

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

**PROCESSO DA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA UTILIZANDO O CONTROLE ESTATÍSTICO
DE QUALIDADE**

MAURÍCIO GUY DE ANDRADE

**CASCAVEL – Paraná – Brasil
2016**

MAURÍCIO GUY DE ANDRADE

**PROCESSO DA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA UTILIZANDO O CONTROLE ESTATÍSTICO
DE QUALIDADE**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas

Coorientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira

CASCADEL – Paraná – Brasil

2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

A568p

Andrade, Maurício Guy de
Processo da irrigação localizada utilizando o controle estatístico de
qualidade. Maurício Guy de Andrade. Cascavel, 2016.
117 f.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Antonio Vilas Boas
Coorientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus
de Cascavel, 2016

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Agrícola

1. Gráficos de controle. 2. Gotejamento. 3. Índice de capacidade do
processo. 4. Microaspersão. I. Vilas Boas, Marcio Antonio. II. Siqueira, Jair
Antonio Cruz. III. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. IV. Título.

CDD 21.ed. 631.587
CIP-NBR 12899

Ficha catalográfica elaborada por Helena Soterio Beijo – CRB 9^o/965

*Revisão de Normas, Português e Inglês, pela Prof. Dhandara Soares de Lima Capitani, 10
de dezembro de 2016.

MAURÍCIO GUY DE ANDRADE

Processo da Irrigação Localizada Utilizando o Controle Estatístico de Qualidade

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



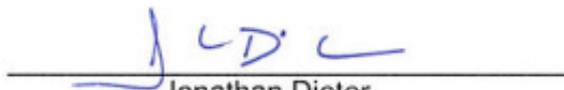
Orientador(a) - Marcio Antonio Vilas Boas

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



Eliane Hermes

Universidade Federal do Paraná - Campus de Palotina (UFPR)



Jonathan Dieter

Universidade Federal do Paraná - Campus de Palotina (UFPR)



Jair Antonio Cruz Siqueira

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



Eriuelto Mercante

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

Cascavel, 18 de novembro de 2016

BIOGRAFIA

Maurício Guy de Andrade nasceu em 25 de março de 1987 na cidade de Cascavel, Paraná, Brasil e cursou Agronomia na Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Campus de Marechal Cândido Rondon, durante os anos de 2005 a 2009. Cursou especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Campus de Cascavel, durante os anos de 2010 e 2011. Cursou mestrado em Energia na Agricultura pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Campus de Cascavel, durante os anos de 2011 a 2013. Em 2014 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI), nível Doutorado, na área de concentração de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, orientado pelo professor Dr. Marcio Antonio Vilas Boas. Desde 2014 atua como Professor de Magistério Superior na Universidade Federal do Paraná (UFPR), Setor Palotina.

“ O amor é luz permanente no cérebro e paz contínua no coração.”

Joanna de Ângelis

*Amar é crescer, sonhar, melhorar, batalhar e viver
junto com você.*

*Com todo meu amor, dedico à minha esposa
Mireille Sato de Andrade.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela vida e pelo Seu amor incondicional;

À minha família, em especial, a minha esposa, Mireille Sato de Andrade, meus pais, Luiz Fernando de Andrade e Tânia Cavalli de Andrade, meus exemplos máximos de honestidade e bondade, minha irmã, Samara Anne, e meu cunhado, Vinícius Zeni, por todo o amor demonstrado em todos os momentos e pelas ajudas com as traduções, pela união que todas essas pessoas apresentam e tornam minha vida repleta de felicidade;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Márcio Antonio Vilas Boas, e meu coorientador, Prof. Dr. Jair Antonio da Cruz Siqueira, por todo o conhecimento repassado, pelas conversas inspiradoras, pela motivação necessária nas horas complicadas e pelas contribuições durante toda a pesquisa;

A todos os meus amigos, em especial ao Jonas Maciel, Roberto Maciel, Djeily Becker, Joel Teleken, Emanuelle Parisotto, Kelly Heringer, Mauro Becker, Sandra Becker, Elisandro Frigo, Késia Frigo, Fabiano Scholz, Michele Sbardelotto, Octavio Viana, Eduardo Burin e Fabiano Bisinella, pelo afeto e companheirismo nesta jornada;

À Universidade Federal do Paraná por propiciar a continuidade e o término deste curso e aos meus colegas de trabalho desta instituição, por toda a compreensão e a força, em especial à Direção do Setor Palotina, ao Departamento de Engenharias e Exatas e ao Curso de Engenharia de Aquicultura, em especial aos professores Dr. Carlos Eduardo Zacarkim, Dr. Luciano Caetano de Oliveira e MSc. Pedro Gusmão Borges Neto, pelas contribuições na pesquisa;

Aos meus orientados Hugo Meneguette, Eduardo Mazotti, Matheus Galvão, Renato Ceolin e Roger Jesuíno, pelas contribuições durante o experimento;

À banca avaliadora, pela leitura e as contribuições para a melhoria do trabalho, em especial ao Prof. Dr. Jonathan Dieter, pela amizade e a ajuda na construção e na constituição dos experimentos;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade e o suporte durante todo o curso;

Aos professores do Programa, especialmente Prof. Dra. Luciana Guedes, Prof. Dr. Erivelto Mercante, Prof. Dr. Eloy Mello, Prof. Dr. Jerry Johann, Prof. Dr. Divair Christ e Prof. Dra. Sílvia Coelho pelo aprendizado durante o cumprimento dos créditos do curso;

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, de suma importância para minha vida profissional e pessoal;

Um agradecimento muito especial à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, por toda a minha formação acadêmica e profissional, com a graduação, a especialização, o mestrado e o doutorado, contribuindo para meu desenvolvimento pessoal.

PROCESSO DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA UTILIZANDO CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE

RESUMO GERAL

Para a otimização dos sistemas de irrigação, deve-se utilizar sistemas com alta uniformidade de operação, como os sistemas de irrigação localizada, que são representados com notoriedade pelo gotejamento e pela microaspersão. Para a avaliação eficaz destes sistemas alguns parâmetros são importantes a serem utilizados, como o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD). A uniformidade de distribuição é influenciada por vários fatores, entre eles a topografia do terreno, a forma de bombeamento de água e o espaçamento entre emissores. Para que estes parâmetros sejam avaliados com maior qualificação, é importante o uso de técnicas estatísticas diferenciadas e de qualidade, como o controle estatístico de qualidade do processo (CEP), através dos gráficos de controle, de Shewhart, Média Móvel Exponencialmente Ponderada (MMEP) e Soma Acumulativa (CUSUM), que possibilitam o monitoramento do processo da irrigação e o índice de capacidade do processo (C_p), que determina o quanto o processo atende às especificações exigidas; neste caso, as classificações de uniformidade. Sendo assim, a pesquisa teve como objetivo avaliar o processo da irrigação localizada utilizando o controle estatístico de qualidade. O trabalho foi dividido em três artigos, com os objetivos específicos de avaliar os espaçamentos entre microaspersores; a influência do uso da energia solar fotovoltaica no bombeamento da água na uniformidade de distribuição na irrigação por microaspersão; e a influência da declividade e do uso de fertilizantes na uniformidade da irrigação por gotejamento. Os ensaios de irrigação foram realizados em laboratório, com menor influência de fatores climáticos. Em relação à microaspersão, os menores espaçamentos apresentaram as maiores uniformidades de distribuição e o uso de um sistema de armazenamento de energia quando utilizada a energia solar fotovoltaica para bombeamento de água diminui as variabilidades da uniformidade. Para o gotejamento, as uniformidades mais elevadas e com maior controle do processo foram para os tratamentos realizados com água tratada e o terreno em nível. Para a irrigação localizada, os gráficos de controle MMEP são mais adequados para diagnosticar pequenas variações e o de Shewhart para diagnosticar variações elevadas. O aumento do C_p é diretamente proporcional aos valores médios de CUC e CUD. As técnicas do CEP foram adequadas para avaliar a uniformidade de distribuição da irrigação localizada. No esforço de racionalizar o uso de água e nutrientes e aumentar a uniformidade de distribuição na irrigação localizada, o uso de técnicas de controle estatístico de qualidade do processo são importantes para o monitoramento adequado do processo e o consequente aumento de produtividade agrícola.

PALAVRAS-CHAVE: gráficos de controle, gotejamento, índice de capacidade do processo microaspersão.

PROCESS OF TRICKLE IRRIGATION USING STATISTICAL QUALITY CONTROL

ABSTRACT

For the optimization of irrigation systems, it is necessary to use systems with high uniformity of operation, such as localized irrigation systems, considering drip and micro sprinkler irrigation most notorious. For an effective evaluation of these systems, some parameters are important to be used, such as the Christiansen Uniformity Coefficient (CUC) and the Uniform Distribution Coefficient (DU). A number of factors, including terrain topography, water pumping and emitter spacing influences the uniformity of distribution. In order for these parameters to be evaluated with higher qualification, it is important to use statistical and quality statistical techniques, such as statistical quality control of the process (CSP), through the Shewhart, Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) and Cumulative Sum (CUSUM), which allows the monitoring of the irrigation process and the process capacity index (C_p) that determines how much the process meets the required specifications, in this case, the uniformity classifications. Thus, the objective of the research was to evaluate the process of localized irrigation using statistical quality control. The work was divided in three articles, with the specific objectives of evaluating the spacings between microsprinklers; the influence of the use of photovoltaic solar energy on water pumping in the uniformity of distribution in irrigation by micro sprinkler; and the influence of slope and fertilizer use on the uniformity of drip irrigation. Irrigation tests were performed in laboratory, with less influence of climatic factors. In relation to the micro sprinkler method, the smaller spacing presented the highest uniformities of distribution and the use of an energy storage system when using photovoltaic solar energy for water pumping decreases the variability of the uniformity. For the drip irrigation the higher uniformities and with greater control of the process were for the treatments carried out with treated water and the terrain level. For localized irrigation the EWMA control charts are more adequate to diagnose small variations and Shewhart's to diagnose high variations. The increase in C_p is directly proportional to the mean values of CUC and DU. CEP techniques were adequate to evaluate the uniformity of distribution of localized irrigation. In an effort to rationalize the use of water and nutrients and increase uniformity of distribution in localized irrigation, the use of statistical process control techniques are important for proper process monitoring and consequent increase in agricultural productivity.

KEYWORDS: control charts, drip irrigation, micro sprinkler, process capability index.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral.....	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Irrigação Localizada.....	4
3.2 Uniformidade	6
3.3 Avaliação de sistemas de irrigação localizada	7
3.4 Controle Estatístico de qualidade.....	10
REFERÊNCIAS	13
ARTIGO 1: UNIFORMIDADE DA IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO UTILIZANDO O CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE	18
1 INTRODUÇÃO	20
2 MATERIAL E MÉTODOS	22
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4 CONCLUSÕES	31
REFERÊNCIAS.....	32
ARTIGO 2: ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA UNIFORMIDADE DA IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO UTILIZANDO O CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE	35
1 INTRODUÇÃO	37
2 MATERIAL E MÉTODOS	42
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4 CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS.....	60
ARTIGO 3: UNIFORMIDADE DA IRRIGAÇÃO E FERTIRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO EM DIFERENTES INCLINAÇÕES DO TERRENO UTILIZANDO O CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE	65
1 INTRODUÇÃO	67
2 MATERIAL E MÉTODOS	72
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4 CONCLUSÕES	95
REFERÊNCIAS.....	96
CONSIDERAÇÕES FINAIS	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC)	8
Tabela 2 Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)	9
Tabela 3 Classificação do Coeficiente de Variação da vazão total (CVt)	9
Tabela 4 Valores mínimos de classificação do processo	12

ARTIGO 1

Tabela 1 Estatística descritiva dos coeficientes de uniformidade	25
Tabela 2 Índice de Capacidade do Processo	29

ARTIGO 2

Tabela 1 Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC)	45
Tabela 2 Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)	45
Tabela 3 Valores mínimos de classificação do processo	48
Tabela 4 Estatística descritiva.....	49
Tabela 5 Análise de variância para o fator energia produzida ($W.h^{-1}$)	49
Tabela 6 Médias coletadas de corrente e tensão	49
Tabela 7 Estatística descritiva dos coeficientes de uniformidade.	52
Tabela 8 Índice de Capacidade do Processo para os Coeficientes de Uniformidade	58

ARTIGO 3

Tabela 1 Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC)	76
Tabela 2 Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)	76
Tabela 3 Coeficiente de Variação da vazão total (CVt)	77
Tabela 4 Valores mínimos de classificação do processo	79
Tabela 5 Valores e estatística descritiva da pressão inicial e final.....	80
Tabela 6 Análise de variância da vazão dos gotejadores.....	80
Tabela 7 Teste de médias de Tukey da vazão dos gotejadores.....	81
Tabela 8 Estatística descritiva do coeficiente de variação da vazão total (CVt).....	84
Tabela 9 Índice de capacidade do processo para o parâmetro CVt	87
Tabela 10 Estatística descritiva do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)	87
Tabela 11 Estatística descritiva do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)	89
Tabela 12 Índice de capacidade do processo para o parâmetro CUC.....	93
Tabela 13 Índice de capacidade do processo para o parâmetro CUD.....	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Exemplo de área com sobreposição de lâminas d'água dos microaspersores..... 7

ARTIGO 1

Figura 1 Desenho esquemático do sistema de microaspersão 23

Figura 2 Gráficos de Controle de Shewhart – CUC..... 27

Figura 3 Gráficos de Controle de Shewhart – CUD..... 28

ARTIGO 2

Figura 1 a) Foto externa do Laboratório do Projeto CASA; b) Foto interna do Laboratório.. 42

Figura 2 a) Layout do sistema sem armazenamento de energia; b) Layout do sistema com armazenamento de energia. 43

Figura 3 Sistema elétrico para medição da tensão (V) e corrente (A). M1: Multímetro utilizado para medição da tensão elétrica do sistema fotovoltaico; M2: multímetro utilizado para a medição da corrente elétrica. 43

Figura 4 Gráfico de Controle de Shewhart para a Energia produzida ($W h^{-1}$)..... 51

Figura 5 Gráfico de Controle de MMEP para a Energia produzida ($W h^{-1}$). 51

Figura 6 Gráfico de Controle de CUSUM para a Energia produzida ($W.h^{-1}$)..... 51

Figura 7 Gráfico de Controle de Shewhart para uniformidade de irrigação. 54

Figura 8 Gráfico de Controle de MMEP para uniformidade de irrigação..... 55

Figura 9 Gráfico de Controle de CUSUM para uniformidade de irrigação. 56

ARTIGO 3

Figura 1 Bancada de ensaios de irrigação por gotejamento em ambiente controlado.....	72
Figura 2 a) Bancada sem inclinação; b) Bancada com inclinação de +2%; c) Bancada com inclinação de -2%; d) Forma de ajuste da inclinação.....	73
Figura 3 Sistema de coleta de dados dos ensaios.	74
Figura 4 Gráficos de dispersão da pressão (KPa) versus vazão (L h-1).....	83
Figura 5 Gráficos de controle Shewhart para o parâmetro CVt	85
Figura 6 Gráficos de controle MMEP para o parâmetro CVt.....	86
Figura 7 Gráficos de controle de Shewhart para o parâmetro CUC.....	90
Figura 8 Gráficos de controle de Shewhart para o parâmetro CUD.....	90
Figura 9 Gráficos de controle MMEP para o parâmetro CUC.....	91
Figura 10 Gráficos de controle MMEP para o parâmetro CUD	91

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da população mundial e a conseqüente necessidade de produção de alimentos, cada vez mais se exige uma agricultura competitiva e tecnificada, que possibilite maior produtividade em termos de qualidade, quantidade e menor custo. Para obter tal produtividade torna-se indispensável a adoção de tecnologias ligadas à área da irrigação, porém com a adequada utilização dos recursos naturais.

O uso racional dos recursos disponíveis no processo agrícola atualmente é um dos principais fatores para a maior rentabilidade na agricultura, sendo o manejo racional de água e fertilizantes fatores preponderantes para o sucesso na produção agrícola (DELGADO et al., 2010). De acordo com Frizzone (2009), estes dois recursos apresentam alta influência na produção agrícola, causando as maiores variações no rendimento de culturas.

De acordo com Mantovani, Bernardo e Palareti (2007), a agricultura irrigada tem sido importante estratégia para aperfeiçoar o plantio mundial de alimentos, proporcionando desenvolvimento sustentável no campo, com geração de empregos e renda de forma estável.

Porém, esta irrigação é responsável pela utilização de 70% da água doce consumida no planeta, sendo alvo de críticas da sociedade. Com isso, se torna necessário o desenvolvimento e a utilização de métodos que permitam determinar o momento, qualidade e quantidade ideal a ser disponibilizada para as plantas (GERVÁSIO; MELO JÚNIOR, 2014).

A irrigação localizada, que é aquela realizada de forma pontual, apresentando menores perdas, alta eficiência e alta uniformidade, possui características compatíveis com a racionalização esperada; porém, a falta de informações adequadas ou mesmo a má utilização das informações disponíveis comprometem a eficiência deste sistema de irrigação, que está relacionada à qualidade dos seus componentes e ao correto dimensionamento hidráulico (PACHICO; LEVIEN, 2014). Os métodos de irrigação localizada mais conhecidos são a microaspersão e o gotejamento

Na irrigação, a uniformidade de distribuição é um dos principais fatores de influência na produtividade agrícola da área irrigada, sendo a alta uniformidade dos sistemas de irrigação localizada uma das principais vantagens. A uniformidade é influenciada pelas diferenças de pressão, desgaste do sistema e entupimento, principalmente quando utilizados fertilizantes. As variações de fabricação também afetam a uniformidade, assim como o espaçamento entre os emissores/aspersores e fatores externos, como o clima e a

topografia (CONCEIÇÃO, 2002; BARRAGAN, 2010; NOORI; AL THAMIRY, 2012; BURT et al., 1997).

O monitoramento da irrigação localizada é primordial para que os sistemas apresentem altas uniformidades, podendo este monitoramento ser feito através das técnicas de controle estatístico do processo (CEP), como os gráficos de controle e o índice de capacidade do processo, estabelecendo padrões para os parâmetros da irrigação, verificando as variabilidades dos sistemas através de gráficos e classificando o processo quanto às especificações pré-estabelecidas através de índices.

Nesse contexto, os usos de técnicas do controle estatístico de qualidade, como os gráficos de controle e índice de capacidade do processo, podem determinar com excelência as variabilidades e classificar os sistemas de irrigação localizada em relação ao parâmetro uniformidade. Sendo assim, pesquisas utilizando o controle estatístico do processo se tornam necessárias para que as melhores características dos sistemas de irrigação sejam alcançadas quanto a uniformidade.

Com o intuito de expandir o uso das técnicas do controle estatístico do processo para a irrigação e também outras áreas do conhecimento, este trabalho foi dividido em três artigos. Os primeiro e segundo artigos se referem à avaliação de um sistema de microaspersão, sendo o primeiro a avaliação da uniformidade através dos coeficientes Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e, o segundo, a influência do uso da energia solar fotovoltaica na uniformidade de distribuição. O terceiro artigo se reporta à influência da declividade e do uso de fertilizantes na uniformidade de distribuição de uma irrigação por gotejamento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa foi avaliar o processo da irrigação localizada utilizando o controle estatístico de qualidade do processo.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a utilização dos gráficos de controle de Shewhart e o índice de capacidade do processo para diagnosticar os espaçamentos entre microaspersores adequados, por meio dos coeficientes de uniformidade de distribuição;
- Avaliar a influência do armazenamento de energia e espaçamento entre microaspersores através de gráficos de controle e comparar os resultados da utilização de gráficos de Shewhart para medidas individuais, gráficos de controle de Média Móvel Exponencialmente Ponderada (MMEP) e gráficos de controle de Soma Acumulativa (CUSUM);
- Avaliar a influência da inclinação topográfica do terreno no processo da irrigação com água e fertirrigação em um sistema por gotejamento de forma laboratorial, determinando os coeficientes de uniformidade de irrigação através dos gráficos de controle de Shewhart e o índice de capacidade do processo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Irrigação Localizada

Com a atual necessidade de aumento da produtividade agrícola, se torna fundamental o uso de tecnologias como a irrigação. Porém, em contrapartida, este aumento do consumo de água promove a concorrência dos recursos hídricos usados na agricultura com outros setores da economia e, por conseguinte força a otimização do uso da água para o setor primário. Assim, desde que usada de forma correta, a agricultura irrigada é uma importante estratégia para se obter êxito no processo de racionalização de água, visando sobretudo o aumento da produção agrícola (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

A agricultura irrigada tem sido importante estratégia para aperfeiçoar o plantio mundial de alimentos, proporcionando maior produtividade no campo, assim como geração de empregos e renda de forma estável, de acordo com Mantovani, Bernardo e Palareti (2007). Em conformidade, Werneck et al. (2009) afirmam que a irrigação é o conjunto de técnicas destinadas a deslocar a água no tempo ou no espaço para modificar as possibilidades agrícolas de cada região, visando corrigir a distribuição natural das chuvas, proporcionando a máxima produtividade.

Com o objetivo de maior sustentabilidade para a irrigação, nas últimas décadas, vem se desenvolvendo técnicas de irrigação que aliem uma maior eficácia no que tange à quantidade de água utilizada e sua distribuição homogênea, sendo o sistema mais promissor para cumprir estas exigências a irrigação localizada (AIROLDI, 2007).

A irrigação localizada é aquela realizada de forma pontual, apresentando menores perdas, alta eficiência (de 85 a 95%) e alta uniformidade (acima de 90%). Diante de tais vantagens, esta forma de irrigação vem ganhando expressividade comercial; todavia, há ainda inúmeros obstáculos, como problemas técnicos com equipamentos, manejo da água e falta de conhecimento sobre os métodos de irrigação (RIBEIRO et al., 2005).

Dentre as irrigações localizadas, destacam-se a microaspersão e o gotejamento. A microaspersão é a irrigação realizada como a aspersão convencional, porém com menores áreas de molhamento e vazões. De acordo com Awasthy et al. (2014), apresenta rendimentos favoráveis em economia de água, eficiência, redução de ervas daninhas, redução da salinidade do solo, redução de pragas e doenças agrícolas, maior controle da água, eficiência no uso de fertilizantes, controle de erosão do solo e aumento da produtividade da cultura.

Pode-se afirmar que o principal benefício da microaspersão reside na economia de água. Em localidades em que é possível utilizar a microaspersão em detrimento a outros

sistemas de irrigação, espera-se uma redução da quantidade de água. Outro aspecto positivo é o controle da relação entre quantidade de água demandada pela planta e seu volume absorvido, fator que garante à microaspersão maior eficácia (KOUMANOV; HOPMANS; SCHWANKL, 2006)

O gotejamento é a irrigação que aplica de forma lenta e regular a água ou fertilizantes diretamente na zona da raiz das plantas, através de tubos gotejadores e com uma vazão baixa em relação aos sistemas de aspersão (LIU; HUANG, 2009). As vantagens são a maior eficiência no uso da água, melhor manejo de fertilizantes, controle de plantas daninhas, menor custo de energia e maior uniformidade (LAMM; CAMP, 2007).

A irrigação por gotejamento desempenha um papel vital na produção de comida, de fibra, e na manutenção do gramado (GYASI-AGYEI, 2011), sendo que a mesma está ganhando importância nas áreas de engenharia agrícola e agrônômica, especialmente em locais com recursos hídricos limitados e caros, pois permite que tais recursos sejam plenamente utilizados (NOORI; AL THAMIRY, 2012)

O gotejamento é mais eficiente em zonas áridas e semiáridas, promovendo uma economia dos recursos hídricos (BENOUNICHE et al., 2014; FABEIRO et al., 2002), se tornando o símbolo de prática de irrigação moderna, que conservam os recursos hídricos e maximizam o desempenho das plantas (OMODEI, 2015).

Quando comparados estes dois sistemas, a microaspersão, por ser aplicada sobre uma área maior, possibilitando às raízes se distribuírem no interior do volume do solo mais umedecido, tornando assim disponível um maior reservatório de nutrientes e água, que podem ser necessários em períodos de maior demanda, quando comparado ao gotejamento.

Os sistemas de irrigação localizada são utilizados principalmente para a fruticultura e olericultura, sendo associado com a aplicação de nutrientes, juntamente com a água da irrigação, a fertirrigação (FERNANDES; COELHO; BOTREL, 2003). A fertirrigação é mais eficiente no sistema de gotejamento em comparação a outros métodos, devido à aplicação da água diretamente no sistema radicular da planta, possibilitando a melhoria do uso de insumos em diversas culturas, tanto em aspectos relacionados ao aumento da produtividade quanto na qualidade desses produtos (HERMES et al., 2014).

Um potencial problema associado à irrigação localizada é a percolação profunda e a lixiviação de nutrientes (AJDARY et al., 2007), sendo necessárias estratégias para diminuição destes problemas. De acordo com Barragan (2010), a uniformidade de distribuição do sistema de irrigação é um dos fatores mais importantes para a lixiviação de nutrientes.

3.2 Uniformidade em sistemas de irrigação localizada

Na irrigação localizada, uma das preocupações é a uniformidade de distribuição, ou seja, é a distribuição espacial da irrigação de forma equivalente em toda área. A maior uniformidade de sistemas de irrigação está ligada diretamente ao maior custo de instalação inicial, embora estes, a longo prazo, sejam compensados pela alta eficiência e a menor necessidade de manutenções e mudanças no sistema de irrigação (WILDE et al., 2009).

Assim, a uniformidade deve ser vista como um fator preponderante na aquisição de equipamentos de irrigação (BRAUER et al., 2011), determinando a maior ou menor produtividade agrícola (VIEIRA et al., 2004; KELLER, 2002; KELLER; BLIESNER, 1990; BRAUER et al., 2011; LOPEZ-MATA et al., 2010; CARRIÓN et al., 2001; BRENNAN, 2008; JUSTI; VILAS BOAS; SAMPAIO, 2010).

Wu e Barragan (2000) simularam os critérios de projeto de irrigação ideais que devem ser considerados para um bom retorno econômico, alta produção da cultura agrícola e baixa poluição do meio ambiente e recomendaram que a uniformidade é o fator mais importante a ser considerado para se alcançar os objetivos citados anteriormente.

A uniformidade de irrigação é influenciada por uma série de fatores, dependendo do sistema de irrigação utilizado. Para a microaspersão, os fatores que mais interferem na uniformidade são: pressão de serviço, diâmetro dos bocais, geometria e rugosidade dos orifícios, entupimento, variações de fabricação, deterioração pelo tempo de uso, inclinação e velocidade de lançamento do jato, altura do emissor em relação ao solo, estabilidade da haste de sustentação do emissor, que deve ser mantida sempre na vertical, distância dos microaspersores ao caule das plantas e fatores climáticos, como velocidade e direção do vento (CONCEIÇÃO, 2002; BARRAGAN, 2010).

De acordo com Almeida et al. (2010), deve-se realizar a sobreposição de microaspersores, como demonstrado na Figura 1, para que se aumente a uniformidade do sistema; do contrário, os valores da uniformidade serão sempre baixos.

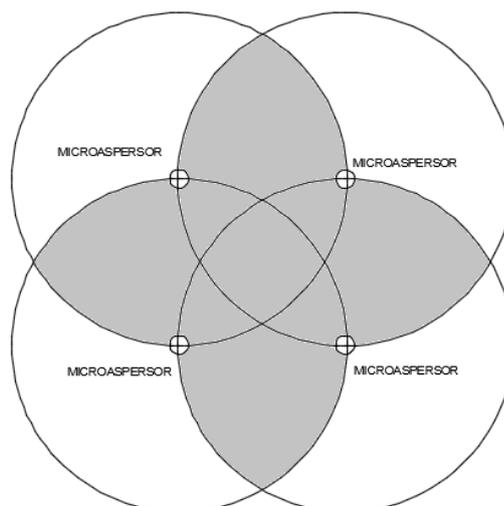


Figura 1 Exemplo de área com sobreposição de lâminas d'água dos microaspersores.
Fonte: autor.

As perdas de água nos sistemas por microaspersão são normalmente maiores do que na irrigação por gotejamento. Isso ocorre devido à maior superfície molhada de solo e porque, na microaspersão, a água é lançada ao ar.

No sistema por gotejamento, a uniformidade é influenciada por fatores como diferenças de pressão, sendo recomendado pressões maiores que 30 KPa (ELLA; REYES; YODER, 2009), espaçamento desigual do sistema, desgaste do sistema, entupimento, variação da fabricação, comprimento das linhas laterais e drenagem desigual pela declividade do terreno (NOORI; AL THAMIRY, 2012; BURT et al., 1997).

Na fertirrigação, principalmente nos sistemas de gotejamento, a uniformidade é ainda mais importante, pois os fertilizantes favorecem o entupimento e afetam negativamente o crescimento de culturas e sua produtividade (EL-HADY; SHAABAN; MOHAMEDIN, 2010).

3.3 Avaliação de sistemas de irrigação localizada

Para avaliar a uniformidade de um sistema de irrigação e a uniformidade de aplicação, é comum utilizar coeficientes de uniformidade de distribuição, que expressam a variabilidade de aplicação das lâminas de irrigação (FRIZZONE, 1992). Existem diversos coeficientes que monitoram e avaliam a uniformidade de aplicação para sistemas de irrigação localizada, como o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), proposto por Christiansen (1942), o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), desenvolvido

por Merriam e Keller (1978), e o Coeficiente de Variação da Vazão Total (CVt), proposto por Solomon (1979).

O coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) é baseado no desvio médio como medida de dispersão, sendo representado pela Equação 1.

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_a - q_i|}{nq_a}\right) \times 100 \quad \text{Eq. (01)}$$

Sendo: q_i - lâmina de cada emissor mm.h^{-1} ; q_a - lâmina média dos emissores mm.h^{-1} ; n - número de emissores.

A lâmina de cada emissor é medida, na maioria dos casos, através do volume de água em cada um dos coletores, que podem ser coletores específicos ou recipientes com área e diâmetros conhecidos, durante o tempo de ensaio, sendo uma hora para microaspersão (ABNT, 2004) e de 3 a 5 minutos para o gotejamento (KELLER; KARMEELLI, 1975). A lâmina média dos emissores é o volume médio ou peso médio de todos os emissores daquele determinado ensaio.

Para a classificação dos dados de CUC podem ser utilizadas diversas tabelas de classificação, sendo que, para o Brasil, a proposta de Bernardo, Mantovani e Soares (2008) vem sendo bem aceita e classifica a uniformidade de distribuição, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC)

CUC	Classificação
90% ou maior	Excelente
80% até 90%	Bom
70% até 80%	Regular
60% até 70%	Ruim
Menor que 60%	Inaceitável

Fonte: Bernardo, Mantovani, Soares (2008)

Outro coeficiente de uniformidade importante para a irrigação localizada é o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), que foi apresentado por Merriam e Keller (1978), sendo baseado na razão entre os 25% das vazões mínimas e as vazões médias dos emissores, expresso pela Equação 2.

$$CUD = \frac{\bar{q}_{25}}{\bar{q}_a} 100 \quad \text{Eq.(02)}$$

Sendo:

q_{25} - lâmina média das 25% menores descargas dos emissores mm.h^{-1} ;

q_a - lâmina média dos emissores mm.h^{-1} .

A lâmina média das 25% menores descargas é medida através do volume de água nos coletores com as 25% menores descargas (volumes) durante o tempo de ensaio, auferidos através de coletores e a lâmina média é o volume médio ou peso médio dos emissores daquele determinado ensaio.

Para a classificação dos dados de CUD, assim como o CUC, inúmeras tabelas são apresentadas, porém uma classificação bem aceita é a desenvolvida por Bralts (1986), que classifica a uniformidade de distribuição, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)

CUD	Classificação
90% ou maior	Excelente
80% até 90%	Bom
70% até 80%	Regular
60% até 70%	Ruim
Menor que 60%	Inaceitável

Fonte: Bralts (1986)

O coeficiente de variação da vazão total (CVt) é menos utilizado na irrigação do que os coeficientes CUC e CUD, porém é importante por indicar as variabilidades da vazão que interferem na uniformidade. Para a determinação do CVt se utiliza a Equação 03.

$$CVt = \frac{\sigma_q}{q} \quad \text{Eq. (03)}$$

Em que:

CVt - Coeficiente de Variação da vazão total;

σ_q - Desvio padrão de todas as vazões amostradas;

q - Média de todas as vazões amostradas (L.h⁻¹).

Para a classificação do CVt, que, quanto menor, melhor para irrigação, a classificação proposta por Solomon (1979) é aceita, sendo apresentada na Tabela 3:

Tabela 3 Classificação do Coeficiente de Variação da vazão total (CVt)

Classes	Uniformidade (%)
Excelente	≤ 0,03
Médio	0,05 a 0,07
Marginal	0,07 a 0,11
Pobre	0,11 a 0,15
Péssimo	> 0,15

Fonte: Solomon (1979)

Para a correta realização dos ensaios e posterior análise dos coeficientes de uniformidade, é importante seguir as normas ABNT NBR 15084 de 2004, denominada Irrigação Localizada: Microaspersores – Requisitos gerais e métodos de ensaio, e a NBR

ISO 9261 de 2006, intitulada como Equipamentos de irrigação agrícola – Emissores e tubos emissores – Especificação e métodos de ensaio. Ambas determinam as informações primordiais para a correta realização do ensaio, como tempo de ensaio, distribuição dos coletores na área, tamanho dos coletores e outros requisitos mais para a correta execução dos ensaios.

