12	12	12,1	12,3	
		T3	<0.005	11	12	12	12	12,2	
		T4	<0.005	11,9	12	12	12,1	12,3	
	Pressão Inicial de saída	T1	<0.005	10,8	11,25	11,6	11,75	11,9	0,484
		T2	<0.005	11,0	11,5	11,7	11,8	12,0	
		T3	0.011	10,6	11,0	11,5	11,75	11,9	
		T4	<0.005	10,6	11,3	11,6	11,8	11,9	
Pressão final de saída	T1	0.024	10,8	11,0	11,4	11,7	11,8	0,118	
	T2	<0.005	11,0	11,55	11,7	11,8	11,9		
	T3	0.013	10,6	11,0	11,5	11,7	11,9		
	T4	<0.005	10,6	11,3	11,6	11,8	11,9		
Autocompensante	Pressão inicial de entrada	T1	<0.005	11,9	11,9	12	12	12,3	0,692
		T2	<0.005	11,8	11,9	12	12	12,3	
		T3	<0.005	11,8	11,9	12	12	12,2	
		T4	<0.005	11,8	11,9	12	12	12,2	
	Pressão final de entrada	T1	<0.005	11,8	11,9	12	12	12,2	0,651
		T2	<0.005	11,8	11,9	12	12	12,3	
		T3	<0.005	11,8	11,9	12	12	12,1	
		T4	<0.005	11,8	11,9	12	12	12,2	
	Pressão Inicial de saída	T1	0.020	10,5	10,8	11	11,35	12	0,801
		T2	<0.005	10,4	10,8	10,8	11,35	12,0	
		T3	0.035	10,4	10,55	11	11,5	11,9	
		T4	0.049	10,4	10,8	11	11,65	11,9	
Pressão final de saída	T1	<0.005	10,4	10,8	11	11,1	11,9	0,748	
	T2	<0.005	10,4	10,8	10,8	11,3	12		
	T3	0.030	10,4	10,5	11	11,25	11,8		
	T4	0.045	10,4	10,75	11	11,65	11,9		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser visto na Tabela 5, o p-valor calculado pelo teste de Kruskal-Wallis de todos os valores de pressão analisadas fica acima de 0,05; isso evidencia que não houve diferença significativa entre as pressões envolvendo cada tratamento. Dessa forma, ressalta-se que a alteração dos tempos de pulso não modifica a pressão na linha de distribuição do sistema de irrigação proposto.

Os valores de mediana, 1 e 3 quartil, mínimo e máximo, apresentados na Tabela 5, referentes ao gotejador normal, como nos gráficos boxplot, representados na Figura 6, evidenciam que as pressões de entrada tanto no começo quanto no final da coleta ficaram estáveis e concentradas em 12 m.c.a. em todos os tratamentos. Somado a isso, destaca-se a quantidade de outliers com destaque ao valor máximo de 12,5 m.c.a., atingido no tratamento T2 na pressão inicial de entrada, e ao valor mínimo de 11 m.c.a., atingido no tratamento T3 na pressão final de entrada.

No que se refere aos valores de pressão no manômetro da saída da linha principal, também do gotejador normal, é importante notar que os valores em geral ficaram abaixo dos valores de pressão do manômetro de entrada, com mediana decrescendo de 12 m.c.a. para faixa entre 11,4 e 11,7 m.c.a. Além disso, observa-se uma semelhança entre as pressões de saída, ou seja, no início e no final da coleta, quanto à distribuição dos dados. Destaca-se, nesse caso, o tratamento T3 por apresentar os valores mínimos (10,6 m.c.a.) e ter a maior distância entre quartis entre todos os tratamentos envolvendo a pressão de saída.

Quanto aos valores referentes ao gotejador autocompensante, apresentado na Tabela 5, como nos gráficos boxplot, representados na Figura 6, tem-se que as pressões de entrada tanto no começo quanto no final da coleta não ficaram estáveis e concentradas em 12 m.c.a., em todos os tratamentos, como foi projetado. Isso se justifica por dois motivos; primeiramente, em todos os tratamentos, pelo menos 25% dos valores de pressão ficaram iguais ou abaixo de 11,9 m.c.a.; em segundo lugar, pela presença de vários outliers acima de 12 m.c.a.

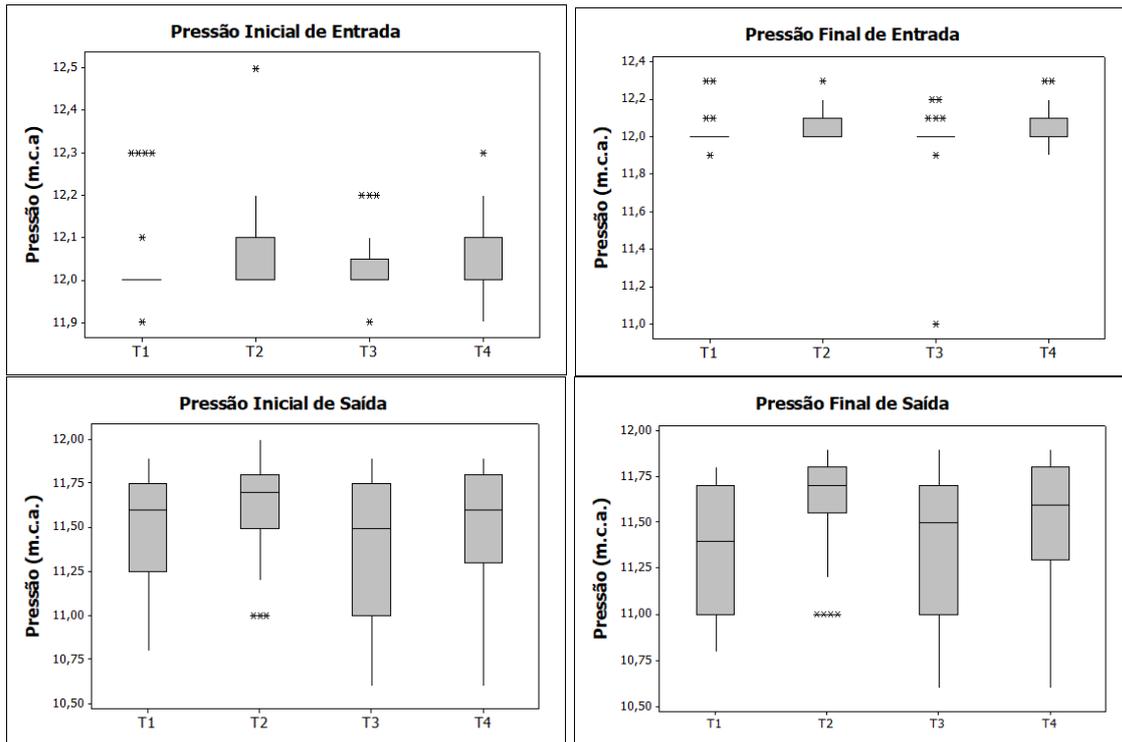


FIGURA 6 - Box-plot dos valores de pressão no sistema de irrigação com gotejador normal
Fonte: Elaborada pelo autor.

