**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Controle estatístico de qualidade aplicado a ensaios de material de irrigação

Hermes Soares da Rocha

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas
Agrícolas

**Piracicaba
2016**

Hermes Soares da Rocha
Engenheiro Agrícola

Controle estatístico de qualidade aplicado a ensaios de material de irrigação

Orientador:
Profª. Dra. **PATRICIA ANGÉLICA ALVES MARQUES**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Rocha, Hermes Soares da

Controle estatístico de qualidade aplicado a ensaios de material de irrigação /
Hermes Soares da Rocha. -- Piracicaba, 2016.

87 p.

Tese (Doutorado) -- USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Ensaios de laboratório 2. Controle estatístico de processos 3. Análise de
sistemas de medição 4. Gráficos de controle 5. Índices de capacidade 6.
Repetitividade e reprodutibilidade I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Rocha e Cândida, em retribuição aos ensinamentos, orientação, carinho e apoio incondicional que recebi durante minha caminhada. A eles serei eternamente grato pela vida, pela educação, pelos princípios, pela confiança e pelo caráter que hoje tenho. Dedico-lhes todos os meus esforços e realizações!

À minha namorada, Audinéia, que, mesmo acompanhando de longe, tem sido muito presente em minha vida e auxiliado a me manter firme nesse desafio. A ela dedico esta conquista, espero poder dedicar muitas outras ao longo de nossas vidas e agradeço muito pelo amor, carinho, cuidado, apoio e, principalmente, pela compreensão!

Aos meus irmãos, Érica e Eliseu, dedico para que sirva de exemplo e incentivo a batalharem pelos seus objetivos com dedicação, esforço e humildade!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e por me dar forças para enfrentar os obstáculos e dificuldades.

A toda a minha família, parentes e amigos da minha terra natal, no município de São Francisco-MG, pelo incentivo e apoio em todos os momentos.

À Universidade de São Paulo, especificamente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, por oferecer a estrutura e o suporte técnico necessários à realização da pesquisa.

À professora Patricia A. A. Marques, pela orientação, contribuição, apoio acadêmico, amizade e confiança em mim depositada.

Ao MCT, CNPq e FAPESP pela concessão de bolsa e apoio financeiro à realização desta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCT-EI). Ao Laboratório de Ensaio de Material de Irrigação (LEMI) pelo apoio e suporte à pesquisa.

À equipe do LEMI pelas contribuições ao longo da minha caminhada na Pós-Graduação, pelas sugestões e apoio na realização deste trabalho, e pelo bom convívio.

Ao professor Sérgio Nascimento Duarte, pelos ensinamentos, orientações, valiosas dicas e materiais compartilhados durante o curso, que foram de grande utilidade.

Ao professor José Antônio Frizzzone, pelos ensinamentos, sugestões, recomendações e dicas, além da confiança em mim depositada para utilização da infraestrutura necessária à condução do trabalho.

Ao professor Daniel Fonseca de Carvalho, da UFRuralRJ, pelo exemplo de profissionalismo, dedicação à docência e pesquisa, e pelo apoio e estímulo à minha caminhada rumo à Pós-Graduação, desde os anos iniciais da faculdade.

Ao professor Leonardo Duarte Batista da Silva, da UFRuralRJ, pelo incentivo ao meu ingresso na Pós-Graduação na ESALQ/USP.

Ao professor Leonardo Oliveira Medici, da UFRuralRJ, pelas oportunidades de aprendizado e desenvolvimento de trabalhos de pesquisa concedidas durante a graduação.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia da UFRuralRJ, pela minha formação. Muito cresci profissionalmente e muito aprendi nesta Universidade.

A Ananias F. Dias Júnior, pela amizade verdadeira e duradoura, iniciada ainda nos tempos do Ensino Médio no CEFET Januária-MG, antigo Colégio Agrícola.

Aos colegas e amigos de pós-graduação, pelos bons momentos vividos e pelo auxílio durante o curso.

Aos colegas de república, pela paciência e boa convivência neste período.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB), pelo auxílio, disponibilidade e dedicação.

Ao técnico do LEB, gerente do LEMI e amigo, Antônio Pires de Camargo, pela inestimável capacidade de trabalho e empenho para orientação, sugestões e auxílio na montagem e condução dos ensaios, além da revisão deste texto. Também pelo exemplo de pessoa, profissional e dedicação à profissão, agradeço!

A Ezequiel Saretta, ex-funcionário do LEMI, pelo apoio, contribuição e ideias sugeridas durante execução dos experimentos.

A Davilmar e Beatriz, secretárias do LEB, pelo empenho e dedicação com os quais cuidam da nossa Pós-Graduação.

Aos engenheiros Douglas Reis e Eric Alberto, pelo auxílio nos processos de automatização dos procedimentos de ensaio nas bancadas.

Aos colegas, professores e amigos da UFRuralRJ, onde comecei a me envolver com atividades de pesquisa junto ao Grupo de Pesquisa Água e Solo em Sistemas Agrícolas (GPASSA), sob a orientação/coordenação do prof. Daniel F. de Carvalho, por quem tenho grande admiração e respeito.

Aos colegas e amigos contemporâneos do GPASSA, especialmente a Adilson Pacheco de Sousa, Márcio Emanuel de Lima, Alexsandra Duarte Oliveira e Marinaldo Ferreira Pinto, pessoas que foram exemplos fundamentais para que eu despertasse interesse pela pesquisa logo nos anos iniciais da graduação em Engenharia Agrícola, na UFRuralRJ.

Por fim, meu muito obrigado a todos que de alguma forma e em algum momento contribuíram para a minha formação não só acadêmica, mas também como cidadão.

BIOGRAFIA

Nascido em 12 de maio de 1989 em São Francisco-MG, Hermes Soares da Rocha passou a infância morando com sua família em uma pequena propriedade rural na região do distrito de Lapa do Espírito Santo, pertencente ao referido município. Nessa localidade, concluiu os estudos da educação de base, referentes ao Ensino Fundamental, na Escola Estadual Ademar Cangussu. Em fevereiro de 2004, ainda aos 14 anos, mudou-se para Januária-MG, cidade vizinha, onde cursou Técnico em Agropecuária integrado ao Ensino Médio, no Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET), antiga EAF Januária-MG e hoje campi do IFNMG, formando-se em 2006. Em abril de 2007, ingressou na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pela qual obteve o título de Engenheiro Agrícola em fevereiro de 2012. Nesse mesmo ano, começou sua Pós-Graduação na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, Campus Piracicaba-SP. Por esta Escola, obteve os respectivos títulos de mestre e doutor em Engenharia de Sistemas Agrícolas, em janeiro de 2014 e novembro de 2016. Durante a graduação, foi bolsista de Iniciação Científica junto ao Grupo de Pesquisas Água e Solos em Sistemas Agrícolas, sob orientação do Prof. Daniel Fonseca de Carvalho, de 2008 a 2011, com pesquisas nas áreas de Irrigação, Agrometeorologia e Manejo e Conservação do Solo e da Água, realizadas junto à UFRuralRJ, Embrapa Agrobiologia e Pesagro-RJ. Na Pós-Graduação, suas pesquisas foram voltadas para a área de Engenharia de Irrigação, sob orientação da Profa. Patricia Angélica Alves Marques, com trabalhos desenvolvidos junto ao Laboratório de Ensaios e Material de Irrigação (LEB/ESALQ/USP).

EPÍGRAFE

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	14
LISTA DE SÍMBOLOS	16
GLOSSÁRIO	18
1. INTRODUÇÃO.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1. CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS (CEP).....	24
2.1.1. Análise de estabilidade, tendências e linearidade (Gráficos de controle).....	24
2.1.2. Análise de capacidade de processos e sistemas de medição.....	30
2.2. REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO (GAGE RR).....	32
3. MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1. ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA VAZÃO-PRESSÃO E UNIFORMIDADE DE VAZÃO DE MICROASPERSORES	39
3.1.1. Automação dos sistemas de controle da pressão de ensaio, medição e aquisição de dados	40
3.1.2. Caracterização e calibração dos instrumentos de medição.....	41
3.1.3. Caracterização dos microaspersores utilizados	42
3.1.4. Ferramentas da qualidade aplicadas à bancada de ensaio de microaspersores	43
Diagrama de Ishikawa (ou de causa e efeito).....	43
Gráficos de controle.....	46
Análise de capacidade.....	47
Repetitividade e reprodutibilidade (Gage RR).....	49
3.2. ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA VAZÃO-PRESSÃO E UNIFORMIDADE DE VAZÃO DE GOTEJADORES E TUBOS GOTEJADORES.....	50
3.2.1. Caracterização dos gotejadores utilizados.....	51
3.2.2. Ferramentas da qualidade aplicadas à bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores.....	52
Diagrama de Ishikawa (ou de causa e efeito).....	52
Gráficos de controle.....	54
Análise de capacidade.....	54
Repetitividade e reprodutibilidade (Gage RR).....	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1. BANCADA DE ENSAIO DE MICROASPERSORES	57
4.1.1. Pressão de ensaio – estabilidade do processo de controle e medição	57
4.1.2. Pressão de ensaio – análise de capacidade do processo de controle e medição.....	61
4.1.3. Monitoramento da temperatura da água	65
4.1.4. Vazão – repetitividade e reprodutibilidade.....	66
4.2. BANCADA DE ENSAIO DE GOTEJADORES E TUBOS GOTEJADORES.....	69
4.2.1. Pressão de ensaio – estabilidade do processo de controle e medição	69
4.2.2. Pressão de ensaio – análise de capacidade do processo de controle e medição.....	72
4.2.3. Monitoramento da temperatura da água	75
4.2.4. Vazão – repetitividade e reprodutibilidade.....	76
4.3. CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES	79
5. CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS.....	83

RESUMO

Controle estatístico de qualidade aplicado a ensaios de material de irrigação

Os ensaios laboratoriais para avaliação técnica ou estudo de material de irrigação envolvem a medição de diversas grandezas, bem como o monitoramento e controle das condições de ensaio. Qualquer sistema de medição e controle naturalmente apresenta instabilidades que podem afetar a qualidade dos resultados de ensaio, implicando em aumento da incerteza no processo de medição. A implementação do Controle Estatístico de Qualidade pode ser promissora para detecção de causas externas de variação, avaliação da variação máxima permitida aos dados de um processo e discriminação das principais componentes de variabilidade de um sistema de medição. Nesse sentido, considerando a hipótese de possibilidade de aprimoramento da qualidade dos resultados de ensaios, a presente pesquisa teve por objetivo utilizar técnicas de controle estatístico de qualidade e análise de sistemas de medição para avaliar o grau de adequação de bancadas de ensaio de emissores de microirrigação, aperfeiçoar os sistemas de medição e controle adotados nas bancadas e diagnosticar a porcentagem de contribuição dos fatores inerentes aos sistemas de medição e controle na variabilidade total das medidas de vazão em ensaios de uniformidade. A pesquisa foi conduzida no Laboratório de Ensaios de Material de Irrigação (LEMI/INCT-EI/ESALQ/USP). Foram elaborados gráficos de controle de Shewhart, média móvel exponencialmente ponderada (MMEP), além de índices de capacidade para o processo de medição da pressão de ensaio, monitoramento de temperatura da água e vazão, consideradas como as variáveis características da qualidade para ensaios de determinação das curvas de vazão em função da pressão de entrada e uniformidade de vazão de emissores de microaspersão e gotejamento. Além disso, realizou-se estudo de repetitividade e reprodutibilidade (Gage RR) do sistema de medição da vazão, para o qual foram utilizadas 10 repetições, sob três turnos de trabalho (manhã, tarde e noite), com 13 emissores na bancada de microaspersão e 25 emissores na bancada de gotejamento. Não houve influência do turno de trabalho nas medidas de vazão obtidas e o aprimoramento do processo de ajuste da pressão de ensaio pela implantação de um controlador proporcional integrativo-derivativo (PID) ao ensaio de microaspersores foi suficientemente detectado pela aplicação dos gráficos de controle. A pressão e temperatura da água se mantiveram estáveis durante cada ensaio, e não foram identificadas causas não aleatórias de variabilidade na rotina de ensaios. O processo de controle e medição da pressão, para as duas bancadas, foi classificado como "excelente" quanto ao desempenho e capacidade de se manter entre os limites de especificação e centralização em relação ao valor de referência (alvo desejado). Como esperado, a variabilidade entre emissores foi a componente de maior contribuição na variância total da vazão, correspondendo a 95,47% e 96,77% para microaspersão e gotejamento, respectivamente. A repetitividade e reprodutibilidade do sistema de medição de vazão (Gage RR) foi "aceitável" para as duas bancadas, com as respectivas contribuições de 4,53% e 3,23%, em relação à variância total, associados às incertezas do Gage RR.

Palavras-chave: Ensaios de laboratório; Controle estatístico de processos; Análise de sistemas de medição; Gráfico de controle; Índice de capacidade; Repetitividade e reprodutibilidade

ABSTRACT

Statistical quality control applied to irrigation materials testing

Laboratory tests for technical evaluation or irrigation material testing involve the measurement of various greatnesses, as well as monitoring and control of test conditions. Any measurement and control system naturally presents instabilities that can affect the quality of the test results, resulting in increased measurement uncertainty. The implementation of the Statistical Quality Control may be promising for detecting causes of variation non-random, evaluation of the tolerance permitted to data of the process and breakdown of the main variability components of a measuring system. In this sense, considering the hypothesis of possibility of improving the quality of test results, the present study aimed at using statistical quality control techniques and measurement systems analysis to assess the reliability of test benches of microirrigation emitters, improve measurement and control systems adopted in the benches and to diagnose percentage of contribution of the factors inherent in the measurement and control systems in the total variability of flow measurements on uniformity tests. The research was carried in Laboratório de Ensaios de Material de Irrigação (LEMI/INCT-EI/ESALQ/USP). Shewhart control charts were developed, exponentially weighted moving average (EWMA), and capability index for the process of measuring the test pressure, temperature monitoring of water and flow, regarded as the quality variables for determination the flow curves as a function of inlet pressure and uniformity of flow for microsprinkler emitters and drip. In addition, it was made study of repeatability and reproducibility (Gage RR) of flow measurement system for which were used 10 repetitions in three work shifts (morning, afternoon and evening), with 13 emitters in the microsprinkler's bench and 25 emitters in the drip bench. There wasn't influence of the work shift in the obtained measures for flow and the improvement of the adjustment process of the test pressure for the implementation of the integrative-derivative proportional controller (PID) to microsprinklers test was sufficiently detected by control charts. The pressure and water of temperature remained stable during the tests and weren't identified non-random causes of variability in routine tests. The process control and measurement of pressure was classified "excellent" to performance and capability to remain in the range of specification and centralization in relation to the reference value (desired target), to the two benches. As expected, the variability between emitters was the greater contribution component in the total variance of flow, corresponding to 95.47% and 96.77% for microsprinkler and drip, respectively. The repeatability and reproducibility for flow measurement system (Gage RR) was "acceptable" for the two benches, with the contributions respective of 4.53% and 3.23% relative to the total variance, associated with uncertainties of Gage RR.

Keywords: Laboratory tests; Statistical process control; Measurement systems analysis; Control charts; Capability index; Repeatability and reproducibility

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplos de gráficos de controle de Shewhart (a), CUSUM (b) e MMEP (c), respectivamente, para pressão de ensaio de microaspersores	27
Figura 2. Exemplo de índices de capacidade do processo de ajuste manual da pressão de ensaio em bancada de microaspersores	32
Figura 3. Bancada de ensaios para determinação da curva vazão-pressão e uniformidade de vazão de microaspersores.....	40
Figura 4. Calibração dos instrumentos de medição utilizados para determinação da curva vazão-pressão e uniformidade de vazão de microaspersores: medidores eletromagnéticos de vazão – 0 a 90 l h ⁻¹ (a); transdutor de pressão (b); e termômetro NTC (c).....	42
Figura 5. Relação vazão-pressão para o modelo de microaspersor utilizado nos ensaios	43
Figura 6. Diagrama de Ishikawa para análise dos sistemas de medição e controle em bancada de microaspersão	45
Figura 7. Bancada de ensaios para determinação da curva vazão-pressão e uniformidade de vazão de gotejadores e tubos gotejadores	51
Figura 8. Relação vazão-pressão para o modelo de tubo gotejador utilizado nos ensaios.....	52
Figura 9. Diagrama de Ishikawa para análise dos sistemas de medição e controle em bancada de gotejamento ..	53
Figura 10. Gráfico de controle de shewhart para médias ($\bar{X}$) da pressão de ensaio, para as três formas de ajuste e considerando a média de 5 repetições em cada emissor “j”	58
Figura 11. Gráfico de controle de shewhart para amplitude (R) da pressão de ensaio, para as três formas de ajuste e considerando a média de 5 repetições em cada emissor “j”	59
Figura 12. Diagrama box-plot para as observações feitas nos 12 emissores, sob as três formas de se ajustar a pressão de ensaio	59
Figura 13. Gráfico de controle MMEP para pressão de ensaio na bancada de microaspersores, operando em três turnos de trabalho	60
Figura 14. Gráficos de controle MMEP para diferentes pressões de ensaio de microaspersores: 0,5 kgf cm ⁻² (a); 1,5 kgf cm ⁻² (b) e 3,5 kgf cm ⁻² (c).....	61
Figura 15. Distribuição de frequência da pressão de ensaio na bancada de ensaio de microaspersores.....	62
Figura 16. Índices de capacidade para processo de ajuste e monitoramento da pressão de ensaio na bancada de ensaio de microaspersores, considerando tolerâncias de $\pm 2\%$ (a); e $\pm 1\%$ (b)	63
Figura 17. Monitoramento da temperatura da água ao longo dos testes na bancada de ensaio de microaspersores	66
Figura 18. Coeficientes de variação de fabricação para microaspersores para três turnos de trabalho e 10 repetições.....	69
Figura 19. Gráfico de controle MMEP para pressão de ensaio na bancada de gotejadores e tubos gotejadores, operando em três turnos de trabalho.....	70
Figura 20. Gráficos de controle MMEP para diferentes pressões de ensaio de microaspersores: 1,0 kgf cm ⁻² (a); 1,5 kgf cm ⁻² (b) e 3,5 kgf cm ⁻² (c).....	71
Figura 21. Gráficos de controle MMEP para monitoramento da pressão em bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores, considerando três turnos de operação: manhã (a); tarde (b) e noite (c)	72
Figura 22. Distribuição de frequência da pressão de ensaio na bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores	73
Figura 23. Índices de capacidade para processo de ajuste e monitoramento da pressão de ensaio na bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores, considerando tolerâncias de $\pm 2\%$ (a); e $\pm 1\%$ (b).....	74

Figura 24. Monitoramento da temperatura da água durante as medições de pressão e vazão na bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores, considerando todas as repetições, obtidas em dias e horários diferentes (a); e considerando repetição única, com dados obtidos durante ensaio específico (b) 75