3.4 Controle Estatístico de qualidade

A demanda pela qualidade em processos, produtos e serviços tem sido a estratégia cada vez mais adotada pelas empresas e requerida pelos consumidores, possibilitando a competitividade no mercado para as empresas e contribuindo na escolha pelos consumidores na aquisição (FRIGO, 2014; MONTGOMERY, 2009).

O controle estatístico de qualidade (CEQ) é uma técnica que consiste em analisar o processo, estabelecer padrões, comparar desempenhos, verificar e estudar desvios, buscar e implementar soluções e analisar novamente o processo após modificações, objetivando a melhoria dos mesmos (MONTGOMERY, 2009).

A técnica de controle estatístico de qualidade prevê que um sistema está sujeito a alterações e variações, sendo importante avaliar se estas alterações/variações são significativas. Quando um processo está sob controle estatístico, o mesmo se apresenta dentro dos limites de controle inferior e superior, e pode, assim, ser considerado com um bom processo (RUSSO, 2002; BORGES; FERREIRA; OLIVEIRA, 2008; MONTGOMERY, 2009).

O controle estatístico de qualidade surge como uma alternativa para melhorar e monitorar a qualidade de um sistema de irrigação (FRIGO, 2014). Uma das ferramentas do controle estatístico de qualidade são os gráficos de controle, os quais se mostram eficientes e de simples interpretação no monitoramento da média e da variabilidade da característica da qualidade em observação (MONTGOMERY, 2009).

Os gráficos ou cartas de controle estatístico são ferramentas de monitoramento do desempenho de processos. Suas medições são realizadas em pontos espaçados no tempo, resultando em gráficos temporais, que, quando comparados aos resultados obtidos nos limites de controle, os valores fora dos limites indicam causas especiais de variabilidade ou anomalias ao processo, que prejudicam a qualidade (BORGES; FERREIRA; OLIVEIRA, 2008; HERMES et al., 2014).

De acordo com Werkema (2006), para um processo estar fora de controle este pode apresentar pontos fora dos limites de controle superior ou inferior, que é a indicação mais evidente; a periodicidade, que é quando ocorre um tendência em intervalos de tempo de

mesma amplitude; a tendência, que é o movimento dos pontos em uma mesma direção (ascendente ou descendente) por sete ou mais pontos consecutivos; a sequência de dados, que são vários pontos acima ou abaixo da linha média de forma consecutiva; outro indicativo é a aproximação de pontos sucessivos próximos aos limites e a aproximação de pontos consecutivos da linha média.

Os gráficos de controle mais utilizados são os de Shewhart para medidas individuais, devido a sua simplicidade de construção e interpretação sendo aplicado em situações em que a amostra consiste de uma única unidade. Em muitas aplicações dos gráficos de controle para unidades individuais utiliza-se a amplitude móvel de suas observações consecutivas como base para estimar a variabilidade do processo (MONTGOMERY, 2009).

Porém, de acordo com Morais (2016), as cartas de controle de Shewhart são lentas para diagnosticar pequenas variações em processos, pois utilizam a informação da última amostra, desprezando as demais amostras, sendo que uma forma de elevar a aptidão de detecção de pequenas variações é acumular informações de amostras, como o método da soma acumulativa (CUSUM) e da Média Móvel Exponencialmente Ponderada (MMEP).

Os gráficos de controle do tipo MMEP são usados para diagnosticar as variações pequenas de forma mais rápida, acumulando informações sucessivas, pondera as amostras e atribui maior peso para as amostras mais recentes. Para variações grandes, o MMEP é mais lento no diagnóstico de variações quando comparado aos gráficos de Shewhart (MONTGOMERY, 2009; FRIGO, 2014; COSTA; EPPRESCHT; CARPINETTI, 2008; SOUZA et al., 2008).

Em relação aos gráficos CUSUM, estes armazenam informações acumuladas de todos os pontos, diagnosticando, assim, de forma mais fácil as pequenas variações, sendo este considerado um gráfico de controle com qualidade superior para situações específicas, diminuindo os incidentes de alarme falso, que é o erro de afirmar que o processo está fora de controle quando na realidade está sob controle (SAMOHYL, 2009).

Para a análise de sistemas de irrigação, outra ferramenta do controle estatístico do processo (CEP) é o estudo da capacidade do processo através de índices, que refletem a capacidade que este tem de fabricar produtos de acordo com as especificações dos clientes (BORGES; FERREIRA; OLIVEIRA, 2008), sendo que de acordo com Werkema (2006), um processo pode não ser satisfatório ou capaz pelo fato de apresentar uma elevada variabilidade ou ainda a média estar deslocada em relação ao ponto médio dos limites de especificação.

O índice de capacidade de processo (C_p) é um parâmetro adimensional que indiretamente mede o quanto o processo consegue atender às especificações, sendo que quanto maior o seu valor, melhor o processo consegue atender às exigências (COSTA; EPPRESCHT; CARPINETTI, 2008; BORGES; FERREIRA; OLIVEIRA, 2008).

De acordo com Montgomery (2009), a classificação do processo em relação ao índice de capacidade se faz de forma a considerar as especificações do processo, podendo ser bilateral ou unilateral e para processos existentes ou novos, devendo o índice de capacidade calculado ser maior que o tabelado para o processo ser considerado capaz/adequado. Os valores tabelados para a classificação dos processos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 Valores mínimos de classificação do processo

	Especificações Bilaterais	Especificações Unilaterais
Processos Existentes	1,33	1,25
Processos Novos	1,50	1,45
Segurança, força ou parâmetro crítico (processos existentes)	1,50	1,45
Segurança, força ou parâmetro crítico (processos novos)	1,67	1,60

Fonte: Montgomery (2009).

As técnicas do controle estatístico de qualidade do processo são utilizadas para a análise dos parâmetros da irrigação, como a uniformidade, sendo que Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010) e Frigo et al. (2013) utilizaram o controle de qualidade do processo, através dos gráficos de controle e/ou índice de capacidade do processo para avaliar um sistema de irrigação por aspersão. Hermes et al. (2015); Hermes et al. (2014), Hermes et al. (2013), Klein et al. (2015) e Juchen, Suszek e Vilas Boas (2013) também utilizaram as ferramentas estatísticas do controle de qualidade do processo, porém em um sistema de irrigação por gotejamento. Estes autores concluíram que o índice de capacidade do processo é diretamente proporcional ao aumento da uniformidade do sistema, com a capacidade de monitorar o controle da irrigação dentro dos limites satisfatórios, além dos gráficos de controle contribuírem para o monitoramento do processo da irrigação.

REFERÊNCIAS

- AIROLDI, R. P. S. **Análise do desempenho de gotejadores e da prevenção do entupimento em irrigação com água residuária**. 2007. 140 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- AJDARY, K.; SINGH, D.; SINGH, D.; KHANNA, M. Modeling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip irrigation. **Agricultural Water Management**, Nova Zelândia, v. 89, p. 15-28, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR ISO 9261. **Equipamentos de irrigação agrícola - Emissores e tubos emissores - Especificação e métodos de ensaio**. São Paulo, 2006.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15084. **Localized irrigation – Microsprinkler – General requirements and test methods**. São Paulo, 2004.
- ALMEIDA, A. C. S.; BOTREL, T. A.; SOUZA, W. J.; OLIVEIRA, M. F.; CAMARGO, A. P. Desenvolvimento de protótipos de microaspersores utilizando prototipagem rápida e torneamento mecânico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, p. 686-691, 2010
- AWASTHY, P.; PATEL, B.; SAHU, P.; PATANWAR, M.; KU, P. Potentials of Micro Irrigation in India: An Overview. **International Journal of Agriculture and Food Science**, v.4, n.1, p. 7-14, 2014.
- BARRAGAN, J.; COTS, L.; MONSERRAT, J.; LOPEZ, R.; WU, I. P. Water distribution uniformity and scheduling in micro-irrigation systems for water saving and environmental protection. **Biosystems Engineering**, Hexham, v. 107, p. 202-211, 2010.
- BENOUNICHE, M.; KUPER, M.; HAMMANI, A.; BOESVELD, H. Making the user visible: analyzing irrigation practices and farmers' logic to explain actual drip irrigation performance. **Irrigation Science**, Berlim, v.32, n. 6, p. 405-420, 2014.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8ª ed. Viçosa: editora UFV, p. 625, 2008.
- BORGES, R. C.; FERREIRA, E. B.; OLIVEIRA, M. S. Estudo do padrão de não-aleatoriedade sequência no controle estatístico do processo. **Symposium**, Lavras, v. 6, n. 2. p. 31-35, 2008.
- BRALTS, V. F. **Field performance and evaluation**. In: NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. (Ed). Trickle irrigation for crop production. Amsterdam: Elsevier. p. 216-240, 1986.
- BRAUER, R. L.; CRUZ, R. L.; VILLAS BÔAS, R. L.; PLETSCH, T. A. Avaliação da uniformidade de aplicação de água em gotejadores em função do teor de ferro. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 1, p. 21-30, 2011.
- BRENNAN, D. Factors affecting the economic benefits of sprinkler uniformity and their implications for irrigation water use. **Irrigation Science**, Berlim, v.26, n.2, p.109-119, 2008.

BURT, C.; CLEMMENS, A.; STRELKOFF, T.; SOLOMON, K.; BLIESNER, R.; HARDY, L. A.; HOWELL, T. A.; EISENHAUER, D. E. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. **Irrigation and Drainage Engineering**, Newark, v. 123, n. 6, p. 423-442, 1997.

CARRIÓN, P.; TARJUELO, J.M.; MONTERO, J. SIRIAS: A simulation model for sprinkler irrigation: I. A description of model. **Irrigation Science**, Berlim, v.20, n.2, p.73-84, 2001.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkely: University of California, Experiment Station, p. 124, 1942.

CONCEIÇÃO, M. A. F. **Simulação da distribuição de água em microaspersores sob condição de vento**. 2002, 110 p. Tese (Doutorado em Agronomia). Piracicaba: ESALQ/USP, 2002.

COSTA, A. F.B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle Estatístico de Qualidade**. 2ª ed. São Paulo: editora Atlas, 2008.

DELGADO, A.; DUARTE, W.; LIMA, V.; CARVALHO, D. Modelagem matemática para otimização da produção e renda de melão e melancia em função de lâminas de água e doses de nitrogênio. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 1-9, 2010.

EL-HADY, O. A.; SHAABAN, S. M.; MOHAMEDIN, A. A. M. Impact of emission uniformity on nutrients uptake and water and fertilizers use efficiency by drip irrigated 15 years old Washington novel orange trees grown on a newly reclaimed sandy area. **Journal of American Science**, Richmond Hill, v. 6, p. 113-119, 2010.

ELLA, V.; REYES, M.; YODER, R. Effect of hydraulic head and slope on water distribution uniformity of a low-cost drip irrigation system. **Applied Engineering and Agriculture**, Louisville, v. 25, p. 349-356, 2009.

FABEIRO, C.; DE SANTA OLALLA, F.; MARTIN DE JUAN, J.A. Production of muskmelon (*Cucumis melo* L.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate. **Agricultural Water Management**, Nova Zelândia, v. 54, p. 93-105, 2002.

FERNANDES, A. L. T.; COELHO, R. D.; BOTREL, T. A. Avaliação do desempenho hidráulico da bomba injetora Indek, para fertirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 409-414, 2003.

FRIGO, J. P. **Controle estatístico da qualidade na irrigação por aspersão**. 2014. 43 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

FRIGO, J. P.; VILAS BOAS, M. A.; FRIGO, E. P.; HERMES, E.; TESSARO, E. Irrigação diurna e noturna em um sistema de aspersão convencional em Palotina-PR. **Irriga**, Botucatu, v. 18, p. 318-327, 2013.

FRIZZONE, J. A. **Irrigação por aspersão**. Piracicaba: ESALQ – Departamento de Engenharia Rural, Série Didática, 3. P. 53, 1992.

FRIZZONE, J. A. Otimização em irrigação com déficit. In: PAZ, V.P.S.; OLIVEIRA, A. S.; GHEYI, F. Manejo e sustentabilidade da irrigação em regiões áridas e semi-áridas. **Ambientais e Biológicas**, Cruz das Almas, v. 1, p. 275-307, 2009.

GERVÁSIO, E.; MELO JÚNIOR, J. Utilização de técnica de lisimetria de pesagem na automação de um sistema de irrigação localizada para uso no manejo da irrigação de cultivos em recipientes. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 4, p. 626-640, 2014.

GYASI-AGYEI, Y. Compatibility assessment of drip irrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Delaware, v. 137, p. 610-615, 2011.

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**, Lagos, v. 10, p. 1427-1433, 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, Agriculture and Environment** (Print), Helsinque, v.12, p. 487 – 490, 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, Agriculture and Environment**, Helsinque, v. 11, p. 841-845, 2013.

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, 2013.

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

KELLER, J. **Evolution of drip/microirrigation: traditional and non-traditional uses**. Paper presented as keynote address at the International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation, Tenerife, Spain, 2002.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkler and Trickle Irrigation**. Chapman and Hall, New York, 1990.

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, Agriculture and Environment**, Helsinque, v. 13, p. 179-183, 2015.

KOUMANOV, K. S.; HOPMANS, J. W.; SCHWANKL, L. W. Spatial and temporal distribution of root water uptake of an almond tree under microsprinkler irrigation, **Irrigation Science**, Berlim, v. 24, p. 267-278, 2006.

LAMM, F.; CAMP, C. **Subsurface drip irrigation**. In: Microirrigation for crop production. Elsevier, 622 p, 2007.

LIU, H.; HUANG, G. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent. **Agricultural Water Management**, Nova Zelândia, v. 96, n. 5, p. 745-756, 2009.

LÓPEZ-MATA, E.; TARJUELO, J. M.; JUAN, J. A. DE; BALLESTEROS, R.; DOMÍNGUEZ, R. A. Effect of irrigation uniformity on the profitability of crops. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p.190-19, 2010.

MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F.; **Irrigação princípios e métodos**. 2 ed. Viçosa: Editora UFV, p. 197, 2007.

MERRIAN, J.L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation**: A guide for management. Logan: Agricultural and Irrigation. Engineering Department, Utah State University, p. 217, 1978.

MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao controle estatístico de qualidade**. Tradução: FARIAS, A. M. L., FLORES, V. R. L. F., LAURENCEL, L. C. 4. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

MORAIS, M. **Esquemas de controlo de qualidade do tipo CUSUM e EWMA para atributos variáveis**. Capítulo 10 (Notas de aula), Escola Técnico Lisboa. Lisboa, Portugal, 2016. Disponível em: <https://www.math.tecnico.ulisboa.pt/~mjmorais/FCQ2-0607-cap10.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2016.

NOORI, J. S.; AL THAMIRY, H. A. Hydraulic and Statistical Analyses of Design Emission Uniformity of Trickle Irrigation Systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Delaware, v. 138, p. 791-798, 2012.

OMODEI, B. Accuracy and uniformity of a gravity-feed method of irrigation. **Irrigation Science**, Berlim, v. 33, n. 2, p. 121-130, 2015.

PACHICO, I.; LEVIEN, S. Avaliação de emissores de baixo custo de irrigação localizada submetidos à baixa pressão. **Irriga**, Edição Especial 1, p. 55-61, 2014.

RIBEIRO, T. A. P.; PATERNIANI, J. E. S.; SILVA; AIROLDI, R. P. S.; SILVA, M. J. M. Variação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos da água em um sistema de irrigação localizada. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.3, p.295-301, 2005.

RUSSO, S. L. **Gráficos de controle para variáveis não-conformes autocorrelacionadas**. 2002. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

SAMOHYL, R. W. **Controle Estatístico de Qualidade**. Rio de Janeiro: editora Elsevier, 2009.

SOLOMON, K. Manufacturing variation of trickle emitters. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph. 22, n. 5, p. 1034-1038, 1979.

SOUZA, L.M.; RIBEIRO JUNIOR, J. I.; REIS, G. M.; IDE, M. S. Eficiência dos Gráficos de Controle XBARRA, EWMA e CUSUM. **Rev. Elet. Produção e Engenharia**, v. 1, n. 1, p. 81-94, 2008.

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, J. G. F.; RAMOS, M. M.; SILVA, C. M.; CORDEIRO, E. A. Recuperação de gotejadores obstruídos devido à utilização de águas ferruginosas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 1-6, 2004.

WERNECK, J.E.F.; FERREIRA, R.S.A.; CHRISTOFIDIS, D. **O uso da água para irrigação**. Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www.cf.org.br/cf2004/irrigacao.doc>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

WERKEMA, M. C. C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Belo Horizonte, 2006.

WILDE, C.; JOHNSON, J.; BORDOVSKY, J. P. Economic analysis of subsurface drip irrigation system uniformity. **Applied Engineering in Agriculture**, San Francisco/Berlim, v. 25, p. 357-361, 2009.

WU, I.; BARRAGAN, J. Design criteria for microirrigation system. **Trans ASABE**, v. 43, n. 5, p. 1145-1154, 2000.

ARTIGO 1: UNIFORMIDADE DA IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO UTILIZANDO O CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE

RESUMO

O estudo objetivou avaliar a utilização dos gráficos de controle de Shewhart e o índice de capacidade do processo para diagnosticar os espaçamentos entre microaspersores adequados, por meio dos coeficientes de uniformidade de distribuição. Para a avaliação da irrigação foram utilizados os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), sendo que estes foram analisados estatisticamente através dos gráficos de controle de Shewhart e do índice de capacidade do processo. O experimento foi conduzido na Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus de Cascavel, Paraná, Brasil, no laboratório do Projeto Centro de Análises de Sistemas Alternativos de Energia (CASA), onde foi empregado um sistema de irrigação por microaspersão, com o bombeamento de água com energia gerada a partir de painéis fotovoltaicos. Foram testados sete espaçamentos entre microaspersores, sendo 1,0 x 1,0 m; 1,0 x 1,5 m; 1,5 x 1,0 m; 1,5 x 1,5 m; 1,5 x 2,0m; 2,0 x 1,5 m; 2,0 x 2,0m. Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com um total de 25 repetições com um único microaspersor, sendo posteriormente simulados os espaçamentos entre microaspersores. Os ensaios de microaspersão realizados apresentaram resultados satisfatórios para o uso do controle estatístico de qualidade, com valores médios acima de 80% para o parâmetro CUC e valores médios acima de 70% para o CUD. Os tratamentos com espaçamento de 1,0 x 1,0 m e de 1,5 x 1,0 m foram os que apresentaram resultados mais satisfatórios por meio das ferramentas de controle estatístico de qualidade, com valores acima de 90% de uniformidade e baixa variabilidade dos dados. Os gráficos de controle contribuíram para o diagnóstico dos tratamentos sob controle. O aumento do índice de capacidade do processo mostrou-se diretamente proporcional às médias dos valores de CUC e CUD.

PALAVRAS-CHAVE: coeficiente de uniformidade de Christiansen, coeficiente de uniformidade de distribuição, gráficos de controle, índice de capacidade do processo.

ARTICLE 1: MICROSPRINKLER IRRIGATION UNIFORMITY USING STATISTICAL QUALITY CONTROL

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the use of Shewhart control charts and the process capability index to diagnose the spacings between suitable micro sprinklers by means of distribution uniformity coefficients. For the irrigation evaluation, the Christiansen uniformity coefficients (CUC) and the distribution uniformity coefficient (DU) were used, and these were analyzed statistically through the Shewhart control charts and the process capability index. The experiment was conducted at the State University of the West of Paraná, Campus of Cascavel, Paraná, Brazil, in the laboratory of the Project Center for Alternative Energy Systems Analysis (CASA), where a micro sprinkler irrigation system was used, with the pumping of energy generated from photovoltaic panels. Seven spacings between micro sprinklers were tested, being 1.0 x 1.0m; 1.0 x 1.5m; 1.5 x 1.0m; 1.5 x 1.5m; 1.5 x 2.0m; 2.0 x 1.5m; 2.0 x 2.0m. A completely randomized design was used, with a total of 25 replications with a single micro sprinkler, and the spacings between micro sprinklers were later simulated. The micro sprinkler tests performed presented satisfactory results for the use of statistical quality control, with mean values above 80% for the CUC parameter and mean values above 70% for the DU. The treatments with spacing of 1.0 x 1.0m and of 1.5 x 1.0m were the ones that presented more satisfactory results through the tools of statistical quality control, with values above 90% of uniformity and low variability of the data. The control charts contributed to the diagnosis of the treatments under control. The increase in the capacity index of the process was directly proportional to the mean values of CUC and DU.

KEYWORDS: Coefficient uniformity Christiansen, Coefficient Distribution Uniformity, control charts, capacity index of process.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os vários tipos de irrigação, a localizada tem maior destaque para pequenos agricultores, aumentando a produtividade e consequentemente gerando melhores condições de renda (DAUDA et al., 2009). De acordo com Kuscu et al. (2008), dentre as irrigações localizadas, destaca-se a microaspersão, que possui rendimentos favoráveis no que tange a economia de água, eficiência, redução de ervas daninhas, redução da salinidade do solo, redução de pragas e doenças agrícolas, maior controle da água, eficiência no uso de fertilizantes, controle de erosão do solo e aumento da produtividade da cultura (AWASTHY et al., 2014).

Na irrigação por microaspersão uma das preocupações é a uniformidade de distribuição, ou seja, é a distribuição espacial da irrigação de forma equivalente em toda área, uma vez que microaspersores tendem a ter baixa uniformidade de aplicação sobre a área molhada (KOUIMANOV; HOPMANS; SCHWANKL, 2006). A uniformidade é ainda um fator importante quanto à aquisição de equipamentos (BRAUER et al., 2011), pois é um dos elementos mais importantes para a irrigação, haja vista que influencia diretamente na produtividade agrícola (VIEIRA et al., 2004; KELLER, 2002; KELLER; BLIESNER, 1990; BRAUER et al., 2011; LOPEZ-MATA et al., 2010; CARRIÓN et al., 2001; BRENNAN, 2008; JUSTI; VILAS BOAS; SAMPAIO, 2010).

Na microaspersão, a uniformidade é afetada principalmente pelo projeto hidráulico, devido à alta perda de carga, variações de fabricação, deterioração dos equipamentos pelo tempo de uso, o espaçamento entre emissores e o entupimento (BARRAGAN, 2010). De acordo com Almeida et al. (2010), deve-se realizar a sobreposição da lâmina d'água dos microaspersores para que se aumente a uniformidade do sistema; do contrário, os valores da uniformidade serão sempre baixos.

Para a análise dos parâmetros da irrigação, como a uniformidade, podem ser utilizadas técnicas do controle estatístico de qualidade, como os gráficos de controle de Shewhart e o índice de capacidade do processo. Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010) e Frigo et al. (2013) utilizaram o controle de qualidade do processo, através dos gráficos de controle e/ou índice de capacidade do processo (C_p) para avaliar um sistema de irrigação por aspersão com resultados satisfatórios em relação ao diagnóstico das variabilidades durante os ensaios através dos gráficos de controle de Shewhart e o uso do índice de capacidade do processo para classificação dos processos.

Hermes et al. (2015), Hermes et al. (2014), Hermes et al. (2013), Klein et al. (2015) e Juchen, Suszek e Vilas Boas (2013) também utilizaram as ferramentas estatísticas do controle de qualidade do processo, porém em um sistema de irrigação por gotejamento, sendo que estes autores concluíram que o índice de capacidade do processo é diretamente

proporcional ao aumento da uniformidade do sistema, com a capacidade de monitorar o controle da irrigação dentro dos limites satisfatórios, além dos gráficos de controle contribuir para o monitoramento do processo da irrigação.

Em conformidade com o exposto acima, o objetivo desta pesquisa foi avaliar a utilização dos gráficos de controle de Shewhart e o índice de capacidade do processo para diagnosticar os espaçamentos entre microaspersores adequados, por meio dos coeficientes de uniformidade de distribuição.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios de irrigação ocorreram no Laboratório do Projeto CASA (Centro de Análises de Sistemas Alternativos de Energia), na Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, campus de Cascavel, sem a influência de fatores externos como radiação solar e vento, com latitude 24° 59' 22" sul, longitude 53° 29' 59" oeste e altitude média do local de 750 metros.

Para a realização dos ensaios de irrigação foi montado um sistema alimentado com energia solar por meio de painel fotovoltaico composto de três módulos da marca SOLARTEC, modelo KS50, com potência nominal de 50W. Tal sistema solar foi ligado a um módulo de armazenamento de energia, constituído por uma bateria AJAX, modelo Energy EN150, conectada a um controlador de carga da marca PHOCOS, modelo CX 40, com objetivo de manter tensão e corrente constantes para a bomba hidráulica, sendo utilizado uma bomba de diafragma da marca SHURFLO, modelo 8000, com vazão máxima de 490 Lh⁻¹ e com capacidade manométrica de 2,07 bar.

Para os ensaios utilizou-se um microaspersor da marca NAANDANJAIN IRRIGATION modelo HADAR 7110, com no mínimo 5 anos de uso, com diâmetro molhado de 6,0m, vazão de 41 L.h⁻¹ quando trabalhado na pressão de 2,0 bar e o equipamento instalado a 0,25m de altura do solo.

A metodologia adotada para coleta dos dados está de acordo com a ABNT (2004), na qual os coletores distribuídos em malha, em um total de 100, e possuíam 0,50 metros entre eles. Foram realizados 25 ensaios com o microaspersor, com o tempo de 1 hora, sendo que antes da coleta dos dados, o sistema foi ligado até que se estabilizasse o sistema de irrigação, em relação a vazão e pressão, mantendo uma pressão próxima de 2,0 bar durante todo o ensaio. O esquema para realização do ensaio pode ser observado na Figura 1.

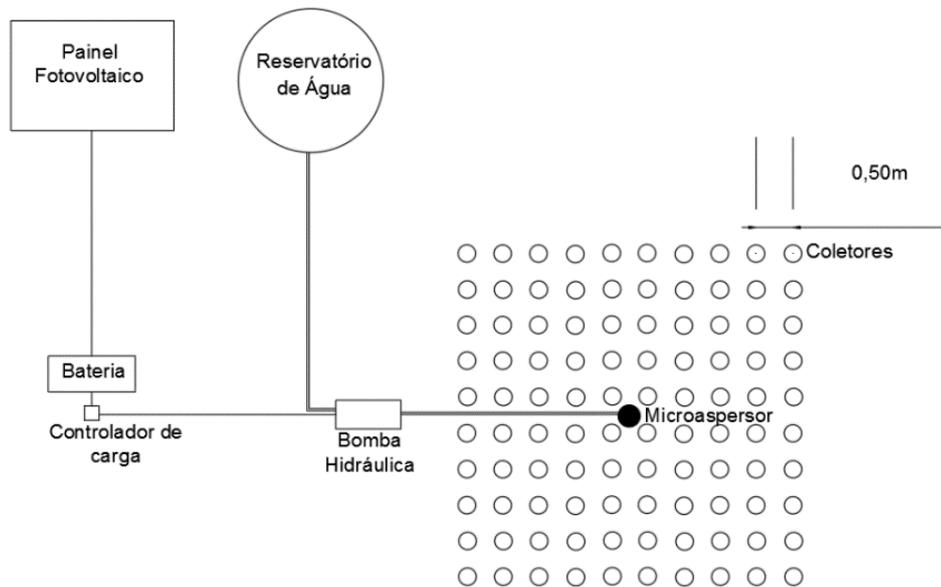


Figura 1 Desenho esquemático do sistema de microaspersão.

Adotou-se o delineamento inteiramente casualizado com os seguintes tratamentos: T1: espaçamento de 1,0 x 1,0 m; T2: espaçamento de 1,0 x 1,5 m; T3: espaçamento de 1,5 x 1,0 m; T4: espaçamento de 1,5 x 1,5 m; T5: espaçamento de 1,5 x 2,0m; T6: espaçamento de 2,0 x 1,5 m; T7: espaçamento de 2,0 x 2,0m. Para cada uma dessas simulações de combinação de espaçamentos calculou-se a uniformidade com os totais sobrepostos em cada coletor, além da média, desvio padrão, normalidade pelo método de Anderson-Darling, com nível de significância de 5%, autocorrelação dos dados e coeficiente de variação.

A fim de avaliar o sistema de irrigação, utilizou-se o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), desenvolvido por Christiansen (1942), e Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), proposto por Merriam e Keller (1978), conforme as Equações 01 e 02, respectivamente.

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_a - q_i|}{nq_a}\right) \times 100 \quad \text{Eq.(01)}$$

Sendo: q_i - lâmina de cada emissor mm.h^{-1} ; q_a - lâmina média dos emissores mm.h^{-1} ; n - número de emissores.

$$CUD = \frac{\bar{q}_{25}}{q_a} 100 \quad \text{Eq.(02)}$$

Sendo: q_{25} - lâmina média das 25% menores descargas dos emissores mm.h^{-1} ; q_a - lâmina média dos emissores mm.h^{-1} .

Para monitorar os coeficientes de uniformidade foram confeccionados os gráficos de controle de Shewhart, com o objetivo de investigar os parâmetros durante os ensaios torna-se necessário para a determinação dos gráficos calcular o Limite Superior de Controle (LSC) e o Limite Inferior de Controle (LIC), através das Equações 03 e 04.

$$LSC = \bar{x} + \frac{3AM}{d_2} \quad \text{Eq.(03)}$$

$$LIC = \bar{x} - \frac{3AM}{d_2} \quad \text{Eq.(04)}$$

Sendo: LSC - limite superior de controle; LIC - limite inferior de controle; \bar{x} - média; AM - amplitude móvel das observações (valor encontrado para cada parâmetro em cada coletor); d_2 - valor pré-determinado (para este caso, de 3,931), de acordo com o número de repetições.

Com o intuito de avaliar a capacidade do processo optou-se pela metodologia proposta por Montgomery (2009), em que se calcula o índice de capacidade do processo (C_p), usado quando o processo se encontra estável, ou seja, com controle estatístico e quando a variável de interesse tenha distribuição próxima da normal.

Quando o processo se encontra estável aplica-se o C_{pk} (processos unilaterais) que é definido de acordo com as Equações 05 e 06, sendo C_{pk} o menor valor entre C_{ps} e C_{pi} , como demonstrado na Equação 07.

$$C_{Pi} = \frac{\bar{x} - LIC}{3\sigma} \quad \text{Eq. (05)}$$

$$C_{Ps} = \frac{LSC - \bar{x}}{3\sigma} \quad \text{Eq. (06)}$$

$$C_{Pk} = (C_{Pi}; C_{Ps}) \quad \text{Eq. (07)}$$

A classificação do processo para os valores de uniformidade propõe como capaz ou adequado aqueles com $C_p \geq 1,25$, haja vista que são processos considerados existentes, pois o microaspersor utilizado é usado, e com especificações unilaterais (MONTGOMERY, 2009). Pelo fato da pesquisa utilizar especificação unilateral inferior, no caso 80 e 90%, para classificação da uniformidade em bom ou excelente, respectivamente, será utilizado o valor de C_{pi} como referência.

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

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva dos dados dos coeficientes de uniformidade consta na Tabela 1.

Tabela 1 Estatística descritiva dos coeficientes de uniformidade

Tratamento	Média CUC (%)	DP CUC (%)	CV CUC (%)	p-valor CUC	AC	Média CUD (%)	DP CUD (%)	CV CUD (%)	p-valor CUD	AC
T1	95,97	1,57	1,64	0,582	Não	94,54	2,44	2,58	0,214	Sim
T2	95,28	1,06	1,11	0,802	Sim	91,18	2,77	3,04	<0,005*	Não
T3	94,50	1,78	1,88	0,744	Não	91,56	2,95	3,22	0,483	Não
T4	92,76	1,03	1,11	0,677	Não	88,24	2,85	3,23	0,348	Não
T5	92,08	1,57	1,71	0,824	Não	88,02	2,73	3,11	0,036*	Não
T6	87,32	1,63	1,87	0,005*	Não	81,48	2,98	3,66	0,230	Não
T7	85,92	1,27	1,48	0,749	Não	79,51	2,13	2,67	0,262	Não

*Valores menores que o nível de significância de 0,05. DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de variação; AC: Autocorrelação.

De acordo com a Tabela 1, nota-se que as médias do CUC e do CUD aumentaram conforme o menor espaçamento entre os microaspersores. Em relação ao desvio padrão, este foi maior para os valores de CUD quando comparado ao CUC, com maior variabilidade dos dados devido a analisar um número menor de coletores, influenciando significativamente no cálculo do índice de capacidade do processo (Cp), devido à equação para cálculo do Cp utilizar o desvio padrão como variável.