Já os valores de pressão, no manômetro da saída da linha principal do sistema, com emissores autocompensantes, são importantes, de forma que é importante notar que os valores em geral ficaram abaixo dos valores de pressão do manômetro de entrada, com mediana decrescendo de 12 m.c.a. para faixa entre 10,8 a 11 m.c.a. Além disso, como pode ser visto na Figura 7, observa-se uma semelhança entre as pressões de saída, ou seja, no início e no final da coleta, quanto à distribuição dos dados. Demonstra-se, diante disso, que a alteração dos tempos de pulso não modifica os valores de pressão na linha principal do sistema de irrigação por gotejamento projetado.

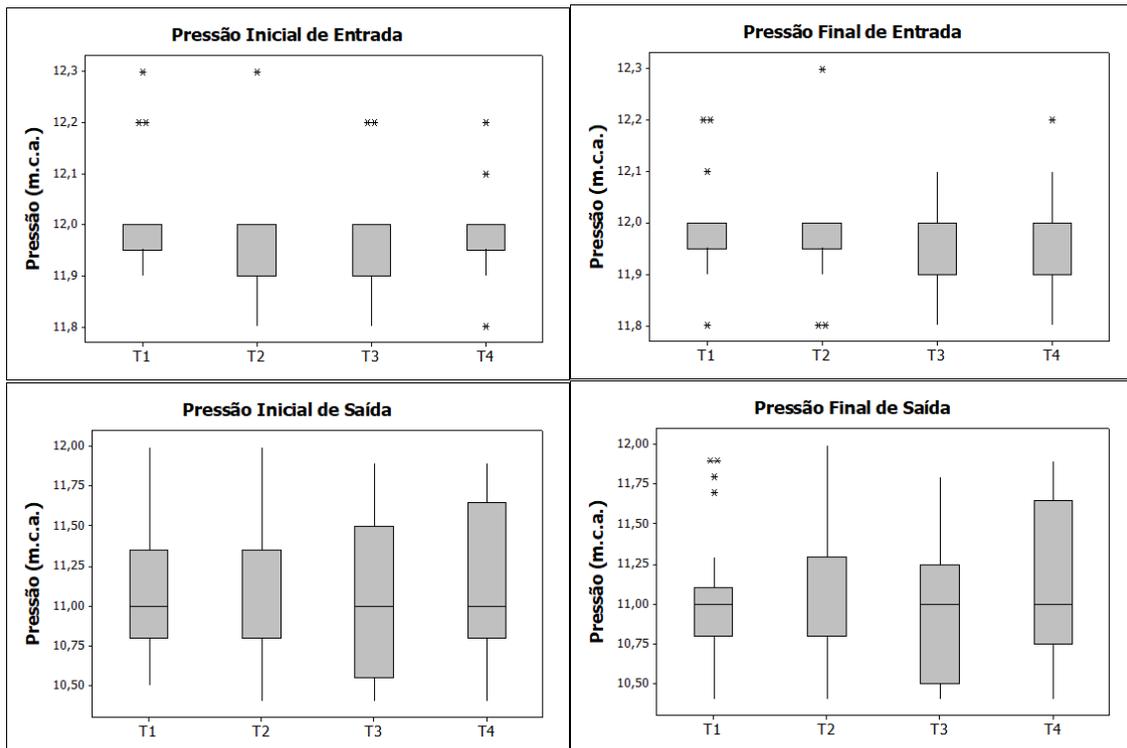


FIGURA 7 - Box-plot dos valores de pressão no sistema de irrigação com gotejador autocompensante
Fonte: Elaborada pelo autor.

Outros parâmetros possíveis de serem analisados e relacionados são a média dessas pressões, citadas acima, com a média das vazões para cada tratamento. No que se refere aos gotejadores normais, os valores de vazão apresentaram desvio de normalidade no tratamento T3, como pode ser visto na Tabela 6, em que o p-valor ficou abaixo de 0,05. Dessa forma, para comparar os tratamentos, foi executado, para análise desses dados, o teste Kruskal-Wallis. Já os valores de pressão, apresentaram normalidade, como também pode ser visto na tabela 6, em que o p-valor para todos os tratamentos ficou acima de 0,05. Sendo assim, o teste para análise desses dados foi o One - Way ANOVA.

Como pode ser visto na Tabela 6, o p-valor calculado pelo teste de Kruskal-Wallis foi abaixo de 0,05, o que propicia a conclusão de que houve diferença significativa entre as vazões envolvendo cada tratamento. Dessa forma, foram executados os testes de comparação múltiplas a partir do teste de Mann-Whitney, para comparações envolvendo dados não paramétricos, e do teste T, para comparação envolvendo dados paramétricos, ambos ao nível de significância de 5%, apresentados na Tabela 7.

Já quanto aos valores de pressão, o p-valor calculado pela ANOVA ficou acima de 0,05, o que proporciona a conclusão de que não houve diferença significativa entre os valores de pressão de cada tratamento.