Figura 25. Coeficientes de variação de fabricação para tubos gotejadores para três turnos de trabalho e 10 repetições..... 79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Situação da qualidade vs Cp	32
Tabela 2. Componentes de variabilidade de um sistema de medição.....	36
Tabela 3. Critérios de aprovação para contribuição do sistema de medição (Gage RR) e número de categorias distintas (NDC)	37
Tabela 4. Referências normativas e limites de especificação para análise dos índices de capacidade do processo de controle e medição da pressão de ensaio durante determinação da relação vazão-pressão e uniformidade de vazão de microaspersores.....	48
Tabela 5. Referências normativas e limites de especificação para análise dos índices de capacidade do processo de controle e medição da pressão de ensaio durante determinação da relação vazão-pressão e uniformidade de vazão de gotejadores e tubos gotejadores.....	55
Tabela 6. Teste de normalidade para os dados de pressão de ensaio na bancada de microaspersores.....	62
Tabela 7. Análise de capacidade e desempenho do processo de controle e medição da pressão na bancada de ensaio de microaspersores	64
Tabela 8. ANOVA para o estudo de repetitividade e reprodutibilidade na bancada de microaspersão	67
Tabela 9. Variância, desvio padrão e porcentagem de contribuição das fontes de variação na variabilidade total das medições de vazão obtidas na bancada de ensaio de microaspersores, para diferentes turnos de trabalho.....	67
Tabela 10. Teste de normalidade para os dados de pressão de ensaio na bancada de gotejadores e tubos gotejadores	73
Tabela 11. Análise de capacidade e desempenho do processo de controle e medição da pressão na bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores.....	75
Tabela 12. ANOVA para o estudo de repetitividade e reprodutibilidade na bancada de gotejamento (com interação).....	76
Tabela 13. ANOVA para o estudo de repetitividade e reprodutibilidade na bancada de gotejamento (sem interação).....	77
Tabela 14. Variância, desvio padrão e porcentagem de contribuição das fontes de variação na variabilidade total das medições de vazão obtidas na bancada de ensaio de gotejadores, para diferentes turnos de trabalho	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\bar{\bar{X}}$	Média geral para os dados de um processo de produção ou medição;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i> ;
ANOVA	Análise de variância;
CEQ	Controle estatístico de qualidade;
CEP	Controle estatístico de processos;
CUSUM	Somas acumuladas ou somas cumulativas;
CVFq	Coefficiente de variação de vazão devido a efeitos de fabricação;
ESALQ/USP	Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/Universidade de São Paulo;
EWMA	<i>Exponentially weighted moving average</i>
GL	Graus de liberdade;
H	Largura da faixa de controle no gráfico CUSUM;
i	Nível do fator condição de medição no estudo Gage RR ($i = 1, \dots, a$);
IC	Intervalo(s) de confiança;
INCT-EI	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Engenharia da Irrigação;
INITL	<i>International Network of Irrigation Testing Laboratories</i> ;
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia;
ISO	<i>International Standard Organization</i> ;
j	Nível do fator peça (emissor) no estudo Gage RR ($j = 1, \dots, b$);
k	Nível das repetições no estudo Gage RR ($k = 1, \dots, n$);
L	Largura da faixa de controle no gráfico MMEP;
LC	Linha central;
LEB	Departamento de Engenharia de Biossistemas;
LEMI	Laboratório de Ensaio de Material de Irrigação;
LIC	Limite inferior de controle;
LIE	Limite inferior de especificação;
LSC	Limite superior de controle;
LSE	Limite superior de especificação;
MSA	<i>Measurement Systems Analysis</i> ;
m	Número de amostras;
MMEP	Média móvel exponencialmente ponderada;

MQ	Média quadrática;
MQC	Média quadrática da condição de medição;
MQE	Média quadrática de desvios entre emissores
MQI	Média quadrática da interação entre os fatores turno de ensaio e emissor;
MQR	Média quadrática dos resíduos;
n	Número de repetições;
NBR	Norma Brasileira;
NDC	Número de categorias distintas;
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i> ;
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i> ;
PID	Proporcional integrativo-derivativo;
QFD	<i>Quality Function Deployment</i> ;
R	Gráfico de controle de Shewhart para amplitude de variação de um processo;
RBC	Rede Brasileira de Calibração;
RR	Repetitividade e reprodutibilidade;
S	Gráfico de controle de Shewhart para desvio padrão de um processo;
SNR	Razão sinal-ruído;
SQ	Soma quadrática;
SQC	Soma quadrática da condição de medição (SQ_{Turnos});
SQE	Soma quadrática de desvios entre emissores ($SQ_{\text{Emissores}}$);
SQI	Soma quadrática da interação entre os fatores turno de ensaio e emissor;
SQO	Soma quadrática entre técnicos ou operadores;
SQP	Soma quadrática de desvios entre peças;
SQR	Soma quadrática dos resíduos;
SQT	Soma quadrática total; e
XBarra	Gráfico de controle de Shewhart para médias de um processo ($\bar{\bar{X}}$).

LISTA DE SÍMBOLOS

$(\tau\beta)_{ij}$	Efeitos de interação entre fatores condição de medição e peça;
$\bar{X}_j$	Média da j-ésima amostra de tamanho de subgrupo maior ou igual a 1;
$\hat{\sigma}_R$	Estimador do desvio padrão da amplitude de variação;
$\sigma^2_{\text{medidor}}$	Variabilidade inerente ao sistema de medição;
$\sigma^2_{\text{produto}}$	Variabilidade inerente ao produto (ou peça)
$\sigma^2_{\text{repetitividade}}$	Variabilidade associada à repetitividade do sistema de medição;
$\sigma^2_{\text{reprodutibilidade}}$	Variabilidade associada à reprodutibilidade do sistema de medição;
σ^2_{total}	Variabilidade total das medidas obtidas;
σ^2_{β}	Variância entre emissores;
σ^2_{τ}	Variância entre turnos de realização dos ensaios;
$\sigma^2_{\tau\beta}$	Variância associada à interação entre peças (emissores) e turnos;
μ_0	Média do processo;
A_2	Constante tabelada em função de n;
C_i^-	Desvios negativos no gráfico CUSUM;
C_i^+	Desvios positivos no gráfico CUSUM;
C_p	Índice de capacidade potencial do processo;
C_{pk}	Índice de capacidade potencial e nível de centralização do processo;
C_{pl}	Índice de capacidade potencial unilateral inferior do processo;
C_{pm}	Índice de capacidade real (global) para especificação e centralização da média do processo em relação ao alvo (T);
C_{pu}	Índice de capacidade potencial unilateral superior do processo;
d_2	Constante tabelada em função de n;
d_3	Constante tabelada em função de n;
D_3	Constante tabelada em função de n;
D_4	Constante tabelada em função de n;
H_0	Hipótese nula;
H_1	Hipótese alternativa;
P_p	Índice de capacidade/desempenho real do processo;
P_{pk}	Índice de capacidade real e nível de centralização do processo;
P_{pl}	Índice de capacidade real para especificação unilateral superior do processo;

P_{pu}	Índice de capacidade real para especificação unilateral inferior do processo;
$\bar{X}$	Média sob controle;
y_{ijk}	Observação individual da característica da qualidade para o estudo Gage RR;
Z_0	Valor alvo ou média em controle de x_i ($Z_0 = \mu_0 = T$);
β_j	Efeitos do nível “j” do fator peça no estudo Gage RR;
ε_{ijk}	Erro aleatório associado às medidas y_{ijk} ;
$\hat{\sigma}$	Estimador do desvio padrão;
σ^2	Variância;
$\sigma_{Emissor}$	Desvio padrão associado às peças (emissores);
$\sigma_{Gage\ RR}$	Desvio padrão de repetitividade e reprodutibilidade do sistema de medição;
σ_{RR}	Desvio padrão associado às incertezas de repetitividade e reprodutibilidade;
τ_i	Efeitos do nível “i” do fator condição de medição no estudo Gage RR;
Δ	Variação a ser detectada;
Σ	Operador de somatório;
∞	Infinito;
F	Valor do teste F na análise de variância;
i	Tamanho amostral para os gráficos CUSUM e MMEP;
k	Valor de referência para o gráfico CUSUM;
m	Número de amostras;
n	Tamanho amostral para gráficos XBarra ($\bar{\bar{X}}$) e de amplitudes (R);
T	Valor nominal ou alvo ou valor de referência para o processo;
$V(y_{ijk})$	Variância total das observações y_{ijk} ;
X	Dados a serem normalizados pelas funções Box-Cox e/ou Johnson;
Z	Dados normalizados pelas funções Box-Cox e/ou Johnson;
α	Nível de significância para remover interação e identificar efeitos dos fatores;
γ	Parâmetro de ajuste da transformação Box-Cox e/ou Johnson;
η	Parâmetro de ajuste da transformação Box-Cox e/ou Johnson;
θ	Parâmetro de ajuste da transformação Box-Cox e/ou Johnson;
λ	Fator de ponderação ou ponderação no gráfico MMEP;
σ	Desvio padrão; e
φ	Parâmetro de ajuste da transformação Box-Cox e/ou Johnson.

GLOSSÁRIO

“Característica da qualidade”: Diz respeito à variável do processo produtivo ou de medição a ser mensurada/monitorada para avaliar a qualidade.

“Gage RR”: Refere-se ao estudo para discriminação das componentes de variabilidade na obtenção de uma medida (estudo de repetitividade e reprodutibilidade do sistema de medição).

“Média quadrática”: Refere-se à relação entre a soma quadrática e o número de graus de liberdade (GL), para cada fator discriminado como fonte de variação na análise de variância (ANOVA).

“Regras sensibilizantes”: Consiste das regras de interpretação utilizadas para análise dos gráficos de controle.

“Sete ferramentas da qualidade”: Grupo de técnicas consagradas no âmbito do Controle Estatístico de Qualidade, que visam o diagnóstico e aperfeiçoamento de sistemas produtivos ou de medição. São elas: histogramas, folhas de verificação e controle, gráfico de Pareto, diagrama de Ishikawa ou de causa e efeito, diagramas de concentração de defeitos, diagramas de dispersão, e cartas ou gráficos de controle.

“Sistema de controle e medição”: Conjunto de métodos, técnicas, procedimentos e equipamentos utilizados para ajuste e medição das características da qualidade dos ensaios.

“Soma quadrática”: Refere-se ao somatório dos desvios em relação à média associada a cada fator discriminado como fonte de variação na análise de variância (ANOVA).

“*Status* do CUSUM”: Consiste de gráfico elaborado para a sobreposição das observações em cada amostra x_i no gráfico CUSUM.

“Subgrupo racional”: É o número de ensaios ou observações realizadas para compor uma amostra.

“Valor de referência”: valor nominal ou alvo desejado para o processo de controle e medição.

“Variante”: Diz respeito à condição de medição como fonte de variação que se associa à componente reprodutibilidade no estudo Gage RR para o sistema de medição. Normalmente esse tipo de estudo utiliza o técnico de ensaio ou operador como variante. Entretanto, nesta pesquisa, devido não haver influência do técnico de ensaios por serem os procedimentos automatizados, adotou-se o turno de trabalho como possível variável na condição de medição, sendo esta a variante em questão.

1. INTRODUÇÃO

Os ensaios laboratoriais para avaliação técnica ou estudo de material de irrigação envolvem a medição de diversas grandezas, bem como o monitoramento e controle das condições de ensaio. Seja manual ou automático, qualquer sistema de medição naturalmente apresenta instabilidades devido a causas como interferência do operador, imperfeições em dispositivos mecânicos ou eletrônicos, oscilações na fonte de energia, vibrações mecânicas e ruídos elétricos. A instabilidade nos sistemas de controle e medição pode afetar diretamente a qualidade dos resultados dos ensaios, uma vez que oscilações produzidas pelo sistema de controle resultam em aumento da incerteza de medição.

Materiais de irrigação são avaliados segundo normas que definem requisitos visando assegurar a qualidade dos resultados de ensaio. De modo geral, as normas apresentam recomendações quanto à estrutura e metodologia a ser adotada para execução dos ensaios, e ainda, requisitos de incerteza de medição a serem atendidos pelos instrumentos ou sistemas de medição. No entanto, evidencia-se que as normas não estabelecem critérios para validação dos resultados de ensaio, sendo esta uma limitação. É possível que um laboratório disponha de instrumentos e sistemas de medição que atendam aos requisitos de incerteza previstos nas normas, o que a princípio asseguraria a qualidade dos resultados. Porém, também existe a possibilidade de ocorrerem oscilações significativas no processo de medição ou controle devido às causas ou interferências já citadas, denominadas de causas não aleatórias ou atribuídas. Consequentemente, mesmo que um laboratório possua sistemas de medição que atendam aos requisitos de incerteza estabelecidos por normas (NBR ISO 9261:2006, NBR 15084:2004 e NBR ISO 7749-1:2000, por exemplo), as referidas oscilações resultariam em instabilidade do processo suficientemente grande para comprometer a qualidade dos ensaios, sendo que tal fato não é considerado pelas normas e constitui uma preocupação.

Em laboratórios de ensaio, dentre as principais medidas visando a rastreabilidade de medição e garantia da qualidade dos resultados de ensaio, preconiza-se a utilização de instrumentos de medição calibrados por laboratórios membros da Rede Brasileira de Calibração (RBC/INMETRO), havendo cronogramas de calibração e de verificações intermediárias dos instrumentos; utilização de instrumentos de medição que atendem aos requisitos de incerteza estabelecidos pelas normas técnicas adotadas; e execução de auditorias e pesquisas internas e rotinas de comparação intralaboratorial e interlaboratorial. O problema abordado nesta pesquisa emergiu a partir da experiência da equipe do Laboratório de Ensaios

de Material de Irrigação (LEMI/INCT-EI/ESALQ/USP) e das observações realizadas ao longo da execução de inúmeros ensaios.

Independentemente da qualidade dos instrumentos de medição, problemas de instabilidade nas condições de ensaio podem ocorrer e são decorrentes, por exemplo: da formação de bolsões de ar na tubulação; instabilidade de vazão recalcada pela motobomba devida às oscilações de tensão na rede elétrica ou desnível de sucção; aquecimento da motobomba operando em condições de vazão muito baixa ou sob rotação máxima; alterações na temperatura da água ou do ambiente; inadequado funcionamento do sistema de controle da pressão de entrada. Neste ponto, vale lembrar que rotinas de verificação dos procedimentos são criteriosamente adotadas pelo LEMI, justamente para que estas possíveis causas de variabilidade indesejadas nos ensaios sejam minimizadas ou eliminadas.

Limitando-se ao objeto deste estudo, em ensaios visando a determinação da uniformidade de vazão e relação vazão-pressão de gotejadores, tubos gotejadores e microaspersores, definem-se pressões de ensaio para as quais efetua-se a determinação da vazão correspondente. Nota-se que sob determinada pressão de ensaio ocorrem flutuações nas indicações dos sensores de pressão e vazão. Sobretudo, a principal preocupação relacionada a estes ensaios consiste em determinar se as referidas oscilações são aceitáveis, e ainda, quais seriam os limites de tolerância dessas variações a fim de assegurar a qualidade dos resultados. É importante ressaltar que as normas técnicas de ensaio relacionadas a equipamentos de irrigação estabelecem apenas critérios de incerteza de instrumentos de medição, não havendo nenhuma referência associada a critérios de aceitação de tais instabilidades nos sistemas de controle e/ou medição. Além da pressão e vazão, a temperatura da água e do ambiente também exercem influência nos resultados dos ensaios mencionados, e também estão sujeitas a oscilações ao longo de um ensaio. Portanto, a presente pesquisa envolve o estudo e aprimoramento dos sistemas de controle e medição das variáveis do escoamento em emissores de microirrigação, através de ferramentas de controle estatístico de qualidade.

A medida, monitoramento, controle e melhoria da qualidade constituem o conceito de controle estatístico de qualidade, sendo sua implementação baseada em abordagens como o planejamento de experimentos, ferramentas de controle estatístico de processos (CEP) e análise de sistemas de medição (MSA), envolvendo ainda definições de ciclo “PDCA” (ou ciclo de Deming) e QFD (Desdobramento da Função Qualidade). Esses conceitos possuem vasta aplicação em linhas de produção de grandes empresas, e podem ser adaptados ao setor de serviços, como aqueles desenvolvidos e prestados por laboratórios de ensaios como o LEMI. Particularmente, a análise de sistemas de medição e implementação de algumas das

ferramentas de CEP, também chamadas de “sete ferramentas da qualidade”, são de foco e interesse no presente estudo, não sendo aprofundados os conceitos de ciclo PDCA e QFD exatamente por se tratarem de abordagens de gênero qualitativo e aplicações mais apropriadas aos setores empresarial e da indústria.

A hipótese deste estudo é de que é possível contribuir para o aprimoramento da qualidade dos resultados de ensaios de material de irrigação pelo uso de ferramentas estatísticas de controle da qualidade de processos, e propor metodologias que auxiliem na avaliação e aprovação dos sistemas de controle e medição adotados nos ensaios. Caso ocorram fontes de variação não aleatórias nesses ensaios, supõe-se também que as mesmas possam ser detectadas pela aplicação das ferramentas da qualidade, permitindo intervir com planos de ação para ajustes no processo de medição e controle das variáveis de interesse. O uso de tais ferramentas também pode ser útil ainda para avaliar o impacto de alterações nos sistemas de controle e medição implementados no laboratório.

O objetivo geral da pesquisa foi utilizar técnicas e ferramentas de controle estatístico da qualidade para avaliar o grau de adequação de bancadas de ensaio de emissores de microirrigação, os resultados de ensaios, aperfeiçoar os sistemas de medição e controle adotados nas bancadas e diagnosticar a porcentagem de contribuição dos fatores inerentes aos sistemas de medição e controle na variabilidade total das medidas de vazão em ensaios de uniformidade de vazão.

Destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- a) avaliar sistemas de controle e medição de pressão, temperatura da água e vazão de emissores de gotejamento e microaspersão, por meio da aplicação de técnicas de controle estatístico de processos (CEP) aos procedimentos técnicos adotados nas bancadas de ensaios;
- b) detectar a ocorrência de possíveis causas não aleatórias de variabilidade na rotina de ensaios praticada no âmbito do Laboratório de Ensaios de Material de Irrigação (LEMI/INCT-EI/ESALQ/USP);
- c) propor metodologias para avaliação do impacto de alterações nos sistemas de controle e medição;
- d) propor metodologias para o monitoramento dos parâmetros intervenientes no processo de ensaio (saída dos sistemas de medição), e aceitação dos sistemas de controle e medição adotados nas bancadas de ensaios de gotejadores, tubos gotejadores e microaspersores, com base nas ferramentas de controle estatístico da qualidade; e,

- e) propor metodologia para diagnosticar a porcentagem de contribuição dos fatores inerentes aos sistemas de controle e medição na variabilidade total das medidas de vazão dos emissores em ensaios de uniformidade de vazão.

A partir dos resultados deste estudo, buscou-se contribuir no que diz respeito aos critérios de aprovação dos sistemas de controle e medição, que futuramente poderão ser incluídos em normas relacionadas a ensaios de material de irrigação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Poucas são as pesquisas com aplicação de controle estatístico de processos (CEP) e análise de sistemas de medição (MSA) à área de Engenharia da Irrigação, porém diversos estudos podem ser encontrados abordando temas relacionados à engenharia de produção, mecânica, ambiental e estatística (Burdick; Borror; Montgomery, 2003; Zhou et al., 2008; Gonzalez; Werner, 2009; Jin Yum; Woo Kim, 2010; Follador et al., 2012b; Niavarani et al., 2012; Walter et al., 2013; Pedott e Fogliatto, 2013; Zanobini et al., 2016), o que forneceu suporte bibliográfico e orientação ao desenvolvimento da pesquisa.

As técnicas de CEP foram desenvolvidas para avaliar a variabilidade de processos de produção ou sistemas de medição a curto e longo prazos, sendo que os gráficos de controle figuram como apenas uma das chamadas “sete ferramentas da qualidade”. São consideradas por Montgomery e Runger (2003) como uma das ferramentas mais eficazes na detecção de causas não aleatórias de variação.

O controle estatístico da qualidade visa a melhoria constante na rotina de um processo, seja de produção ou de medição, uma vez que permite aos profissionais da qualidade detectar oportunamente situações fora de controle e tomar decisões sempre que necessário, a fim de garantir que os produtos ou serviços prestados atendam aos requisitos mínimos de qualidade desejados (Psarakis; Vyniou; Castagliola, 2013). Montgomery (2016) apresenta o controle de qualidade sob os aspectos do planejamento de experimentos, da aplicação do Manual de Referência para Análise de Sistemas de Medição (“Measurement Systems Analysis” – Reference Manual – MSA 4ª Edição), conforme AIAG (2010), e do controle estatístico de processos (CEP) propriamente dito.

