



**Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais  
Pós – Graduação em Engenharia Agrícola  
Área de Concentração em Irrigação e Drenagem**



**PATRÍCIA FERREIRA DA SILVA**

**UNIFORMIDADE DE VAZÃO EM MANGUEIRA GOTEJADORA  
AUTOCOMPENSANTE UTILIZANDO ÁGUA SALINA**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**FEVEREIRO DE 2014**

**PATRÍCIA FERREIRA DA SILVA**

**UNIFORMIDADE DE VAZÃO EM MANGUEIRA GOTEJADORA  
AUTOCOMPENSANTE UTILIZANDO ÁGUA SALINA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Campina Grande, como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de Concentração:

Engenharia de Irrigação e Drenagem

Orientador:

Prof. Dr. José Dantas Neto – UFCG/CTRN/UAEAg

**CAMPINA GRANDE, PB**

**FEVEREIRO DE 2014**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586u Silva, Patrícia Ferreira da.  
Uniformidade de vazão em mangueira gotejadora autocompensante utilizando água salina / Patrícia Ferreira da Silva. – Campina Grande, 2014. 87 f. : color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2014.

"Orientação: Prof.<sup>a</sup> Prof. Dr. José Dantas Neto".  
Referências.

1. Gotejamento. 2. Emissores. 3. Salinidade. 4. Uniformidade de Irrigação I. Dantas Neto, José Dantas. II. Título.

CDU 631.674.6(043)



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais  
Pós – Graduação em Engenharia Agrícola  
Área de Concentração em Irrigação e Drenagem



**PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DA MESTRANDA**

**Patrícia Ferreira da Silva**

**UNIFORMIDADE DE VAZÃO EM MANGUEIRA GOTEJADORA  
AUTOCOMPENSANTE, UTILIZANDO ÁGUA SALINA**

Aprovada em: 24 de fevereiro de 2014

**Banca Examinadora**

**Parecer**

José Dantas Neto

APROVADO

Prof. Dr. José Dantas Neto

– Orientador –

Vera Lúcia Antunes de Lima

Aprovado

Prof. Dra. Vera Lúcia Antunes de Lima

– Examinadora –

Delfran Batista dos Santos

APROVADO

Dr. Delfran Batista dos Santos

– Examinador –

**CAMPINA GRANDE, PB**

**FEVEREIRO DE 2014**

Em mais uma etapa da minha vida DEUS me concedeu forças para estar aqui, neste momento único, concretizando mais um sonho.

Dedico

A meus pais, Cristovão João da Silva e Maria de Fátima Ferreira da Silva, pelo amor, carinho e por serem os maiores responsáveis pela minha formação; por todo apoio, dedicação, orientação e toda confiança depositada em mim.

A meus irmãos, Ademir, Emerson, Leticia e Valmir, pela amizade e por estarem sempre ao meu lado. Obrigada por sua presença nos momentos em que estive ausente e pelo amor tão abundante.

*...há um tempo em que é preciso abandonar as roupas usadas, que já tem a forma do nosso corpo, e esquecer os nossos caminhos, que nos levam sempre aos mesmos lugares. É o tempo da travessia: e, se não ousarmos fazê-la, teremos ficado, para sempre, à margem de nós mesmos...*

*Fernando Pessoa*

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Campina Grande, particularmente à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso e por me proporcionar uma formação profissional e humana.

Agradeço a toda minha família: pais, irmãos e amigos.

Ao Professor Dr. José Dantas Neto, pela importante ajuda, orientação, estímulo, atenção, paciência e dedicação durante este trabalho e pelos ensinamentos por ocasião do curso.

A todos os professores da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, pelos bons ensinamentos durante os anos de curso. Agradeço também a todos os professores das instituições de ensino por onde passei.

Aos examinadores: Professor Dr. José Dantas Neto, Professora Dra Vera Lúcia Antunes de Lima e ao Dr. Delfran Batista dos Santos, pelas providenciais contribuições para o aperfeiçoamento deste trabalho.

A todos os funcionários da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

À Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e às pessoas que ali trabalham, pelas informações prestadas e pelo apoio aos alunos deste centro.

Aos amigos: Arsênio Pessoa de Melo Júnior, Aaron de Sousa Alves, Luciano Saboya Fallé, Betânia Rodrigues e Jailma Ribeiro.

Às companheiras de todas as horas, Célia, Daniela, Elenize, Tatiana e Valéria.

Às Bolsistas: Sabrina Cordeiro e Roberta de Cassia.

Aos alunos da graduação em Engenharia Agrícola da empresa júnior AGTEC, em especial a Aryadne Ellen e Rafael Juvino.

Aos colegas do curso de Mestrado e Doutorado: Jailma Ribeiro de Lima, Júlia Soares de Lima, Ramara Sena, Rodrigo Pereira, Franklin dos Anjos, Antônio Suassuna, Janivan Fernandes, Lenildo Teixeira, Benjamim Carvalho, Aaron de Sousa, Arsenio Pessoa, Luciano Saboya, Marcelo Possas, Junior Carvalho, Claudinete Costa, Sonyvagno Sousa, Sebastião de Oliveira e Mônica Shirley.

Enfim, agradeço a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para  
minha qualificação profissional.

**OBRIGADA**

## Sumário

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABELAS .....	iii
RESUMO .....	iv
ABSTRACT:.....	v
Considerações gerais .....	1
1. Introdução .....	2
2. Objetivos .....	3
2.1. Geral.....	3
2.2. Específico.....	3
3. Revisão de Literatura .....	4
3.1. Irrigação Localizada.....	4
3.2. Principais Vantagens do sistema da irrigação por gotejamento .....	4
3.3. Principais Desvantagens do sistema de irrigação por gotejamento.....	6
3.4. Qualidade da água para irrigação .....	6
3.5. Avaliação do sistema de irrigação.....	7
3.6. Relação pressão x vazão do emissor .....	11
3.7. Obstrução de emissores.....	12
3.8. Normas para avaliar os emissores .....	13
3.9. Normas ISO 8796:2004 e 9261:2004.....	14
3.10. Controle Estatístico de Processos.....	14
3.11. Controle Estatístico de Qualidade .....	15
3.12. Gráficos de Controle .....	16
3.13. Referências bibliográficas .....	19
I CAPÍTULO.....	23
DESEMPENHO DE EMISSORES AUTOCOMPENSANTES UTILIZANDO ÁGUAS SALINAS .....	24
Resumo.....	24
Abstract .....	25
4. Introdução .....	26
5. Material e Métodos.....	27
5.1. Descrição da estrutura experimental e funcionamento do sistema.....	27
5.2. Processo de coleta de dados .....	30
5.3. Parâmetros avaliados.....	30
6. Resultados e Discussão .....	33

7. Conclusões .....	51
8. Referências bibliográficas .....	52
II CAPITULO .....	55
CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO EM EMISSORES AUTOCOMPENSANTE COM ÁGUAS SALINAS .....	56
Resumo.....	56
Abstract .....	57
9. Introdução .....	58
10. Material e Método .....	59
11. Resultados e Discussão .....	63
11.1. Testes de Normalidade .....	63
11.2. Aplicação do controle estatístico da qualidade .....	65
11.3. Índice de capacidade de processo.....	75
12. Conclusões .....	84
13. Referências Bibliográficas .....	85

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Vista da casa de vegetação (A) experimento instalado dentro da casa de vegetação (B).	28
Figura 2– Estrutura para avaliação composta de 3 mangueiras e cinco reservatórios com água salina(A) e conjunto motobomba com filtro e manômetro (B) .....	28
Figura 3–Características físicas do gotejador modelo XFS Dripline da Rain Bird.....	29
Figura 4 – Curva de vazão versus pressão com equação potencial para emissores novos nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas. ....	34
Figura 5 – Curva de vazão versus pressão com equação potencial para emissores com 210 horas de funcionamento nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas. ....	35
Figura 6 – Curva de vazão versus pressão com equação potencial para emissores com 350 horas de funcionamento nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas. ....	36
Figura 7 – Coeficientes de uniformidade de Christiansen CUC (A), de uniformidade de distribuição CUD (B) e de uniformidade estatístico CUE (C), em emissores novos, nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas. ....	40
Figura 8 – Coeficientes de uniformidade de Christiansen CUC (A), de uniformidade de distribuição CUD (B) e de uniformidade estatístico CUE (C) em emissores com 210 horas de funcionamento nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas. ....	42
Figura 9 – Coeficientes de uniformidade de Christiansen CUC (A), de uniformidade de distribuição CUD (B) e de uniformidade estatística CUE (C) em emissores com 350 horas de funcionamento nas diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas. ....	43
Figura 10 – Grau de entupimento GE (A), coeficiente de variação de fabricação CVF (B) e eficiência de aplicação EA (C) em função da pressão de serviço aplicada em emissores novos.....	46
Figura 11 – Grau de entupimento GE (A), coeficiente de variação de uso CVq (B) e eficiência de aplicação EA (C) em emissores com 210 horas de funcionamento nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas .....	48
Figura 12 – Grau de entupimento GE (A), coeficiente de variação de uso CVq (B) em função da interação (S X P) e eficiência de aplicação EA (C) em emissores com 350 horas de funcionamento nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas. ....	50
Figura 13 - Cartas de controle de medidas individuais para vazão nos quatro tratamentos salinos aplicados aos emissores novos. ....	66
Figura 14 - Cartas de controle de medidas individuais para vazão nos quatro tratamentos salinos aplicados aos emissores com 210 horas de funcionamento.....	67
Figura 15- Cartas de controle de medidas individuais para vazão nos quatro tratamentos salinos aplicados aos emissores com 350 horas de funcionamento.....	68
Figura 16 - Cartas de controle de médias individuais para coeficiente de uniformidade e Christiansen (CUC) em função da salinidade da água de irrigação em gotejadores novos. ....	70
Figura 17- Cartas de controle de médias individuais para coeficiente de uniformidade e Christiansen (CUC) em função da salinidade da água de irrigação em gotejadores com 210 horas de funcionamento.....	72
Figura 18 - Cartas de controle de médias individuais para coeficiente de uniformidade e Christiansen (CUC) em função da salinidade da água de irrigação em gotejadores com 350 horas de funcionamento.....	74

Figura 19 - Histogramas da Capacidade de processo (Cp) e sua centralidade (Cpk) para vazão de gotejadores submetidos a águas de diferentes concentrações salinas quando novo.....	76
Figura 20 - Histogramas da Capacidade de processo (Cp) e sua centralidade (Cpk) para vazão de gotejadores submetidos a água de diferentes concentrações salinas com 210 horas de funcionamento.....	77
Figura 21 - Histogramas da Capacidade de processo (Cp) e sua centralidade (Cpk) para vazão de gotejadores submetidos a água de diferentes concentrações salinas, com 350 horas de funcionamento.....	78
Figura 22 - Histogramas da Capacidade de processo (Cp) e sua centralidade (Cpk) para coeficiente de uniformidade de Christiansen com água de diferentes concentrações salinas para emissores novos. ....	80
Figura 23 - Histogramas da Capacidade de processo (Cp) e sua centralidade (Cpk) para coeficiente de uniformidade de Christiansen com água de diferentes concentrações salinas para emissores com 210 horas de funcionamento. ....	82
Figura 24 - Histogramas da Capacidade de processo (Cp) e sua centralidade (Cpk) para coeficiente de uniformidade de Christiansen com água de diferentes concentrações salinas para emissores com 350 horas de funcionamento .....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e Christiansen (CUC).....	9
Tabela 2- Classificação do coeficiente de variação de fabricação (CVf) de emissores para gotejamento. ....	10
Tabela 3 – Características técnicas do emissor modelo XFS dripline da Rain Bird. ....	29
Tabela 4 – Vazões fornecidas pelo fabricante e a diferença com as vazões obtidas pelas equações ajustadas em emissores novos nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas. ...	37
Tabela 5 – Vazões fornecidas pelo fabricante e a diferença com as vazões obtidas pelas equações ajustadas em emissores com 210 horas de funcionamento nas diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas .....	37
Tabela 6 – Vazões fornecidas pelo fabricante e a diferença com as vazões obtidas pelas equações ajustadas em emissores com 350 horas de funcionamento nas diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas .....	38
Tabela 7 – Análise de variância dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), uniformidade de distribuição (CUD) e uniformidade estatística (CUE) em emissores novos, com 210 e 350 horas de funcionamento nas diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas .....	38
Tabela 8 – Resumo da análise de variância para grau de entupimento (GE), coeficiente de variação de fabricação e de uso (CVF e CVq) e eficiência de aplicação (EA) em emissores novos, com 210 e 350 horas de funcionamento nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas ...	45
Tabela 9 - Valores mínimos recomendados da razão da capacidade de processo (Cp; Cpk).....	62
Tabela 10 – Estatística descritiva dos parâmetros avaliados conforme teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, com a modificação de Lilliefors (1967) para vazão e coeficiente de uniformidade de Christiansen em gotejadores novos. ....	63
Tabela 11 – Estatística descritiva dos parâmetros avaliados conforme teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, com a modificação de Lilliefors (1967) para vazão e coeficiente de uniformidade de Christiansen em gotejadores com 210 horas de funcionamento. ....	64
Tabela 12 – Estatística descritiva dos parâmetros avaliados conforme teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, com a modificação de Lilliefors (1967) para vazão e coeficiente de uniformidade de Christiansen em gotejadores com 350 horas de funcionamento .....	64

## UNIFORMIDADE DE VAZÃO EM MANGUEIRA GOTEJADORA AUTOCOMPENSANTE UTILIZANDO ÁGUA SALINA

**RESUMO:** A implantação de sistemas de irrigação eficientes torna-se uma necessidade nas regiões com escassez de água; assim, a utilização de águas de qualidade inferior é uma alternativa viável para irrigação garantindo seu bom funcionamento, fornecendo elementos para a operação do sistema. Objetivou-se, com o presente estudo, avaliar uniformidade de vazão em mangueira gotejadora autocompensante utilizando água de diferentes condutividades elétricas (CEa) num período de doze meses; especificamente, foram determinados os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) de distribuição (CUD), o estatístico (CUE), coeficiente de variação de fabricação (CVF), o grau de entupimento (GE), a eficiência de aplicação (EA), os gráficos individuais de Shewhart e o índice de capacidade do processo em gotejadores autocompensantes com águas de diferentes concentrações salinas. A pesquisa foi conduzida em casa de vegetação pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, latitude 07° 13' S, longitude 35° 53' W e altitude média 550 m. Utilizou-se uma análise de variância em blocos inteiramente casualizados, no esquema fatorial com cinco níveis de condutividade elétrica da água (CEai) (0,6; 1,5; 2,5; 3,5 e 4,5 dS m<sup>-1</sup> a 25° C), sob quatro pressões de serviço (60, 100, 140 e 160 kPa), com três repetições, em dois cultivos consecutivos de girassol totalizando 60 parcelas experimentais. Para o controle estatístico de qualidade fixou-se a pressão de 160 kPa, em 15 ensaios de irrigação ao longo do experimento para emissores novos, com 210 e 350 horas de funcionamento. A variação de vazão dos emissores autocompensantes analisados foi considerada baixa ao longo do tempo dentro, portanto, da recomendação de  $\pm 7\%$  da vazão nominal. Os emissores obtiveram valores de expoente entre 0,02 a 0,09, considerados autocompensantes estando em conformidade com os dados do fabricante. A vazão que mais se aproximou da recomendada pelo fabricante em emissores novos ocorreu na pressão de 60 kPa e na salinidade de 0,6 dS m<sup>-1</sup>; quando se aumentou o tempo de funcionamento para 210 e 350 horas o comportamento foi semelhante ao dos emissores novos. Os valores encontrados dos coeficientes CUC, CUD, CUE, CVF, GE e EA, foram considerados excelentes mas não foram influenciados significativamente pelos níveis de sais da água de irrigação nem pela interação entre salinidade da água e pressão quando novos, sendo influenciados pela pressão de serviço aplicada. A interação entre (S x P) influenciou, de forma significativa, os coeficientes analisados para as avaliações realizadas com 210 e 350 horas de funcionamento, exceto para o CVq com 350 horas de funcionamento. O desempenho dos emissores foi considerado satisfatório utilizando-se água salina sendo a pressão de 60 kPa a que resultou na melhor relação custo/benefício. Os gráficos de Shewhart são instrumentos capazes de diagnosticar alterações no sistema de irrigação, demonstrando o momento para se fazer sua manutenção. Os emissores foram considerados capazes quando novos; após 210 e 350 horas de funcionamento necessitam de manutenção para que possam continuar dentro dos limites de controle tornando o emissor capaz. O índice de capacidade do processo é uma ferramenta capaz de diagnosticar se o sistema de irrigação tem capacidade de se manter sob controle, ou seja, se será capaz de manter níveis aceitáveis de uniformidade, auxiliando o irrigante na tomada de decisão.

**Palavras – chave:** gotejamento, emissores, salinidade, uniformidade de irrigação

## UNIFORMITY OF FLOW HOSE DRIPPER SELF-COMPENSATING USING SALINE WATER

**ABSTRACT:** The implementation of efficient irrigation systems becomes a necessity in regions where water is scarce, so the use of lower quality water is a viable alternative for irrigation besides evaluating its smooth operation, aiming at providing elements for system operation. The objective of this study was to evaluate uniformity of flow in self-compensating drip hose using different electrical conductivity (EC w) water in a twelve month period, specifically determined the coefficients Christiansen uniformity (CUC), distribution (CUD), statistical (CUE), coefficient of manufacturing variation (CVF), degree obstruction (GE), application efficiency (AE), individual Shewhart charts and process capability index in self-compensating drippers in waters of different salt concentrations. The research was conducted in a greenhouse belonging to the Academic Unit of Agricultural Engineering, Federal University of Campina Grande, latitude 07 ° 13 'S, longitude 35 ° 53' W and an average altitude 550 m. We used an analysis of variance in a completely randomized block with scheme factorial with five levels of electric conductivity (EC wi) (0.6, 1.5, 2.5, 3.5 and 4.5 dS m<sup>-1</sup> a 25 ° C) and under four different operating pressures (60, 100, 140 and 160 kPa), with three replications in two consecutive crops of sunflower, totaling 60 experimental plots. For statistical quality control we used the five salinity levels of water and set the pressure in 160 kPa of 15 trials irrigation the emitters new for , with 210 and 350 hours of operation. Flow variation of self-compensating emitters were considered low analyzed over time being within the recommendation of ± 7% of the nominal flow. emitter obtained exponent values between 0.02 to 0.09, classified as self-compensating being in accordance with the manufacturer's data. The flow that is closer to that recommended by the manufacturer on new issuers occurred in pressure of 60 kPa and salinity of 0.6 dS m<sup>-1</sup>, when it increased uptime for 210 and 350 hours, the behavior was similar to new issuers. The values of the coefficients found CUC, CUD, CUE, FVC, GE and EA, were considered excellent and were not significantly influenced by the levels of salts in the irrigation water and the interaction between salinity and pressure when new, and are influenced by pressure service applied. The interaction between (S x P) influenced significantly the coefficients analyzed for evaluations carried out with 210 and 350 hours of operation, except for the CVq with 350 hours of operation. The performance was considered satisfactory emitters using saline water, the pressure of 60 kPa which resulted in better cost benefit. The Shewhart charts is a tool capable of diagnosing changes in the irrigation system showing the time to do maintenance. The emitters were considered capable when new, after 210 and 350 hours operation need of maintenance so you can keep within the limits of control making the emitter able. The process capability index is a tool to diagnose whether the irrigation system is able to keep under control, ie, whether it will be able to maintain acceptable levels of uniformity, helping the irrigator decision making.

**Key words:** drip emitters, salinity, irrigation uniformity

## **Considerações gerais**

---

## 1. Introdução

Um sistema de irrigação localizada bem projetado permite que se obtenha uniformidade de aplicação de água acima de 90%, o que se considera ótimo índice (Medeiros et al., 2008) mas, segundo Ribeiro (2010), observa-se, com uso intensivo, diminuição na uniformidade e aumento no coeficiente de variação de fabricação (CVf) ao longo do tempo, ocasionados por diversos fatores relacionados ao processo de obstrução cujo principal responsável é a qualidade da água usada na irrigação.

A irrigação localizada está sujeita a alterações de vazão apresentando, como consequência, a obstrução da emissão pelo fato de utilizar emissores com orifícios de pequenos diâmetros; esta limitação ocorre principalmente na irrigação por gotejamento que possui, como grande limitação, o fato de seus emissores possuírem pequenos diâmetros de orifícios suscetíveis ao entupimento, ocasionando perda da uniformidade de irrigação ao longo do tempo, porém este fato pode ser agravado com a utilização de águas de qualidade inferior. Existem diversos trabalhos expondo esses fatos (Busato & Soares, 2010; Teixeira et al., 2008; Cararo & Botrel, 2007).

A elevada uniformidade de aplicação e a distribuição de água nos sistemas de irrigação por gotejamento tornam-se fundamentais para uma irrigação eficiente e, conseqüentemente, visando também a um aproveitamento melhor dos recursos hídricos e redução dos custos (Ribeiro et al., 2012). No entanto, Batista et al. (2005) e Batista et al. (2007) evidenciaram redução de 67% na vazão de gotejadores aplicando água residuária após 144 h de operação do sistema de aplicação; os autores afirmam que quanto maior a redução da vazão menores serão os coeficientes de uniformidade. Brauer et al. (2011) asseguram ser necessária a análise da fonte de água antes da instalação dos sistemas de irrigação.

Uma característica sumamente importante para os irrigantes na aquisição dos sistemas de irrigação está relacionada com a qualidade dos emissores usados. Sendo assim, a melhoria na qualidade e a manutenção da irrigação se fazem indispensáveis, tanto para empresas fornecedoras dos equipamentos quanto para os consumidores. A fim de melhorar a eficiência da irrigação é oportuno avaliar seu desempenho, através da vazão e dos coeficientes de uniformidade. O controle estatístico de qualidade e o índice de capacidade do processo são ferramentas que podem ser estudadas para auxiliar tal procedimento (Frigio, 2012).

Na irrigação, tal como em outros processos realizados no meio agrícola, deve-se ter a qualidade dos procedimentos controlando parâmetros que estejam afetando os mesmos pois com a correção e a eliminação de desperdícios e falhas, haverá redução de custos e aumento da produtividade (Silva et al., 2007).

O controle estatístico de qualidade é uma ferramenta da engenharia de processo utilizada para avaliar a qualidade de um produto e apresentar suas variações, tanto positivas quanto negativas, para que seja possível gerar informações de melhoria (Chew, 1957). Assim, as organizações que melhoram a qualidade de um produto podem aumentar a produtividade no campo, o crescimento no mercado agrícola, aumentar a lucratividade do produtor e, assim, torná-lo mais competitivo (Tassaro, 2012). Ainda segundo o referido autor, a capacidade de processo gera informações verificando se um produto ou processo está dentro de um padrão de qualidade, ou seja, constata se este está dentro das especificações exigidas pelo consumidor, parâmetros que levam a interferir no rendimento do produto ou processo.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Geral**

Avaliar a uniformidade de vazão em mangueira gotejadora autocompensante utilizando água de diferentes condutividades elétricas da água (CEa) no período de doze meses.

### **2.2. Específico**

Determinar os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), de distribuição (CUD), o estatístico (CUE), o coeficiente de variação de fabricação (CVF), o grau de entupimento (GE) e a eficiência de aplicação (EA) para os gotejadores novos e usados com águas de diferentes concentrações salinas;

Aplicar o controle estatístico de processo, pelos gráficos individuais de Shewhart e o índice de capacidade do processo em gotejadores autocompensantes com águas de diferentes concentrações salinas.

### **3. Revisão de Literatura**

#### **3.1. Irrigação Localizada**

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 alcançar a máxima produção (Werneck et al., 2010). Segundo Silva et al. (2007), a irrigação é uma tecnologia que requer investimentos significativos e está associada à utilização intensiva de insumos agrícolas tornando importante o estudo econômico dos componentes envolvidos no sistema. A irrigação localizada é um método de irrigação no qual a água é aplicada diretamente na região radicular da planta, com pequena intensidade e alta frequência, para manter a umidade do solo próximo da ideal, ou seja, da capacidade de campo (Bernardo et al., 2008).

Este método de irrigação tem sido o que mais se desenvolveu nas últimas décadas devido à maneira racional e econômica do uso da água, bem como do aumento da produção e de uma qualidade melhor da cultura (Brauer et al., 2011) podendo ser por gotejamento ou microaspersão caracterizando-se, basicamente, pela aplicação da água numa fração de volume do solo explorado pelas raízes da planta. Pode ser, ainda, de forma pontual ou em faixa contínua, geralmente com distribuição pressurizada, em que se utilizam pequenas vazões e curtos intervalos de rega mantendo os níveis de umidade ideal para a cultura (Mantovani et al., 2012). O sistema possui emissores através dos quais a água escoia após dissipar a pressão ao longo de uma rede de condutos (Mantovani et al., 2012).

#### **3.2. Principais Vantagens do sistema da irrigação por gotejamento**

O emprego do sistema de irrigação por gotejamento permite controlar determinados parâmetros de projeto e operação, de modo a se obter efeitos significativos na produção, por área e por água consumida, tal como na época da colheita e na qualidade do produto. Esses efeitos são devidos às seguintes vantagens conseguidas com o emprego desse sistema (Ribeiro, 2010):

Maior eficiência no uso da água: em função do melhor controle da aplicação de água visto que irriga apenas a área ao redor da planta reduzindo, assim, as perdas por evaporação, percolação profunda, escoamento superficial e pelo vento (Bernardo et al., 2008).

Maior produtividade: de acordo com Bernardo et al. (2005) só é possível em virtude da irrigação ser diária, ocorre maior uniformidade da umidade do solo e, com isso, maior desenvolvimento, sobretudo para culturas que respondem a maiores níveis de umidade no solo, pois existe uma frequência maior de aplicação de água.

Permite utilizar águas com maiores teores salinos: Dasberg & Bresler (1985), constataram, em seus estudos que, devido o teor de água no solo permanecer sempre próximo à capacidade de campo, a irrigação por gotejamento possibilita a utilização de água com teores elevados de sais.

Propicia aproveitamento de pequenos mananciais: um aproveitamento melhor de pequenos mananciais se deve em função da alta eficiência do sistema de irrigação por gotejamento, o qual aplica pequenas vazões em pequenos intervalos de tempo (Vieira, 1983).

Maior eficiência no controle fitossanitário: segundo Bernardo et al. (2005) de vez que este sistema não molha toda a área plantada e as partes aéreas dos vegetais, facilita o controle de ervas daninhas, insetos e fungos; com isto é obtida uma eficiência maior no uso de defensivos agrícolas.

Economia de mão-de-obra: em função do sistema de irrigação por gotejamento ser fixo e com alto potencial para ser automatizado (Hillel, 1982).

Permite a fertirrigação: os fertilizantes são aplicados junto às raízes das plantas, em regime de alta frequência, conforme as necessidades; aumentando a eficiência de uso, tem-se a economia de mão-de-obra, do combustível e da máquina, para a operação de adubação (Marouelli & Silva, 2002).

Não interfere nos tratos culturais: para Vermeiren & Jobling (1980) com o emprego da técnica de gotejamento apenas a zona radicular da cultura é irrigada permitindo, desta forma, o tráfego de máquinas e implementos, mesmo durante as irrigações.

Adapta-se a diferentes tipos de solo e topografia: a irrigação por gotejamento se adapta melhor que os outros sistemas de irrigação a diferentes tipos de solo e topografia irregular ou acidentada (Keller & Bliesner, 1990).

### **3.3. Principais Desvantagens do sistema de irrigação por gotejamento**

Entupimento dos gotejadores: este é o principal problema associado à irrigação por gotejamento. Em função do uso de emissores com diâmetros pequenos de saída, há sempre o risco de entupimento comprometendo a eficiência e a uniformidade da irrigação. As causas mais comuns de entupimento são partículas de areia, partículas insolúveis de fertilizantes, algas, bactérias, óxido de ferro e formação de precipitados químicos (Capra & Scicolone, 2004; Ribeiro et al., 2005).

Acúmulo de sais no solo: a água caminha no solo verticalmente e horizontalmente formando, na superfície, um disco molhado cujo centro é ponto de queda do líquido (Hillel, 1982). Neste movimento os sais presentes no solo são carregados para a periferia do bulbo molhado onde tendem a se acumular. De acordo com Bernstein & François (1973), em regiões áridas a água da chuva pode carregar esses sais acumulados, para a zona das raízes da planta, causando-lhe choque osmótico.

Restrição ao desenvolvimento das raízes da planta: no gotejamento, a água é aplicada em uma parte do volume total do solo; com isto, as raízes tendem a se limitar ao volume ou bulbo molhado, próximo ao emissor ou ao longo de cada linha lateral. A restrição excessiva do desenvolvimento das raízes pode acarretar decréscimo no crescimento e no rendimento das plantas (Nakayama & Bucks, 1986).

Elevado custo de implantação: conforme observaram Nakayama & Bucks (1986) os equipamentos auxiliares requeridos na irrigação por gotejamento encarecem o custo inicial do sistema; entretanto, o custo pode variar consideravelmente dependendo do tipo de cultura, do sistema de gotejadores, dos equipamentos de filtragem e automação.

### **3.4. Qualidade da água para irrigação**

A qualidade da água para irrigação nem sempre é determinada levando-se em consideração o sistema de irrigação a ser utilizado. Muitas vezes, refere-se à sua salinidade com relação à quantidade total de sólidos dissolvidos expressa em miligramas por litro, partes por milhão ou por meio de sua condutividade elétrica. No entanto, para que se possa fazer uma interpretação correta da qualidade da água para irrigação, os parâmetros analisados devem estar relacionados com seus efeitos no solo, na cultura e no manejo da irrigação, os quais serão necessários para controlar ou compensar os problemas relacionados à qualidade da água (Bernardo et al., 2008).

Para o êxito da utilização de sistemas irrigados, a qualidade da água é um aspecto fundamental; mesmo assim, a avaliação da sua qualidade é, muitas vezes, negligenciada no momento da elaboração de projetos. Como consequência, a irrigação poderá produzir efeitos indesejáveis na condução de uma cultura comercial ou servir como veículo para contaminação da população no momento em que ocorre a ingestão dos alimentos que receberam a água contaminada (Mantovani et al., 2012).

De acordo com Sano et al. (2005) e Figueiredo (2009) a qualidade da água para a irrigação tem sido objeto de preocupação constante fato que Alvarez et al. (2009) e Srinivasan et al. (2009) complementam, citando que a qualidade da água afeta um sistema de irrigação desde a cultura até as propriedades do solo demonstrando a importância do monitoramento para irrigação e ressaltando que a escassez de água doce leva à utilização de água de má qualidade para a agricultura representando uma ameaça para a sustentabilidade e para a saúde pública.

A avaliação da água para irrigação se fundamenta na identificação de suas características químicas, físicas e microbiológicas (Santos, 2000). O uso intensivo de praticamente todas as águas de boa qualidade implica em que, tanto nos projetos novos como nos antigos que requerem águas adicionais, é importante que se recorra às águas de qualidade inferior. Para evitar problemas consequentes deve existir um planejamento efetivo que assegure o melhor uso possível das águas, de acordo com sua qualidade (Ayers & Westcot, 1999). Ainda em relação à qualidade da água Ayers & Westcot (1991), determinam alguns parâmetros que devem ser avaliados para irrigação com seus respectivos valores de referência, sendo: CE, sólidos totais solúveis, RAS, Sódio, Cloro, Boro, Nitrogênio, Bicarbonato e pH.

Conforme Gilbert & Ford (1986) a salinidade da água usada na irrigação não contribui para o entupimento de gotejadores, a menos que os íons dissolvidos interajam entre si, para formar precipitados ou promover o crescimento de limo.

### **3.5. Avaliação do sistema de irrigação**

A quantidade de água aplicada e sua uniformidade de distribuição pelos emissores são informações importantes para o dimensionamento e o manejo racional de um sistema de irrigação localizada (Almeida & Botrel, 2010). O conceito de uniformidade de distribuição de água em um sistema de irrigação, tem tido grande avanço devido a

crecentes e inúmeras pesquisas científicas relacionadas à necessidade de conservação dos recursos hídricos; à competitividade pela água; ao custo da energia e demais insumos e à estabilização dos preços dos produtos agrícolas. Os sistemas de irrigação e os métodos de manejo da água devem proporcionar uma aplicação uniforme e eficiente.

De acordo com Almeida & Botrel (2010) o termo uniformidade de distribuição (UD) está relacionado aos parâmetros de desempenho do sistema em operação, associados à variabilidade da lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo. A uniformidade de distribuição de água às plantas, é fundamental para obtenção da máxima produtividade da lavoura e/ou rentabilidade. Enquanto que baixa uniformidade de distribuição significa excesso de água em certos pontos do campo e falta em outros (Airoldi, 2007).

Segundo Bernardo (1995); Denículi et al. (1980) e Keller & Karmeli (1974), a uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação por gotejamento pode ser expressa através de vários coeficientes, destacando-se o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e o coeficiente de variação de fabricação (CVf).

É comum expressar a uniformidade de distribuição de água por um coeficiente de uniformidade. Quando este coeficiente é maior ou igual a certo valor arbitrário, há uniformidade de distribuição da lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo. Muitos coeficientes de uniformidade foram propostos, mas o antigo e amplamente utilizado é proposto por Christiansen (1942). Apesar de muitos outros coeficientes terem sido apresentados como alternativas ao de Christiansen, nenhum apresentou vantagens significativas (Frizzone, 1992).