Tabela 6 - Análise da descritiva dos valores de vazão e pressão média (gotejador normal)

Variável	Normalidad e dos dados (p-Valor)		Teste de Comparação	Min	1º Q	Media na	3º Q	Max	ANOVA (p-Valor)
Vazão	T1	0,581	Kruskal-Wallis	4,09	4,15	4,17	4,19	4,23	<0,005
	T2	0,096		4,14	4,18	4,20	4,21	4,26	
	T3	0,011		4,13	4,18	4,20	4,21	4,22	
	T4	0,897		4,17	4,18	4,20	4,21	4,23	
Variável	Normalidade dos dados (p-Valor)		Teste de Comparação	Media	Desvio Padrão	C.V.	ANOVA (p-Valor)		
Pressão	T1	0,715	One-Way ANOVA	11,73	0,185	1,57	0,190		
	T2	0,137		11,82	0,175	1,48			
	T3	0,135		11,71	0,216	1,84			
	T4	0,052		11,76	0,208	1,76			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quanto aos valores apresentados na Tabela 6, tem-se que a mediana das vazões foi menor no tratamento T1. Em relação aos demais tratamentos, destaca-se a igualdade entre medianas (4,20 L/h), 1 quartil (4,18 L/h) e 3 quartil (4,21 L/h). Pelo teste de comparação múltipla, as vazões do tratamento de T1 diferem-se dos demais tratamentos, visto que, como apresentado na Tabela 7, em nenhuma de suas comparações, o p-valor calculado foi superior a 0,05. Na Figura 8, é possível observar com mais clareza, no gráfico box-plot, como a vazão média passa a assumir uma vazão menor apenas quando se aplicam pulsos de 2 minutos (T1).

Já os valores referentes aos valores de pressão, é possível observar que o tratamento que apresentou as maiores e menores pressões foi o T2 e T3, com média de 11,82 e 11,71 m.c.a., respectivamente. O desvio padrão apresentou valores semelhantes; o C.V. apresentou o mesmo comportamento e com valores baixos, uma vez que foram inferiores a 10%.

Tabela 7 - Comparação múltipla de dados de vazão (gotejador normal)

Comparação		Vazão P - Valor
T1	T2	0,001
T1	T3	0,006
T1	T4	<0,005
T2	T3	0,409
T2	T4	0,842
T3	T4	0,816

Fonte: Elaborada pelo autor.

No gráfico de intervalos da Figura 8, é possível observar essa igualdade entre os tratamentos e sua baixa amplitude.

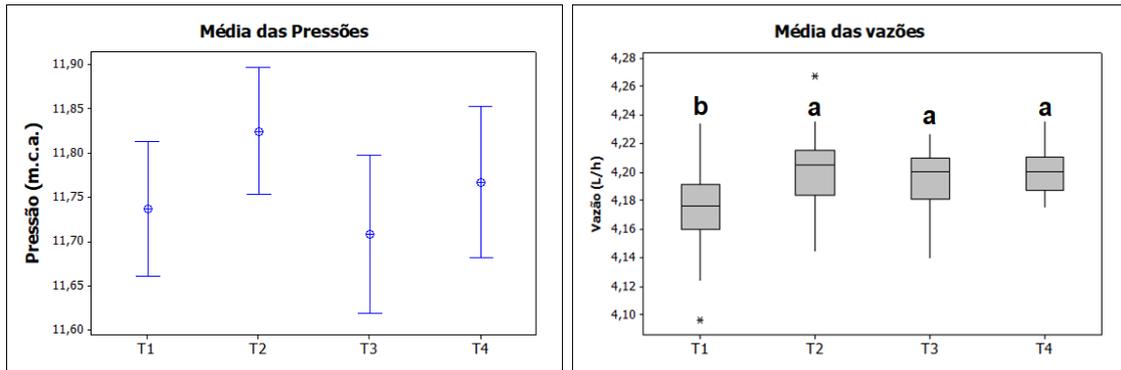


FIGURA 8 - Gráfico de intervalos das pressões e Box-plot dos valores de vazão (gotejador normal)
Fonte: Elaborada pelo autor.

Relacionando a média das pressões com a média das vazões, é possível afirmar que a pressão não interferiu na variação da vazão com a alteração dos tempos de pulso. Entretanto, é possível afirmar que, apenas com a diminuição do tempo de pulso para 2 minutos (T1), a vazão passa a ser diferente e menor, a 5% de significância, comparada aos tratamentos T2, T3 e T4.

Agora, no que se refere aos gotejadores autocompensantes, os valores de pressão apresentaram desvio de normalidade nos dados nos tratamentos T1 e T2, como pode ser visto na Tabela 8, em que o p-valor ficou abaixo de 0,05. Dessa forma, para comparar os tratamentos, foi executado, para análise desses dados, o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Já os valores de vazão, apresentaram normalidade nos dados, como também pode ser visto na Tabela 8, em que o p-valor para todos os tratamentos ficou acima de 0,05. Sendo assim, o teste executado para análise desses dados foi o paramétrico One - Way ANOVA.

Como pode ser visto na Tabela 8, o p-valor calculado pelo teste de Kruskal-Wallis foi acima de 0,05, o que proporcionou a conclusão de que não houve diferença significativa entre as pressões envolvendo cada tratamento. Já quanto aos valores de vazão, o p-valor calculado ficou abaixo de 0,05, entretanto, executando o teste de comparação múltipla, a partir do teste Tukey, tem-se que a vazão média de todos os tratamentos é igual a 5% de significância.

Tabela 8 - Análise da descritiva dos valores de vazão e pressão média (gotejador autocompensante)

Variável	Normalidade dos dados (p-Valor)	Teste de Compar.	Min	1º Q	Media na	3º Q	Max	ANOVA (p-Valor)
Pressão	T1	0,024	11,2	11,3	11,5	11,6	12,1	0,799
	T2	0,035	11,1	11,3	11,4	11,6	12,1	
	T3	0,229	11,1	11,2	11,5	11,7	12,0	
	T4	0,245	11,1	11,3	11,5	11,8	12,0	
Variável	Normalidade dos dados (p-Valor)	Teste de Comparação	Media	Desvio Padrão	C.V.	ANOVA (p-Valor)		
Vazão	T1	0,897	5,88	0,053	0,90	0,043		
	T2	0,648	5,88	0,045	0,76			
	T3	0,828	5,87	0,053	0,90			
	T4	0,796	5,84	0,053	0,91			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quanto aos valores de mediana, 1 e 3 quartil, mínimo e máximo, apresentados na Tabela 8 e na Figura 9, destaca-se a proximidade de valores de pressão entre tratamentos com relação a todos os quartis.