Os ensaios apresentaram altas uniformidades, acima de 80%, com valores de CUC de 85,92 a 95,97%, semelhantes aos resultados apresentados por Holanda Filho et al. (2001) que, realizando a caracterização hidráulica de um microaspersor, obtiveram resultados do CUC entre 85,2 e 96,6% considerados de bom a excelente, segundo a classificação de Mantovani (2002). Ainda no que tange aos valores de CUC, outros autores apresentaram médias similares com a presente pesquisa, como Silva e Silva (2003), com média de 95,47% para avaliação hidráulica de um microaspersor em diferentes pressões. Freire et al. (2012), empregando microaspersores na cultura da banana obtiveram médias entre 77 a 93%; já Martins et al. (2009), avaliando o desempenho de um microaspersor chegaram à média 89,53%, condizentes com os apresentados por Cordeiro (2006), aplicando microaspersor na cultura do mamão.

Em relação aos valores do CUD, Santos et al. (2012) realizando ensaios de desempenho para a cultura da banana obtiveram resultados variando de 56% até 88%, considerado razoável a bom, segundo a classificação de Bralts (1986).

Na presente pesquisa, os valores médios de CUC foram maiores que o de CUD, corroborando com os dados revelados por Pletsch et al. (2009) utilizando irrigação localizada, assim como por Faria et al. (2016) e Keller e Bliesner (1990).

Quando comparado com outros sistemas de irrigação, os valores de CUC e CUD são correlatos com os dos atuais ensaios, bem como os resultados de Faria et al. (2016) que, avaliando a influência do vento em um sistema de irrigação de aspersão com lateral móvel, constataram o CUC entre 85 a 93,86% e o CUD de 76,71 a 89,26%. Já Cainelli et al. (1997), analisando a uniformidade de um pivô central, obtiveram valores oscilando entre 92 a 97% e entre 88 a 96%, para o parâmetro CUC e CUD, respectivamente.

Para a realização posterior dos gráficos de controle de Shewhart e o cálculo do índice de capacidade do processo se sugere (Montgomery, 2009) que os dados tenham normalidade e não tenham autocorrelação entre eles. Como apresentado na Tabela 1, para o parâmetro CUC, o tratamento T6 não apresenta normalidade e para o parâmetro CUD, os tratamentos T2 e T5 não são normais, pelo fato do p-valor ser menor que o nível de significância adotado de 0,05, de acordo com o teste de normalidade de Anderson-Darling. 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, estes foram constatados no tratamento 2 para o CUC e no tratamento T1 para o CUD. Desta forma, tais tratamentos foram descartados nas técnicas de controle estatístico de qualidade. Com isso, foram determinados os gráficos de controle de Shewhart e o índice de capacidade do processo para os tratamentos adequados de acordo com Montgomery (2009). Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os gráficos de controle para o parâmetro CUC e CUD, respectivamente.

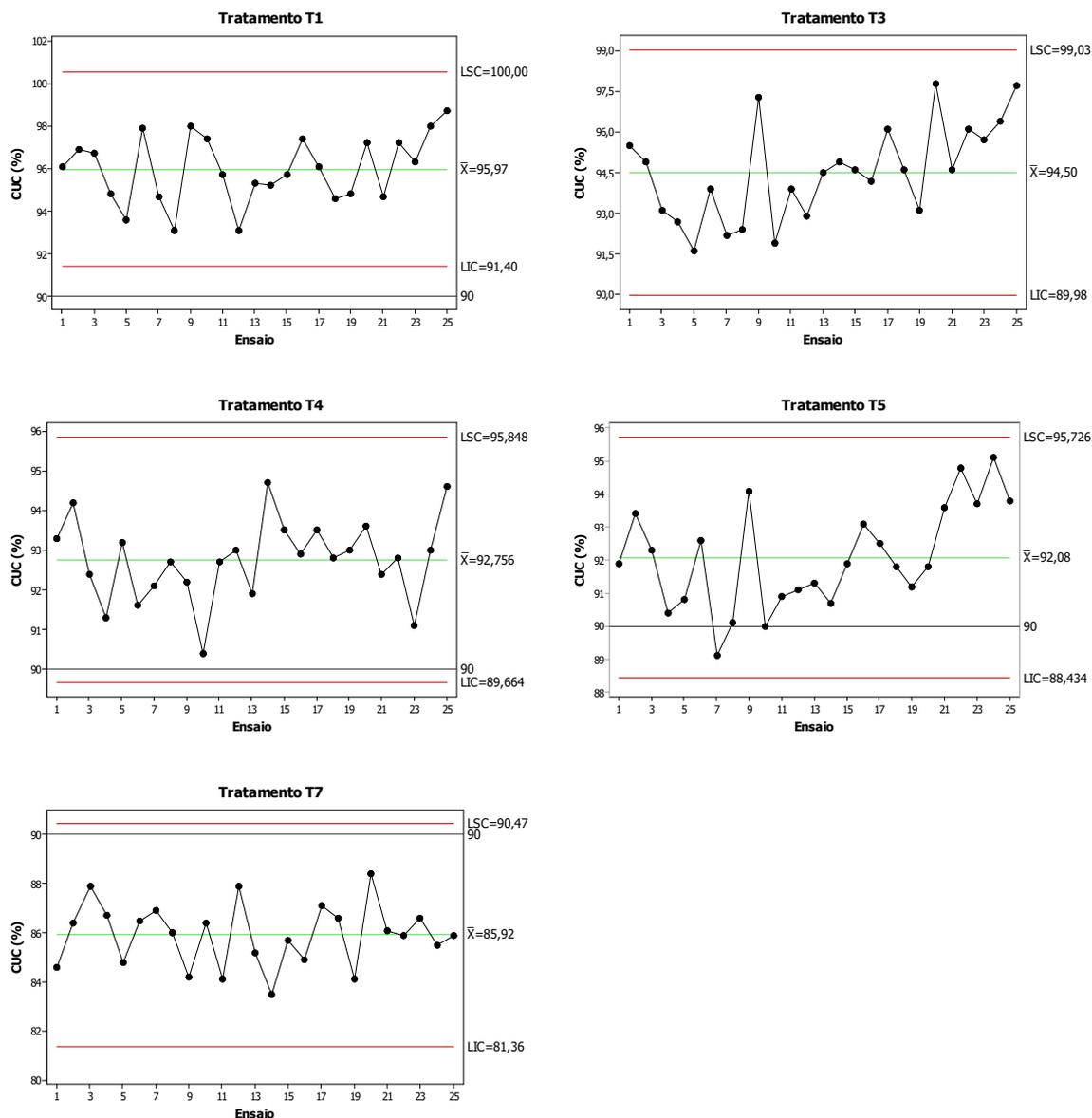


Figura 2 Gráficos de Controle de Shewhart para o CUC.

A partir da construção dos gráficos de controle de Shewhart, analisando a Figura 2 para o parâmetro CUC tem-se que os tratamentos T1, T3, T5 e T7 apresentam-se sob controle, pois nenhum deles possui pontos fora dos limites superior e inferior de controle, nem configurações indesejáveis como tendência ou sequência (MONTGOMERY, 2009). O tratamento 4 não apresenta pontos fora dos limites de controle, porém possui uma sequência acima da linha média, entre os ensaios 14 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.

Analisando a distribuição dos dados em relação à linha do valor de 90%, de acordo com Mantovani (2002), valor mínimo de uniformidade de irrigação classificado como excelente, os tratamentos 1 e 3 apresentam todos os valores acima da linha. Sendo assim, são os espaçamentos mais adequados em relação à uniformidade de distribuição para o parâmetro CUC, de acordo com os gráficos de controle.

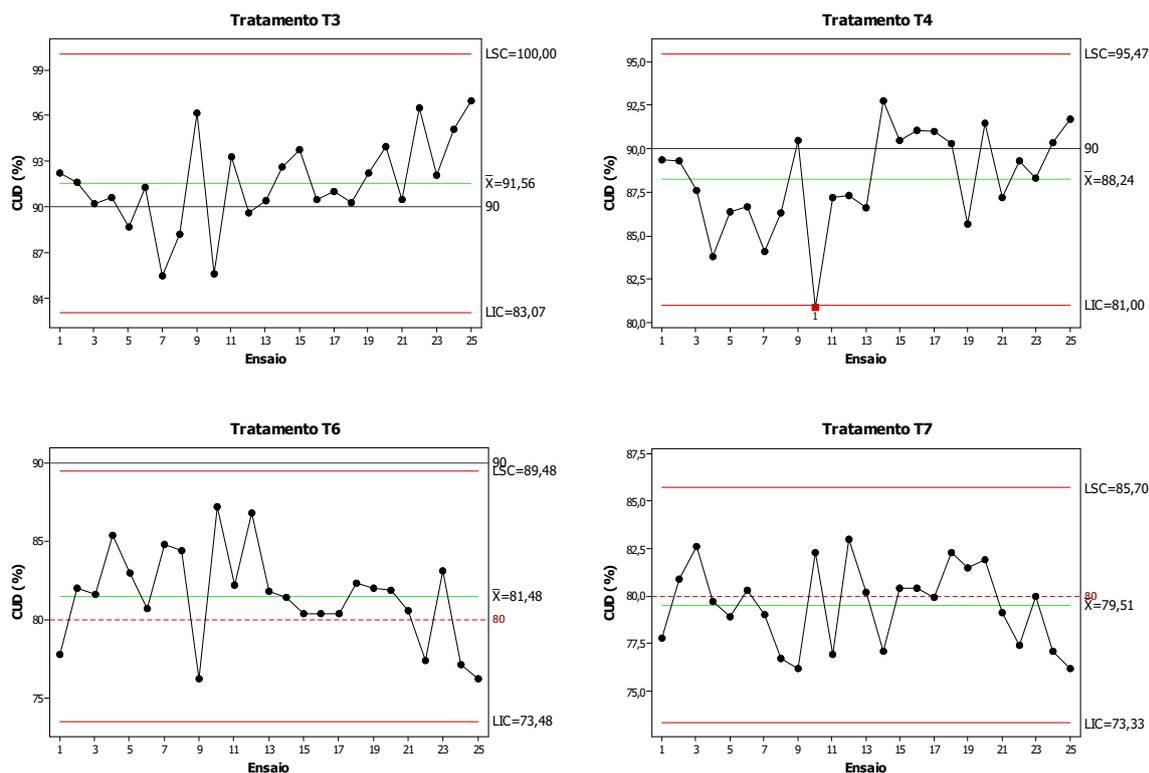


Figura 3 Gráficos de Controle de Shewhart – CUD.

Em relação ao parâmetro CUD ilustrados nos gráficos de controle na Figura 3, os tratamentos 3, 6 e 7 apresentam-se sob controle estatístico. Ainda que o tratamento 7 do ensaio 15 ao 20 possuam valores acima da linha média, o mesmo não é tido como uma tendência (Montgomery, 2009). O tratamento 4 não apresenta controle estatístico, pois o ensaio 10 está abaixo do limite inferior de controle, mesmo que seus valores estejam acima da linha de 80%, sendo classificados como bons, de acordo com Bralts (1986).

Como demonstrados nos gráficos de controle para o CUD, nenhum ensaio apresenta todos os dados acima de 90%, sendo classificados como excelentes (BRALTS, 1986), sendo que apenas o tratamento 3 tem todos os valores acima de 80%, classificado como uniformidade boa.

Hermes et al. (2013), Hermes et al. (2014) e Hermes et al. (2015) analisando a irrigação por gotejamento através de gráficos de controle de Shewhart verificaram a ocorrência de valores abaixo do limite inferior de controle. Juchen, Suszek e Vilas Boas (2013), empregando os gráficos de controle para a irrigação por gotejamento para cultura da alface obtiveram todos os ensaios sob controle. Frigo et al. (2013), estudando a uniformidade para irrigação diurna e noturna constataram ensaios abaixo do limite inferior de controle (LIC) em todos tratamentos. Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010), utilizando gráficos de controle de Shewhart para estudar a uniformidade da irrigação por aspersão constataram um dos ensaios acima do limite superior de controle (LSC) e nenhum abaixo do LIC.

No que se refere ao índice de capacidade do processo foi considerado apenas o limite inferior de controle, o valor de 80% foi adotado como bom e de 90% como excelente, de acordo com a classificação de Mantovani (2002) para o parâmetro CUC e os mesmos valores são atribuídos ao parâmetro CUD, segundo a classificação de Bralts (1986). Os índices de capacidade do processo estão apresentados na Tabela 2, sendo calculados apenas para os tratamentos com normalidade e sem autocorrelação entre os dados.

Tabela 2 Índice de Capacidade do Processo

Tratamento	CUC		CUD	
	Cpl LIC=90%	Cpl LIC =80%	Cpl LIC =90%	Cpl LIC =80%
T1	1,27	3,39	*	*
T2	*	*	*	*
T3	0,84	2,72	0,18	1,31
T4	0,90	4,15	0,00	1,16
T5	0,44	2,56	*	*
T6	*	*	0,00	0,17
T7	0,00	1,55	0,00	0,00

* Não pode-se calcular o índice de capacidade do processo por falta de normalidade ou autocorrelação entre os dados

Analisando os processos novos e com especificações unilaterais, Montgomery (2009) classifica os valores acima de 1,25 como processo adequado. Desta forma, o parâmetro CUC mostra que para o LIC = 90%, apenas o tratamento T1 é adequado; já com relação ao LIC = 80%, todos os tratamentos possíveis para uso foram tidos como adequados. A Tabela 2 mostra, ainda, que para o parâmetro CUD nenhum tratamento foi adequado para 90%, e apenas o tratamento T3 é adequado para LIC = 80%.

Apesar da maioria dos processos serem classificados como incapazes, 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 $CUC (\%) = 87,107 + 7,4473 Cpl$, com coeficiente de

determinação de $R^2 = 88,13\%$ para LIC = 90%. No entanto, quando utilizado o LIC = 80% para o CUC, a equação é $CUC (\%) = 84,12 + 2,8273 \text{ Cpl}$, com $R^2 = 50,85\%$.

Para o parâmetro CUD a relação entre as variáveis não pode ser expressa para um LIC = 90%, haja vista que a maioria dos valores foram iguais a zero. Entretanto, para um LIC = 80% a relação pode ser expressa por $CUD (\%) = 79,70 + 8,4425 \text{ Cpl}$, com $R^2 = 98,26$.

As equações expressas para o parâmetro CUC com o LIC = 90% e o CUD com LIC = 80% apresentaram uma correlação forte entre as variáveis, por apresentarem altos valores de R^2 em ambas, a cada unidade de Cpl que se consegue controlar no processo aumenta-se 7,4473 e 8,4425 no valor do CUC e CUD, respectivamente, demonstrando assim a importância do controle do processo para adquirir altos valores de uniformidade.

Para estudos com irrigação por gotejamento, Hermes et al. (2014), Hermes et al. (2013) e Klein et al. (2015) constataram que conforme aumenta-se o valor do CUC o índice de capacidade do processo também crescia, com um coeficiente de determinação R^2 de 70,35, 61 e 91,84%, respectivamente. A mesma relação se faz com os valores do CUD, conforme Hermes (2015), com um R^2 de 70,10% para LIC=90% e 85,7% para LIC=80%. Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010), estudando irrigação por aspersão, também concluíram a relação diretamente proporcional dos coeficientes de uniformidade CUC e CUD com o Cpl, com R^2 de 78%.

Desta forma para a pesquisa, os tratamentos com espaçamento entre microaspersores de 1,0 x 1,0 m (T1) e 1,5 x 1,0 m (T3) apresentaram os melhores resultados quanto a uniformidade quando se utilizou os gráficos de controle de Shewhart e o índice de capacidade do processo, com alta correlação entre os valores do índice Cp e a uniformidade de distribuição de água.

4 CONCLUSÕES

Os gráficos de controle foram adequados para diagnosticar os tratamentos sob controle e os espaçamentos mais adequados, sendo para o CUC o tratamento T1 (1,0 x 1,0 m) e T3 (1,5 x 1,0 m), sendo este último o mais adequado para o CUD.

O aumento do índice de capacidade do processo foi diretamente proporcional aos valores médios do CUC e CUD dos ensaios, com R^2 acima de 80% na maioria dos casos. Sendo assim, os menores espaçamentos apresentam os maiores valores do índice de capacidade do processo.

As ferramentas de controle estatístico de qualidade do processo utilizadas foram satisfatórias para determinar os espaçamentos para a microaspersão em relação à uniformidade de distribuição de água e monitorar as suas variabilidades.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15084. **Localized irrigation – Microsprinkler – General requirements and test methods**. São Paulo, 2004.

ALMEIDA, A. C. S.; BOTREL, T. A.; SOUZA, W. J.; OLIVEIRA, M. F.; CAMARGO, A. P. Desenvolvimento de protótipos de microaspersores utilizando prototipagem rápida e torneamento mecânico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, p. 686-691, 2010

AWASTHY, P.; PATEL, B.; SAHU, P.; PATANWAR, M.; KU, P. Potentials of Micro Irrigation in India: An Overview. **International Journal of Agriculture and Food Science**, v. 4, n. 4, p. 116-118, 2014.

BARRAGAN, J.; COTS, L.; MONSERRAT, J.; LOPEZ, R.; WU, I. P. Water distribution uniformity and scheduling in micro-irrigation systems for water saving and environmental protection. **Biosystems Engineering**, Hexham, v. 107, p. 202-211, 2010.

BRALTS, V. F. **Field performance and evaluation**. In: NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. (Ed). Trickle irrigation for crop production. Amsterdam: Elsevier. p. 216-240, 1986.

BRAUER, R. L.; CRUZ, R. L.; VILLAS BÔAS, R. L.; PLETSCH, T. A. Avaliação da uniformidade de aplicação de água em gotejadores em função do teor de ferro. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 1, p. 21-30, 2011.

BRENNAN, D. Factors affecting the economic benefits of sprinkler uniformity and their implications for irrigation water use. **Irrigation Science**, Berlim, v.26, n.2, p.109-119, 2008.

CAINELLI, V.H.; ROBAINA, A. D.; CARLESSO, R.; DOTTO, C. R. D. Desempenho e uniformidade da distribuição de água de um pivô central. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.27, n.4, p.35-40, 1997.

CARRIÓN, P.; TARJUELO, J.M.; MONTERO, J. SIRIAS: A simulation model for sprinkler irrigation: I. A description of model. **Irrigation Science**, Berlim, v.20, n.2, p.73-84, 2001.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkely: University of California, Experiment Station, p. 124, 1942.

CORDEIRO, E. A. **Diagnóstico e manejo da irrigação na cultura do mamoeiro na região norte do Estado do Espírito Santo**. 2006. 100f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2006.

DAUDA, T. O.; ASIRIBO, O. E.; AKINBODE, S. O.; SAKA, J. O.; SALAHU, B. F. An assessment of the roles of irrigation farming in the millennium development goals. **African Journal of Agricultural Research**, Lagos, v. 4(5), p. 445-450, 2009.

FARIA, L. C.; BESKOW, S.; COLOMBO, A.; NORENBORG, B. G.; NETO, O. R.; SIMÕES, M. CH. Influence of the Wind on water application uniformity of a mechanical lateral move irrigation equipment using rotating plate sprinklers. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 46, n.1, p.83-88, 2016.

FREIRE, F. G. C.; BARRETO, H. B. F.; BATISTA, R. O.; COSTA, F. G. B.; SANTOS, W. O.; SANTOS, F. S. S. **Avaliação da Uniformidade de Aplicação de água no sistema de**

irrigação por microaspersão na cultura da goiaba no Projeto de Irrigação Vale do Gorutuba, Janaúba – MG. In: INOVAGRI: International Meeting, Fortaleza, 2012

FRIGO, J. P.; VILAS BOAS, M. A.; FRIGO, E. P.; HERMES, E.; TESSARO, E. Irrigação diurna e noturna em um sistema de aspersão convencional em Palotina-PR. **Irriga**, Botucatu, v. 18, p. 318-327, 2013.

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**, Helsingue, v. 10, p. 1427-1433, 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, Agriculture and Environment** (Print), v.12, p. 487 – 490, 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, Agriculture and Environment**, Helsingue, v. 11, p. 841-845, 2013.

HOLANDA FILHO, R. S. F.; PORTO FILHO, F.Q.; MIRANDA, N.; MEDEIROS, J. F. Caracterização hidráulica do microaspersor RONDO, da PLASTRO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, Paraíba, v. 5. n.1, p. 16-21, 2001.

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, 2013.

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

KELLER, J. **Evolution of drip/microirrigation: traditional and non-traditional uses.** Paper presented as keynote address at the International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation, Tenerife, Spain, 2002.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkler and Trickle Irrigation.** Chapman and Hall, New York, 1990.

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, Agriculture and Environment**, Helsingue, v. 13, p. 179-183, 2015.

KOUMANOV, K. S.; HOPMANS, J. W.; SCHWANKL, L. W. Spatial and temporal distribution of root water uptake of an almond tree under microsprinkler irrigation, **Irrigation Science**, Berlim, v. 24, p. 267-278, 2006.

KUSCU, H.; BOLUKTEPE, F. E.; DEMIR, A. O. Performance assessment for irrigation water management: A case study in the Karacabey irrigation scheme in Turkey. **African Journal of Agricultural Research**, Lagos, v. 4(2), p. 124-132, 2009.

LÓPEZ-MATA, E.; TARJUELO, J. M.; JUAN, J. A. DE; BALLESTEROS, R.; DOMÍNGUEZ, R. A. Effect of irrigation uniformity on the profitability of crops. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p.190-19, 2010.

MANTOVANI, E. C. **Avalia**: manual do usuário. Viçosa, EMBRAPA, 2002. 100 p.

MARTINS, C. A. S., ROCHA, M. J. R., REIS, E. F. **Avaliação do desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão em área cultivada na Região Sul Capixaba**. In: XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação Universidade do Vale do Paraíba, 2009, São José dos Campos. Anais de Trabalhos Completos (CD-Rom). São José dos Campos-SP: UNIVAP, 2009.

MERRIAN, J.L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Agricultural and Irrigation. Engineering Department, Utah State University, p. 217, 1978.

MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao controle estatístico de qualidade**. Tradução: FARIAS, A. M. L.; FLORES, V. R. L. F.; LAURENCEL, L. C. 4. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

PLETSCH, T. A.; CRUZ, R. L.; MAZZER, H. R.; OLIVEIRA, E. F. Desempenho de gotejadores com uso de esgoto doméstico tratado. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 2, p. 243-253, 2009.

SANTOS, D. A.; FREIRE, F. G. C., SANTOS, F. S. S.; DOS SANTOS, M. M. S.; LIMA, R. M. S.; SANTOS, W. O. **Avaliação da Uniformidade de Aplicação de água na irrigação por microaspersão na cultura da banana em São João do Jaguaribe-CE**. In: INOVAGRI: International Meeting, Fortaleza, 2012.

SILVA, R. A.; SILVA, A. M. Avaliação das características hidráulicas do Microdifusor autocompensante Dan Jet 7200. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 4, p.873-878. 2003.

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, J. G. F.; RAMOS, M. M.; SILVA, C. M.; CORDEIRO, E. A. Recuperação de gotejadores obstruídos devido à utilização de águas ferruginosas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 1-6, 2004.

ARTIGO 2: ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA UNIFORMIDADE DA IRRIGAÇÃO POR MICROASPERSÃO UTILIZANDO O CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE

RESUMO

O trabalho teve como objetivo avaliar um sistema de irrigação por microaspersão com bombeamento de água por sistema fotovoltaico, através dos coeficientes de uniformidade CUC e CUD e da energia total produzida ($W.h^{-1}$) pelo sistema, utilizando o controle estatístico de qualidade, comparando os gráficos de controle de Shewhart, Média Móvel Exponencialmente Ponderada (MMEP) e Soma Acumulativa (CUSUM), e classificando os processos empregando o índice de capacidade do processo. O trabalho foi desenvolvido em laboratório, com dois sistemas distintos, com e sem armazenamento de energia. Para cada um desses sistemas foram realizados 25 ensaios, com pressão constante e medição da tensão e da corrente durante os ensaios. Foram simulados para os dados dos ensaios diferentes espaçamentos entre microaspersores, determinando os seis tratamentos usados: T1: espaçamento de 1,0 x 1,0 m com armazenamento de energia; T2: espaçamento de 1,0 x 1,5 m com armazenamento de energia; T3: espaçamento de 1,5 x 1,0 m com armazenamento de energia; T4: espaçamento de 1,0 x 1,0 m sem armazenamento de energia; T5: espaçamento de 1,0 x 1,5 m sem armazenamento de energia; T6: espaçamento de 1,5 x 1,0 m sem armazenamento de energia. A energia produzida ($W.h^{-1}$) no sistema sem armazenamento de energia foi superior, porém se recomenda a utilização do sistema com armazenamento de energia devido ao processo ter menor variabilidades e maior confiabilidade, além de manter estável o sistema elétrico, em relação a tensão, não danificando a bomba hidráulica como nos tratamentos sem armazenamento de energia. Quanto aos espaçamentos, quanto menor, maior a uniformidade do sistema de irrigação. Os gráficos de controle foram adequados para diagnosticar os tratamentos sob controle, sendo os de MMEP relevantes para detectar as pequenas variabilidades decorrentes nos ensaios. O índice de capacidade do processo foi relevante para classificar os processos utilizados. O controle estatístico de qualidade foi adequado para determinar as variabilidades dos processos, recomendando utilizar o sistema proposto no tratamento T1, devido a sua menor variabilidade em relação aos gráficos de controle, maior uniformidade de distribuição de água e maior classificação em relação ao índice de capacidade do processo.

Palavras-chave: Gráficos de controle CUSUM, gráficos de controle MMEP, gráficos de controle de Shewhart, índice de capacidade do processo

ARTICLE 2: PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY IN MICROSPRINKLER IRRIGATION UNIFORMITY USING QUALITY CONTROL OF STATISTICAL

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate a micro-sprinkler irrigation system with water pumping by photovoltaic system, through the CUC and DU uniformity coefficients and the total energy produced (Wh^{-1}) by the system using the statistical quality control, comparing the Shewhart control charts, Exponentially Weighted Moving Average (EWMA) and Cumulative Sum (CUSUM) and classifying the processes using the process capability index. The work was developed in the laboratory, with two distinct systems, with and without energy storage. For each of these systems, 25 tests were performed, with constant pressure and voltage and current measurements during the tests. Different spacing between microsprinklers were simulated for the test data, determining the six treatments used: T1: 1.0 x 1.0m spacing with energy storage; T2 spacing of 1.0 x 1.5m with energy storage; T3: spacing of 1.5 x 1.0m with energy storage; T4: 1.0 x 1.0m spacing without energy storage; T5: 1.0 x 1.5m spacing without energy storage; T6: spacing of 1,5 x 1,0 m without energy storage. The energy produced ($W h^{-1}$) in the system without energy storage was superior, however, it is recommended to use the system with energy storage due to the smaller variability and reliability, besides keeping the electrical system stable, in relation to the voltage, not damaging the hydraulic pump as in the treatments without energy storage. As far as the spacings are concerned, the smaller the uniformity of the irrigation system. The control charts were adequate to diagnose the treatments under control, and the EWMA were relevant to detect the small variabilities resulting from the tests. The process capability index was relevant for classifying the processes used. The statistical quality control was adequate to determine the variability of the processes, recommending to use the system proposed in T1 treatment, due to its lower variability in relation to the control graphs, greater uniformity of water distribution and higher classification in relation to the capacity index The process.

Keywords: CUSUM control charts, EWMA control charts, Shewhart control charts, Process Capability Index.

1 INTRODUÇÃO

A energia, em suas mais variadas formas, é um recurso indispensável para a humanidade, sendo a eletricidade, em termos de suprimento energético, umas das formas mais interessantes e convenientes de energia, tornando-se estratégica para o desenvolvimento de muitos países e regiões.

Para que as nações alcancem o nível de progresso almejado é necessário pensar no desenvolvimento sustentável, principalmente no que tange à acessibilidade à fonte energética. Atualmente, o problema de acesso à energia é predominantemente rural, sendo que, segundo dados do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), juntamente a Organização Mundial da Saúde (OMS), em 2015, em torno de 85% ou 1,1 de 1,3 bilhão de pessoas sem acesso à energia estão nas áreas rurais, sendo o problema ainda mais grave quando se fala em energia limpa (BHATTACHARYYA, 2012).

Dentre as localidades desprovidas de atendimento à rede elétrica, estão as áreas rurais produtoras de alimentos e, diante deste cenário, torna-se necessária a adoção de práticas tecnológicas que contribuam para o acesso à eletricidade, viabilizando o aumento da produção de alimentos não só em termos de quantidade, como também em qualidade. Uma destas tecnologias é a promoção da irrigação (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008) através do uso de energias alternativas, provenientes de fontes renováveis e com fácil disponibilidade (BARDI; EL ASMAR; LAVACCHI, 2013; BECKMAN; XIARCHOS, 2013; CARROQUINO; DUFO-LÓPEZ; BERNAL-AGUSTÍN, 2015).

Além da adversidade relativa ao acesso de energia, há o problema relacionado ao uso da água, que expõe que, de acordo com o relatório da ONU (2015), cerca de 70% é utilizada para irrigação. Posto isto, é primordial o seu bom aproveitamento e a máxima eficiência de uso, pois conforme o mesmo relatório estima-se que as reservas hídricas do mundo podem encolher até 40% até 2030.

Diante do alarmante quadro hídrico, aliar tecnologias como a irrigação de qualidade, principalmente em relação à uniformidade, com fontes renováveis de energia é de suma importância para a solução de problemas globais. Uma técnica exemplar em termos sustentáveis é o bombeamento de água com uso de painéis fotovoltaicos, principalmente em áreas rurais.

A deficiência de atendimento elétrico e o alto custo do diesel, no caso de bombeamento d'água por meio de motores à combustão, são requisitos que afetam a irrigação de uma localidade. Portanto, o uso da energia solar para o bombeamento de água por meio da tecnologia fotovoltaica é uma alternativa promissora à eletricidade convencional e para sistemas baseados com bombeamento à diesel (CHANDEL; NAIK; CHANDEL, 2015; ROHIT; KARVE; KHATRI, 2013).

A utilização de sistemas de bombeamento de água à base de diesel apresenta como desvantagens exigirem combustíveis caros, altos custos de manutenção e impactos ambientais negativos, como ruídos e poluição do ar (FOSTER; MAJID; COTA, 2014).

Com a escassez das fontes de energia convencionais (ou fósseis) e o aumento de custos do diesel, aliados à diminuição constante dos custos dos módulos fotovoltaicos, os sistemas de bombeamento por painéis que utilizam esta tecnologia estão se tornando financeiramente atraentes, em comparação com outros sistemas. A viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos foi avaliada por uma série de autores, como Eduard e Water (1997), Sako et al. (2011), Lal, Kumar e Rajora (2013), Kolhe, Kolhe e Joshi (2002), Rehman e Sahin (2014) e Odeh, Yohanis e Norton (2006), com resultados convincentes.

O bombeamento de água com painel fotovoltaico é frequentemente usado para a irrigação de culturas, na pecuária e no abastecimento de água residencial e, em muitos casos, rentáveis. A tecnologia fotovoltaica para bombeamento de água específica para irrigação é utilizada comumente em pequenas áreas e culturas, como hortaliças e frutíferas (KELLEY et al., 2010; BRIASSOULIS et al., 1997; PARDOSSI; TOGNONI; INCROCCI, 2004; RECA et al., 2016).

No Brasil, o bombeamento de água por meio de painel fotovoltaico pode representar uma solução às famílias em pequenas propriedades rurais (VILELA, 2004), principalmente em regiões áridas e semiáridas, porém cabe lembrar que o emprego do painel exige o conhecimento sobre a tensão, a corrente e a potência geradas pelo sistema, assim como as características do conjunto motobomba e a radiação média da região em todas as estações do ano (MICHELS et al., 2009).

A fim de aumentar a sustentabilidade dos sistemas de bombeamento de água através da energia solar fotovoltaica, especificamente em relação ao controle do consumo de água e sua maior eficiência, pode-se utilizar a irrigação localizada ou microirrigação, como o gotejamento e microaspersão (AWASTHY et al., 2014).

A irrigação localizada é considerada um dos métodos mais eficientes; todavia, não era julgada como viável devido ao alto custo. Este sistema de irrigação foi submetido a vários estudos e inovações tecnológicas que o tornaram acessível economicamente, viabilizando seu uso (VERMA et al., 2004; UPADHYAY, 2003).

Dentre as irrigações localizadas, a microaspersão é a irrigação realizada como a aspersão convencional, porém com menores áreas de molhamento e vazões. De acordo com Awasthy et al. (2014), a microaspersão apresenta rendimentos favoráveis na economia de água, eficiência, redução de ervas daninhas, redução da salinidade do solo, redução de pragas e doenças agrícolas, maior controle da água, eficiência no uso de fertilizantes, controle de erosão do solo e aumento da produtividade da cultura.