Em ensaios laboratoriais de material de irrigação normalmente são monitorados parâmetros como pressão da água na entrada da tubulação, vazão, perda de carga, e temperaturas da água e do ambiente. Algumas das variáveis citadas devem ser monitoradas e controladas, enquanto as outras devem ser apenas monitoradas durante a realização de ensaios. Assim, ferramentas de controle de processos constituem possíveis alternativas para a avaliação dos sistemas de medição e controle adotados, possibilitando ainda o diagnóstico rápido e eficaz na prevenção e detecção de problemas na obtenção das medidas (Sanders, 1995). Tais ferramentas são técnicas estatísticas e constituem-se dos histogramas, folhas de verificação e controle, gráfico de Pareto, diagrama de Ishikawa ou de causa e efeito, diagramas de concentração de defeitos, diagramas de dispersão, e cartas ou gráficos de controle; totalizando as chamadas “sete ferramentas da qualidade” referidas acima.

2.1. Controle estatístico de processos (CEP)

Em sistemas de produção, o controle estatístico de processos tem como objetivo detectar rapidamente alterações dos parâmetros de determinados processos para que os problemas possam ser corrigidos antes que muitos itens não conformes sejam produzidos (Mingoti; Fidelis, 2001; Silva et al., 2008). As análises de estabilidade e capacidade de processos ou de um sistema de medição dizem respeito à sua uniformidade, sendo comum na implementação do CEP e considerada por Montgomery (2016) de vital importância para um programa de melhoria da qualidade. Na sequência são apresentados os conceitos básicos para avaliação e interpretação de padrões indicativos do nível de estabilidade de um determinado processo, que pode ser dito estável (controlado) ou instável (fora de controle); além de definições necessárias para avaliar se o mesmo apresenta capacidade satisfatória ou não.

2.1.1. Análise de estabilidade, tendências e linearidade (Gráficos de controle)

Na análise de estabilidade podem ser adotados gráficos de controle de Shewhart para médias ($\bar{\bar{X}}$) e dispersão dos dados (R e S), sendo a carta R (amplitude) mais sensível a causas especiais de variação quando se trabalha com tamanho amostral fixo e relativamente reduzido ($n \leq 10$). Analogamente, a carta S (desvio padrão) é preferível para n elevado ou variável. Além disso, podem ser utilizados ainda os gráficos CUSUM (Somas Cumulativas) e MMEP (Média Móvel Exponencialmente Ponderada), ambos apresentando a vantagem da maior sensibilidade a pequenas causas de variação em relação aos anteriores (Reynolds JR.; Stoumbos, 2009; Follador et al., 2012a; Walter et al., 2013), e apresentando a particularidade de tamanho de subgrupo racional preferencialmente igual a 1, por ocasião da sua utilização. Entende-se por tamanho de subgrupo racional o número de ensaios ou observações realizadas para compor uma amostra (Montgomery, 2016).

Um dos pressupostos para elaboração dos gráficos de controle de Shewhart e análise de capacidade é a aderência dos dados do processo à função de densidade de probabilidade normal. Porém, não incomum é a ocorrência de distribuição não normal na saída de um processo (Balestrassi; Ferreira; Moraes, 2006; Montgomery, 2016), de modo que se a suposição inicial de normalidade não for atendida torna-se necessária a busca por distribuições adequadas. Nesse sentido, a aplicação de funções de transformação aos dados medidos, como as de Box-Cox (Eq. 1) e Johnson (Eq. 2), ou a utilização de métodos alternativos não paramétricos, como os apresentados por Clements (1989), Pearn e Chen (1997) e Chen e Ding (2001), figuram como possíveis soluções para o caso de dados não

normais na aplicação do CEP à saída de um processo (Farnum, 1997; Gonzalez; Werner, 2009). Alternativamente, os gráficos de controle para somas cumulativas (do tipo CUSUM) ou média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) também podem ser adotadas sem maiores preocupações quanto à necessidade de aproximação dos dados do processo à distribuição normal (Vargas; Lopes; Souza, 2004; Yang et al., 2011).

$$Z = \begin{cases} \frac{X^\theta - 1}{\theta}, & \theta \neq 0 \\ \ln X, & \theta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$Z = \begin{cases} \gamma + \eta \ln(X - \varphi); \eta > 0, -\infty < \gamma < \infty, -\infty < \varphi < \infty, X > \varphi \\ \gamma + \eta \sinh^{-1}\left(\frac{X - \varphi}{\theta}\right); \eta, \theta > 0, -\infty < \gamma < \infty, -\infty < \varphi < \infty, -\infty < X < \infty \\ \gamma + \eta \ln\left(\frac{X - \varphi}{\theta + \varphi - X}\right); \eta, \theta > 0, -\infty < \gamma < \infty, -\infty < \varphi < \infty, \varphi < X < \theta + \varphi \end{cases} \quad (2)$$

em que:

X – dados a serem transformados;

γ, η, φ e θ – parâmetros de ajuste da respectiva transformação; e

Z – dados normalizados após a transformação.

Os pontos a serem plotados nos gráficos CUSUM são definidos conforme Eq. 3, de modo que os desvios da média ou de cada observação individual ($\bar{X}_j$) em relação à média do processo (μ_0) ou valor alvo (T) são acumulados. Para a média do processo sob controle, os desvios positivos (C_i^+) serão compensados pelos desvios negativos (C_i^-), e a fórmula oscilará aleatoriamente em torno do valor zero. Caso isto não ocorra, os desvios aumentarão ou diminuirão indefinidamente e o processo estará fora dos limites de controle, definidos pelo afastamento simétrico de distância 3σ acima e abaixo da linha central (Costa; Epprescht; Carpinetti, 2004; Follador et al., 2012a; Follador et al., 2012b; Montgomery, 2016).

$$C_i = \sum_{j=1}^i (\bar{X}_j - \mu_0) \quad (3)$$

em que:

$\bar{X}_j$ – média da j -ésima amostra de tamanho de subgrupo $n \geq 1$.

Os pontos dos gráficos MMEP são definidos pela Eq. 4, que concede pesos para as informações mais atuais em relação às mais remotas através do “fator de suavização λ ” ($0 \leq \lambda \leq 1$). Quando λ se aproxima de zero, maior é a importância das observações recentes, em

relação àquelas que estão no horizonte de tempo mais distante. Para $\lambda = 1$, a MMEP torna-se uma média simples (Follador et al., 2012a; Montgomery, 2016). Segundo Souza et al. (2008), é conveniente que se adote ponderação $\lambda \leq 0,5$ quando se deseja detectar mudanças no deslocamento da média sob controle de até dois desvios padrão, sendo este valor definido pela equipe técnica de avaliação. Montgomery (2016) afirma que comumente λ varia de 0,05 a 0,25, sendo frequentemente padronizado pela maioria dos pacotes computacionais o valor de $\lambda = 0,2$.

$$Z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)Z_{i-1} \quad (4)$$

em que:

λ – fator de ponderação (normalmente $0,05 \leq \lambda \leq 0,25$); e

i – tamanho amostral.

*para $i = 1$, $Z_0 = \mu_0$ (valor-alvo ou média em controle de x_i).

Em relação aos gráficos de controle de Shewhart, são apresentados exemplos conforme ilustração da Figura 1a; e as formulações para determinação dos limites de controle das cartas de médias e amplitudes (Eqs. 5 a 10), baseando-se em m amostras de tamanho n (tamanho de subgrupo racional). Por outro lado, cartas CUSUM e MMEP são representadas nas Figuras 1b e 1c, com os limites de controle determinados conforme Eqs. 11, 12, 13, 14 e 15, respectivamente. Segundo Montgomery e Runger (2003), o parâmetro k das equações 11 e 12 é chamado valor de referência, sendo geralmente escolhido no meio do caminho entre o valor alvo (ou μ_0) e o valor da média correspondente ao estado de fora de controle, $\mu_1 = \mu_0 + \Delta$. Desta forma, k é de aproximadamente metade da variação Δ de interesse de ser detectada no gráfico CUSUM. Para a elaboração e análise desses gráficos, existem softwares com pacotes específicos dedicados a este fim, como é o caso do Minitab® e do R; ou mesmo podem ser criados a partir de simples planilhas de Excel.

a

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} = \bar{\bar{X}} + \frac{3}{d_2 \sqrt{n}} \bar{R} \quad (5)$$

$$LC = \bar{\bar{X}} \quad (6)$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} = \bar{\bar{X}} - \frac{3}{d_2 \sqrt{n}} \bar{R} \quad (7)$$

$$LSC = \bar{R} + 3\hat{\sigma}_R = D_4 \bar{R} = \bar{R} + 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (8)$$

$$LC = \bar{R} \quad (9)$$

$$LIC = \bar{R} - 3\hat{\sigma}_R = D_3 \bar{R} = \bar{R} - 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (10)$$

b

$$C_i^+ = \max[0, x_i - (\mu_0 + k) + C_{i-1}^+] \quad (11)$$

$$C_i^- = \max[0, (\mu_0 - k) - x_i + C_{i-1}^-] \quad (12)$$

Normalmente:

Valores iniciais de $C_i^+ = C_i^- = 0$ para $n = 1$; e

$$k = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{2}$$

c

$$LSC = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1-\lambda)^{2i}]} \quad (13)$$

$$LC = \mu_0 \quad (14)$$

$$LIC = \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1-\lambda)^{2i}]} \quad (15)$$

Figura 1. Exemplos de gráficos de controle de Shewhart (a), CUSUM (b) e MMEP (c), respectivamente, para pressão de ensaio de microaspersores

em que:

LSC e LIC – limites superior e inferior de controle para a característica da qualidade;

LC – linha central, que reflete a média das m amostras ($\bar{\bar{X}}$);

- n – tamanho amostral para gráficos $\bar{X}$ e R ;
 i – tamanho amostral para gráficos CUSUM e MMEP;
 A_2, d_2, d_3, D_3, D_4 – constantes tabeladas em função de n ;
 $\bar{\bar{X}}$ – média das médias dos subgrupos;
 R – amplitude média das m amostras; e
 $\hat{\sigma}_R$ – estimador do desvio padrão da amplitude ($\hat{\sigma}_R = d_3 \frac{\bar{R}}{d_2}$).

Usualmente é adotada distância "L" entre os limites de controle igual a 3σ para concepção da carta MMEP. Cartas CUSUM (Figura 1b) e MMEP (Figura 1c), por sua vez, são indicadas para processos robustos, ou seja, processos em que causas especiais de variação tendem a ser cada vez menos expressivas, e a magnitude dos desvios tende a diminuir (Follador et al., 2012a; Folador et al., 2012b; Montgomery, 2016). Isto quer dizer que tais gráficos de controle evidenciam sinais de processo fora de controle mais rapidamente e são mais eficazes para detecção de pequenos desvios da média do processo. Zhou et al. (2008) combinaram gráficos de Shewhart e CUSUM para monitorar a qualidade da água, percebendo a importância de seu uso para processos controlados. Abordagens que levam em consideração o uso combinado, como o gráfico de "status" do CUSUM, podem conduzir a benefícios na interpretação do nível de controle do processo (Abujiya; Riaz; Lee, 2012). São plotados num só gráfico o intervalo de decisão H , definido por Souza et al. (2008) e que reflete a largura da faixa de controle no gráfico, os valores de CUSUM superior (C_i^+) e inferior (C_i^-), e a estatística observada para a amostra x_i em cada período. Isto permite analisar e interpretar possíveis particularidades observadas na CUSUM e associá-las às amostras nas quais ocorreram (Montgomery; Runger, 2003).

De forma geral, um processo é dito estável quando a variabilidade se mantém dentro dos limites de controle, sem padrões indicativos cíclicos, tendências ou não aleatoriedade dos dados. Normalmente, tal análise se baseia nas seguintes regras sensibilizantes (regras de interpretação), criadas no intuito de acelerar a detecção de alterações (Walter et al., 2013; Montgomery, 2016):

- Um ou mais pontos fora dos limites de controle;
- Dois ou três pontos consecutivos fora dos limites de alerta 2σ ;
- Quatro ou cinco pontos consecutivos além dos limites de 1σ ;
- Sequência de oito pontos consecutivos de um mesmo lado da linha central (LC);
- Seis pontos em uma sequência sempre crescente ou decrescente;

- Quinze pontos em sequência na faixa de controle, acima ou abaixo da LC;
- Quatorze pontos em sequência, alternando acima e abaixo da LC;
- Oito pontos em sequência de ambos os lados da LC, fora da faixa de controle;
- Padrão incomum ou não-aleatório dos dados; e
- Um ou mais pontos próximos aos limites de alerta ou de controle.

Vale lembrar que as regras sensibilizantes mencionadas constituem apenas sinal de alerta para o nível de estabilidade do processo, o que demanda a identificação e tentativa de eliminação das possíveis causas associadas. Segundo Werkema (1995), citado por Nomelini et al. (2009), padrões de não aleatoriedade podem ser identificados por algumas ocorrências como pontos fora de controle, mistura, descolamento no nível do processo, padrões cíclicos, tendência e estratificação.

Conforme Montgomery (2016), pontos fora dos limites de controle constituem a indicação mais evidente da ausência de controle do processo, associando-se a erros de medição, instrumentos descalibrados, erros de operador ou defeitos em equipamentos. Mistura caracteriza-se por poucos pontos próximos à linha central (LC) e associa-se à segregação dos dados conforme duas ou mais distribuições de probabilidade superpostas. O deslocamento no nível do processo está associado a inovações metodológicas e técnicas capazes de causar deslocamento na média do processo. Tendência refere-se ao movimento contínuo dos valores em uma direção e pode ser ocasionada em função do desgaste de instrumentos, condições ambientais e fadiga de operador. Padrões cíclicos são caracterizados pela sucessão de grupos de observações dispostos acima e abaixo da linha central das cartas de controle, assemelhando-se a uma senóide. Estratificação caracteriza-se pela acentuada ausência de variabilidade, havendo agrupamento dos dados em torno da linha central e distância relativamente grande em relação aos limites de controle, e tendo como possível causa o cálculo incorreto dos limites superior e inferior de controle.

Os diversos tipos de gráficos de controle apresentados servem para o mesmo propósito, o de avaliar o nível de estabilidade do processo ou sistema de medição. Desse modo, pontos fora dos limites de controle, padrões cíclicos, de tendência, deslocamento de nível e estratificação, caso ocorram, possivelmente aparecerão em mais de um tipo gráfico, supondo-se o mesmo conjunto de dados. Então, cabe ao engenheiro da qualidade definir que tipo de gráfico adotar em cada caso específico; lembrando que esta escolha deve ser sustentada por critérios técnicos, a exemplo do tamanho amostral, aderência dos dados à distribuição normal quando se trabalha com gráficos que exigem tal condição, magnitude da variabilidade do processo. Gráficos CUSUM e MMEP, por exemplo, são mais sensíveis a

pequenas variações do que gráficos de Shewhart; assim como o gráfico MMEP dispensa exigência de aderência dos dados à distribuição normal, sendo que fora tratado por Montgomery (2016) quase como um procedimento não paramétrico, conforme detalhado anteriormente.

2.1.2. Análise de capacidade de processos e sistemas de medição

No que diz respeito à análise de capacidade, Vannman (1998) relata que são utilizados índices para determinar se um processo, que pode ser de produção, medição ou prestação de serviços, é capaz de atender a uma faixa de tolerância ou manter-se próximo de um valor especificado. Tais índices referem-se à variação inerente medida na saída de um processo em relação à variação máxima permitida estabelecida por requisitos normativos ou mesmo exigência de um cliente (Montgomery, 2016), sendo que devem ser analisados após teste de aproximação à distribuição normal e com processo sob controle estatístico. Juchen et al. (2013) utilizaram gráficos de controle de Shewhart e índices de capacidade para avaliar a qualidade de um sistema de fertirrigação em cultivo de alface. Este índice mostrou-se capaz de diagnosticar se a irrigação por aspersão tem capacidade de se manter sob controle e constante, ou seja, se seria capaz de se manter acima do nível mínimo desejável para a uniformidade do sistema (Justi et al., 2010). Cartas de controle e índices de capacidade também foram utilizados por Hermes et al. (2013) para avaliar a uniformidade de irrigação e fertirrigação com água residuária do processamento de mandioca, em sistema de irrigação por gotejamento.

A capacidade de um processo, seja de produção ou medição, pode ser analisada em termos dos índices C_p , C_{pl} , C_{pu} , C_{pk} , e C_{pm} , dentre outros. Tais índices relacionam a variação máxima permitida, ou tolerância, com a variação obtida do processo, relativa aos limites de controle 6σ , conforme Eqs. 16, 17, 18, 19 e 20. Pelo fato de representarem os limites que ocorrerão na maioria das vezes num processo sob controle, os limites de $\pm 3\sigma$ em torno da média do processo são algumas vezes chamados de limites naturais de tolerância, o que também conduz à interpretação de 6σ como a largura do processo (Montgomery; Runger, 2003).

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}} \quad (16)$$

$$C_{pl} = \frac{\mu_0 - LIE}{3\hat{\sigma}} \quad (17)$$

$$C_{pu} = \frac{LSE - \mu_0}{3\hat{\sigma}} \quad (18)$$

$$C_{pk} = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}} \left(1 - \frac{|T - \mu_0|}{0,5(LSE - LIE)} \right) \quad (19)$$

$$C_{pm} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\hat{\sigma}^2 + (\mu_0 - T)^2}} \quad (20)$$

em que:

LSE – limite superior de especificação;

LIE – limite inferior de especificação;

$\hat{\sigma}$ – estimador do desvio padrão ($\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}$);

T – valor nominal para a característica da qualidade (valor de referência); e

μ_0 – média do processo.

Além de descrever a capacidade efetiva e quão bem o processo se encaixa nos limites de especificação, os índices C_{pk} , C_{pl} , C_{pu} e C_{pm} são mais sensíveis ao deslocamento do processo e, portanto, utilizados para avaliar a centralização da média do processo (Silva; Pinto Júnior, 2010). Quanto maior a variabilidade, menores são estes índices, sendo normalmente considerados adequados quando maiores ou iguais a um (Chun-Tsai; Che-Chen, 2006; Kaya; Kahraman, 2010).

De acordo com Montgomery (2016), o processo é capaz se os limites de especificação estabelecidos previamente por normas, pelo cliente ou pela própria equipe de avaliação forem suficientemente maiores que a faixa de controle. Outra interpretação pode ser obtida a partir da Tabela 1 (Tsai; Chen, 2006; Kaya; Kahraman, 2010; Kaya; Kahraman, 2011), sendo que o índice C_p mede a capacidade potencial e se refere ao enquadramento do processo dentro dos limites de especificação, porém sem considerar a posição/deslocamento da média em relação ao valor alvo (Figura 2). Em outras palavras, mede somente a largura das especificações em relação à dispersão seis-sigma do processo.

Além disso, índices de desempenho do processo P_p , que possuem os mesmos subscritos dos índices de capacidade C_p , também são fornecidos por alguns pacotes computacionais, como é o caso das ferramentas Action Stat® (ESTATCAMP, 2016), desenvolvidos sobre a plataforma R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2016) e incorporados ao Excel como suplemento; e também do pacote Minitab®.