Já com os valores, referentes à vazão, é possível observar que, com o tempo de pulso menores, a vazão é maior, com diferença de 0,04L/h na média. O desvio padrão apresentou valores semelhantes e, conseqüentemente, o valor de C.V. apresentou o mesmo comportamento, com valores baixos, uma vez que foram inferiores a 10%, representando dados homogêneos (PIMENTEL GOMES, 2000). No gráfico de intervalos da Figura 9, é possível observar a igualdade entre os tratamentos, entretanto, com o tratamento T4, apresenta-se a maior variação, assumindo uma média de 5,84 L/h.

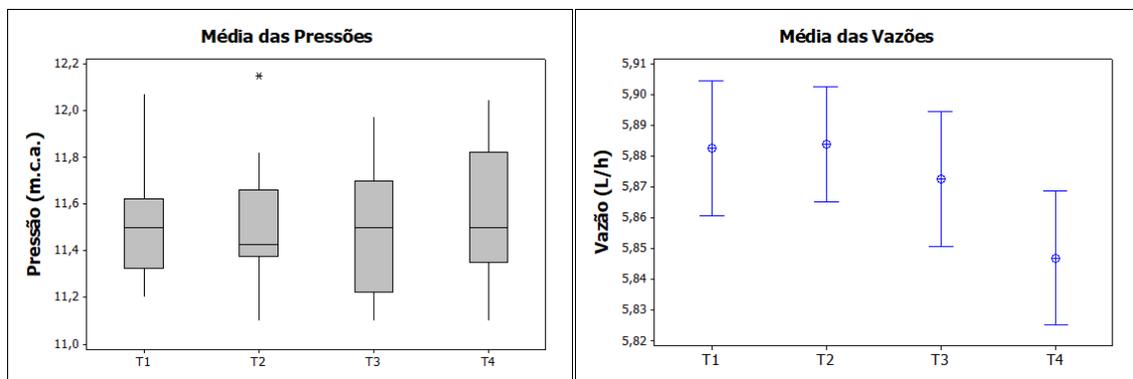


FIGURA 9 - Gráfico de intervalos das pressões e Box-plot dos valores de vazão (gotejador autocompensante)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Além da variação da vazão, outro importante fator a ser avaliado é se a uniformidade de distribuição do sistema sofre alteração. Para isso, foram analisados os coeficientes de uniformidade de distribuição (CUD) e os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC).

Para o sistema de irrigação projetado com gotejadores normais, o conjunto de dados dos dois parâmetros apresentou normalidade, como pode ser visto na Tabela 9, em que o p-valor para todos os tratamentos ficou acima de 0,05. Assim, foi executado, para análise, o teste paramétrico One - Way ANOVA. Já com os gotejadores autocompensantes, para os dois parâmetros, os conjuntos de dados não apresentaram normalidade, exceto para o CUC do tratamento T4, como pode ser visto na Tabela 9. Assim, foi executado, para análise desses dados, o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis.

Como pode ser visto na Tabela 9, o p-valor calculado pela ANOVA de ambos os coeficientes, envolvendo o gotejador normal, ficou abaixo de 0,05, o que proporciona a conclusão de que houve diferença significativa entre os coeficientes de uniformidade envolvendo cada tratamento. Dessa forma, foram executados os testes de comparação múltiplas a partir do teste Tukey ao nível de significância de 5%. Quanto ao p-valor, calculado

pelo teste de Kruskal-Wallis de ambos os coeficientes, envolvendo o emissor autocompensante, ficou acima de 0,05, lo que evidencia que não houve diferença significativa entre os coeficientes de uniformidade envolvendo cada tratamento.

Tabela 9 - Análise da descritiva dos valores de CUD e CUC

Modelo de Emissor	Variável	Normalidade dos dados (p-Valor)	Média	Desvio Padrão	C.V.	ANOVA (p-Valor)			
Normal	CUD	T1	0,885	96,11%	0,221	0,22	<0,005		
		T2	0,123	96,43%	0,199	0,20			
		T3	0,762	96,55%	0,196	0,20			
		T4	0,114	96,56%	0,198	0,20			
	CUC	T1	0,740	97,08%	0,140	0,14	<0,005		
		T2	0,554	97,23%	0,107	0,11			
		T3	0,259	97,32%	0,096	0,09			
		T4	0,563	97,31%	0,101	0,10			
	Variável	Normalidade dos dados (p-Valor)	Min	1º Q	Mediana	3º Q	Max	Kruskal Wallis (p-Valor)	
Autocompensante	CUD	T1	<0.005	92,72	94,53	96,81	97,25	97,45	0,921
		T2	<0.005	93,85	95,23	96,81	97,15	97,38	
		T3	<0.005	93,55	95,41	96,94	97,19	97,33	
		T4	<0.005	93,33	94,98	96,70	97,04	97,41	
	CUC	T1	0.010	96,35	97,17	97,86	98,10	98,33	0,615
		T2	<0.005	96,88	97,38	97,82	97,99	98,11	
		T3	<0.005	96,70	97,30	97,81	97,94	98,09	
		T4	0,075	96,61	97,21	97,68	97,94	98,13	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os gotejadores normais, os valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação, referentes a ambos os coeficientes, podem ser observados pelo tratamento que apresentou a menor uniformidade, que foi o T1, com média de 96,11% e 97,08%, para CUD e CUC, respectivamente. O desvio padrão apresentou valores semelhantes, com exceção ao mesmo tratamento T1. Já o valor de C.V., foi maior para o CUD, mas com valores baixos para CUD e CUC, uma vez que foram inferiores a 10%, representando dados homogêneos (PIMENTEL GOMES, 2000).

Já para os gotejadores autocompensantes, no que se refere aos valores de mediana, 1 e 3 quartil, mínimo e máximo, apresentados na Tabela 9, tem-se que, comparando CUD com CUC, observam-se medianas estáveis com as alterações de pulso, mas, com o CUD, está aproximadamente 1% abaixo (96,8% e 97,8%). Além disso, os outros quartis obedecem à mesma estabilidade, com 3 quartil e máximo muito próximo da mediana para ambos os coeficientes de uniformidade (menos de 1% de diferença); entretanto, quanto a 1 quartil e mínimo apenas para o CUD é possível notar que os valores se distanciam da mediana (em torno de 2%). Esses comportamentos revelam que os valores de CUD apresentaram uma variação maior de uniformidade, mas não provocados pela variação dos tempos de pulso.