A uniformidade de distribuição utilizada CUD é a razão entre a média dos 25% menores valores de lâminas de irrigação e a lâmina média aplicada na superfície do solo. Na Tabela 1 pode-se observar a classificação do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e Christiansen (CUC) quanto à sua uniformidade de aplicação e conforme os autores Keller & Karmeli (1974); Merriam & Keller, (1978); ASAE (1996); Mantovani (2002).

Tabela 1- Classificação do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e Christiansen (CUC).

<b>CUD %</b>	<b>Uniformidade</b>	<b>CUC%</b>	<b>Uniformidade</b>	<b>Fonte</b>
> 90	Excelente			Keller & Karmeli, 1974.
85 < CUD < 90	Boa			
70 < CUD < 80	Regular			
< 70	Ruim			
> 90	Excelente			Merriam & Keller, 1978.
85 < CUD < 90	Boa			
70 < CUD < 80	Regular			
< 70	Ruim			
87 < CUD < 100	Excelente	90 < CUC < 100	Excelente	ASAE, 1996.
75 < CUD < 87	Bom	80 < CUC < 90	Bom	
62 < CUD < 75	Razoável	70 < CUC < 80	Razoável	
50 < CUD < 62	Ruim	60 < CUC < 70	Ruim	
< 50	Inaceitável	< 60	Inaceitável	
		90 < CUC < 100	Excelente	Mantovani, 2002.
		80 < CUC < 90	Bom	
		70 < CUC < 80	Razoável	
		60 < CUC < 70	Ruim	
		< 60	Inaceitável	

A uniformidade de aplicação de água é um parâmetro que caracteriza o sistema de irrigação, em função da diferença de volume de água aplicado na planta, ao longo das linhas laterais. A uniformidade da irrigação tem efeito direto no rendimento de culturas, razão pela qual é considerada um dos fatores mais importantes no dimensionamento e na operação de sistemas de irrigação (Barreto Filho, 2000).

Silva & Kay (1997) afirmam que, frequentemente, é necessário avaliar o desempenho de um sistema de irrigação a fim de determinar sua aplicabilidade em certas condições. Um sistema de irrigação pode ser avaliado levando-se em conta aspectos técnicos (eficiência e uniformidade) e aspectos econômicos, tanto no desenvolvimento de projetos como no manejo de sistemas de irrigação.

Outro índice avaliado é o coeficiente de variação de fabricação, que depende integralmente do processo e dos cuidados no momento da fabricação. Os emissores são todos fabricados com polietileno, os quais são sujeitos a variações consideráveis. Existem numerosas variáveis de controle nas máquinas injetoras e estruturas, como pressão e temperatura de injeção, velocidade de injeção, temperatura do molde, tempo de processo (ciclo) e manutenção do molde. Quaisquer mudanças nesses fatores causam alterações nas condições de moldagem: temperatura, pressão e tempo de esfriamento. Tudo isto influencia as características do emissor: tamanho, forma, peso, resistência e a

lisura das superfícies (Solomon, 1979). O autor não considerou variações que ocorrem em função da qualidade da matéria-prima. Com o tempo de uso a uniformidade tende a diminuir, justamente por outros fatores associados ao desgaste.

Conforme a ABNT (2006) o coeficiente de variação de fabricação CVf do emissor é obtido através da relação entre o desvio-padrão e a média das vazões dos emissores amostrados. O CVf é uma medida estatística que avalia a variação do processo de fabricação dos emissores. É utilizado também para avaliar a variação de fluxo do emissor ao longo de uma linha lateral de irrigação localizada. Apesar de ser impossível a fabricação de um grupo de emissores com o mesmo coeficiente de descarga, a variação resultante do processo de fabricação normalmente tende a se distribuir em torno de um valor médio (Keller & Karmeli, 1974). O coeficiente de variação de fabricação pode ser classificado de acordo com Solomon (1979); Hillel (1982); ABNT (2006); Keller & Bliesner (1990), Tabela 2.

Tabela 2- Classificação do coeficiente de variação de fabricação (CVf) de emissores para gotejamento.

CVf	Uniformidade	Fonte
$\leq 0,03$	Excelente	Solomon, 1979.
$0,05 < CVf \leq 0,07$	Média	
$0,08 < CVf \leq 0,10$	Marginal	
$0,11 < CVf \leq 0,14$	Pobre	
$> 0,15$	Inaceitável	
Até 10%	Bons	Hillel, 1982.
$10\% < CVf < 20\%$	Médios	
Acima 20%	Deficientes	
$\leq 10\%$	Boa	ABNT, 2006.
$10\% < CVf < 20\%$	Média	
$20\% < CVf < 30\%$	Marginal	
$30\%$	Inaceitável	
$< 0,05$	Excelente	Keller & Bliesner, 1990.
$0,05 < CVf < 0,07$	Média	
$0,07 < CVf < 0,11$	Marginal	
$0,11 < CVf < 0,15$	Pobre	
$> 0,15$	Inaceitável	

O entupimento ocasionado por partículas, algas e bactérias provenientes da água de irrigação, geralmente ocorre nas extremidades da linha lateral sendo a limpeza, no final da linha, a técnica mais recomendada. Por outro lado, entupimentos ocasionados por intrusão radicular e partículas sólidas do solo, podem ocorrer de maneira geral, comprometendo todo o sistema de irrigação pelo aumento do grau de entupimento e redução da vazão relativa aos emissores (Souza et al., 2012).

Quando é utilizada na irrigação, a água não pode conter sais em excesso para não prejudicar as plantas e o solo, nem conter substâncias dissolvidas que possam causar danos ao entupimento (Lima & Chaves, 2008). O entupimento parcial ou completo reduz a uniformidade de distribuição de água e, como consequência, reduz a eficiência de irrigação (Marouelli & Silva, 2002). Em muitos casos, para assegurar que as plantas recebam a quantidade correta de água, faz-se necessário irrigar, em excesso, áreas com déficit, prática que causa percolação profunda e consequentes prejuízos como maior consumo de energia, lixiviação de fertilizantes e contaminação do lençol subterrâneo (Keller & Bliesner, 1990).

Souza et al. (2005) observaram, por meio da caracterização hidráulica de microaspersores, aplicando água limpa e residuária de avicultura e bovinocultura, que as últimas podem causar o entupimento dos emissores e, conseqüentemente, alterar sua vazão.

### **3.6. Relação pressão x vazão do emissor**

Keller e Karmeli (1974); Keller e Blisner (1990) citam, como característica desejável aos emissores em irrigação localizada, uma relação vazão versus pressão favorável que resulta em vazões uniformes com baixa sensibilidade à variação da pressão. A equação (1) expressa a relação vazão versus pressão, para emissores:

$$q = kp^x \quad (1)$$

Em que:

q : escoamento do gotejador, em L h<sup>-1</sup>;

k : coeficiente específico de cada emissor, que também depende das unidades de q e p;

p : pressão disponível na entrada do gotejador, kPa;

x : expoente do emissor caracterizando o escoamento no gotejador.

O valor do expoente de descarga “x” caracteriza o regime de escoamento e pode variar teoricamente de 0 a 1,0. De acordo com Abreu et al. (1987) quanto mais próximo de zero for o valor de x, menor será a sensibilidade do emissor à variação de pressão (autocompensantes); por outro lado, quando x é próximo a 1, a curva vazão pressão tende a formar um ângulo de 45 graus com o eixo das abscissas (eixo x, pressões) caracterizando um emissor com alta sensibilidade à variação de pressão e o regime de

escoamento é denominado laminar. No regime de escoamento turbulento, o  $x$  é igual a 0,5 (Lopez, 1997). A grande maioria dos emissores no mercado tem valores de  $x$  menores de 0,6 e quando os emissores são mais próximos de 0, são mais caros (Andrade, 2005).

### **3.7. Obstrução de emissores**

A obstrução de emissores e tubulações constitui um dos problemas mais importantes na operação e na manutenção de sistemas de irrigação por gotejamento e está diretamente associada à qualidade da água (Povoa & Hills, 1994) uma vez que os emissores são bastante susceptíveis à obstrução. O entupimento de emissores em linhas laterais provoca redução da uniformidade de emissão (Souza et al., 2006), sendo que a obstrução total de 5 a 10% dos emissores proporciona coeficiente de variação de vazão de 23 a 33% (Frizzone et al., 2012).

O entupimento de gotejadores prejudica o funcionamento geral do sistema de irrigação afetando suas características de operação e exigindo manutenções mais frequentes (Liu & Huang, 2009). Os emissores podem obstruir por diversas causas, tornando o entupimento um dos principais problemas de uso e a manutenção dos sistemas. A obstrução de emissores afeta a uniformidade de aplicação de água, reduzindo-a e, conseqüentemente, reduz também a eficiência da aplicação de produtos químicos via irrigação, o que resulta em perdas de produtividade (Batista et al., 2011).

Batista et al. (2010) observaram, avaliando o efeito da aplicação de águas residuais sobre a uniformidade de aplicação de água de um sistema de irrigação por gotejamento, a formação de um biofilme, resultante da interação entre colônias de bactérias e algas, propiciando entupimentos parcial e total dos gotejadores, acarretando na diminuição da vazão e da uniformidade de aplicação.

Dias et al. (2004) afirmam, em seu estudo sobre resistência de diferentes tipos de tubo gotejadores ao entupimento por precipitação química de cálcio, que a obstrução do orifício de saída do tubo gotejadores, decorrente do tempo de funcionamento, contribui para o aumento do coeficiente de variação, constituindo sério problema da irrigação localizada, tendo em vista que as amostras oferecem oportunidades inferiores de uniformidade de vazão.

O entupimento de emissor pode ser de origem física, química ou biológica (Capra & Scicolone, 2004). Os entupimentos físicos são ocasionados pelas partículas retidas que a água leva em suspensão e que obstruem ou fecham os emissores (gotejadores e microaspersores) ou as próprias tubulações. Já os entupimentos provocados pelas precipitações químicas são mais difíceis de localizar e tratar quando estão em estado avançado necessitando, assim, fazer tratamentos preventivos mais frequentes quanto mais altos forem os riscos de entupimento, o que pode ser originado por excesso de carbonato ou sulfato de cálcio e magnésio ou pela oxidação do ferro, formando precipitados pouco solúveis, quando as condições de umidade, temperatura, pH e/ou concentração de sais, favorecem esses processos. O entupimento biológico diz respeito à acumulação de biofilme contendo algas, bactérias e fungos (Nakayama & Bucks, 1991).

Nakayama (1982) classifica a água, quanto ao risco de entupimento, em nenhum, ligeiro ou moderado e severo, quando a quantidade de sólidos em suspensão for menor que 50, entre 50 e 100 e maior que 100 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Para minimização do entupimento de gotejadores são recomendadas diversas técnicas. Entre as práticas mais aceitas ambientalmente, se incluem a sedimentação, a filtração, o aumento da pressão de serviço e a limpeza das linhas, laterais com água limpa (Puig – Bargues et al., 2010).

Segundo Teixeira et al. (2008) para prevenir o entupimento dos emissores a avaliação sistemática do sistema de irrigação e o monitoramento da qualidade da água são essenciais. Muito embora os fabricantes de tubos gotejadores recomendem apenas água de boa qualidade, fatos inerentes à irrigação, como fertirrigação e variação de temperatura e pH podem proporcionar risco ao entupimento por precipitados químicos. Assim, para maior segurança são necessárias pesquisas sobre resistência de gotejadores a obstrução objetivando maior confiabilidade para fornecer opções mais confiáveis aos irrigantes (Dias et al., 2004).

### **3.8. Normas para avaliar os emissores**

Segundo Andrade (2005) uma norma estabelecida representa o estado da arte na sua respectiva área e pode ser uma ferramenta importante para as pessoas que selecionam, projetam, compram, instalam, operam e avaliam equipamentos de irrigação, e afirmam, ainda, que os fornecedores, os projetistas, consultores e usuários finais de

irrigação localizada por gotejamento, deveriam ser sabedores, e estar cientes das normas disponíveis sobre vários equipamentos e procedimentos já normalizados.

### **3.9. Normas ISO 8796:2004 e 9261:2004**

Essas normas foram elaboradas pelo Comitê Técnico ISO/TC –Tratores e máquinas para agricultura e silvicultura, Subcomitê SC 18 – Sistemas e equipamentos de irrigação e drenagem. Para o caso da ISO 9261:2004 (segunda edição) que foi liberada em 15 de janeiro de 2004, cancela e toma o lugar das edições anteriores da ISO 9261:1991 e da ISO 9260:1991, das quais constitui uma revisão técnica. Esta norma internacional fornece exigências mecânicas e operacionais para emissores e tubos usados na irrigação e onde sejam aplicados para conexões e determina métodos de ensaio em conformidade com tais exigências. Também especifica os dados a serem fornecidos pelos fabricantes a fim de permitir uma informação adequada, instalação e operação no campo. A ISO 8796:2004, a qual foi liberada em junho de 2004, foi desenvolvida com base na longa experiência de diversos países, intensivamente envolvidos na irrigação cujo método foi aprovado na prática. Esta norma internacional especifica um método de determinar a suscetibilidade ao rachamento por stress ambiental nas tubulações de polietileno.

### **3.10. Controle Estatístico de Processos**

O controle estatístico da qualidade é o resultado da aplicação do Controle Estatístico de Processos (CEP) nas indústrias que geram bens de consumo. O início formal do controle estatístico de processos se deu na década de 1920, quando Walter Shewhart desenvolveu e aplicou os gráficos de controle para operários com pouca instrução (Costa et al., 2005). O controle permanente de processos é condição básica para a manutenção da qualidade de bens e de serviços (Montgomery, 2009). Ainda segundo o autor, o objetivo principal do CEP é detectar rapidamente as causas atribuíveis e saná-las brevemente. Existem causas aleatórias e atribuíveis da variação da qualidade; as aleatórias são causas inevitáveis, inerentes ao processo, são causas naturais; quando existem somente essas causas o sistema está sob controle estatístico.

As causas atribuíveis ou especiais ocorrem devido a desajustes na máquina, ao erro do operador e à matéria-prima defeituosa; assim, o processo está fora de controle.

O Controle Estatístico de Processo é uma ferramenta que procura manter as variáveis dentro dos limites ou padrões pré-estabelecidos por normas técnicas, para que o processo se comporte de forma adequada. Este procedimento permite obter conclusões e tomadas de decisões com base em dados numéricos, formados pelas combinações necessárias entre mão-de-obra, materiais, máquinas, métodos, meio ambiente e medições, a fim de que sejam obtidos produtos e serviços satisfatórios dentro das normas técnicas (Trindade et al., 2000).

De acordo com Hernandez (2010) o CEP é feito através do uso das cartas (ou gráficos) de controle. Para cada tipo de peça, serviço produzido numa máquina ou prestação de serviço, é construído um gráfico. São determinados os limites inferior e superior que podem ser expressos em porcentagem de peças defeituosas ou através da distribuição de medidas. A cada número de peças fabricadas se marca, no gráfico, a média das dimensões de uma amostra de peças.

O controle de qualidade na fabricação dos emissores é primordial visto que suas vazões podem ser inconstantes, em lotes com coeficiente de variação de fabricação alto, não obstante isto poder ocorrer também em sistema superficial. A manutenção no subsolo é mais difícil; a taxa de vazão de cada emissor pode ser afetada pelas propriedades do solo (Gil et al., 2008).

Para avaliar a uniformidade de distribuição em um sistema de gotejamento ao longo de um ciclo de cultura ou do tempo, buscou-se utilizar o índice de capacidade do processo aplicando um estudo de engenharia de qualidade uma vez que as técnicas de controle estatístico de qualidade foram desenvolvidas para avaliar a variabilidade ao longo do tempo (ciclo) do processo (Montgomery, 2009).

Justi et al. (2010) empregaram o índice de capacidade de processo ( $C_p$ ) para avaliar um sistema de irrigação por aspersão e concluíram que  $C_p$  é diretamente proporcional ao aumento da uniformidade de distribuição, é capaz de diagnosticar o controle da irrigação dentro de níveis aceitáveis.

### **3.11. Controle Estatístico de Qualidade**

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, analisar novamente o processo após as modificações, em busca da melhor performance de máquinas e/ou pessoas (Montgomery, 2009).

Um processo estará sob controle estatístico quando as causas especiais de variação são eliminadas do processo e os pontos plotados no gráfico de controle permanecem dentro dos limites de controle (Montgomery, 2009). O controle de qualidade é perfeitamente adaptável à avaliação de sistemas de irrigação; sabe-se que, com a correção e a eliminação de desperdícios e falhas, redução de custos e aumento da produtividade, inúmeras vantagens serão acrescidas à competitividade no campo (Silva et al., 2007).

Para Gonçalves & Antoniassi (2010) a estimativa de incerteza é um termo que se deve ter e manter sob controle estatístico, pois uma pesquisa realizada por um laboratório de ensaios pode somente se voltar ao que se refere a causas específicas ou aleatórias enquanto as alterações significativas do objeto analisado geralmente ocorrem nas incertezas.

Quando um produto é fabricado por determinado processo sujeito a uma variação significativa e se obtém produtos fora do padrão de qualidade, ou seja, que não atendem às especificações, é possível utilizar a técnica do controle estatístico de qualidade para verificar onde está ocorrendo tal variação (Russo, 2002).

### **3.12. Gráficos de Controle**

Gráficos ou cartas de controle estatístico, são ferramentas cujo objetivo principal é diferenciar de monitoramento do desempenho de processos, utilizando medições de variáveis que influenciam na qualidade dos itens manufaturados com dados de entrada. As medições são realizadas em pontos espaçados no tempo e registradas nas cartas; este registro resulta em gráficos temporais que apresentam os valores de medição da variável no eixo vertical e os pontos no tempo nos quais as medições são efetuadas no eixo horizontal. A cada medição se compara o resultado obtido com limites de controle: medições fora dos limites indicam a presença de causas especiais de variabilidade, anomalias ao processo, que prejudicam a qualidade do produto manufaturado (Michel & Flogiatto, 2002).

As cartas de controle do tipo Shewhart, introduzidas por volta de 1930, continuam sendo uma das ferramentas mais utilizadas em controle de qualidade. Na sua concepção e na utilização é necessário se ter em conta três aspectos fundamentais: os instantes de

amostragem, o tamanho das amostras e os limites de controle. Nas cartas Shewhart clássicas, os valores dessas grandezas são fixos durante todo o processo de controle. Em particular, usando uma carta de controle para a média se utilizam, usualmente, os limites 3- sigma (Infante & Dias, 2006).

A confecção das cartas de Shewhart, ou gráficos de controle, é construída plotando-se os dados coletados em cada amostragem das variáveis que caracterizam o processo, podendo confeccionar-se, para um mesmo processo: o gráfico dos valores médios ( $\bar{X}$ ), para monitorar a centralidade; a amplitude amostral ( $\bar{R}$  ou MR); a variância ( $S^2$ ) e o desvio padrão (S) para monitorar a dispersão. O gráfico mais conhecido é denominado "X - R"; este gráfico exibe uma linha central representando o valor médio ( $\mu$ ), da característica da qualidade que corresponde ao estado sob controle. Outra linha superior do limite superior de controle (LSC), uma linha inferior do limite inferior de controle (LIC) e os pontos representando as amostras colhidas ao longo do tempo. O modelo, estabelecido por Shewhart, utiliza a média aritmética dos valores resultantes das medições realizadas de forma amostral, como medida de posição do processo. Fixa três desvios – padrões acrescidos à média, definindo o Limite Superior de Controle (LSC), – padrões decrescidos à média, definindo o Limite Inferior de Controle (LIC) do processo (Lima et al., 2006).

Werkema (1995) descreve os critérios indicativos da falta de controle de um processo:

Pontos fora de controle: é a indicação mais evidente da falta de controle de um processo; esta ocorrência pode ser resultado principalmente de erros de registro de dados e cálculos de medições, além da utilização incorreta ou defeitos dos equipamentos;

Periodicidade: representa uma tendência para cima e para baixo em intervalos de tempo com aproximadamente a mesma amplitude; pode ocorrer devido a mudanças sistemáticas nas condições ambientais ou em alguma variável dos equipamentos utilizados;

Sequência: onde vários pontos consecutivos do gráfico de controle surgem em apenas um dos lados da linha média. Este fenômeno indica uma mudança no nível do processo relacionado a novos operadores, matérias-primas ou equipamentos;

Tendência: movimento contínuo dos pontos do gráfico de controle em uma direção (ascendente ou descendente) sendo que a existência de sete pontos ou mais, indica falta de controle de processo;

Aproximação dos limites de controle: corresponde à ocorrência de dois ou três pontos consecutivos fora dos limites  $2\sigma$ , apesar desses ainda estarem dentro dos limites de controle  $3\sigma$ ; podem haver duas diferentes distribuições sobrepostas gerando o resultado do processo, caso em que se recomenda construir, separadamente, os gráficos para os dois processos que estejam gerando os resultados da característica da qualidade de interesse.

Aproximação da linha média: se grande parte dos pontos está muito próxima da linha média dentro das linhas centrais de  $1,5\sigma$ , apresentando uma variabilidade menor do que a esperada, observa-se a possibilidade de erros nos cálculos dos limites de controle.

Um processo está fora de controle quando um ou mais pontos se situarem fora dos limites sob a configuração aleatória ou quando há configurações especiais com pontos dentro ou fora dos limites de controle (Souza et al., 2008).

A avaliação dos sistemas de irrigação tem, como objetivo, verificar se o conjunto de componentes escolhidos, segundo as especificações dos fabricantes, atende ao dimensionamento calculado e às necessidades da cultura; pode-se verificar esse tipo de avaliação com a análise da capacidade do processo e do conjunto de irrigação selecionado. As análises podem envolver as variáveis de vazão e de pressão, empregando-se os Coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e o Coeficiente de Variação Total (CVt) dado principalmente que esses possibilitam analisar o comportamento em função da vida útil do conjunto de irrigação (Hernandez, 2010).

### 3.13. Referências bibliográficas

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Equipamentos de irrigação agrícola – Emissores e tubos emissores – Especificações e métodos de ensaio. ABNT NBR ISO 9261. São Paulo: ABNT,2006. 9p.
- Abreu, J. M. H.; Lopez, J. R.; Regalado, A. P.; Hernandez, J. F. G. El Riego localizado. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrárias, 1987, 317p.
- Airoldi, R.P.S. Análise do desempenho de gotejadores e da prevenção do entupimento em irrigação com água residuária. Piracicaba: ESALQ/USP, 2007. 140p. Tese de Doutorado.
- Almeida, C. D. G. C.; Botrel, T. A. Determinação do diâmetro de microtubos em irrigação localizada. Agrárias, v. 5,p. 413-417, 2010.
- Alvarez, V. M., Leyva, J. C., Valero, J. F., Górriz, B. M. Economicas sessment of shade-cloth covers for agricultural irrigation reservoirs in a semi-arid climate. Agricultural Water Management, v. 96, p.1351-1359, 2009.
- Andrade, L. Avaliação Hidráulica e de resistência a tração de dois modelos de mangueiras gotejadoras. Botucatu: UNESP, 2005. 76 p. Dissertação de Mestrado.
- ASAE - American Society of Agricultural Engineers. Field evaluation of microirrigation systems. St. Joseph, 1996.p.792-797.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. A. qualidade da água na agricultura, Campina Grande: UFPB, 1999. 153p.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. A. qualidade da água na agricultura. Campina Grande: UFPB, 1991. 218p.
- Barreto Filho, A. De A.; Dantas Neto, J.; Matos, J. A. De; Gomes, E. M. Desempenho de um sistema de irrigação por microaspersão, instalado a nível de campo. Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 4,p. 309-314, 2000.
- Batista, R. O. ; Matos, A. T. ; Cunha, F. F. ; Monaco, P. A. Formação de biofilme em gotejadores aplicando água residuária da despolpa dos frutos do cafeeiro. Acta Scientiarum Agronomy, v. 29, p. 367-371, 2007.
- Batista, R. O.; Costa, F. G. B.; Lopes, H. S. S.; Coelho, D. C. L.; Costa Paiva, M. R. F. Efeito das características do esgoto doméstico na uniformidade de aplicação de sistemas de irrigação por gotejamento. Revista Caatinga,v.24, p.137-144, 2011.
- Batista, R. O.; Souza, J. A. R.; Ferreira, D. C. Influência da aplicação de esgoto doméstico tratado no desempenho de um sistema de irrigação. Revista Ceres, v.57, p.18-22, 2010.
- Batista, R. O.; Lo Monaco, P. A.; Matos, A. T.; Cunha, F. F. Alteração na vazão de gotejadores tipo fita utilizados na aplicação de água residuária da despolpa de frutos do cafeeiro. Revista Engenharia na Agricultura, v.13, p.69-73, 2005.
- Bernardo, S. Manual de irrigação, 6ª ed. Viçosa: UFV, 1995. 657p.
- Bernardo, S.; Mantovani, E. C.; Soares, A. A. Manual de irrigação. 8. ed. Viçosa: UFV, 2008. 611 p.
- Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de Irrigação. 7. ed. Viçosa: UFV, 2005. 625p.
- Bernstein, L., François, L. E. Comparation of drip, furrow and sprinkler irrigation. Soil Sci, v.115, p 73 - 86. 1973.
- Brauer, R. L.; Cruz, R. L.; Villas Boas, R. L.; Plestch, T. A. Avaliação da uniformidade de aplicação de água em gotejadores em função do teor de ferro. Irriga, v. 16, p. 21-30, 2011.
- Busato, C.C.M.; Soares. A.A. Desempenho de gotejadores, utilizando água de baixa qualidade química e biológica. Bioscience Journal, v.26, p.739-746, 2010.

- Capra, A.; Scicolone, B. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation. *Agricultural Water Management*, n. 68, p. 135–149, 2004.
- Cararo, D. C.; Botrel, T. A. Uso de cloração e ar comprimido no controle de entupimento de gotejadores ocasionado pela a aplicação de água residuária. *Revista Engenharia Agrícola*, v.27, p.336-345, 2007.
- Chew, V. *Experimental Designs in industry*. New York, John Wiley & Sons.Inc. 1957. 58p.
- Christiansen, E. J. *Irrigation by sprinkler*. Berkeley: University of California, 1942. 142p. (Bulletin, 670).
- Costa, A. F. B; Epprecht, E. K.; Carpinetti, L. C. R. *Controle estatístico de qualidade*. Atlas, 2.ed. São Paulo: Atlas, 2005. 334 p.
- Dasberg, S, Bresler, E. *Drip irrigation manual*. Israel. IIC. (9), 1985.95p.
- Denículi, W.; Bernardo, S.; Thiébaud, J.T.L.; Sediyaama, G.C. Uniformidade de distribuição de água, em condições de campo num sistema de irrigação por gotejamento. *Revista Ceres*, v. 27,p 155-162, 1980.
- Dias, N. S. ; Coelho, R. D. ; Oliveira, M. V. A. M. . Resistência de diferentes tipos de tubo gotejadores ao entupimento por precipitação química de cálcio. *Irriga*, v. 9, p. 115/02-125, 2004.
- Figueirêdo, V. B.; Medeiros, J. F.; Zocoler, J. L.; Sobrinho, J. S. Evapotranspiração da cultura da melancia irrigada com água de diferentes salinidades. *Revista de Engenharia Agrícola*, v. 29, p.231-240,2009.
- Frigo, J. P. *Controle do processo da irrigação no sistema de aspersão convencional em Palotina - PR*. Cascavel: UNIOESTE, 2012. 43p. Dissertação de Metrado.
- Frizzone, J. A. *Irrigação por aspersão: uniformidade e eficiência*. Piracicaba: ESALQ, 1992, 53 p.
- Frizzone, J. A.; Freitas, P. S. L.; Rezende, R.; Faria, M. A. *Microirrigação: gotejamento e microaspersão*. Maringá: 1. ed. Eduem,v1. 2012. 356 p.
- Gil, M.; Sinobas, R.; Juana, L.; Sáchez, R.; Losada, A. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: Effect on water-application uniformity. *Irrigation Science*, v.26, p.451-458, 2008.
- Gilbert, R. G.; Ford, H. W. *Operational principles/emitter clogging*. In: Nakayama, F. S.; Bucks, D. A. *Trickle irrigation for crop production*. Amsterdam: Elsevier Publishers, 1986. 383p.
- Goncalves, E. B.; Antoniassi, R. Incerteza em resultados analíticos e verificação de conformidade de qualidade de alimentos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 30, p. 917-927, 2010.
- Hernandez, R. H. *Efeito da carga hidráulica e qualidade de água na uniformidade de sistema de irrigação por gotejamento*. Cascavel: UNIOESTE, 2010. 79p. Dissertação de Mestrado.
- Hillel, D. *Advances in irrigation*. New York, Academic Press, Inc. 1982, 302p.
- Infante, P.; Dias, J. R. *Carta X com Amostras de Tamanho Variável: Um Novo Procedimento Dinâmico*. *Investigação Operacional*, v. 26, p.45-63, 2006.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 8796:Polyethylene PE 32 and PE 40 pipes for irrigation lateral: susceptibility to environmental stress cracking induced by inserted-type fittings: test method and requirements. 2 ed. Geneva, 2004a.20 p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9621: Agricultural irrigation equipment: emitters and emitting pipe: specification and test methods. 2 ed. Geneva, 2004b.20 p.
- Justi, A. L; Vilas Boas, M. A.; Sampaio, S. C. Índice de capacidade do processo na avaliação da irrigação por aspersão. *Engenharia Agrícola*, v. 30, p.264 -270, 2010 .

- Keller, J.; Bleisner, R. D. Sprinkle and trickle irrigation. New York, Van Nostrand Reinhold. 1990 , 314p.
- Keller, J.; Karmeli, D. Trickle irrigation design parameters. Transactions of the ASAE, Saint Joseph, v.17, p.678-84, 1974.
- Lima, L. G.; Rolim-Neto, P. J. Aplicação do controle estatístico de processo na indústria farmacêutica. Revista Ciências Farmêuticas Básica e Aplicada, v 27, p.177-187, 2006.
- Lima, V. L. De A.; Chaves, L. H. G. Qualidade da água. Campina Grande: Agenda. 2008. 120 p.
- Liu, H.; Huang, G. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent. Agricultural Water Management, v.96, p.745-756, 2009.
- Lopez, R. J. Riego localizado. 2 ed. Madrid: Ediciones Mundi Prensa, 1997. 405 p.
- Mantovani, E. C.; Bernardo, S.; Palaretti, L. F. Irrigação: princípios e métodos. Viçosa: UFV, 3. Ed atual e ampliado. 2012. 355p.
- Mantovani, E.C. Avalia: manual do usuário. Viçosa: DEA/UFV–PNP&D/café Embrapa. 2002. 100p.
- Marouelli W. A.; Silva W.L.C. Tomateiro para processamento industrial: irrigação e fertirrigação por gotejamento. Brasília: Embrapa Hortaliças. 2002. 32p. (Circular Técnica, 30).
- Medeiros, P. R. F.; Coelho, R. D.; Barros, A. C.; Mélo, R. F. Dinâmica do entupimento de gotejadores em função da aplicação de carbonato de potássio. Irriga, v. 13, p. 288-297, 2008.
- Merriam, J. L.; Keller, J. Farm irrigation system evaluation: a guide for management. Logan: Utah State University. 1978, 271p.
- Michel, R.; Fogliatto, F. S. Projeto econômico de cartas adaptativas para monitoramento de processos. Revista Gestão & Produção, v. 9,p. 17-31, 2002.
- Montgomery, D.C. Introdução ao controle estatístico da qualidade. Tradução Ana Maria Lima de Farias, Vera Regina Lima de Farias e Flores; Revisão técnica Luiz da Costa Laurencel. – Rio de Janeiro: LTC,4 ed., reimpressa. 2009. 513p.
- Nakayama, F. S. Water analysis and treatment techniques to control emitter plugging. In: PROC. Irrigation Association Conference, 1982, Portland, Oregon, 1982.120p.
- Nakayama, F. S; Bucks, D. A. Trickle irrigation for crop production: Design, operation and management. Amsterdam: 1986. 164p.
- Nakayama, F.S.; Bucks, D.A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. Irrigation Science, New York, v.12, p.187-92, 1991.
- Povoa, A. F.; Hills, D. J. Sensitivity of microirrigation system pressure to emitter plugging and lateral line perforations. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v. 37, p. 793-799, 1994.
- Puig-Bargués, J.; Arbat, G.; Elbana, M.; Duran-Ros, M.; Barragán, J.; Ramírez De Cartagena, F.; Lamm, F. R. Effect of flushing frequency on emitter clogging in microirrigation with effluents. Agricultural Water Management, v.97, p.883- 891, 2010.
- Ribeiro, M. D. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento para agricultura familiar. Cascavel : UNIOESTE, 2010. 54p. Dissertação de Mestrado
- Ribeiro, P. A. De A.; Teixeira, M. B.; Coelho, R. D.; Franco, E. M.; Silva, N. F. Da; Carvalho, L. C. C. De; Alves, M. E. B. Gotejadores submetidos a condições críticas de qualidade da água. Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - Irriga, Ed. Especial, p. 368 - 379, 2012.
- Ribeiro, T. A. P.; Airoidi, R. P. Da S.; Paterniani, J. E. S. Efeito da qualidade da água na perda de carga em filtros utilizados na irrigação localizada. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 9,p.1-6. 2005.
- Russo, S. L. Gráficos de controle para variáveis não-conformes auto correlacionadas. Florianópolis; UFSC, 2002, 120 p. Tese de Doutorado.