Tabela 1. Situação da qualidade vs C_p

Situação da qualidade	Valor de C_p
Excelente	$C_p \geq 2,00$
Muito boa	$1,67 \leq C_p \leq 2,00$
Satisfatória	$1,33 \leq C_p \leq 1,67$
Capaz	$1,00 \leq C_p \leq 1,33$
Inadequada	$0,67 \leq C_p \leq 1,00$
Inaceitável	$C_p < 0,67$

Figura 2. Exemplo de índices de capacidade do processo de ajuste manual da pressão de ensaio em bancada de microaspersores

Os índices C_p , com seus respectivos subscritos como descrito anteriormente, representam o nível potencial ao qual o processo poderia chegar se todas as causas especiais fossem eliminadas, sendo calculados utilizando a variação dentro de subgrupos (σ_{dentro}); já os índices de desempenho P_p (P_p , P_{pl} , P_{pu} , e P_{pk}) se referem à capacidade global do processo, ou seja, refletem o real desempenho do processo em relação aos limites de especificação, sendo que são obtidos a partir do desvio padrão global (σ_{global}), sem considerar a possível ocorrência de subgrupos com desvios padrão internos diferenciados (Montgomery, 2016).

2.2. Repetitividade e reprodutibilidade de um sistema de medição (Gage RR)

O planejamento experimental pode ser utilizado tanto no desenvolvimento de um processo quanto na solução de problemas no mesmo, sendo intimamente correlacionado ao CEP e à aplicação do MSA – 4ª Edição (AIAG, 2010). Montgomery (2016) comenta que estas técnicas podem ainda produzir resultados melhorados, com variabilidade reduzida e conformidade mais próxima da desejada, além de redução no tempo e custo de desenvolvimento do processo.

Dois métodos são normalmente utilizados na análise de sistemas de medição (estudo Gage RR): (1) abordagem de análise de variância (ANOVA) para estimativa das componentes de variabilidade; (2) método da amplitude, que considera um algoritmo tabular para estimar os desvios padrão associados às componentes de variabilidade do sistema de medição (Burdick; Borror; Montgomery, 2003; Klaput; Plura, 2012). Burdick, Borror e Montgomery (2003) afirmam ainda que o método da amplitude é pouco robusto e não permite o cômputo

dos intervalos de confiança para as medidas de dispersão, ainda que estejam inseridos na maioria dos pacotes computacionais para estudos de Gage RR; enquanto o método da ANOVA mostra-se bastante confiável e tem se tornado amplamente utilizado, além de fornecer os intervalos de confiança para médias, variâncias e desvios padrão.

Segundo AIAG (2010), a aplicação de modelos de ANOVA para ensaio de repetitividade e reprodutibilidade (Gage RR) de um sistema de medição replicável, com ou sem efeito de interação entre operador e instrumento de medição, por exemplo, permite avaliar o erro de medição e outras fontes de variabilidade por meio de experimentos cruzados com dois fatores: operador e instrumento de medição, sendo o grau de influência de cada fator facilmente compreendido, assim como a variabilidade inerente à própria peça medida.

AIAG (2010) sugere um modelo simples para a variabilidade total observada em uma medida (σ^2_{total}), a qual é devida à soma da variabilidade inerente ao próprio produto ($\sigma^2_{\text{produto}}$) com a variabilidade do sistema de medição ($\sigma^2_{\text{medidor}}$), decorrente do erro de mensuração, conforme Eq. 21 (White; Borror, 2011; Montgomery, 2016).

$$\sigma^2_{\text{total}} = \sigma^2_{\text{produto}} + \sigma^2_{\text{medidor}} \quad (21)$$

Muitas vezes é de interesse separar estas componentes de variância e determinar as contribuições parciais na variância total observada. No que diz respeito à componente de variância do sistema de medição ($\sigma^2_{\text{medidor}}$), é comum se investigar a repetitividade e a reprodutibilidade, ambas componentes do erro de mensuração. Segundo Montgomery (2016), à repetitividade se associa a variância $\sigma^2_{\text{repetitividade}}$, sendo que representa a aptidão de um instrumento de medição em fornecer indicações muito próximas, em repetidas aplicações do mesmo mensurando, sob as mesmas condições de medição, inclusive o operador, e reflete a precisão básica inerente ao próprio medidor. Por outro lado, a reprodutibilidade ($\sigma^2_{\text{reprodutibilidade}}$) refere-se à variação na obtenção de uma mesma medida por diferentes operadores, ambientes e/ou tempos de observação; de modo geral sob condições diferenciadas (BIPM; IEC; IFCC; ILAC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML, 2012). Vale ressaltar que o efeito da reprodutibilidade pode ser nulo no estudo completo de repetitividade e reprodutibilidade (Gage RR) quando se tem apenas um operador ou com sistema automático de aquisição de dados, ou seja, condições de obtenção das medidas não variam. E ainda, a abordagem do estudo Gage RR permite isolar e quantificar as porcentagens de contribuição de cada fonte de

variação na variância total da medida obtida, assim como possíveis efeitos de interação entre estas.

Exemplificando para melhor entendimento, ao selecionar “a” condições de medição (períodos diferentes de tempo, diferentes operadores, formas de ajustes ou ambientes de medição, dentre outras) e “b” emissores aleatoriamente, considerando que as características de fluxo em cada emissor “b” seja medida “n” vezes, pode-se representar o modelo de medição conforme Eq. 22, para as medidas y_{ijk} (i = condição de medição; j = emissores; k = repetição), sendo μ a média geral dos dados.

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, 3, \dots, a \\ j = 1, 2, 3, \dots, b \\ k = 1, 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (22)$$

Os parâmetros τ_i , β_j , $(\tau\beta)_{ij}$ e ε_{ijk} representam os efeitos do nível “i” do fator condição de medição (normalmente operador; ou turno de trabalho a exemplo da presente pesquisa); do nível “j” do fator peça (ou emissores no presente estudo); os possíveis efeitos de interação entre emissor e condição de medição (nível “ij”); e o erro aleatório, respectivamente. Supondo-se que tais parâmetros tenham distribuição normal, a variância total das observações $V(y_{ijk})$ pode ser obtida pela soma das componentes parciais da variabilidade total segundo a Eq. 23. Estas, por sua vez, são obtidas normalmente como função das somas dos quadrados dos erros e do número de graus de liberdade em cada fonte de variação.

$$V(y_{ijk}) = \sigma^2_{\tau} + \sigma^2_{\beta} + \sigma^2_{\tau\beta} + \sigma^2 \quad (23)$$

em que:

σ^2_{β} = variabilidade do emissor;

$\sigma^2_{\tau} + \sigma^2_{\tau\beta}$ = componente de variação relativa à reprodutibilidade ($\sigma^2_{\text{reprodutibilidade}}$); e

σ^2 = componente de variação relativa à repetitividade ($\sigma^2_{\text{repetitividade}}$).

O objetivo da ANOVA no estudo de repetitividade e reprodutibilidade é testar a hipótese de igualdade das médias ou dos efeitos dos fatores e da interação serem iguais a zero (Pedott; Fogliatto, 2013). Segundo Zanobini et al. (2016), é possível considerar β_j como o desvio da média geral μ , conforme Eq. 22, de modo que ao buscar a igualdade entre as médias

também está sendo testada a igualdade de efeitos de níveis, podendo ainda ser definido o teste de hipótese como a Eq. 23.

$$\sum_{j=1}^b \beta_j = 0 = \sum_{j=1}^b (\mu_j - \mu) \quad (22)$$

$$\begin{cases} H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0 \\ H_1: \beta_j \neq 0 \end{cases} \quad (23)$$

Semelhante à ANOVA de experimentos planejados tradicionais, calculam-se as variâncias a partir das somas quadráticas dos desvios. A soma quadrática da condição de medição, que normalmente consiste da soma de desvios entre técnicos ou operadores ($SQ_0 = SQ_C = SQ_{\text{Turnos}}$ na presente pesquisa); a soma quadrática de peças, como sendo a soma de desvios entre emissores ($SQ_P = SQ_E = SQ_{\text{Emissores}}$); a soma quadrática da interação (SQ_I); a soma quadrática dos resíduos (SQ_R); e a soma quadrática total (SQ_T) são obtidas mediante as Eqs. 24, 25, 26, 27 e 28, respectivamente.

$$SQ_C = bn \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 \quad (24)$$

$$SQ_E = an \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{.j.} - \bar{y}_{...})^2 \quad (25)$$

$$SQ_I = n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{y}_{ij.} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 \quad (26)$$

$$SQ_R = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{ij.})^2 \quad (27)$$

$$SQ_T = SQ_C + SQ_E + SQ_I + SQ_R = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 \quad (28)$$

Considerando a Eq. 28, tem-se $(abn - 1)$, $(a - 1)$, $(b - 1)$, $(a - 1)(b - 1)$ e $ab(n - 1)$ graus de liberdade (GL) para SQ_T , SQ_C , SQ_E , SQ_I e SQ_R , respectivamente. Dividindo-se as somas quadráticas por GL, obtêm-se as médias quadráticas associadas a cada fator, as quais são utilizadas para se chegar aos desvios associados a cada componente no estudo de repetitividade e reprodutibilidade do sistema de medição (Gage RR).

Conforme Pedott e Fogliatto (2013), se o efeito de um fator for significativo, o valor esperado da média quadrática do fator deve ser diferente da média quadrática dos resíduos, sendo que a verificação desta condição é feita pela aplicação do teste F a cada fator e possível interação do estudo. Em geral, a interação não deve ser significativa, sendo recomendado nesses casos a unificação das somas quadráticas somando-se SQ_I e SQ_R , da mesma forma que se somam também os graus de liberdade associados aos resíduos e a interação testada para a

nova formulação da ANOVA, gerando novos número de graus de liberdade e valores para as médias quadráticas e correspondentes valores de F (Montgomery; Runger, 2003).

Nos estudos de repetitividade e reprodutibilidade (Gage RR), as componentes de variação do sistema de medição são comparadas à variação total, sendo frequentemente representadas pelo desvio padrão 6σ , por σ simplesmente, ou pela variância σ^2 . O uso do desvio padrão é mais recomendado por ser mais fácil interpretá-lo fisicamente do que a variância. No manual da “Automotive Industry Action Group” (AIAG, 2010), é definido que caso a média quadrática da interação (MQI) seja maior que a média quadrática dos técnicos de medição ou avaliadores, ou ainda, basicamente da condição de medição (MQC), a variância associada às incertezas de reprodutibilidade deve ser considerada nula; se MQI for maior que a média quadrática das peças, ou emissores na presente pesquisa (MQE), a variância associada às peças deve ser considerada nula; e ainda, se a média quadrática dos resíduos (MQR) for maior que MQI, a variância inerente a efeitos de interação deve ser nula (Pedott; Fogliatto, 2013).

Nesse contexto, são apresentadas na Tabela 2 as formulações para obtenção dos desvios padrão associados a cada fonte de variabilidade de um sistema de medição, assim como as porcentagens de contribuição em relação à variação total.

Tabela 2. Componentes de variabilidade de um sistema de medição

Fonte de variação	Desvio padrão	Percentual da variação total (%)
Repetitividade	$\sigma_{\text{repetitividade}} = \sqrt{\text{MQR}}$	$\% \sigma_{\text{repet.}} = 100 \frac{\sigma_{\text{repetitividade}}}{\sigma_{\text{total}}}$
Reprodutibilidade	$\sigma_{\text{reprodutibilidade}} = \sqrt{\frac{\text{MQC} - \text{MQI}}{an}}$	$\% \sigma_{\text{reprod.}} = 100 \frac{\sigma_{\text{reprodutibilidade}}}{\sigma_{\text{total}}}$
Interação (Emissor*Condição)	$\sigma_{\text{interação}} = \sqrt{\frac{\text{MQI} - \text{MQR}}{n}}$	$\% \sigma_{\text{interação}} = 100 \frac{\sigma_{\text{interação}}}{\sigma_{\text{total}}}$
Peça (Emissores)	$\sigma_{\text{emissores}} = \sqrt{\frac{\text{MQI} - \text{MQR}}{bn}}$	$\% \sigma_{\text{emissores}} = 100 \frac{\sigma_{\text{emissores}}}{\sigma_{\text{total}}}$
RR	$\sigma_{\text{RR}} = \sqrt{\sigma_{\text{repet.}}^2 + \sigma_{\text{reprod.}}^2 + \sigma_{\text{int.}}^2}$	$\% \sigma_{\text{RR}} = 100 \frac{\sigma_{\text{RR}}}{\sigma_{\text{total}}}$
Total	$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{RR}}^2 + \sigma_{\text{emissores}}^2}$	

Derivado da ANOVA de repetitividade e reprodutibilidade, o índice número de categorias distintas (NDC), também chamado razão sinal-ruído (SNR), normalmente também é utilizado como critério para interpretação da condição que se encontra a qualidade do sistema

de medição (Gargía; Rio, 2013; Al-Refaie; Bata, 2016; Dalalah; Hani, 2016), sendo que é obtido pela Eq. 29 (Montgomery, 2016).

$$NDC = \sqrt{2} \frac{\sigma_{\text{Emissor}}}{\sigma_{\text{Gage RR}}} \quad (29)$$

em que:

σ_{Emissor} = desvio padrão associado às peças (emissores); e

$\sigma_{\text{Gage RR}} = \sigma_{\text{RR}}$ = desvio padrão associado às incertezas de repetitividade e reprodutibilidade (sistema de medição).

Critérios de aceitação, definidos em AIAG (2010) e apresentados na Tabela 3, tem sido bastante utilizados e relatados por diversos pesquisadores para definir se o sistema de medição pode ser aprovado ou não (Al-Refaie; BATA, 2010; Pedott; Fogliatto, 2013; Peruchi et al., 2014; Pereira et al., 2016; Zanobini et al., 2016).

Tabela 3. Critérios de aprovação para contribuição do sistema de medição (Gage RR) e número de categorias distintas (NDC)

Gage RR em relação ao σ_{total} (%)	NDC	Interpretação	Observações quanto ao sistema de medição
$\leq 10,0$	$\geq 5,0$	Bom (Adequado)	Recomendável, especialmente útil quando tentamos ordenar ou classificar peças ou quando for requerido um controle bastante rigoroso do processo.
Entre 10,0 e 30,0	Entre 2,0 e 5,0	Aceitável	O sistema de medição pode ser aceito, devendo a decisão ser baseada na importância da aplicação da medição, custos e limitações dos dispositivos de medição e no custo de aperfeiçoamento.
$> 30,0$	$< 2,0$	Ruim (Inadequado)	Esforços devem ser tomados para melhorar o sistema de medição. Aumentar o número de repetições pode ser uma alternativa para reduzir a variabilidade da medida final.

Normalmente, se não forem encontrados pontos fora dos limites 6σ dos gráficos de controle e o processo de medição e ajuste das variáveis características da qualidade apresentarem capacidade satisfatória, considera-se desnecessária a aplicação do MSA – 4ª Edição (AIAG, 2010; BIPM; IEC; IFCC; ILAC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML, 2012). Porém, uma vez verificado sistema instável, padrões de tendência associados ao erro sistemático de

obtenção das medidas devem ser analisados, assim como o erro aleatório referente à repetitividade. É importante lembrar que na determinação da componente de reprodutibilidade, torna-se necessária a medição do mesmo mensurando sob diferentes condições, sejam estas representadas por diferentes laboratórios, técnicos, instrumentos de medição e controle, ou outras.

O método da ANOVA para repetitividade e reprodutibilidade de sistemas de medição (Gage RR) também é bastante oportuno para estudos de comparação intralaboratorial e interlaboratorial. Embora não tenham utilizado esse método, pesquisas dessa natureza relacionadas à área de irrigação foram feitas para comparar o desempenho de diferentes instalações, pertencentes a laboratórios da “International Network of Irrigation Testing Laboratories” (INITL), na determinação de curvas vazão-pressão de aspersores rotativos (Koech et al., 2015a) e gotejadores (Koech et al., 2015b). Com aspersores, pelo menos dois testes de cada instalação apresentaram desvios da vazão reconstituída acima dos limites recomendados, lembrando que a vazão reconstituída é o somatório das intensidades de precipitação ao longo do raio de alcance do aspersor; e diferenças entre a vazão medida e a reconstituída podem ser associadas a perdas de água por evaporação ou imperfeições na execução do ensaio. Já no trabalho com emissores de gotejamento, foram identificadas oportunidades de melhoria nos processos de medição utilizados, sendo que pelo menos um dos laboratórios apresentou incerteza de medição diferente dos demais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Ensaios de Material de Irrigação (LEMI/INCT-EI/ESALQ/USP). Priorizou-se neste estudo a implementação de algumas das sete ferramentas da qualidade, enumeradas em sequência, e análise dos sistemas de controle e medição empregados nas bancadas de ensaio de microaspersores e gotejadores/tubos gotejadores:

1. Histograma
2. Gráfico de Pareto
3. Diagrama de causa e efeito (Diagrama de Ishikawa)
4. Diagrama de defeito-concentração
5. Gráficos (ou cartas) de controle
6. Diagrama de dispersão
7. Folha de verificação

A seguir, são apresentados os procedimentos adotados; a estrutura e instrumentos de medição utilizados em cada bancada de ensaio; e os respectivos experimentos executados para as avaliações.

3.1. Ensaio para determinação da curva vazão-pressão e uniformidade de vazão de microaspersores

Os ensaios para determinação da curva vazão-pressão e da uniformidade de vazão de microaspersores foram executados seguindo as referências normativas da NBR 15084 (ABNT, 2004). O LEMI dispõe de bancada de ensaio especialmente projetada para este propósito (Figura 3), de modo que a relação vazão-pressão foi determinada com base em sete combinações de pressão e correspondente vazão, efetuando-se medições em, pelo menos, quatro emissores do lote sob avaliação. A uniformidade de vazão, expressa pelo coeficiente de variação de vazão devido a efeitos de fabricação (CVFq), requer a composição da amostragem a partir de pelo menos 13 peças (emissores) retiradas aleatoriamente do lote, avaliadas sob uma ou mais pressões de ensaio. Ressalta-se que todo o procedimento técnico de testes é fundamentado e regido pela norma; e que foram previamente definidas como características da qualidade para o ensaio as variáveis pressão, temperatura da água e vazão do emissor.

Figura 3. Bancada de ensaios para determinação da curva vazão-pressão e uniformidade de vazão de microasperores

Até recentemente a rotina de ensaios era executada manualmente por um operador treinado, sendo o ajuste da pressão de ensaio realizado alterando-se a rotação da motobomba pelo uso de um inversor de frequência. Geralmente, ajustava-se a pressão para o valor desejado e aguardava-se de 3 a 5 minutos para estabilização do sistema e execução da leitura da indicação de vazão no medidor eletromagnético. Ainda assim, durante e após esse tempo de estabilização, era comum a observação de instabilidades nas indicações do manômetro e do medidor de vazão, principalmente para as maiores vazões de ensaio. Isto apontou para a necessidade de desenvolvimento e instalação do sistema de ajuste da pressão de ensaio via controlador proporcional integrativo-derivativo (PID), o qual foi associado a um sistema automático de aquisição dos dados do ensaio.

3.1.1. Automação dos sistemas de controle da pressão de ensaio, medição e aquisição de dados

Ainda que criteriosamente seguidas as recomendações normativas e o procedimento técnico de ensaio definido, algumas instabilidades da pressão de ensaio ocasionalmente ocorriam. Em virtude disto, e visando minimizar possíveis causas não aleatórias de variabilidade, procedeu-se à automação do ajuste de pressão via controlador proporcional integrativo-derivativo (PID), associado a um sistema automático de aquisição dos dados. Para tal, dispôs-se da ferramenta Simulink do software MATLAB[®], acoplada a uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre e placa única com controlador, portas de entrada e saída digital e analógica, e interface serial/USB para ligação, programação e interação com computador (Arduino[®] Mega 2560). Os controladores PID agem com base no erro entre o valor atual de uma variável de controle e o valor de referência (ponto de ajuste), também denominado de *setpoint* (Leite et al., 2010; apud Pinto et al., 2013), sendo relatada por estes a

existência de potencial de aplicação em processos associados à área de engenharia de irrigação.