A Figura 10 mostra com mais clareza a disparidade em relação ao tratamento T1, bem como a classificação dos tratamentos com gotejador normal de acordo com o teste Tukey. Observa-se também que, comparado ao CUD, o CUC é mais sensível na classificação, visto que foi capaz de diferenciar os tratamentos T2, T3 e T4.

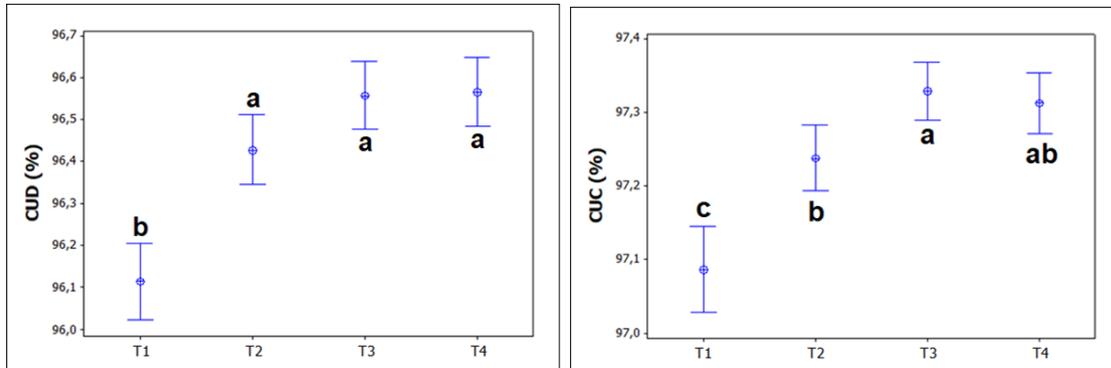


FIGURA 10 - Gráfico de intervalos do CUD e Gráfico de intervalos do CUC
Fonte: Elaborada pelo autor.

Já quanto ao gotejador autocompensante, a Figura 11 deixa mais evidente a estabilidade dos valores de uniformidade com a variação dos tempos de pulso, bem como a maior amplitude dos valores de CUD quando comparado com o CUC.

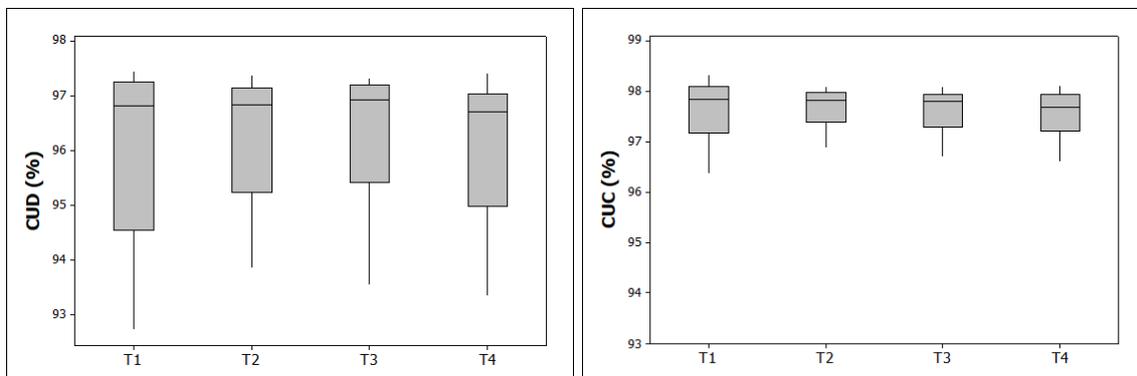


FIGURA 11 - Box-plot do CUD e Box-plot do CUC
Fonte: Elaborada pelo autor.

Comparado a pesquisas, que envolvem o mesmo modelo de emissor, os resultados são semelhantes aos apresentados por Poloni *et al.* (2017) que, avaliando o desempenho de um botão gotejador Irritec, aplicando resíduos finos, apresentou CUD de 93% nas primeiras horas de uso.

Quanto à aplicação pulsante, o CUD diverge do apresentado por Lozano (2020), que, avaliando um sistema de irrigação por gotejamento, com inclinação e pulsos de 5 minutos, estimou CUD de 65%. Além disso, evidenciou inclinação descendente de 3%, bem como o comprimento da linha lateral de 44 metros, ou seja, duas vezes o tamanho da apresentada neste trabalho.

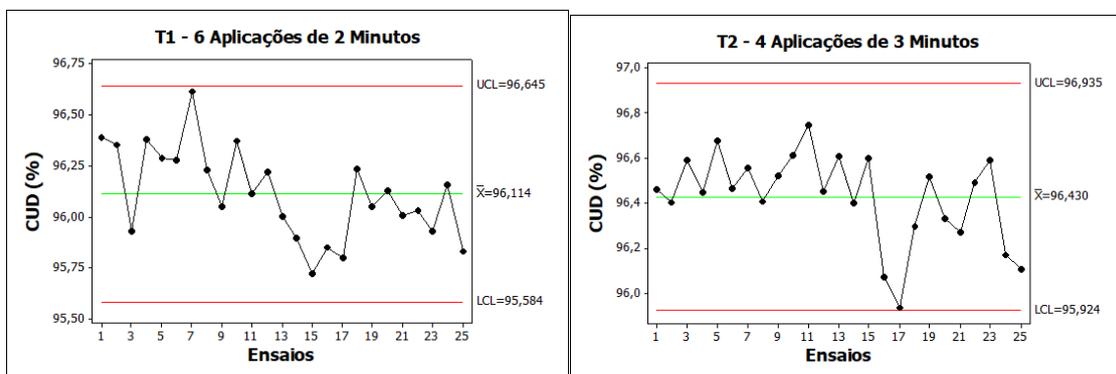
Ainda, no que tange aos valores de CUD, sistemas de irrigação por gotejamento testados em bancada, também apresentou valores compatíveis. Lopes *et al.* (2019), por exemplo, investigando a uniformidade de aplicação de uma unidade de irrigação por gotejamento sob diferentes inclinações, obtiveram resultados de CUD entre 97,2% e 98,7%.

Em relação aos valores de CUC, com médias entre 88,00 e 95,76%, são semelhantes aos resultados apresentados por Klein (2015), que, realizando a caracterização hidráulica de um sistema de irrigação por gotejamento sob diferentes pressões, obtiveram resultados do CUC entre 95,84 e 97,81%. Outros autores apresentaram médias similares com a presente pesquisa, como Hermes (2013), que, sob diferentes qualidades de água, encontraram CUC entre 88,67 e 95,21%.