- Sano, E. E.; Lima, J. E. F. W.; Silva, E. M. Oliveira, E. C.; Estimativa da variação na demanda de água para irrigação por pivô-central no distrito federal entre 1992 e 2002. *Revista de Engenharia Agrícola*, v. 25, p.508-515. 2005.
- Santos, J. R. G. A salinidade na agricultura irrigada: teoria e prática. Campina Grande, PB: UFPB, 2000. 171 p.
- Silva, A.P., Kay, B.D. Estimating the least limiting water range of soil from properties and management. *Soil Science Society of America Journal*, v. 61, p. 877-883, 1997.
- Silva, M.L.O.; Souza, A. M.; Pereira, J. E. S. Viabilidade técnica e econômica do cultivo de safrinha do girassol irrigado na região de Lavras, MG. *Ciência e Agrotecnologia*, v.31, p.200-205.2007.
- Solomon, K. Manufacturing variation of trickle emitters. *Transactions of the ASAE*. St Joseph.v.22, p. 1034-1038, 1979.
- Souza, I. H.; Andrade, E. A. Costa, E. M. ; Silva, E. L. Avaliação de um sistema de irrigação localizada de baixa pressão, projetado pelo software “BUBBLER”. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 25, p. 264-271. 2005.
- Souza, J. A. A.; Cordeiro, E. A.; Costa, E. L. Aplicação de hipoclorito de sódio para recuperação de gotejadores entupidos em irrigação com água ferruginosa. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 10, p. 5-9, 2006.
- Souza, L. M.; Júnior, J. I. R.; Reis, G. M.; Ide, M. S. Eficiência dos gráficos de controle xbarra, ewma e cusum. *Eletrônica& Engenharia*, v. 1, p. 81-94, 2008.
- Souza,W. J.; Botrel, T. A.; Coelho, R. D.; Nova, N. A. V. Irrigação localizada subsuperficial: Gotejador convencional e novo protótipo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.811–819, 2012.
- Srinivasan, J. T., Reddy, V. R. Impact of irrigation water quality on human health: a case study in India. *Ecological economics*, Hyderabad, v.68, p.2800-2807, 2009.
- Teixeira, M. B.; Melo, R. F. De; Coelho, R. D.; Rettore Neto, O.; Ribeiro, P. A. de A. Tratamento para desentupimento de gotejadores convencionais. *Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - Irriga*,v.13, p.235-248, 2008.
- Tessaro, E. Efeito da carga hidráulica na uniformidade da irrigação e fertirrigação em sistema de gotejamento. Cascavel : UNIOESTE, 2012, 80 p. Dissertação de Mestrado.
- Trindade, C.; Rezende, J.L.P.; Jacovine, L.A.G.; Sartório, M.L. Ferramentas da qualidade – aplicação na atividade florestal. 2. ed. Viçosa: UFV, 2000, 124p.
- Vermeiren, L., Jobling, G. A. Localized irrigation. *Irrigation and Drainage*. Rome: FAO, 1980. 36p.
- Vieira, D. B. Engenharia de Irrigação. Apostila - Faculdade de Engenharia de Limeira. Limeira: 1983. 433 p.
- Werkema, M. C. C. Ferramentas da qualidade: ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos. Belo Horizonte: FCO - UFMG, 1995. 404 p.
- Werneck, J.E.F.; Ferreira, R.S.A.; Christofidis, D. O uso da água para irrigação. 2010. Disponível em: <<http://www.cf.org.br/cf2004/irrigacao.doc>>. Acesso em: 9 de agosto de 2013.

## **I CAPITULO**

---

## DESEMPENHO DE EMISSORES AUTOCOMPENSANTES UTILIZANDO ÁGUAS SALINAS

### Resumo

Na irrigação localizada é essencial analisar as características hidráulicas de gotejadores autocompensantes, visando fornecer elementos para a operação do sistema. A implantação de sistemas de irrigação eficientes se torna uma necessidade nas regiões com escassez de água; assim, a utilização de água de qualidade inferior é uma alternativa viável para irrigação. Objetivou-se, com o presente trabalho, avaliar a uniformidade de Christiansen (CUC), distribuição (CUD), estatístico (CUE), coeficiente de variação de fabricação (CVF), eficiência de aplicação (EA) e a relação de vazão versus pressão para o emissor novo e o usado com águas de diferentes concentrações salinas. A pesquisa foi conduzida em casa de vegetação da Unidade Acadêmica de Engenharia, Universidade Federal de Campina Grande. Os tratamentos foram compostos por cinco níveis de salinidade da água de irrigação (CEai) (0,6; 1,5; 2,5; 3,5 e 4,5 dS m<sup>-1</sup> a 25°C ) e três repetições, para quatro pressões de serviço (60, 100, 140 e 160 kPa). As variações de vazão dos emissores autocompensante foram consideradas baixa, ao longo do tempo, estando dentro da recomendação de  $\pm 7\%$  da vazão nominal, com valores de expoente x entre 0,02 e 0,09, classificados como autocompensantes em conformidade com os dados do fabricante. Os coeficientes CUC, CUD, CUE, CVF, GE e EA, foram considerados excelentes não sendo influenciados significativamente pelos níveis de sais da água de irrigação nem pela interação entre a salinidade da água e a pressão, quando novos, sendo influenciados pela pressão de serviço aplicada. A interação entre (S x P) influenciou de forma significativa, os coeficientes analisados nas avaliações realizadas com 210 e 350 horas de funcionamento, exceto para o CVq com 350 horas de funcionamento. O desempenho dos emissores foi considerado satisfatório utilizando-se água salina, sendo a pressão de 60 kPa a que resultou na melhor relação custo/benefício.

**Palavras - chave:** irrigação localizada, uniformidade de irrigação, salinidade.

## PERFORMANCE OF THE EMITTERS SELF-COMPENSATING USING WATER SALINA

### Abstract

In drip irrigation is essential to analyze the hydraulic characteristics self-compensating drippers, aiming to provide elements for the operation of the system. The implementation of efficient irrigation systems becomes a necessity in regions where water is scarce, so the use of lower quality water is a viable alternative for irrigation. Therefore, the aim of this work, was to evaluate the hydraulic performance of the self-compensating dripper hose XFS Subsurface Dripilines using saline waters. The research was conducted in a greenhouse at the Academic Unit of Agricultural Engineering, Federal University of Campina Grande- PB. The treatments consisted of five salinity levels of irrigation water (EC<sub>wi</sub>) (0.6; 1.5; 2.5; 3.5 and 4.5 dS m<sup>-1</sup> at 25 ° C) and three replicates for four operating pressures (60, 100, 140 and 160 kPa). Variations in flow of self-compensating emitters were considered low over time being within the recommendation of ± 7% of the nominal flow rate, with exponent values of x between 0.02 and 0.09, classified as self-compensating in accordance with the manufacturer's data. The CUC, CUD, CUE, FVC, GE and EA coefficients were considered excellent and not being significantly influenced by the levels of salts in the irrigation water and the interaction between salinity and pressure when new, being influenced by the service pressure applied. The interaction between (S x P) influenced significantly the coefficients analyzed the evaluations performed with 210 and 350 hours of operation, except for the CV<sub>q</sub> with 350 hours of operation. The performance was satisfactory emitters using salt water, the pressure of 60 kPa resulting in the better cost benefit.

**Key words:** drip irrigation, irrigation uniformity, salinity

#### 4. Introdução

A irrigação por gotejamento se destaca por sua facilidade de operação, eficiência e uniformidade de distribuição de água, refletindo em melhor aproveitamento dos recursos hídricos e aumento na produção das culturas (Silva et al., 2012). Quando bem manejada, a irrigação por gotejamento permite maior eficiência de aplicação de água e nutrientes, através da fertirrigação (Barros et al., 2009).

A irrigação localizada apresenta como vantagens em relação aos demais sistemas economia de água e energia, possibilidade de automação e fertirrigação das áreas cultivadas, redução de incidência de pragas e doenças, possibilita o cultivo em áreas declivosas e a utilização de águas salinas (Ribeiro et al., 2010). De acordo com Najafi et al. (2010), no caso de aplicação de águas de qualidade inferior os sistemas de irrigação por gotejamento também apresentam a vantagem de minimizar o contato direto da água com o agricultor e com o produto agrícola comercializado.

O entupimento de emissores está diretamente relacionado à qualidade da água de irrigação que inclui fatores como: quantidade de partícula suspensa, composição química e população microbiana (Coelho, 2007). É importante salientar que, por melhor que seja a qualidade da água de irrigação, as obstruções sempre aparecem, necessitando fazer-se seu tratamento para que o sistema possa distribuí-la com a maior uniformidade possível, durante um espaço de tempo prolongado. Para realizar o tratamento é preciso se fazer, antes, uma avaliação do risco de obstrução que a água oferece para que se tenha uma ideia do tipo de tratamento a ser realizado.

Uma análise da qualidade de irrigação, ou seja, o desempenho técnico do sistema só é possível quando são associados os conceitos de eficiência com medidas de uniformidade, adequabilidade da irrigação e perdas (Valnir Júnior et al., 2011). Mantovani et al. (2012) afirmaram que a avaliação da irrigação é uma etapa imprescindível para se obter as informações relacionadas à eficiência de uso da água do sistema de irrigação, perdas durante a aplicação e uniformidade de distribuição de água, funcionamento real do sistema (vazão, pressão, lâmina, entupimento etc.) e a necessidade de manutenção.

A eficiência de um sistema de irrigação localizada está relacionada à qualidade dos seus componentes e ao dimensionamento hidráulico correto do sistema, sobremaneira no que se refere aos cálculos de perda de carga. Para satisfazer as necessidades de uma agricultura moderna novos equipamentos são fabricados com os

mais variados tipos de materiais, implicando na necessidade de determinação de suas características estruturais e da análise de seu desempenho (Fernandes, 2010).

Silva et al. (2012) sugerem que um sistema de irrigação bem dimensionado permite que se obtenha uniformidade de aplicação de água acima de 90%, considerando-se um bom índice para a irrigação. Todavia, vários fatores podem afetar a uniformidade de distribuição da água nos sistemas de irrigação localizada, como variação da pressão de serviço do emissor, velocidade da água na tubulação, alinhamento da linha lateral e entupimento dos emissores. Segundo Bernardo et al.,(2009) estudar o desempenho do sistema em diferentes pressões é de suma importância para a irrigação localizada sendo possível identificar qual pressão de serviço será capaz de fornecer o melhor desempenho dos emissores e, conseqüentemente, recomendar o manejo adequado com a melhor relação custo benefício.

Com base no exposto desenvolveu-se este trabalho com o objetivo de determinar os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), distribuição (CUD), estatístico (CUE), coeficiente de variação de fabricação (CVF), eficiência de aplicação (EA) e a relação de vazão versus pressão para os emissores novos e usados com águas de diferentes concentrações salinas.

## **5. Material e Métodos**

### **5.1. Descrição da estrutura experimental e funcionamento do sistema**

O experimento foi realizado em casa de vegetação pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola Universidade Federal de Campina Grande (Figura 1A e B), Campina Grande, PB. A área experimental se localiza nas coordenadas geográficas: 7° 12' 88" de latitude sul, 35° 54' 40" de longitude oeste e altitude média de 532 m; para o ensaio foi utilizada estrutura de alvenaria com 8 m de comprimento por 1 m de largura e 0,11 m de altura, composta de três módulos experimentais e cinco reservatórios (Figura 2A).

O sistema de pressurização utilizado no experimento se compunha de uma motobomba centrífuga da marca Maqtron, modelo IBD 35 (Figura 2). A operação de funcionamento da bomba quanto ao horário de início e término de cada ciclo de

aplicação, foi realizada manualmente, obedecendo aos horários de início, duração de aplicação e ensaio de vazão. Para evitar a entrada de partículas em suspensão no sistema com tamanho superior ao diâmetro dos emissores, foi utilizado um filtro de tela de 1", com capacidade para 5 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão, com linhas laterais de 8 m comprimento cada um equipado com manômetros do tipo Bourdon (Figura 2 B) testados e aferidos antes dos ensaios.



Figura 1– Vista da casa de vegetação (A) experimento instalado dentro da casa de vegetação (B).



Figura 2– Estrutura para avaliação composta de 3 mangueiras e cinco reservatórios com água salina(A) e conjunto motobomba com filtro e manômetro (B) .

Foram utilizados, no experimento, tubos gotejadores utilizados em dois cultivos consecutivos de girassol irrigados com água salina as características, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Características técnicas do emissor modelo XFS dripline da Rain Bird.

Fabricante	Modelo	Vazão	Ø N	Pressão	Espaçamento entre emissores	Espessura da parede	Ø I	Ø O
		Lh <sup>-1</sup>	mm	kPa	m	mm	mm	mm
Rain Bird	XFS 0612500	2,3	16,1	60 - 420	0,3	1,2	13,6	0,76

Ø N = Diâmetro nominal; Ø I = Diâmetro interno; Ø O = Diâmetro do orifício

Funcionamento da mangueira gotejadora, modelo XFS dripline da Rain Bird usada no experimento (Figura 3).

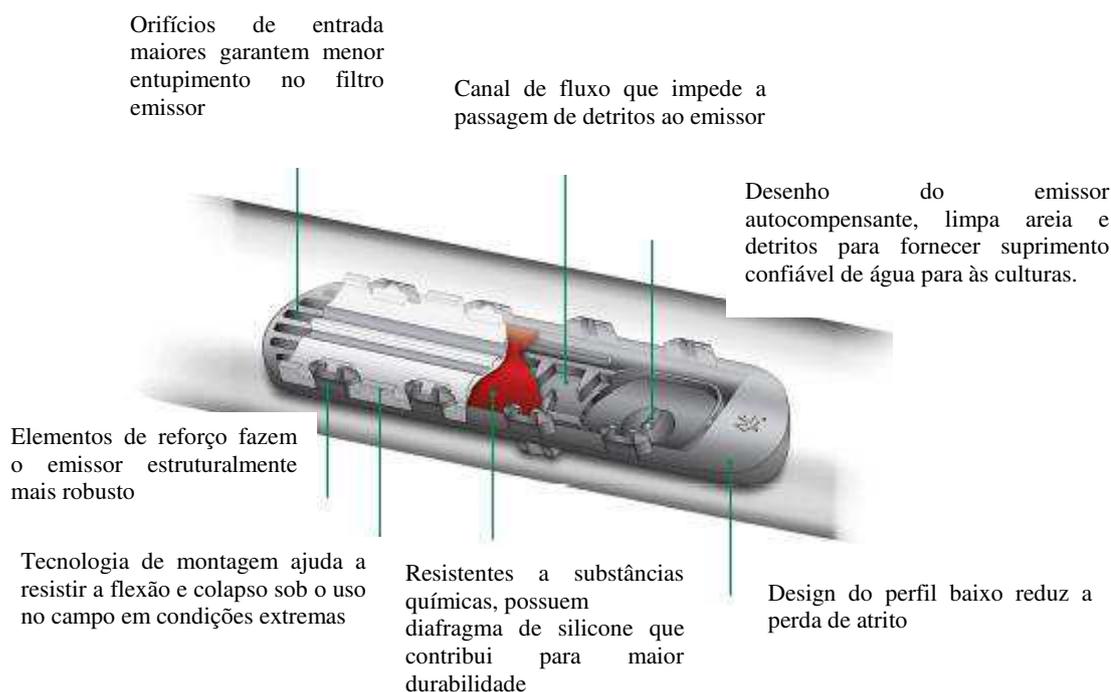


Figura 3–Características físicas do gotejador modelo XFS Dripline da Rain Bird.

Os tratamentos foram compostos pela combinação de dois fatores: cinco níveis de salinidade da água de irrigação – CEai (S1 = 0,6; S2 = 1,5; S3 = 2,5; S4 = 3,5 e S5 = 4,5dS m<sup>-1</sup> a 25 °C) e quatro pressões de serviço (60, 100, 140, e 160 kPa) registradas por manômetro de Bourdon (0 a 1000 kPa), conectado na entrada das linhas de emissores. As águas de diferentes concentrações salinas foram preparadas mediante metodologia proposta por Richards (1954) com adição de cloreto de sódio. Para cada pressão dentro de cada nível de salinidade foram feitas três repetições, com o tempo de coleta de 5 minutos medidas em cronômetro digital.

## **5.2. Processo de coleta de dados**

Inicialmente, foram utilizados emissores novos e se procedeu à avaliação utilizando-se os cinco níveis de salinidade da água e as quatro pressões estudadas aplicadas a cada linha de emissores, individualmente. Em seguida, ao final a utilização no primeiro ciclo do girassol com 210 e no segundo ciclo com 350 horas de funcionamento do sistemas irrigado com as mesmas concentrações salinas do presente estudo, foram realizadas as segunda e terceira avaliações dos emissores, respectivamente; utilizaram-se 5 linhas usadas nos experimentos, cada linha avaliada individualmente com seu respectivo nível de salinidade e as diferentes pressões testadas.

As vazões dos emissores foram amostradas de acordo com a metodologia proposta por Keller & Karmeli (1974) e Deniculi et al. (1980), a coleta da vazão é feita em oito emissores por linha lateral: do primeiro emissor, dos emissores situados na posição 1/7, 2/7, 3/7, 4/7, 5/7, 6/7 e do último emissor, em intervalos de 5 minutos; com a utilização de coletores plásticos o tempo foi medido com auxílio de cronômetro digital, e o volume foi medido com o auxílio de uma proveta graduada, de 1000 mL.

Coletou-se a vazão de 24 emissores em cada pressão, totalizando 72 nas 3 avaliações; nas 4 pressões estudadas obteve-se o total de 288 coletas para cada nível de salinidade, o tempo gasto em cada coleta foi de 30 minutos com o total de 6 horas para cada coleta nas quatro pressões, em cada nível de salinidade do estudo.

Para a coleta de dados foram tomados alguns cuidados, como a limpeza do filtro de tela antes das avaliações, a abertura do final das linhas laterais em intervalos de 5 minutos para saída de impurezas e bolhas de ar e posteriormente o fechamento dos mesmos para estabilização da pressão.

Para um resultado mais preciso em razão da variação de temperatura e a turbulência da água no interior do tubo gotejador, podendo interferir na uniformidade, as vazões foram amostradas simultaneamente.

## **5.3. Parâmetros avaliados**

De posse dos dados de vazão dos gotejadores procedeu-se aos cálculos dos seguintes parâmetros: Vazão Versus Pressão, Coeficiente de Uniformidade Christiansen (CUC), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE), Coeficiente de Variação de Fabricação de Gotejadores

novos e usados (CVf e CVq), Grau de Entupimento (GE) e eficiência de aplicação (1), (2), (3), (4), (5), (6) e (7) respectivamente, para os gotejadores avaliados quando novos, com 210 e 350 horas de funcionamento.

A equação (1) expressa a relação vazão versus pressão para emissores.

$$q = kp^x \quad (1)$$

em que:

q : escoamento do gotejador, em L h<sup>-1</sup>;

k : coeficiente específico de cada emissor que também depende das unidades de q e p;

p : pressão disponível na entrada do gotejador, kPa;

x : expoente do emissor caracterizando o escoamento no gotejador.

Um dos coeficientes mais conhecidos e largamente utilizados para o cálculo da uniformidade, é o de Christiansen (1942), que adotou o desvio médio como medida de dispersão, sendo seu cálculo obtido pela equação 2.

$$CUC = 1 - \left( 1 - \frac{\sum_i^n |Q_i - \bar{Q}|}{n * \bar{Q}} \right) \quad (2)$$

Em que:

Q<sub>i</sub> = vazão coletada em cada gotejador (Lh<sup>-1</sup>);

$\bar{Q}$  = média das vazões coletadas de todos os gotejadores (Lh<sup>-1</sup>);

n = número de gotejadores analisados.

O conceito de coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) foi originalmente apresentado por Keller & Karmeli (1975) sendo sua definição baseada na razão entre os 25% das vazões mínimas e as vazões médias dos emissores, conforme expresso pela equação 3.

$$CUD = \left( \frac{Q_{25\%}}{\bar{Q}} \right) * 100 \quad (3)$$

Em que:

Q<sub>25%</sub> = média de 25% do total de gotejadores com as menores vazões, (Lh<sup>-1</sup>);

Q<sub>med</sub> = média das vazões coletadas nos gotejadores na subárea, (Lh<sup>-1</sup>).

A equação 4 é caracterizada por ser mais rigorosa para o dimensionamento e avaliação em campo, pois possui as variações na uniformidade devido a fatores construtivos e fatores hidráulicos (Keller & Karmeli 1974).

$$CUE = 100 * \left(1 - \frac{Sd}{Qmed}\right) \quad (4)$$

Em que:

Sd = desvio-padrão dos valores de precipitação, em (L h<sup>-1</sup>);

Qmed = média das vazões coletadas nos gotejadores na subárea, (Lh<sup>-1</sup>).

A variação em razão do processo de fabricação é medida pelo coeficiente de variação da vazão do emissor (cv) equação 5. De acordo com a ABNT (2006) o coeficiente de variação (cv), da vazão da amostra não deve exceder 7%.

$$CVf = \left(\frac{Sd_{novo}}{Qmed}\right) \quad CVq = \left(\frac{Sd_{usado}}{Qmed_{usado}}\right) \quad (5)$$

Em que:

Sd novo = desvio padrão das vazões novos, L h<sup>-1</sup>;

Qmed novo = vazão média dos gotejadores novos, L h<sup>-1</sup>.

CVq = coeficiente de variação de uso, decimal;

Sd usado= desvio padrão da vazão dos gotejadores usados;

Qmed usado= vazão média dos gotejadores usados, em L h<sup>-1</sup>.

Na equação 6 o entupimento pode ser parcial, reduzindo a uniformidade de aplicação, ou total, interrompendo por completo o funcionamento do sistema causando sérios problemas às culturas devido à deficiência hídrica (Cararo, 2004).

$$GE = 100 * \left(1 - \frac{qusado}{qnovo}\right) \quad (6)$$

Em que:

qusado = Vazão média dos emissores usados (L.h<sup>-1</sup>);

q<sub>novo</sub> = Vazão média dos emissores novos (L.h<sup>-1</sup>).

A eficiência de aplicação (EA) sob irrigação plena foi determinada de acordo com o que sugerem Merriam & Keller (1978), a partir da Equação 7, a seguir:

$$EA = K_s * CUD \quad (7)$$

Em que:

CUD = Coeficiente de uniformidade de distribuição (%);

K<sub>s</sub> é o coeficiente de transmissividade. Para este trabalho utilizou-se o valor de 90%, (em que o K<sub>s</sub> desejável está em torno de 85 a 90%, segundo Vermeiren & Jobling (1997).

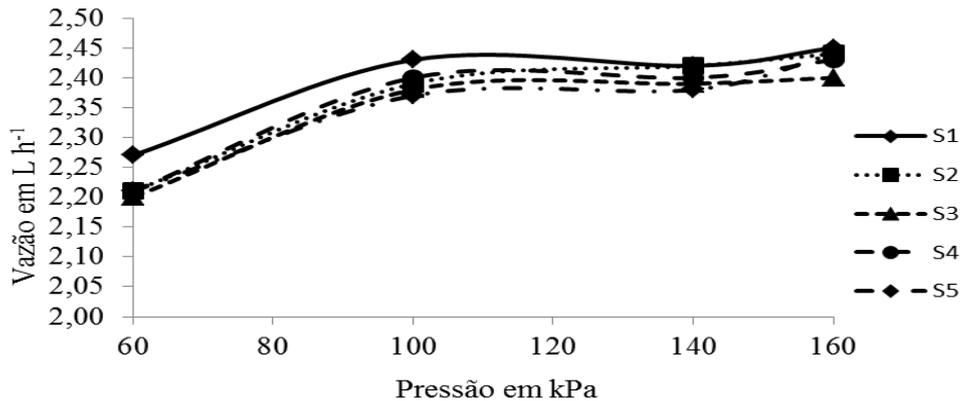
Os dados obtidos foram avaliados mediante análise de variância pelo teste 'F', a nível de 0,05 de probabilidade e, nos casos de significância realizou-se análise de regressão polinomial linear e quadrática utilizando-se do software estatístico SISVAR-ESAL (Lavras, MG) (Ferreira, 2008).

## 6. Resultados e Discussão

A partir da vazão e sua respectiva pressão, determinou-se a equação que relaciona a vazão com a pressão do emissor e a curva característica dos emissores novos para os diferentes níveis de salinidade (Figura 4). Por análise de regressão obteve-se a relação vazão versus pressão, observando-se que a curva característica para cada tratamento S1(0,6 dS m<sup>-1</sup>), S2(1,5 dS m<sup>-1</sup>), S3(2,5 dS m<sup>-1</sup>), S4(3,5 dS m<sup>-1</sup>) e S5(4,5dS m<sup>-1</sup>), apresenta equação potencial com valores de x muito próximos de zero ( 0,073; 0,099; 0,087; 0,092 e 0,093) respectivamente; constatou-se que os emissores são pouco susceptíveis à variação de vazão em função da pressão, caracterizando-os como autocompensantes, concordando com os resultados encontrados por Almeida et al. (2006) em que a equação potencial apresentou valor muito próximo de zero (0,0974). Pela ISO 9261:2004, quando o valor do expoente x do emissor é menor que 0,2, considera-se este emissor autocompensante podendo-se afirmar que este modelo é autocompensante conforme manifesta seu fabricante.

Garcia (2006) obteve em seu experimento, avaliando tubo gotejador autocompensante novo, as equações  $q = 1,288H^{0,075}$ ;  $q = 2,183H^{0,015}$  e  $q = 1,926H^{0,034}$

com valores de expoente de descarga (x) de 0,075; 0,015 e 0,034 valores muito próximos aos encontrados neste experimento, apesar de serem outros modelos. Pletsch et al. (2009) obtiveram, em seu estudo sobre o desempenho de gotejadores, modelo Tiran 17, com vazão de 2 L h<sup>-1</sup> e espaçamento entre gotejadores de 0,5 m com uso de esgoto doméstico tratado, curva característica do emissor novo, que apresenta a equação  $q = 0,2417 H^{0,47}$ , com coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) de 0,995 e valor de expoente de descarga(x) de 0,47, discordando dos valores encontrados neste estudo.



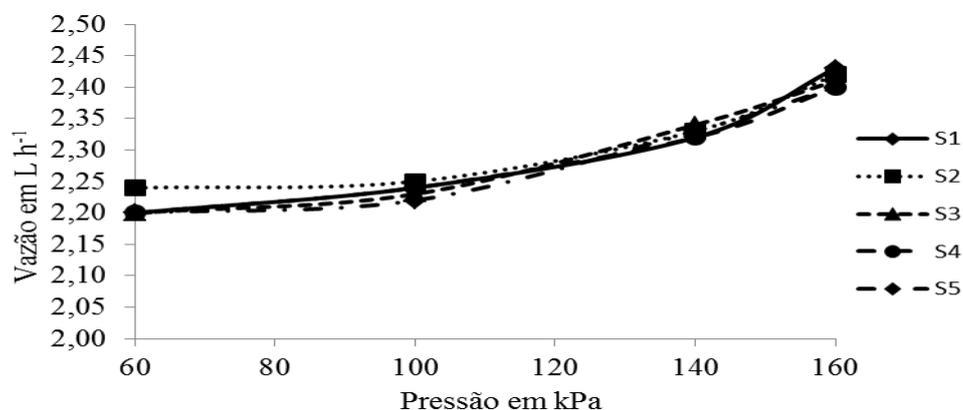
Tratamentos	Equação com R <sup>2</sup>
S1 (0,6 dS m <sup>-1</sup> )	$q = 1,69P^{0,073}$ R <sup>2</sup> = 0,83
S2 (1,5dS m <sup>-1</sup> )	$q = 1,48P^{0,099}$ R <sup>2</sup> = 0,92
S3 (2,5dS m <sup>-1</sup> )	$q = 1,55P^{0,087}$ R <sup>2</sup> = 0,85
S4 (3,5dS m <sup>-1</sup> )	$q = 1,52P^{0,092}$ R <sup>2</sup> = 0,86
S5 (4,5dS m <sup>-1</sup> )	$q = 1,51P^{0,0933}$ R <sup>2</sup> = 0,92

Figura 4 – Curva de vazão versus pressão com equação potencial para emissores novos nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas.

Silva et al.(2012) evidenciaram, em estudo sobre desempenho de gotejadores autocompensantes com diferentes efluentes de esgoto doméstico quando da comparação dos emissores utilizados em campo com um lote de gotejadores novos, que os emissores novos foram bons nas pressões de 100, 150 e 200 kPa, e regulares, para 250 kPa, indicando que para as menores pressões recomendadas pelo fabricante os emissores obtiveram melhores desempenhos.

A equação que relaciona a vazão com a pressão do emissor e a curva característica do tubo gotejador com 210 horas de funcionamento para os diferentes níveis de salinidade se encontra na (Figura 5). As equações potenciais para cada tratamento salino S1 (0,6 dS m<sup>-1</sup>); S2 (1,5 dS m<sup>-1</sup>); S3 (2,5 dS m<sup>-1</sup>); S4 (3,5 dS m<sup>-1</sup>) e S5 (4,5 dS m<sup>-1</sup>),

demonstraram valores de expoente de descarga (x) bem próximos de zero (0,090; 0,070; 0,089; 0,082 e 0,083) respectivamente.



Tratamentos	Equação com R <sup>2</sup>
S1 (0,6 dS m <sup>-1</sup> )	q = 1,50P <sup>0,090</sup> R <sup>2</sup> = 0,82
S2 (1,5dS m <sup>-1</sup> )	q = 1,65P <sup>0,0709</sup> R <sup>2</sup> = 0,74
S3 (2,5dS m <sup>-1</sup> )	q = 1,50P <sup>0,089</sup> R <sup>2</sup> = 0,85
S4 (3,5dS m <sup>-1</sup> )	q = 1,55P <sup>0,082</sup> R <sup>2</sup> = 0,86
S5 (4,5dS m <sup>-1</sup> )	q = 1,53P <sup>0,083</sup> R <sup>2</sup> = 0,82

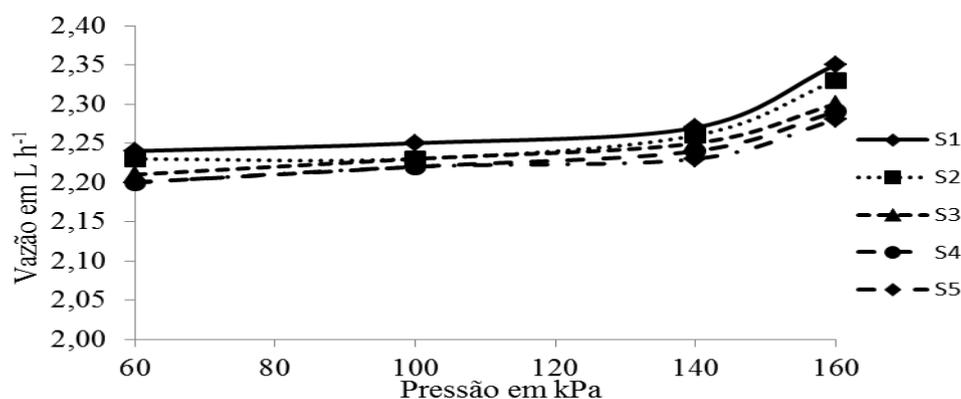
Figura 5 – Curva de vazão versus pressão com equação potencial para emissores com 210 horas de funcionamento nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas.

Para Keller & Karmelli (1974), o expoente “x” caracteriza o regime de fluxo e a relação vazão versus pressão do emissor, de modo que:  $0 < x < 0,5$  o regime de escoamento varia de turbulento a plenamente turbulento e a vazão sofre menos influência da variação da pressão. De  $0,5 < x < 1,0$  o regime de escoamento varia de instável a laminar, verificando-se maior influência das variações de pressão sobre a vazão. Quando o expoente x é próximo de 0 (autocompensante) menor será a sensibilidade do emissor à variação de pressão.

A relação de vazão versus pressão do tubo gotejador com 350 horas de funcionamento para os diferentes níveis de salinidade se encontra na (Figura 6). Por análise de regressão obteve-se a relação vazão versus pressão, observando-se que a curva característica para cada tratamento S1(0,6 dS m<sup>-1</sup>), S2(1,5 dS m<sup>-1</sup>), S3(2,5 dS m<sup>-1</sup>), S4(3,5 dS m<sup>-1</sup>) e S5(4,5dS m<sup>-1</sup>), apresenta equação do tipo potencial com valores de x muito próximos de zero ( 0,038; 0,036; 0,034; 0,034 e 0,029) respectivamente.

Segundo Pizarro (1987) um emissor autocompensante deve apresentar o expoente da equação característica variando entre 0 a 0,4, o que se evidenciou no

presente estudo, de vez que os coeficientes de descarga foram: 0,0219; -0,014; 0,0198; 0,0538 e 0,0393 respectivamente, os quais estão classificados como emissores autocompensantes e os valores bem próximos de zero, mostrando que no emissor varia muito pouco a vazão com a variação da pressão, concordando com os resultados obtidos no presente estudo; pela ISO 9261:2004, quando o valor do expoente  $x$  do emissor é menor do que 0,2, considera-se este emissor autocompensante.