Nesse contexto, optou-se por manter a interface de controle do ensaio configurável para operar sob atuação do controlador PID, somente via utilização do inversor de frequência, como era praticado anteriormente, ou ainda sob controle totalmente manual da pressão de ensaio mediante manobras nos registros de gaveta instalados na saída e retorno da motobomba, embora esta última opção nunca tenha sido adotada na rotina de ensaios do LEMI. Isto foi feito no intuito de checar possíveis benefícios da implementação do sistema de controle automatizado por ocasião da aplicação das ferramentas de controle estatístico da qualidade, a exemplo das cartas de controle. A interpretação destas, por sua vez, permitiria a observação clara de erros de medição decorrentes de instrumentos com defeitos ou descalibrados, da operação da estrutura de ensaios; além de tendências, caso ocorressem; e o provável e esperado deslocamento do nível do processo de controle da pressão em função da atuação do controlador PID.

3.1.2. Caracterização e calibração dos instrumentos de medição

As determinações de vazão foram feitas utilizando medidor eletromagnético de vazão apto a operar na faixa de 0 a 90 L h⁻¹, que possui incerteza expandida de 0,5% em relação ao fundo de escala e resolução de 0,01 L h⁻¹. Além disso, também foram utilizados um sensor de temperatura do tipo NTC (“*Negative Temperature Coefficient*”), para o monitoramento das possíveis oscilações de temperatura da água no reservatório; e um transdutor de pressão apto a operar na faixa de 0 a 5 kgf cm⁻², com incerteza expandida de 1% em relação ao fundo de escala e resolução de 0,01 kgf cm⁻².

Foram determinadas equações para correlacionar sinais digitais e indicações dos seguintes instrumentos de medição utilizados durante os ensaios: medidor de vazão eletromagnético, transdutor de pressão e termômetro. A equação para o medidor de vazão foi obtida confrontando os sinais digitais com as indicações apresentadas no *display* do próprio instrumento. As equações para o transdutor de pressão e para o termômetro foram correlacionadas com indicações fornecidas por instrumentos de referência adotados pelo laboratório. A Figura 4 ilustra as curvas obtidas para os referidos instrumentos de medição.

Figura 4. Calibração dos instrumentos de medição utilizados para determinação da curva vazão-pressão e uniformidade de vazão de microaspersores: medidores eletromagnéticos de vazão – 0 a 90 L h^{-1} (a); transdutor de pressão (b); e termômetro NTC (c)

3.1.3. Caracterização dos microaspersores utilizados

Peças de um emissor “micro spray jet - vermelho”, modelo fabricado pela RSB Plásticos[®], oriundas do estoque interno do LEMI, foram utilizadas para as avaliações, sendo apresentada na Figura 5 a relação vazão-pressão para esse modelo de emissor. Esta curva foi levantada a partir de quatro emissores (repetições), com peças selecionadas aleatoriamente.

Figura 5. Relação vazão-pressão para o modelo de microaspersor utilizado nos ensaios

Vale ressaltar que perante os propósitos e metodologia utilizada para esta pesquisa, a marca e/ou modelo de emissor utilizado nos ensaios não implica em interferência qualquer, uma vez que o que se encontrava sob avaliação eram os procedimentos e o sistema de medição em si, e não a marca ou modelo. Entretanto, buscou-se quantificar e separar os efeitos atribuídos à variabilidade total das medidas que fossem decorrentes das variações no processo de fabricação dos emissores (efeitos associados à componente de variação “peça” no estudo de repetitividade e reprodutibilidade). Nesse tipo de estudo normalmente espera-se que o sistema de medição apresente interferência mínima e que a maior parte das contribuições na variância total seja atribuída aos efeitos da variação entre peças.

3.1.4. Ferramentas da qualidade aplicadas à bancada de ensaio de microaspersores

Diagrama de Ishikawa (ou de causa e efeito)

O Diagrama de Ishikawa apresentado na Figura 6 contém fatores que podem influenciar na qualidade dos resultados de ensaio de microaspersores. Tais fatores foram identificados a partir de discussões com a equipe do laboratório, estudo de relatórios de pesquisas internas e relatórios técnicos de ensaios do LEMI. Alguns dos fatores apresentados podem caracterizar causas não aleatórias de variabilidade, sendo que foram identificados e tratados a fim de buscar melhoria contínua do sistema. Isso permite eliminar possíveis interferências no processo de medição decorrentes de causas especiais de variabilidade, caso existam. Com isto, e baseado nas observações realizadas durante testes preliminares, foi

possível julgar e destacar as fontes tidas inicialmente como aquelas com maior potencial de contribuição no erro de mensuração. Estas foram marcadas em negrito e vermelho no diagrama.

Esse tipo de diagrama fornece uma visão geral de muitas das variáveis capazes de influenciar nos resultados de ensaio, sendo útil para identificação de eventuais problemas (não conformidades) ou oportunidades de melhoria. Sempre que problemas ou oportunidades de melhoria forem identificadas, ações são planejadas e executadas e o sistema é reavaliado a fim de verificar o impacto das mudanças realizadas. Em outras áreas do conhecimento é comum denominar este modelo de ciclo PDCA (“Planning” = planejamento; “Do” = fazer/executar; “Check” = checar/estudar; “Act” = agir/implementar), ou simplesmente o famoso ciclo de Deming mencionado do item 1.

Figura 6. Diagrama de Ishikawa para análise dos sistemas de medição e controle em bancada de microaspersão

Gráficos de controle

Após alterações de qualquer natureza na bancada ou no procedimento de ensaios é comum que haja a dúvida sobre o impacto da mudança na qualidade dos resultados de ensaios. A fim de demonstrar o potencial de algumas das ferramentas de controle estatístico da qualidade em tais situações, testes preliminares foram conduzidos para confrontar três possíveis formas de ajuste da pressão de ensaio: (1) ajuste manual utilizando somente registros de gaveta nas tubulações de recalque e retorno da motobomba para o reservatório; (2) ajuste via inversor de frequência, utilizando o potenciômetro disponível na própria interface do equipamento; e (3) uso do controlador PID acoplado ao inversor de frequência para ajuste automático da pressão. Durante os ensaios foram monitoradas as variáveis pressão de ensaio, vazão e temperatura da água, consideradas como as características da qualidade, mantendo-se a pressão de ensaio fixa em $2,0 \text{ kgf cm}^{-2}$.

Nesta abordagem foram selecionados 12 emissores, submetendo-os a ensaios para avaliação das características da qualidade (pressão de ensaio, vazão e temperatura da água), sob as três condições de ajuste da pressão (manual, via inversor de frequência e com controlador PID), e com cinco repetições para cada emissor. No total, 180 medições foram realizadas, sendo consideradas as cinco repetições por emissor para elaboração de gráficos de controle de Shewhart para médias ($\bar{\bar{X}}$) e amplitude de variação (R) da pressão. Ressalta-se que cada uma das 180 medidas obtidas resultou da média de 500 valores, decorrentes do intervalo de aquisição de 100 ms em um tempo de leitura de 50 s por repetição, e provenientes das leituras de sinal do transdutor de pressão efetuadas pelo sistema de aquisição de dados.

Uma vez que o sistema controlado via PID mostrara ser o mais estável (Figuras 10, 11 e 12), apresentando ganhos em termos de qualidade dos resultados das medidas obtidas, numa segunda etapa do trabalho, procedeu-se à avaliação de gráficos de controle somente para o sistema controlado via PID. Nesta segunda fase, arbitrou-se $1,5 \text{ kgf cm}^{-2}$ para a pressão de ensaio e foram analisados gráficos de controle para somas cumulativas (CUSUM) e média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) visando checar o nível de estabilidade da pressão de ensaio ajustada pelo controlador PID, para os três turnos de trabalho (manhã, tarde e noite), e considerando única peça. Considerou-se apenas um emissor visando eliminar a ocorrência de pontos fora de controle e/ou padrões associados a efeitos de variação de fabricação dos emissores, e não do processo de medição em si.

Os gráficos de controle foram elaborados a partir de 180 valores da indicação de pressão, obtidos a partir de uma única amostra (emissor 5), sob 10 repetições em cada turno, cada qual com seis valores registrados num tempo de aquisição de um minuto. Ou seja, a cada 10 s o sistema registrava uma medida resultante da média dos últimos 10 valores lidos, sendo descartados os demais 90 valores medidos nesse intervalo de 10 s, e totalizando o registro de apenas seis valores após um minuto de monitoramento da indicação dos sensores (transdutor de pressão, termômetro NTC e medidor eletromagnético de vazão), em cada teste. A esses seis registros das variáveis monitoradas poderia ser atribuído o tamanho de subgrupo racional sob a ótica do controle estatístico de processos, especificamente para o caso da análise de gráficos de controle de Shewhart ($\bar{\bar{X}}$ e R), caso fossem feitos, sendo o número de repetições igual a 10.

Além disso, para a mesma amostra identificada anteriormente, análises similares foram feitas considerando três pressões de ensaio (0,5; 1,5; e 3,5 kgf cm⁻²) devido à possibilidade de ser maior ou menor o grau de dificuldade em manter estável a indicação do instrumento de medição (transdutor de pressão), conforme a pressão aplicada e correspondente vazão do emissor. Com isto, checkou-se a hipótese de que o controlador PID fosse capaz de manter estável o processo de medição sob qualquer pressão, independentemente do horário de realização do ensaio, durante o tempo necessário para obtenção de cada repetição.

Previamente à elaboração dos gráficos de controle, os dados foram submetidos ao teste de Anderson-Darling para aderência à distribuição normal, requisito também exigido para as análises de capacidade do processo apresentadas adiante. Sempre que não atendido tal pressuposto, buscou-se pela aplicação de funções de transformação aos dados do processo (Box-Cox ou Johnson), ou uso de cartas livres de distribuição, como é o caso dos gráficos do tipo MMEP (média móvel exponencialmente ponderada).

Seguindo os mesmos princípios utilizados para análise de estabilidade da pressão de ensaio, procedeu-se ao monitoramento da temperatura da água durante os testes, mantendo-se as mesmas condições de amostragem.

Análise de capacidade

Tendências não aleatórias de variabilidade no processo de ajuste e medição da pressão de ensaio poderiam ser associadas às oscilações de tensão na rede elétrica, o que pode afetar o desempenho do conjunto motobomba utilizado na realização dos ensaios. Para

averiguar esta suposição foram realizados testes com dados dos três turnos diferentes (manhã, tarde e noite), com a pressão de ensaio mantida em $1,5 \text{ kgf cm}^{-2}$, e com o sistema de aquisição configurado para registrar apenas seis valores por minuto. Assim, o conjunto de dados levantados para tais análises foi composto de 2340 medidas da pressão de ensaio, sendo 780 obtidas em cada turno. Este total era proveniente da realização de ensaios com os 13 emissores, sendo 10 repetições por emissor e considerando a obtenção dos seis valores por teste, cada qual proveniente da média das últimas 10 leituras instantâneas ($13 \text{ emissores} \times 10 \text{ repetições por emissor} \times 6 \text{ valores registrados por repetição}$).

Vale lembrar que tanto a análise dos gráficos de controle quanto a presente abordagem acerca da capacidade do processo foram realizadas considerando a pressão de ensaio, tida como a característica da qualidade de maior interesse para as análises em questão, uma vez que a vazão é diretamente relacionada com a pressão sob a forma de equação potencial, conforme ilustrado na Figura 5.

Para a especificação da tolerância permitida ao processo, foi inicialmente considerada a respectiva norma para métodos de ensaio de microaspersores (Tabela 4), estabelecendo-se a máxima variação permitida de $\pm 2\%$ em torno do valor alvo para a pressão de ensaio, sendo que a temperatura da água deve permanecer entre 15 e 30 °C.

Tabela 4. Referências normativas e limites de especificação para análise dos índices de capacidade do processo de controle e medição da pressão de ensaio durante determinação da relação vazão-pressão e uniformidade de vazão de microaspersores

Ensaio p/ determinação da curva vazão-pressão	Norma	Incerteza do medidor	Limites de especificação
Microaspersores	NBR 15084:2004	Pressão: $\pm 2\%$ Vazão: $\pm 1\%$	Pressão: $\pm 2\%$ Temperatura ambiente: 15 a 30 °C Temperatura da água: 15 a 30 °C

Além disso, visando analisar possibilidade de estreitamento da faixa de especificação para processo de medição, foram calculados índices de capacidade do processo para $\pm 1\%$ de variação em relação ao alvo, que era de $1,5 \text{ kgf cm}^{-2}$. Nesse caso, o estabelecimento de novos limites de especificação implica na redução dos índices de capacidade, mas foram definidos na tentativa de contribuir no que se refere ao estabelecimento de critérios de aprovação dos sistemas de medição adotados. Assim, de acordo com o nível de capacidade do processo obtido (Kaya; Kahraman, 2011), considerando os limites de especificação de $\pm 1\%$ em relação

ao alvo, novos critérios de tolerância à variabilidade poderiam ser sugeridos para a análise, juntamente com o que se tem referenciado na norma NBR 15084 (ABNT, 2004).

Repetitividade e reprodutibilidade (Gage RR)

Em ensaios de emissores de irrigação, as variações nas determinações de vazão para uma dada pressão de ensaio são expressas através do coeficiente de variação de vazão devido a efeitos de fabricação (CVFq) da amostra de emissores, seja de gotejamento, microaspersão ou mesmo aspersão. O CVFq é um indicativo da qualidade do processo de fabricação de emissores, sendo que, quanto mais próximo de zero for o CVFq, menor é a variabilidade entre peças do lote avaliado. Entretanto, o fato que não é de conhecimento comum refere-se a influência do sistema de controle e medição no resultado do CVFq. Se uma única peça for ensaiada várias vezes sob condições de repetitividade de ensaio, é esperado que haja uma dispersão dos resultados. Essa dispersão está associada exclusivamente com a qualidade do sistema de controle e medição, devendo ser próxima de zero. Portanto, é razoável afirmar que o CVFq, na verdade, inclui a variabilidade entre peças e um efeito de instabilidades do sistema de ensaio, sendo que este naturalmente deve ser o menor possível.

O estudo completo de repetitividade e reprodutibilidade (Gage RR) permite a distinção entre causas especiais de variação inerentes ao processo de controle e medição e causas associadas à variação de fabricação propriamente dita, uma vez que permite quantificar as contribuições de cada fonte de variação na variância total da medida obtida. Tal ferramenta de controle estatístico da qualidade foi utilizada para identificar o quanto o sistema de medição e controle impacta no resultado de CVFq obtido em ensaios de uniformidade de vazão de emissores.

Considerando que o número de categorias distintas, parâmetro calculado no contexto do estudo de repetitividade e reprodutibilidade (Gage RR) do sistema de medição, pode ser significativamente afetado quando se utiliza número de peças (b) reduzido (Yeh; Sun, 2013), para o estudo foram realizadas medições de vazão nos 13 emissores sorteados do lote. García e Rio (2013) e Montgomery (2016) recomendam a adoção de “b” maior ou igual a 10. Mediuse a vazão de cada um dos emissores nos três diferentes turnos de operação (manhã, tarde e noite), com 10 repetições. No total, 390 medições foram realizadas (130 por turno de trabalho), cada uma proveniente da média dos seis valores registrados pelo sistema automático de aquisição de dados do medidor eletromagnético.

Este experimento foi planejado visando atender ao modelo da ANOVA proposto no item 2.2 para repetitividade e reprodutibilidade (com $a = 3$, $b = 13$ e $n = 10$), diferindo-se somente porque, ao invés de se ter o operador do sistema de medição para variante, como normalmente acontece neste tipo de estudo na maioria das pesquisas ou atividades relacionadas a processos produtivos industriais, no presente caso foi estabelecido o turno de realização do ensaio como variante do estudo. Tal fato se justifica pela ausência de influência do operador na medida resultante, uma vez que nesta etapa já se tratava de sistema de controle da pressão de ensaio totalmente automatizado pela atuação do controlador PID e também do monitoramento automático das demais características da qualidade (temperatura da água e vazão), com sistema de aquisição de dados. Nesse sentido, a condição de medição que supostamente poderia causar interferências nas medidas resultantes do sistema de medição foi a alteração de turno de trabalho. Caso fossem obtidas leituras da indicação dos sensores no mostrador digital pela simples observação, poder-se-ia ter estabelecido como variante no estudo a condição de visualização dessas indicações, para obtenção das medidas de vazão, pressão de ensaio e temperatura da água, por diferentes técnicos de ensaio ou observadores, mas não foi este o caso.

No caso de instabilidades serem estatisticamente significativas perante os estudos de repetitividade e reprodutibilidade (Gage RR), cartas de controle e índices de capacidade, ações corretivas e/ou de melhoria deveriam ser implementadas, com a reavaliação de todo o processo de medição após cada tentativa de aperfeiçoamento da qualidade.

3.2. Ensaio para determinação da curva vazão-pressão e uniformidade de vazão de gotejadores e tubos gotejadores

Os ensaios para determinação da curva vazão-pressão e uniformidade de vazão de gotejadores e tubo-gotejadores foram executados segundo a NBR ISO 9261 (ABNT, 2006) em bancada de ensaios especialmente projetada para este propósito (Figura 7). Pela norma, a relação vazão-pressão deve ser determinada com base em, no mínimo, quatro combinações de pressões e correspondentes vazões, efetuando-se medições em, pelo menos, 25 emissores do lote sob avaliação, com passos não maiores que 50 kPa. A uniformidade de vazão também requer a mesma quantidade de emissores.

Figura 7. Bancada de ensaios para determinação da curva vazão-pressão e uniformidade de vazão de gotejadores e tubos gotejadores

Recentemente, essa bancada de ensaios foi automatizada, sendo que a medição de vazão atual é baseada no princípio de variações de nível em tubos coletores e emprega transdutor de pressão para medição de carga hidráulica que opera na faixa de 0 a 100 mbar, com incerteza expandida de 0,02% em relação ao fundo de escala; resolução de 0,01 mbar. Adicionalmente, a bancada de ensaios conta com um transmissor de pressão para monitoramento da pressão de ensaio que opera na faixa de 0 a 5 bar, com incerteza expandida de 0,03% em relação ao fundo de escala e resolução de 0,001 bar; um transdutor de temperatura para monitoramento da temperatura da água calibrado na faixa de 20 a 40 °C, com incerteza expandida de 0,15 °C e resolução de 0,1 °C.

3.2.1. Caracterização dos gotejadores utilizados

Na bancada de ensaio de gotejadores e tubo-gotejadores foram instalados emissores Naan TIF 25 16 mm, modelo fabricado pela NaanDanJain®, também pertencentes ao estoque de material do LEMI. Na Figura 8 é apresentada a relação vazão-pressão para este modelo de emissor, levantada a partir de 25 emissores, com cinco repetições e com trechos de tubos retirados de forma aleatória de uma bobina qualquer do lote.

Figura 8. Relação vazão-pressão para o modelo de tubo gotejador utilizado nos ensaios

Novamente, lembra-se que o modelo e/ou marca do produto adotado são irrelevantes perante a proposta de avaliação dos sistemas de controle e medição desenvolvidos para a bancada de ensaio, e não da qualidade de fabricação do produto propriamente dita. Nesta bancada, de forma semelhante ao ensaio para determinação da curva vazão-pressão e uniformidade de vazão de microaspersores, também foi priorizada a quantificação dos efeitos de repetitividade e reprodutibilidade, às quais se associam as incertezas do sistema de medição sobre a variância total das medidas de vazão obtidas.

3.2.2. Ferramentas da qualidade aplicadas à bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores

Diagrama de Ishikawa (ou de causa e efeito)

O Diagrama de Ishikawa apresentado na Figura 9 contém fatores que podem influenciar nos resultados e na qualidade dos resultados de ensaio de gotejadores e tubo-gotejadores.