Outra forma de comparar o CUC com o CUD, na intenção de compreender qual é melhor na análise de um sistema de irrigação por gotejamento pulsante, é investigar a sua variação no decorrer do tempo. Para isso, as análises a seguir referem-se aos gráficos de controle de Shewhart, para ambos os coeficientes.

Para a realização dos gráficos de controle de Shewhart Montgomery (2009), ressalta-se que os dados tenham normalidade e não tenham autocorrelação. Como apresentado na Tabela 9, o CUC e o CUD dos tratamentos, envolvendo o gotejador normal, e o CUC do tratamento T4, com gotejador autocompensante, apresentaram normalidade. A falta de normalidade é inadequada para se utilizar nas ferramentas do controle estatístico de qualidade do processo, pois podem distorcer os resultados.

Considerando a autocorrelação entre os dados, em nenhum dos tratamentos com o gotejador normal, tanto para CUD quanto para CUC, foram constatados autocorrelação. Já com os tratamentos envolvendo o gotejador autocompensante, todos apresentaram autocorrelação. Dessa forma, apenas os tratamentos envolvendo o gotejador normal foram considerados para análise por meio das técnicas de controle estatístico de qualidade. Na Figura 12, são apresentados os gráficos de controle para o parâmetro CUD.



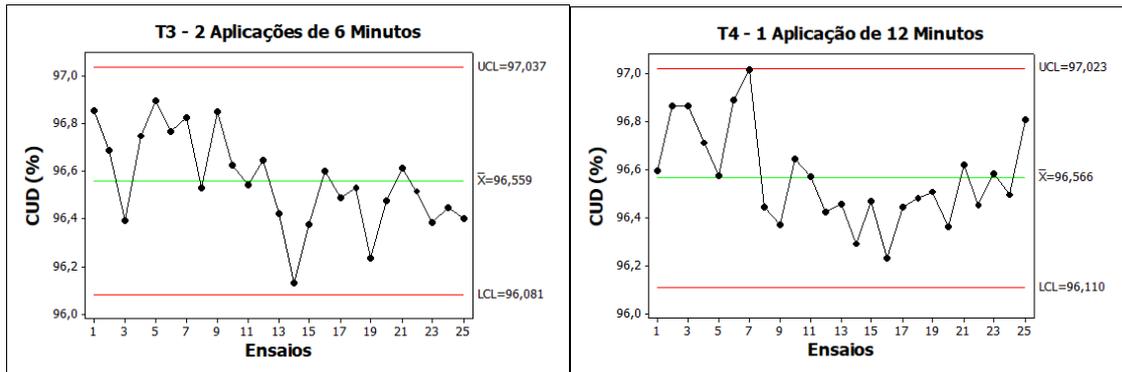


FIGURA 12 - Gráficos de controle de Shewhart para CUD

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação ao parâmetro CUD, ilustrado nos gráficos de controle na Figura 12, nenhum dos tratamentos apresentam-se sob controle, pois possui ou pontos fora dos limites superior e inferior de controle, ou configurações indesejáveis, como tendência ou sequência (MONTGOMERY, 2009).

O tratamento 1 possui, em dois momentos, 4 pontos consecutivos a uma distância de 1-sigma ou além da linha média, entre os ensaios 4 e 7, e entre os ensaios 14 e 17. O mesmo acontece com o com o tratamento 3 entre os ensaios 4 e 7.

O tratamento 2 não apresenta controle estatístico, pois evidencia dois pontos consecutivos distantes a 2 sigmas da linha média, nos ensaios 16 e 17. Já o tratamento 4, além de possuir o mesmo problema de falta de controle, nos tratamentos 6 e 7, ainda possui uma sequência abaixo da linha média, entre os ensaios 12 e 20, sendo um indício de falta de controle. Para Montgomery (2009), quando sete valores seguidos estão abaixo ou acima de linha média, ocorre uma tendência dos dados e, por suposição, uma provável falta de controle estatístico.

Na Figura 13, são apresentados os gráficos de controle para o parâmetro CUC.

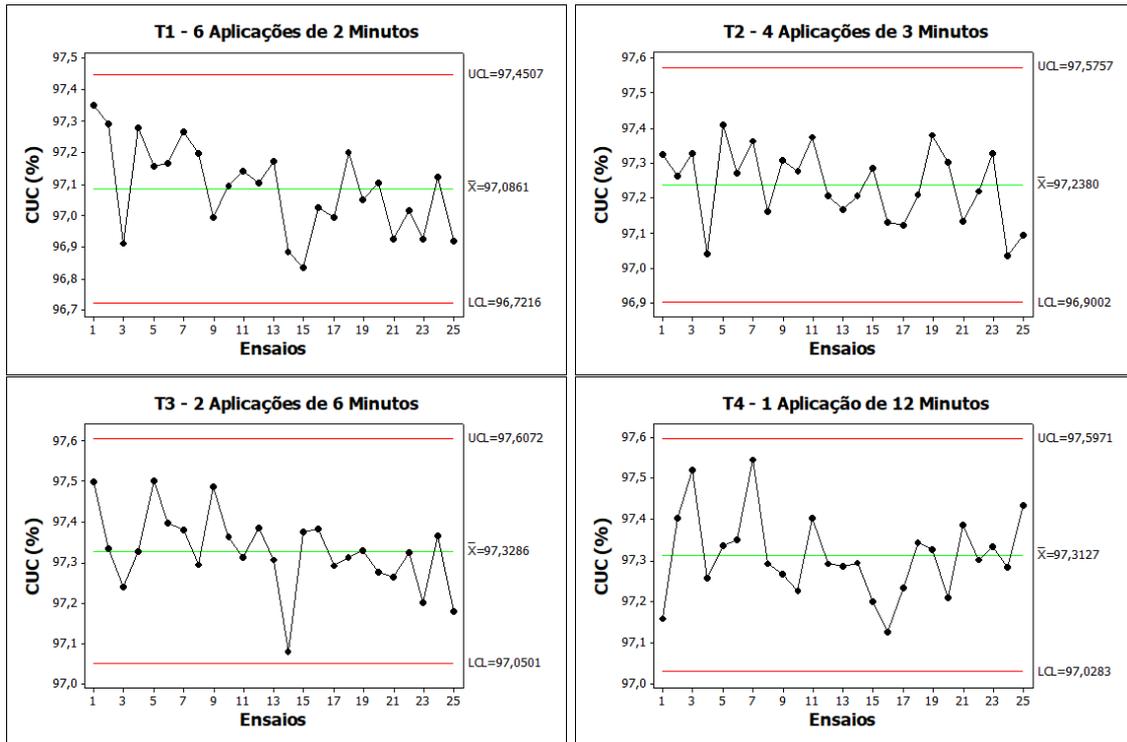


FIGURA 13 - Gráficos de controle de Shewhart para CUC

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em relação ao parâmetro CUC, ilustrados nos gráficos de controle na Figura 13, todos os tratamentos apresentam-se sob controle, pois não possuem ou pontos fora dos limites superior e inferior de controle, ou configurações indesejáveis como tendência ou sequência (MONTGOMERY, 2009).