Um sistema de irrigação, para ter um bom desempenho, deve apresentar uma boa uniformidade de distribuição de seus emissores. A uniformidade está associada à variabilidade da lâmina de irrigação ao longo da área molhada, sendo expressa por índices ou coeficientes.

A uniformidade de irrigação é influenciada por uma série de fatores, como pressão de serviço, diâmetro dos bocais, geometria e rugosidade dos orifícios, inclinação e velocidade de lançamento do jato, altura do emissor em relação ao solo, estabilidade da haste de sustentação do emissor, que deve ser mantida sempre na vertical, distância dos microaspersores ao caule das plantas e principalmente fatores climáticos, como velocidade e direção do vento (CONCEIÇÃO, 2002).

Na microaspersão, a uniformidade é afetada principalmente pelo projeto hidráulico, variações de fabricação e espaçamento entre emissor e entupimento (BARRAGAN, 2010).

A fim de avaliar a uniformidade de um sistema de irrigação e a uniformidade de aplicação, é comum utilizar coeficientes de uniformidade de distribuição, que expressam a variabilidade de aplicação das lâminas de irrigação (FRIZZONE, 1992). Existem diversos coeficientes que monitoram e avaliam a uniformidade de aplicação para sistemas de irrigação por gotejamento, como o coeficiente de variação de vazão total conhecido como coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), proposto por Christiansen (1942) e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), desenvolvido por Keller e Karmeli (1975) e Merriam e Keller (1978)

Para melhor análise dos sistemas de bombeamento de água fotovoltaico e do sistema de irrigação, pode-se utilizar o controle estatístico de qualidade (CEQ), que é uma técnica que consiste em analisar o processo, estabelecer padrões, comparar desempenhos, verificar e estudar desvios, buscar e implementar soluções e analisar novamente o processo após modificações, objetivando a melhoria dos mesmos (MONTGOMERY, 2009).

A busca pela qualidade em processos, produtos e serviços tem sido a estratégia cada vez mais adotada por empresas, pois possibilita a competitividade no mercado. Os consumidores consideram a qualidade como um aspecto prioritário na aquisição de produtos e serviços, tornando-a, na maioria das vezes, o fator de escolha no momento da aquisição (FRIGO, 2014; MONTGOMERY, 2009).

A técnica de controle estatístico de qualidade prevê que um sistema está sujeito a alterações e variações, sendo importante avaliar se estas alterações/variações são significativas. Quando um processo está sob controle estatístico, o mesmo se apresenta dentro dos limites de controle inferior e superior, e pode, assim, ser considerado com um bom processo (RUSSO, 2002; BORGES; FERREIRA; OLIVEIRA, 2008; MONTGOMERY, 2009).

O controle estatístico de qualidade surge como uma alternativa para melhorar e monitorar a qualidade de um sistema de irrigação. Tal controle ocorre por meio de gráficos que auxiliam no seu desempenho e na análise dos dados (FRIGO, 2014). Uma das ferramentas do controle estatístico de qualidade são os gráficos de controle, os quais se mostram eficientes e de simples interpretação no monitoramento da média e da variabilidade da característica da qualidade em observação (MONTGOMERY, 2009).

Os gráficos ou cartas de controle estatístico são ferramentas de monitoramento do desempenho de processos, suas medições são realizadas em pontos espaçados no tempo, resultando em gráficos temporais que, quando comparados aos resultados obtidos nos limites de controle, os valores fora dos limites indicam causas especiais de variabilidade ou anomalias ao processo, que prejudicam a qualidade (BORGES; FERREIRA; OLIVEIRA, 2008; HERMES et al., 2014). Os gráficos de controle mais utilizados são os gráficos de controle de Shewhart (X-barra), o Média Móvel Exponencialmente Ponderada (MMEP) e de Soma Acumulativa (CUSUM).

O mais destacável dentre os gráficos de controle citados é o de Shewhart para medidas individuais, devido a sua simplicidade de construção e interpretação, sendo aplicado em situações que a amostra consiste de uma única unidade. Em muitas aplicações dos gráficos de controle para unidades individuais utiliza-se a amplitude móvel de suas observações consecutivas como base para estimar a variabilidade do processo (MONTGOMERY, 2009).

Porém, de acordo com Morais (2001), as cartas de controle de Shewhart são lentas para diagnosticar pequenas variações em processos, pois utilizam a informação da última amostra, desprezando as demais amostras, sendo que uma forma de elevar a aptidão de detecção de pequenas variações é acumular informações de amostras, como o método da soma acumulativa (CUSUM) e da Média Móvel Exponencialmente Ponderada (MMEP).

Os gráficos de controle do tipo MMEP é usado para diagnosticar as variações pequenas de forma mais rápida. Acumulando informações sucessivas, pondera as amostras e atribui maior peso para as amostras mais recentes. Para variações grandes, o MMEP é mais lento no diagnóstico de variações quando comparado aos gráficos de Shewhart (MONTGOMERY, 2009; FRIGO, 2014; COSTA, EPPRESCHT; CARPINETTI, 2008; SOUZA et al., 2008).

Em relação aos gráficos de CUSUM, estes armazenam informações acumuladas de todos os pontos, diagnosticando, assim, de forma mais fácil as pequenas variações, sendo este considerado um gráfico de controle com qualidade superior para situações específicas, diminuindo os incidentes de alarme falso, que é o erro de afirmar que o processo está fora de controle quando, na realidade, está sob controle (SAMOHYL, 2009).

Outra ferramenta do controle estatístico do processo (CEP) é o estudo da capacidade do processo através de índices, que refletem a capacidade que este tem de fabricar produtos de acordo com as especificações dos clientes (BORGES; FERREIRA; OLIVEIRA, 2008), sendo que, de acordo com Werkema (1995), um processo pode não ser satisfatório ou capaz pelo fato de apresentar uma elevada variabilidade ou ainda a média estar deslocada em relação ao ponto médio dos limites de especificação.

O índice de capacidade de processo (C_p) é um parâmetro adimensional que indiretamente mede o quanto o processo consegue atender às especificações, sendo que quanto maior o seu valor, melhor o processo consegue atender às exigências (COSTA, EPPRESCHT; CARPINETTI, 2008; BORGES; FERREIRA; OLIVEIRA, 2008).

Em relação à uniformidade de um sistema de irrigação, Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010) e Frigo (2014) utilizaram o controle de qualidade do processo, através dos gráficos de controle e/ou índice de capacidade do processo para avaliar um sistema de irrigação por aspersão, assim como Hernandez (2010); Hermes et al. (2015); Hermes et al. (2013), Klein et al. (2015), Juchen, Suszek e Vilas Boas (2013) e Tessaro (2012) que também utilizaram as ferramentas estatísticas do controle de qualidade do processo, porém em um sistema de irrigação por gotejamento, e concluíram que o índice de capacidade do processo é diretamente proporcional ao aumento da uniformidade do sistema, com a capacidade de monitorar o controle da irrigação dentro dos limites satisfatórios, além dos gráficos de controle contribuírem para o monitoramento do processo da irrigação.

Com isso, o objetivo da pesquisa foi de avaliar a irrigação em um sistema de microaspersão, determinar o CUC e CUD e verificar a influência do armazenamento de energia e espaçamento entre microaspersores através de gráficos de controle e comparar os resultados da utilização de gráficos de controle de Shewhart para medidas individuais, gráficos de controle de Média Móvel Exponencialmente Ponderada (MMEP) e gráficos de controle de Soma Acumulativa (CUSUM), e classificar os processos utilizando o índice de capacidade do processo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios de irrigação desta pesquisa ocorreram no Laboratório do Projeto CASA (Centro de Análises de Sistemas Alternativos de Energia), como demonstrado na Figura 1, na Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, campus de Cascavel, com Latitude 24°59' Sul, Longitude 53°23' Oeste e altitude de 750 metros com relação ao nível do mar e de acordo com o Programa SUNDATA (CRESESB, 2016) radiação média de 4,80 KWh m⁻².dia⁻¹, com classificação climática Cfa (KOPPEN-GEIGER, 1928), com verões moderadamente quentes e invernos frescos.



Figura 1 a) Foto externa do Laboratório do Projeto CASA; b) Foto interna do Laboratório

As variáveis da pesquisa controláveis foram: pressão de entrada, passagem de água, vento, radiação solar, temperatura, carga hidráulica, tensão e corrente do sistema; sendo que as não controláveis foram: a temperatura da água, sendo utilizada água tratada, a pressão no final do sistema, sendo medido apenas a pressão inicial, através de manômetro analógico, e o entupimento dos emissores.

Para a realização dos ensaios de irrigação optou-se por dois sistemas, ambos alimentados com energia solar por meio de painel fotovoltaico, composto de três módulos da marca SOLARTEC, modelo KS50, com potência nominal de 50W, conectados em paralelo. Para o primeiro sistema, exibido na Figura 2a, os módulos fotovoltaicos estavam ligados a uma unidade de armazenamento de energia, a qual consistia em uma bateria da marca AJAX, modelo Energy EN150, conectada a um controlador de carga da marca PHOCOS, modelo CX 40. Com o objetivo de manter a tensão e a corrente constantes para a bomba hidráulica, utilizou-se uma bomba de diafragma da marca SHURFLO, modelo 8000, com vazão máxima de 490 Lh⁻¹ e com capacidade manométrica de 2,07 bar.

No caso do segundo sistema, apresentado na Figura 2b, os módulos fotovoltaicos foram ligados diretamente à bomba hidráulica, não ocorrendo o armazenamento de energia.

Nos dois sistemas o armazenamento de água ocorreu por meio de um reservatório de 100 litros, situado a 1,50 metros de altura em relação a bomba hidráulica.

Os ensaios mencionados contaram com um microaspersor da marca NAANDANJAIN IRRIGATION modelo HADAR 7110, usado, com diâmetro molhado de 6,0m, vazão de 41 L.h^{-1} quando trabalhado na pressão de 2,0 bar e, por fim, o equipamento estava posicionado a 0,25m do solo, conforme instruções da ABNT (2004).

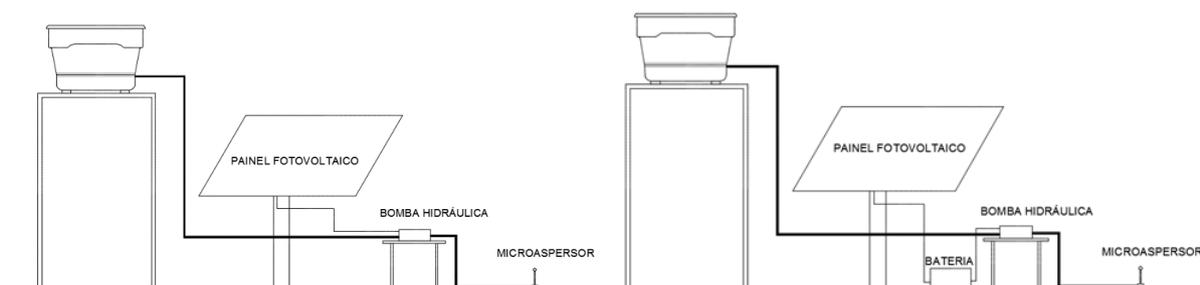


Figura 2 a) Layout do sistema sem armazenamento de energia; b) Layout do sistema com armazenamento de energia.

Objetivando realizar a medição da energia gerada pelo sistema fotovoltaico durante os ensaios com microaspersor, dois multímetros da marca INSTRUTHERM estavam conectados, um deles em paralelo com os terminais de saída do painel fotovoltaico para a medição da tensão elétrica em corrente contínua e o outro multímetro fora conectado em série com a bomba hidráulica para a medição da corrente consumida pela carga, como mostra a Figura 3.

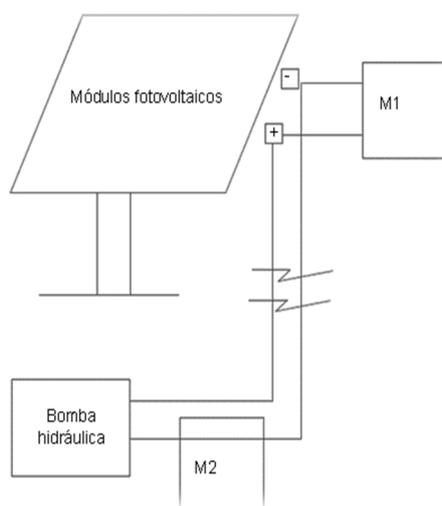


Figura 3 Sistema elétrico para medição da tensão (V) e corrente (A). M1: Multímetro utilizado para medição da tensão elétrica do sistema fotovoltaico; M2: multímetro utilizado para a medição da corrente elétrica.

Mediram-se a tensão e a corrente dos sistemas a cada 5 minutos durante os ensaios, calculando posteriormente a média da hora, sendo que a partir destes calculou-se a potência produzida (Watts), utilizando a Equação 1.

$$\text{Potência (W)} = \text{Tensão (V)} \cdot \text{Corrente (A)} \quad \text{Eq. (01)}$$

De posse dos dados de potência, pode-se calcular os valores de energia produzida em Watts.hora⁻¹, sendo igual ao valor de potência, pois o ensaio foi durante 1 hora.

Utilizou-se também os dados de radiação solar da estação meteorológica IPARANCA4, instalada na Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, através do piranômetro de silício, da marca ONSET, modelo S-LIB-M003.

A metodologia adotada para coleta dos dados está de acordo com a ABNT (2004). Os 100 coletores empregados estavam distribuídos em malha, com espaçamento de 0,50 metros entre eles. Realizaram-se 25 ensaios com o microaspersor com armazenamento de energia e sem armazenamento de energia, cada um deles com a duração de 1 hora. Vale lembrar que antes de iniciar os experimentos o sistema ficava ligado até que se estabilizasse em relação à vazão e à pressão, mantendo esta última em 2,0 bar durante todo o período de análise. Os ensaios eram realizados entre as 10 horas da manhã e as 14 horas.

Os dados de volume coletados nos ensaios foram submetidos à análise dos coeficientes de uniformidade. As sobreposições dos mesmos deram-se através do software Catch3D, em três espaçamentos entre microaspersores, de 1,0 x 1,0 m; 1,0 x 1,5 m e 1,5 x 1,0 m.

Para averiguar a uniformidade, adotou-se as seguintes combinações de fatores: armazenamento de energia e espaçamento, com os seguintes tratamentos T1: espaçamento de 1,0 x 1,0 m com armazenamento de energia; T2: espaçamento de 1,0 x 1,5 m com armazenamento de energia; T3: espaçamento de 1,5 x 1,0 m com armazenamento de energia; T4: espaçamento de 1,0 x 1,0 m sem armazenamento de energia; T5: espaçamento de 1,0 x 1,5 m sem armazenamento de energia; T6: espaçamento de 1,5 x 1,0 m sem armazenamento de energia. Para cada uma dessas simulações de combinação de espaçamentos e de armazenamento de energia, calculou-se a uniformidade com os totais sobrepostos em cada coletor, média, desvio padrão, normalidade pelo método de Anderson-Darling, além da autocorrelação dos dados e coeficiente de variação.

As variáveis respostas dos ensaios foram a precipitação coletada no coletor amostrado (mm.h⁻¹) e a energia produzida (W.h⁻¹), sendo realizados a análise de variância e o teste de médias de Tukey para estas variáveis.

A fim de avaliar o sistema de irrigação, utilizou-se o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), conforme as Equações 02 e 03, respectivamente.

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_a - q_i|}{nq_a}\right) \times 100 \quad \text{Eq.(02)}$$

Sendo: q_i - lâmina de cada emissor mm.h^{-1} ; q_a - lâmina média dos emissores mm.h^{-1} ; n - número de emissores.

Para a classificação dos dados de CUC foi empregada a proposta de Bernardo, Soares e Mantovani (2008), que classificam a uniformidade da aplicação conforme a Tabela 1.

Tabela 1 Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC)

CUC	Classificação
90% ou maior	Excelente
80% até 90%	Bom
70% até 80%	Regular
60% até 70%	Ruim
Menor que 60%	Inaceitável

Fonte: Bernardo, Soares e Mantovani (2008)

Para CUD:

$$CUD = \frac{\bar{q}_{25}}{\bar{q}_a} 100 \quad \text{Eq.(03)}$$

Sendo: q_{25} - lâmina média das 25% menores descargas dos emissores mm.h^{-1} ; q_a - lâmina média dos emissores mm.h^{-1} .

Com relação à classificação dos dados de CUD foi utilizada a proposta de Bralts (1986), que classifica a uniformidade da aplicação conforme a Tabela 2.

Tabela 2 Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)

CUC	Classificação
90% ou maior	Excelente
80% até 90%	Bom
70% até 80%	Regular
60% até 70%	Ruim
Menor que 60%	Inaceitável

Fonte: Bralts (1986)

Com o intuito de monitorar os coeficientes de uniformidade, foram confeccionados três tipos de gráficos de controle, o primeiro, as cartas de controle de Shewhart foram

confeccionadas necessitando calcular o Limite Superior de Controle (LSC) e o Limite Inferior de Controle (LIC), através das Equações 04 e 05.

$$LSC = \bar{x} + \frac{3AM}{d_2} \quad \text{Eq.(04)}$$

$$LIC = \bar{x} - \frac{3AM}{d_2} \quad \text{Eq.(05)}$$

Em que: LSC - limite superior de controle; LIC - limite inferior de controle; \bar{x} - média; AM - amplitude móvel das observações (valor encontrado para cada parâmetro em cada coletor); d_2 - valor pré-determinado (tabelado), de acordo com o número de repetições.

Para o gráfico de controle MMEP, pode ser produzido pelas variáveis do valor médio e o número da amostra i , ou tempo. O gráfico de MMEP pode ser delimitado pela Equação 06.

$$Z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)Z_i - 1 \quad \text{Eq. (06)}$$

Sendo: σ - é o desvio padrão dos dados; λ - peso dado a cada amostra ($0 < \lambda \leq 1$), sendo λ utilizado de 0,20.

Para o gráfico de controle do tipo MMEP para calcular os limites de controle foram utilizadas as fórmulas apresentadas nas Equações 07 e 08.

$$LSC = \bar{x} + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad \text{Eq. (07)}$$

$$LIC = \bar{x} - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad \text{Eq. (08)}$$

Sendo: \bar{x} - média dos dados; L - número de desvios padrão da média de controle que se quer detectar, sendo o L utilizado igual a 2).

Para a terceira forma de gráficos de controle, de CUSUM, em que os desvios em relação à média são acumulados no tempo, foi utilizada a Equação 09 para gerar a soma acumulada.

$$C_i = \sum_{j=1}^i (x_j - \mu_0) \quad \text{Eq. (09)}$$

Sendo: x_j - média da j -ésima amostra; C_i - soma acumulativa até a i -ésima amostra; μ_0 - alvo, sendo que na pesquisa foi utilizada a média do tratamento.

No caso dos gráficos de CUSUM estes acumulam desvios acima e abaixo do valor alvo, sendo chamadas de CUSUM superior e CUSUM inferior, sendo expressas pelas Equações 10 e 11.

$$C_i^+ = \text{máx}[0; x_i - (\mu_0 + K) + C_{i-1}^+] \quad \text{Eq. (10)}$$

$$C_i^- = \text{máx}[0; (\mu_0 + K) - x_i + C_{i-1}^-] \quad \text{Eq. (11)}$$

Sendo: x_i - observação no tempo; K - valor de compensação, sendo utilizado na pesquisa o valor de 0,5.

Objetivando avaliar o índice de capacidade do processo (C_p), optou-se pela metodologia proposta por Montgomery (2009), usada quando o processo se encontra estável, ou seja, quando apresenta controle estatístico e quando a variável de interesse tenha distribuição próxima da normal. Para a pesquisa, foi adotada o processo dos ensaios de irrigação como unilateral para o fator uniformidade, estimando os valores de C_p inferior, com o LIC de 80 e 90%, sendo estes utilizados devido à classificação de Bernardo, Soares e Mantovani (2008) e um processo bilateral para o fator da energia produzida total, sendo calculado o índice desse fator através dos valores obtidos pelo método de Shewhart, MMEP e CUSUM.

O índice de capacidade do processo é expresso pela Equação 12:

$$C_p = \frac{LSC - LIC}{6\sigma} \quad \text{Eq. (12)}$$

Quando o processo se encontra estável e o processo é unilateral, podem ser aplicados os índices de capacidade do processo inferior e superior, C_{pi} e C_{ps} , respectivamente, demonstrados nas Equações 13 e 14, e ainda o índice C_{pk} , com o objetivo de medir a distância entre o limite de especificação mais próxima do valor esperado, sendo este do ponto de vista prático mais avançado que o C_p (MONTGOMERY, 2009), sendo esse índice o menor valor entre C_{ps} e C_{pi} , como demonstrado na Equação 15.

$$C_{pi} = \frac{\bar{x} - LIC}{3\sigma} \quad \text{Eq. (13)}$$

$$C_{ps} = \frac{LSC - \bar{x}}{3\sigma} \quad \text{Eq. (14)}$$

$$C_{pk} = (C_{pi}, C_{ps}) \quad \text{Eq. (15)}$$

Sendo: LSC e LIC - limites superior e inferior de controle, respectivamente; σ - desvio padrão populacional da variável em estudo, calculado pela Equação 16.

$$\sigma = \frac{AM}{d_2} \quad \text{Eq. (16)}$$

Ainda com relação à metodologia de Montgomery (2009), quando as especificações são unilaterais, como nesta pesquisa, e os processos são existentes, como no caso de equipamentos usados, a classificação prevê valores do índice de capacidade do processo $\geq 1,25$ para que o processo seja considerado capaz ou adequado, segundo as especificações. Tal classificação do processo é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 Valores mínimos de classificação do processo

	Especificações Bilaterais	Especificações Unilaterais
Processos Existentes	1,33	1,25
Processos Novos	1,50	1,45
Segurança, força ou parâmetro crítico (processos existentes)	1,50	1,45
Segurança, força ou parâmetro crítico (processos novos)	1,67	1,60

Fonte: Montgomery (2009)

As técnicas de controle estatístico de qualidade, bem como os gráficos de controle de índice de capacidade do processo foram calculados apenas para os dados normais, como especificado por Montgomery (2009) e para dados não autocorrelacionados, como sugerido pelo mesmo autor e corroborado por Frigo (2014). A estatística descritiva e as técnicas de controle estatístico de qualidade foram realizadas utilizando o software MINITAB, versão 16.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados para a variável energia produzida, dado em $W h^{-1}$, e a precipitação dos coletores, em $mm h^{-1}$, são apresentados a Tabela 4 com a estatística descritiva.

Tabela 4 Estatística descritiva

Trat.	Média Energia ($W h^{-1}$)	DP Energia ($W h^{-1}$)	CV Energia (%)	p-valor Energia	Média Prec. ($mm h^{-1}$)	DP Prec. ($mm h^{-1}$)	CV Prec. (%)	p-valor Prec.
C/A	4,4028	0,1615	3,67	0,684	0,9775	0,0419	4,29	0,006*
S/A	5,7148	0,3177	5,56	0,596	1,0203	0,2279	22,34	0,028*

Trat.: Tratamento; C/A: Com armazenamento de energia; S/A: Sem armazenamento de energia; DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de variação; Prec.: Precipitação coletada; *Valores não normais, sendo menores que o nível de significância de 5%.

Analisando os dados apresentados na Tabela 4, em relação à energia produzida, o tratamento sem o armazenamento de energia apresentou-se mais produtivo, porém com um desvio padrão maior do que o tratamento com o armazenamento de energia. Para os dois tratamentos em relação à energia produzida, os dados apresentaram o p-valor maior que o nível de significância de 0,05, sendo, assim, classificados como normais.

Com os dados da energia produzida ($W h^{-1}$) calculou-se a análise de variância, demonstrada na Tabela 5.

Tabela 5 Análise de variância para o fator energia produzida ($W.h-1$)

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	1	21,517	21,517	338,789*
Resíduo	48	3,05	0,064	
Total	49	24,565		

*Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F.

Como o F calculado é maior que o F tabelado (7,1956) a variância entre os tratamentos é significativa ao nível de 5%, com o tratamento sem armazenamento de energia sendo maior estatisticamente que o tratamento com armazenamento de energia em relação à energia produzida, sendo explicado pelo fato do sistema não ter controlador de carga, elevando, assim, os valores de tensão, como observado na Tabela 6.

Tabela 6 Médias coletadas de corrente e tensão

Tratamento	Média corrente (A)	Média tensão (V)
Com bateria	0,341	12,9
Sem bateria	0,336	17,01

A tensão nominal da bomba hidráulica utilizada é de 12 V, sendo que no sistema sem o uso de bateria, a média de tensão foi de 17,01 V elevando assim a potência e, conseqüentemente, a energia produzida pelo sistema, porém sistemas com tensão acima da requerida pela bomba tendem a danificar o equipamento, sendo prejudicial ao sistema,

mesmo que a energia total produzida seja maior. Neste caso, aconselha-se utilizar o sistema com armazenamento de energia, pois a tensão do sistema é próxima à tensão da bomba hidráulica utilizada.

A energia produzida ($W.h^{-1}$) foi baixa em ambos os tratamentos pelo fato da corrente (A) dos sistemas terem obtido valores baixos, apresentados na Tabela 6. De acordo com a curva de potência da bomba hidráulica (NEOSOLAR, 2016), em uma pressão de 2,0 bar e com uma tensão de 12 V, a corrente para uma performance típica é de 4,5 A, com estimativa de energia produzida de $54 W.h^{-1}$. Os resultados inferiores nos ensaios realizados ocorreram por conta do dimensionamento do sistema, pois o armazenamento de água que se localizava a 1,5 metros de altura em relação à bomba hidráulica funcionou abaixo da sua capacidade, com a corrente requerida nos sistemas ensaiados inferiores a 10% da performance típica da bomba hidráulica.

Para os dados de precipitação, apresentados na Tabela 4, a média, o desvio padrão e, conseqüentemente, o coeficiente de variação dos dados sem o armazenamento de energia apresentaram-se maiores que os dados do tratamento com o uso da bateria. O coeficiente de variação para os dados de precipitação do tratamento sem o armazenamento de energia é alto, de acordo com a classificação de Pimentel Gomes (2009). Em relação ao p-valor dos dados de precipitação, para ambos os tratamentos este está abaixo do nível de significância, sendo classificados como dados não normais.

Como os dados da precipitação não foram classificados como normais, foi utilizado para analisar a diferença entre as distribuições o teste de Mann-Whitney, adequado para amostras pequenas, com uma variação não normal, como neste caso. Os resultados do teste são apresentados abaixo:

Sendo a hipótese nula: as amostras têm distribuições idênticas.

Ao nível de 5% de significância, o Z calculado é de 1,08 e o Z tabelado de 1,96, sendo assim, não se rejeita a hipótese nula e as amostras não são diferentes.

Desta forma, compreende-se que em ambos os tratamentos não há diferenças significativas em relação a precipitação.

Analisando os dados de energia produzida e precipitação coletada, tem-se que não há uma correlação entre os dados com R^2 de 0,64 e 13,32%, para os tratamentos com armazenamento de energia e sem tratamento de energia, respectivamente.

Para diagnosticar os processos de forma mais eficiente e analisar a variabilidade dos ensaios da irrigação por microaspersão foram construídos os gráficos de controle para a energia produzida, respeitando as sugestões de Montgomery (2009), para dados normais e sem autocorrelação. Nas Figuras 4, 5 e 6 são apresentados os gráficos de controle de Shewhart, MMEP e CUSUM, respectivamente, para a variável resposta da energia produzida.

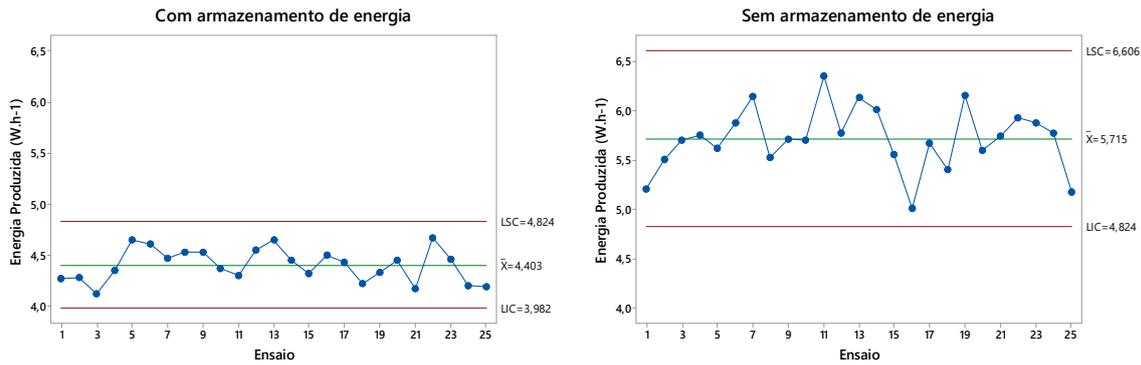


Figura 4 Gráfico de Controle de Shewhart para a Energia produzida (W h⁻¹).

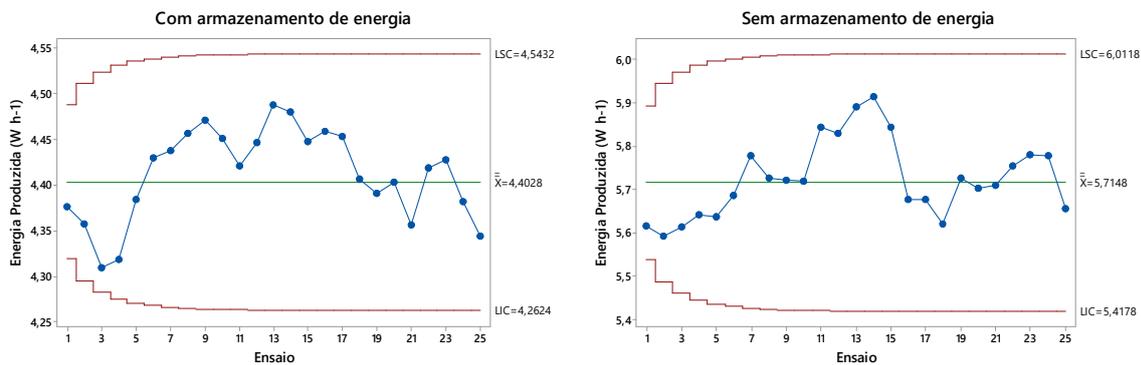


Figura 5 Gráfico de Controle de MMEP para a Energia produzida (W h⁻¹).

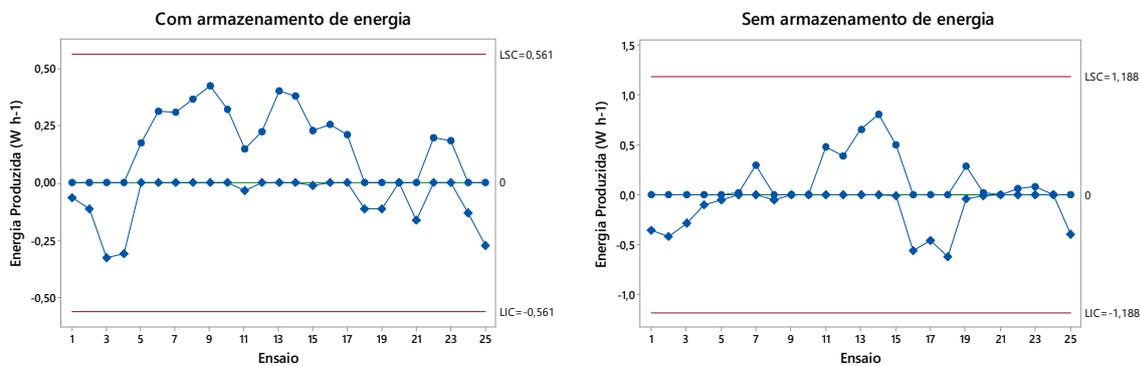


Figura 6 Gráfico de Controle de CUSUM para a Energia produzida (W.h-1).

Analisando os gráficos de controle de Shewhart para a energia produzida, em ambos os tratamentos o processo está sob controle, pois não há valores acima ou abaixo dos limites, assim como não há uma sequência ou tendência nos valores. Para os gráficos de controle MMEP, este, apesar de não apresentar pontos acima ou abaixo dos limites de controle, nos dois tratamentos apresentam uma sequência de dados acima da linha média, sendo no tratamento com armazenamento do ensaio 6 até o 17 e no tratamento sem armazenamento a sequência do ensaio 7 até o 15, o que, de acordo com Montgomery

(2009), é uma característica de processos fora de controle. Porém, como os valores apresentam a sequência acima da média, que na prática significa que quanto maior a energia produzida, melhor para o processo, essa interferência não é prejudicial para o processo, mas com variabilidade considerável de acordo com o método MMEP.

Para os gráficos de controle de CUSUM, os tratamentos não apresentam dados fora dos limites de controle. Entretanto, para o tratamento com armazenamento de energia, os dados apresentam uma sequência acima da linha média, não sendo prejudicial para o processo, demonstrando no gráfico de CUSUM o momento em que a mudança na variabilidade ocorreu.