Figura 9. Diagrama de Ishikawa para análise dos sistemas de medição e controle em bancada de gotejamento

A norma NBR ISO 9261 especifica que a temperatura da água deve permanecer entre 20 e 26 °C durante os ensaios de gotejadores. A bancada de ensaios do laboratório é um circuito fechado no qual a água fica continuamente recirculando. Ao atravessar a carcaça/rotor da bomba, a temperatura da água tende a elevar-se ao longo do tempo. Por outro lado, a água que escoar através dos orifícios dos emissores cai sobre uma plataforma metálica que atua como um trocador de calor e resfria a água. Assim, para o caso específico do laboratório, não é necessária a implementação de um sistema de controle de temperatura da água, pois essa mantém-se dentro dos limites especificados pela norma.

Gráficos de controle

Os ensaios para análise de estabilidade do processo de medição na bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores seguiram os mesmos passos da bancada de microaspersão, com rotina de ensaios instauradas nos três turnos de trabalho, ajustando-se a pressão de ensaio e monitorando as demais características da qualidade (temperatura da água e vazão dos emissores).

Gráficos de controle CUSUM e MMEP puderam ser analisados para averiguar o nível de estabilidade do processo de ensaio. Foram confrontados os resultados de ensaios realizados nos três turnos de trabalho, sob a pressão de ensaio de 1,5 kgf cm⁻² e a vazão correspondente a esta pressão, com 10 repetições por turno; e também dados de ensaios conduzidos sob as pressões de 1,0; 1,5 e 3,0 kgf cm⁻².

Durante cada ensaio a 1,5 kgf cm⁻², o sistema de aquisição registrou no mínimo 362 leituras das indicações de pressão, vazão e temperatura da água, isto porque o sistema requer um tempo mínimo de enchimento dos coletores, uma vez que opera sob o princípio de medição do nível da água nos mesmos.

Nesta avaliação, diferentemente do que ocorre na bancada de ensaio de microaspersores, não houve necessidade de se utilizar dados de apenas um emissor na elaboração dos gráficos de controle para a pressão de ensaio, uma vez que a variável pressão é, teoricamente, a mesma em todos os 25 emissores ensaiados ao mesmo tempo, por se tratar de sistema hidráulicamente em equilíbrio.

Análise de capacidade

Na análise de capacidade do processo de controle e medição de pressão foram considerados dados provenientes das 10 repetições, perante três turnos de realização dos

ensaios (manhã, tarde e noite), sendo registrados 362 valores por teste. Desse modo, índices de capacidade e desempenho do processo foram obtidos a partir de 3620 medidas da pressão de ensaio por turno, com total de 10860 valores da indicação de pressão no conjunto geral de dados.

Os limites de especificação foram definidos conforme a norma para métodos de ensaio de emissores e tubos emissores de microirrigação (Tabela 5), estabelecendo-se a máxima variação permitida de $\pm 2\%$ em torno do valor alvo para a pressão de ensaio inicialmente, e de $23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ para a temperatura da água. Em seguida, de forma semelhante ao que foi feito na análise de capacidade para processo de medição na bancada de ensaio de microaspersores, procedeu-se à utilização dos limites de especificação restritos a $\pm 1\%$ de variação em relação ao alvo desejado, que era de $1,5\text{ kgf cm}^{-2}$, para cálculo dos índices de capacidade e desempenho do sistema de medição.

Tabela 5. Referências normativas e limites de especificação para análise dos índices de capacidade do processo de controle e medição da pressão de ensaio durante determinação da relação vazão-pressão e uniformidade de vazão de gotejadores e tubos gotejadores

Ensaio p/ determinação da curva vazão-pressão	Norma	Incerteza do medidor	Limites de especificação
Gotejadores e tubo-gotejadores	NBR ISO 9261:2006	Pressão: $\pm 1\%$ Vazão: $\pm 0,5\%$	Pressão: $\pm 2\%$ Temperatura ambiente: $23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$ Temperatura da água: $23\text{ °C} \pm 3\text{ °C}$

Repetitividade e reprodutibilidade (Gage RR)

No estudo de repetitividade e reprodutibilidade da bancada de ensaio para determinação da relação vazão-pressão e uniformidade de vazão de emissores e tubos emissores foram utilizados 25 gotejadores, com testes realizados nos turnos da manhã, tarde e noite. Assim, procedeu-se à medição da vazão de cada um dos gotejadores submetidos à pressão de ensaio de $1,5\text{ kgf cm}^{-2}$, com 10 repetições em cada turno de trabalho, perfazendo o total de 750 observações no total. Nesta bancada, $a = 3$, $b = 25$ e $n = 10$ para a definição do modelo da ANOVA de repetitividade e reprodutibilidade, e caracterização das incertezas associadas ao sistema de medição (Gage RR).

Novamente, estabeleceu-se o turno de realização dos ensaios como variante para o estudo por se tratar de bancada com sistema de medição automatizado, sem interferência do operador nas medições.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da pesquisa estão apresentados a seguir separadamente para cada bancada de ensaio, lembrando que as análises foram realizadas no intuito de mensurar quão bom, ou ruim, estavam os sistemas ou métodos de controle e medição das características da qualidade adotados nas bancadas de avaliação de microaspersores, gotejadores e tubos gotejadores. Era esperado que, devido ao rigor dos procedimentos adotados na rotina do Laboratório, os resultados de ensaios mantivessem níveis de aceitação e confiabilidade adequados, conforme discutido a seguir. Mesmo assim, possíveis oportunidades de melhoria poderiam ser detectadas e implementadas mediante implementação das ferramentas de Controle Estatístico de Qualidade aos testes. Ademais, análises dessa natureza devem ser realizadas sempre que forem implementadas modificações em estruturas ou procedimentos de ensaio visando suporte à tomada de decisão e garantia da qualidade dos resultados de ensaio.

4.1. Bancada de ensaio de microaspersores

No que se refere à bancada para avaliação da uniformidade de vazão e levantamento das curvas vazão-pressão de microaspersores, estão apresentados na sequência resultados referentes à estabilidade (gráficos de controle) e índices de capacidade do processo de ajuste da pressão de ensaio; ao monitoramento da temperatura da água; e à discriminação das fontes de variação e suas contribuições na variabilidade total das medidas de vazão obtidas (estudo de repetitividade e reprodutibilidade para o sistema de medição da vazão dos microaspersores – Gage RR).

4.1.1. Pressão de ensaio – estabilidade do processo de controle e medição

Na Figura 10 é apresentado o gráfico de controle para médias ($\bar{\bar{X}}$) das observações em 12 emissores avaliados, e sob três formas de ajuste da pressão de ensaio (manual, com inversor de frequência e via controlador PID). Evidencia-se claramente o benefício em termos de estabilidade de pressão provindo da implementação do controlador PID em relação aos demais meios de se ajustar a pressão, uma vez que foram atingidas médias mais próximas do alvo desejado, de 2,0 kgf cm⁻². Pode-se considerar que utilizar o inversor de frequência também conduz a resultados satisfatórios, já que não foram observados pontos acima ou abaixo dos limites de controle de $\pm 3\sigma$ (LSC – LIC). Entretanto, ao se analisar os dados para o ajuste manual da pressão de ensaio, facilmente se identificam dois pontos abaixo do limite

inferior de controle (LIC) e dois pontos acima do limite superior de controle (LSC), apontando para sistema não controlado ou instável. Ajustando manualmente a pressão em ensaios de perda de carga em tubos, Rocha et al. (2014) também encontraram instabilidade para essa variável, com processo incapaz de manter a pressão de ensaio e a perda de carga entre os limites de especificação estabelecidos. Ainda que em termos de média a diferença seja desprezível, é evidente a capacidade de detecção das diferenças de variabilidade entre sistemas de ajuste da pressão pelos gráficos de controle.

Figura 10. Gráfico de controle de Shewhart para médias ($\bar{X}$) da pressão de ensaio, para as três formas de ajuste e considerando a média de 5 repetições em cada emissor “j”

Os resultados obtidos na carta de controle de amplitudes (R), conforme Figura 11, são condizentes com a interpretação anteriormente mencionada para carta de médias, diferenciando-se somente por apresentar mais pontos fora de controle quando do ajuste manual. Tal fato pode se associar à maior sensibilidade desta carta às causas não aleatórias. Montgomery (2016) comenta que instabilidades não observadas na carta de médias podem aparecer na de amplitudes, para um mesmo conjunto de dados.

Figura 11. Gráfico de controle de Shewhart para amplitude (R) da pressão de ensaio, para as três formas de ajuste e considerando a média de 5 repetições em cada emissor “j”

Além dos gráficos de controle já apresentados, a análise do diagrama Box-plot apresentado na Figura 12 indica claramente que as pressões de ensaio ajustadas utilizando o controlador PID são bastante exatas em relação ao valor alvo e apresentam pouquíssima dispersão.

Figura 12. Diagrama Box-plot para as observações feitas nos 12 emissores, sob as três formas de se ajustar a pressão de ensaio

Uma vez evidenciado o benefício do controlador PID e considerando o gráfico de controle para média móvel exponencialmente ponderada (MMEP), descrito por Montgomery (2016) como um procedimento que se aproxima de métodos não-paramétricos (livres de distribuição), ao se analisar peça única (microaspersor 05, por exemplo) para os três turnos de trabalho, verificou-se que as medidas obtidas para as 10 repetições permaneceram entre os limites de controle $\pm 3\sigma$ no gráfico MMEP; com destaque ainda para distribuição de relevante parcela dos dados até o limite máximo de $\pm 1\sigma$ (Figura 13). Os resultados apresentados na

Figura 13 referem-se às análises realizadas para verificar se a estabilidade da pressão de ensaio era influenciada pelo turno de ensaio, de modo que foi concluído que o turno não interfere na estabilidade da pressão de ensaio, sendo esta estável em qualquer dos turnos avaliados.

Figura 13. Gráfico de controle MMEP para pressão de ensaio na bancada de microaspersores, operando em três turnos de trabalho

A Figura 14 contém resultados de testes realizados com a finalidade de verificar a estabilidade na pressão ao longo de um ensaio, sendo avaliadas três pressões de ensaio. Para isso, são apresentados gráficos de controle MMEP para diferentes pressões de ensaio, considerando amostra única (microaspersor 05). Os limites de controle dos gráficos MMEP são calculados com base na dispersão das observações, sendo necessário cautela para análise dos resultados. Conforme apresentado nos gráficos da Figura 14, os limites de controle são bastante estreitos devido à baixa dispersão de valores, o que torna esse tipo de gráfico de controle excessivamente rigoroso para a análise do processo em questão. Embora tenham sido observados um e dois pontos além dos limites $\pm 3\sigma$ para os níveis de pressão de ensaio de 0,5 e 1,5 kgf cm⁻², respectivamente, constata-se que, esses pontos apresentaram desvio muito baixo em relação ao valor médio de pressão. Portanto, é possível afirmar que o sistema de medição é capaz de se manter satisfatoriamente controlado e estável em todos os níveis de pressão, sendo que a maior parte das observações se manteve dentro da faixa de controle, oscilando alternadamente acima e abaixo da linha central (alvo do processo). É importante ressaltar que nesta etapa do estudo foram considerados dados de 250 observações em cada pressão para a construção dos gráficos, a partir das quais normalmente se obtêm valores médios para cada ponto na elaboração da curva vazão-pressão dos microaspersores apresentada na Figura 5.

Figura 14. Gráficos de controle MMEP para diferentes pressões de ensaio de microaspersores: 0,5 kgf cm⁻² (a); 1,5 kgf cm⁻² (b) e 3,5 kgf cm⁻² (c)

Em ensaios para determinação da curva vazão-perda de carga, Rocha et al. (2014) afirmam que o baixo desempenho obtido para processo de medição de pressão durante ensaio não implicou em aumento significativo da variabilidade das medidas de vazão dos tubos. Além disso, o sistema de medição utilizado no procedimento de ensaio mostrou-se sob controle e satisfatório para medidas de vazão, sendo instável para a pressão de ensaio e inadequado quanto à capacidade de manter a perda de carga nos tubos e pressão dentro de limites de especificação estabelecidos para ao processo.

4.1.2. Pressão de ensaio – análise de capacidade do processo de controle e medição

Os valores da estatística A e p-valor do teste de Anderson-Darling para normalidade são apresentados na Tabela 6, considerando os dados dos três turnos de trabalho, mensurados nas 13 peças selecionadas aleatoriamente, sob 10 repetições, cada qual composta pelas seis observações coletadas durante 1 minuto pelo sistema de aquisição de dados. Esse reduzido tempo necessário para aquisição dos dados dos sensores pode ser considerado um benefício da

automação do procedimento de ensaio via controlador PID, uma vez que a rotina pode ser agilizada, com garantia de estabilidade da indicação de pressão, como já demonstrado na análise dos gráficos de controle anteriormente apresentada. A experiência prévia de uso do inversor de frequência para o ajuste da pressão, com a obtenção das características da qualidade inerentes ao ensaio por meio da observação da indicação dos sensores no mostrador digital, permite afirmar que o tempo necessário para a caracterização da uniformidade de vazão e levantamento das curvas vazão-pressão de um lote de microaspersores era maior.

Tabela 6. Teste de normalidade para os dados de pressão de ensaio na bancada de microaspersores

Turno	n*	Estatística A	p-valor	Normalidade?
Manhã	780	0,3708	0,414	Sim
Tarde	780	0,4254	0,307	Sim
Noite	780	0,5327	0,167	Sim
Geral	2340	0,5203	0,181	Sim

*n = 10 repetições/emissor x 13 emissores x 6 indicações por medição

O p-valor representa a probabilidade de se cometer erro ao rejeitar a hipótese de aderência dos dados à normalidade, sendo apresentada a distribuição de frequência dos dados de pressão de ensaio para testes realizados nos três turnos (Figura 15), não se mostrando evidências de diferenças expressivas para turnos de realização dos ensaios.

Figura 15. Distribuição de frequência da pressão de ensaio na bancada de ensaio de microaspersores

Uma vez confirmada a aproximação dos dados à distribuição normal, calculou-se os índices de capacidade e desempenho do processo de controle e medição da pressão de ensaio. Essa análise permite identificar se um dado processo de medição é capaz de atender aos limites de especificação estabelecidos por normas ou exigências de clientes, levando em conta a dispersão dos valores e centralização da média em relação ao valor alvo. Essa análise foi realizada para o conjunto geral dos dados, com $\pm 2\%$ e $\pm 1\%$ para a faixa de especificação, obtendo-se os respectivos valores de 2,36 e 2,31 para os índices C_p e P_p (Figura 16a), com tolerância à variabilidade de $\pm 2\%$. Considerando tolerância de $\pm 1\%$ em relação ao valor alvo (Figura 16b), obteve-se os valores de 1,18, 1,15 e 1,15 para os índices C_p , P_p e C_{pm} , respectivamente. Os índices C_p (C_p , C_{pl} , C_{pu} , e C_{pk}) representam o nível potencial ao qual o processo poderia chegar se todas as causas especiais fossem eliminadas, sendo calculados utilizando a variação dentro de subgrupos (σ_{dentro}); já os índices P_p (P_p , P_{pl} , P_{pu} , e P_{pk}) são indicadores da capacidade real do processo, ou seja, refletem o real desempenho do processo em relação aos limites de especificação, e são calculados a partir do desvio padrão global (σ_{global}); o índice C_{pm} indica o nível de centralização dos dados em relação à média do processo e ao alvo desejado (Montgomery, 2016).

Figura 16. Índices de capacidade para processo de ajuste e monitoramento da pressão de ensaio na bancada de ensaio de microaspersores, considerando tolerâncias de $\pm 2\%$ (a); e $\pm 1\%$ (b)

O cálculo dos índices de desempenho do processo de controle e medição da pressão de ensaio para os três turnos de trabalho com a bancada de ensaio de microaspersores resultou nos valores apresentados na Tabela 7, lembrando que nessa etapa foi considerada a variação máxima permitida de $\pm 2\%$ em relação à pressão de ensaio, ou seja, LIE = 1,47 e LSE = 1,53 kgf cm⁻², respectivamente.

Tabela 7. Análise de capacidade e desempenho do processo de controle e medição da pressão na bancada de ensaio de microaspersores

Turno	Índices de capacidade/desempenho do processo								
	-----Potencial-----				-----Global-----				
	C _p	C _{pl}	C _{pu}	C _{pk}	P _p	P _{pl}	P _{pu}	P _{pk}	C _{pm}
Manhã	2,39	2,39	2,40	2,39	2,33	2,33	2,34	2,33	2,33
Tarde	2,37	2,37	2,37	2,37	2,31	2,31	2,31	2,31	2,31
Noite	2,33	2,34	2,32	2,32	2,28	2,29	2,27	2,27	2,28
Geral	2,36	2,36	2,36	2,36	2,31	2,31	2,31	2,31	2,31

Considerando a faixa de especificação de $\pm 2\%$ em relação ao valor alvo de 1,5 kgf cm⁻², conforme ABNT (2004), o processo de controle e medição da pressão de ensaio está muito próximo do seu nível máximo possível, haja vista a proximidade dos índices C_p e P_p; e o nível de centralização dos dados em relação à média do processo e ao alvo desejado, representado pelos índices C_{pk} e C_{pm} (Pan; LI, 2014), respectivamente. E ainda, mediante Tabela 1 (Tsai; Chen, 2006; Kaya; Kahraman, 2010; Kaya; Kahraman, 2011), classificou-se o processo com capacidade “excelente”, lembrando que fora utilizado o ajuste da pressão de ensaio via controlador PID nesta etapa da pesquisa. Ao se impor a restrição de $\pm 1\%$ à dispersão dos dados do processo em relação à amplitude da especificação (LSE – LIE), ainda foi possível classificar o processo como “capaz” segundo a classificação de Tsai e Chen (2006), conforme definido na Tabela 1.

Ao se analisar a dispersão dos dados do processo em relação à largura da especificação, não foram identificados dados além dos limites de especificação de $\pm 2\%$. No entanto, quando se arbitrou o limite de especificação de $\pm 1\%$, identificou-se 0,26% dos dados fora da faixa de especificação, sendo 0,17% < LIE e 0,09% > LSE. Todas essas análises foram realizadas mediante o uso do software Minitab® 16.0, o qual fornece também previsões acerca da expectativa da quantidade de dados não-conformes (fora da especificação previamente estabelecida ou desejada). Assim, para tolerância de $\pm 1\%$, espera-se que 0,06% dos dados encontrem-se além dos limites de especificação, sendo 0,03% < LIE e 0,03% > LSE. Abordagens não paramétricas podem ser utilizadas quando os dados não seguem a distribuição normal, como descrito por Chen e Ding (2001).

É importante ressaltar que a primeira faixa de tolerância adotada para o processo, de $\pm 2\%$, provém da norma para ensaios de microaspersores (ABNT, 2004) e refere-se ao limite para incerteza dos medidores de pressão; enquanto que a tolerância de $\pm 1\%$ foi arbitrada

visando a classificação e caracterização do processo de medição de acordo com critérios mais rigorosos. A conclusão sobre essa análise é que, assumindo que $\pm 2\%$ é a faixa de especificação estabelecida em norma, o processo de medição avaliado atende aos requisitos normativos.

Testes dessa natureza para os limites de especificação e tolerância à variabilidade do processo de medição podem ser sugeridos com o intuito de definir critérios de validação dos resultados dos ensaios de emissores, tanto de microaspersão quanto de gotejamento, uma vez que ainda não são claramente estabelecidos pelas normas técnicas de ensaio.

4.1.3. Monitoramento da temperatura da água

Para o monitoramento da temperatura, talvez fosse interessante se observar duas escalas de tempo diferentes: a primeira considerando o tempo durante o qual são coletados os dados de pressão e vazão na saída dos emissores para elaboração da curva vazão-pressão (cada ponto da curva); e a segunda comparando a obtenção desses pares de pontos da curva a intervalos de tempo maiores, ou seja, entre turnos e/ou dias diferentes.