Visto isso, pode-se concluir que o CUD é mais sensível que o CUC na análise de uniformidade de distribuição, levando em consideração a sequência em que os ensaios foram feitos, uma vez que o CUD foi capaz de identificar padrões indesejados em todos os tratamentos, mapeando indícios de falta de controle na irrigação por gotejamento pulsante. Ademais, o CUC sobre a mesma parametrização do gráfico de controle de Shewhart não foi capaz de identificar nenhum comportamento indesejado.

Vale ressaltar que a diminuição da vazão, em T1, vista anteriormente, não reflete em maior falta de controle quando comparada aos demais tratamentos. Partindo dos valores do CUD, a mudança dos tempos de pulso não fez aumentar a falta de controle para o tratamento T1, haja vista que ele apresentou dois indícios de falta de controle da mesma forma que o tratamento T4.

Alguns autores buscaram, por meio do gráfico de controle de Shewhart, analisar o comportamento da irrigação por gotejamento. Juchen, Suszek e Vilas Boas (2013), por exemplo, obtiveram todos os ensaios sob controle em uma irrigação por gotejamento para a cultura da alface. Já Hermes *et al.* (2013; 2014; 2015), analisando a irrigação por gotejamento, com utilização de água residuária, observaram ocorrência de valores abaixo do limite inferior

de controle. Lopes *et al.* (2021), monitorando a qualidade da fertirrigação por gotejamento em diferentes inclinações, observou que os sistemas, em nível e em declive, mantiveram-se sob controle estatístico, enquanto o sistema em aclive apresentou um ponto acima do limite de controle.

Todas as análises, realizadas anteriormente, apresentam características e riscos da irrigação por gotejamento pulsante, mas isso não as classifica quanto à eficácia, a fim da escolha em sua adoção perante a necessidade do projeto. Para isso, as últimas análises deste estudo foram voltadas para o índice de capacidade de processo (ICP). O ICP exige as mesmas condições de normalidade e não autocorrelação dos dados necessários para desenvolvimento dos gráficos de controle de Shewhart. Dessa forma, para possibilidade de análise dos dados não normais, envolvendo os emissores autocompensantes, foi feita uma comparação entre ICP para dados normais e ICP para dados não normais, a fim de obter referências quanto à sua classificação. Para o cálculo do ICP para dados não normais, foi usado como base a distribuição de Weibull, visto a sua proximidade com a distribuição assimétrica dos dados.

Para avaliação dos ICP, foi considerado apenas o critério de limite inferior de controle. O valor de 90% foi atribuído a esse limite, pois, de acordo com Keller e Bliesner (2009), uniformidades acima de 90% classificam o sistema de irrigação como excelente. Os índices de capacidade do processo referentes aos gotejadores normais estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Índice de Capacidade do Processo (gotejadores normais)

Tratamento	T1	T2	T3	T4
CUC (Cpl)	19,44	21,43	26,31	25,71
CUD (Cpl)	11,53	12,71	13,72	14,40

Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando os processos novos e com especificações unilaterais, Montgomery (2016) classifica os valores acima de 1,45 como processo adequado. Dessa forma, ambos os parâmetros (CUD e CUC) mostram que, para o LIC = 90%, todos os tratamentos analisados foram adequados para 90% de uniformidade. Sendo assim, todos os tratamentos foram classificados como excelentes, de acordo com a classificação de Keller e Bliesner (2009).

Observa-se um comportamento diretamente proporcional entre a média dos valores dos coeficientes de uniformidade e o valor do Cpl, sendo que, para o parâmetro CUC, a relação entre as variáveis é expressa pela equação $CUC (\%) = 96,51 + 0,03Cpl$, com coeficiente de determinação de $R^2 = 88,9\%$. Para o parâmetro CUD, a relação entre as variáveis pode ser expressa por $CUD (\%) = 94,33 + 0,16 Cpl$, com $R^2 = 89,3\%$.

Quanto ao gotejador autocompensante, os índices de capacidade estão presentes na Tabela 11. Utilizando a mesma referência de Cpk acima de 1,45, para processos adequados, tem-se que, para CUC, todos os tratamentos analisados foram adequados para 90% de uniformidade, independentemente do índice utilizado (paramétrico ou não paramétrico).

Agora, quanto ao CUD, os Cpk calculados pelo método paramétrico classificaram o processo como adequado, mas com valores baixos, mais próximos a 1,45. Entretanto, com o cálculo de Cpk, para dados não paramétricos, partindo da distribuição de Weibull, em nenhum tratamento, atingiu-se a adequação para 90% de eficiência.

Tabela 11 - Índice de Capacidade do Processo (gotejadores autocompensantes)

	T5		T6		T7		T8	
	Normal	Não Normal						
CUC (Cpl)	9,82	3,24	10,29	4,39	14,53	4,21	11,29	3,63
CUD (Cpl)	3,05	1,03	3,51	1,33	4,63	1,29	3,04	1,16

Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa forma, pode se concluir que os valores de uniformidade foram altos e acima de 90%, entretanto, a classificação “boa” é mais adequada para os tratamentos envolvendo o gotejador autocompensante, segundo Keller e Bliesner (2009).

Hermes *et al.* (2014; 2013) e Klein *et al.* (2015) observaram o mesmo comportamento, de maneira que, conforme se aumenta o valor do CUC, o índice de capacidade do processo também cresce, com um coeficiente de determinação R^2 de 70,35, 61 e 91,84%, respectivamente. A mesma relação é feita com os valores do CUD, conforme Hermes (2015), com um R^2 de 70,10% para LIC=90% e 85,7% para LIC=80%.