Com os gráficos de controle da energia produzida, juntamente com as médias, pode-se assim afirmar que a energia produzida nos ensaios sem o uso da bateria é maior estatisticamente do que quando se utilizou o sistema de armazenamento de energia, sendo estes dados com variabilidade estável quando utilizados os gráficos de Shewhart e demonstrando uma maior variabilidade nos gráficos de MMEP e CUSUM, ratificando a literatura que atesta que estas duas formas de gráficos detectam as pequenas variações de forma mais rápida que os gráficos de Shewhart, porém as variações constatadas nos ensaios são devidas à sequências de dados acima da linha média, sendo favorável para o sistema fotovoltaico.

Em relação à uniformidade de distribuição de água, esta foi calculada através dos coeficientes CUC e CUD. Para a determinação destes, os dados de precipitação (mm.h^{-1}) foram sobrepostos em três diferentes espaçamentos entre microaspersores (1,0 x 1,0 m; 1,0 x 1,5 m; 1,5 x 1,0 m). A estatística descritiva para os resultados dos coeficientes de uniformidade (CUC e CUD) para as sobreposições é demonstrada na Tabela 7.

Tabela 7 Estatística descritiva dos coeficientes de uniformidade

Trat.	Média CUC	DP CUC	CV(%) CUC	p-valor CUC	AC	Média CUD	DP CUD	CV(%) CUD	p-valor CUD	AC
T1	95,97	1,57	1,64	0,582	Não	94,54	2,44	2,58	0,214	Sim
T2	95,28	1,06	1,11	0,802	Sim	91,18	2,77	3,04	<0,005*	Não
T3	94,50	1,78	1,88	0,744	Não	91,56	2,95	3,22	0,483	Não
T4	96,68	2,28	2,36	<0,005*	Não	95,29	3,42	3,59	<0,005*	Não
T5	91,54	2,88	3,14	0,044*	Não	85,43	6,13	7,17	<0,005*	Não
T6	94,12	2,41	2,56	0,010*	Não	90,19	3,52	3,90	0,232	Não

*Valores abaixo do nível de significância de 5%, dados não normais. DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variação; AC: Autocorrelação

Considerando a Tabela 7, os valores de CUC são maiores nos tratamentos 1 e 4, ou seja, com o menor espaçamento entre microaspersores de 1,0 x 1,0 m. Observa-se nos dados de CUC que os desvios padrões são mais altos nos tratamentos 4, 5 e 6, sem o armazenamento de energia.

Os ensaios apresentam altas uniformidades, acima de 90%, classificados como excelentes de acordo com classificação de Bernardo, Soares e Mantovani (2008). Tais valores foram semelhantes em outros trabalhos, como no caso de Holanda Filho et al. (2001), que realizaram a caracterização hidráulica de um microaspersor atingindo a média de 91,17% de uniformidade, assim como Silva e Silva (2003), com média de 95,47% para avaliação hidráulica de um microaspersor em diferentes pressões.

Os tratamentos sem o armazenamento de energia (T4, T5 e T6) para o parâmetro CUC apresentam o p-valor menor que 0,05, sendo, assim, classificados como não normais. O tratamento 2 foi o único que apresentou uma autocorrelação entre os dados de CUC.

Para o parâmetro de uniformidade CUD, assim como no CUC, os valores são maiores no menor espaçamento. Para os dados de CUD, os tratamentos 1, 3 e 6 são normais, porém o tratamento 1 apresenta autocorrelação entre os dados.

Em relação aos valores do CUD, somente o tratamento 5 está abaixo de 90%, sendo esse classificado como bom e os demais como excelentes, de acordo com Bernardo, Soares e Mantovani (2008). Tais resultados são ainda condizentes com Santos et al. (2012), realizando ensaios de desempenho de microaspersores para a cultura da banana, no qual obtiveram resultados variando de até 88% considerado bom, segundo a classificação de Bralts (1986). Os valores médios de CUC foram maiores que o de CUD, corroborando com os dados revelados por Pletsch et al. (2009) utilizando irrigação localizada, assim como por Faria et al. (2016) e Keller e Bliesner (1990).

Os resultados apresentados estão de acordo com outras pesquisas realizadas com irrigação localizada, como Hermes et al. (2015), com gotejamento da água residuária do processo da mandioca, em que obtiveram valores de CUD acima de 87% para todos os tratamentos. Hermes et al. (2014), utilizando gotejamento com diferentes concentrações de sólidos suspensos com água residuária da mandioca, adquiriram resultados do CUC acima de 93% nos tratamentos analisados. Klein et al. (2015), utilizando irrigação localizada por gotejamento em vinhedo obtiveram CUC acima de 95,2% para todos os tratamentos. Borssoi et al. (2012), realizando experimentos utilizando o gotejamento em diferentes pressões, obtiveram CUD acima de 85,80%.

Para os parâmetros de uniformidade CUC e CUD, foram confeccionados os gráficos de controle, aplicados apenas para os tratamentos que possuem distribuição normal e em que não há autocorrelação entre os dados.

Na Figura 7 são apresentados os gráficos de controle de Shewhart para os parâmetros CUC e CUD da uniformidade de irrigação.

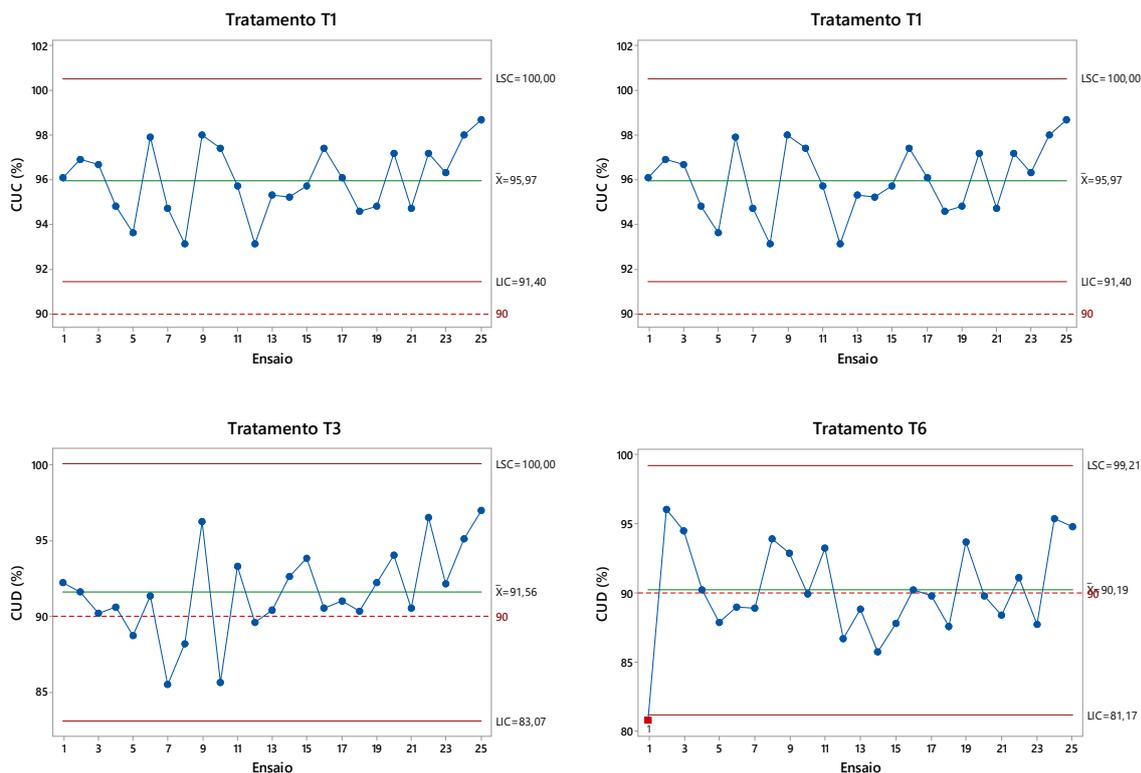


Figura 7 Gráfico de Controle de Shewhart para uniformidade de irrigação.

Investigando os gráficos de controle acima, nota-se que para o parâmetro CUC, nos tratamentos T1 e T3, o processo está sob controle e com todos os dados acima da linha de 90%, ou seja, com todos os ensaios sendo classificados como excelentes, de acordo com Bernardo, Soares e Mantovani (2008).

Em contrapartida para o parâmetro CUD, verificou-se que, para o tratamento T3, o processo está sob controle, mesmo que entre o ensaio 3 e 8 haja uma sequência de dados. Porém, de acordo com Montgomery (2009), são necessários sete ensaios em sequência para que não se tenha um controle estatístico. Os dados para este mesmo tratamento não apresentam todos os ensaios acima da linha de 90%, porém todos acima de 80%, sendo assim classificados como bons, de acordo com a classificação de Bralts (1986). No tratamento T6 o processo não está sob controle, pois existe um valor fora do limite inferior de controle.

Na Figura 8 são apresentados os gráficos de controle MMEP para o parâmetro CUC e CUD.

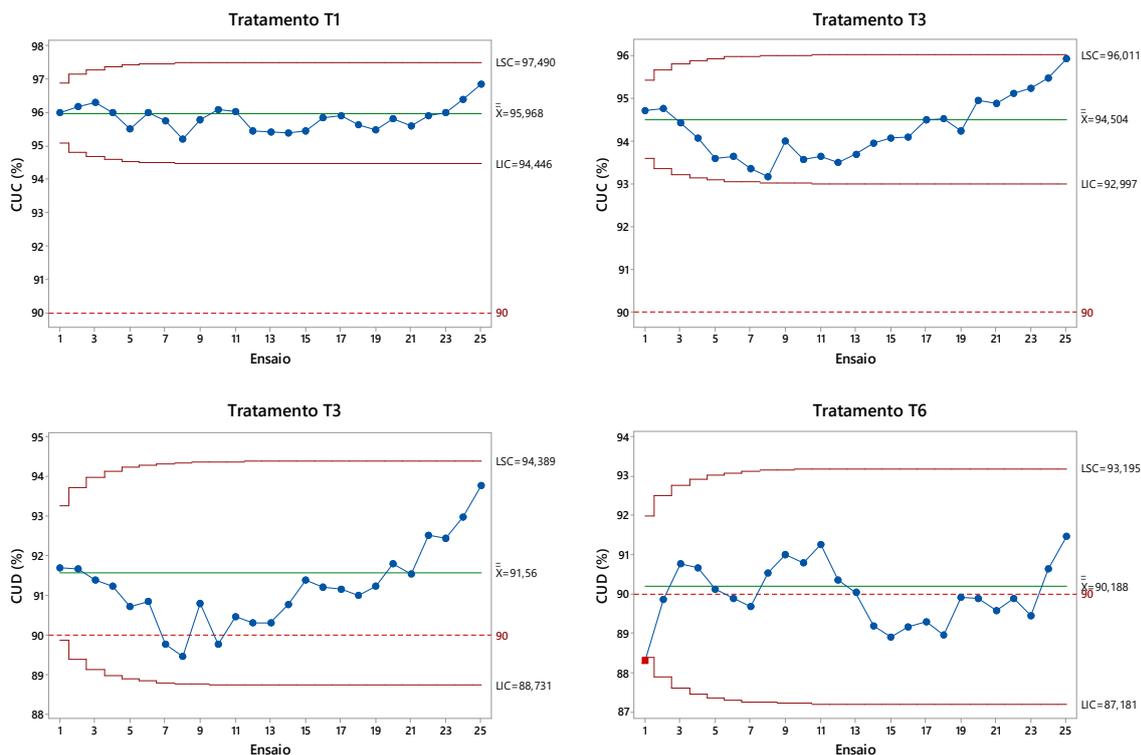


Figura 8 Gráfico de Controle de MMEP para uniformidade de irrigação.

Analisando os gráficos de controle MMEP, em todos os tratamentos ocorreram falta de controle estatístico, confirmando a habilidade destes gráficos de detectar pequenas variações no processo. Para o parâmetro CUC, os tratamentos T1 e T3 apresentam uma sequência de dados abaixo da linha média, apresentando uma variabilidade no processo desfavorável para a irrigação, pois há uma sequência de dados de diminuição da uniformidade. Na avaliação do parâmetro CUD, o tratamento T3 apresenta também sequência abaixo da linha média, a partir do ensaio 3 até o ensaio 19, considerando-se fora de controle estatístico. No tratamento T6 os dados de CUD apresentaram sequência de dados e o ensaio 1, abaixo do LIC, considerado também sem controle estatístico

Os gráficos de controle de CUSUM são demonstrados na Figura 9 para o parâmetro CUC e CUD.

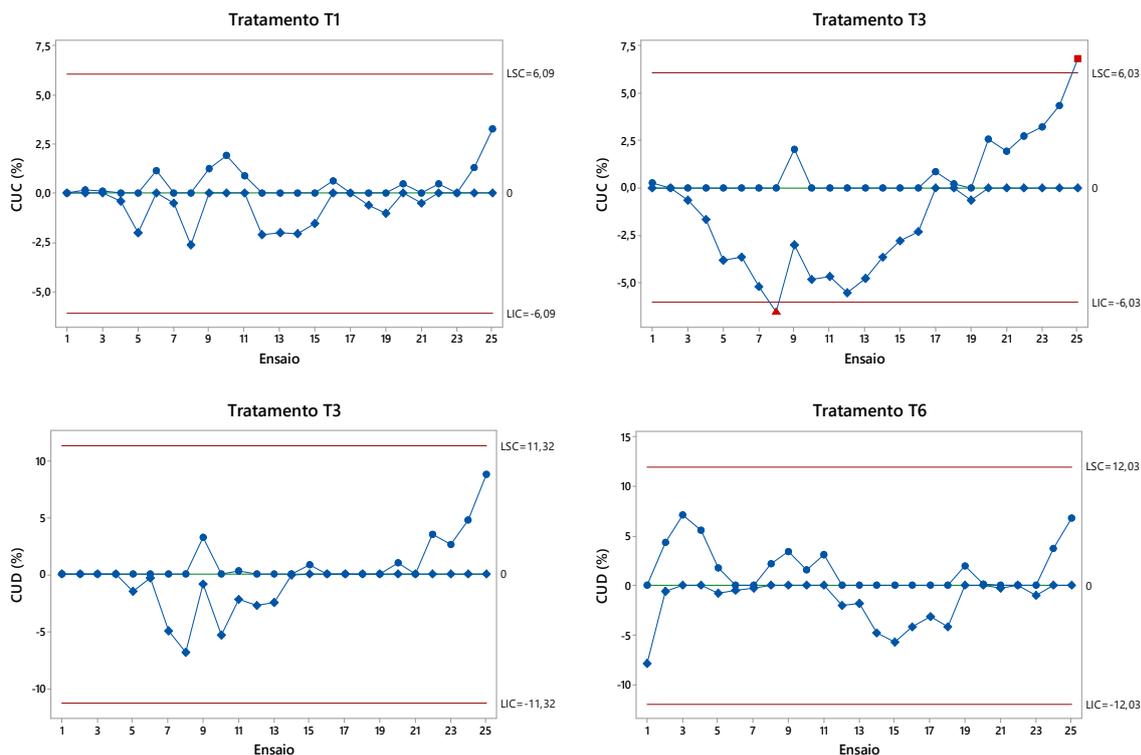


Figura 9 Gráfico de Controle de CUSUM para uniformidade de irrigação.

Nos gráficos de controle de CUSUM, no tratamento T1 em relação ao parâmetro CUC, este se apresenta sob controle, com os dados de ensaios próximos à linha média. Porém, na avaliação do tratamento T3, o mesmo não apresenta controle estatístico pois vários ensaios estão longe da linha média, apresentando uma sequência em relação à linha média, tendência de baixa e alta em momentos distintos, além do acumulado até o ensaio 8 e o acumulado do ensaio 25 estarem fora dos limites de controle. A soma acumulada do ensaio 8 fora do LIC é prejudicial para a uniformidade de irrigação por microaspersão.

Comparando os gráficos de controle utilizados, devido à pesquisa ter sido realizada em ambiente sem interferência climáticas, como vento e radiação solar, as variações que ocorreram nos processos foram pequenas e diagnosticadas da melhor forma pelos gráficos de MMEP e CUSUM. Porém, a maioria destas cartas de controle apresentaram falta de controle devido à sequências de ensaios abaixo da média, o que nos ensaios sem armazenamento de energia é influenciado pelas alterações de radiação solar, tensão e corrente, e nos ensaios com armazenamento de energia pelas tensão e corrente, além de possíveis alterações de pressão. Em suma, para este trabalho os gráficos de Shewhart são significativos, porém simples e não detectam as pequenas variações. Sendo assim, as cartas com diagnóstico mais preciso foram as de MMEP e CUSUM, com maior destaque para o MMEP, devido ao diagnóstico adequado para a irrigação por microaspersão em relação à uniformidade e à energia produzida.

Para Frigo (2014), realizando ensaios de irrigação por aspersão convencional com influência do vento, a utilização dos gráficos de controle de Shewhart foi mais eficiente para avaliação da uniformidade, pois ocorreram grandes oscilações. Isso ratifica Souza et al. (2008), em que os gráficos de Shewhart são eficazes para o diagnóstico para grandes variações e os gráficos de MMEP e CUSUM para detectar pequenas variações nos processos.

Ainda em relação aos gráficos de controle, o tratamento T1, em que foi utilizado um sistema de armazenamento de energia e um espaçamento entre microaspersores de 1,0 x 1,0 m, está sob controle estatístico na avaliação do coeficiente CUC nos gráficos de Shewhart e CUSUM e, no MMEP, a sequência ocorre, porém de forma mais próxima à linha média do que em outros casos, sendo, assim, o mais adequado em relação a este parâmetro.

Os gráficos de controle produzidos na presente pesquisa estão em conformidade com outros estudos de irrigação, como Hermes et al. (2013), Hermes et al. (2014) e Hermes et al. (2015) que, analisando a irrigação por gotejamento através de gráficos de controle de Shewhart, verificaram a ocorrência de valores abaixo do limite inferior de controle. Em contrapartida, Juchen, Suszek e Vilas Boas (2013), empregando os gráficos de controle para a irrigação por gotejamento para cultura da alface, obtiveram todos os ensaios sob controle. Frigo et al. (2013), estudando a uniformidade para irrigação diurna e noturna constatou ensaios abaixo do limite inferior de controle (LIC) em todos tratamentos. Desta forma, constata-se que o uso de gráficos de controle para a irrigação em outros estudos foi válido para avaliar os coeficientes de uniformidade e observar a variabilidade destes

Em comparação, os resultados obtidos concordam com Holanda Filho et al. (2001), realizando a caracterização hidráulica de um microaspersor, com espaçamentos variando de 1,2 x 1,2 m até 3,6 x 3,6 m, alcançaram resultados de CUC acima de 90% para os menores espaçamentos, sendo que quanto menor os espaçamentos maiores os valores do coeficiente de uniformidade.

Para uma análise mais confiável dos resultados da uniformidade de distribuição foi calculado o índice de capacidade do processo. Na Tabela 8 são apresentados os índices de capacidade C_{pi} para os coeficientes de uniformidade, utilizando LIC de 90 e 80%.

Tabela 8 Índice de Capacidade do Processo para os Coeficientes de Uniformidade

Tratamento	Cpi CUC	Cpi CUC	Cpi CUD	Cpi CUD
	LIC=90%	LIC=80%	LIC=90%	LIC=80%
T1	1,27	3,39	*	*
T2	*	*	*	*
T3	0,84	2,72	0,18	1,31
T4	*	*	*	*
T5	*	*	*	*
T6	*	*	0,07	1,18

Analisando os processos novos e com especificações unilaterais, considerando a classificação de Bernardo, Soares e Mantovani (2008) e Bralts (1986), para CUC e CUD, respectivamente e avaliando como limites as classificações de excelente (LIC = 90%) e bom (LIC = 80%), o tratamento 1 para o CUC, tanto para a classificação de excelente é considerado como um processo adequado/capaz. Para a classificação dos coeficientes como bom, para o parâmetro CUC, os dois tratamentos possíveis de se calcular o Cpi são classificados como adequados, por apresentarem $Cpi \geq 1,25$. Para o coeficiente CUD, apenas o tratamento T3, com LIC = 80% apresenta-se como adequado.

Para estudos com irrigação localizada por gotejamento, Hermes et al. (2014), Hermes et al., (2013) e Klein et al., (2015) constataram que conforme aumenta-se o valor do CUC, o índice de capacidade do processo também crescia, assim como com os valores do CUD, conforme Hermes (2015), na irrigação por gotejamento e Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010), estudando irrigação por aspersão, também concluíram a relação diretamente proporcional dos coeficientes de uniformidade CUC e CUD.

4 CONCLUSÕES

Em relação à energia produzida, o tratamento realizado sem o armazenamento de energia apresentou valores superiores, porém com uma tensão maior que a requerida pela bomba hidráulica, prejudicial para o equipamento, sendo assim sugerido utilizar o sistema com armazenamento de energia.

Em referência aos espaçamentos entre microaspersores, quanto menor o espaçamento, maior a uniformidade de distribuição de água, independente do coeficiente de uniformidade utilizado.

Os gráficos de controle foram adequados para diagnosticar os tratamentos sob controle, sendo que os gráficos de controle de Shewhart classificaram a maior parte dos processos como controlados, porém são significativos e simples para a avaliação de sistemas de irrigação.

Os gráficos de controle de MMEP foram os mais sensíveis para diagnosticar as pequenas variações no processo, prevalecendo a classificação dos gráficos como fora de controle.

Os gráficos de CUSUM foram significativos para determinar o momento de ocorrência das variabilidades dos processos e, assim como os gráficos de MMEP, são relevantes para detectar as pequenas variabilidades decorrentes nos ensaios, sendo estes dois tipos de gráficos superiores em análises em laboratório, sem interferências climáticas.

O índice de capacidade do processo foi relevante para classificar os processos utilizados, demonstrando que os tratamentos com armazenamento de energia elevaram o valor do índice de capacidade do processo.

Em suma, se recomenda utilizar o sistema com armazenamento de energia e com o espaçamento de 1,0 x 1,0 m (Tratamento T1) quando utilizado o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen para avaliação do sistema de irrigação por microaspersão, quando utilizado um sistema de energia solar fotovoltaico, com resultados satisfatórios e confiáveis de acordo com as técnicas do controle estatístico de qualidade do processo.

As técnicas do controle estatístico de qualidade utilizadas foram adequadas para determinar as variabilidades dos ensaios de irrigação em relação aos parâmetros de energia produzida e uniformidade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR ISO 9261. **Irrigação Localizada – Microaspersores – Requisitos gerais e métodos de ensaio**. São Paulo, 2004.

AWASTHY, P.; PATEL, B.; SAHU, P.; PATANWAR, M.; KU, P. Potentials of Micro Irrigation in India: An Overview. *International Journal of Agriculture and Food Science*, v. 4, n. 4, p. 116-118, 2014.

BARDI, U.; EL ASMAR, T.; LAVACCHI, A. Turning electricity into food: the role of renewable energy in the future of agriculture. *Journal of Cleaner Production*, Budapeste, v. 53, p. 224-231, 2013.

BARRAGAN, J.; COTS, L.; MONSERRAT, J.; LOPEZ, R.; WU, I. P. Water distribution uniformity and scheduling in micro-irrigation systems for water saving and environmental protection. *Biosystems Engineering*, Hexham, v. 107, p. 202-211, 2010.

BECKMAN, J.; XIARCHOS, I. M. Why are Californian farmers adopting more (and larger) renewable energy operations? *Renewable Energy*, Lemosos, v. 55, p. 322-330, 2013.

BHATTACHARYYA, S. C. Energy access programmes and sustainable development: A critical review and analysis. *Journal of Energy for Sustainable Development*, Portland, v. 16, n. 3, p. 260-271, 2012.

BORGES, R. C.; FERREIRA, E. B.; OLIVEIRA, M. S. Estudo do padrão de não-aleatoriedade sequência no controle estatístico do processo. *Symposium*, Lavras, v. 6, n. 2. p. 31-35, 2008.

BORSSOI, A. L.; VILAS BOAS, M. A.; REISDORFF, M.; HERNANDEZ, R. H.; FOLADOR, F. A. C. Water application uniformity and fertigation in a dripping irrigation set. *Engenharia Agrícola (Impresso)*, Jaboticabal, v. 32, p. 718-726, 2012.

BRALTS, V. F. **Field performance and evaluation**. In: NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. (Ed). *Trickle irrigation for crop production*. Amsterdam: Elsevier. p. 216-240, 1986.

BRIASSOULIS, D.; WAAIJENBERG, D.; GRATRAUD, J. VON ELSNER, B. Mechanical properties of covering materials for greenhouses: General overview. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Hexham, v. 67, n. 3, p. 81-96, 1997.

CARROQUINO, J.; DUFO-LÓPEZ, R.; BERNAL-AGUSTÍN, J. L. Sizing of off-grid renewable energy systems for drip irrigation in Mediterranean crops. *Renewable Energy*, Lemosos, v. 76, p. 566-574, 2015.

CHANDEL, S. S.; NAIK, M. N.; CHANDEL, R. Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Golden, v. 49, p. 1084-1099, 2015.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkely: University of California, Experiment Station, p. 124, 1942.

CONCEIÇÃO, M. A. F. **Simulação da distribuição de água em microaspersores sob condição de vento**. 2002, 110 p. Tese (Doutorado em Agronomia). Piracicaba: ESALQ/USP, 2002.

COSTA, A. F.B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle Estatístico de Qualidade**. 2ª ed. São Paulo: editora Atlas, 2008.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Sálvio Brito. **SUNDATA**. 2016. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>>. Acesso em: 24 nov. 2016.

EDUARD, M.; WATER, P. V. Pumping with a peak-power tracker using a simple six-step square-wave inverter. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Canada, v. 3, 1997.

FARIA, L. C.; BESKOW, S.; COLOMBO, A.; NOREMBERG, B. G.; NETO, O. R.; SIMÕES, M. CH. Influence of the Wind on water application uniformity of a mechanical lateral move irrigation equipment using rotating plate sprinklers. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.46, n.1, p.83-88, 2016.

FOSTER, R.; MAJID, G.; COTA, A. A test book of solar energy. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, Golden, 2014.

FRIGO, J. P. **Controle estatístico da qualidade na irrigação por aspersão**. 2014. 43 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

FRIGO, J. P.; VILAS BOAS, M. A.; FRIGO, E. P.; HERMES, E.; TESSARO, E. Irrigação diurna e noturna em um sistema de aspersão convencional em Palotina-PR. **Irriga**, Botucatu, v. 18, p. 318-327, 2013.

FRIZZONE, J.A. **Irrigação por aspersão**. Piracicaba: ESALQ – Departamento de Engenharia Rural, Série Didática, 3. P. 53, 1992.

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, Agriculture and Environment** (Print), Helsinque, v.12, p. 487 – 490, 2014.

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**, Lagos, v. 10, p. 1427-1433, 2015.

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, Agriculture and Environment**, Helsinque, v. 11, p. 841-845, 2013.

HERNÁNDEZ, R. H. **Controle estatístico de processo aplicado na uniformidade da irrigação e fertirrigação por gotejamento**. 2010. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2010.

HOLANDA FILHO, R. S. F.; PORTO FILHO, F.Q.; MIRANDA, N.; MEDEIROS, J. F. Caracterização hidráulica do microaspersor RONDO, da PLASTRO. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, Paraíba, v. 5. n.1, p. 16-21, 2001.

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, 2013.

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

KELLER, J. **Evolution of drip/microirrigation**: traditional and non-traditional uses. Paper presented as keynote address at the International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation, Tenerife, Spain, 2002.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkler and Trickle Irrigation**. Chapman and Hall, New York, 1990.

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation design**. Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing, 133p, 1975.

KELLEY, L. C.; GILBERTSON, E.; SHEIKH, A.; EPPINGER, S. D.; DUBOWSKY, S. On the feasibility of solar-powered irrigation. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 14, n. 9, p. 2669-2682, 2010.

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, Agriculture and Environment**, Helsinque, v. 13, p. 179-183, 2015.

KOLHE, M.; KOLHE, S.; JOSHI, J. C. Economic viability of stand-alone solar photovoltaic system in comparison with diesel-powered system for India. **Energy Economics**, Falmer, v. 24, p. 155-165, 2002.

KOPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928.

LAL, S.; KUMAR, P.; RAJORA, R. Techno-economic analysis of solar photovoltaic based submersible water pumping system for rural áreas of na Indian state Rajasthan. **Science Journal of Energy Engineering**, California, v. 1, n. 1, p. 1-4, 2013.

MERRIAN, J.L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation**: a guide for management. Logan: Agricultural and Irrigation. Engineering Department, Utah State University, p. 217, 1978.

MICHELS, R. N., RICIERI, R., GNOATTO, E., SOUSA, S. N. M., SILVA, S. L., FISCHBORN, M. Avaliação do bombeamento de água em um sistema alimentado por painéis fotovoltaicos. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, p. 370 – 379, 2009.

MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao controle estatístico de qualidade**. Tradução: FARIAS, A. M. L., FLORES, V. R. L. F., LAURENCEL, L. C. 4. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

MORAIS, M. **Esquemas de controlo de qualidade do tipo CUSUM e EWMA para atributos variáveis**. Capítulo 10 (Notas de aula), Escola Técnico Lisboa. Lisboa, Portugal, 2016. Disponível em: <https://www.math.tecnico.ulisboa.pt/~mjmorais/FCQ2-0607-cap10.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2016.

NEOSOLAR. **Bomba Solar Shurflo 8000 – Especificações Técnicas**. Disponível em: <http://www.neosolar.com.br/loja/bomba-solar-shurflo-8000-12v.html>. Acesso em: 1 ago. 2016.

ODEH, S.; YOHANIS, Y, G.; NORTON, B. Economic viability of photovoltaic water pumping systems. **Solar Energy**, Tampa, v. 80, p. 850-860, 2006.

ONU (Organização das Nações Unidas). **Relatório de Desenvolvimento Humano 2015**. Nova York, 2015. Disponível em: <http://www.pnud.org.br/hdr/arquivos/RDHglobais/hdr2015_ptBR.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2016.

PARDOSSI, A.; TOGNONI, F.; INCROCCI, L. Mediterranean greenhouse technology. **Chron. Hort.**, v. 44, n. 2, p. 28-34, 2004.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15ª Ed. Piracicaba: FEALQ, 2009, 451p.

PLETSCH, T. A.; CRUZ, R. L.; MAZZER, H. R.; OLIVEIRA, E. F. Desempenho de gotejadores com uso de esgoto doméstico tratado. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 2, p. 243-253, 2009.

RECA, J.; TORRENTE, C.; LÓPEZ-LUQUE, R.; MARTÍNEZ, J. Feasibility analysis of stand alone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses. **Renewable Energy**, Lemesos, v. 85, p. 1143-1154, 2016.

REHMAN, S.; SAHIN, A. Z. Performance comparison of diesel and solar photovoltaic power systems for water pumping in Saudi Arabia. **International Journal of Green Energy**, Ontario, v. 12, n. 7, p. 702-713, 2014.

ROHIT, K. B.; KARVE, G.; KHATRI, M. Solar water pumping system. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, online, v. 3, p. 225-259, 2013.

RUSSO, S. L. **Gráficos de controle para variáveis não-conformes autocorrelacionadas**. 2002. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

SAKO, K. M.; GUESSAN, Y. N.; DIANGO, A. K.; SANGARE, K. M. Comparative economic analysis of photovoltaic, diesel generator and grid extension in Cote D'Ivoire. **Asian Journal of Applied Science**, Shiraz, v. 8, n. 8, p. 787-793, 2011.

SAMOHYL, R. W. **Controle Estatístico de Qualidade**. Rio de Janeiro: editora Elsevier, 2009.

SANTOS, D. A.; FREIRE, F. G. C., SANTOS, F. S. S.; DOS SANTOS, M. M. S.; LIMA, R. M. S.; SANTOS, W. O. **Avaliação da Uniformidade de Aplicação de água na irrigação por microaspersão na cultura da banana em São João do Jaguaribe-CE**. In: INOVAGRI: International Meeting, Fortaleza, 2012

SILVA, R. A.; SILVA, A. M. Avaliação das características hidráulicas do Microdifusor autocompensante Dan Jet 7200. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 4, p.873-878. 2003.

SOUZA, L.M.; RIBEIRO JUNIOR, J. I.; REIS, G. M.; IDE, M. S. Eficiência dos Gráficos de Controle XBARRA, EWMA e CUSUM. **Revista Eletrônica Produção e Engenharia**, online, v. 1, n. 1, p. 81-94, 2008.

TESSARO, E. **Efeito da carga hidráulica na uniformidade da irrigação e fertirrigação em sistema de gotejamento**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

UPADHYAY, B. Drip irrigation: an appropriate technology for women. **Appropriate Technology**, Burnham, v. 30, n. 4, p. 31–37, 2003.