Tratamentos	Equação com $R^2$
S1 (0,6 dS m <sup>-1</sup> )	$q = 1,90P^{0,0386}$ $R^2 = 0,60$
S2 (1,5dS m <sup>-1</sup> )	$q = 1,90P^{0,0364}$ $R^2 = 0,59$
S3 (2,5dS m <sup>-1</sup> )	$q = 1,91P^{0,0346}$ $R^2 = 0,78$
S4 (3,5dS m <sup>-1</sup> )	$q = 1,90P^{0,0348}$ $R^2 = 0,78$
S5 (4,5dS m <sup>-1</sup> )	$q = 1,94P^{0,0297}$ $R^2 = 0,73$

Figura 6 – Curva de vazão versus pressão com equação potencial para emissores com 350 horas de funcionamento nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas.

Para Mantovani et al. (2012) a pressão de serviço tem particular importância na irrigação pressurizada pois afeta a vazão aplicada, a eficiência da aplicação e a uniformidade de distribuição de água. Ao se trabalhar com valores acima do recomendado pelos fabricantes, poderá ocorrer um fracionamento excessivo das gotas, com diminuição do seu tamanho. O expoente  $x$  calculado, não deve desviar do valor fornecido pelo fabricante em  $\pm 5\%$ , segundo a norma ISO 9261:2004, porém não foi possível fazer esta comparação, visto que a marca não informou este coeficiente nos seus catálogos.

Pode-se observar, para todas as avaliações, que os emissores foram autocompensantes, conforme os valores de  $x$ , embora ocorra um pequeno aumento na vazão quando do aumento da pressão (Figuras 4, 5 e 6). As vazões fornecidas pelo

fabricante e a diferença com as vazões obtidas pelas equações ajustadas e acham nas Tabelas 4, 5 e 6, para emissores novos, com 210 e 350 horas de funcionamento nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas. Aceita-se, pela ISO 9261:2004 que a conformação das curvas obtidas com os dados das Tabelas 4, 5 e 6, pode ter uma variação de  $\pm 7\%$  em relação à curva apresentada pelo fabricante.

De modo geral e conforme se observa nas Tabelas 4, 5 e 6, as vazões experimentais determinadas em laboratório estão próximas às fornecidas pelos catálogos do fabricante, porém com valores inferiores aos fornecidos. Observa-se, nas Tabelas 4, 5 e 6, que as diferenças percentuais dentro da faixa de trabalho recomendada pelo fabricante (60 a 420 kPa, respectivamente), estão menores que os 7% impostos pela norma. Garcia (2006) constatou, em seu estudo sobre avaliação técnica de tubos emissores para irrigação localizada avaliando 25 emissores diferentes, que as vazões experimentais determinadas em laboratório estão próximas às fornecidas pelos catálogos da Petro Drip e Tiran, com valores superiores aos fornecidos; no entanto, as diferenças percentuais encontradas por Garcia (2006) estão dentro da faixa de pressão recomendada pelo fabricante (60 a 120 kPa, e 50 a 300 kPa Petro Drip e Tiran, respectivamente), embora menores que o 7% imposto pela norma, concordando com os resultados encontrados neste estudo.

Tabela 4 – Vazões fornecidas pelo fabricante e a diferença com as vazões obtidas pelas equações ajustadas em emissores novos nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas.

Pressão - kPa	Vazão (L h <sup>-1</sup> ) do emissor										
	Vazão nominal	Vazão ajustada					Diferença entre vazão nominal e ajustada (%)				
		S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5
60	2,3	2,28	2,22	2,21	2,22	2,22	0,86	3,47	3,91	3,47	3,47
100	2,4	2,36	2,33	2,31	2,33	2,33	1,67	2,91	3,75	2,91	2,91
140	2,5	2,42	2,41	2,38	2,40	2,41	3,20	3,60	4,80	4,00	3,60
160	2,6	2,45	2,45	2,42	2,43	2,44	5,76	5,76	6,92	6,53	6,15

Tabela 5 – Vazões fornecidas pelo fabricante e a diferença com as vazões obtidas pelas equações ajustadas em emissores com 210 horas de funcionamento nas diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas

Pressão - kPa	Vazão (L h <sup>-1</sup> ) do emissor										
	Vazão nominal	Vazão ajustada					Diferença entre vazão nominal e ajustada (%)				
		S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5
60	2,3	2,20	2,20	2,20	2,20	2,20	4,34	4,34	4,34	4,34	4,34
100	2,4	2,27	2,28	2,25	2,24	2,24	6,66	5,41	6,25	6,66	6,66
140	2,5	2,34	2,34	2,32	2,32	2,31	6,40	6,40	6,40	7,00	7,00
160	2,6	2,45	2,44	2,43	2,45	2,42	5,76	6,15	5,76	5,76	6,92

Tabela 6 – Vazões fornecidas pelo fabricante e a diferença com as vazões obtidas pelas equações ajustadas em emissores com 350 horas de funcionamento nas diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas

Pressão - kPa	Vazão (L h <sup>-1</sup> ) do emissor										
	Vazão nominal	Vazão ajustada					Diferença entre vazão nominal e ajustada (%)				
		S1	S2	S3	S4	S5	S1	S2	S3	S4	S5
60	2,3	2,22	2,20	2,20	2,19	2,19	3,47	4,34	4,34	4,78	4,78
100	2,4	2,26	2,24	2,23	2,23	2,23	5,83	6,66	7,00	7,00	7,00
140	2,5	2,33	2,32	2,32	2,35	2,35	6,80	7,00	7,00	6,00	6,00
160	2,6	2,42	2,42	2,43	2,44	2,42	6,92	6,92	6,10	6,10	6,92

Pode-se observar, nas tabelas 4, 5 e 6, que as diferenças entre vazão nominal e ajustada, aumentam com o aumento do nível de salinidade da água de irrigação e com o tempo de uso dos emissores, dentro, porém, do limite aceitável de 7%.

O resumo da análise de variância para o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e coeficiente de uniformidade estatístico (CUE) para os gotejadores novos, com 210 e 350 horas de funcionamento em função da aplicação de água salina e diferentes pressões de serviço, é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Análise de variância dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), uniformidade de distribuição (CUD) e uniformidade estatística (CUE) em emissores novos, com 210 e 350 horas de funcionamento nas diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas

Fonte de Variação	G.L	Estatística F								
		CUC	CUC	CUC	CUD	CUD	CUD	CUE	CUE	CUE
		Novos	210h	350h	Novos	210h	350h	Novos	210h	350h
Salinidade (S)	4	0,36 <sup>ns</sup>	13,09 <sup>**</sup>	50,78 <sup>**</sup>	0,19 <sup>ns</sup>	70,80 <sup>**</sup>	39,40 <sup>**</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	52,15 <sup>**</sup>	5,53 <sup>**</sup>
Reg. Linear	1	0,001 <sup>ns</sup>	18,95 <sup>**</sup>	168,64 <sup>**</sup>	0,27 <sup>ns</sup>	237,09 <sup>**</sup>	150,87 <sup>**</sup>	0,074 <sup>ns</sup>	11,65 <sup>**</sup>	21,37 <sup>**</sup>
Reg. Quadrática	1	0,016 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	34,40 <sup>**</sup>	0,12 <sup>ns</sup>	5,61 <sup>*</sup>	4,31 <sup>*</sup>	0,007 <sup>ns</sup>	11,10 <sup>**</sup>	0,38 <sup>ns</sup>
Pressão(P)	3	655,51 <sup>**</sup>	4,27 <sup>*</sup>	26,85 <sup>**</sup>	59,91 <sup>**</sup>	22,62 <sup>**</sup>	54,98 <sup>**</sup>	274,78 <sup>**</sup>	15,04 <sup>**</sup>	5,79 <sup>**</sup>
Reg. Linear	1	136,01 <sup>**</sup>	0,08 <sup>ns</sup>	53,16 <sup>**</sup>	8,52 <sup>**</sup>	9,45 <sup>**</sup>	111,48 <sup>**</sup>	574,61 <sup>**</sup>	43,84 <sup>**</sup>	4,92 <sup>*</sup>
Reg. Quadrática	1	364,09 <sup>**</sup>	0,004 <sup>ns</sup>	6,00 <sup>*</sup>	68,32 <sup>**</sup>	55,19 <sup>**</sup>	44,58 <sup>**</sup>	138,87 <sup>*</sup>	0,04 <sup>ns</sup>	10,44 <sup>**</sup>
Interação (SxP)	12	0,28 <sup>ns</sup>	6,77 <sup>**</sup>	12,28 <sup>**</sup>	0,17 <sup>ns</sup>	35,56 <sup>**</sup>	27,12 <sup>**</sup>	0,23 <sup>ns</sup>	6,75 <sup>**</sup>	3,37 <sup>**</sup>
C.V (%)		0,10	0,23	0,33	0,74	0,29	0,49	0,10	0,21	0,26

<sup>ns</sup>, <sup>\*\*</sup>, <sup>\*</sup> respectivamente não significativo, significativo a p < 0,01 e p < 0,05 pelo teste F

Pelos resultados apresentado na Tabela 7, constata-se que os parâmetros CUC, CUD e CUE para os gotejadores novos, não foram influenciados pela salinidade da água; entretanto, para 210 e 350 horas de funcionamento a salinidade da água influenciou de forma significativa esses coeficientes, a nível de (p < 0,01). Verifica-se, para os emissores novos, que não houve efeito da regressão; no entanto se observou, nos emissores com 210 e 350 horas de funcionamento, efeito linear e quadrático a nível de

( $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ ), respectivamente, para CUC, CUD e CUE em função da salinidade da água de irrigação, Tabela 7.

A pressão de serviço influenciou os coeficientes estudados para as avaliações com gotejadores em todas as épocas estudadas, a nível de ( $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ ) de probabilidade, respectivamente. Verifica-se efeito linear e quadrático para o CUC, CUD e CUE, exceto para o CUC e CUE, com 210 horas de funcionamento, Tabela 7.

A interação entre salinidade da água de irrigação e pressão de serviço aplicada (S x P) foi significativa a nível de ( $p < 0,01$ ) para as avaliações com 210 e 350 horas de funcionamento; entretanto, para a avaliação realizada nos gotejadores quando novos, não se observou efeito significativo da interação entre os fatores, Tabela 7.

Brauer et al. (2011) observaram, avaliando a uniformidade de aplicação de água em gotejadores em função do teor de ferro, que o CUC e CUD, foram influenciados a nível de 5% de probabilidade após 2100 horas de funcionamento. Martins et al. (2010) constataram, analisando a aplicação de cloro orgânico no tratamento de tubo gotejador utilizado na irrigação com água ferruginosa que após 700h de funcionamento do sistema de irrigação com água ferruginosa, ocorreram reduções de 23; 30,2 e 8,35%, para o CUC, CUD e CUE, assemelhando-se com os resultados obtidos no presente estudo em que com o passar do tempo, os coeficientes de uniformidade reduziram.

O ponto de maior coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) foi observado na pressão de 100 kPa, sendo o valor encontrado de 98,5% (Figura 7 A). Para o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) o ponto de máximo foi em 100 kPa, com 98,0% (Figura 7B). Observa-se, com o aumento da pressão de serviço, que o coeficiente de uniformidade estatístico (CUE) aumentou sendo o máximo valor observado na pressão de 160 kPa correspondendo a 99, 6% (Figura 7C); contudo, a melhor pressão de serviço para o CUC, CUD e CUE foi a de 60 kPa, uma vez que as diferenças foram poucas quando comparadas com as demais pressões; assim, a menor pressão utilizada foi a que evidenciou a melhor relação custo/benefício, com bons índices e menor consumo de energia.

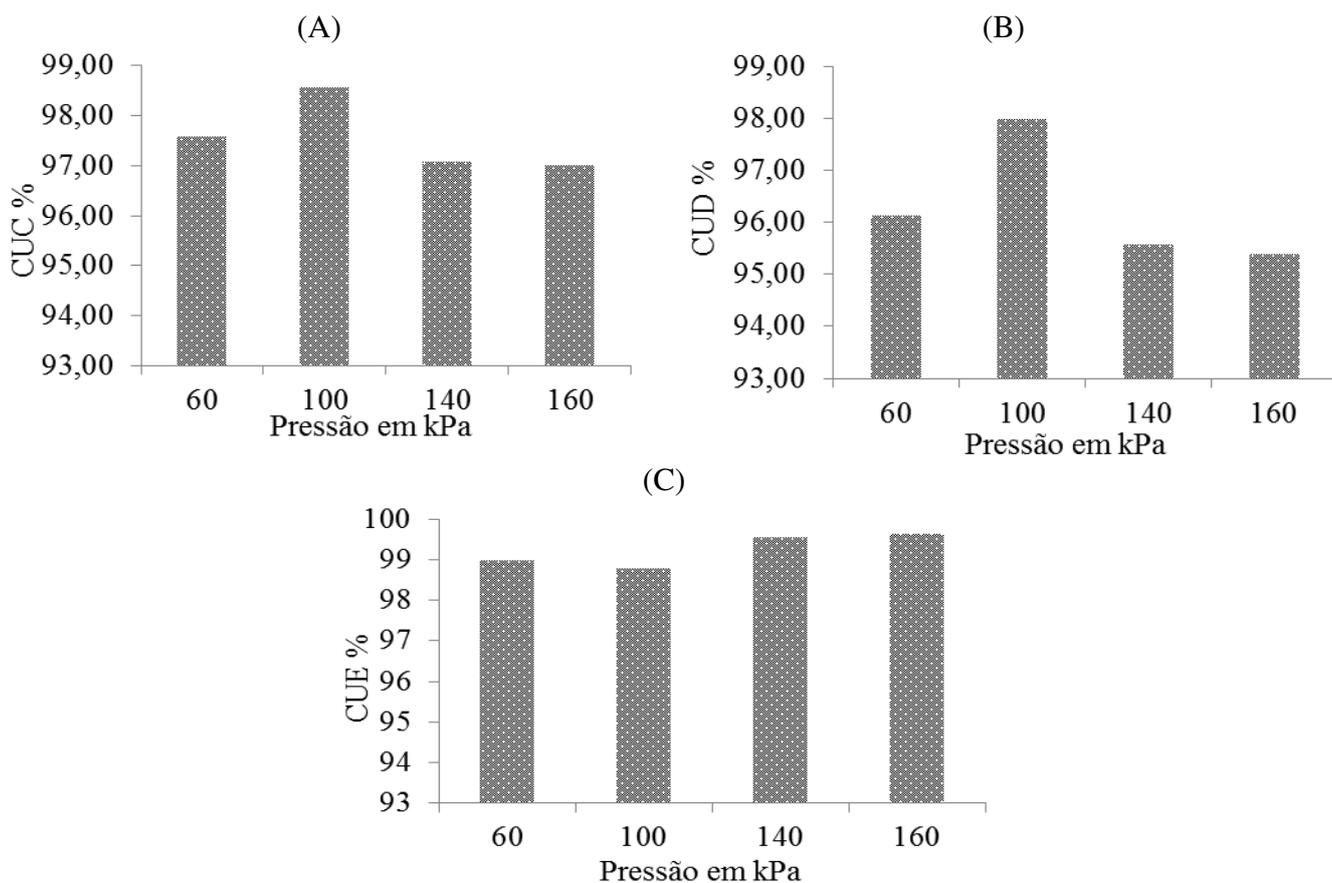


Figura 7 – Coeficientes de uniformidade de Christiansen CUC (A), de uniformidade de distribuição CUD (B) e de uniformidade estatístico CUE (C), em emissores novos, nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas.

Segundo o critério adotado por (Mantovani, 2002; ASAE, 1996) para os valores de CUC em sistema de gotejamento os resultados encontrados para os emissores novos foram, em todos os tratamentos, considerados excelentes. Thebaldi et al. (2013), também observaram, estudando diferentes tipos de água e seu efeito na uniformidade de gotejadores na cultura de tomate, resultados semelhantes.

Os valores de CUD obtidos para emissores novos foram classificados excelentes, por (Keller & Karmeli, 1974; Merriam & Keller, 1978). Resultado semelhante foi encontrado por (Thebaldi et al., 2013). Silva et al. (2010) avaliando a utilização de gotejadores autocompensantes externos, com valores de coeficientes de uniformidade CUC e CUD, acima de 96 e 94%, respectivamente, classificando-os de acordo com Keller & Karmeli (1974) no quadro de excelente uniformidade.

De acordo com ASAE (1996) o coeficiente de uniformidade estatístico evidenciou resultados classificados excelentes. Resultado semelhante aos encontrados por Silva et al. (2012). Segundo Mantovani et al. (2012), o CUE é o mais utilizado para avaliar o desempenho de sistemas de irrigação localizada em condições de campo, por se tratar

de uma medida mais restrita mas principalmente porque levam em consideração as plantas que podem receber menor quantidade de água.

A interação entre os fatores salinidade da água x pressão de serviço fornecida ao sistema, foi significativa para o coeficiente de uniformidade de Christiansen apenas para a pressão de 160 kPa (Figura 8A), observa-se redução de 1,0% entre 0,6 e 4,5d S m<sup>-1</sup>; já para o coeficiente de uniformidade de distribuição a interação foi significativa para as pressões de 60; 140 e 160 kPa (Figura 8B), sendo a redução do CUD, para as pressões em função da salinidade da água de 1,5; 2,7 e 2,73%, respectivamente. O coeficiente de uniformidade estatístico (CUE) para a interação foi significativo na pressão de 60 kPa, sendo a redução de 1,22% (Figura 8C), em relação ao maior e ao menor nível de salinidade (S5 e S1), para 210 horas de funcionamento.

Verifica-se que, mesmo com as reduções observadas em função da interação (S x P) os coeficientes CUC, CUD e CUE, ainda são classificados como excelentes, fato que pode estar relacionado ao tipo de emissor usado ser autocompensantes, demonstrando que o sistema foi bem dimensionado para as condições locais. Para Bernardo et al. (2009), modelos de emissores autocompensantes são os que possuem tecnologias que trabalham com vazão constante, mesmo sofrendo variações de pressão.

O menor valor para o CUE foi observado para a salinidade de 4,5 dSm<sup>-1</sup> correspondendo a 97,5%, para a interação (salinidade x pressão) na pressão de 60 kPa para os emissores com 210 horas de funcionamento, classificados excelentes. Resultado semelhante foi obtido por (Pletsch et al., 2009) após 500 horas de utilização em que o CUE ficou, em todas as pressões, acima dos 95%, classificado excelente. Airoidi (2007) encontrou, no seu experimento em casa de vegetação, valores de CUE de 76,2 % para um tubo gotejador após 500 horas de utilização com água residuária de esgoto doméstico tratado.

Concordando com Silva et al. (2012) Rodrigues et al. (2013) encontraram, avaliando a uniformidade de aplicação de solução nutritiva eficiência e uniformidade de um sistema de irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro, resultados médios de 91,96; 86,78% e 88,15% para o CUC, CUD e CUE, respectivamente acima, portanto, do valor de 80% considerado aceitável por vários autores, (Mantovani et al., 2012) e Ferreira (2008) evidenciaram que o CUC e CUD, em estudo com a aplicação de água proveniente do sistema de abastecimento, não apresentaram grandes variações dos coeficientes de uniformidade com 150 horas de funcionamento, sendo os CUC e CUD médio, de 96,6% e 95,4%.

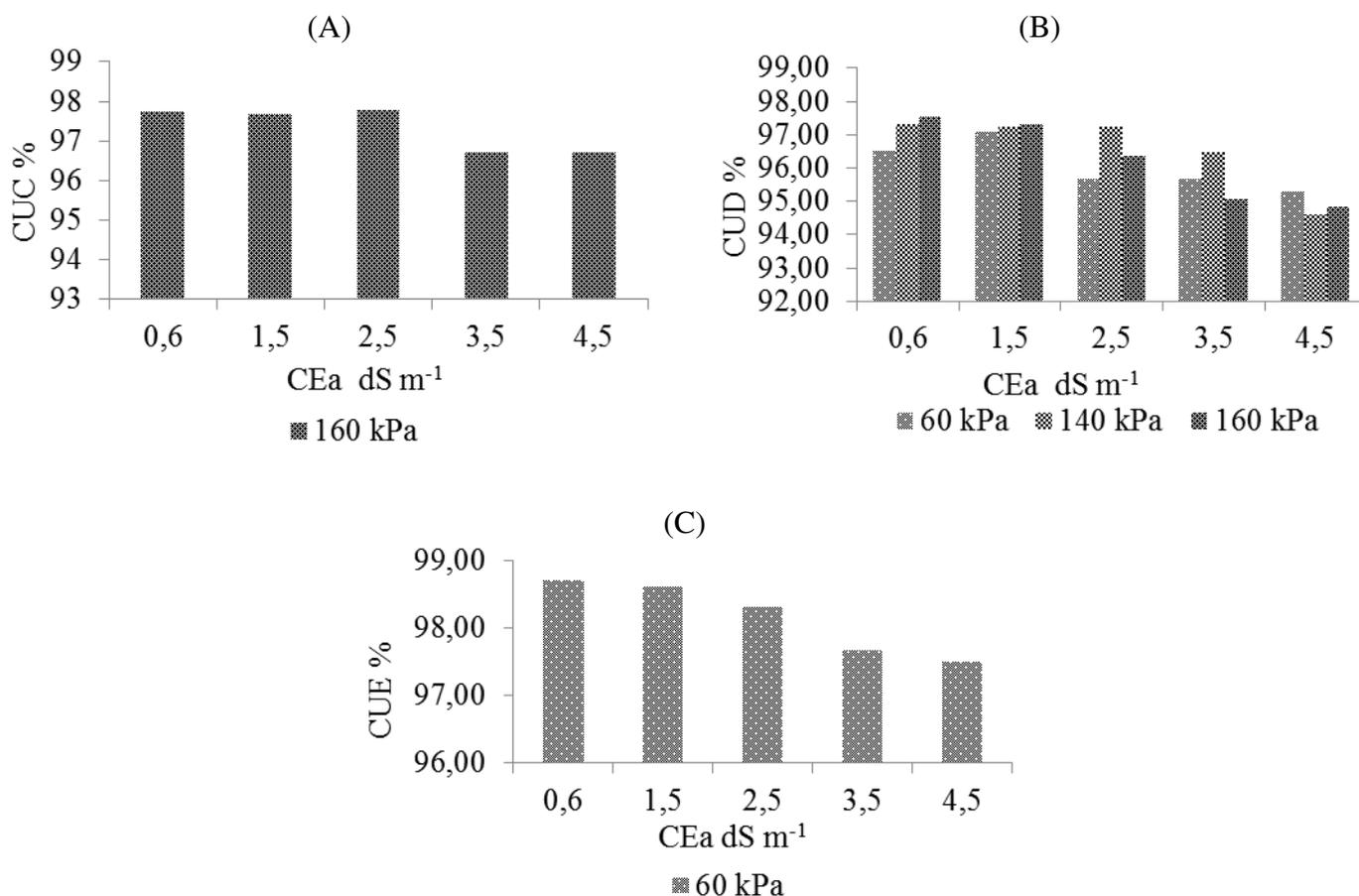


Figura 8 – Coeficientes de uniformidade de Christiansen CUC (A), de uniformidade de distribuição CUD (B) e de uniformidade estatístico CUE (C) em emissores com 210 horas de funcionamento nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas.

Pimentel et al. (2012) evidenciaram, estudando a uniformidade de distribuição de água em irrigação por gotejamento no cultivo de cumaru (*Amburana cearensis*), que o sistema apresentou média de uniformidade de distribuição de 90%, dentro do recomendável para sistemas localizados sendo possível sua utilização desde que sejam atendidas as recomendações técnicas de manutenção da uniformidade, ao longo do tempo, concordando com os resultados obtidos no presente trabalho utilizando água com diferentes concentrações salinas.

O efeito da interação salinidade da água x pressão de serviço fornecida ao sistema de irrigação com 350 horas de funcionamento, encontra-se na Figura 9; observou-se efeito significativo para o CUC quando se utilizaram as pressões de 60; 100; 140 e 160 kPa (Figura 9A), com reduções de 1,26; 1,33; 3,18 e 1,37% respectivamente, para o menor nível de salinidade da água ( $\text{CEai} = 0,6 \text{ dS m}^{-1}$ ), comparado com o maior nível de salinidade da água de irrigação ( $\text{CEai} = 4,5 \text{ dS m}^{-1}$ ).

Para o CUD, a interação foi significativa para as pressões de 60; 100 e 140 kPa (Figura 9B) com 350 horas de funcionamento, e reduções de 2; 2,7 e 3,51% respectivamente, quando se comparou o menor nível de salinidade da água ( $CE_{ai} = 0,6 \text{ dS m}^{-1}$ ), com o maior nível de salinidade da água de irrigação ( $CE_{ai} = 4,5 \text{ dS m}^{-1}$ ). No entanto, mesmo com as reduções, os coeficientes ainda estão classificados como excelentes evidenciando que a salinidade da água de irrigação não interferiu no desempenho do sistema para as condições estudadas.

O coeficiente de uniformidade estatístico com 350 horas de funcionamento (Figura 9C) para a interação entre os fatores, foi significativo para as pressões de 100 e 140 kPa, com redução por incremento de salinidade de 0,84 e 0,92% respectivamente, neste sentido, constatou-se que o coeficiente de uniformidade estatístico para o presente estudo é classificado excelente, assemelhando-se aos coeficientes determinados para água limpa, mesmo após 350 horas de funcionamento.

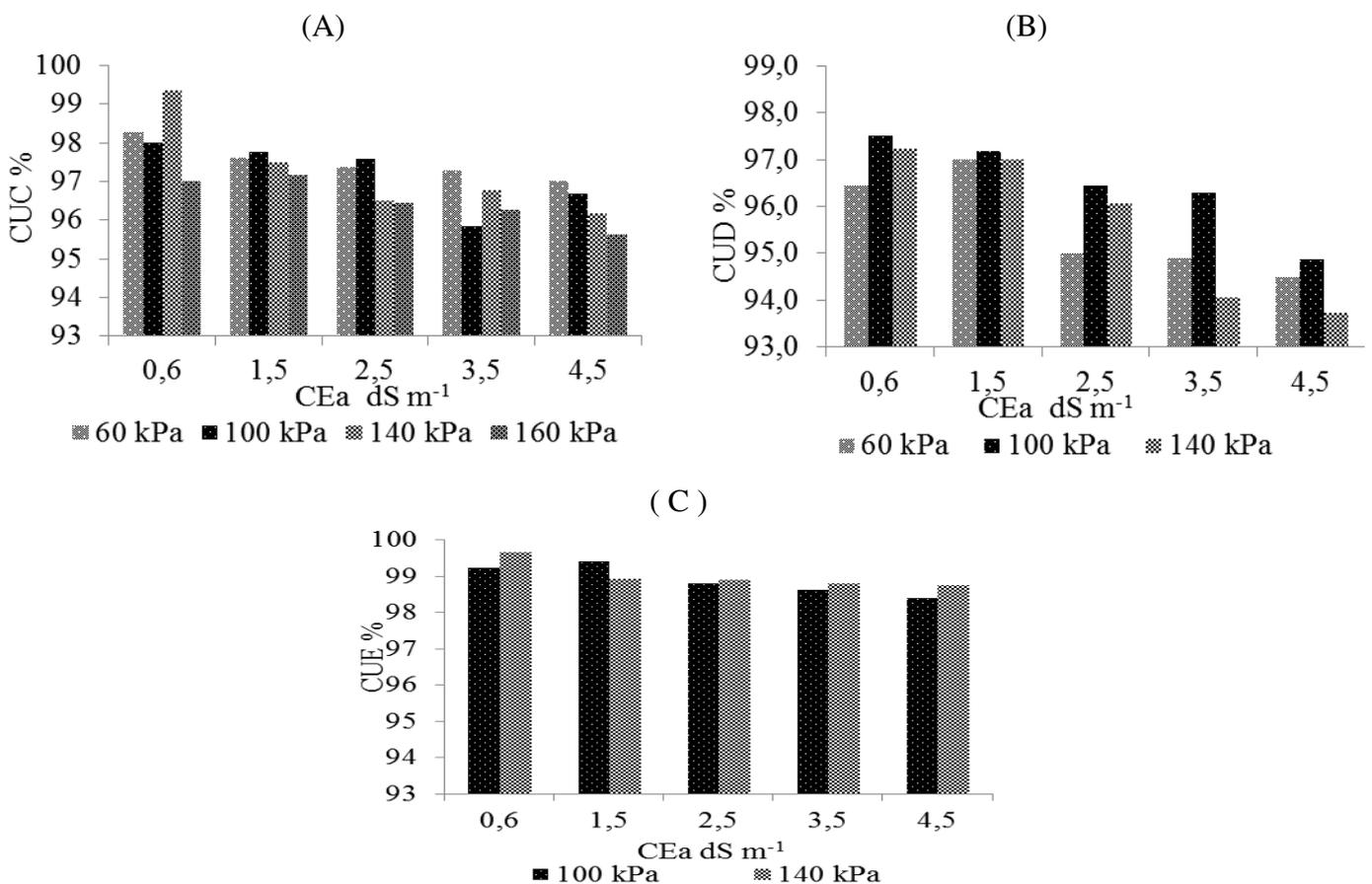


Figura 9 – Coeficientes de uniformidade de Christiansen CUC (A), de uniformidade de distribuição CUD (B) e de uniformidade estatística CUE (C) em emissores com 350 horas de funcionamento nas diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas.

Martins et al. (2010) afirmaram, estudando a aplicação de cloro orgânico no tratamento de tubo gotejador utilizado na irrigação com água ferruginosa, que o coeficiente de uniformidade estatístico na primeira avaliação foi classificado excelente, de acordo com Favetta & Botrel (2001); no entanto, na última avaliação observou-se redução do CUE em 28,35%. Busato et al. (2012) concluíram, em seu estudo, que o sistema foi classificado excelente no início das avaliações (CUC = 95,23%), mas apresentou redução no valor de CUC de 8,2%, passando a ser classificado bom.

Apesar do efeito significativo da interação, observou-se que o CUC, o CUD e o CUE para 350 horas de funcionamento também foram classificados excelentes, ou seja, acima de 90%. Martins et al. (2010) também classificaram como excelentes, em seu estudo, CUC e o CUD em quase todas as avaliações realizadas.

Ainda conforme os resultados expostos na Figura 9 verifica-se que o CUC foi superior ao CUD, em todas as avaliações e para todos os tratamentos estudados. O CUD é mais sensível às variações da uniformidade de aplicação de água pelo efeito do entupimento que o CUC, como se previa, em seu cálculo se utilizam os valores médios dos 25% menores valores das vazões (Busato et al., 2012). De acordo com Bernardo et al. (2009), um dos principais parâmetros para avaliação de um sistema de irrigação é a determinação da uniformidade de aplicação de água sobre a área irrigada.

O resumo da análise de variância para o grau de entupimento (GE), coeficiente de variação de fabricação e de uso (CVF e CVq) e eficiência de aplicação (EA) para os gotejadores novos, com 210 e 350 horas de funcionamento em função aplicação de água salina e diferentes pressões de serviço, está descrito na Tabela 8.

Observa-se que os GE, CVF e EA para os gotejadores novos não foram influenciados pela salinidade da água utilizada (Tabela 8); porém para 210 e 350 horas de funcionamento a salinidade da água aplicada influenciou, de forma significativa, o nível de ( $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ ) os parâmetros GE, CVq e EA. Para os gotejadores com 210 e 350 horas de funcionamento foi observada uma redução linear, além de um ponto máximo a nível de ( $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ ), respectivamente, para o grau de entupimento, coeficiente de variação de uso e eficiência de aplicação em função da salinidade da água, Tabela 8.

A pressão de serviço influenciou os parâmetros estudados para as avaliações com gotejadores em todas as épocas estudadas, a nível de ( $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ ). Foram verificados efeito linear e ponto de máximo desempenho nos GE, CVF, CVq e EA, para os gotejadores novos, com 210 e 350 horas de funcionamento em função da pressão de

serviço fornecida ao sistema. A interação entre salinidade da água de irrigação e pressão de serviço aplicada (Salinidade x Pressão) foi significativa a nível de ( $p < 0,01$ ) para os parâmetros GE, CVq e EA nas avaliações com 210 e 350 horas de funcionamento; entretanto, para a avaliação realizada nos emissores quando novos e para o CVq com 210 horas de funcionamento, não se observou efeito significativo para a interação entre os fatores, Tabela 8.