Na primeira escala, devido ao pequeno tempo de observação (1 min), não foram feitos gráficos de controle, considerando-se desprezível a variação de temperatura nesse período.

Na segunda escala, entre turnos e/ou dias diferentes, observou-se que a temperatura da água variou de 23,28 a 27,84 °C, mantendo-se dentro dos limites de especificação da norma NBR 15084, ou seja, de 15 a 30 °C (Figura 17). É esperado que a temperatura da água sofra alterações temporais em função da própria variação de temperatura do ambiente e da recirculação na bancada.

Figura 17. Monitoramento da temperatura da água ao longo dos testes na bancada de ensaio de microaspersores

4.1.4. Vazão – repetitividade e reprodutibilidade

A vazão é uma variável de saída do processo que é influenciada principalmente pelas características geométricas do emissor avaliado, mas também pela estabilidade ou nível de controle da pressão e temperatura da água durante o ensaio. Conforme constatado nas análises de estabilidade e capacidade realizadas para pressão de ensaio e temperatura da água, tais variáveis apresentam nível de controle ou estabilidade adequados, eliminando a necessidade de reavaliar esses indicadores para a variável vazão.

A análise descrita nesse item refere-se ao estudo de repetitividade e reprodutibilidade (Gage RR) do sistema de medição da vazão dos microaspersores (Tabelas 8 e 9); e teve como objetivo quantificar a contribuição das principais componentes de variabilidade no processo de medição de vazão. Considerou-se que a variância total de vazão pode ser influenciada pelas seguintes fontes de variação: (a) peça ou emissor; (b) repetitividade; (c) reprodutibilidade; (d) turno de ensaio; (e) interações entre turno de ensaio e peças.

Na Tabela 8 é apresentado o quadro resumido da ANOVA para o estudo de repetitividade e reprodutibilidade do sistema de medição (Gage RR) utilizado na bancada de microaspersão, considerando como variante o turno de realização dos ensaios. Efeitos significativos da variação entre peças (emissores) e da interação entre essas e o turno de realização dos ensaios foram identificados, haja vista a reduzida magnitude dos valores de F e p-valor. Por outro lado, para o fator turno não aparecem efeitos expressivos na ANOVA (p – valor = 0,54), não havendo, portanto, influência do turno de ensaios na variância total de vazão ao nível de significância $\alpha = 5\%$ para remover efeitos de interação, na análise do

sistema de medição e controle. Conforme já mencionado, é esperado que a variabilidade de vazão entre peças seja significativa. Por outro lado, esperava-se que o efeito de interação entre peças e turno fosse nulo, não havendo suposições para justificar o resultado observado.

Tabela 8. ANOVA para o estudo de repetitividade e reprodutibilidade na bancada de microaspersão

Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F	*p-valor
Peça (Emissor)	12	2108,50	175,71	184,40	0,00
Reprodutibilidade: Turno	2	1,19	0,60	0,63	0,54
Reprodutibilidade: Interação [Peça*Turno]	24	22,87	0,95	4,73	0,00
Repetitividade	351	70,72	0,20		
Total	389	2203,28			

* $\alpha = 0,05\%$ para remover efeitos de interação

Assim, a Tabela 9 indica que 95,47% da variância total de vazão é devida à variabilidade entre peças (emissores) e apenas 4,53% é devida a efeitos do sistema de medição e controle utilizados para realização dos ensaios. Esse resultado é positivo e indica baixa interferência do sistema de medição e controle nas determinações de vazão, ou seja, é razoável afirmar que, de fato, o CVFq obtido nos ensaios de uniformidade de vazão de microaspersores é devido a imperfeições no processo de fabricação dos emissores. Portanto, baseando-se nesses valores conclui-se que o sistema de medição de vazão utilizado nos ensaios de microaspersores opera adequadamente.

Tabela 9. Variância, desvio padrão e porcentagem de contribuição das fontes de variação na variabilidade total das medições de vazão obtidas na bancada de ensaio de microaspersores, para diferentes turnos de trabalho

Fonte de variação	σ^2	Contribuição de σ^2_{total} (%)	σ	Percentual de σ_{total} (%)	*IC para σ		**NDC do estudo
					Inferior	Superior	
Gage RR	0,277	4,53	0,526	21,29	0,484	0,694	6
Repetitividade	0,202	3,30	0,449	18,17	0,418	0,485	
Reprodutibilidade	0,075	1,23	0,274	11,10	0,199	0,520	
Turno	0,000	0,00	0,000	0,00	0,000	0,420	
Interação [Emissor*Turno]	0,075	1,23	0,274	11,10	0,194	0,405	
Peça (Emissor)	5,825	95,47	2,413	97,71	1,726	3,991	
Total	6,102	100,00	2,470	100,00	1,805	4,026	

*Intervalo de confiança para o desvio padrão, a 95% de probabilidade

** $NDC = \sqrt{2} \frac{\sigma_{\text{Emissor}}}{\sigma_{\text{Gage RR}}} = \text{Número de categorias distintas}$

O número de categorias distintas (NDC) é um índice usado em estudos RR para identificar a habilidade de um sistema de medição em detectar uma diferença na característica medida, ou seja, basicamente ele quantifica indiretamente a resolução do sistema de medição. Para o estudo em questão, o valor obtido foi $NDC = 6$, considerado adequado por Pedott e Fogliatto (2012). Esse índice indica que o sistema de medição é capaz de identificar 6 classes de vazão entre as amostras avaliadas. Quanto maior o valor de NDC, melhor a qualidade do sistema de medição, sendo que valores entre 5 e 10 são considerados “aceitável” (Tabela 3). Em abordagem teórica para a determinação da relação entre NDC e índices de capacidade de processos de medição, Dalalah e Hani (2016) afirmam que o número de categorias distintas, indicador chamado de razão sinal-ruído (SNR) no estudo, pode atingir valores extremamente elevados ou até mesmo se aproximar de infinito, caso o sistema de medição se aproxime da perfeição. Em termos práticos, conforme Tabela 3, valores de NDC acima de 5 são considerados bons ou adequados.

Outro critério utilizado para aprovar um sistema de medição é a relação percentual entre o desvio-padrão do sistema de medição (Gage RR) e o desvio-padrão total do mensurando (Tabela 9). Para o estudo realizado, essa relação foi de 21,29% e, conforme critério apresentado na Tabela 3, para valores entre 10 e 30% o sistema de medição é considerado aceitável.

Requisitos normativos ou mesmo exigidos por clientes também podem ser adotados para classificar os sistemas de medição utilizados nas bancadas de ensaio quanto à sua adequação e confiabilidade, lembrando que o nível de rigor adotado pode variar em função das aplicações para as quais se destinam as medições (AIAG, 2010; Zanobini et al., 2016). E ainda, nem sempre percentuais de σ_{total} inferiores a 10,0% são alcançados com sistemas de medição altamente confiáveis e aperfeiçoados; assim como sistemas de medição com percentuais acima de 30,0% podem atender satisfatoriamente à aplicação para a qual se destina (Montgomery, 2016). Exemplificando, a precisão exigida para medição de temperatura pode variar para diferentes aplicações. Um termostato de uma sala pode regular a temperatura de uma sala para o conforto humano, ser economicamente viável, possuir Gage RR acima de 30,0% e ser aceitável; já em aplicações de laboratório, onde pequenas variações podem impactar nos resultados dos ensaios, sistemas de medição e controle mais sofisticados são requeridos, com Gage RR reduzido, sendo provavelmente sistemas com custos elevados (AIAG, 2010).

Com base nas 10 repetições, obteve-se os coeficientes de variação de fabricação (CVFq) dos microaspersores, para os turnos da manhã, tarde e noite (Figura 18). O CVFq

variou de 5,1% a 5,8%, com média geral de todas as repetições nos três turnos de 5,5%. Nesse aspecto, é esperado que medições de CVFq, considerando o mesmo conjunto de emissores avaliados, resultem aproximadamente o mesmo valor, independentemente do turno de realização dos ensaios ou outra variante qualquer do sistema de medição. Ou seja, os horários de realização dos ensaios, trocas de técnicos para testes realizados de forma manual e possibilidade de utilização de mais de um instrumento de medição para o mesmo mensurando não devem constituir fontes de variação significativas (Burdick, Borror, Montgomery, 2003). Koech et al. (2015a) atribuíram ao padrão assimétrico de cobertura do aspersor, às incertezas de medição e influência do abrigo do aspersor nas determinações de vazão as dificuldades de se validar pontos da curva vazão-pressão em estudo de comparação interlaboratorial, no qual foram comparados laboratórios da Austrália, Brasil, China e França. No entanto, no âmbito da International Network of Irrigation Testing Laboratories (INITL), é esperado que diferentes locais e estruturas de testes sejam capazes de produzir os mesmos resultados para um mesmo material ensaiado, semelhantemente ao que se deseja ao realizar testes em variados turnos, ou ainda sob a condução de diferentes técnicos de ensaio.

Figura 18. Coeficientes de variação de fabricação para microaspersores para três turnos de trabalho e 10 repetições

4.2. Bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores

4.2.1. Pressão de ensaio – estabilidade do processo de controle e medição

Dois pontos praticamente coincidentes com o $LSC = 3\sigma$ no gráfico de controle MMEP foram identificados na quarta e quinta repetição, respectivamente, para os ensaios

realizados no turno da manhã (Figura 19). Entretanto, assumiu-se que tal constatação não pode ser considerada como sinal de instabilidade ou ausência de controle do processo de medição da pressão de ensaio, devido à faixa de controle (LIC – LSC) ser bastante restrita, ou seja, a faixa de variação do processo permaneceu dentro de limites de variabilidade adequados, considerando-se a magnitude dos limites de controle obtidos.

Figura 19. Gráfico de controle MMEP para pressão de ensaio na bancada de gotejadores e tubos gotejadores, operando em três turnos de trabalho

Como ocorrido para os ensaios com microaspersores, na bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores também ficou evidenciada a maior dificuldade em manter sob controle os ensaios conduzidos nas pressões mais baixas, conforme demonstram os gráficos MMEP da Figura 20. Para 1,0 kgf cm⁻², quatro pontos além do limite +3σ foram verificados nas observações 40, 41, 42 e 43 (Figura 20a), porém deve-se observar que a variabilidade na pressão ocorreu somente após a quarta casa decimal e portanto é tecnicamente irrelevante nesse tipo de ensaios; para 1,5 kgf cm⁻², o sistema de controle e medição da pressão de ensaio manteve-se controlado, com a maior parte da dispersão dos dados entre os limites $\pm 2\sigma$ (Figura 20b); enquanto que para 3,0 kgf cm⁻², a variabilidade permaneceu praticamente restrita aos limites de controle $\pm 1\sigma$ (Figura 20c). Baseando-se nesses resultados, conclui-se que a pressão é estável em quaisquer dos valores de pressão usualmente utilizados na bancada.

Figura 20. Gráficos de controle MMEP para diferentes pressões de ensaio de microaspersores: 1,0 kgf cm⁻² (a); 1,5 kgf cm⁻² (b) e 3,5 kgf cm⁻² (c)

Analisando-se a estabilidade de pressão ao longo de um ensaio obteve-se os dados apresentados na Figura 20. Como o tempo de ensaio nesta bancada é elevado, comparado ao tempo demandado para medição das características da qualidade na bancada de ensaio de microaspersores, foram analisados gráficos de controle para pressão de ensaio durante a determinação da vazão do conjunto de 25 emissores, sob repetição única e considerando os três turnos. Nesta análise, verificou-se que o sistema de controle e medição da pressão é capaz de se manter estável, independentemente do turno de trabalho, durante o período de realização do ensaio, que dura aproximadamente 12 minutos para o modelo de gotejador utilizado, à pressão de 1,5 kgf cm⁻² (Figura 21). Durante o tempo de enchimento dos coletores, 362 indicações da pressão de ensaio foram registradas e utilizadas na elaboração dos gráficos de controle apresentados.

Figura 21. Gráficos de controle MMEP para monitoramento da pressão em bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores, considerando três turnos de operação: manhã (a); tarde (b) e noite (c)

4.2.2. Pressão de ensaio – análise de capacidade do processo de controle e medição

Conforme relatado anteriormente, para a análise de desempenho de um processo produtivo ou sistema de medição, inicialmente é primordial averiguar a aproximação dos dados do processo à distribuição normal de probabilidades (Montgomery, 2016), aplicar funções de transformação para a normalidade ou ajustá-los a uma distribuição qualquer não paramétrica (Chen; Ding, 2001). Valores da estatística A de Anderson-Darling e p-valor do teste são apresentados na Tabela 10, considerando dados de 10 repetições em cada turno, com 362 indicações da pressão de ensaio em cada repetição, obtidas durante o tempo de monitoramento de cada ensaio na bancada.

Tabela 10. Teste de normalidade para os dados de pressão de ensaio na bancada de gotejadores e tubos gotejadores

Turno	n*	Estatística A	p-valor	Normalidade?
Manhã	3620	0,2003	0,846	Sim
Tarde	3620	0,1530	0,942	Sim
Noite	3620	0,1296	0,977	Sim
Geral	10860	0,1607	0,934	Sim

*n = 10 repetições x 362 indicações por medição

Novamente, a distribuição de frequência das pressões de ensaio na bancada de ensaios e gotejadores e tubos gotejadores, apresentada na Figura 22, demonstra que não há evidências de diferenças expressivas durante monitoramento do ajuste de pressão, em termos da realização dos ensaios em turnos diferentes. Concluiu-se que o pressuposto de normalidade dos dados exigido para a análise de capacidade foi satisfatoriamente atendido (Balestrassi, P.P.; Ferreira, J.R.; Moraes, C.F., 2006), conforme também evidenciado pelos resultados do teste de Anderson-Darling acima.

Figura 22. Distribuição de frequência da pressão de ensaio na bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores

Após atender ao requisito da aderência à distribuição normal, foram obtidos os índices de capacidade e desempenho do processo de controle e medição da pressão de ensaio, considerando o conjunto geral dos dados, sem discriminação referente ao turno de trabalho (Figura 23). Aqui, todos os dados permaneceram entre os limites de especificação, tanto para $\pm 2\%$ (LIE = 1,47 e LSE = 1,53 kgf cm⁻²) quanto para $\pm 1\%$ (LIE = 1,485 e LSE = 1,515

kgf cm⁻²) de variação máxima permitida em torno do alvo, não sendo esperado também nenhum valor fora da faixa de especificação (% < LIE = 0 e % > LSE = 0). Novamente, a centralização do processo de controle e medição da pressão de ensaio em relação aos limites de especificação ficou evidente, devido aos valores dos índices C_{pk} e C_{pm} serem quase idênticos aos índices C_p e P_p (Pan; Li, 2014). Conforme tabela de classificação adaptada de Kaya e Kahraman (2011) para enquadramento do nível de capacidade do processo, classificou-se o ajuste da pressão e sua medição na bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores como “excelente”.

Figura 23. Índices de capacidade para processo de ajuste e monitoramento da pressão de ensaio na bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores, considerando tolerâncias de $\pm 2\%$ (a); e $\pm 1\%$ (b)

Índices de desempenho do processo de controle e medição da pressão de ensaio, discriminados para os três turnos de operação, são apresentados na Tabela 11. Nessa etapa, foi considerada a variação máxima permitida de $\pm 2\%$ em relação à pressão de ensaio para os limites de especificação (LIE = 1,47 e LSE = 1,53 kgf cm⁻², respectivamente). Considerando-se que o conjunto de dados é o mesmo, e que o processo está satisfatoriamente centralizado, pode-se supor sem riscos de cometer erros, que para obter os índices de capacidade a $\pm 1\%$, basta multiplicar por $\frac{1}{2}$ os índices obtidos a $\pm 2\%$ de variação. Entretanto, isto somente é válido para um mesmo conjunto de dados avaliados sob as duas faixas de especificação; e para processos que sejam centralizados em relação à faixa de especificação, ou seja, cuja média do processo praticamente coincida com o alvo desejado (Pearn; Shu; Hsu, 2005; Al-Refaie; Bata, 2010).

Tabela 11. Análise de capacidade e desempenho do processo de controle e medição da pressão na bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores

Turno	Índices de capacidade/desempenho do processo								
	-----Potencial-----				-----Global-----				
	C_p	C_{pl}	C_{pu}	C_{pk}	P_p	P_{pl}	P_{pu}	P_{pk}	C_{pm}
Manhã	5,21	5,15	5,27	5,15	5,02	4,96	5,07	4,96	4,95
Tarde	5,31	5,25	5,36	5,25	5,28	5,22	5,33	5,22	5,20
Noite	5,15	5,09	5,21	5,09	5,06	5,00	5,12	5,00	4,99
Geral	5,22	5,16	5,28	5,16	5,11	5,06	5,17	5,06	5,04

4.2.3. Monitoramento da temperatura da água

Conforme esperado, oscilações diárias da temperatura ambiente implicaram em variações na temperatura média da água durante os ensaios (Figura 24a). Entretanto, mais importante que analisar as oscilações de temperatura da água entre ensaios, é a estabilidade da temperatura da água durante um único ensaio (Figura 24b), pois nesta escala de observação, não devem ocorrer variações na temperatura ao ponto de afetar significativamente as medições da vazão dos gotejadores.

Figura 24. Monitoramento da temperatura da água durante as medições de pressão e vazão na bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores, considerando todas as repetições, obtidas em dias e horários diferentes (a); e considerando repetição única, com dados obtidos durante ensaio específico (b)

Conforme NBR ISO 9261, a temperatura da água deve permanecer entre 20 e 26 °C durante cada ensaio, limites estes que foram adequadamente atendidos, não sendo identificados também pontos além dos limites $\pm 3\sigma$ no gráfico de controle MMEP para temperatura da água durante um ensaio (repetição 05, no turno da manhã).

Normalmente, pode ocorrer elevação da temperatura da água durante processo de recirculação da água na bancada devido à passagem pela motobomba aquecida. Porém, ficou empiricamente constatado, através de observações durante a condução dos ensaios, que o próprio sistema de retorno da água para o reservatório, passando por área de coleta constituída de chapa metálica, pode funcionar como sistema de resfriamento da água aquecida que sai do conjunto motobomba, sendo este um aspecto importante de ser mencionado.

4.2.4. Vazão – repetitividade e reprodutibilidade

A análise descrita nesse item refere-se ao estudo de repetitividade e reprodutibilidade (Gage RR) do sistema de medição da vazão dos tubos gotejadores e teve como objetivo quantificar a contribuição das principais componentes de variabilidade no processo de medição de vazão. O modo de apresentação dos resultados é similar àquele adotado para o estudo de repetitividade e reprodutibilidade microaspersores.

No estudo de repetitividade e reprodutibilidade (Gage RR) para a bancada de ensaio de gotejadores e tubos gotejadores, observou-se ausência de interação entre efeitos de peça e turnos de trabalho, sendo, portanto, necessário refazer a ANOVA, desconsiderando a componente de interação, conforme recomendado por Pedott e Fogliatto (2013). A ausência de interação entre peça e turno de trabalho ficou evidenciada pelo elevado p-valor associado na análise de variância, assim como os efeitos significativos dos fatores peça e turno foram identificados pelo reduzido p-valor da ANOVA (Tabela 12), considerando-se o nível α de 5% de significância para remoção dos efeitos de interação.

Tabela 12. ANOVA para o estudo de repetitividade e reprodutibilidade na bancada de gotejamento (com interação)

Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F	*p-valor
Peça (Emissor)	24	5,13442	0,21393	2104,62	0,000
Turno	2	0,00108	0,00054	5,32	0,008
Interação [Peça*Turno]	48	0,00488	0,00010	0,41	1
Repetitividade	675	0,16599	0,00025		
Total	749	5,30637			

* $\alpha = 0,05\%$ para remover efeitos de interação

Os efeitos de turno e interação, quando existem, apresentam-se como incremento nas contribuições associadas às incertezas de reprodutibilidade do sistema de medição, conforme detalhado mais adiante na análise de variância para medidas de vazão dos gotejadores.