VERMA, S.; TSEPHAL, S.; JOSE, T. Pepsee systems: grass root innovation underground water stress. **Water Policy**, v. 6, p. 1–16, 2004.

VILELA, O. C.; BIONE, J.; FRAIDENRAICH, N. Simulation of grape culture irrigation with photovoltaic V-trough pumping systems. **Renewable Energy**, Lemesos, v. 29, n. 10, p. 1697-1705, 2004.

WERKEMA, M. C. C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Belo Horizonte, 2006.

ARTIGO 3: UNIFORMIDADE DA IRRIGAÇÃO E FERTIRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO EM DIFERENTES INCLINAÇÕES DO TERRENO UTILIZANDO O CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE

RESUMO

A uniformidade de irrigação é fator importante para o aumento da produtividade agrícola, diminuição de custos e melhor utilização da água e fertilizantes. Com isso, o objetivo do trabalho foi de avaliar um sistema de irrigação por gotejamento com o uso de água tratada e fertilizantes em diferentes inclinações do terreno com o uso de técnicas de controle estatístico de qualidade. O experimento foi realizado em laboratório, com um delineamento experimental fatorial 2 x 3, com os fatores: forma de irrigação (com água tratada e com fertilizantes) e inclinação topográfica do terreno (em nível; -2 e +2%), totalizando assim 6 tratamentos com 25 repetições cada. Foram medidas as variáveis de pressão, vazão, pH e condutividade elétrica, com 16 coletores amostrados. Com os dados de vazão foram determinados o coeficiente de variação da vazão total (CVt), o de uniformidade de distribuição (CUD) e o de uniformidade de Christiansen (CUC), sendo estes analisados através dos gráficos de controle de Shewhart e de Média Móvel Exponencialmente Ponderada (MMEP) e pelo índice de capacidade do processo (Cp). Os resultados da vazão foram menores quando utilizados fertilizantes na irrigação e com +2% de inclinação do terreno. Os valores de CVt e CUC foram mais adequados quando utilizado a água tratada. O Cp foi diretamente proporcional aos valores de uniformidade e inversamente proporcional aos valores de CVt. Os resultados da uniformidade reduziram de acordo com o tempo e os valores de CVt diminuíram. As técnicas de controle estatístico de qualidade utilizadas foram adequadas para determinar as variabilidades dos ensaios de irrigação em relação aos fatores forma de irrigação e inclinação para o CVt, CUC e CUD.

Palavras-chave: CUC, CUD, CVt, gráficos de controle, índice de capacidade do processo.

ARTICLE 3: UNIFORMITY OF IRRIGATION AND FERTIRRIGATION DRIP IN DIFFERENT LAND INCLINATIONS USING THE SLOPES CONTROL QUALITY OF STATISTICAL

ABSTRACT

Irrigation uniformity is an important factor for increasing agricultural productivity, lowering costs, and providing better utilization of water and fertilizers. The objective of this work was to evaluate a drip irrigation system with the use of treated water and fertilizers in different slopes of the land using techniques of statistical quality control. The experiment was carried out in a laboratory with a 2 x 3 factorial design, with irrigation (with treated water and fertilizers) and topographic slope (at level -2 and +2%), totalizing 6 treatments with 25 repetitions each. The variables of pressure, flow, pH, and electrical conductivity were measured, with 16 collectors sampled. With the flow data, the coefficient of variation of the total flow (CVt), the uniformity of distribution (DU) and the uniformity of Christiansen (CUC) were determined by the Shewhart and Exponentially Weighted Mobile Average control charts (EWMA) and by the process capability index (Cp). The results of the flow were lower when fertilizers were used in the irrigation and with +2% slope of the land. The values of CVt and CUC were more adequate when treated water was used. The Cp was directly proportional to the values of uniformity and inversely proportional to the values of CVt. The uniformity results reduced with time and CVt values decreased. The statistical quality control techniques used were adequate to determine the variability of the irrigation tests in relation to the form of irrigation and inclination for the CVt, CUC and DU.

Keywords: CUC, DU, CVt, control charts, process capability index.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo da população mundial e a conseqüente necessidade de produção de alimentos exigem uma agricultura competitiva e tecnificada que possibilite maior produtividade em termos de qualidade e quantidade. Para obter tal produtividade, torna-se indispensável a adoção de tecnologias ligadas à área da irrigação.

Todavia, cabe lembrar que este cenário demográfico aumenta o consumo de água, promovendo a concorrência dos recursos hídricos usados na agricultura com outros setores da economia e, por conseguinte, força a otimização do uso da água para o setor primário. Assim, desde que usada de forma correta, a agricultura irrigada é uma importante estratégia para se obter êxito no processo de racionalização de água, visando sobretudo o aumento da produção agrícola (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2008).

De acordo com Mantovani, Bernardo e Palareti (2007), a agricultura irrigada tem sido importante estratégia para aperfeiçoar o plantio mundial de alimentos, proporcionando desenvolvimento sustentável no campo, com geração de empregos e renda de forma estável. Em conformidade Werneck et al. (2009), afirmam que a irrigação é o conjunto de técnicas destinadas a deslocar a água no tempo ou no espaço para modificar as possibilidades agrícolas de cada região, visando corrigir a distribuição natural das chuvas, proporcionando a máxima produtividade.

Para Oni, Maliwichi e Obadire (2011), quando se tem acesso à irrigação adequada, seja através de projetos ou técnicas, os agricultores apresentam resultados satisfatórios na produção e na segurança alimentar no âmbito familiar. Desta forma, havendo incentivos governamentais, estas experiências satisfatórias podem ser aplicadas em projetos mais complexos e ambiciosos.

Dentre os vários tipos de irrigação, a localizada ganhou maior destaque a partir das décadas de 60 e 70 (AIROLDI, 2007), apresentando melhores resultados para pequenos agricultores. Como exemplo da irrigação localizada, o gotejamento é mais eficiente em zonas áridas e semiáridas promovendo uma economia dos recursos hídricos (BENOUNICHE et al., 2014; HAMOURI et al., 1996; TARJUELO et al., 1999; FABEIRO et al., 2002), se tornando o símbolo de prática de irrigação moderna, que conservam os recursos hídricos e maximizam o desempenho das plantas (OMODEI, 2015).

A irrigação por gotejamento desempenha um papel vital na produção de comida, de fibra, e na manutenção do gramado (GYASI-AGYEI, 2011), sendo que a mesma está ganhando importância nas áreas de engenharia agrícola e agrônômica, especialmente em locais com recursos hídricos limitados e caros, pois permite que tais recursos sejam plenamente utilizados (NOORI; AL THAMIRY, 2012).

O problema de escassez de água vem popularizando a irrigação por gotejamento (SAHIN et al., 2005), uma vez que proporciona um menor consumo de água e sua melhor distribuição em relação a outros sistemas (LUQUET et al., 2005; BASSO; VILLAFANE; TORRES, 2008). Esta caracteriza-se como uma irrigação de alta eficiência, pois menos água é perdida no transporte e a aplicação é realizada diretamente na região da planta, apresentando uma distribuição mais uniforme da irrigação (WANG et al., 2013).

A irrigação por gotejamento tem ainda como vantagem, em comparação com os sistemas de aspersão, prevenir ou minimizar problemas de salinidade do solo pelo fato de aumentar a infiltração e a percolação, além de reduzir a evaporação da água do solo (SOUSA et al., 2011).

Embora este tipo de irrigação apresente benefícios em termos de economia d'água, sua viabilidade só é assegurada quando há um baixo custo de implantação, o que pode ser alcançado por meio de kits de irrigação. Karlberg e Penning de Vries (2004) salientam que a implementação destes kits de irrigação de baixo valor tem sido bem-sucedida em áreas onde a água representa uma limitação à irrigação, como no caso de agricultores de pequeno porte em vários países da África nos quais o gotejamento é uma opção promissora e interessante.

Os sistemas de irrigação por gotejamento de baixo custo podem mudar estilos de vida familiar, aumentar a renda, criar emprego, gerar segurança alimentar e melhorar a nutrição familiar, podendo reduzir em 50% o uso de água quando comparado aos demais sistemas, tornando-o compatível com o viés de sustentabilidade (MAISIRI et al., 2005). Keller (2002) e Ella et al. (2012) também salientam a ideia de economia de água e maior uniformidade da irrigação por gotejamento, encarada como uma tecnologia promissora que pode ser empregada para áreas sustentáveis de produção de culturas em países em desenvolvimento.

Apesar dos sistemas de irrigação por gotejamento serem baseados em longa experiência de trabalho e ter atingido um elevado nível tecnológico, esses sistemas muitas vezes não são capazes de atingirem todas as suas vantagens nominais (CAPRA; SCICOLONE, 1998). Para que isso ocorra, é necessário que se avaliem as variáveis dentro do sistema, como o dimensionamento do sistema, pressão de trabalho, vazão, uso de fertilizantes, entre outros.

O sistema de irrigação por gotejamento é associado, invariavelmente, com a aplicação de nutrientes, sendo a utilização de fertilizantes na irrigação conhecida como fertirrigação ou fertigação, e é o processo de aplicação conjunta de água e fertilizantes, por meio de um sistema de irrigação (FERNANDES; COELHO; BOTREL, 2003), permitindo uma melhor gestão dos nutrientes e maior produtividade das culturas (POSTEL, 2000; GLEICK, 2002). Na irrigação por gotejamento, a fertirrigação é mais eficiente em

comparação a outros métodos, devido à aplicação da água diretamente no sistema radicular da planta, possibilitando a melhoria do uso de insumos em diversas culturas, tanto em aspectos relacionados ao aumento da produtividade quanto na qualidade desses produtos (HERMES et al., 2014).

Cabe ressaltar que a eficiência do sistema por gotejamento reside na aplicação de água e nutrientes diretamente na zona radicular da cultura; todavia, a má gestão deste procedimento pode levar ao excesso de irrigação e a consequente perda de nutrientes por lixiviação. Desta forma estes sistemas devem ser estudados e avaliados (DUKES et al., 2006).

Há indícios de que em sistemas mal dimensionados, tanto de irrigação com água como de fertirrigação, a desuniformidade em excesso afeta negativamente o crescimento de culturas e sua produtividade (EL-HADY; SHAABAN; MOHAMEDIN, 2010). Esta influência da uniformidade é causada por fatores como diferenças de pressão, sendo recomendado pressões maiores que 30 KPa (ELLA; REYES; YODER., 2009), espaçamento desigual do sistema, desgaste do sistema, entupimento, variação da fabricação, comprimento das linhas laterais e drenagem desigual pela declividade do terreno (NOORI; AL THAMIRY, 2012; BURT et al., 1997).

Além de influenciar na produtividade a uniformidade do sistema, é importante também para a fertirrigação, podendo promover o processo de lixiviação em sistemas inadequados de irrigação (GONÇALVES et al., 2006; LI MENG; LI, 2006; BONFIM et al., 2014; HERMES et al., 2013; HERMES et al., 2014).

A maior uniformidade de sistemas de irrigação está ligada diretamente ao maior custo de instalação inicial, embora estes custos a longo prazo sejam compensados pela alta eficiência e menor necessidade de manutenções e mudanças no sistema de irrigação (WILDE et al., 2009). Assim, a uniformidade deve ser vista como um fator preponderante na aquisição de equipamentos de irrigação (BRAUER et al., 2011), determinando a maior ou menor produtividade agrícola (VIEIRA et al., 2004; KELLER, 2002; KELLER; BLIESNER, 1990; BRAUER et al., 2011; LOPEZ-MATA et al., 2010; CARRIÓN et al., 2001; BRENNAN, 2008; JUSTI; VILAS BOAS; SAMPAIO, 2010).

Para minimizar os possíveis problemas causados pela irrigação desuniforme, é importante avaliar a uniformidade de distribuição por métodos universalmente aceitos, como é o caso do coeficiente de uniformidade Christiansen, desenvolvido por Christiansen (1942), e o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) desenvolvido por Merriam e Keller (1978) (ZHANG; WU; ZHU, 2013; ZHANG; MERKLEY, 2012; BONFIM et al., 2014), assim como o coeficiente de variação de vazão total (CVt), descrito por Solomon (1979).

Dentre os fatores que influenciam nos valores dos coeficientes de uniformidade está a topografia do terreno, sendo essencial o seu conhecimento para a escolha do sistema de

irrigação. Em locais de acentuada declividade, a influência da topografia na irrigação pode ser facilmente verificada no método de gotejamento, a exemplo de um sistema de irrigação que, mesmo desligado, ainda continua a fornecer água por um tempo considerável nas regiões mais rebaixadas do terreno, alterando os valores finais de uniformidade do sistema de irrigação (BURT et al., 1997; PROVENZANO; PUMO, 2004; GYASI-AGYEI, 2011).

Para melhor análise estatística dos parâmetros que afetam a uniformidade de um sistema de irrigação por gotejamento, pode-se utilizar o controle estatístico de qualidade (CEQ), que é uma técnica que consiste em analisar o processo, estabelecer padrões, comparar desempenhos, verificar e estudar desvios, buscar e implementar soluções, analisar novamente o processo após modificações, objetivando a melhoria dos processos envolvidos no experimento em questão (MONTGOMERY, 2009).

O controle estatístico de qualidade surge como uma alternativa para melhorar e monitorar a qualidade de um sistema de irrigação com o desenvolvimento de gráficos para avaliar o desempenho da irrigação e a análise dos dados (FRIGO, 2014). Uma das ferramentas do controle estatístico de qualidade é os gráficos de controle que se mostram eficientes e de simples interpretação no monitoramento da média e da variabilidade da característica da qualidade em observação (MONTGOMERY, 2009).

Os gráficos ou cartas de controle estatístico constituem-se como ferramentas de monitoramento do desempenho de processos, as medições das variáveis envolvidas são realizadas em pontos espaçados no tempo resultando em gráficos temporais que são comparados com os resultados obtidos nos limites de controle, sendo que valores fora destes limites indicam causas especiais de variabilidade ou anomalias ao processo, que prejudicam a qualidade. Os gráficos de controle são uma ferramenta importante para diagnosticar as causas especiais que provocam alterações no processo, diferenciando das causas comuns (BORGES; FERREIRA; OLIVEIRA, 2008; HERMES et al., 2013).

Os gráficos de controle mais utilizados são os de Shewhart para medidas individuais, devido a sua simplicidade de construção e interpretação, sendo aplicado em situações que a amostra consiste de uma única unidade. Em muitas aplicações dos gráficos de controle para unidades individuais utiliza-se a amplitude móvel de suas observações consecutivas como base para estimar a variabilidade do processo (MONTGOMERY, 2009).

Porém, de acordo com Morais (2016), as cartas de controle de Shewhart são lentas para diagnosticar pequenas variações em processos, pois utilizam a informação da última amostra, desprezando as demais amostras, sendo que uma forma de elevar a aptidão de detecção de pequenas variações.

Por isso, os gráficos de controle do tipo Média Móvel Exponencialmente Ponderada (MMEP) são usados para diagnosticar as variações pequenas de forma mais rápida, acumulando informações sucessivas, uma vez que pondera as amostras e atribui maior

peso para as amostras mais recentes. Para variações grandes, o MMEP é mais lento no diagnóstico de alterações quando comparado aos gráficos de Shewhart (MONTGOMERY, 2009; FRIGO, 2014; COSTA, EPPRECHT; CARPINETTI, 2008; SOUZA et al., 2008).

Outra ferramenta do controle estatístico de qualidade é o índice de capacidade do processo que reflete a potencialidade que este tem de produzir de acordo com as especificações dos clientes, sendo que, quanto maior o seu valor, melhor o processo consegue atender às exigências (COSTA; EPPRECHT; CARPINETTI, 2008; BORGES; FERREIRA; OLIVEIRA, 2008). Para Werkema (2006), um processo pode não ser considerado satisfatório apenas por apresentar uma elevada variabilidade ou a média estar deslocada em relação ao ponto médio dos limites de especificação.

Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010) e Frigo (2013) utilizaram o controle de qualidade do processo, através dos gráficos de controle e/ou índice de capacidade do processo para avaliar um sistema de irrigação por aspersão, assim como Hernandez (2010); Hermes et al. (2015); Hermes et al. (2013), Klein et al. (2015), Juchen, Suszek e Vilas Boas (2013) e Tessaro (2012) que também utilizaram as ferramentas estatísticas do controle de qualidade do processo, porém em um sistema de irrigação por gotejamento, e concluíram que o índice de capacidade do processo é diretamente proporcional ao aumento da uniformidade do sistema, com a capacidade de monitorar o controle da irrigação dentro dos limites satisfatórios, além dos gráficos de controle contribuírem para o monitoramento do processo da irrigação.

Posto isto, se pressupõem no estudo que a inclinação topográfica dos terrenos afete negativamente a uniformidade de distribuição da irrigação, principalmente quando utilizado fertilizantes junto com a irrigação e que as ferramentas do controle estatístico de qualidade contribuem para diagnósticos precisos sobre as variabilidades durante o processo.

Com isso, o objetivo do trabalho foi avaliar a influência da inclinação topográfica do terreno no processo da irrigação com água e da fertirrigação em um sistema por gotejamento, determinando os coeficientes de uniformidade de irrigação e analisando-os através dos gráficos de controle e o índice de capacidade do processo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa ocorreu em área experimental da Universidade Federal do Paraná – UFPR, no Setor Palotina, na região oeste do Paraná, com classificação climática Cfa (Koppen-Geiger, 1928), com verões moderadamente quentes e invernos frescos, sendo o experimento construído (Figura 1) em ambiente controlado sem interferências do vento e da radiação solar, com coordenadas geográficas 24° 17'36" de latitude Sul e 53° 50' 27" de longitude Oeste e altitude de 327 metros, de acordo com dados do receptor de satélites da marca Garmin, modelo Etrex30.



Figura 1 Bancada de ensaios de irrigação por gotejamento em ambiente controlado.

As variáveis controláveis do experimento foram: pressão de entrada e saída (kPa), passagem de água ($L h^{-1}$), concentração de fertilizante ($g L^{-1}$), potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade da água ($dS.m^{-1}$) e fertilizante e o entupimento do filtro e dos emissores. As variáveis não controláveis do sistema foram a qualidade da água e dos fertilizantes e a temperatura da água.

Para realização da pesquisa foi montado um sistema de irrigação por gotejamento, sendo este colocado na parte superior de uma bancada de madeira, como demonstrado na Figura 1, com área de $9,60 m^2$ ($6,00 \times 1,60 m$).

A bancada construída tem um ajuste de declividade em uma das extremidades, que permitiu simular três inclinações diferentes: em nível (0%) ou plano, +2 e -2% (Figura 2), sendo utilizadas estas inclinações, pois são as mesmas testadas pelo fabricante do tubo gotejador (IRRITEC, 2015).

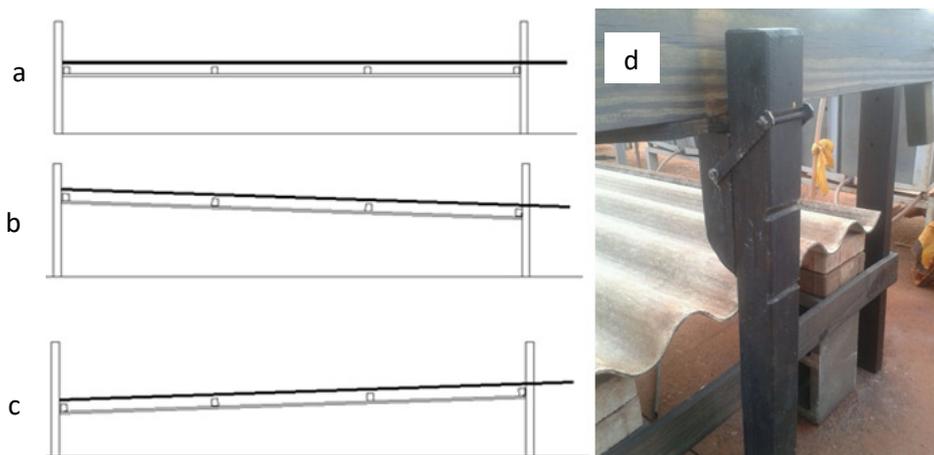


Figura 2 a) Bancada sem inclinação; b) Bancada com inclinação de +2%; c) Bancada com inclinação de -2%; d) Forma de ajuste da inclinação.

O sistema de gotejamento foi constituído de tubo gotejador do Modelo P1 da marca SIPLAST, novo, com diâmetro de 16mm, com filtro de entrada com área de 7,5mm² e um total de 8 orifícios e com vazão de 2,10 L h⁻¹ na pressão de 100 kPa, com espaçamento entre gotejadores de 0,20m e com equação potencial vazão = 0,19.pressão^{0,52}.

Para a realização dos ensaios foi utilizada a bomba hidráulica com potência nominal de 735,99W com vazão controlada através de dois registros para a pressão média dos ensaios próxima a 100 kPa.

Com uma linha principal e 4 linhas laterais, o sistema possui um total de 28 gotejadores por linha, totalizando 112 gotejadores, com uma vazão total média de 235,20 Lh⁻¹. Para diminuir o entupimento foi utilizado um filtro de 120 mesh, como recomendado pelo fabricante e instalado próximo ao reservatório. A pressão foi medida no início e no final do sistema com dois manômetros digitais ITMPD-15 Instrutemp, Modelo 8215, com precisão de $\pm 0,3\%$ a aproximadamente 25 °C, de acordo com o fabricante. A metodologia adotada para coleta dos dados foi proposta por Keller e Karmeli (1975), e consiste em selecionar 16 pontos de coleta, situados no primeiro gotejador da linha lateral, o gotejador que está a um 1/3 do comprimento total da linha lateral, o gotejador que está a 2/3 do comprimento e o último gotejador da linha (Figura 3).

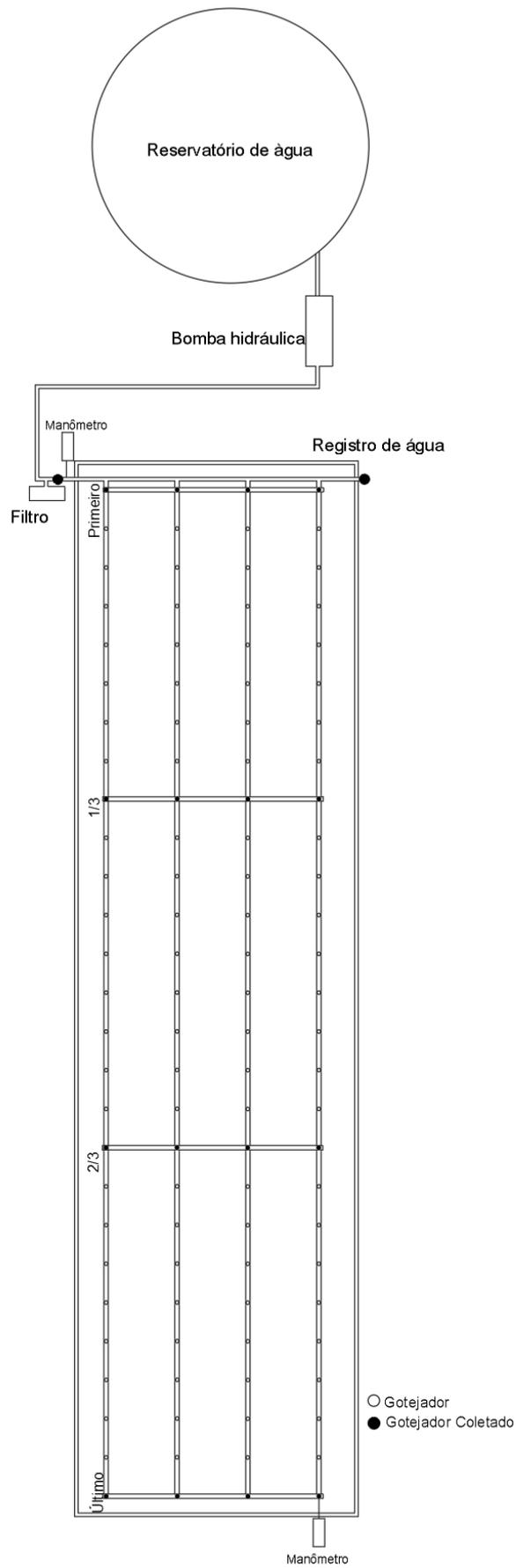


Figura 3 Sistema de coleta de dados dos ensaios.

O delineamento experimental utilizado foi um delineamento fatorial, com o fator tipo de irrigação, com dois níveis com o sistema de irrigação com água tratada e fertirrigação, com o fator inclinação em três níveis (0, -2 e +2%), com 25 repetições cada tratamento.

As variáveis respostas dos ensaios são a vazão do gotejador amostrado (Lh^{-1}), o peso dos coletores (g) e pressão (kPa) medida no início e no fim do sistema.

Sendo assim os tratamentos realizados foram:

T1: Sistema com irrigação com água tratada e em nível (0% de inclinação);

T2: Sistema com irrigação com água tratada e inclinação de -2%;

T3: Sistema com irrigação com água tratada e inclinação de +2%;

T4: Sistema com fertirrigação e em nível (0% de inclinação);

T5: Sistema com fertirrigação e inclinação de -2%;

T6: Sistema com fertirrigação e inclinação de +2%.

Foram realizados 25 ensaios para cada um dos tratamentos, com o tempo de coleta de 3 minutos, de acordo com Keller e Karmeli (1975). Antes da coleta dos dados, o sistema foi ligado por 5 minutos até que se estabilizasse o sistema de irrigação, em relação à vazão e pressão. Antes de cada ensaio foi realizada a limpeza do filtro para evitar entupimentos que afetassem os ensaios. Os ensaios seguiram as normas propostas pela NBR ISO 9261 (ABNT, 2006).

Para determinação dos coeficientes de uniformidade, objetivando maior precisão dos dados, foram pesados, no próprio local dos ensaios, os coletores em uma balança semi-analítica, classe II, com capacidade de 500g e sensibilidade de 0,001g para obtenção precisa da uniformidade, sendo utilizado o peso no cálculo do CUC e CUD. Para medição das vazões dos coletores, estas foram realizadas através de uma proveta de 150 mL. Para que o ensaio fosse validado, foram realizadas 3 coletas (triplicata), sendo utilizado o volume médio para determinar a vazão e CVt dos ensaios.

Nos ensaios com fertirrigação foi utilizado o fertilizante com formulação de 12% de nitrogênio, 5% de fósforo (na forma de fosfato) e 15% de potássio, recomendado para crescimento inicial de hortaliças, principalmente as folhosas, onde a microaspersão é mais utilizada. Foram medidos, em laboratório, o potencial hidrogeniônico e a condutividade da água e do fertilizante, de 5 ensaios por tratamento, sendo realizado a cada intervalo de 5 ensaios, otimizando o período de diagnóstico desta variável.

A fim de avaliar o sistema de irrigação, utilizou-se Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC), desenvolvido por Christiansen (1942), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), proposto por Merriam e Keller (1978), e Coeficiente de Variação da vazão total (CVt) conforme as Equações 01, 02 e 03, respectivamente.

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_a - q_i|}{nq_a}\right) \times 100 \quad \text{Eq.(01)}$$

Sendo: q_i - lâmina de cada emissor mm.h^{-1} ; q_a - lâmina média dos emissores mm.h^{-1} ; n - número de emissores.

Para a classificação dos dados de CUC, utilizou-se a proposta de Bernardo, Soares e Mantovani (2008), que classificam a uniformidade da distribuição conforme a Tabela 1.

Tabela 1 Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC)

CUC	Classificação
90% ou maior	Excelente
80% até 90%	Bom
70% até 80%	Regular
60% até 70%	Ruim
Menor que 60%	Inaceitável

Fonte: Bernardo, Mantovani e Soares (2008)

Para o CUD foi utilizada a Equação 02:

$$CUD = \frac{\bar{q}_{25}}{q_a} 100 \quad \text{Eq.(02)}$$

Sendo: q_{25} - lâmina média das 25% menores descargas dos emissores mm.h^{-1} ; q_a - lâmina média dos emissores mm.h^{-1}

Para a classificação dos dados de CUD, foi utilizada a proposta de Bralts (1986), que classifica a uniformidade de distribuição conforme a Tabela 2.

Tabela 2 Classificação do Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)

CUD	Classificação
90% ou maior	Excelente
80% até 90%	Bom
70% até 80%	Regular
60% até 70%	Ruim
Menor que 60%	Inaceitável

Fonte: Bralts (1986)

Para o cálculo do CVt utilizou-se a Equação 03:

$$CVt = \frac{\sigma_q}{q} \quad \text{Eq.(03)}$$

Sendo: CVt - Coeficiente de Variação da vazão total; σ_q - desvio padrão de todas as vazões amostradas; q - Média de todas as vazões amostradas (L.h^{-1});

Para a classificação do Coeficiente de Variação da vazão total (CVt) foi utilizado a classificação proposta por Solomon (1979), para emissores novos, como apresentado na Tabela 3:

Tabela 3 Coeficiente de Variação da vazão total (CVt)

Classes	Uniformidade (%)
Excelente	$\leq 0,03$
Médio	0,05 a 0,07
Marginal	0,07 a 0,11
Pobre	0,11 a 0,15
Péssimo	$> 0,15$

Fonte: Solomon (1979)

Para a avaliação hidráulica dos sistemas utilizados foram calculados com os resultados das vazões médias ($L \cdot h^{-1}$) e a pressão de cada um dos tratamentos, as relações da pressão e vazão, para obtenção da equação de fluxo, e os fatores de correlação entre as duas variáveis.

Para monitorar os coeficientes de uniformidade foram confeccionados os gráficos de controle de Shewhart e da Média Móvel Exponencialmente Ponderada (MMEP), com o objetivo de investigar os parâmetros, devido a estes gráficos apresentarem características adequadas para a análise da irrigação.

As cartas de controle de Shewhart foram confeccionadas necessitando calcular o Limite Superior de Controle (LSC) e o Limite Inferior de Controle (LIC), através das Equações 04 e 05.

$$LSC = \bar{x} + \frac{3AM}{d_2} \quad \text{Eq.(04)}$$

$$LIC = \bar{x} - \frac{3AM}{d_2} \quad \text{Eq.(05)}$$

Em que: LSC - limite superior de controle; LIC - limite inferior de controle; \bar{x} - média; AM - amplitude móvel das observações (valor encontrado para cada parâmetro em cada coletor); d_2 - valor pré-determinado (tabelado), de acordo com o número de repetições.

Para o gráfico de controle MMEP pode ser produzido pelas variáveis do valor médio e o número da amostra i , ou tempo. O gráfico de MMEP pode ser delimitado pela Equação 05.

$$Z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)Z_{i-1} \quad \text{Eq. (05)}$$

Em que: σ - é o desvio padrão dos dados; λ - peso dado a cada amostra ($0 < \lambda \leq 1$), sendo λ utilizado de 0,20.

Para o gráfico de controle do tipo MMEP para calcular os limites de controle foram utilizadas as Equações 06 e 07.

$$LSC = \bar{x} + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1-\lambda)^{2i}]} \quad \text{Eq. (06)}$$

$$LIC = \bar{x} - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1-\lambda)^{2i}]} \quad \text{Eq. (07)}$$

Em que: \bar{x} - média dos dados; L - número de desvios padrão da média de controle que se quer detectar, sendo o L utilizado igual a 2).

Objetivando avaliar o índice de capacidade do processo (C_p), optou-se pela metodologia proposta por Montgomery (2009), usado quando o processo se encontra estável, ou seja, quando apresenta controle estatístico e quando a variável de interesse tenha distribuição próxima da normal. Para a pesquisa foi adotado o processo dos ensaios de irrigação como unilateral para o fator uniformidade, estimando os valores de C_p inferior, com o LIC de 80 e 90%, sendo estes utilizados devido a classificação de níveis excelente e bom, propostas por Bernardo, Soares e Mantovani (2008) e Bralts (1986) para os parâmetros CUC e CUD, respectivamente, e ainda os valores de 0,03 e 0,07, de excelente e médio, respectivamente, para o parâmetro CVt. O índice de capacidade do processo é expresso pela Equação 8:

$$C_p = \frac{LSC - LIC}{6\sigma} \quad \text{Eq. (08)}$$

Quando o processo se encontra estável e o processo é unilateral, como neste caso, podem ser aplicados os índices de capacidade do processo inferior e superior, C_{pi} e C_{ps} respectivamente, demonstrados nas Equações 09 e 10, e ainda o índice C_{pk} , com o objetivo de medir a distância entre o limite de especificação mais próxima do valor esperado, sendo este, do ponto de vista prático, mais avançado que o C_p (MONTGOMERY, 2009), sendo esse índice o menor valor entre C_{ps} e C_{pi} , como demonstrado na Equação 11.

$$C_{pi} = \frac{\bar{x} - LIC}{3\sigma} \quad \text{Eq. (09)}$$

$$C_{ps} = \frac{LSC - \bar{x}}{3\sigma} \quad \text{Eq. (10)}$$

$$C_{pk} = (C_{pi}, C_{ps}) \quad \text{Eq. (11)}$$

Sendo: LSC e LIC - limites superior e inferior de controle, respectivamente; σ -desvio padrão populacional da variável em estudo, que é calculado pela Equação 11.

$$\sigma = \frac{AM}{d_2} \quad \text{Eq. (12)}$$

De acordo com Montgomery (2009), a classificação do processo se faz da seguinte forma para processos novos e com especificações unilaterais, como por exemplo, os valores de CUC e CUD, se: $C_{pi} \geq 1,45$ o processo é capaz ou adequado, segundo as especificações.