Tabela 8 – Resumo da análise de variância para grau de entupimento (GE), coeficiente de variação de fabricação e de uso (CVF e CVq) e eficiência de aplicação (EA) em emissores novos, com 210 e 350 horas de funcionamento nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas

Fonte de Variação	G.L	Estatística F								
		GE			CVF			EA		
		Novos	210h	350h	Novos	210h	350h	Novos	210h	350h
Salinidade (S)	4	0,05 <sup>ns</sup>	12,37 <sup>**</sup>	73,74 <sup>**</sup>	0,001 <sup>ns</sup>	10,47 <sup>**</sup>	3,07 <sup>*</sup>	0,001 <sup>ns</sup>	71,15 <sup>**</sup>	39,57 <sup>**</sup>
Reg. Linear	1	0,010 <sup>ns</sup>	2,74 <sup>ns</sup>	217,57 <sup>**</sup>	0,002 <sup>ns</sup>	18,94 <sup>**</sup>	2,32 <sup>ns</sup>	0,003 <sup>ns</sup>	238,04 <sup>**</sup>	151,56 <sup>**</sup>
Reg. Quadrática	1	0,16 <sup>ns</sup>	0,60 <sup>ns</sup>	72,06 <sup>**</sup>	0,002 <sup>ns</sup>	0,96 <sup>ns</sup>	0,11 <sup>ns</sup>	0,002 <sup>ns</sup>	5,57 <sup>*</sup>	4,29 <sup>*</sup>
Pressão(P)	3	258,21 <sup>**</sup>	23,43 <sup>**</sup>	256,51 <sup>**</sup>	57,00 <sup>**</sup>	5,33 <sup>**</sup>	3,26 <sup>*</sup>	7,34 <sup>**</sup>	22,65 <sup>**</sup>	55,27 <sup>**</sup>
Reg. Linear	1	761,80 <sup>**</sup>	64,59 <sup>*</sup>	601,40 <sup>**</sup>	146,95 <sup>**</sup>	5,60 <sup>*</sup>	9,13 <sup>**</sup>	10,91 <sup>**</sup>	9,47 <sup>**</sup>	112,15 <sup>**</sup>
Reg. Quadrática	1	1,95 <sup>ns</sup>	0,98 <sup>ns</sup>	2,96 <sup>ns</sup>	21,75 <sup>**</sup>	2,17 <sup>ns</sup>	0,02 <sup>ns</sup>	8,25 <sup>**</sup>	55,22 <sup>**</sup>	44,71 <sup>**</sup>
Interação (SxP)	12	0,25 <sup>ns</sup>	3,16 <sup>**</sup>	25,89 <sup>**</sup>	0,002 <sup>ns</sup>	4,02 <sup>**</sup>	1,66 <sup>ns</sup>	0,002 <sup>ns</sup>	35,57 <sup>**</sup>	27,28 <sup>**</sup>
C.V (%)		15,60	11,70	9,38	43,97	23,56	29,97	13,43	0,29	0,49

<sup>ns</sup>, \*\*, \* respectivamente não significativo, significativo a  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$  pelo teste F

Observa-se redução do grau de entupimento quando se aumenta a pressão de serviço aplicada aos emissores novos (Figura 10A), verificando-se reduções no entupimento dos emissores, fato este relacionado ao aumento da velocidade da água que arrasta as partículas para fora dos emissores deixando os orifícios livres para a passagem da água. Tais resultados corroboram com os dados encontrados por Cunha et al. (2013), ao constatarem redução no GE para o modelo 1 quando se elevou a pressão, em ambas as condições (crescente e decrescente). Para o coeficiente de variação de fabricação ocorreu decréscimo com o aumento da pressão de serviço fornecida ao sistema (Figura 10B). Para tanto, os coeficientes estão classificados como excelentes, de acordo com ASAE (1996), resultado semelhante ao encontrado por Silva et al. (2012).

Observou-se máxima eficiência de aplicação em função da pressão de serviço aplicada ao sistema de irrigação, quando novo, ao se aplicar a pressão de 100 kPa, correspondendo a 88,6% de eficiência (Figura 10C); contudo, a diferença entre os valores nas distintas pressões é pequena sendo recomendada a pressão de 60 kPa, visto ser a que evidencia, a melhor, relação de eficiência na aplicação com economia de energia.

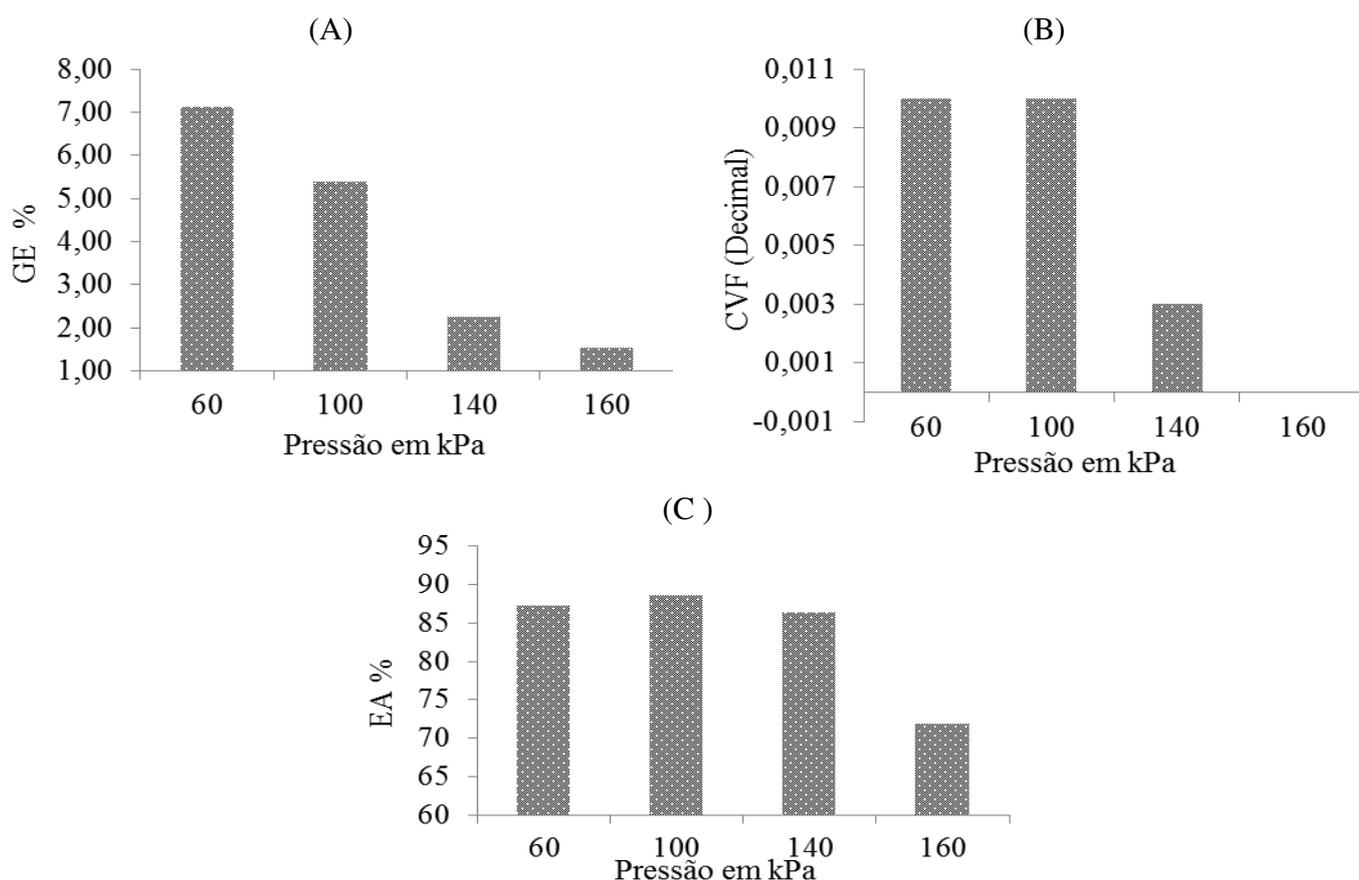


Figura 10 – Grau de entupimento GE (A), coeficiente de variação de fabricação CVF (B) e eficiência de aplicação EA (C) em função da pressão de serviço aplicada em emissores novos.

Um efeito negativo do aumento do entupimento relatado por alguns autores, consiste na redução da vazão dos gotejadores; já no que se refere ao manejo do sistema de aplicação, uma consequência direta da baixa uniformidade de aplicação de água é o aumento do volume aplicado uma vez que o aplicador, ao constatar a redução da vazão média dos gotejadores pelo efeito do entupimento, tem a tendência de aumentar o tempo de aplicação (Cunha et al., 2006).

Silva et al. (2012) concluíram, em seu estudo relativo ao coeficiente de variação de fabricação (CVf), em gotejadores autocompensantes com diferentes efluentes de esgoto doméstico, que o coeficiente de variação de fabricação foi superior a 20% em toda a faixa de pressão estudada. Carvalho et al. (2006) e Koetz et al. (2006) também obtiveram coeficientes de variação de fabricação para emissores autocompensantes acima do recomendado pela ABNT. Dias et al. (2005) consideraram que membrana elástica controladora de pressão para esses tipos de emissores, muito sensível às intempéries.

Almeida et al. (2006) concluíram, avaliando o comportamento hidráulico de gotejadores em linha lateral de irrigação, que o coeficiente de variação de fabricação se apresentou de forma irregular, segundo a recomendação da ABNT (2006) dentro das faixas de pressão trabalhadas.

Vidal et al. (2012) afirmam que a EA apresentou diferença significativa entre as pressões de serviço no nível de 5% de probabilidade, ou seja, com mais de 95% de probabilidade de haver diferença de pelo menos um tratamento em seu estudo, sobre a caracterização hidráulica de um sistema de irrigação por gotejo; entretanto, este parâmetro não reflete, sozinho, a adequação da irrigação visto que, em condições de irrigação muito deficientes, ele pode atingir altos valores, levando o irrigante a uma interpretação errônea quanto ao desempenho do sistema de irrigação (Rodrigues et al., 2013), tornando-se necessárias avaliações de uniformidade de aplicação e de perdas possíveis de ocorrer durante a operação do sistema. Para que a eficiência possa atingir altos valores, é imprescindível que, durante a operação, as perdas sejam as menores possíveis e maior a uniformidade de aplicação e distribuição.

A interação entre salinidade e pressão de serviço aplicada ( $S \times P$ ) para o grau de entupimento GE (Figura 11A), ocasionou efeito significativo quando se utilizaram as pressões de 60 e 140 kPa, verificando-se que, para a pressão de 60 kPa com o aumento do nível de salinidade da água, ocorreu aumento no grau de entupimento dos emissores; contudo, para a pressão de 140 kPa verificou-se diminuição no grau de entupimento com o aumento da salinidade da água de irrigação; esta variação no GE em função do aumento da pressão, ocorre devido ao acréscimo da pressão que aumenta a velocidade de escoamento da água e, conseqüentemente, arrasta as partículas que danificam os emissores reduzindo o seu grau de entupimento.

Em relação ao coeficiente de variação de uso (CVq) a interação entre os fatores estudados foi significativa nas pressões 60, 100 e 160 kPa (Figura 11B). Para a pressão 60 kPa quando se aumentou o nível de salinidade da água de irrigação elevou-se também o coeficiente de variação de uso porém para as pressões de 100 e 160 kPa quando foi aplicada água com salinidade maior e o coeficiente de variação de uso diminuiu. Cararo & Botrel (2007) constataram, estudando o uso de cloração e ar comprimido no controle do entupimento de gotejadores ocasionado pela aplicação de água residuária que, independentemente do manejo utilizado, o coeficiente de variação de uso não oscilou estatisticamente, sinalizando que, dentre os manejos utilizados, quanto ao coeficiente de variação de uso, qualquer tratamento apresentaria o mesmo

resultado; entretanto, o uso apenas de filtragem seria mais indicado, visto que não requer custos adicionais, como os provenientes da adição de cloro ou de ar comprimido.

De acordo com os estudos de regressão para a eficiência de aplicação EA em função da interação salinidade da água x pressão de serviço fornecido ao sistema com 210 horas de funcionamento (Figura 11C), a interação foi significativa para as pressões de 60; 140 e 160 kPa; para a pressão de 60 kPa a máxima eficiência foi observada com a condutividade elétrica de 2,5 dS m<sup>-1</sup> enquanto para as pressões de 140 e 160 kPa a redução da eficiência foi de 2,5% quando se aumentou a salinidade da água de irrigação; mesmo assim, é oportuno ressaltar que a eficiência de aplicação ainda está dentro dos limites aceitáveis para um sistema de irrigação por gotejamento.

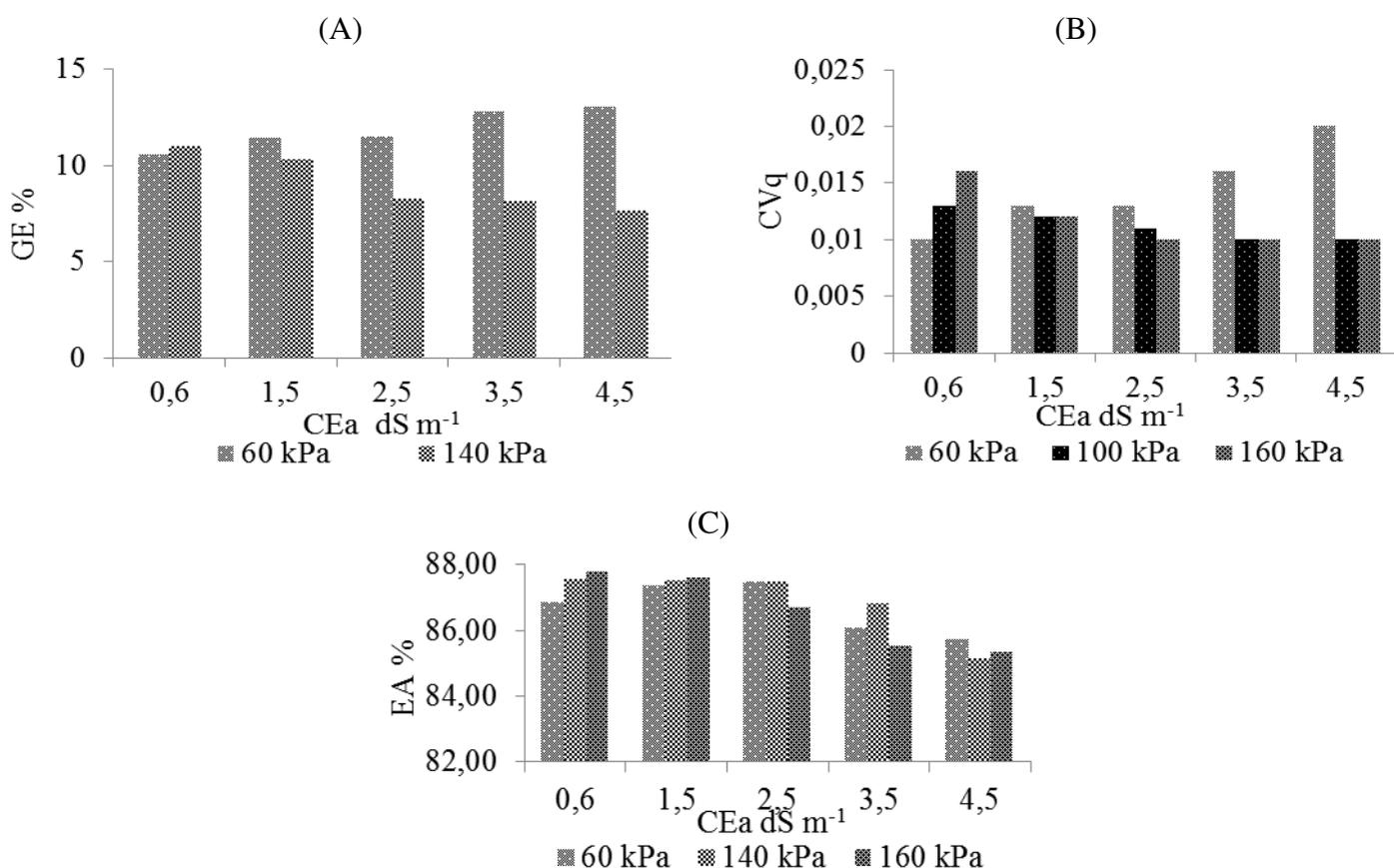


Figura 11 – Grau de entupimento GE (A), coeficiente de variação de uso CVq (B) e eficiência de aplicação EA (C) em emissores com 210 horas de funcionamento nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas

Segundo Mantovani et al. (2012) a eficiência de uniformidade de aplicação de água para sistemas de irrigação por gotejamento deve ser da ordem de 85 a 95%; estando os dados obtidos no presente estudo dentro desses valores mesmo com os

decréscimos obtidos com os níveis de salinidade é possível, então, concluir que mesmo na pressão 60 kPa a EA pode ser adotada como manejo eficiente .

A interação para o grau de entupimento dos gotejadores com 350 horas de funcionamento se encontra na Figura 12 A, na qual se observa que a interação (Salinidade x Pressão) foi significativa para as pressões de 60; 140 e 160 kPa, verificando-se que, quando se aumentou a pressão de serviço nos diferentes níveis de salinidade da água reduziu-se o GE, concordando com os resultados encontrados por Ribeiro et al. (2010).

Ribeiro et al. (2012) observaram, avaliando gotejadores submetidos às condições críticas de qualidade da água após 288 horas de funcionamento, que os modelos de gotejadores autocompensantes apresentaram desempenho variável quanto à suscetibilidade ao entupimento, desde modelos com excelente desempenho a modelos de baixo desempenho; essas variações operacionais dos emissores estão correlacionadas com a arquitetura de cada emissor.

Para o coeficiente de variação de uso CVq observa-se efeito isolado da pressão de serviço com 350 horas de funcionamento (Figura 12B), cujo decréscimo foi de 0,01% quando se elevou a pressão de serviço fornecida ao sistema.

Cararo & Botrel (2007) observaram que, com 58 horas de funcionamento, os coeficientes de variação de uso se apresentam superiores a 10% na maioria dos valores analisados e para todos os manejos, o que indicaria que nenhum tratamento foi eficiente em manter os coeficientes no nível desejável, em relação aos tratamentos testados, discordando dos resultados encontrados no presente estudo de que o CVq esteve classificado como excelente.

A eficiência de aplicação para os emissores com 350 horas de funcionamento se encontra na Figura 12 C. Observa-se efeito da interação para EA para as pressões de 60; 100 e 140 kPa, sendo que a redução, quando se comparou o menor nível de salinidade estudado ( $0,6 \text{ d S m}^{-1}$ ) com o maior nível ( $4,5 \text{ d S m}^{-1}$ ) foi de 1,75; 2,38 e 3,16, respectivamente. Verifica-se que, mesmo com as reduções observadas, a eficiência de aplicação é considerada adequada para um sistema de irrigação por gotejamento e como são poucas as diferenças de valores nas pressões, é possível diagnosticar, que embora na menor pressão 60 kPa, o sistema ainda está dentro dos padrões considerados aceitáveis.

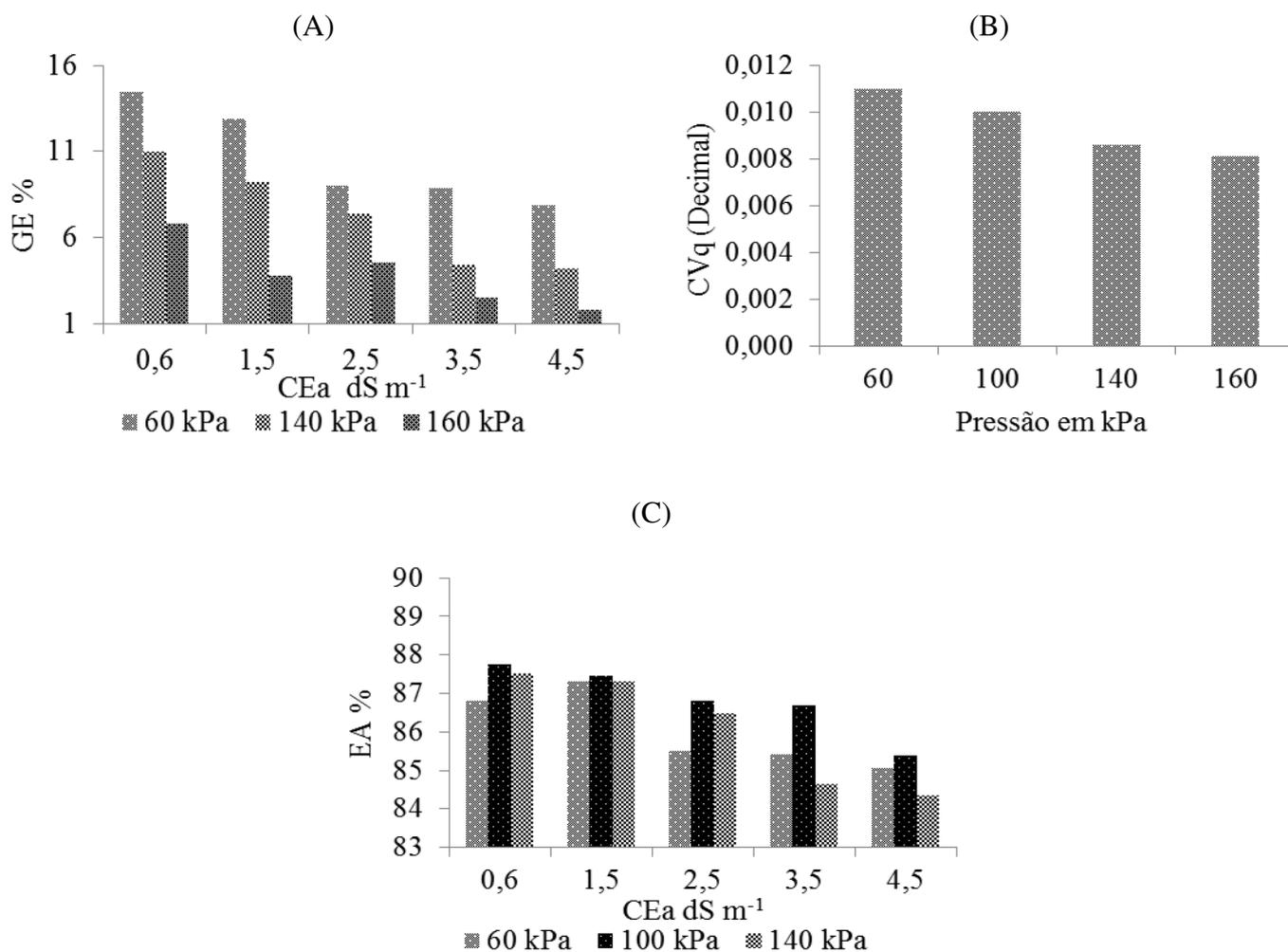


Figura 12 – Grau de entupimento GE (A), coeficiente de variação de uso CVq (B) em função da interação (S X P) e eficiência de aplicação EA (C) em emissores com 350 horas de funcionamento nos diferentes níveis de salinidade da água e pressões estudadas.

Dantas Neto et al. (2013) encontraram, em estudo conduzido em condições de campo, eficiência de aplicação nas culturas de tomate e pimentão abaixo do mínimo aceitável (80%), fato este passível de ser atribuído às variações de pressão e vazão observadas nas linhas laterais. Esta eficiência se aproximou da de Silva et al. (2010) que avaliaram sistema de irrigação de gotejamento no semiárido de Pernambuco com eficiência de aplicação média de 83,73 %.

## 7. Conclusões

A variação de vazão do emissor autocompensante analisada foi considerada baixa ao longo do tempo, estando dentro da recomendação de  $\pm 7\%$  da vazão nominal. Os emissores obtiveram valores de expoente entre 0,02 a 0,09, classificados como autocompensantes em conformidade com os dados do fabricante. A vazão que mais se aproximou da vazão recomendada pelo fabricante em emissores novos ocorreu na pressão de 60 kPa e na salinidade de  $0,6 \text{ dS m}^{-1}$ ; quando se aumentou o tempo de funcionamento para 210 e 350 horas, o comportamento foi semelhante ao dos emissores novos.

Os valores encontrados dos coeficientes CUC, CUD, CUE, CVF, GE e EA em emissores novos, foram considerados excelentes mas não foram influenciados significativamente pelos níveis de sais da água de irrigação nem, tampouco, pela interação entre salinidade da água e pressão, embora tenham sido influenciados pela pressão de serviço aplicada. A interação entre níveis de salinidade e pressão de serviço aplicada influenciou significativamente, os coeficientes analisados para as avaliações realizadas com 210 e 350 horas de funcionamento do sistema de irrigação, exceto para o CVq com 350 horas de funcionamento; o desempenho dos emissores foi considerado satisfatório utilizando água salina, sendo a pressão de 60 kPa a que resultou na melhor relação custo benefício.

## 8. Referências bibliográficas

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Equipamentos de irrigação agrícola – Emissores e tubos emissores – Especificações e métodos de ensaio. ABNT NBR ISO 9261. São Paulo: ABNT,2006. 9p.
- Airoldi, R.P.S. Análise do desempenho de gotejadores e da prevenção do entupimento em irrigação com água residuária. Piracicaba: ESALQ/USP, 2007. 140p. Tese de Doutorado.
- Almeida, A. M.; Sampaio, S. C.; Suszek, M. Comportamento hidráulico de Gotejadores em linha lateral. *Revista Varia Scientia*, v. 06, p. 129-140, 2006.
- ASAE - American Society of Agricultural Engineers. Field evaluation of microirrigation systems. St. Joseph, 1996.p.792-797.
- Barros, A. C.; Coelho, R. D.; Medeiros, P. R. F.; Mélo, R. F.; Barboza Junior, C. .R. A.; Dias, S. T. C. Entupimento de gotejadores em função da aplicação de superfosfato simples e ácido nítrico. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 29, p. 62-71,2009.
- Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de irrigação. 8. ed. Viçosa: UFV, 2009. 630p .
- Brauer, R. L.; Cruz, R. L.; Villas Boas, R. L.; Plestch, T. A. Avaliação da uniformidade de aplicação de água em gotejadores em função do teor de ferro. *Irriga*, v. 16, p. 21-30, 2011.
- Busato, C. C. M.; Soares, A. A.; Ramos, M. M. ; Reis, E. F.; Busato, C. Dicloroisocianurato na prevenção do entupimento devido ao uso de águas ferruginosas em sistemas de irrigação por gotejamento. *Semina. Ciências Agrárias*, v. 33, p. 49-56, 2012.
- Cararo, D. C. Manejo de irrigação por gotejamento para aplicação de água residuária visando a minimização do entupimento de emissores. Piracicaba: ESALQ/USP, 2004. 130 p. Tese de Doutorado
- Cararo, D. C., Botrel, T. A. Uso De Cloração E Ar Comprimido No Controle Do Entupimento De Gotejadores Ocasionado Pela Aplicação De Água Residuária. *Revista de Engenharia Agrícola*, v.27, p.336-345. 2007.
- Carvalho, C. M.; Eloí, W. M.; Lima, S. C. R. V.; Pereira, J. M. G. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento na cultura da goiaba. *Irriga*, v.11, p.36-46, 2006.
- Coelho, R.D. Contribuições para a irrigação pressurizada no Brasil. Piracicaba: ESALQ/USP, 2007. 192 p. Tese Livre-Docência
- Christiansen, E. J. Irrigation by sprinkler. Berkeley: University of California, 1942. 142p. (Bulletin, 670).
- Cunha, F. F., Matos, A. T.; Batista, R. O.; Monaco, P. A. L. Uniformidade de distribuição em sistemas de irrigação por gotejamento utilizando água residuária da despolpa dos frutos do cafeeiro. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 28, p. 143-147, 2006.
- Cunha, F. N.; Silva, N. F.; Oliveira, R. C.; Teixeira, M. B.; Carvalho, J. J.; Gomes Filho, R. R. Caracterização hidráulica de gotejadores em condição superficial e subsuperficial. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* v.7,p 317 - 329, 2013.
- Dantas Neto, J.; Azevedo, C. A. V.; Silva, L. F. D.; Silva, P. F.; Santos, C. S. Desempenho De Sistema De Irrigação Por Gotejamento Em Áreas De Pequenos Produtores Do Semiárido Paraibano. *Enciclopédia Biosfera*, v.9, p. 679-688, 2013.
- Denículi, W.; Bernardo, S.; Thiébaud, J. T. L.; Sediyaama, G. C. Uniformidade de distribuição de água, em condições de campo num sistema de irrigação por gotejamento. *Revista Ceres*, v. 27, p 155-162, 1980.
- Dias, N. Da S.; Medeiros, J. F. De; Teixeira, M. B. Avaliação de diferentes modelos, vazões e espaçamentos de gotejadores na irrigação do meloeiro. *Irriga*, v.10, p.263-271, 2005.

- Favetta, G. M.; Botrel, T. A. Uniformidade de Sistemas de Irrigação Localizada: Validação de Equações. *Scientia Agricola*, v.58,p.427-430. 2001.
- Fernandes, A. L. T.; Fraga Júnior, E. F.; Davi, F. M. M. Avaliação do desempenho e microjet's utilizados na irrigação localizada. *FAZU em Revista*, Uberaba, n.7, p. 22- 26, 2010.
- Ferreira, D. C. *Fertirrigação Do Cafeeiro Com Esgoto Doméstico –Riscos De Salinização E Contaminação Do Solo*. Viçosa: UFV, 2008. 58 p. Dissertação de mestrado.
- Ferreira, D. F. Sisvar: Um programa para análises e ensino de estatística. *Revista Symposium (Lavras)*,v.6, p.36-41, 2008.
- Garcia, C. J. B. Avaliação técnica de tubos emissores para irrigação localizada. Botucatu: UNESP, 2006.63 p. Tese de Doutorado.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9621: Agricultural irrigation equipment: emitters and emitting pipe: specification and test methods. 2 ed. Geneva, 2004.20 p.
- Keller, J.; Karmeli, D. Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, v.17, p.678-84, 1974.
- Keller, J.; Karmeli, D. *Trikler irrigation desing*. Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing, 1975. 182 p.
- Koetz, M.; Coelho, G.; Costa, C. C.; Lima, E. P.; Souza, R. J. Efeitos da dose de potássio e da frequência de irrigação na produção da alface-americana em ambiente protegido. *Revista de Engenharia Agrícola*, v.26, p.730-737, 2006.
- Mantovani, E. C.; Bernardo, S.; Palaretti, L. F. *Irrigação: princípios e métodos*. Viçosa: UFV, 3. ed. eampl. 2012. 358p.
- Mantovani, E.C. *Avalia: manual do usuário*. Viçosa: DEA/UFV–PNP&D/café Embrapa. 2002. 100p.
- Martins, C. M., Soares, A. A., Ramos, M. M., Reis, E. F. Aplicação de cloro orgânico no tratamento de tubo gotejador utilizado na irrigação com água ferruginosa. *Revista Acta Scientiarum Agronomy*, v. 32,p. 1-5, 2010.
- Merriam, J. L.; Keller, J. *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. Logan: Utah State University. 1978, 271p.
- Najafi, P.; Tabatabaei, S. H.; Asgari, K. Evaluation of filtration and SDI application effects on treated wastewater quality index. *African Journal of Agricultural Research*, v.5, p.1250-1255, 2010.
- Pimentel, J. V. F.; Guerra, H. O. C.; Paixão, F. J. R. da. Uniformidade de distribuição de água em irrigação por gotejamento no cultivo de cumaru (*amburana cearensis*). In: *Inovagri International Meeting & Iv Workshop Internacional De Inovações Tecnológicas Na Irrigação, I*, 2012, Fortaleza. *Anais... Fortaleza: I Inovagri International Meeting & IV Winotec*, 2012 .CD-Rom.
- Pizarro, F. C. *Riegos localizados de alta frequência*. Madrid: Mundi Prensa, 1987. 461 p.
- Pletsch, T. A.; Cruz, R. L.; Mazzer, H. R.; Oliveira, E. F. Desempenho de gotejadores com uso de esgoto doméstico tratado. *Irriga*, v. 14, p. 243-253, 2009.
- Ribeiro, P. A. De A.; Coelho, R. D.; Teixeira, M. B. Entupimento de tubos gotejadores convencionais com aplicação de cloreto de potássio (branco e vermelho) via duas qualidade de água. *Revista Engenharia Agrícola*, v.30, p.279-287, 2010.
- Ribeiro, P. A. De A.; Teixeira, M. B.; Coelho, R. D.; Franco, E. M.; Silva, N. F. Da; Carvalho, L. C. C. De; Alves, M. E. B. Gotejadores submetidos a condições críticas de qualidade da água. *Brazilian Journal of Irrigation and Drainage - Irriga*, Ed. Especial, p. 368 - 379, 2012.
- Richards, L. A. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington: United States Salinity Laboratory. 1954. 160p. *Agriculture Handbook*, 60

- Rodrigues, R.R; Cola, M. P.; Nazário, A. A.; Azevedo, J. M. G.; Reis, E. F. Eficiência e uniformidade de um sistema de irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro. *Revista Ambiência*, v.9,p. 323 - 334 , 2013.
- Silva, L. P.; Silva, M.M. ; Correa, M. M. ; Souza, F.C.D. ; Silva, E. F. F. E. Desempenho de gotejadores autocompensantes com diferentes efluentes de esgoto doméstico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, p. 480-486, 2012.
- Silva, M. M.; Souza, F. C. D.; Silva. L. P.; Barnabé, J. M. C.; Melo, R. R. C.; Correa, M. M. Sistema de irrigação localizada com esgoto doméstico tratado: efeitos na uniformidade de distribuição de água. In: *Jornada De Ensino, Pesquisa E Extensão*, 5,2010, Anais... Recife :UFRPE, 2010. CD Rom.
- Thebaldi, M. S. ;Sandri, D. ; Rocha, M.S. ; Felisberto, A. B. ; Avelino Neto, S. . Diferentes tipos de água e seu efeito na uniformidade de gotejadores na cultura de tomate. *Irriga v. 18*, p. 212-222, 2013.
- Valnir Junior, M.; Carvalho, C. M.; Carvalho, C. M.; Santos Neto, A. M. ; Soares, J. I. ; Lima, S. C. R. V. ; Carvalho, M. A. R. De . Análise de desempenho em laboratório de linha gotejadora nova e após sua utilização em campo. *Revista brasileira de agricultura irrigada*, v. 5,p. 351-360, 2011.
- Vidal, V. M.; Bessa, J. F. V.; Pedrosa, J. S.; Valério, F. L.; Soares, F. A. L.; Teixeira, M. B. Caracterização hidráulica de um sistema de irrigação por gotejo. In: *Inovagri International Meeting & IV Workshop Internacional De Inovações Tecnológicas Na Irrigação*, I , 2012, Fortaleza. Anais... Fortaleza: I Inovagri International Meeting& IV Winotec, 2012 . CD-Rom.
- Vermeiren, L.; Jobling. G.A. *Irrigação Localizada*. Tradução de Ghey, H.R.; Damasceno, F.A.V.; Silva Júnior, L.G.A.; Medeiros, J.F. de. Campina Grande. UFPB. 1997. 184 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 36).