6 CONCLUSÕES

Os valores de pressão na linha de distribuição não se alteram com a variação dos tempos de pulso, independentemente do emissor utilizado.

A vazão do sistema com emissores normais permanece constante com aplicação pulsante até um pulso mínimo de 3 minutos.

A vazão do sistema com emissores autocompensantes permanece constante, independentemente do tempo de pulso.

Para o sistema com gotejadores normais, o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) foi mais sensível na comparação de médias que o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD).

O CUD foi mais sensível na análise de controle estatístico, com base no gráfico de controle de Shewhart que o CUC.

A diminuição dos tempos de pulso não altera o comportamento sob controle do sistema de irrigação com gotejadores normais.

Todos os tratamentos com gotejadores normais são classificados como excelentes para o CUC e para o CUD.

Existe um comportamento diretamente proporcional entre a média dos valores dos coeficientes de uniformidade e o índice de capacidade de processo, com coeficiente de determinação para regressão linear de 88,9%, para CUC, e 89,3%, para CUD.

Os sistemas de irrigação com gotejadores autocompensantes são classificados como excelentes e bom, de acordo com o CUC e CUD, respectivamente.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Equipamentos de irrigação agrícola – Emissores e tubos emissores – Especificações e métodos de ensaio**. ABNT NBR ISSO 9261. São Paulo: ABNT, 2006.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8 ed. Viçosa: Editora UFV, 2008.

CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California 1942.

COSTA, A. F. B. EPPRESCHT, E. K. CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. São Paulo: Atlas, 2004.

DIAS, N. S; COELHO, R. D; OLIVEIRA, M. V. A. M. Resistência de diferentes tipos de tubo gotejadores ao entupimento por precipitação química de cálcio. **Irriga**, Unesp-FCA-Botucatu-SP, v. 9, n. 2, p. 115/02-125, agosto, 2004.

FAO. **Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias**. Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. Brasília, 2017.

HERMES, E.; VILAS BOAS, M. A.; RODRIGUES, L. N.; MELLO, E. L.; GONCALVES, M. P.; LINS, M. A.; BERGER, J. S. Process capacity index in drip irrigation with cassava wastewater processing. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi/Quênia, v. 10, n.12, p. 1427-1433, march, 2015.

HERMES, E. VILAS BOAS, M. A. FRIGO, E. P.; BERGER, J. S.; LINS, M. A.; FRIGO, J. P. Irrigation with wastewater from cassava processing with different concentrations of suspended solids. **International Journal of Food**, Helsinki/Finland, v.12, n.1, p. 487-490, january, 2014.

HERMES, E.; VILAS BOAS, M. A.; GOMES, S. D.; GOMES, B. M.; REIS, C. F. Quality control in irrigation and fertigation with cassava processing wastewater into drip system. **International Journal of Food**, Helsinki/Finland, v. 11, n.2, p. 841-845, april, 2013.

IRRITEC. **Catálogo de gotejadores iDrop**. Disponível em: www.new.irritec.com. Acesso em: 27 de outubro de 2021.

JUSTI, A. L.; VILAS BOAS, M. A.; SAMPAIO, S. C. Índice de capacidade do processo na avaliação da irrigação por aspersão. **Engenharia Agrícola**, local, v. 30, n. 2, p. 264-270, mês, 2010.

JUCHEN, C. R.; SUSZEK, F. L.; VILAS BOAS, M. A. Irrigação por gotejamento para produção de alface fertirrigada com águas residuárias agroindustriais. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 1, p. 243-256, mar./abr., 2013.

KLEIN, M. R.; VILAS BOAS, M. A.; SUSZEK, F. A.; SZEKUT, F. D.; MELLO, E. L.; GOMES, B. M.; SILVA, B. B.; ZUCULOTTO, T. Fertigation quality with drip irrigation system in grape orchard by using the process capability index. **International Journal of Food**, Helsinque, v. 13, n.2, p. 179-183, march, 2015.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: van Nostrand Reinhold, 1990.

LAMM, R. F; CAMP, C. R. 13. **Subsurface drip irrigation**. Local: Nakayama (Editors), 2007.

LOZANO, D., RUIZ, N., BAEZA, R., CONTRERAS, J.I., GAVILÁN, P. Effect of pulse drip irrigation duration on water distribution uniformity. **Water**, Switzerland, v.12, n. 8, p. 2276, august, 2020.

LOPES, A. R. VILAS BOAS, M. A. PAZUCH, F. A. CORTE, L. A. OSTROSKI, D. A. REMOR, M. A. MOHR, F. B. M. DOTTO, M. ZANELLA A. P. CARVALHO, A. F. G. ALVARO RODRIGO 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**, Canadá, v. 11, n. 16, p 11., september, 2019.

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 - Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, local, v. 16, n. 1, p. 1-7, march, 2021.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, p. 549, 2016.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Estatistical Quality Control**. Arizona: Elm Street Publishing, 2009.

MERRIAN, J. L.; KELLER, J. **Farm Irrigation System Evaluation: a guide for management 3rd**. Utah State University: Ed. Logan, 1978.

OMOFUNMI, O. E.; ILESANMI, O. A.; ORISABINONE, T. Performance evaluation of hydraulic parameters of a developed drip irrigation system. **Malaysian Journal of Civil Engineering**, Oye-Ekiti, Nigeria, v. 31, n. 2, p. 9-16, august, 2009.

POLONI, C. M. M.; VIEIRA, G. H. S.; FREITAS, J. J. G.; LOSS, J. B.; PETERLE, G.; LO MONACO, P.A.V. Desempenho de emissores aplicando resíduos finos de rochas ornamentais. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, IRRIGA & INOVAGRI, p. 118-126, outubro. 2017

VILAS BOAS, M. A. **Fundamentos de irrigação localizada**. 1. ed. Cascavel: Edunioeste, 2016.

WALTER, O. M. F.; HENNING, E.; CARDOSO, M. F.; SAMOHYL, R. W. Aplicação individual e combinada dos gráficos de controle de Shewhart e CUSUM: uma aplicação no setor metal mecânico. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 20, n. 2, p. 271-286, dezembro, 2013.