De acordo com Montgomery (2009), a classificação do processo é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 Valores mínimos de classificação do processo

	Especificações Bilaterais	Especificações Unilaterais
Processos Existentes	1,33	1,25
Processos Novos	1,50	1,45
Segurança, força ou parâmetro crítico (processos existentes)	1,50	1,45
Segurança, força ou parâmetro crítico (processos novos)	1,67	1,60

Fonte: Montgomery (2009)

Após os ensaios foram realizadas as análises estatísticas descritivas dos dados coletados, como média, mediana, desvio padrão, máximo e mínimo e coeficiente de variação. Foram determinados as regressões potenciais entre a vazão e pressão e os coeficientes de determinação (R^2) e o teste de normalidade dos dados através dos métodos de Anderson-Darling, a análise de variância da vazão ($L \text{ h}^{-1}$) e o teste de média de Tukey para esta variável.

As técnicas de controle estatístico de qualidade, bem como os gráficos de controle de Shewhart e MMEP e o índice de capacidade do processo foram calculados utilizando o software MINITAB, versão 16, assim como para o cálculo da autocorrelação, pois para que se realize os gráficos de controle dos sistemas de irrigação e fertirrigação, testados em diferentes declividades se faz necessário que os dados utilizados possuam independência entre si.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados da pressão inicial e final (KPa), assim como a estatística descrita (média, coeficiente de variação, máximo, mínimo e mediana) destes são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 Valores e estatística descritiva da pressão inicial e final.

Trat.	N	Pressão inicial (kPa)	Pressão Final (kPa)	Δ Pressão (kPa)	Pressão Média (kPa)	Vazão média (L h ⁻¹)	DP (Lh ⁻¹)	CV (%)	Máximo (L h ⁻¹)	Mediana (L h ⁻¹)	Mínimo (L h ⁻¹)	pH	CE (dS.m ⁻¹)
1	25	97,082	95,071	-2,011	96,077	2,044	0,051	2,495	2,673	2,047	1,923	7,95	0,15
2	25	98,449	96,337	-2,112	97,393	2,107	0,053	2,515	2,220	2,017	1,887	8,00	0,15
3	25	97,248	94,070	-3,178	95,659	2,041	0,227	11,122	2,200	2,073	0,433	8,04	0,15
4	25	98,975	96,389	-2,586	97,682	2,080	0,037	1,779	2,145	2,083	2,001	5,98	1,35
5	25	99,028	97,494	-1,534	98,161	2,048	0,163	7,959	2,480	2,100	1,480	5,98	1,39
6	25	99,537	93,170	-6,367	96,354	2,003	0,171	8,537	2,360	2,070	1,400	6,07	1,32

N= número de repetições; Δ = diferença; DP= desvio padrão amostral; CV= coeficiente de variação. pH= potencial hidrogeniônico; CE: condutividade elétrica.

Em relação à pressão medida durante os ensaios, a diferença (Δ) média entre os tratamentos apresentaram valores semelhantes para os tratamentos T1, T2, T4 e T5, sendo que os tratamentos T3 e T6, que têm em comum o aclave de 2%, apresentaram menores valores médios de pressão e maiores diferenças entre a pressão inicial e final, quando comparados aos demais.

Assim como para a pressão (KPa), a vazão média (L.h⁻¹) apresentou os menores valores para os tratamentos T3 e T6 e os maiores coeficientes de variação para esses tratamentos. Em relação aos valores mínimos de pressão, os tratamentos T3 e T6 foram os que tiveram os valores mais baixos. Sendo assim observa-se a influência da inclinação na vazão, sendo a inclinação de +2%, ou seja, em aclave, que se detecta as maiores influências negativas na vazão, porém com uma baixa variabilidade dos dados.

A Tabela 6 apresenta a análise de variância da vazão (L.h⁻¹) para os tratamentos realizados e seguido pelo teste de médias de Tukey, demonstrado na Tabela 7.

Tabela 6 Análise de variância da vazão dos gotejadores

Fonte de variação	GL	SQ	QM	F
Forma de irrigação	1	0,0151	0,0151	8,7571 *
Inclinação	2	0,0806	0,0403	23,2528*
Forma de Irrigação versus Inclinação	2	0,0620	0,0310	17,8733*
Tratamentos	5	0,1577	0,0315	18,2018*
Resíduo	144	0,2495	0,0017	
Total	149	0,4071		

*Significativo ao nível de 0,05.

Tabela 7 Teste de médias de Tukey da vazão dos gotejadores

		Inclinação			Média
		Em nível (0%)	-2%	+2%	
Forma de Irrigação	Com água tratada	2,044 Bb	2,107 aA	2,041 aB	2,064 a
	Com fertilizante	2,080 aA	2,048 bB	2,003 bC	2,049 b
	Média	2,062 A	2,078 A	2,022 B	

Obs: Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na coluna, e maiúscula, na linha, não diferem entre si, pelo teste Tukey, a 5% de probabilidade.

Analisando a Tabela 6, considerando um nível de significância de 5%, as fontes de variação utilizadas foram significativas para os valores de vazão, tanto a forma de irrigação como a inclinação. Pelo valor do F calculado, percebe-se que a inclinação tem maior influência do que a forma de irrigação, sendo também a interação entre os fatores significativos para a vazão média ($L \cdot h^{-1}$).

Para o teste de média, o tratamento com água tratada e com inclinação de -2% (T2) e o com fertilizante e em nível (T4) apresentaram as médias mais altas de vazão pelo teste de Tukey, sendo que a vazão média se diferencia estatisticamente entre a água tratada e a fertirrigação, sendo que em relação à inclinação, o processo quando realizado com inclinação de +2% apresenta vazões menores estatisticamente do que quando realizado em nível ou com -2% de inclinação.

Em relação à vazão coletada, os tratamentos com fertirrigação, para o tratamento T5 e T6, os valores inferiores ocorreram na terceira fileira de coleta (2/3), que podem ser os locais onde ocorram entupimentos do sistema, principalmente quando em aclave (T6).

Para isso, quando utilizada a irrigação por gotejamento em terrenos com inclinação, a limpeza dos gotejadores com água é primordial para adquirir a vazão adequada, pois mesmo com a realização da limpeza com água nos tubos gotejadores estes apresentaram entupimentos. O aumento da pressão de trabalho (kPa) pode compensar este maior entupimento de acordo com a declividade, pois contribuiria para o fertilizante atingir os emissores finais da linha lateral.

Este maior estabelecimento dos fertilizantes na terceira fileira de coleta (2/3) também foi observado para os valores para o potencial hidrogeniônico (pH) e a condutividade ($dS \cdot m^{-1}$).

Os valores de pH para os tratamentos de irrigação com água tratada apresentaram resultados semelhantes entre si e também entre as fileiras de coleta, porém diferentes quando comparados aos valores para os tratamentos com fertirrigação, sendo os tratamentos T4 e T5 semelhantes. O tratamento T6 apresentou valor médio de pH mais alto que os outros de fertirrigação, principalmente na última fileira de coleta, pois, devido ao

acive, os fertilizantes não alcançaram os níveis do demais coletores, aumentando o pH destes.

Os valores médios do pH para os tratamentos com fertirrigação foram mais baixos que os recomendados por Folegati (2001), que cita os valores ideais para o uso de fertilizantes entre 6,5 a 8,4, sendo que resultados abaixo disso podem contribuir para o entupimento das tubulações e emissores.

Assim como para os resultados do pH, a condutividade elétrica (CE) foi similar entre os tratamentos com água tratada, sendo estes distintos das médias quando utilizado fertilizantes. Em relação aos coletores cabe ressaltar a diferença apenas no tratamento T6, assim como para o pH, os coletores da última fileira, apresentaram CE mais baixa devido a menor concentração de fertilizantes.

A condutividade elétrica medida nos ensaios está dentro dos valores indicados por Nakayama e Bucks (1986), sendo desaconselhável utilizar para a irrigação quando apresentar CE acima de $3,0 \text{ dS.m}^{-1}$.

A Figura 4 apresentam os gráficos de dispersão entre a vazão (L.h^{-1}) e a pressão (KPa), assim como as equações potenciais e o coeficiente de determinação (R^2).

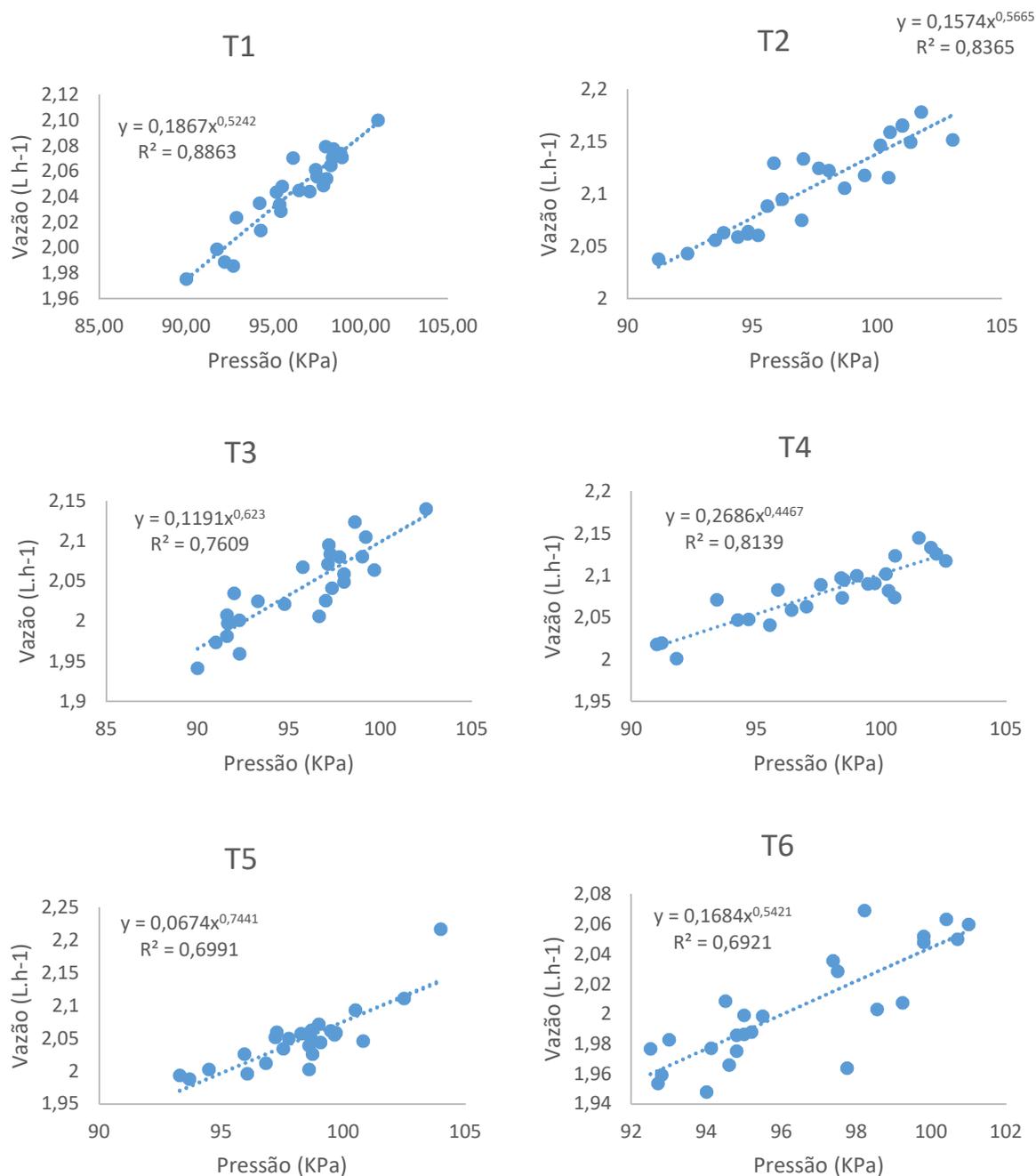


Figura 4 Gráficos de dispersão da pressão (KPa) versus vazão (L h-1).

Em relação aos gráficos de dispersão os valores do coeficiente de determinação (R^2) variam de 88,63% no tratamento T1 a 69,21% para o menor valor no tratamento T6. Essa correlação entre as variáveis pressão e vazão para os tratamentos em nível (T1 e T4) ou com irrigação com água tratada (T1, T2 e T3) apresentaram os valores mais satisfatórios. Como exemplo para o tratamento T1, significa que quando se aumenta o valor da variável independente (pressão) ocorre um acréscimo na variável dependente (vazão), sendo que,

para este caso o modelo ajustado explicou 89,63% da variabilidade da vazão em função da pressão.

Os valores encontrados no estudo são menores que Pachico e Levien (2014), que realizando ensaios para um gotejador GA-4 atingiram R^2 de 99,57%, assim como Faria et al. (2002), realizando ensaios com gotejador para avaliação do entupimento, com R^2 de 99,76%. Hermes et al. (2015) atingiram valores próximos aos determinados na pesquisa, com R^2 variando de 82% a 63%, realizando ensaios de gotejadores com água residuária de amidonaria com diferentes concentrações de sólidos suspensos.

No que condiz às equações de regressão, quando maior o coeficiente de determinação, mais próxima a equação ficou do estipulado pelo fabricante. A equação do tratamento T1 foi que mais se adequou ao proposto pelo fabricante, com $vazão = 0,1867.pressão^{0,5242}$, de acordo com Pachico e Levien (2014), o expoente x, neste caso 0,5242, quanto mais próximo de zero, menor a sensibilidade à variação de pressão, caracterizando um comportamento autocompensante.

Em relação ao coeficiente de variação da vazão total (CVt), os dados da estatística descritiva são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 Estatística descritiva do coeficiente de variação da vazão total (CVt)

Trat.	N	CVt Médio	DP	CV (%)	Máximo	Mediana	Mínimo	p-valor	AC
1	25	0,0130	0,0017	12,9556	0,0188	0,0128	0,0104	0,058	Não
2	25	0,0145	0,0029	19,9823	0,0273	0,0139	0,0118	0,058	Não
3	25	0,0435	0,0017	3,8703	0,1709	0,0205	0,0162	<0,005*	Sim
4	25	0,0580	0,0029	5,0821	0,1191	0,0597	0,0178	0,179	Não
5	25	0,0795	0,0017	2,1693	0,1169	0,0749	0,0587	0,172	Não
6	25	0,1127	0,0031	2,7216	0,1574	0,0921	0,0599	0,144	Sim

* Valores menores que o nível de significância de 0,05

Para os valores do CVt, seguindo a classificação de Solomon (1979), o tratamento T1 e T2 foram considerados como excelentes, os tratamentos T3 e T4 como médios, o tratamento T5 como marginal e o tratamento T6 como pobre. Em relação ao coeficiente de variação, os tratamentos classificados como CVt excelentes apresentaram os maiores CV, acima de 10%, indicando variabilidade dos dados, conforme Pimentel Gomes (2009).

Os maiores CVt ocorreram quando utilizados fertilizantes na água da irrigação, demonstrando uma influência do tipo de água utilizada, corroborado por Hermes (2013), que determinaram valores mais baixos de CVt para a água residuária de amidonaria quando comparado com a água.

Hermes et al. (2013), utilizando água limpa e água residuária do processamento da mandioca, adquiriram valores de CVt de 0,054, classificados como médios para a água limpa e de 0,15 para a água residuária, considerados como pobres. Plestch et al. (2009), utilizando emissores novos para avaliar aplicação de esgoto doméstico obteve valores abaixo de 0,03, classificados como excelentes.

Suszek et al. (2012), realizando ensaios de gotejamento com diferentes cargas hidráulicas, adquiriram valores de CVt de pobre e péssimo nos ensaios. Em todos os trabalhos citados, os valores mais baixos do CVt estão em emissores novos e com uso de água na irrigação, como nos casos dos tratamentos com CVt inferiores nesta pesquisa. Em contrapartida, o uso de materiais como fertilizantes ou águas residuárias tende a aumentar os valores de CVt, assim como a utilização de emissores com maior tempo de uso, facilitando a obstrução dos emissores.

Na Figura 5 são apresentados os gráficos de controle de Shewhart para o CVt.

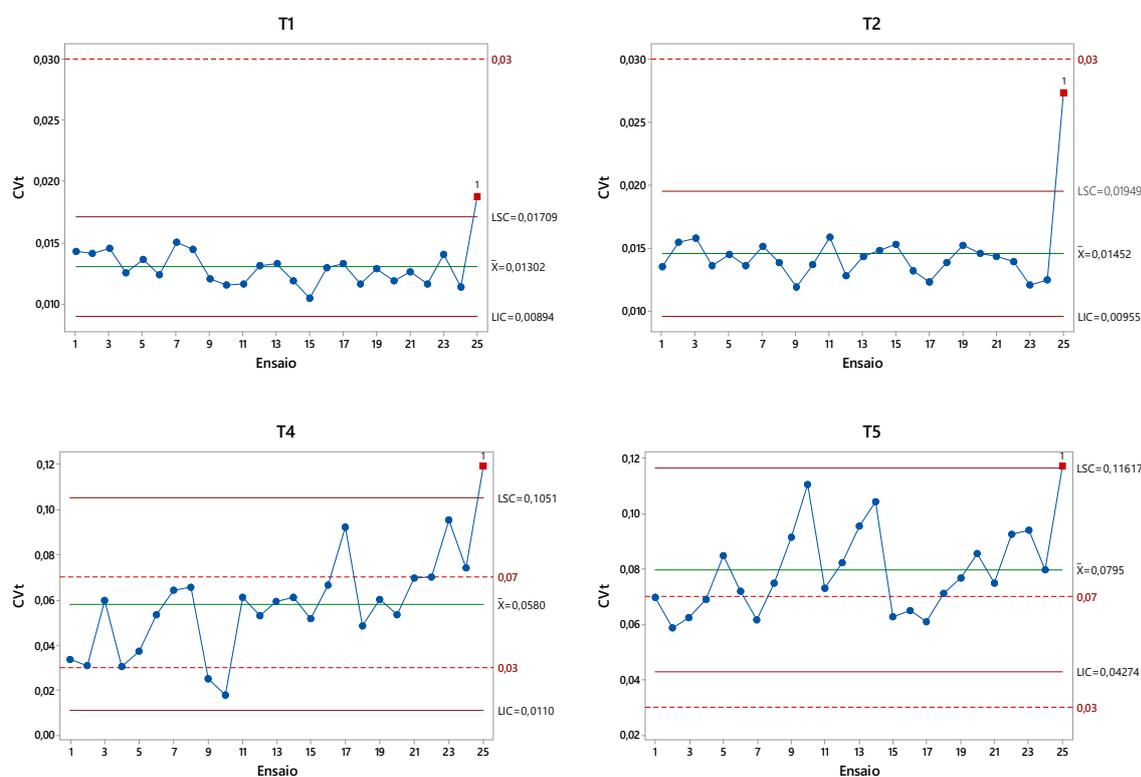


Figura 5 Gráficos de controle Shewhart para o parâmetro CVt.

Os gráficos de controle de Shewhart para o CVt todos apresentaram o ensaio 25 acima do LSC, sendo prejudicial na prática e, apesar dos gráficos não apresentarem sequência ou tendência dos dados, estes estão fora de controle estatístico.

Para os gráficos de controle do tipo MMEP, estes são demonstrados para o parâmetro CVt, na Figura 6.

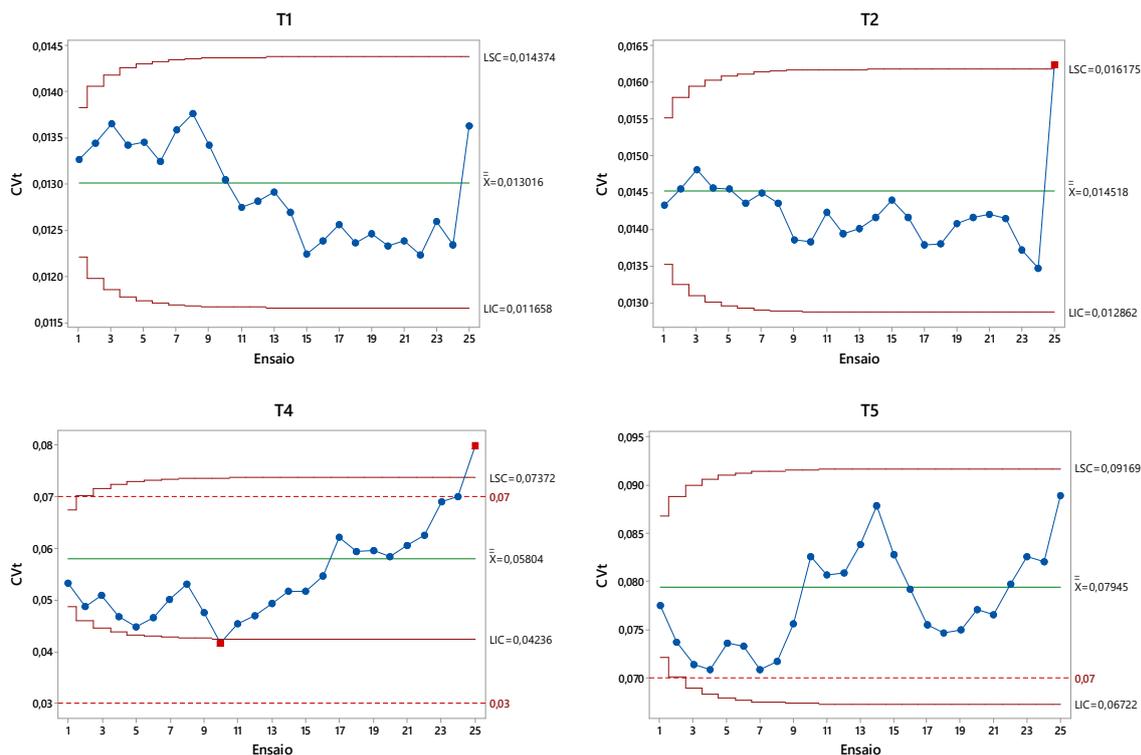


Figura 6 Gráficos de controle MMEP para o parâmetro CVt.

Para os gráficos de controle para o parâmetro CVt, para o tratamento T1 e T5 não há pontos fora dos limites de controle, porém ambos apresentam uma sequência de dados, configurando uma falta de controle dos dados, o que é indesejável no processo, o que pode ser observado de forma mais fácil no tratamento T1, sendo os nove primeiros ensaios acima da linha média e os ensaios 11 até 24 abaixo da linha média em sequência. Para o tratamento T5 isto ocorreu nos primeiros nove ensaios.

Para os tratamentos T2 e T4, estes apresentam dados fora dos limites de controle, facilitando a classificação do processo como fora de controle. Porém, para o tratamento T2 o ponto fora de controle está acima do LSC, sendo positivo para os ensaios. Contudo, este tratamento apresenta uma sequência de dados do ensaio 6 até o 24 abaixo da linha média. Posto isto, para o CVt nenhum tratamento está sob controle estatístico quando utilizados os gráficos MMEP.

As cartas de controle de Shewhart e MMEP classificaram os ensaios como fora de controle estatístico para o coeficiente de variação da vazão total. Hermes (2013) obteve em ensaios de gotejamento com água residuária de amidonaria ensaios sem controle estatístico, pelos fatores de valores acima do LSC, e uma sequência de dados utilizando os gráficos de controle de Shewhart. Utilizando os mesmos gráficos Hermes et al. (2013), avaliando o CVt com uso de água limpa e água residuária do processamento de mandioca,

adquiriram resultados fora de controle para a água e um ensaio fora do LIC para a água residuária.

Hernandez (2010), realizando ensaio com gotejamento em função de cargas hidráulicas diferentes, para o parâmetro CVt, adquiriu através dos gráficos de Shewhart valores satisfatórios para o controle estatístico do processo, estando apenas um tratamento fora de controle.

Na Tabela 9 são exibidos os índices de capacidade do processo (Cps) para o CVt, sendo utilizados como limites superiores os valores de 0,03 e 0,07, que representam as classificações de excelente e médio, respectivamente, de acordo com Solomon (1979).

Tabela 9 Índice de capacidade do processo para o parâmetro CVt

Trat.	CVt médio	Cps	
		LSC=0,03	LSC=0,07
1	0,0130	3,33	11,18
2	0,0145	1,78	6,38
3	0,0435	*	*
4	0,0580	0	1,38
5	0,0795	0	0
6	0,1127	0	0

Para o parâmetro CVt, apesar que de acordo com os gráficos de controle nenhum apresentar um controle estatístico do processo, quando analisado com a ferramenta do índice de capacidade do processo, os tratamentos T1 e T2 evidenciaram como adequados, segundo classificação de Montgomery (2009), para processos novos e com especificações unilaterais, pois obtiveram Cps maior que 1,45, tanto para o LSC = 0,03, ou seja, classificação como excelente, e para o LSC = 0,07, classificado com médio (SOLOMON, 1979).

Para o parâmetro do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) é apresentada na Tabela 10 a estatística descritiva dos dados.

Tabela 10 Estatística descritiva do coeficiente de uniformidade de Chistiansen (CUC)

Trat.	N	CUC Médio	DP	CV (%)	Máximo	Mediana	Mínimo	p-valor	AC
1	25	98,84	0,112	0,113	99,05	98,85	98,57	0,329	Não
2	25	98,80	0,246	0,249	99,02	98,83	97,67	<0,005*	Não
3	25	97,59	1,497	1,534	98,70	98,42	91,28	<0,005*	Sim
4	25	96,10	1,556	1,619	98,47	95,94	91,28	0,185	Não
5	25	94,62	1,286	1,359	96,52	94,94	91,73	0,332	Não
6	25	92,88	2,076	2,235	95,81	93,37	88,09	0,152	Sim

Trat.=Tratamento; N=Número de repetições; DP= Desvio padrão amostral; CV= Coeficiente de variação; AC= autocorrelação; * Valores menores que o nível de significância de 0,05

Os resultados do CUC foram todos considerados como excelentes, de acordo com a classificação de Bernardo, Soares e Mantovani (2008), acima de 90% de uniformidade. O coeficiente de variação de todos os tratamentos foi baixo, considerado de baixa variabilidade e confirmando uma homogeneidade dos dados (PIMENTEL GOMES, 2009).

Todavia, apesar dos valores serem acima de 90%, ocorre um decréscimo dos valores de CUC quando utilizada a fertirrigação. Isto pode ser observado por Hermes et al. (2013), que determinaram valores médios de CUC de 95,21% para ensaios de gotejamento com água limpa e 88,67% para fertirrigação.

Em relação ao CUC quando as variáveis influentes são bem controladas é comum se obter valores elevados, como Pletsch (2009), que, utilizando gotejadores novos, adquiriram CUC acima de 98%, Hermes et al. (2014), que obtiveram os valores de CUC acima de 94% em todos os tratamentos com água limpa e água residuária de amidonaria, assim como Frigo et al. (2006), que, realizando ensaios de gotejamento com água residuária de suinocultura, adquiriram valores acima de 90%.

A relação de menor valor de CUC para ensaios realizados com fertilizantes ou água residuárias também pode ser observado Thebaldi et al. (2013), que, realizando avaliação da uniformidade com gotejadores na cultura do tomate, obtiveram CUC de 91,96 até 96,3%, sendo os menores valores quando utilizado efluente tratado de abate bovino.

Em relação ao p-valor, os tratamentos T2 e T3 foram menores que o nível de significância de 5% (0,05), considerados assim dados não normais. No que condiz com a autocorrelação entre os dados, o tratamento T3 e T6 apresentam essa autocorrelação. Sendo assim, como indicado por Montgomery (2009), os dados não normais não devem ser utilizados para as técnicas do controle estatístico do processo (CEP), como os gráficos de controle e índice de capacidade do processo. Em relação aos tratamentos que apresentam autocorrelação entre os dados não há limitações, porém Montgomery sugere que não sejam utilizados no CEP.

Em relação ao coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), os dados da estatística descritiva são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 Estatística descritiva do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)

Trat.	N	CUD Médio	DP	CV (%)	Máximo	Mediana	Mínimo	p-valor	AC
1	25	98,19	0,206	0,210	98,36	98,26	97,38	<0,005*	Não
2	25	98,08	0,507	0,517	98,54	98,14	95,73	<0,005*	Não
3	25	93,53	7,175	7,671	97,86	97,27	72,63	<0,005*	Sim
4	25	92,85	2,972	3,201	97,51	92,35	84,37	0,171	Não
5	25	86,05	5,619	6,530	92,93	86,70	74,37	0,027*	Sim
6	25	85,59	5,678	6,634	92,21	87,65	71,40	<0,005*	Sim

Trat.=Tratamento; N=Número de repetições; DP= Desvio padrão amostral; CV= Coeficiente de variação; AC= autocorrelação. * Valores menores que o nível de significância de 0,05

O coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) evidenciou os valores médios dos tratamentos T1, T2, T3 e T4 acima de 90%, sendo considerados como excelentes, de acordo com Bralts (1986), e para os tratamentos T5 e T6, como bons, segundo a mesma classificação. Com os valores médios demonstrados, se conclui a influência da fertirrigação e da inclinação topográfica, tanto em aclave como declive, para a diminuição do CUD. Os coeficientes de variação (CV) estiveram todos abaixo de 10%, representando homogeneidade dos dados (PIMENTEL GOMES, 2009).

Os resultados da pesquisa foram similares aos calculados por Hermes et al. (2015), que variaram de 87,62 a 91,93%, assim como Borssoi et al. (2012), que, avaliando a irrigação por gotejamento, adquiriu vazões de 85,84 a 91,65%, quando utilizando água e de 88,28 até 91,03%, quando utilizada a fertirrigação.

Wang, Li, Li (2014), analisando a uniformidade em função de aplicações de nitrogênio na cultura do milho, adquiriram resultados para o CUD de 57 até 95%. Plestsch et al. (2009) avaliando gotejadores novos obtiveram resultados superiores a 98% para o CUD. Thebaldi et al. (2013), realizando avaliação da uniformidade com gotejadores na cultura do tomate obtiveram CUD de 86,00 até 93,10%, sendo os menores valores quando utilizado efluente tratado de abate bovino e os maiores para a fertirrigação convencional. Marques et al. (2016), realizando ensaios de gotejadores com água residuária de laticínios com diferentes tempos de operação calcularam CUD de 83 até 98%, sendo que quanto maior o tempo de operação menor o valor da uniformidade.

Essa análise do tempo é de menor influência para a atual pesquisa, pois entre os ensaios foram realizadas limpezas dos gotejadores com água tratada nos tratamentos com uso de fertilizantes, ressaltando assim a importância dos corretos manejo e limpeza dos equipamentos.

Os valores do CUD foram inferiores ao CUC. De acordo com Zhang e Merkley (2012), geralmente os valores de CUC são maiores que o de CUD, mas não é uma regra para os conjuntos de dados.

Quanto à normalidade dos dados do CUD pelo método de Anderson-Darling, apenas o tratamento T4 apresentaram os dados como normais, além dos tratamentos T3, T5 e T6 apresentarem autocorrelação entre os dados. Com isso, para as técnicas do CEP, apenas o tratamento T4 foi utilizado.