## **II CAPITULO**

---

## **CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO EM EMISSORES AUTOCOMPENSANTE COM ÁGUAS SALINAS**

### **Resumo**

Analisar a qualidade da irrigação, além de avaliar seu bom funcionamento, é uma forma de verificar a viabilidade de sua implantação e operação. Como o coeficiente de Uniformidade de Christiansen é um dos parâmetros mais utilizados para essa avaliação objetivou-se, com este trabalho, aplicar o controle estatístico de processo, pelos gráficos individuais de Shewhart e o índice de capacidade do processo em emissores autocompensantes com águas de diferentes concentrações salinas. A pesquisa foi conduzida em casa de vegetação da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Os tratamentos foram compostos por cinco níveis de salinidade da água de irrigação (CEai) (0,6; 1,5; 2,5; 3,5 e 4,5 dS m<sup>-1</sup> a 25°C), fixados na pressão de 160 kPa durante 15 ensaios de irrigação para emissores novos, com 210 e 350 horas de funcionamento. Foram aplicados os testes de controle de qualidade, elaborando os gráficos de controle de Shewhart e calculado o índice de capacidade do processo (Cp, Cpk e Cpl), em que os resultados obtidos permitem afirmar que os gráficos de Shewhart são capazes de diagnosticar alterações no sistema de irrigação demonstrando o momento para fazer sua manutenção. Os emissores foram considerados capazes quando novos; após 210 e 350 horas de funcionamento eles necessitam de manutenção para que possam continuar dentro dos limites de controle. O índice de capacidade do processo é uma ferramenta adequada para diagnosticar se o sistema de irrigação tem capacidade de se manter sob controle, ou seja, se será capaz de manter níveis aceitáveis de uniformidade, auxiliando o irrigante na tomada de decisão.

**Palavras-chave:** índice de capacidade de processo, engenharia de qualidade, vazão, gráficos de controle de Shewhart

## STATISTICAL PROCESS CONTROL IN EMITTERS SELF COMPENSATE WITH SALINE WATER

### Abstract

Analyze the quality of irrigation, and evaluate its functioning, is a way to verify the feasibility of its implementation and operation. Since the coefficient of uniformity Christiansen is a parameter commonly used for this evaluation therefore this work Monitor the process of applying water by applying statistical process control, by individual Shewhart charts and process capability index in emitters self-compensating water different salt concentrations. The research was conducted in a greenhouse of the academic unit of agricultural engineering, Federal University of Campina Grande (UFCG). The treatments consisted of five salinity levels of irrigation water (EC wi) (0.6; 1.5; 2.5; 3.5 and 4.5 dS m<sup>-1</sup> at 25 ° C), set in pressure 160 kPa during the 15 trials irrigation for new drippers, with 210 and 350 hours of operation. Testing of quality control were applied, producing the Shewhart control charts and calculated the index of process capability (Cp, Cpk and Cpl), and the results obtained allow us to state that the Shewhart charts is a tool capable of diagnosing changes in the irrigation system showing the time to do maintenance. The emitters were considered capable when new, after 210 and 350 hours operation need of maintenance so you can keep within the limits of control making the emitter able. The process capability index is a tool to diagnose whether the irrigation system is able to keep under control, ie, whether it will be able to maintain acceptable levels of uniformity, helping the irrigator decision making.

**Key words:** process capability index, quality engineering, Flow, Shewhart control charts

## 9. Introdução

O sistema de irrigação por gotejamento possui emissores através dos quais a água escoar, após dissipar a pressão ao longo de uma rede de condutos (Mantovani et al., 2012). De acordo com Souza et al. (2005) faz-se necessário minimizar a aplicação de água de qualidade inferior via irrigação sem, contudo, comprometer a produção final.

A escassez de água no mundo é um problema diagnosticado, especialmente em países com grandes regiões semiáridas, como o Brasil. Diante do quadro de baixa oferta de água potável, tornam-se importantes os projetos de pesquisa e a geração de tecnologias que permitam o uso de águas salinas na irrigação das culturas agrícolas (Paulus et al., 2010).

Em irrigações, assim como em outros processos realizados no meio agrícola, deve-se ter uma qualidade das ações, controlando parâmetros que estejam afetando tais ações. O controle estatístico de qualidade é perfeitamente adaptável ao sistema de produção agrícola, visto que, com a correção e a eliminação de desperdícios e falhas, há redução de custos e aumento da produtividade e muitas vantagens são agregadas à competitividade no campo (Silva et al., 2007), sendo que o gráfico de controle é uma das principais ferramentas utilizadas (Montgomery, 2009).

De acordo com Tessaro (2012) o controle estatístico de processo é uma ferramenta em experimentos científicos, utilizada para avaliar a qualidade de um produto e apresentar suas variações negativas para que seja possível gerar informações que melhorem a qualidade do produto. A qualidade é a principal estratégia de negócios. A capacidade de processo gera informações e verifica se um produto ou processo está dentro de um padrão de qualidade, isto é, dentro das especificações exigidas pelo consumidor, parâmetros que interferem no rendimento do produto e no processo.

Ferramentas podem ser aplicadas como o índice de capacidade de processo na irrigação localizada, visando observar o quanto esta irrigação é adequada, em termos de qualidade refletida por meio dos gráficos de controle, onde um coeficiente alto e pouca variabilidade contribuem para o aumento do valor deste índice, responsável pela adequação desta irrigação aos critérios pré-estabelecidos (Montgomery, 2009).

No Brasil, são poucos os locais que possuem estrutura suficiente para se fazer uma avaliação detalhada de sistemas de irrigação a fim de que seja possível a realização do aperfeiçoamento desses equipamentos; logo, é necessária, muitas vezes, a construção

de bancadas de ensaio para realização de testes laboratoriais, a fim de que sejam comparados com as condições de campo (Hernandes, 2010).

Assim sendo, a utilização das ferramentas de controle na identificação de problemas causados aos emissores em função da utilização de águas de qualidade inferior na irrigação, é de extrema importância, de vez que a qualidade da água pode afetar, além da cultura irrigada, o sistema de irrigação, causando prejuízos ao produtor.

Neste contexto objetivou-se, com o presente estudo, aplicar o controle estatístico de processo pelos gráficos individuais de Shewhart, e o índice de capacidade do processo em gotejadores autocompensantes com águas de diferentes concentrações salinas.

## **10. Material e Método**

O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, situada a 7° 12' 88" de latitude sul, 35° 54' 40" de longitude oeste e altitude média de 532 m. Para o ensaio utilizou-se a estrutura de alvenaria com 8 m de comprimento por 1 m de largura e 0,11 m de altura, composto por três módulos experimentais e cinco reservatórios.

O sistema de pressurização utilizado no experimento foi composto por uma moto bomba centrífuga da marca Maqtron, modelo IBD 35. A operação de funcionamento da bomba, quanto ao horário de início e término de cada ciclo de aplicação, foi realizada manualmente obedecendo aos horários de início, duração de aplicação e ensaio de vazão. Para evitar a entrada de partículas em suspensão no sistema com tamanho superior ao diâmetro dos emissores, foi utilizado um filtro de tela de 1", com capacidade para 5 m<sup>3</sup>h<sup>-1</sup> de vazão; as linhas laterais tinham comprimento de 8 m e 1 manômetro do tipo Bourdon, testados e aferidos antes dos ensaios.

A mangueira gotejadora utilizada no experimento é da Rain Bard™, modelo XFS 0612500 autocompensante, com espaçamento entre gotejadores de 0,30 m e a pressão recomendada para funcionamento, segundo o fabricante, varia de 60 a 420 kPa.

Os tratamentos foram compostos por cinco níveis de salinidade da água de irrigação (CEai) (0,6 - controle; 1,5; 2,5; 3,5 e 4,5 dS m<sup>-1</sup> a 25°C ) e três repetições, para a maior pressão estudada 160 (kPa) fornecida ao sistema, registrada por

manômetro de Bourdon (0 a 1000 kPa), conectado à entrada das linhas de emissores. As águas de diferentes concentrações salinas foram preparadas mediante metodologia proposta por Richards (1954), sendo elas 0,6; 1,5; 2,5; 3,5 e 4,5 dS m<sup>-1</sup>a 25 °C. Para cada pressão dentro de cada nível de salinidade foram feitas três repetições com um tempo de coleta de 5 minutos cronometrados em cronômetro digital.

Inicialmente, utilizaram-se emissores novos e se procedeu à avaliação utilizando os cinco níveis de salinidade da água na pressão aplicada à linha de emissores, individualmente; em seguida ao final, a utilização no primeiro ciclo do girassol com 210 e no segundo ciclo com 350 horas de funcionamento do sistemas irrigado com as mesmas concentrações salinas do presente estudo, foram realizadas a segunda e terceira avaliações dos emissores, respectivamente. Utilizaram-se 5 linhas usadas nos experimentos, cada uma avaliada individualmente com seu respectivo nível de salinidade estudado.

As vazões dos emissores foram amostradas de acordo com a metodologia proposta por Keller & Karmeli (1974) e Deniculi et al. (1980); a coleta da vazão é feita em oito emissores por linha lateral: do primeiro emissor, dos emissores situados na posição, 1/7, 2/7, 3/7, 4/7, 5/7, 6/7 e do último emissor, em intervalos de 5 minutos; com a utilização de coletores plásticos o tempo foi medido com auxílio de cronômetro digital e o volume foi medido com o auxílio de uma proveta graduada em 1000 mL.

Para a coleta de dados tomaram-se alguns cuidados, como a limpeza do filtro de tela antes das avaliações, abertura do final das linhas laterais em intervalos de 5 minutos para a saída de impurezas e bolhas de ar; posteriormente, o fechamento dos mesmos para estabilização da pressão, sendo realizadas 15 avaliações em cada coleta para os emissores novos, com 210 e 350 horas de funcionamento em cada nível de salinidade estudado. Com os dados de vazão determinou-se o CUC, Equação 1, para os gotejadores novos, com 210 e 350 horas de funcionamento.

$$CUC = 1 - \left( 1 - \frac{\sum_i^n |Q_i - \bar{Q}|}{n * \bar{Q}} \right) \quad (1)$$

Em que:

$Q_i$  = vazão coletada em cada gotejador (Lh<sup>-1</sup>);

$\bar{Q}$  = média das vazões coletadas de todos os gotejadores (Lh<sup>-1</sup>);

n = número de gotejadores analisados.

Para a aplicação das ferramentas fornecidas pelo controle estatístico de processo, ressalta-se a necessidade de que os dados devem apresentar distribuição normal, a qual que foi observada por meio do teste de Anderson-Darling e Kolmogorov - Smirnov, determinado por meio do programa Minitab 16.

Com os dados de vazão e CUC foram gerados gráficos de controle de Shewart de amostras individuais, com auxílio do software Minitab 16.

Os gráficos de controle foram utilizados para verificar as características da qualidade dos gotejadores para cada tratamento. Por meio do gráfico denominado "X - R" foi realizado o monitoramento do valor médio (X) e sua variabilidade, cujo modelo utiliza a média aritmética dos valores resultantes das medições realizadas de forma amostral, como medida de posição do processo, fixando três desvios-padrões acrescidos à média e definindo o Limite Superior de Controle (LSC), conforme a Equação 2, e três desvios-padrões decrescidos à média, conforme Equação 3, definindo o Limite Inferior de Controle (LIC) do processo; assim, a linha central representa o valor médio da qualidade, que corresponde ao estado sob controle (Lima et al., 2006).

$$LSC = X + 3\sigma \quad (2)$$

$$LIC = X - 3\sigma \quad (3)$$

Em que:

LSC = Limite Superior de Controle;

X = é a linha central do gráfico de controle e corresponde ao valor médio das vazões;  $\sigma$  = é o estimador do desvio-padrão populacional;

LIC = Limite Inferior de Controle.

Com os dados de vazão e do coeficiente de uniformidade de Christiansen dos ensaios de cada tratamento, calculou-se a razão de capacidade de processo estimada ( $\hat{C}_p$ ), utilizando-se as equações 4 e 5, e se elaboraram (Cpk e Cpl) gráficos para analisar a capacidade dos processos e sua centralidade  $\hat{C}_p$ .

$$\hat{C}_p = (LSE - LIE) * 6\bar{\sigma}^{-1} \quad (4)$$

$6\sigma$  é a capacidade do processo.

$$\bar{\sigma} = \bar{R}(d_2)^{-1} \quad (5)$$

Em que:

R ou MR = amplitude média;

$d_2$  = fator para a linha central;

$\hat{C}_p$  = é uma estimativa de  $C_p$ ;

LSE= Limite superior de especificação;

LSI= Limite inferior de especificação.

Lopes (2007) descreve que quando  $C_p < 1$ , a capacidade do processo é inadequada, sendo recomendada a realização do trabalho com um processo que seja mais adequado às especificações, se  $1 \leq C_p \leq 1,33$  a capacidade do processo está em torno da diferença entre as especificações; neste caso, é interessante a utilização de cartas de controle para manter o processo sob controle e se  $C_p > 1,33$ , a capacidade do processo é adequada à tolerância exigida. Se a capacidade do processo é menor que metade da tolerância, não é preciso tomar maiores cuidados com o processo, mas se pode dizer que o mesmo é excelente ou altamente confiável. Quando o processo se encontra estável aplica-se o  $C_{pk}$  (processos unilaterais) que é definido de acordo com as equações 6 e 7,  $C_{pk}$  equação 8, é o menor valor entre  $CP_S$  e  $CP_i$ .

$$CP_S = \frac{[LSE - \bar{x}]}{3\sigma} \quad (6)$$

$$CP_i = \frac{[LIE - \bar{x}]}{3\sigma} \quad (7)$$

$$Cpk = (CP_i; CP_S) \quad (8)$$

Em que:

$\bar{X}$  - média;

LSE= Limite superior de especificação;

LIE= Limite inferior de especificação;

$CP_i$ = Capacidade de processo do LIE;

$CP_S$  = Capacidade de processo do LSE.

A classificação do processo está descrita na Tabela 9, conforme Montgomery (2009).

Tabela 9 - Valores mínimos recomendados da razão da capacidade de processo ( $C_p$ ;  $C_{pk}$ ).

	Especificações unilaterais	Especificações bilaterais
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)

## 11. Resultados e Discussão

### 11.1. Testes de Normalidade

A maioria dos métodos estatísticos usuais parte da hipótese de que os dados apresentem distribuição de probabilidade Normal. Vasconcelos et al. (2013) afirmam, baseados nesta suposição de normalidade dos dados, que é de fundamental importância comprovar sua veracidade através de alguns testes não-paramétricos de normalidade, tais como: Kolmogorov-Smirnov, com a modificação de Lilliefors, Cramér-Von Mises, Anderson-Darling, Kuiper, Watson, Lilliefors e Shapiro-Wilk. O teste Kolmogorov-Smirnov, com a modificação de Lilliefors foi aplicado na avaliação dos parâmetros de vazão e coeficiente de uniformidade de Christiansen em gotejadores novos, com 210 e 350 horas de funcionamento em função da salinidade da água e pressão de serviço. A aplicação dos testes se deu através do Software Minitab 16. Os resultados da aplicação do teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov com a modificação de Lilliefors (Lilliefors, 1967), para a vazão e o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) e para gotejadores novos, se encontram na Tabela 10; segundo a análise dos resultados, apenas o parâmetro vazão para o tratamento S2 ( $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ ), ( $p > 0,10$ ) apresentou distribuição não normal.

Tabela 10 – Estatística descritiva dos parâmetros avaliados conforme teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, com a modificação de Lilliefors (1967) para vazão e coeficiente de uniformidade de Christiansen em gotejadores novos.

Parâmetro	Valor máximo	Valor mínimo	Média	Desvio padrão	CV	Normalidade			
						Valor	V Crit	P-Valor	Normal
<b>S1</b>									
<b>VAZÃO</b>	2,47	2,21	2,39	0,064	2,69	0,12	0,22	0,15	<b>Sim</b>
<b>CUC</b>	99,98	98,53	99,41	0,45	0,45	0,10	0,22	0,15	<b>Sim</b>
<b>S2</b>									
<b>VAZÃO</b>	3,64	2,21	2,93	0,32	13,29	0,42	0,22	0,01	<b>Não</b>
<b>CUC</b>	99,89	97	98,92	0,84	0,85	0,13	0,22	0,15	<b>Sim</b>
<b>S3</b>									
<b>VAZÃO</b>	2,45	2,21	2,33	0,07	3,17	0,15	0,22	0,15	<b>Sim</b>
<b>CUC</b>	99,94	97,47	99,20	0,65	0,66	0,13	0,22	0,15	<b>Sim</b>
<b>S4</b>									
<b>VAZÃO</b>	2,45	2,21	2,33	0,05	2,45	0,12	0,22	0,15	<b>Sim</b>
<b>CUC</b>	99,97	99,06	99,56	0,31	0,31	0,12	0,22	0,15	<b>Sim</b>
<b>S5</b>									
<b>VAZÃO</b>	2,45	2,21	2,33	0,06	2,57	0,19	0,22	0,10	<b>Sim</b>
<b>CUC</b>	99,98	98,75	99,49	0,40	0,40	0,12	0,22	0,15	<b>Sim</b>

Nota: p-valor : nível de significância observado. Vcrit: valor crítico

Para os gotejadores com 210 horas de funcionamento, os resultados da aplicação do teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov com a modificação de Lilliefors (Lilliefors, 1967), para a vazão e o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC)

se encontram na Tabela 11; segundo a análise dos resultados, somente o parâmetro vazão para o tratamento S1 ( $0,6 \text{ dS m}^{-1}$ ), ( $p > 0,10$ ) apresentou distribuição não normal.

Tabela 11 – Estatística descritiva dos parâmetros avaliados conforme teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, com a modificação de Lilliefors (1967) para vazão e coeficiente de uniformidade de Christiansen em gotejadores com 210 horas de funcionamento.

Parâmetro	Valor máximo	Valor mínimo	Média	Desvio padrão	CV	Normalidade				
						Valor	V Crit	P-Valor	Normal	
<b>S1</b>										
<b>VAZÃO</b>	2,51	2,03	2,27	0,15	6,85	0,25	0,22	0,01	<b>Não</b>	
<b>CUC</b>	99,71	96,02	98,45	1,03	1,05	0,13	0,22	0,15	<b>Sim</b>	
<b>S2</b>										
<b>VAZÃO</b>	2,10	1,99	2,06	0,02	1,44	0,09	0,22	0,15	<b>Sim</b>	
<b>CUC</b>	99,99	96,34	98,82	1,10	1,11	0,15	0,22	0,15	<b>Sim</b>	
<b>S3</b>										
<b>VAZÃO</b>	2,51	2,27	2,43	0,07	3,02	0,14	0,22	0,15	<b>Sim</b>	
<b>CUC</b>	99,82	98,46	99,16	0,45	0,45	0,14	0,22	0,15	<b>Sim</b>	
<b>S4</b>										
<b>VAZÃO</b>	2,57	2,03	2,27	0,15	6,65	0,15	0,22	0,15	<b>Sim</b>	
<b>CUC</b>	99,92	97,6	98,97	0,61	0,59	0,19	0,22	0,10	<b>Sim</b>	
<b>S5</b>										
<b>VAZÃO</b>	2,51	2,15	2,35	0,12	5,10	0,12	0,22	0,15	<b>Sim</b>	
<b>CUC</b>	99,64	96,96	98,79	0,72	0,73	0,12	0,22	0,15	<b>Sim</b>	

Nota: p-valor : nível de significância observado. Vcrit: valor crítico

Segundo as análises dos testes estatísticos de normalidade para a vazão e o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), só o parâmetro vazão para o tratamento S4 ( $3,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) apresentou distribuição não normal ( $p > 0,10$ ) Tabela 12.

Tabela 12 – Estatística descritiva dos parâmetros avaliados conforme teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov, com a modificação de Lilliefors (1967) para vazão e coeficiente de uniformidade de Christiansen em gotejadores com 350 horas de funcionamento

Parâmetro	Valor máximo	Valor mínimo	Média	Desvio padrão	CV	Normalidade				
						Valor	V Crit	P-Valor	Normal	
<b>S1</b>										
<b>VAZÃO</b>	2,57	2,09	2,32	0,14	6,42	0,13	0,22	0,15	<b>Sim</b>	
<b>CUC</b>	99,88	96,58	98,57	0,88	0,90	0,15	0,22	0,15	<b>Sim</b>	
<b>S2</b>										
<b>VAZÃO</b>	2,60	2,21	2,41	0,11	4,81	0,13	0,22	0,15	<b>Sim</b>	
<b>CUC</b>	99,93	90	97,71	2,25	2,30	0,19	0,22	0,10	<b>Sim</b>	
<b>S3</b>										
<b>VAZÃO</b>	2,63	2,27	2,47	0,10	4,16	0,09	0,22	0,15	<b>Sim</b>	
<b>CUC</b>	99,88	97,75	98,77	0,71	0,72	0,11	0,22	0,15	<b>Sim</b>	
<b>S4</b>										
<b>VAZÃO</b>	2,61	2,15	2,49	0,13	5,26	0,22	0,22	0,05	<b>Não</b>	
<b>CUC</b>	99,94	94,34	98,61	1,30	1,32	0,17	0,22	0,15	<b>Sim</b>	
<b>S5</b>										
<b>VAZÃO</b>	2,75	2,27	2,49	0,14	5,82	0,19	0,22	0,10	<b>Sim</b>	
<b>CUC</b>	99,69	97	98,53	0,81	0,82	0,08	0,22	0,15	<b>Sim</b>	

Nota: p-valor : nível de significância observado. Vcrit: valor crítico

## 11.2. Aplicação do controle estatístico da qualidade

Para controlar a qualidade Montgomery (2009) afirma serem imprescindíveis a identificação e a medição das variações ocorridas no processo por meio dos gráficos de controle, visto que as mesmas servem para determinar se essas variações são devidas a causas assinaláveis ou a causas aleatórias, razão pela qual foram construídos gráficos com os valores de vazão e coeficientes de uniformidade, objetivando-se avaliar a qualidade do sistema de irrigação por gotejamento.

O gráfico de controle de Shewhart para medidas individuais ao longo de 15 ensaios para avaliação dos emissores se encontra na (Figura 13). Observou-se que os ensaios para vazão dos gotejadores novos nos tratamentos S1 (0,6 dS m<sup>-1</sup>); S3 (2,5 dS m<sup>-1</sup>) e S5 (4,5 dS m<sup>-1</sup>) estão dentro dos limites de controle, ou seja, não apresentam variação  $> 3\sigma$  ou  $< 3\sigma$  que foram os limites estabelecidos para o processo, sendo o limite superior de controle LSC de aproximadamente (2,66 L h<sup>-1</sup>) e limite inferior de controle (2,09 L h<sup>-1</sup>), sob controle e a vazão distribuída próximo à linha média observada (2,3 L h<sup>-1</sup>) indicando, deste modo, que não houve qualquer fator particular de processo que promovesse um comportamento diferente do usual ou pudesse resultar em um deslocamento do nível de qualidade esperado. No tratamento S4 (3,5 dS m<sup>-1</sup>) o ensaio 2 está próximo do limite inferior de controle, ou seja, fora do controle estatístico, o que, segundo Werkema (1995) é um indicativo da falta de controle de um processo devido a causas especiais, em que a melhoria da qualidade pode, em grande parte, ser atingida através de ações locais que não envolvem investimentos significativos, isto é, existe um ponto em que precisa de manutenção para que o sistema de irrigação possa ser utilizado de forma eficiente.

Resultado semelhante foi encontrado por Juchen et al. (2013) estudando irrigação por gotejamento para a produção de alface fertirrigada com águas residuárias agroindustriais, cujos limites de controle da especificação (LCE) estiveram entre 6,069 Lh<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> para o limite inferior (LICE) e 8,058 Lh<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> para o limite superior (LSCE), observando-se, nos 4 tratamentos aplicados no trabalho, que as vazões se distribuem próximo da média de 7,063 Lh<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> enquanto para o S2 (1,5dS m<sup>-1</sup>) os pontos dos ensaios não tiveram distribuição normal e, desta forma, não foi possível obter um gráfico de controle com o mesmo.

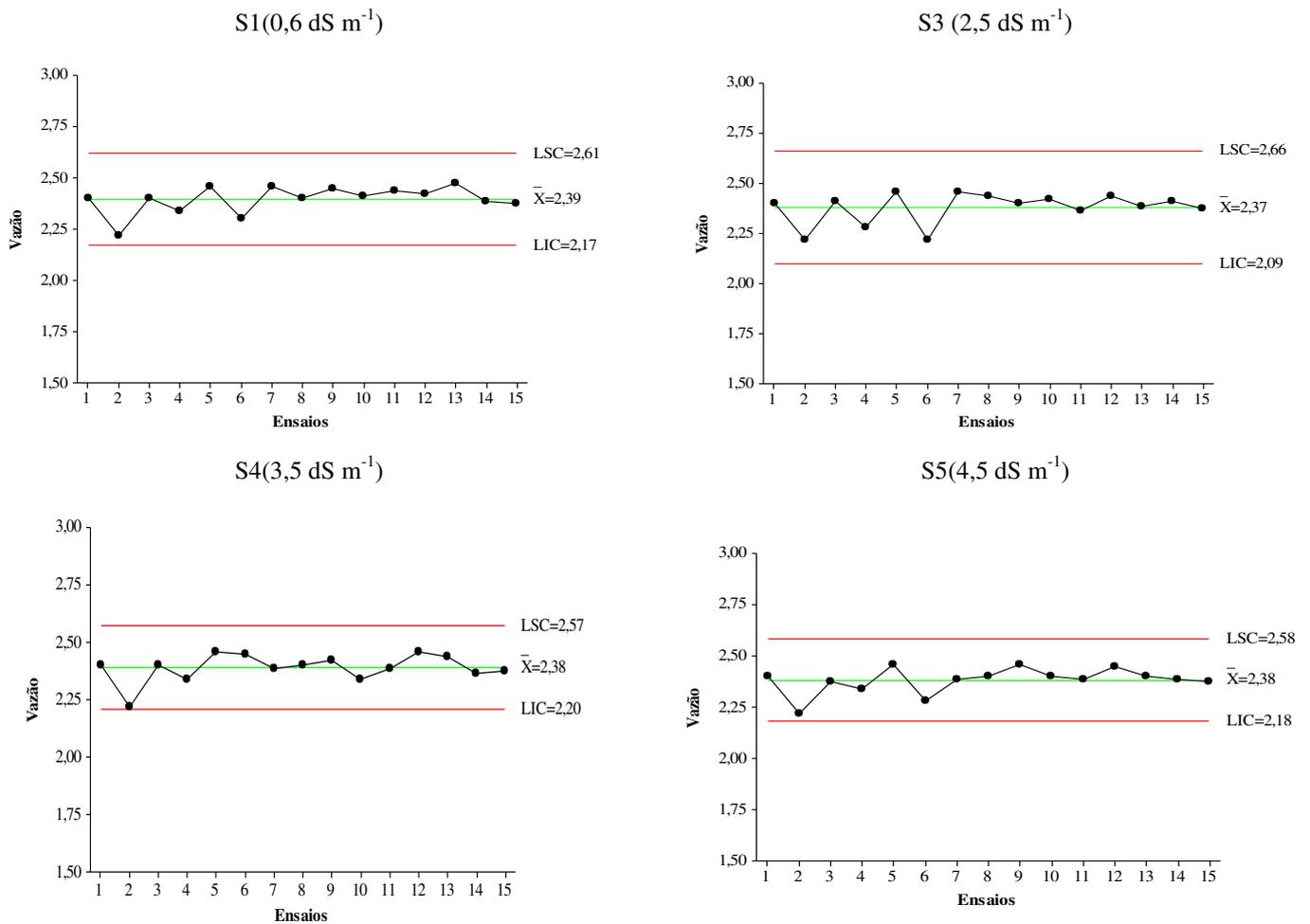


Figura 13 - Cartas de controle de medidas individuais para vazão nos quatro tratamentos salinos aplicados aos emissores novos.

A medida de vazão individual ao longo de 15 ensaios para gotejadores com 210 horas de funcionamento se encontra na (Figura 14). Observa-se que nos tratamentos S2 (1,5 dS m<sup>-1</sup>) e S4 (3,5 dS m<sup>-1</sup>) o ponto 14 e o ponto 1 se mantiveram, respectivamente, acima do limite superior de controle evidenciando que o processo está fora de controle e quando isto ocorre é sinal de que o mesmo está necessitando de correções para retornar o ao funcionamento correto mas este fato pode ter ocorrido em função de pequena desestabilização da pressão, acarretando em um ponto fora dos limites de controle.

Nos tratamentos S3 (2,5 dS m<sup>-1</sup>) e S5 (4,5 dS m<sup>-1</sup>), todos os dados de vazão se encontram dentro dos limites de controle e o tratamento S3 está sob controle porém no tratamento S5, do ensaio 8 ao 14 os dados representam uma sequência de pontos consecutivos aumentando; logo, tal processo foi considerado fora do controle estatístico de qualidade. Este fato indica a presença de causas especiais de controle, ou seja, representa um descontrole temporário do processo, possíveis de serem identificadas e corrigidas as causas e os efeitos que são facilmente identificáveis no nível do processo

por estarem relacionados à variação e ao tempo de funcionamento do equipamento e novos operadores, necessitando de ajuste para que o processo volte a funcionar corretamente (Werkema, 1995). Concordando com os valores encontrados por Tassaró (2012) estudando o Efeito da carga hidráulica na uniformidade da irrigação e fertirrigação em sistema de gotejamento com carga hidráulica de 1 m.

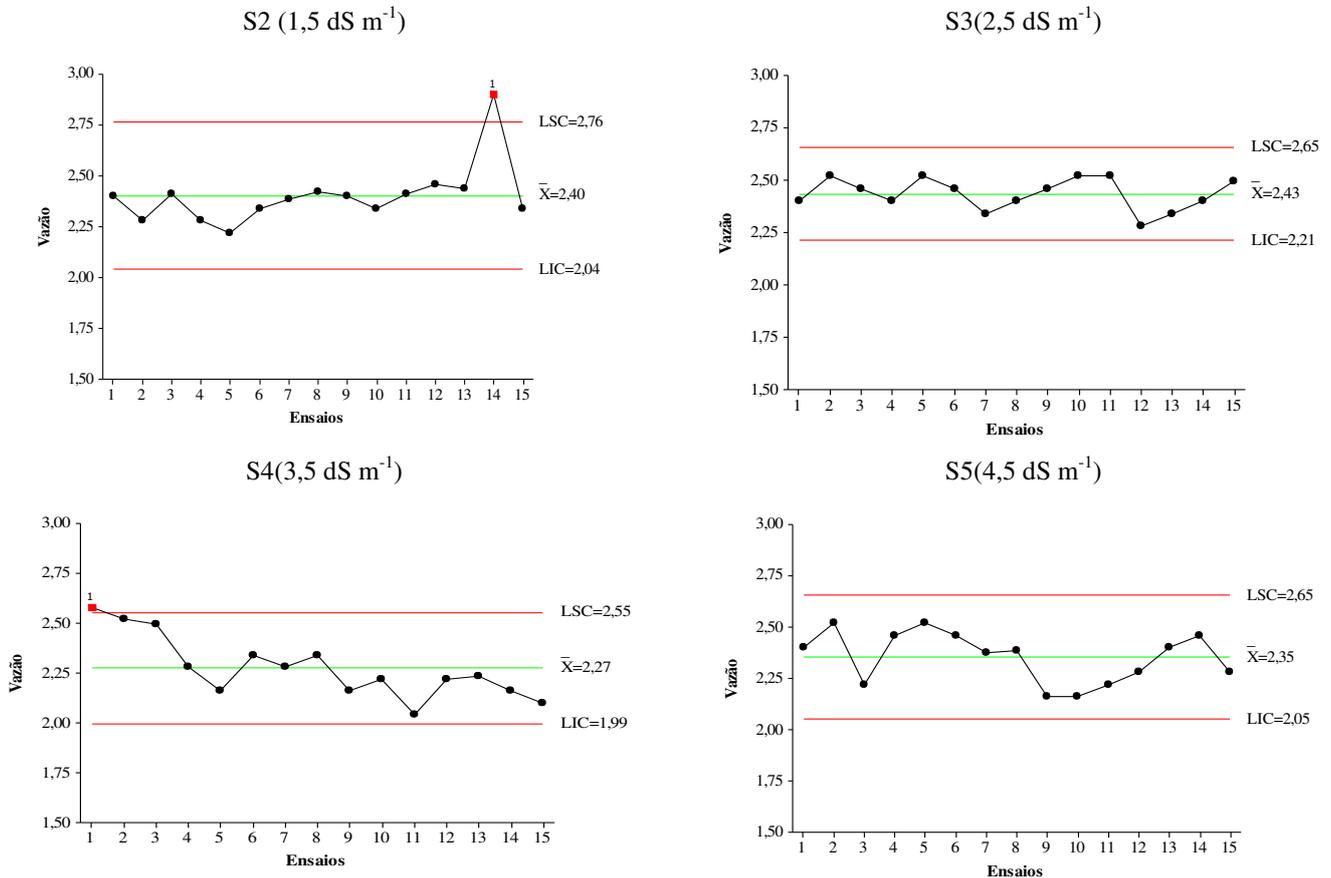


Figura 14 - Cartas de controle de medidas individuais para vazão nos quatro tratamentos salinos aplicados aos emissores com 210 horas de funcionamento.

Os dados coletados para elaboração das cartas de Shewart com 350 horas de funcionamento ao longo de 15 ensaios, se encontram na Figura 15. Observa-se que nos tratamentos S1 ( $0,6 \text{ dS m}^{-1}$ ) e S2 ( $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) os dados de vazão se mantêm dentro dos limites de controle mas para o tratamento S1( $0,6 \text{ dS m}^{-1}$ ) do ensaio 4 ao 8, os dados representam uma sequência acima da linha média e enquanto para o tratamento S2 ( $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) do ensaio 7 ao 11, os dados estão em uma sequência acima da linha média; logo, tais processo foram considerados como fora de controle estatístico de qualidade, tais observações que podem ser fruto de uma ou poucas causas associadas que produzem grandes variações no processo e ocorrem em decorrência de desvios do comportamento "normal" do processo e por falta de avaliação pontual concordando com os critérios preconizados por Werkema (1995), podendo acontecer devido a mudanças

nas condições de temperatura no interior da casa de vegetação ou mesmo por desestabilização da pressão fornecida ao sistema.

No tratamento S3 (2,5 dS m<sup>-1</sup>) observa-se que o ensaio 6 está acima do limite superior de controle e o ensaio 13 abaixo do limite inferior de controle fora, portanto, deste processo enquanto para o tratamento S5 (4,5 dS m<sup>-1</sup>) o ensaio 2 se encontra acima do limite superior de controle, semelhante ao tratamento S3 (2,5 dS m<sup>-1</sup>) cujo processo se mantém fora de controle. Essas variações no controle da irrigação poderão ser resultado de alguma variação no sistema de irrigação como oscilação na pressão de serviço dos emissores durante o funcionamento (Montgomery, 2009). Os pontos que estão abaixo do limite inferior do controle (LIC) recomendado, denunciam a existência de alguns problemas no processo e, no caso da avaliação da irrigação, podem ser explicados por alguns fatores, como variação da pressão do sistema, entupimentos, temperatura da água e diversos outros fatores, Ribeiro (2010).

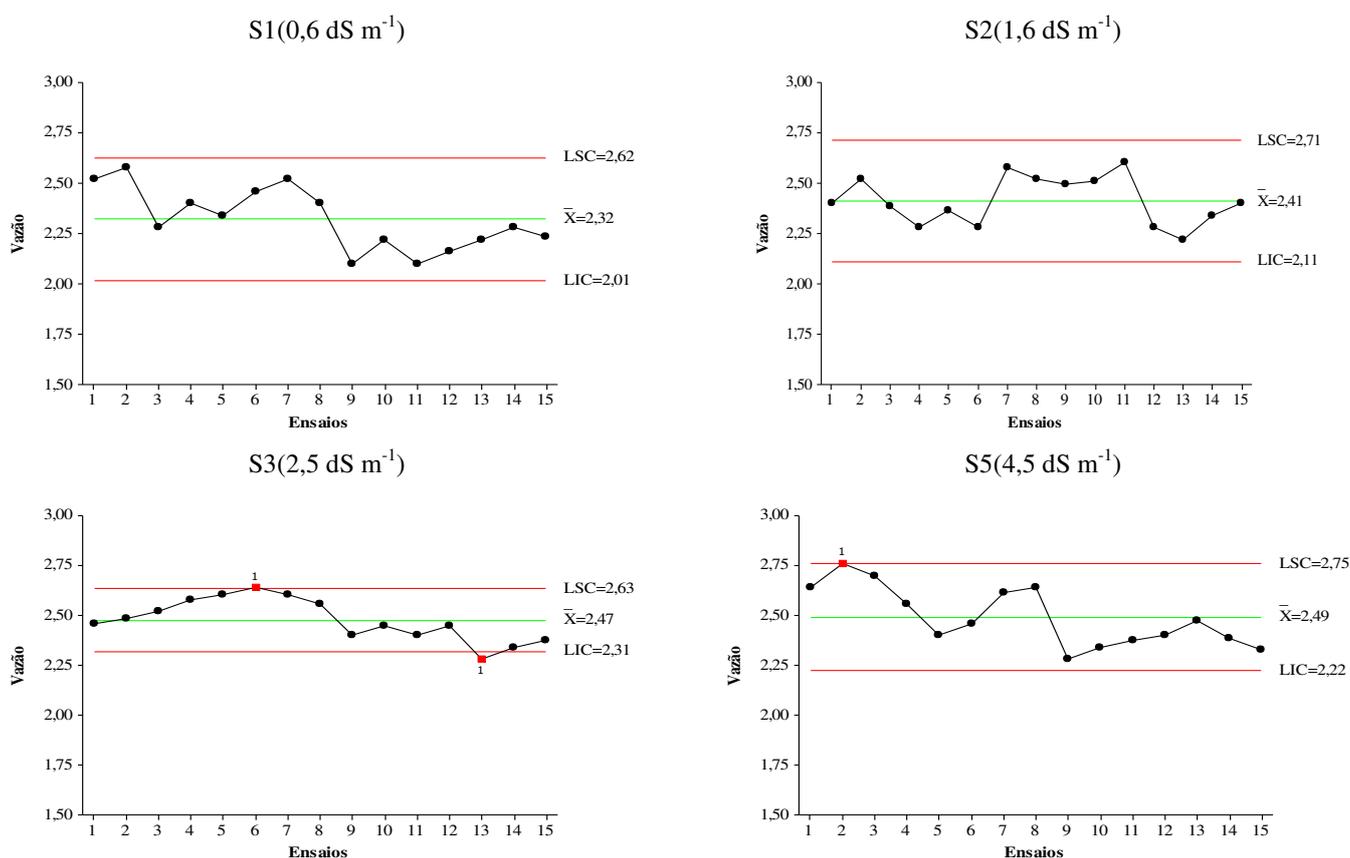


Figura 15- Cartas de controle de medidas individuais para vazão nos quatro tratamentos salinos aplicados aos emissores com 350 horas de funcionamento.

Na Figura 16 podem ser observados os resultados para as medidas individuais com distribuição dos 15 ensaios referentes ao coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC). Verifica-se, para os tratamentos S1 (0,6 dS m<sup>-1</sup>); S2 (1,5 dS m<sup>-1</sup>);

S4(3,5 dS m<sup>-1</sup>) e S5(4,5 dS m<sup>-1</sup>) que os resultados do CUC foram satisfatórios; apesar de alguns ensaios estarem muito próximos do LSC, a distribuição dos dados foi aleatória à linha média encontrando-se dentro dos limites de controle; entretanto, apenas os tratamentos S1 e S5 estão sob controle; o tratamento S2(1,5 dS m<sup>-1</sup>) apresenta, a partir do ensaio 4 até 9, pontos sequenciados, tal como o S4(3,5 dS m<sup>-1</sup>) que possui uma sequência não aleatória, do ponto 11 ao 15, Figura 16.

Ribeiro (2010) também observou, em seu estudo, a existência de uma configuração do tipo sequência de valores, como o decréscimo da irrigação 1 a 5. Ocorreu início de tendência, como os valores consecutivos abaixo da linha média do gráfico, que são as irrigações de 4 a 8 e outra na parte superior das irrigações de 12 a 17.

Para o tratamento S3(2,5 dS m<sup>-1</sup>) verifica-se que o ensaio 6 se encontra abaixo do limite inferior de controle (LIC = 97,54%) e que nenhum apresentou valor maior que o limite superior de controle (LSC = 100%) Figura 16; resultado semelhante foi encontrado por Hermes (2010) em seu trabalho sobre o efeito da carga hidráulica e qualidade da água na uniformidade de sistema de irrigação por gotejamento.

Observam-se, ainda, alguns indicativos de falta de controle no processo para os tratamentos S2(1,5 dS m<sup>-1</sup>); S3(2,5 dS m<sup>-1</sup>) e S4 (3,5 dS m<sup>-1</sup>) com a existência de sequências de valores consecutivos, tanto acima quanto abaixo da linha média, além da própria ocorrência de pontos fora dos limites de controle, Figura 16; ressalta-se, portanto, que todos os ensaios foram superiores a 90% indicando classificação excelente.

Justi et al. (2010) aplicaram carta de controle  $\bar{X}$  para o coeficiente de uniformidade de Christiansen em um sistema de irrigação por aspersão e observaram a existência de um ponto fora do limite superior de controle, sendo que, de maneira geral, o gráfico se portou de forma semelhante à descrita no presente estudo. Frigo (2012) afirma que valores acima do limite superior de controle devem ser considerados aceitáveis pois quanto maiores os valores dos coeficientes de avaliação melhor será a irrigação.

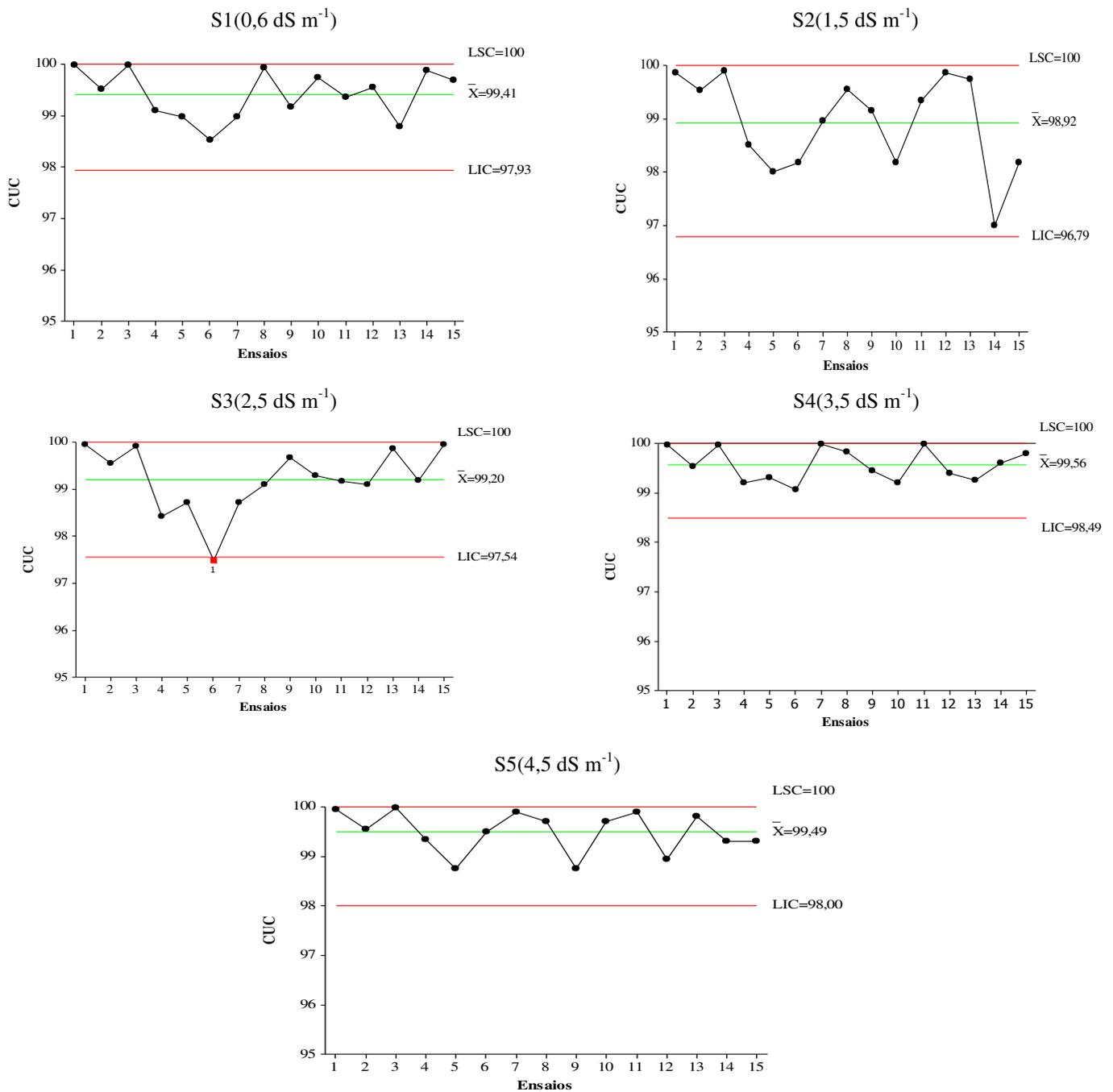


Figura 16 - Cartas de controle de médias individuais para coeficiente de uniformidade e Christiansen (CUC) em função da salinidade da água de irrigação em gotejadores novos.

A carta de Shewhart para medidas individuais com a distribuição dos 15 ensaios referentes ao coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) para cinco níveis de salinidade da água de irrigação com 210 horas de funcionamento, é apresentada na Figura 17. Verifica-se, para os tratamentos S1 (0,6 dS m<sup>-1</sup>); S3 (2,5 dS m<sup>-1</sup>); S4 (3,5 dS m<sup>-1</sup>) e S5 (4,5 dS m<sup>-1</sup>) que os pontos se acham dentro dos limites de controle e sob

controle sabendo-se, deste modo, que o processo está sob controle e os cálculos pertinentes ao manejo da irrigação se tornaram mais confiáveis.

Klein et al. (2012) evidenciaram, ao estudar gráficos de Shewhart no processo de aplicação de água de um sistema de irrigação familiar por gotejamento, que não houve ponto nenhum fora dos limites de controle, ou seja, o processo de aplicação de água manteve um padrão no decorrer das 25 avaliações. Os pontos ficaram bem próximos à linha central e só então as aplicações foram semelhantes, com baixa variabilidade entre si. Na nona avaliação existe um pico, porém a variação em relação à média central é de 2,7% sabendo-se que o processo está sob controle, o cálculo de tempo de irrigação se torna confiável.

Para o tratamento S2 ( $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) observa-se que os pontos 12 e 13 estão abaixo do limite inferior de controle (LIC = 96,63%), não apresentando valor maior que o limite superior de controle (LCL = 100%); concordando com os resultados encontrados por Hermes (2010) em seu estudo sobre efeito da carga hidráulica e qualidade de água na uniformidade de sistema de irrigação por gotejamento.

Friego (2012) evidenciou, estudando a aplicação do controle do processo da irrigação no sistema de aspersão convencional em Palotina-PR, que todos os ensaios se apresentaram dentro dos limites de controle, com exceção do ensaio 22 (CUC = 74,6%), que apresentou valor fora do limite inferior calculado para o coeficiente.

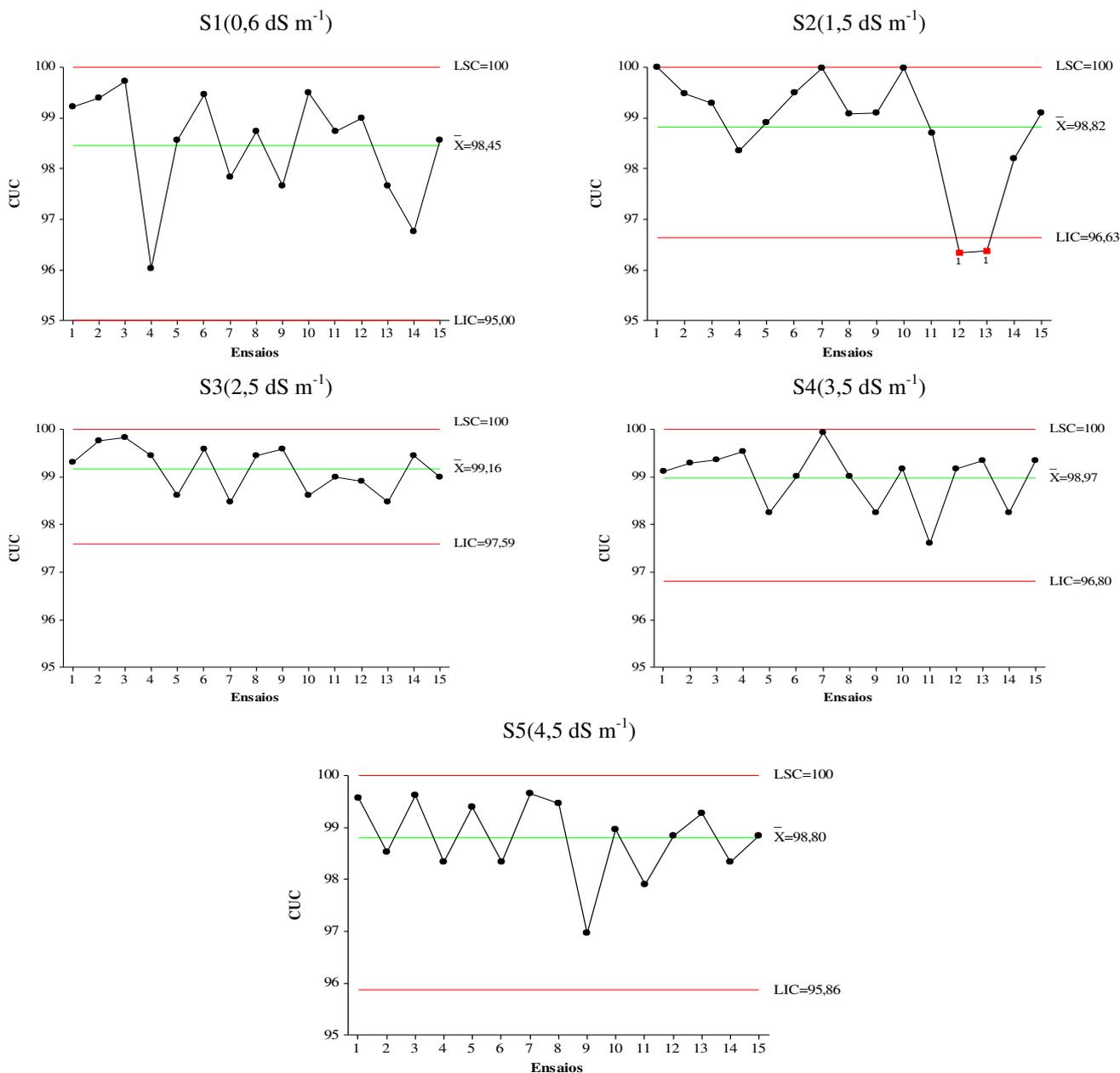


Figura 17- Cartas de controle de médias individuais para coeficiente de uniformidade e Christiansen (CUC) em função da salinidade da água de irrigação em gotejadores com 210 horas de funcionamento

O gráfico de controle para o CUC em 15 ensaios de irrigação com cinco níveis de salinidade da água com 350 horas de funcionamento, se encontra na Figura 18. Nota-se que S1; S3 e S5 estiveram entre aproximadamente 95% para o limite inferior (LIC) e 100% para o limite superior (LSC) observando-se, nos 3 tratamentos, que o CUC se distribui próximo da média de 98% enquanto os tratamentos S1 e S3 estão sob controle.

Juchen et al. (2013) também constataram o mesmo efeito estudando o controle de qualidade na irrigação por gotejamento para a produção de alface fertirrigada com águas

residuárias agroindustriais porém no tratamento S5 observou-se a existência de uma configuração do tipo sequência de valores, como o acréscimo do coeficiente de uniformidade de Christiansen 9 a 13, concordando com Ribeiro (2010) que constatou haver existência de uma configuração do tipo sequência de valores, como o decréscimo da irrigação do ponto 1 ao 5, início de tendência, como os valores consecutivos abaixo da linha média do gráfico, que são as irrigações de 4 a 8 e outra na parte superior, das irrigações de 12 a 17.

Para Gonçalves & Antoniassi (2010), a estimativa de incerteza é um termo que se deve ter e manter sob controle estatístico, pois uma pesquisa realizada por um laboratório de ensaios pode voltar-se apenas ao que se refere as causas específicas ou aleatórias enquanto as alterações significativas do objeto analisado geralmente ocorrem nas incertezas.

Nos tratamentos S2 ( $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) e S4 ( $3,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) observou-se a existência de uma configuração do tipo sequência de valores que também possuem pontos fora do limite inferior de controle (LIC = 98,46% e 95,82%, respectivamente). Quando se observa algum ponto fora dos limites de controle e principalmente quando o ponto se situa abaixo do limite inferior de controle, indica que este deve merecer especial atenção e ser investigado (Jacobi et al., 2002). Para Souza et al. (2008), um processo está fora de controle quando um ou mais pontos se situam fora dos limites, sob a configuração aleatória ou quando há configurações especiais com pontos dentro ou fora dos limites de controle.

Neste contexto, a utilização de métodos estatísticos não garante a solução de todos os problemas de um processo, porém é uma maneira racional, lógica e organizada e de se determinar onde estão os problemas e de se encontrar meios para solucioná-los. Esses métodos podem ajudar na obtenção de sistemas que assegurem uma melhoria contínua da qualidade e da produtividade, ao mesmo tempo (Lima et al., 2006).

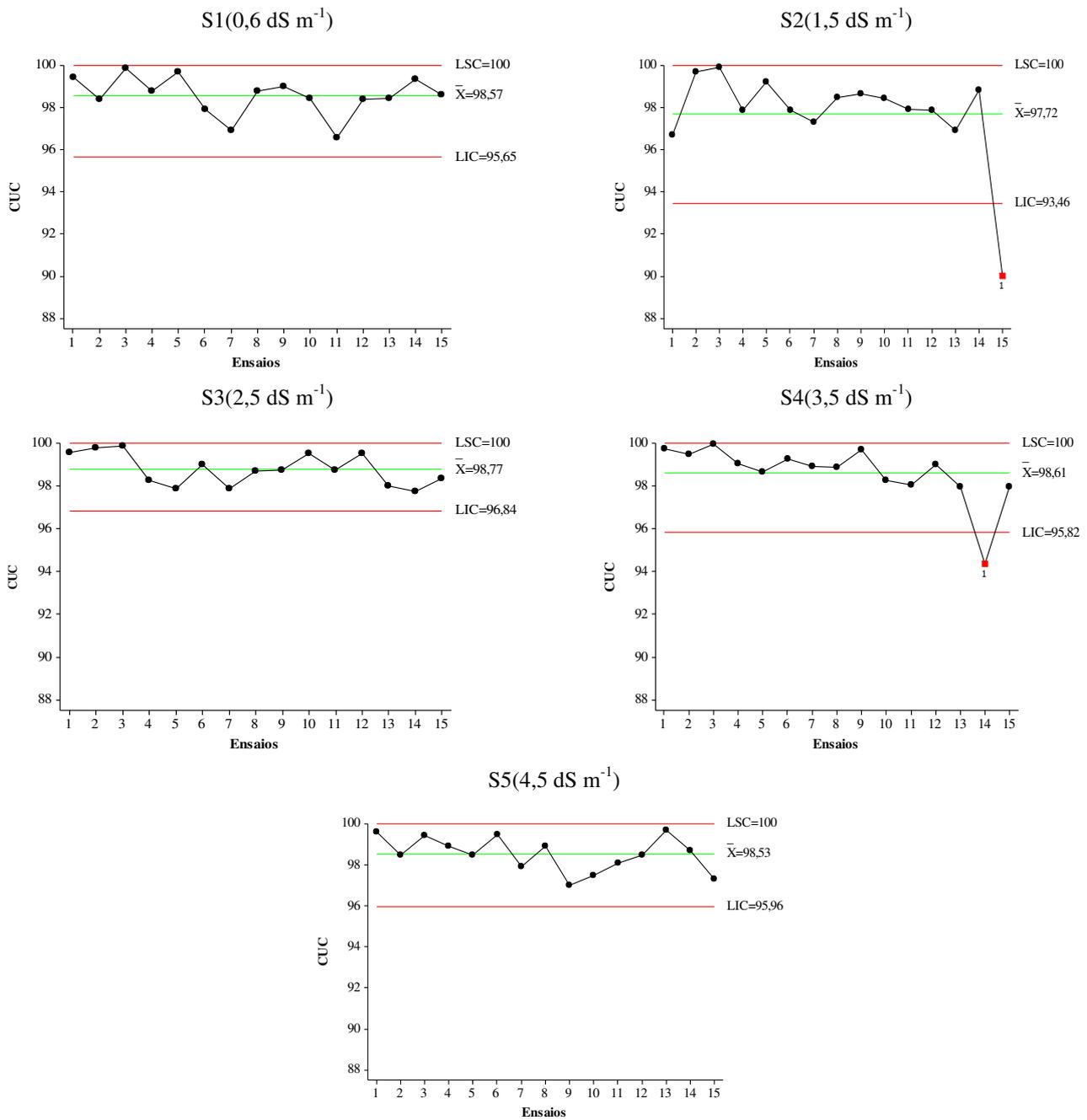


Figura 18 - Cartas de controle de médias individuais para coeficiente de uniformidade e Christiansen (CUC) em função da salinidade da água de irrigação em gotejadores com 350 horas de funcionamento

### 11.3. Índice de capacidade de processo

Sabendo-se que o índice de capacidade de processo é a resposta de quanto o processo está operando dentro dos limites fornecidos de especificação tem-se, na sequência, uma avaliação do sistema baseada nos valores obtidos de vazão e nos coeficientes uniformidade de Christiansen (CUC).

Segundo Frizzone et al.(1998) como a variação de vazão tem distribuição normal, é possível utilizar conceitos estatísticos para se fazer análises quantitativas e, assim, observar a qualidade da irrigação.

Os histogramas com curva normal para avaliar a capacidade de processo ( $C_p$ ) e a sua centralidade ( $C_{pk}$ ) para a vazão dos gotejadores novos submetidos a cinco níveis de salinidade da água de irrigação, se encontram na Figura 19. Verifica-se, para os tratamentos em que a curva de vazão foi normal S1 ( $0,6 \text{ dS m}^{-1}$ ); S3 ( $2,5 \text{ dS m}^{-1}$ ); S4 ( $3,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) e S5 ( $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) que os valores superaram o de referência, de 1,33 indicando que as águas de diferentes concentrações salinas aplicadas aos gotejadores conseguem manter o processo sob controle.

Ao observar a centralidade do processo apenas o tratamento S3 ( $2,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) se manteve centrado, não fugindo da especificação estabelecida (5 a 10%) e, assim, o valor de  $C_{pk} = 1,35$  está próximo de  $C_p = 1,68$ ; segundo Montgomery (2009), quanto mais próximo  $C_p$  de  $C_{pk}$  mais centrado está o processo.

Ao analisar a capacidade de processo ( $C_p$ ) observa-se que os tratamentos são capazes, tendo em vista que o valor ideal, segundo Montgomery (2009) deve ser maior que 1,50 para materiais novos, caso deste experimento. De acordo com Ribeiro (2010) a vazão média das irrigações tem alto potencial para o processo com baixa variação em referência à faixa dos limites de especificações e o índice de capacidade de processo é capaz, com  $C_{pk}$  de 1,59 atendendo às exigências em que o LIE foi a vazão nominal do sistema de avaliado.

Resultados quanto à viabilidade da utilização do controle de qualidade foram encontrados por Chen et al. (2007) que afirmaram, após estudar a capacidade do processo para medidas unilaterais, que este índice, utilizando gráficos de controle, pode ser usado não apenas para monitorar a estabilidade do processo mas também para monitorar sua qualidade, acompanhando índices de especificação e avaliando sua estabilidade.

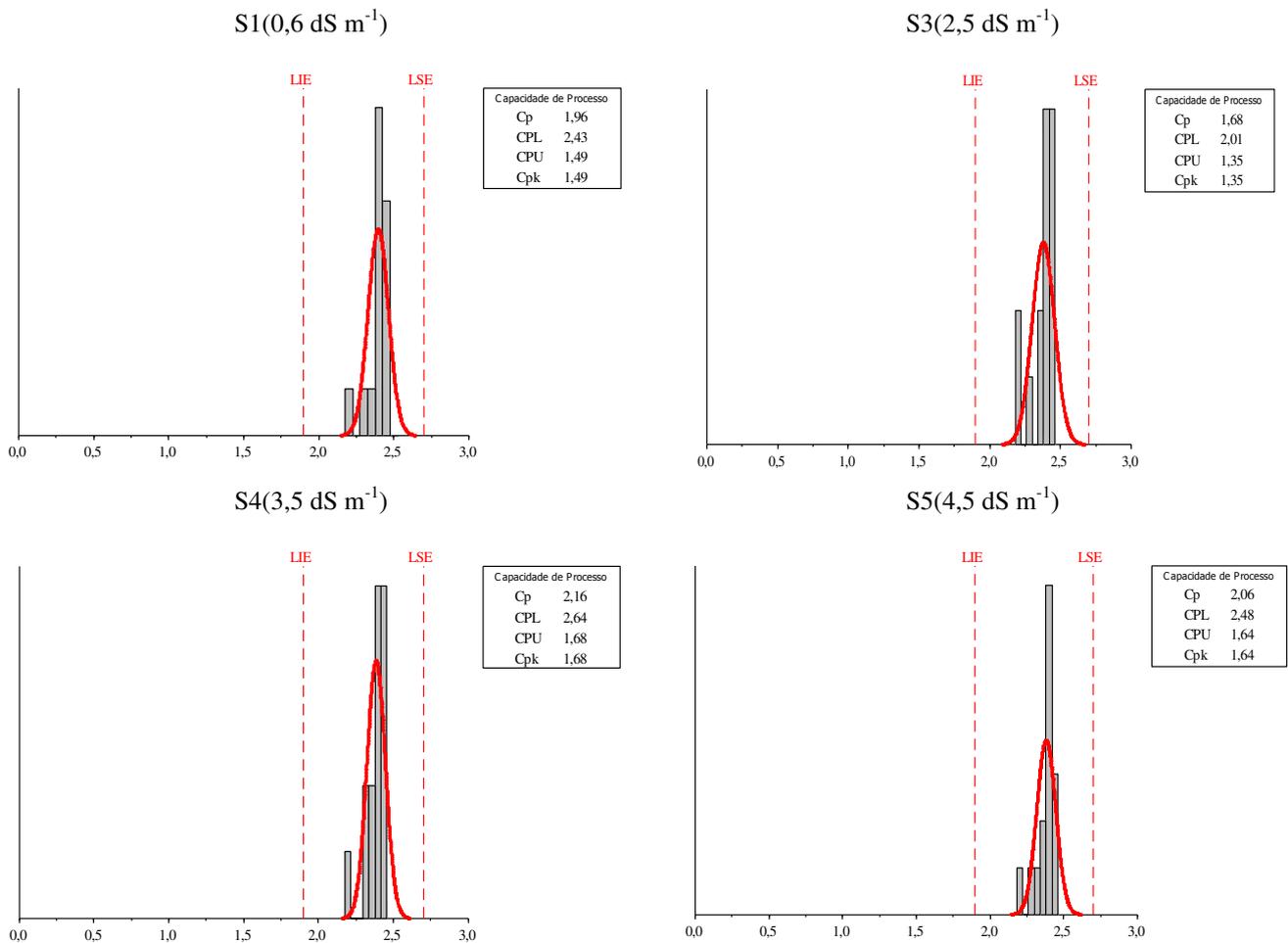


Figura 19 - Histogramas da Capacidade de processo (Cp) e sua centralidade (Cpk) para vazão de gotejadores submetidos a águas de diferentes concentrações salinas quando novo.

Para os gotejadores com 210 horas de funcionamento, o índice de capacidade de processo se encontra, em função da salinidade da água de irrigação, na (Figura 20); observa-se que para os tratamentos S2 (1,5 dS m<sup>-1</sup>) e S4 (1,5 dS m<sup>-1</sup>) o processo foi considerado incapaz uma vez que os valores de Cp e Cpk estão abaixo dos valores mínimos recomendados. Lopes (2007) descreve que quando  $Cp < 1$  a capacidade do processo é inadequada, mas recomendada a realização do trabalho com LIE um processo que seja mais adequado às especificações. Para Montgomery (2009) quando os Cp e Cpk são menores que 1, os processos são classificados incapazes.

Souza et al. (2007) observaram, utilizando os dados de uma indústria de fundição pelo índice de capacidade de processo, que este era incapaz, concordando com o presente trabalho, visto que o valor calculado ficou abaixo de 1; os autores concluíram, então, que o processo esteve, durante a maior parte do tempo, em controle,

porém se mostrou incapaz produzindo uma quantidade significativa de itens defeituosos.

O tratamento S3 ( $2,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) foi considerado capaz ou adequado, de vez que o  $C_p$  foi superior a 1,33 e quando se observou o índice de centralidade este  $C_{pk}$  também foi considerado aceitável. Em contrapartida, o tratamento S5 ( $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) evidenciou que o  $C_p$  foi classificado aceitável pois, segundo Lopes (2007) quando o  $1 \leq C_p < 1,33$  o processo também é considerado aceitável; entretanto, quando se observa o  $C_{pk}$ , ele está abaixo dos recomendados como aceitáveis, variando em relação à média não centralizada.