Os gráficos de controle de Shewhart para os parâmetros CUC e CUD são apresentados nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

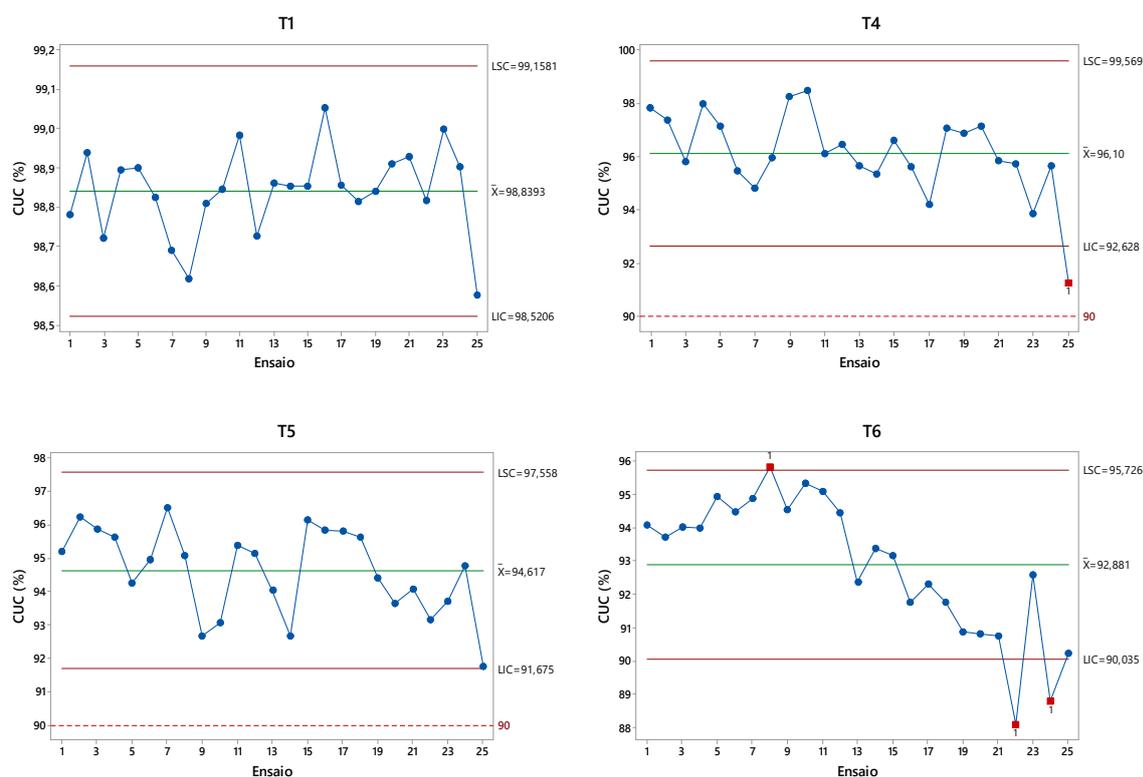


Figura 7 Gráficos de controle de Shewhart para o parâmetro CUC.

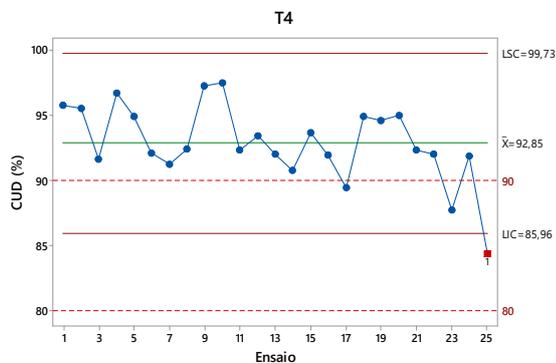


Figura 8 Gráficos de controle de Shewhart para o parâmetro CUD.

Para o parâmetro CUC, os tratamentos T1 e T5 estão sob controle, por apresentarem todos os dados dentro dos limites de controle e não apresentarem tendência ou sequência dos dados ou qualquer outra característica de processo fora de controle (MONTGOMERY, 2009). Os tratamentos T4 e T6 apresentam dados fora do LIC, sendo assim considerados prejudiciais para o processo e sem controle estatístico de qualidade neste processo.

Para o parâmetro CUD, o tratamento T4 apresenta o ensaio 25 abaixo do LIC, sendo assim considerado o processo sem controle estatístico.

Na Figura 9 são apresentados os gráficos de controle do tipo MMEP para o parâmetro CUC e a Figura 10 para o CUD.

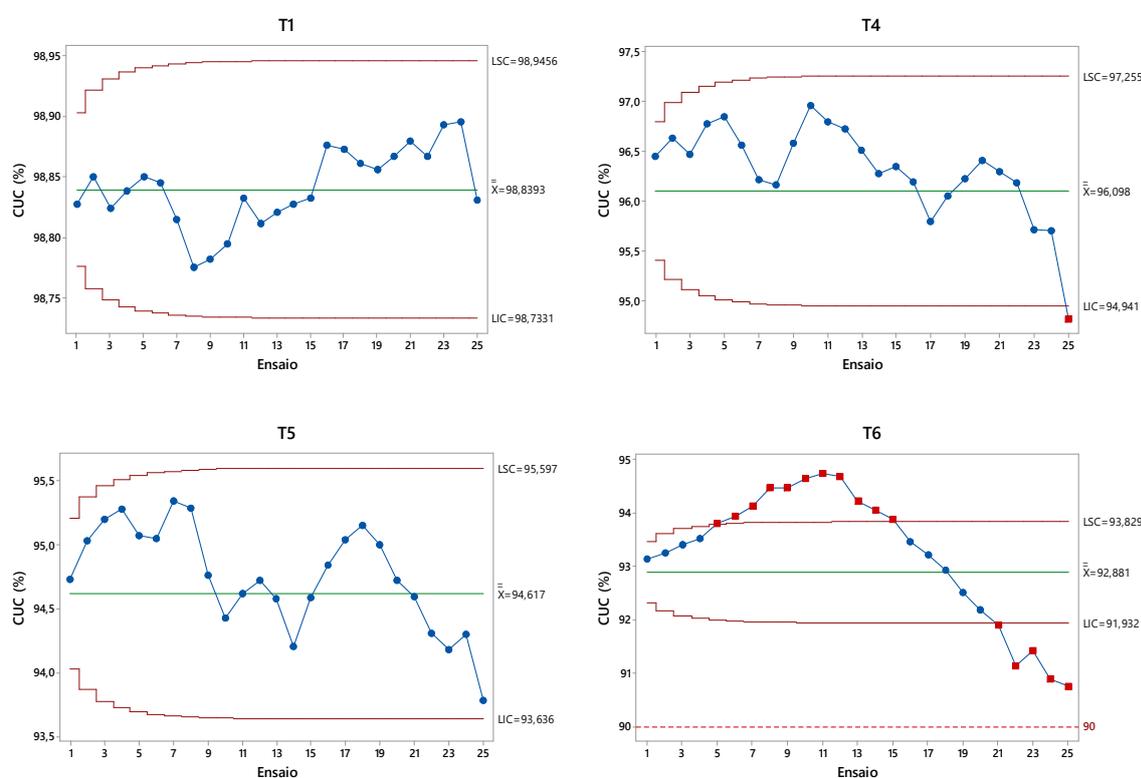


Figura 9 Gráficos de controle MMEP para o parâmetro CUC.

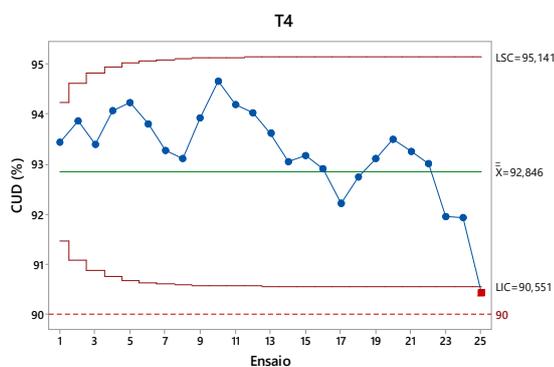


Figura 10 Gráficos de controle MMEP para o parâmetro CUD.

Analisando os gráficos de controle MMEP para os parâmetros CUC e CUD, todos os tratamentos estão fora de controle estatístico. Para o CUC, o tratamento T4 e T6 apresentam valores fora do limite inferior de controle, e os tratamentos T1 e T5 apesar de terem valores fora do LIC, apresentam uma sequência de dados abaixo ou acima da linha média.

Para o parâmetro CUD, apresentado na Figura 11, o tratamento T4 apresenta o ensaio 25 abaixo do LIC e uma sequência de dados do ensaio 1 até 16, estando fora de controle estatístico. O ensaio 25, para todos os tratamentos, apresentou resultados de uniformidade abaixo da média e valores de CVt elevados, podendo ser explicado pelo fato do tempo maior de uso do sistema de irrigação. As limpezas do sistema foram realizadas entre ensaios com água tratada, com abertura dos registros de água e com maior ênfase ao fim do tratamento, com a utilização de detergentes neutros e água tratada.

Comparando os gráficos de Shewhart e MMEP para o parâmetro CUC ocorreu uma divergência de resultados, pois quando aplicado as cartas de controle de Shewhart os tratamentos T1 e T5 apresentam controle estatístico, e para as cartas do tipo MMEP o mesmo não ocorre. Nesses tratamentos ocorreram variações pequenas não detectadas pelos gráficos de Shewhart, sendo que os gráficos de MMEP, por acumularem informações sucessivas diagnosticaram no processo as variações menores e uma sequência dos dados em relação a linha média.

Quando no processo ocorrem variações maiores, os gráficos de Shewhart são recomendados, como apresentado por Frigo (2014), que, realizando ensaios de irrigação por aspersão convencional com influência do vento, afirma que a utilização dos gráficos de controle de Shewhart foi mais eficiente para avaliação da uniformidade, pois ocorreram grandes oscilações. Isso corrobora com Souza et al. (2008), em que os gráficos de Shewhart são eficazes para o diagnóstico para grandes variações e os gráficos de MMEP para detectar pequenas variações nos processos.

Os gráficos de controle produzidos na presente pesquisa estão em conformidade com outros estudos de irrigação, como Hermes et al. (2013), Hermes et al. (2014) e Hermes et al. (2015), que analisando a irrigação por gotejamento através de gráficos de controle de Shewhart verificaram a ocorrência de valores abaixo do limite inferior de controle. Em contrapartida, Juchen, Suszek e Vilas Boas (2013), empregando os gráficos de controle para a irrigação por gotejamento para cultura da alface, obtiveram todos os ensaios sob controle. Frigo et al. (2013) estudando a uniformidade para irrigação diurna e noturna constataram ensaios abaixo do limite inferior de controle (LIC) em todos tratamentos. Desta forma, constata-se que o uso de gráficos de controle para a irrigação em outros estudos foi válido para avaliar os coeficientes de uniformidade e observar a variabilidade destes.

Os índices de capacidade do processo para o parâmetro CUC e CUD são demonstrados nas Tabelas 12 e 13, respectivamente. Os limites inferiores utilizados foram de 90 e 80%, que representam as classificações de uniformidade excelente e boa, respectivamente, de acordo com Bernardo, Soares e Mantovani (2008) para o CUC e Bralts (1986) para o CUD.

Tabela 12 Índice de capacidade do processo para o parâmetro CUC

Trat.	CUC (%) médio	Cpi	
		LIC=90%	LIC=80%
1	98,84	26,34	56,14
2	98,80	*	*
3	97,59	*	*
4	96,10	1,31	3,45
5	94,62	1,20	3,79
6	92,88	0,46	2,07

Tabela 13 Índice de capacidade do processo para o parâmetro CUD

Trat.	CUC (%) médio	Cpi	
		LIC=90%	LIC=80%
1	98,19	*	*
2	98,08	*	*
3	93,53	*	*
4	92,85	0,32	1,44
5	86,05	*	*
6	85,59	*	*

Considerando os valores do Cpi para a variável CUC, o tratamento T1, com CUC é capaz para atingir a classificação de excelente e bom, LIC=90% e LIC=80%, respectivamente, pois $Cpi \geq 1,45$. Os tratamentos T4, T5 e T6 revelaram Cpi capazes, quando avaliados para um LIC=80%. Os resultados para o tratamento T1 foram extremamente altos, devido ao desvio padrão dos dados ser baixo (0,11).

Sendo assim, o CUC quando analisado pelos gráficos de controle de MMEP nenhum tratamento apresenta controle estatístico e pelos gráficos de Shewhart os tratamentos T1 e T5 são considerados sob controle, sendo que o tratamento T1 é capaz para adquirir uma classificação de excelente na uniformidade e o tratamento T5 a classificação de bom, de acordo com Bernardo, Soares e Mantovani (2008).

Para o parâmetro CUD, este não apresenta o índice de capacidade do processo como adequado, para ambos os LIC utilizados na pesquisa. Sendo assim, a variável CUD está fora do controle estatístico, de acordo com os gráficos de controle de Shewhart e MMEP, e indica pelo Cpi uma incapacidade nos ensaios de irrigação para adquirir a classificação de excelente e bom, conforme Bralts (1986).

Observando os valores do CVt, CUC e CUD com o índice de capacidade do processo Cps e Cpi utilizado no estudo, detecta-se um comportamento inversamente

proporcional do CVt em relação ao Cps, com a diminuição do CVt ocorre um aumento do índice de capacidade do processo.

O contrário ocorre para os parâmetros CUC e CUD, em que existe um comportamento diretamente proporcional com o Cpi, de acordo que com o aumento dos coeficientes de uniformidade, aumenta-se o Cpi, sendo expressa para o parâmetro CUC pela expressão $Cpi = 4,3595.CUC - 409,48$ com $R^2 = 75,26\%$ para um LIC=90% e $Cpi = 9,0897.CUC - 852,69$ com $R^2 = 74,76\%$ para um LIC=80%.

Para estudos com irrigação por gotejamento, Hermes et al. (2014), Hermes et al. (2013) e Klein et al. (2015) constataram que, conforme aumenta-se o valor do CUC o índice de capacidade do processo, também crescia, com um coeficiente de determinação R^2 de 70,35, 61 e 91,84%, respectivamente. A mesma relação se faz com os valores do CUD, conforme Hermes (2015), com um R^2 de 70,10% para LIC=90% e 85,7% para LIC=80%. Justi, Vilas Boas e Sampaio (2010) estudando irrigação por aspersão também concluíram a relação diretamente proporcional dos coeficientes de uniformidade CUC e CUD com o Cpl, com R^2 de 78%.

Posto isso, para se obter menor valor de CVt e as maiores uniformidades utilizando o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, de acordo com a ferramenta do índice de capacidade do processo, a alternativa é a utilização de água na irrigação e um terreno sem inclinação.

4 CONCLUSÕES

A fertirrigação e a inclinação com 2% (active) afetaram negativamente os valores de vazão do sistema de gotejamento, com uma maior influência do fator inclinação do terreno nos valores finais de vazão.

Os melhores resultados para os coeficientes de determinação R^2 da vazão e da pressão de trabalho foram obtidos nos tratamentos com o uso da água tratada na irrigação quando comparado a fertirrigação, podendo ser explicado devido à concentração de sólidos nos fertilizantes, alterando os valores de vazão e conseqüentemente a correlação.

Os resultados do CVt foram superiores quando utilizado água tratada e com terreno em nível (T1) ou com declive de 2% (T2). Em relação aos gráficos de controle o CVt apresentou todos os tratamentos fora de controle, tanto pelas cartas de Shewhart, como MMEP. Para o índice de capacidade do processo, os tratamentos citados acima foram considerados como adequados para um CVt considerado excelente.

A uniformidade de distribuição de água para o sistema de gotejamento construído para a pesquisa apresentou os maiores valores quando realizada a irrigação com água e em nível. Com a utilização de fertirrigação e a inclinação do terreno, a uniformidade, para os coeficientes CUC e CUD foi afetada negativamente com seu decréscimo.

Os valores de CUC foram superiores para os ensaios com água tratada quando comparados com a fertirrigação. Para os gráficos de controle de Shewhart e o índice de capacidade do processo, o tratamento com água tratada e em nível o terreno apresentou-se sob controle e capaz para obter classificação excelente para a uniformidade.

O índice de capacidade do processo foi diretamente proporcional aos valores de uniformidade e inversamente proporcional aos valores de CVt. Os resultados da uniformidade pioraram de acordo com o tempo e os valores de CVt diminuíram, sendo adequados para a prática da irrigação.

As técnicas de controle estatístico de qualidade utilizadas foram adequadas para determinar as variabilidades dos ensaios de irrigação em relação aos fatores forma de irrigação e inclinação para os CVt, CUC e CUD.

Sendo assim, se recomenda para uma menor variabilidade dos dados e maior adequação da uniformidade conforme os padrões de excelência o uso da água tratada e um terreno em nível ou declive, porém a utilização de fertilizantes na irrigação por gotejamento não é prejudicial para o alcance da classificação de excelência para a uniformidade, principalmente em terrenos planos, desde que manejado adequadamente o sistema de irrigação, essencialmente com a realização de limpezas constantes.

REFERÊNCIAS

AIROLDI, R. P. S. **Análise do desempenho de gotejadores e da prevenção do entupimento em irrigação com água residuária**. 2007. 140 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR ISO 9261. **Equipamentos de irrigação agrícola** – Emissores e tubos emissores – Especificação e métodos de ensaio. São Paulo, 2006.

BASSO, C.; VILLAFANE, R.; TORRES, S. Evaluación de la uniformidad del riego y efecto del fertirriego nitrogenado en un huerto de lechosa (Carica papaya L.). **Bioagro**, Barquisimeto, v. 20, n. 2, p. 105-110, 2008.

BENOUNICHE, M.; KUPER, M.; HAMMANI, A.; BOESVELD, H. Making the user visible: analyzing irrigation practices and farmers' logic to explain actual drip irrigation performance. **Irrigation Science**, Berlim, v.32, n. 6, p. 405-420, 2014.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8ª ed. Viçosa: editora UFV, p. 625, 2008.

BONFIM, G. V.; MANZANO, J.; AZEVEDO, B. M.; VASCONCELOS, D. V.; VIANA, T. V. A. Potassium Distribution in Drip Irrigation with Fertigation for Different Injection Distances in the Main Line. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 6, p. 1150-1161, 2014.

BORGES, R. C.; FERREIRA, E. B.; OLIVEIRA, M. S. Estudo do padrão de não-aleatoriedade sequência no controle estatístico do processo. **Symposium**, Lavras, v. 6, n. 2. p. 31-35, 2008.

BORSSOI, A. L.; VILAS BOAS, M. A.; REISDORFF, M.; HERNANDEZ, R. H.; FOLADOR, F. A. C. Water application uniformity and fertigation in a dripping irrigation set. **Engenharia Agrícola (Impresso)**, Jaboticabal, v. 32, p. 718-726, 2012.

BRALTS, V. F. Field performance and evaluation. In: NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. (Ed). **Trickle irrigation for crop production**. Amsterdam: Elsevier. p. 216-240, 1986.

BRAUER, R. L.; CRUZ, R. L.; VILLAS BÔAS, R. L.; PLETSCHE, T. A. Avaliação da uniformidade de aplicação de água em gotejadores em função do teor de ferro. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 1, p. 21-30, 2011.

BRENNAN, D. Factors affecting the economic benefits of sprinkler uniformity and their implications for irrigation water use. **Irrigation Science**, Berlim, v.26, n.2, p.109-119, 2008.

BURT, C.; CLEMMENS, A.; STRELKOFF, T.; SOLOMON, K.; BLIESNER, R.; HARDY, L. A.; HOWELL, T. A.; EISENHAEUER, D. E. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. **Irrigation and Drainage Engineering**, Newark, v. 123, n. 6, p. 423-442, 1997.

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 68, p. 135-149, 2004.

CARRIÓN, P.; TARJUELO, J.M.; MONTERO, J. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation: I. A description of model. **Irrigation Science**, Berlim, v.20, n.2, p.73-84, 2001.

CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkely: University of California, Experiment Station, p. 124, 1942.

COSTA, A. F.B.; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle Estatístico de Qualidade**. 2ª ed. São Paulo: editora Atlas, 2008.

DUKES, M. D.; ZOTARELLI, L.; SCHOLBERG, J. M. S.; MUÑOZ-CARPENA, R. **Irrigation and Nitrogen Best Management Practices Under Drip Irrigated Vegetable Production**. World Environmental and Water Resources Congress, 2006.

EL-HADY, O. A.; SHAABAN, S. M.; MOHAMEDIN, A. A. M. Impact of emission uniformity on nutrients uptake and water and fertilizers use efficiency by drip irrigated 15 years old Washington novel orange trees grown on a newly reclaimed sandy area. **Journal of American Science**, Richmond Hill, v. 6, p. 113-119, 2010.

ELLA, V.; KELLER, J.; REYES, M.; YODER, B. **Water distribution uniformity improvement of microtube-type and button-type drip irrigation system using adjustable pressure-loss lateral takeoff valves**. In Soil and Water Engineering. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-Ag Eng. Valencia, Spain, 2012.

ELLA, V.; REYES, M.; YODER, R. Effect of hydraulic head and slope on water distribution uniformity of a low-cost drip irrigation system. **Applied Engineering in Agriculture**, San Francisco/Berlim, v. 25, p. 349-356, 2009.

FABEIRO, C.; DE SANTA OLALLA, F.; MARTIN DE JUAN, J.A. Production of muskmelon (*Cucumis melo* L.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate. **Agricultural Water Management**, Nova Zelândia, v. 54, p. 93-105, 2002.

FERNANDES, A. L. T.; COELHO, R. D.; BOTREL, T. A. Avaliação do desempenho hidráulico da bomba injetora Indek, para fertirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 409-414, 2003.

FOLEGATI, M. **Fertirrigação: flores, frutas e hortaliças**. Guaíba: Agropecuária, 2001. 336 p.

FRIGO, E.; SAMPAIO, S.; FREITAS, P.; NÓBREGA, L.; SANTOS, R.; MALLMANN, L. Desempenho de sistemas de irrigação por gotejamento e de filtros utilizando água residuária de suinocultura. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 3, p. 305-318, 2006.

FRIGO, J. P. **Controle estatístico da qualidade na irrigação por aspersão**. 2014. 43 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

FRIGO, J. P.; VILAS BOAS, M. A.; FRIGO, E. P.; HERMES, E.; TESSARO, E. Irrigação diurna e noturna em um sistema de aspersão convencional em Palotina-PR. **Irriga**, Botucatu, v. 18, p. 318-327, 2013

GLEICK, P. Water Management: soft water paths. **Nature**, v. 418, p. 373-373, 2002.

GONÇALVES, M. P.; HERMES, E.; VILAS BOAS, M. A.; BERGER, J. S.; LINS, M. A.; WULF, V. S. Uniformidade de aplicação de água e efluente de amidonaria em sistema de irrigação por gotejamento. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 12, p. 391-399, 2013.

GONÇALVES, R. A. B; MANTOVANI, E. C; RAMOS, M. M; SOUZA, L. O. C. Diagnóstico da aplicação de águas residuárias da suinocultura na cafeicultura irrigada II Avaliação da uniformidade de aplicação de água. **Irriga**, Botucatu, v.11, n.3, p. 402-414, 2006.

GYASI-AGYEI, Y. Compatibility assessment of drip irrigation laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Delaware, v. 137, p. 610-615, 2011.

HAMOURI, B.E.; HANDOUF, A.; MEKRANE, M. TOUZANI, M.; KHANA, A.; KHALLAYOUNE, K.; BENCHOKROUN, T. Use of wastewater for crop production under arid and saline conditions: yield and hygienic quality of the crop and soil conditions. **Water Science and Technology**, Innsbruck, v. 33, n.10-11, p. 327-334, 1996.

HERMES, E. **Avaliação da irrigação por gotejamento com aplicação de água residuária de amidonaria**. 2013. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.

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**, Lagos, v. 10, p. 1427-1433, 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, Agriculture and Environment** (Print), Helsinque, v.12, p. 487 – 490, 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, Agriculture and Environment**, Helsinque, v. 11, p. 841-845, 2013.

HERNÁNDEZ, R. H. **Controle estatístico de processo aplicado na uniformidade da irrigação e fertirrigação por gotejamento**. 2010. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2010.

IRRITEC. **Catálogo P1 Siplast**. Disponível em: <http://www.irritec.com/it-IT/wp-content/uploads/sites/2/2013/09/Catalogo_P1.pdf>. Acesso em: 04 maio 2015.

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, 2013.

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

KARLBERG, L.; PENNING DE VRIES, F. W. T. Exploring potentials and constraints of low-cost drip irrigation with saline water in sub-Saharan. **Physics and Chemistry of the Earth**, Bristol, v. 29, p. 1035–1042, 2004.

KELLER, J. **Evolution of drip/microirrigation**: traditional and non-traditional uses. Paper presented as keynote address at the International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation, Tenerife, Spain, 2002.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkler and Trickle Irrigation**. Chapman and Hall, New York, 1990.

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation design**. Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing, 133p, 1975.

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, Agriculture and Environment**, Helsinque, v. 13, p. 179-183, 2015.

LI, J.; MENG, Y.; LI, B. Field evaluation of fertigation uniformity as affected by injector type and manufacturing variability of emitters. **Irrigation Science**, Berlim, v. 25, n. 2, p. 117-125, 2006.

LÓPEZ-MATA, E.; TARJUELO, J. M.; JUAN, J. A. DE; BALLESTEROS, R.; DOMÍNGUEZ, R. A. Effect of irrigation uniformity on the profitability of crops. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p.190-19, 2010.

LUQUET, D.; VIDAL, A.; SMITH, M.; DAUZAT, J. "More crop per drop": how to make it acceptable for farmers?. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 73, p. 108-119, 2005.

MAISIRI, N.; SENZANJE, A.; ROCKSTROM, J.; TWOMLOW, S. J. On farm evaluation of the effect of low cost drip irrigation on water and crop productivity compared to conventional surface irrigation system. **Physics and Chemistry of the Earth**, Bristol, v. 30, p. 783–791, 2005.

MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação – princípios e métodos**. 2 ed. Viçosa: Editora UFV, p. 197, 2007.

MARQUES, B.; CUNHA, V.; CUNHA, V.; SILVA, K.; BATISTA, R. Desempenho de gotejadores operando com água residuária de laticínios em escala laboratorial. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 1, p. 140-155, 2016.

MERRIAN, J.L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Agricultural and Irrigation. Engineering Department, Utah State University, p. 217, 1978.

MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao controle estatístico de qualidade**. Tradução: FARIAS, A. M. L., FLORES, V. R. L. F., LAURENCEL, L. C. 4. Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.

MORAIS, M. **Esquemas de controlo de qualidade do tipo CUSUM e EWMA para atributos variáveis**. Capítulo 10 (Notas de aula), Escola Técnico Lisboa. Lisboa, Portugal, 2016. Disponível em: <https://www.math.tecnico.ulisboa.pt/~mjmorais/FCQ2-0607-cap10.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2016.

NAKAYAMA, F.; BUCKS, D. **Trickle irrigation for crop production: design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 164.

NOORI, J. S.; AL THAMIRY, H. A. Hydraulic and Statistical Analyses of Design Emission Uniformity of Trickle Irrigation Systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Delaware, v. 138, p. 791-798, 2012.

OMODEI, B. Accuracy and uniformity of a gravity-feed method of irrigation. **Irrigation Science**, Berlim, v. 33, n. 2, p. 121-130, 2015.

ONI, S. A.; MALIWICHI, L. L.; OBADIRE, O. S. Assessing the contribution of smallholder irrigation to household food security, in comparison to dry land farming in Vhembe district of Limpopo province, South Africa. **African Journal of Agricultural Research**, Lagos, v. 6, n.10, p. 2188-2197, 18 May, 2011.

PACHICO, I.; LEVIEN, S. Avaliação de emissores de baixo custo de irrigação localizada submetidos à baixa pressão. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial 1, p. 55-61, 2014.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15ª Ed. Piracicaba: FEALQ, 2009, 451p.

PLETSCH, T. A.; CRUZ, R. L.; MAZZER, H. R.; OLIVEIRA, E. F. Desempenho de gotejadores com uso de esgoto doméstico tratado. **Irriga**, Botucatu, v. 14, n. 2, p. 243-253, 2009.

POSTEL, S. Entering na era of water scarcity: the challenges ahead. **Ecology Applied**, Londres, v. 10, n. 4, p. 941-948, 2000.

PROVENZANO, G.; PUMO, D. Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation Laterals. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Delaware, v.130, n. 4, p. 318–324, 2004.

SAHIN, U.; ANAPAL, O.; DONMEZ, M. F.; SAHIN, F. Biological treatment of clogged emitters in a drip irrigation system. **Journal of Environment Management**, Berkeley, v. 76, n. 4, p. 338–341, 2005.

SOLOMON, K. Manufacturing variation of trickle emitters. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph. 22, n. 5, p. 1034-1038, 1979.

SOUSA, V. F.; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Embrapa: Informação Tecnológica, Brasília, p. 771, 2011.

SOUZA, L.M.; RIBEIRO JUNIOR, J. I.; REIS, G. M.; IDE, M. S. Eficiência dos Gráficos de Controle XBARRA, EWMA e CUSUM. **Revista Eletrônica Produção e Engenharia**, online, v. 1, n. 1, p. 81-94, 2008.

SUSZEK, F.; VILAS BOAS, M.; KLEIN, M.; REIS, C.; MORÉ, C.; SZEKUT, F. **Uniformidade em um sistema de irrigação familiar por gotejamento sob diferentes cargas hidráulicas**. In: INOVAGRI: International Meeting, Fortaleza, 2012

TARJUELO, J.M.; MONTERO, J.; HONRUBIA, F.T.; ORTIZ, J.J. ORTEGA, J.F. Analysis of uniformity of sprinkle irrigation in a semi-arid area. **Agricultural Water Management**, v. 40, p. 315-331, 1999.

TESSARO, E. **Efeito da carga hidráulica na uniformidade da irrigação e fertirrigação em sistema de gotejamento**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

THEBALDI, M.; ROCHA, M.; SANDRI, D.; FELISBERTO, A.; NETO, S. Diferentes tipos de água e seu efeito na uniformidade de gotejadores na cultura do tomate. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 2, p. 212-222, 2013.

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, J. G. F.; RAMOS, M. M.; SILVA, C. M.; CORDEIRO, E. A. Recuperação de gotejadores obstruídos devido à utilização de águas ferruginosas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 1-6, 2004.

WERNECK, J.E.F.; FERREIRA, R.S.A.; CHRISTOFIDIS, D. **O uso da água para irrigação**. Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www.cf.org.br/cf2004/irrigacao.doc>>. Acesso em: 10 ago. 2015.

WERKEMA, M. C. C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Belo Horizonte, 2006.

WANG, J.; GONG, S.; XU, D.; YU, Y.; ZHAO, Y. Impact of drip and level-basin irrigation on growth and yield of winter wheat in the North China Plain. **Irrigation Science**, Berlim, v. 31, n. 5, p. 1025-1037, 2013.

WANG, Z.; LI, J.; LI, Y. Effects of drip irrigation system uniformity and nitrogen applied on deep percolation and nitrate leaching during growing seasons of spring maize in semi-humid region, **Irrigation Science**, Berlim, v. 32, n. 3, p. 221-236, 2014.

WILDE, C.; JOHNSON, J.; BORDOVSKY, J. P. Economic analysis of subsurface drip irrigation system uniformity. **Applied Engineering in Agriculture**, San Francisco/Berlim, v. 25, p. 357-361, 2009.

ZHANG, L.; MERKLEY, G. Relationships between common irrigation application uniformity indicators, **Irrigation Science**, Berlim, v. 30, n. 2, p. 83-88.

ZHANG, L.; WU, P.; ZHU, D. Hydraulic design procedure for drip irrigation submain unit based on relative flow difference. **Irrigation Science**, Berlim, v. 31, p. 1065-1073, 2013.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a atual conjuntura das agriculturas mundial e brasileira se faz necessário a utilização de tecnologias que aumentem a produtividade das culturas, mas ao mesmo tempo respeitem o meio ambiente e a utilização racional dos recursos naturais.

Para suprir estas necessidades, a irrigação, utilizada como tecnologia para aumento de produtividade, deve ser estudada através de parâmetros que demonstrem melhor racionalização do uso da água e maior sustentabilidade.

Nesta pesquisa, as ferramentas de gráficos de controle e índice de capacidade do processo foram adequadas para indicar as variabilidades dos processos, diagnosticando as alterações, classificando os processos conforme as especificações e contribuindo na tomada de decisão quanto aos sistemas mais adequados.

No trabalho, quando analisado os coeficientes de uniformidade, os valores determinados nos processos de CUC foram maiores que os de CUD, tanto na microaspersão como no gotejamento.

Para a microaspersão, quando se utilizou a energia solar fotovoltaica, a mesma evidenciou os maiores valores de uniformidade quando se utilizou um sistema de armazenamento de energia e quando os menores espaçamentos entre microaspersores foram usados.

Na irrigação por gotejamento foi observado a influência da inclinação topográfica do terreno na uniformidade e do uso de fertilizantes na irrigação, sendo que as uniformidades mais elevadas ocorreram quando o terreno está em nível e não se utiliza fertilizantes.

Quanto aos gráficos de controle, os do tipo Média Móvel Exponencialmente Ponderada são os mais adequados quando realizadas experimentos em laboratório, demonstrando com exatidão as pequenas variabilidades que ocorrem, porém os de Shewhart continuam sendo cartas de controle de bom diagnóstico para a irrigação localizada.

Por fim, no esforço de racionalizar o uso de água e nutrientes e aumentar a uniformidade de distribuição na irrigação localizada, ocorre ainda a necessidade de mais estudos, porém as influências verificadas na pesquisa foram avaliadas e diagnosticadas como se pretendia com o uso de técnicas de controle estatístico de qualidade do processo, determinando que a energia solar fotovoltaica pode ser utilizada na irrigação, apresentando altas uniformidades desde que aliada a um sistema de armazenamento de energia. Também atestou-se que em terrenos mais planos a uniformidade é maior e com menor variabilidade e o uso de fertilizantes nestes sistemas é uma alternativa viável para o aumento da produção agrícola, porém aliado a uma maior manutenção e limpeza do sistema de irrigação.