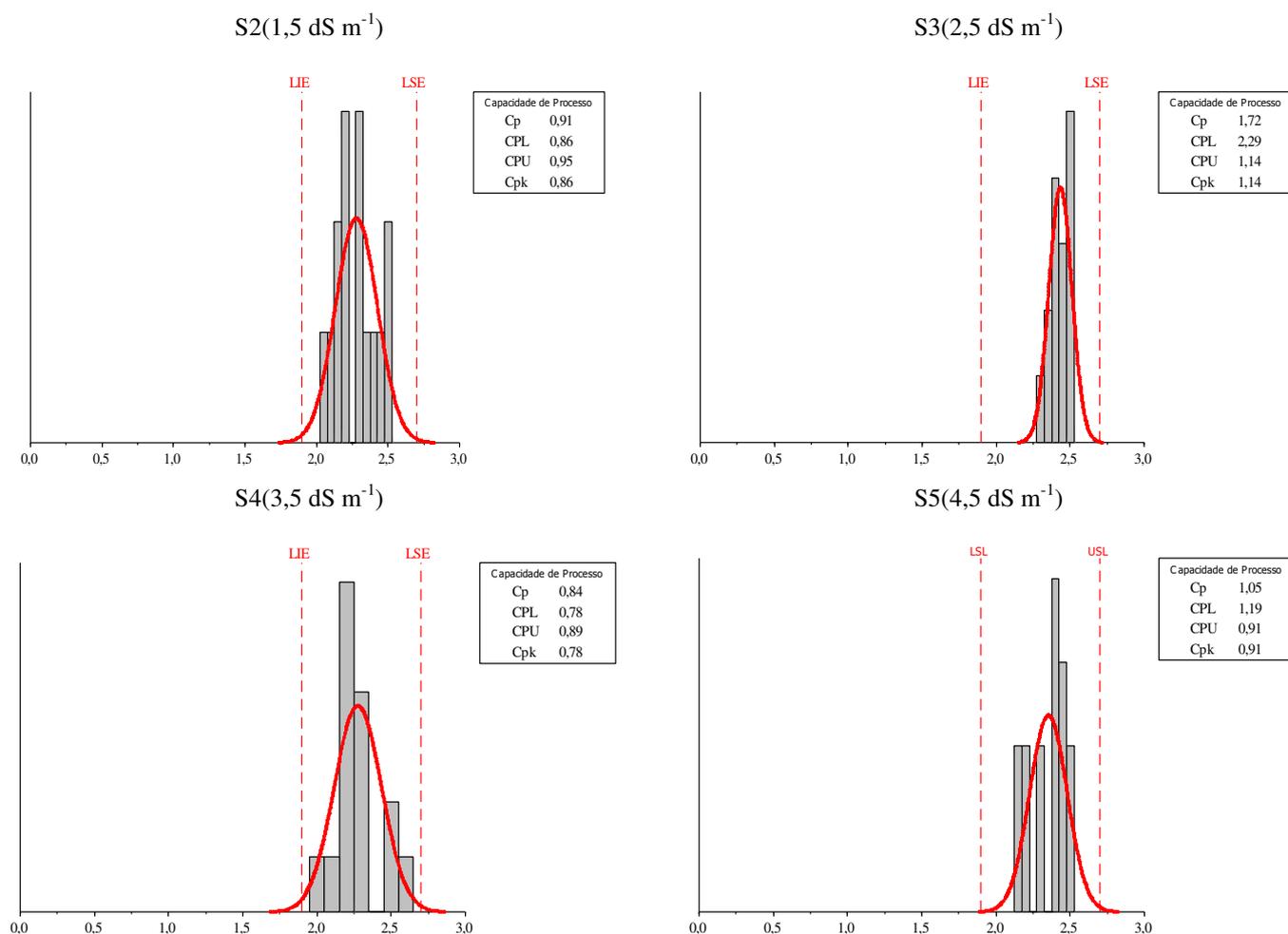


Figura 20 - Histogramas da Capacidade de processo ( $C_p$ ) e sua centralidade ( $C_{pk}$ ) para vazão de gotejadores submetidos a águas de diferentes concentrações salinas com 210 horas de funcionamento.

O índice de capacidade de processo para a vazão com 350 horas de funcionamento em função dos tratamentos salinos aplicados aos gotejadores, encontra-se na Figura 21; verifica-se que os tratamentos S1 ( $0,6 \text{ dS m}^{-1}$ ); S2 ( $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) e S5 ( $4,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) foram classificados incapazes, haja vista que os índices  $C_p$  e  $C_{pk}$  estão abaixo das recomendações para um processo ser considerado capaz, Figura 21. Justi et al. (2010)

empregaram o índice de capacidade de processo ( $C_p$ ) para avaliar um sistema de irrigação por aspersão e concluíram que  $C_p$  é diretamente proporcional ao aumento da uniformidade de distribuição, tanto quanto capaz de diagnosticar o controle da irrigação dentro de níveis aceitáveis, enquanto para o tratamento S3 ( $2,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) como observado para as avaliações quando os gotejadores estavam novos, com 210 e 350 horas de funcionamento, o processo foi classificado capaz pelo  $C_p$ , porém para o  $C_{pk}$  não apresenta boa centralidade, Figura 21; o índice de capacidade de processo (ICP) é um parâmetro adimensional que, indiretamente, mede o quanto o processo consegue atender às especificações, ou seja, quanto o sistema de irrigação está operando de forma eficiente sendo que, quanto maior seu valor melhor o processo consegue atender às exigências (Costa et al. 2004). Segundo Werkema (1995), um processo pode não ser capaz por apresentar elevada variabilidade ou a média estar deslocada em relação ao ponto médio dos limites de especificação.

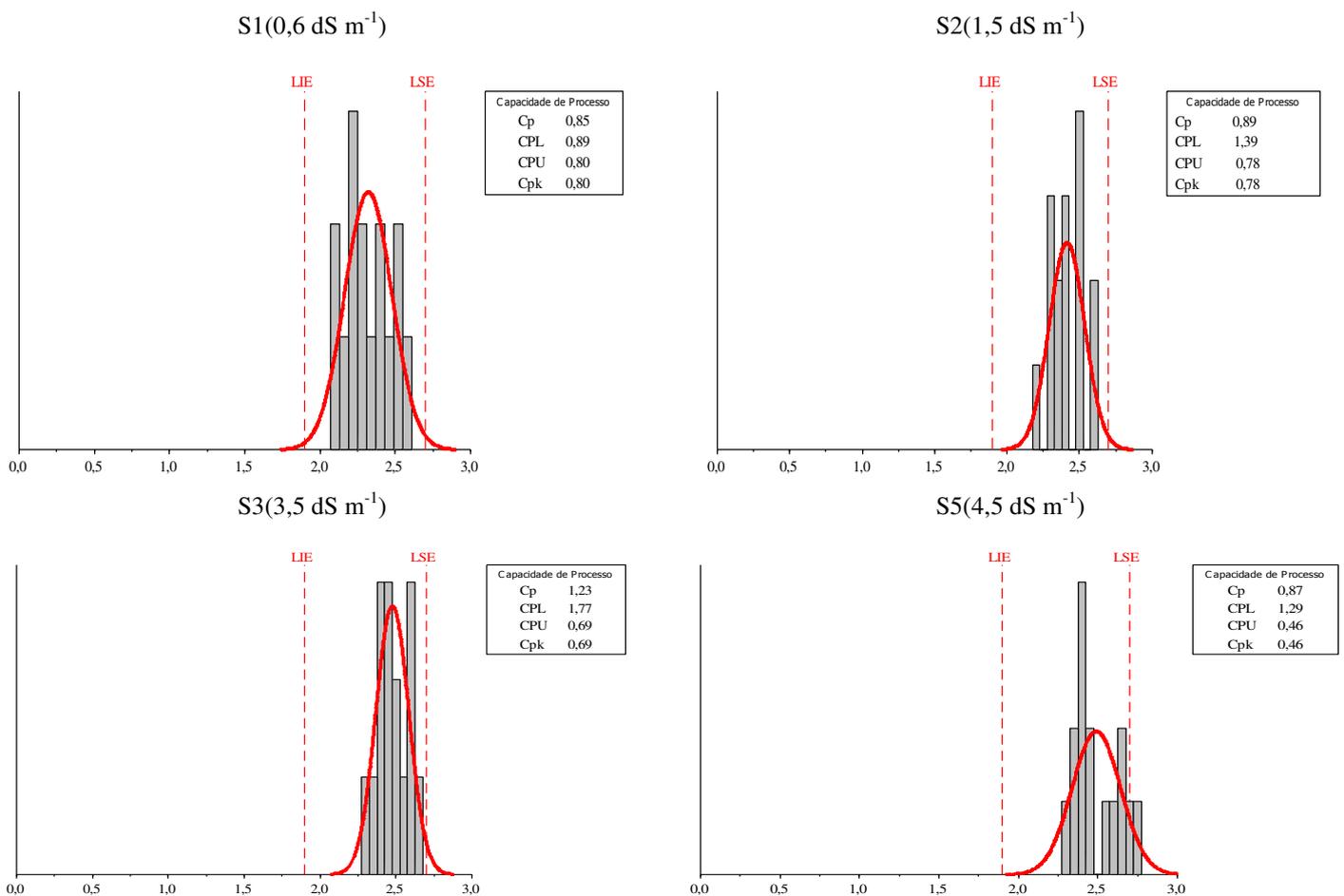


Figura 21 - Histogramas da Capacidade de processo ( $C_p$ ) e sua centralidade ( $C_{pk}$ ) para vazão de gotejadores submetidos a água de diferentes concentrações salinas, com 350 horas de funcionamento.

Para avaliar a capacidade e a centralidade de processo de uniformidade de Christiansen utilizou-se, nos gráficos, a equação que considera apenas a existência do limite Inferior de Especificação (LIE) de 90% para os gotejadores novos utilizando água salina (Figura 22). Observa-se, para os gotejadores que, quando novos, todos os tratamentos S1 (0,6 dS m<sup>-1</sup>); S2 (1,5 dS m<sup>-1</sup>); S3 (2,5 dS m<sup>-1</sup>); S4 (3,5 dS m<sup>-1</sup>) e S5 (4,5 dS m<sup>-1</sup>), evidenciaram índices acima dos valores mínimos aceitáveis, Figura 22; os valores de Cpl são iguais aos de Cpk, uma vez que o limite inferior de especificação é o que interessa para determinar o valor mínimo do processo.

Pode-se dizer, ainda, que o sistema de gotejamento possui excelente capacidade de processo, visto que seu valor é superior ao proposto por Montgomery (2009) para possui esta classificação, ou seja, os valores de Cpk são maiores que 1,60, para processo unilateral, isto é, que é usado apenas um limite de especificação; logo, o funcionamento do sistema, quando novo, pelos diferentes tratamentos, tem excelente capacidade de processo pelos dados de CUC.

Quanto aos valores de Cpl, Montgomery (2009) afirmou que para considerar processos novos aceitáveis o valor mínimo do índice de capacidade do processo (Cpl) deve ser 1,60; o sistema estudado obteve índices acima de 2,00, sendo um sistema novo, em seu primeiro ano de uso. Justi et al. (2010) também obtiveram, para um CUC entre 70 e 75%, o índice de capacidade do processo igual a 2,26, para CUC; entre 75 e 80% o índice de capacidade do processo foi de 2,97 e para um CUC, maior que 80%, um índice de capacidade do processo de 3,00 indicando que os sistemas de irrigação podem ser controlados eficazmente empregando-se a metodologia de Controle Estatístico de Processos, concordando com os resultados do presente trabalho.

Tassaró (2012) determinou os valores de capacidade de processo para o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), ao levar em consideração o limite inferior de especificação (LIE) como o valor de CUC igual a 90% e que, segundo Mantovani & Ramos (1994), o sistema é considerado aceitável; verificou-se, também, que o Cpk com LIE era igual ao CUC de 80%; de acordo com Bernardo et al. (2009), este é o valor para se considerar o sistema aceitável.

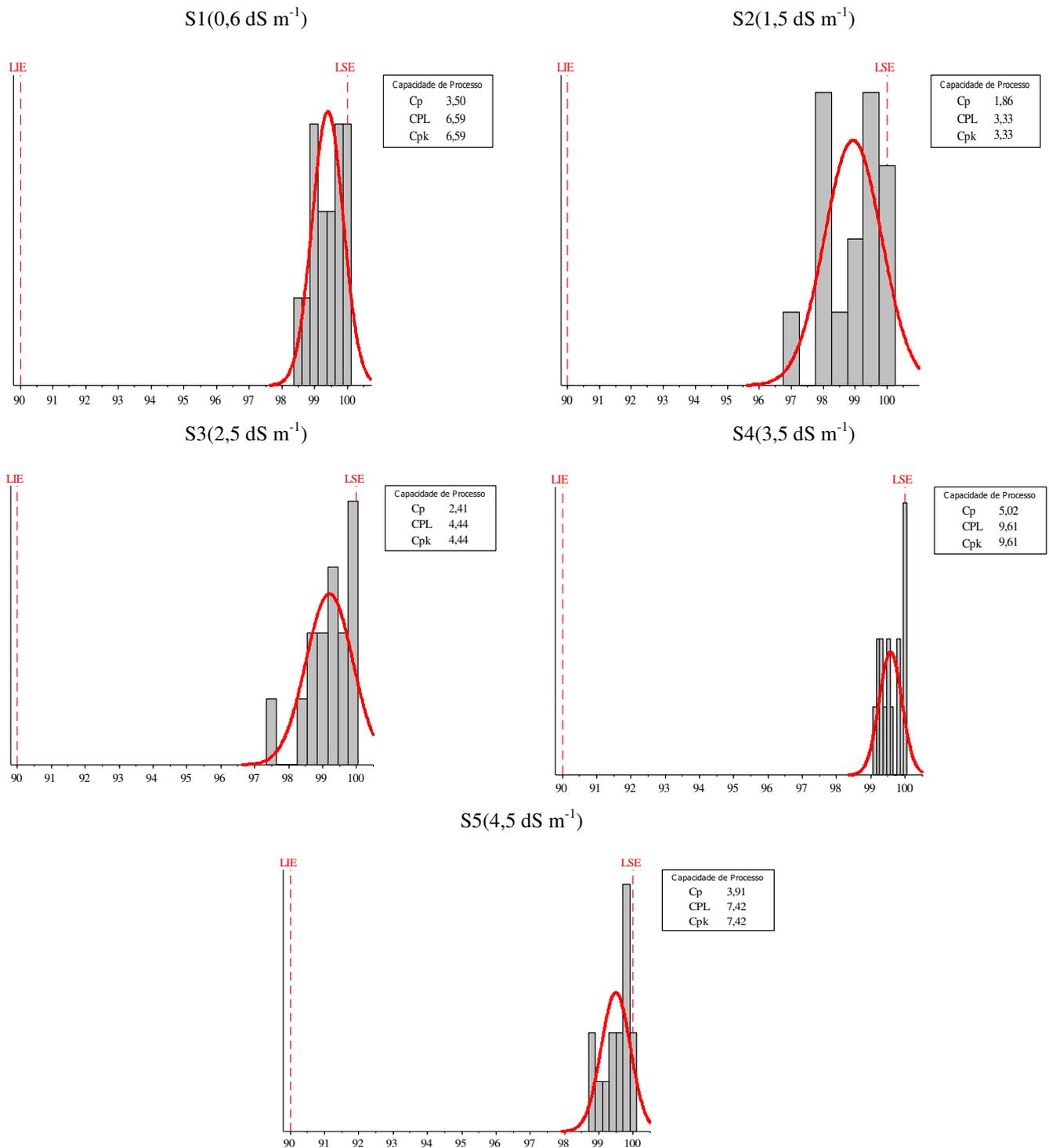


Figura 22 - Histogramas da Capacidade de processo (Cp) e sua centralidade (Cpk) para coeficiente de uniformidade de Christiansen com água de diferentes concentrações salinas para emissores novos.

O Histograma da Capacidade de processo (Cp) e sua centralidade (Cpk) para coeficiente de uniformidade de Christiansen com água de diferentes concentrações salinas para gotejadores com 210 horas de funcionamento, são apresentados na Figura 23, que também leva, em consideração, apenas o limite inferior de especificação (90%).

Para este caso foram utilizados, visando ao seu efeito de cálculo os critérios de classificação, segundo a norma da ASAE (1996). Conforme Zocoler (2005), estima-se que em sistemas por gotejamento o ideal é que a uniformidade alcance valores de CUC superiores a 90%.

Pode-se observa, na Figura 23, que nos cinco tratamentos salinos utilizados, mesmo com 210 horas de funcionamento, o Cpk foi considerado excelente, independente do tratamento salino aplicado. O coeficiente de uniformidade de Christiansen evidenciou, em todos os tratamentos estudados, que  $C_{pk} > C_p$ , implica em que os processos estão dentro do ponto de especificação e a distribuição está centrada (Montgomery, 2009).

De acordo com Tassaró (2012) analisa-se também que, quando o critério de especificação foi reduzido de 90% para 80%, os valores de Cpk aumentaram, ou seja, quanto menor a exigência do fabricante melhor vai ser a capacidade do processo em trabalhar dentro das especificações. Em sistemas de gotejamento de baixo custo, com operação a baixas pressões, determinou-se o índice de capacidade de processo aceitável para dados de CUC e se notou um acréscimo do valor de Cpk quando o critério passou de 90% para 80% (Hermes, 2010).

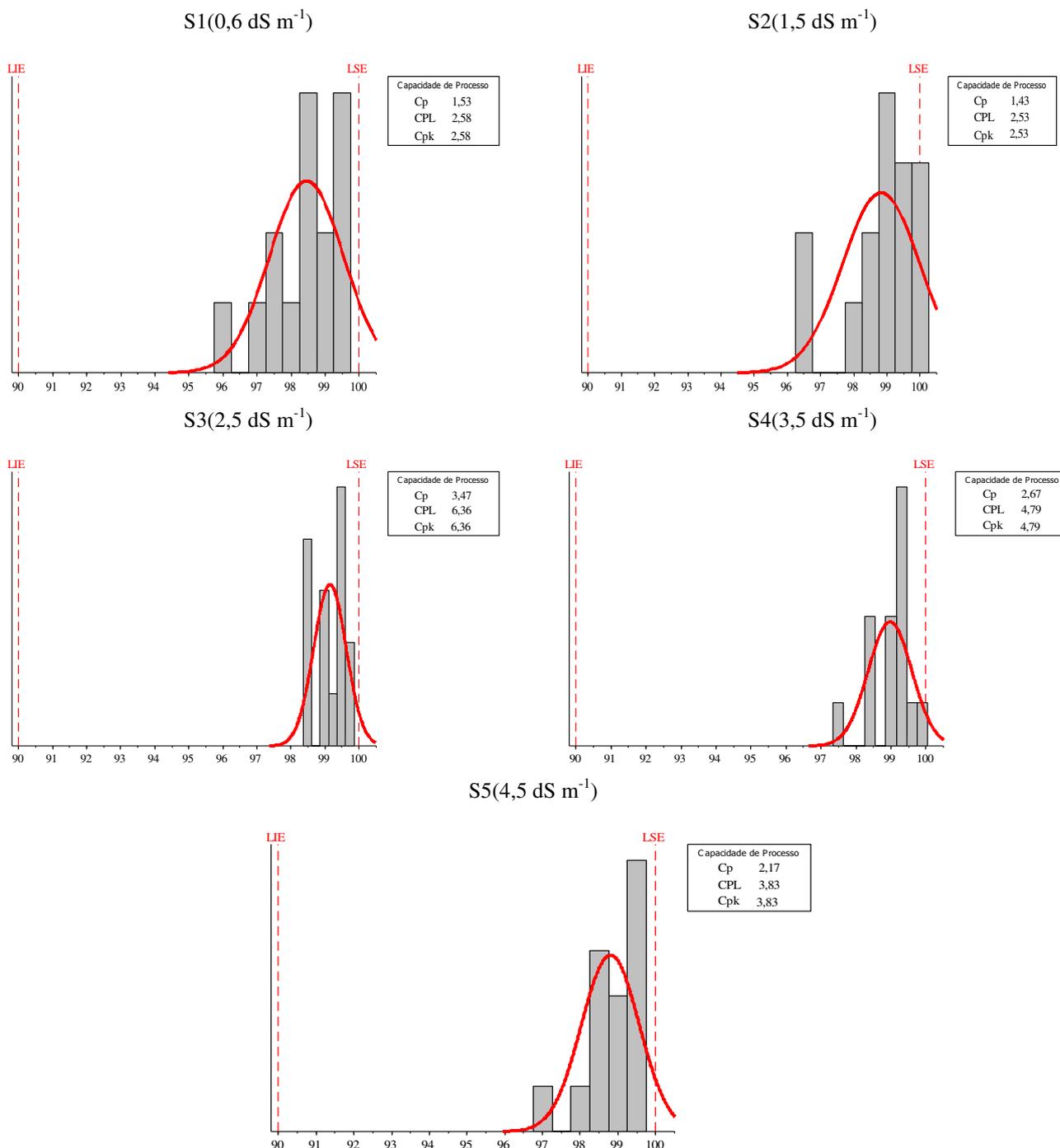


Figura 23 - Histogramas da Capacidade de processo (Cp) e sua centralidade (Cpk) para coeficiente de uniformidade de Christiansen com água de diferentes concentrações salinas para emissores com 210 horas de funcionamento.

Verificou-se, na Figura 24, o índice de capacidade de processo para o coeficiente de uniformidade de Christiansen com 350 horas de funcionamento e que o Cpk foi superior ao Cp, determinando que os processos estão dentro do ponto de especificação e a distribuição está centrada. Para tanto observa-se, ainda, que os índices observados são inferiores comparados aos obtidos quando os gotejadores eram novos e com 210 horas de funcionamento concluindo que, com o passar do tempo, os gotejadores estão ficando

mais próximos dos índices considerados razoavelmente aceitáveis; ao analisar a capacidade de processo ( $C_p$ ) constata-se que os tratamentos S1; S3 e S5 são capazes pois o valor ideal, segundo Montgomery (2004) deve ser maior que 1,50.

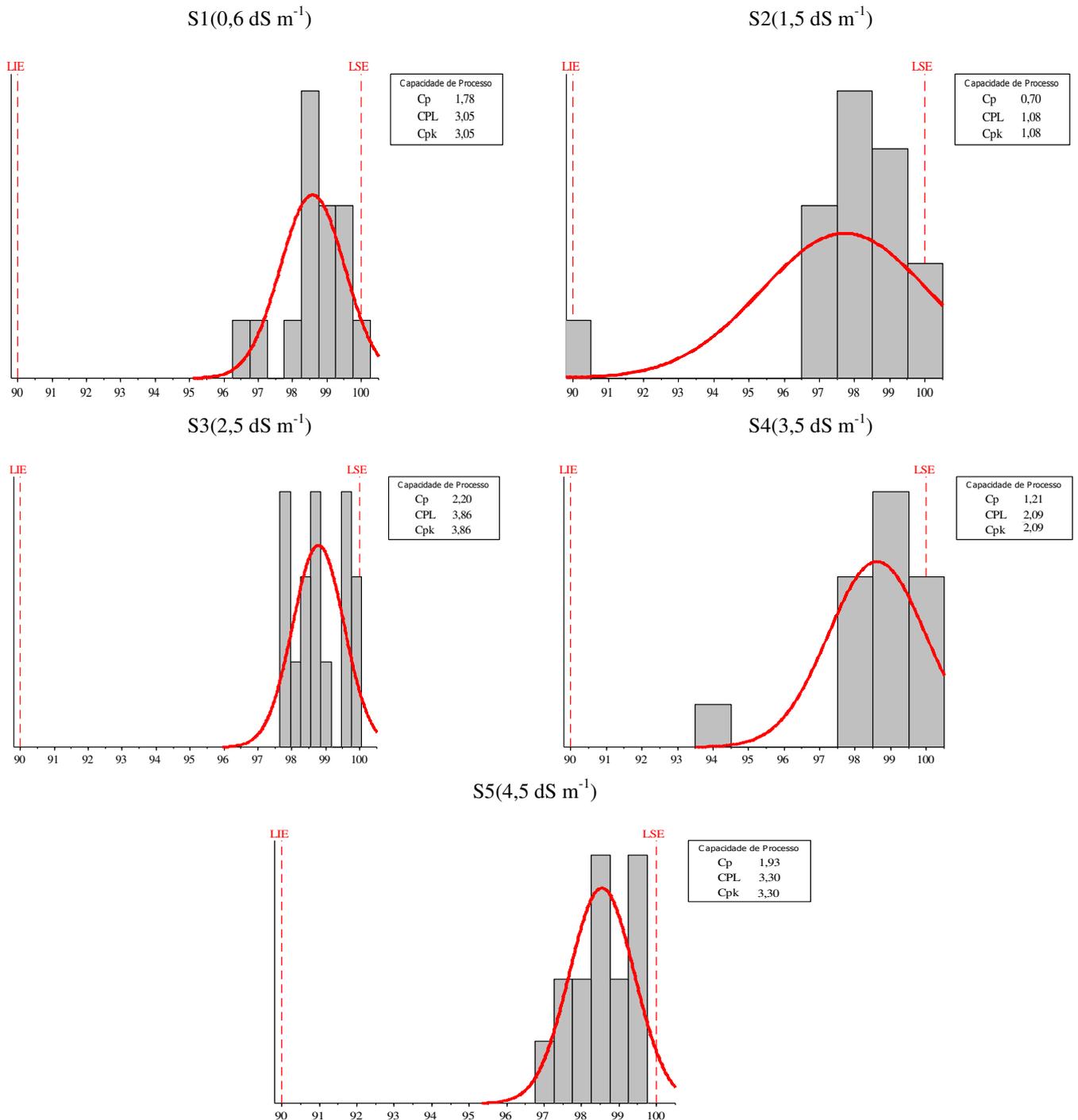


Figura 24 - Histogramas da Capacidade de processo ( $C_p$ ) e sua centralidade ( $C_{pk}$ ) para coeficiente de uniformidade de Christiansen com água de diferentes concentrações salinas para emissores com 350 horas de funcionamento

## 12. Conclusões

A vazão dos gotejadores novos para os tratamentos S2 e S4 foi classificada como acima do limite superior de controle.

O Coeficiente de Uniformidade de Christiansen para os gotejadores novos foi superior a 90%, em todos os tratamentos salinos estudados; por outro, os lado tratamentos S1 e S5 estão classificados como sob controle para os gotejadores novos e com 210 horas de funcionamento.

O CUC para os tratamentos S2 e S4 para os gotejadores com 350 horas de funcionamento se encontra abaixo do LIC denunciando a existência de prováveis entupimentos ou a variação na temperatura da água.

Os emissores novos tiveram vazão considerada capaz pelos índices Cp e Cpk; já com 210 horas de funcionamento para os tratamentos S2 e S4 esses emissores obtiveram vazões classificadas incapazes, exigindo manutenções antes de completar 210 horas de funcionamento do sistema.

Para os tratamentos S1; S2 e S5, os emissores com 350 horas de funcionamento tiveram vazões classificadas incapazes, exigindo a manutenção dos sistema antes de 350 horas de funcionamento.

Os tratamentos S1; S2; S3; S4 e S5, para o CUC dos gotejadores novos, com 210 e 350 horas de funcionamento, foram classificados capazes, estando o processo dentro das especificações exigidas.

Os emissores foram considerados capazes quando novos; após 210 horas de funcionamento necessitam de manutenção para que possam continuar dentro dos limites de controle, tornando o emissor capaz.

O índice de capacidade do processo é uma ferramenta capaz de diagnosticar se o sistema de irrigação tem capacidade de se manter sob controle, ou seja, se será capaz de manter níveis aceitáveis de uniformidade, auxiliando o irrigante na tomada de decisão.

### 13. Referências Bibliográficas

- ASAE - American Society of Agricultural Engineers. Field evaluation of microirrigation systems. St. Joseph, 1996.p.792-797.
- Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de irrigação. 8. ed. Viçosa: UFV, 2009. 630p .
- Chen, K.S.; Huang, H.L.; Huang, C.T. Control charts for one-sided capability indices. *Quality & Quantity*, v.41, p.413-427, 2007.
- Costa, A. F. B; Epprecht, E. K.; Carpinetti, L. C. R. Controle estatístico de qualidade. Atlas, 2.ed. São Paulo: Atlas, 2005. 334 p.
- Denículi, W.; Bernardo, S.; Thiébaud, J. T. L.; Sediya, G. C. Uniformidade de distribuição de água, em condições de campo num sistema de irrigação por gotejamento. *Revista Ceres*, v. 27, p. 155-162, 1980.
- Friço, J. P. Controle do processo da irrigação no sistema de aspersão convencional em Palotina-PR. Cascavel: UNIOESTE, 2012. 43p. Dissertação de Mestrado .
- Frizzone, J. A.; Vieira, A. T.; Paz, V. P. S.; Botrel, T. A. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.2, p.278-283, 1998.
- Gonçalves, E. B.; Antoniassi, R. Incerteza em resultados analíticos e verificação de conformidade de qualidade de alimentos. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. V.30,p. 917-927, 2010.
- Hermes, E. Controle estatístico de processo aplicado na uniformidade da irrigação e fertirrigação por gotejamento Cascavel: UNIOESTE, 2010. 96p. Tese de Doutorado.
- Hernandez, R. H. Efeito da carga hidráulica e qualidade de água na uniformidade de sistema de irrigação por gotejamento. Cascavel: UNIOESTE, 2010. 79p. Dissertação de Mestrado.
- Jacobi, L. F.; Souza, A. M.; Pereira, J. E. S. Gráfico de controle de regressão aplicado na monitoração de processos. *Revista Produção*, Florianópolis, v. 12, p. 46-59, 2002.
- Juchen, C. R.; Suzek, F. L.; Vilas Boas, M. A. Irrigação por gotejamento para produção de alface fertirrigada com águas residuárias agroindustriais. *Irriga*, v. 18, 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*, v.30,p.264-270, 2010.
- Keller, J.; Karmeli, D. Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, v.17, p.678-84, 1974.
- Klein, M. R. ;Szekut F. D. ; Silva, B. B. ; Reis, C. F. ; Suszek, F. L. ; Vilas Boas, M. A. Gráficos de shewhart no processo de aplicação de água de um sistema de irrigação familiar por gotejamento. In: *Inovagri International Meeting & Iv Workshop Internacional De Inovações Tecnológicas Na Irrigação*, I , 2012, Fortaleza. Anais... Fortaleza: I Inovagri International Meeting& IV Winotec, 2012 . CD-Rom.
- Lilliefors, H.W. On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association*, v. 62, p. 399-402, 1967.
- Lima, A. A. N.; Lima, J. R.; Silva, J. L. Aplicação do controle estatístico de processo na indústria farmacêutica. *Revista Ciência Farmácia Básica Aplicada*. v. 27, p. 177-187, 2006.
- Lopes, L. F. D. Controle estatístico de processo – Apostila. Santa Maria: DE – CEEMQ - UFSM, 2007. 70p.
- Mantovani, E. C.; Bernardo, S. Palaretti, L. F. Irrigação: Princípios e métodos. Viçosa: UFV. 3. ed. 2012. 358p.
- Mantovani, E. C.; Ramos, M. M. Manejo Da Irrigação. In: Costa, E. F.; Vieira, R. F.; Viana, P. A. *Quimigação: aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação*. Empresa

- Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro de Pesquisa de Milho e Sorgo. – Brasília: EMBRAPA-SSI, 1994. p. 129-158
- Montgomery, D.C. Introdução ao controle estatístico da qualidade. Tradução Ana Maria Lima de Farias, Vera Regina Lima de Farias e Flores; Revisão técnica Luiz da Costa Laurencel. – Rio de Janeiro: LTC, 4 ed., reimpressa. 2009. 513p.
- Paulus, D.; Dourado Neto, D.; Frizzone, J. A.; Soares, T. M. Produção e indicadores fisiológicos de alface sob hidroponia com água salina. *Horticultura Brasileira*, v.28, p.29-35, 2010.
- Ribeiro, M. D. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento para agricultura familiar. Cascavel: UNIOESTE, 2010. 54p. Dissertação de Mestrado
- Richards, L. A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: United States Salinity Laboratory. 1954. 160p. *Agriculture Handbook*, 60
- Silva, R. P.; Souza, F. G.; Cortez, J. W.; Furlani, C. E. A.; Vigna, G. P. Variabilidade espacial e controle estatístico do processo de perdas na colheita mecanizada do algodoeiro. *Revista de Engenharia Agrícola*, v. 27, p.742-752, 2007.
- Souza, I. H.; Andrade, E. M.; Silva, E. L. Avaliação hidráulica de um sistema de irrigação localizada de baixa pressão, projetado pelo software “bubler”. *Revista de Engenharia Agrícola*, v.25, p.264-271, 2005.
- Souza, L. M.; Júnior, J. I. R.; Reis, G. M.; Ide, M. S. Eficiência dos gráficos de controle xbarra, ewma e cusum. *Eletrônica & Engenharia*, v. 1, p. 81-94, 2008.
- Souza, T. V.; Paz, V. P. S.; Coelho, E. F.; Pereira, F. A. C.; Ledo, C. A. S. Crescimento e produtividade do mamoeiro fertirrigado com diferentes combinações de fontes nitrogenadas. *Irriga*, v. 12, p. 563-574, 2007.
- Tessaro, E. Efeito da carga hidráulica na uniformidade da irrigação e fertirrigação em sistema de gotejamento. Cascavel: UNIOESTE. 2012. 80p. Dissertação de Mestrado.
- Vasconcelos, N, S.; Dantas Neto, J.; Medeiros, J. F.; Lima, C. J. G. S. Qualidade Das Águas Subterrâneas De Área Irrigada Da Comunidade De Pau Branco Em Mossoró (RN). *Revista Holos*, v. 1, p. 11 – 23. 2013.
- Werkema, M. C. C. Ferramentas da qualidade: ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos. Belo Horizonte: FCO - UFMG, 1995. 404 p.
- Zocoler, J. L. Avaliação de desempenho em sistemas de irrigação. Ilha Solteira : UNESP. 2005. 45p.