Uma vez identificada ausência de efeitos de interação, conforme os resultados da tabela anterior, obteve-se o novo quadro da ANOVA (Tabela 13), para o qual os efeitos de emissores (Peça) predominam, e os de turno foram considerados irrelevantes ($p - \text{valor} = 0,102$).

Tabela 13. ANOVA para o estudo de repetitividade e reprodutibilidade na bancada de gotejamento (sem interação)

Fonte de variação	GL	SQ	MQ	F	*p-valor
Peça (Emissor)	24	5,13442	0,21393	905,22	0,000
Turno	2	0,00108	0,00054	2,29	0,102
Repetitividade	723	0,17087	0,00024		
Total	749	5,30637			

*Efeitos de interação removidos considerando $\alpha = 0,05\%$ de significância

Na Tabela 14, tem-se o desdobramento da ANOVA e quantificação da contribuição na variância total, com os intervalos de confiança, considerando 95% de probabilidade, para os respectivos valores obtidos; e o desvio padrão associado a cada fonte de variação. Conforme a Tabela 14, concluiu-se que apenas 3,23% da variância total é devida a efeitos associados às incertezas de repetitividade e reprodutibilidade, ou seja, a erros de mensuração inerentes ao sistema de medição (Gage RR). Desse total, 0,02% é decorrente da reprodutibilidade, especificamente da utilização da bancada para medição das vazões dos gotejadores sob diferentes condições, sendo que no presente caso essa variante foi o turno de trabalho. Assim, 96,77% da variância total de vazão é devida à variabilidade entre peças (emissores), o que permite afirmar que o sistema de medição de vazão utilizado nos ensaios de gotejadores/tubos gotejadores opera adequadamente e exerce pouca influência nos resultados de CVFq obtidos em ensaios de uniformidade de vazão.

Tabela 14. Variância, desvio padrão e porcentagem de contribuição das fontes de variação na variabilidade total das medições de vazão obtidas na bancada de ensaio de gotejadores, para diferentes turnos de trabalho

Fonte de variação	σ^2	Contribuição		Percentual de σ_{total} (%)	*IC para σ		**NDC do estudo
		de σ^2_{total} (%)	σ		Inferior	Superior	
Gage RR	0,0002375	3,23	0,015413	17,96	0,015	0,018	7
Repetitividade	0,0002363	3,21	0,015373	17,92	0,015	0,016	
Reprodutibilidade	0,0000012	0,02	0,001103	1,29	0,000	0,009	
Turno	0,0000012	0,02	0,001103	1,29	0,000	0,009	
Peça (Emissor)	0,0071233	96,77	0,084399	98,37	0,066	0,117	
Total	0,0073608	100,00	0,085795	100,00	0,068	0,118	

*Intervalo de confiança para o desvio padrão, a 95% de probabilidade

** NDC = $\sqrt{2} \frac{\sigma_{\text{Emissor}}}{\sigma_{\text{Gage RR}}} = \text{Número de categorias distintas}$

O sistema de medição de vazão utilizado na bancada foi capaz de identificar sete categorias de gotejadores de vazão distintas, conforme representado pelo índice NDC = 7, sendo que valores de NDC acima de 5 são considerados bons ou adequados, conforme Tabela 3 (Peruchi et al., 2014; Pereira et al., 2016; Zanobini et al., 2016).

Nesse estudo de repetitividade e reprodutibilidade do sistema de medição, o desvio padrão total foi de 0,0858, sendo 17,96% pertinente ao Gage RR e 98,37% associado às peças ou emissores de gotejamento. É importante lembrar que, em termos de desvio padrão, a soma das porcentagens de contribuição do sistema de medição (Gage RR) e das peças não resulta 100%, como apresentado para a variância; e isso decorre da formulação proposta na Eq. 23, com o desvio padrão total associado às medidas y_{ijk} expresso como a raiz quadrada da soma

das componentes parciais da variabilidade total, ou seja, $\sigma_{\text{total}} = \sqrt{V(y_{ijk})} = \sqrt{\sigma^2_{\tau} + \sigma^2_{\beta} + \sigma^2_{\tau\beta} + \sigma^2}$ (White; Borror, 2011; Montgomery, 2016).

Conforme estudo de comparação interlaboratorial realizado por Koech et al. (2015) para ensaio de gotejadores realizados manualmente pelo método gravimétrico, maior dispersão nas medições pode ser interpretada como uma maior instabilidade nas condições de ensaio, sendo que pelo menos um dos laboratórios avaliados apresentou incerteza de medição significativamente diferentes dos demais.

Determinações do coeficiente de variação dos tubos gotejadores, com 10 repetições e considerando três turnos de trabalho (manhã, tarde e noite), apontaram CVFq variando de 2,9 a 3,1%, com média geral de 3,0% (Figura 25). Diante desses valores e da análise conjunta

com a Figura 28, pode-se afirmar que os sistemas de controle e medição adotados na bancada de ensaio são capazes de mensurar as características da qualidade necessárias para obtenção do coeficiente de variação de fabricação dos gotejadores de forma adequada, produzindo CVFq com reduzida variabilidade, independentemente do momento em que os ensaios sejam realizados. Esta deve ser uma preocupação de laboratórios de testes de material de irrigação, uma vez que sistemas que operem satisfatoriamente não devem resultar variabilidade elevada, de forma que as características de desempenho dos emissores sejam mantidas, sem influência de horários de realização dos testes, trocas de técnicos de ensaios quando forem conduzidos manualmente ou utilização de diferentes instrumentos de medição para a mesma característica da qualidade.

Figura 25. Coeficientes de variação de fabricação para tubos gotejadores para três turnos de trabalho e 10 repetições

4.3. Considerações e recomendações

Normalmente, os estudos de repetitividade e reprodutibilidade de sistemas de medição (Gage RR) são feitos considerando-se operadores ou técnicos de ensaio como variante do estudo. Entretanto, para sistemas automatizados, nos quais não há influência do técnico na obtenção das medidas, como no presente caso, torna-se incorreto o enquadramento do técnico como fonte de variação no estudo. Foi com base nisso que foram definidos o turno de trabalho para a realização dos ensaios como variante no estudo de repetitividade e reprodutibilidade das duas bancadas de ensaio.

Apesar de pesquisas recentes relacionadas à área de estatística, engenharia de produção, mecânica e industrial apresentarem critérios para interpretação desses estudos,

recomenda-se a utilização desses critérios com cautela para analisar sistemas de medição e controle em ensaios de material de irrigação. A utilização das ferramentas de controle estatístico de processos e análise de sistemas de medição constitui aplicação potencial para a identificação de oportunidades de aperfeiçoamento das técnicas de ensaio adotadas por um laboratório qualquer, sempre devendo ser preconizados critérios técnicos e econômicos, associados ao bom senso para a tomada de decisão por parte do engenheiro da qualidade ou técnico de ensaios responsável.

Analisando-se a temperatura da água nas duas bancadas estudadas verificou-se que, durante um dado ensaio, a variação da temperatura é pequena e não exerce influência significativa na vazão, e, portanto, o emprego de um sistema para controle de temperatura da água seria dispensável. Por outro lado, visando a padronização das condições de ensaio seria interessante o uso de tal sistema de controle a fim de produzir resultados de ensaio sob condições padronizadas de temperatura da água.

A pressão de ensaio, que possui relação proporcional direta e potencial com a vazão dos emissores, manteve-se sob controle independentemente do turno em que os ensaios foram conduzidos, sendo este um provável efeito benéfico da adoção do sistema automatizado via controlador PID para ajuste da pressão.

As análises feitas para a presente pesquisa foram baseadas nas configurações e nível de sofisticação atualmente existentes para os processos de medição das características da qualidade (pressão de ensaio, vazão e temperatura da água), pertinentes aos ensaios para determinação da uniformidade de vazão e curvas vazão-pressão de emissores de microirrigação. Com base nelas, foi possível checar os níveis de estabilidade e desempenho dos sistemas de medição adotados, assim como a discriminação das principais fontes de variabilidade nas medidas de vazão, com os percentuais de contribuição incorporados pelas incertezas de repetitividade e reprodutibilidade. Nesse contexto, pressupõe-se que os resultados obtidos não devam ser estendidos para futuros níveis de processo que venham a ser obtidos em função de possíveis tentativas de aperfeiçoamento dos sistemas de medição. Por exemplo, é normal, ou até mesmo necessário, que equipamentos (motobombas, sensores ou instrumentos de medição, entre outros) sejam substituídos nas bancadas. Assim, sugere-se que quaisquer medidas implementadas sejam reavaliadas, podendo, para tal, dispor das mesmas ferramentas apresentadas para a comparação do “antes” e “depois” da medida ou ação de melhoria acrescentada. Inclusive, como mencionado anteriormente, etapas de avaliação e reavaliação de um processo fazem parte do conceito de ciclo PDCA (ou ciclo de Deming), que é historicamente consagrado no âmbito do controle estatístico de qualidade.

5. CONCLUSÕES

Os sistemas de ajuste e medição da pressão de ensaio e temperatura da água foram satisfatoriamente avaliados mediante utilização de gráficos de controle e índices de capacidade para o processo de medição. Essas ferramentas ficaram sugeridas como procedimentos para quantificação dos impactos de alterações visando o aprimoramento da qualidade dos resultados, a exemplo da automação das bancadas de ensaio.

Na bancada de ensaio de microaspersores, melhorias no ajuste de pressão foram alcançadas por meio da implantação do controlador PID e claramente detectadas nos gráficos de controle.

O ajuste de pressão via controlador PID permitiu manter estável essa variável, independentemente do turno de realização dos ensaios, sendo que menores pressões implicaram em maior dificuldade de manter o sistema entre os limites de controle desejados para o processo.

Quanto à capacidade do processo de medição de pressão, tanto para a bancada de ensaio de microaspersores como de gotejadores e tubos gotejadores, o mesmo foi classificado como “excelente”, considerando a faixa de variação máxima de $\pm 2\%$ em relação ao valor alvo desejado. Para a bancada de gotejamento, foi possível restringir esses limites de especificação a $\pm 1\%$, mantendo o nível de excelência para os índices de capacidade do processo.

Não existe influência do turno de realização dos ensaios na qualidade das medições de vazão dos emissores em nenhuma das bancadas.

O efeito de variabilidade entre emissores foi a componente de maior contribuição na variância total das medições de vazão dos microaspersores e gotejadores, com os respectivos percentuais de 95,47% e 96,77%.

A repetitividade e reprodutibilidade do sistema de medição de vazão (Gage RR) foi aceitável para as duas bancadas de ensaio.

Não foram identificadas causas não aleatórias relevantes de variabilidade na rotina de ensaios praticada no âmbito do Laboratório de Ensaios de Material de Irrigação (LEMI/INCT-EI/ESALQ/USP).

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 15084: Irrigação localizada – Microaspersores – Requisitos gerais e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2004. 14p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9261: Equipamentos de irrigação agrícolas – Emissores e tubos emissores – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2006. 17p.
- Abujiya, M.R.; Riaz, M.; Lee, M.H. Improving the Performance of Combined Shewhart-Cumulative Sum Control Charts. *Quality and Reliability Engineering International*, v.29, n.8, p.1193-1206, 2013.
- AIAG (AUTOMOTIVE INDUSTRIES ACTION GROUP). Measurement System Analysis – Reference Manual, 4rd ed. Daimler Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation, Essex, 2010.
- Al-Refaie, A.; Bata, N. Evaluating measurement and process capabilities by GR&R with four quality measures. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v.43, n.6, p.842–851. 2010.
- Moraes, C.F; Ferreira, J.R.; Balestrassi, P.P. Análise crítica da aplicação de métodos estatísticos em processos definidos por dados que não apresentam distribuição normal. *Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, n.1, v.2, p.7-18, 2006.
- BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP e OIML. Vocabulário Internacional de metrologia – VIM 2012. Joint Committee for Guides in Metrology, JCGM, 2012.
- Burdick, R. K.; Borror, C.M.; Montgomery, D. C. A review of methods for measurement systems capability analysis. *Journal of Quality Technology*, v.35, n.4, p.342–354, 2003.
- García, A.; Río, A. Number of distinct data categories and gage repeatability and reproducibility. A double (but single) requirement. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v.46, n.8, p.2514–2518, 2013.
- Chen, J.P.; Ding, C.G. A new process capability index for non-normal distributions. *The International Journal of Quality & Reliability Management*, v.18, n.6-7, p.762–770, 2001.
- Chun-Tsai, C.; Che-Chen, C. Making decision to evaluate process capability index Cp with fuzzy numbers. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.30, p.334–339, 2006.
- Clements, J.A. Process capability calculations for non-normal distributions. *Quality Progress*, v.22, n.9, p.95–100. 1989.

- Costa, A.F.B.; Epprescht, E.K.; Carpinetti, L.C.R. Controle estatístico de qualidade. São Paulo: Atlas, 2004.
- Dalalah, D.; Hani, D. B. On the actual and observed process capability indices: A signal-to-noise ratio model. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v.81, p.241–250, 2016.
- ESTATCAMP. Portal Action. 2016 (<http://www.portalaction.com.br/>). Acesso em: 20/10/2016
- Farnum, N.R. Using Johnson curves to describe non-normal process data. *Quality Engineering*, v.9, n.2, p.329–336, 1997.
- Follador, F.A.C.; Villas Boas, M.A.; Malmann, L.; schoenhals, M.; Villwock, R. Controle de qualidade da água medido através de cartas de controle de Shewhart, CUSUM e MMEP. *Engenharia Ambiental*, v.9, n.3, p.183–197, 2012a.
- Follador, F.A.C.; Villas Boas, M.A.; Schoenhals, M.; Hermes, E.; Rech, C. Tabular CUSUM control charts of chemical variables applied to the control of surface water quality. *Engenharia Agrícola*, v.32, n.5, p.951–960, 2012b.
- Frizzone, J.A.; Freitas, P.S.L.; Rezende, R.R. Faria, M.A. Microirrigação: gotejamento e microaspersão. 1 ed. Maringá: EDUEM, 2012. 356p.
- Gonzalez, P.U.; Werner, L. Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não normais. *Gestão e Produção*, v.16, n.1, p.121–132, 2009.
- Hermes, E.; Vilas Boas, M.A.; Gomes, S.D.; Gomes, B.M.; Reis, C.F. Quality control in irrigation and fertigation with cassava processing wastewater into drip system. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, v.11, n.2, p.841-845, 2013.
- ISO/IEC GUM: 2008. Guide to the expression of uncertainty in measurements. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization; 2008.
- Jim Youm, B.; Woo Kim, K. A Bibliography of the Literature on Process Capability Indices: 2000–2009. *Quality and Reliability Engineering International*, v.27, n.3, p.251-268. 2011.
- Juchen, C.R.; Suszek, F.L.; Vilas Boas, M.A. Irrigação por gotejamento para produção de alface fertirrigada com águas residuárias agroindustriais. *Irriga*, v.18, n.1, p.243–256, 2013.
- Justi, A. L.; Vilas Boas, M.A; Sampaio, S.C. Índice de capacidade do processo na avaliação da irrigação por aspersão. *Engenharia Agrícola*, v.30, n.2, p.264–270, 2010.
- Kaya, İ.; Kahraman, C. Fuzzy process capability indices with asymmetric tolerances. *Expert Systems with Applications*, v.38, n.12, p.14882–14890, 2011.

- Kaya, İ.; Kahraman, C. Fuzzy process capability analyses with fuzzy normal distribution. *Expert Systems with Applications*, v.37, n.7, p.5390–5403, 2010.
- Klaput, P.; Plura, J. Influence of Used Method on the Results of Gage Repeatability and Reproducibility Study. In: *Proceedings of Metal 2012 – 21st International conference on Metallurgy and Materials*, Tanger, Brno, Czech Republic, 23 – 25 May, 6 p., 2012.
- Koech, R.; Molle, B.; Camargo, A.P; Dimaiolo, P.; Audouard, M.; Saretta, E.; Frizzone, J.A.; Pezzaniti, D.; Benhu, G. Intercomparison dripper testing within the INITL. *Flow Measurement and Instrumentation*, v.46, Part A, p.1–11, 2015b.
- Koech, R.; Camargo, A.P; Molle, B.; Saretta, E.; Frizzone, J. A.; Benhu, G.; Pezzaniti, D. Intercomparison Testing and Evaluation of Sprinklers within the INITL. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.142, n.2, p.1-8, 2015a.
- Leite, M.S.; Fileti, A.M.F.; Silva, F.V. Desenvolvimento e aplicação experimental de controladores fuzzy e PID convencional em um bioprocesso. *Revista Controle & Automação*, Campinas, v.21, n.2, p.147-158, 2010.
- Mingoti, S.A.; Fidelis, M.T. Aplicando a geoestatística no controle estatístico de processo. *Revista Produto & Produção*, v.5, n.2, p.55–70, 2001.
- Montgomery, D.C. *Introdução ao controle estatístico da qualidade*. 7 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2016, 528p.
- Montgomery, D.C.; Runger, G.C. *Applied statistics and probability for engineers*. 3rd ed. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2003, 976p.
- Niavarani, M.; Noorossana, R.; Abbasi, B. Three New Multivariate Process Capability Indices. *Communications in Statistics—Theory and Methods*, v. 41, n.2, p.341–356, 2012.
- Nomellini, Q.S.S.; Ferreira, E.B.; Oliveira, M.S. Estudos dos padrões de não aleatoriedade dos gráficos de controle de Shewhart: um enfoque probabilístico. *Gestão e Produção*, v.16, n.3, p.414-421, 2009.
- Pan, J.N.; Li, C.I. New capability indices for measuring the performance of a multidimensional machining process. *Expert Systems with Applications*, v.41, n.5, p.2409–2414, 2014.
- Pearn, W.L.; Shu, M.H.; Hsu, B.M. Testing process capability based on C_{pm} in the presence of random measurement errors. *Journal of Applied Statistics*, v.32, n.10, p.1003–1024, 2005.
- Pearn, W.L.; Chen, K.S. Capability indices for non-normal distributions with an application in electrolytic capacitor manufacturing. *Microelectronics Reliability*, v.37, n.12, p.1853-1858, 1997.

- Pedott, A.H., Fogliatto, F.S. Estudo de repetitividade e reprodutibilidade para dados funcionais. *Produção*, v.23, n.3, p. 548-560, 2013.
- Pereira, R.B.D.; Peruchi, R.S.; de Paiva, A.P.; da Costa, S.C.; Ferreira, J.R. Combining Scott-Knott and GR&R methods to identify special causes of variation. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v.82, p.135–144, 2016.
- Peruchi, R.S.; Paiva, A.P.; Balestrassi, P.P.; Ferreira, J.R.; Sawhney, R. Weighted approach for multivariate analysis of variance in measurement system analysis. *Precision Engineering*, v.38, n.3, p.651–658, 2014.
- Pinto, M.F.; Salvador, C.A.; Camargo, A.P.; Alves, D.G.; Botrel, T.A. Desempenho de lógicas de controle para o ajuste automático do pH da água utilizada em microirrigação. *Irriga*, v.18, n.4, p.708-720, 2013.
- Psarakis, S., Vyniou, A.K.; Castagliola, P. Some Recent Developments on the Effects of Parameter Estimation on Control Charts. *Quality and Reliability Engineering International*, v.30, n.8, p.1113-1129, 2013.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna, 2016.
- Reynolds, M.R.; Stoumbos, Z.G. Robust CUSUM charts for monitoring the process mean and variance. *Quality and Reliability Engineering International*, v.26, n.5, p.453–473, 2009.
- Rocha, H.S.; Camargo, A.P.; Marques, P.A.A.; Perboni, A.P.; Lavanholi, R.; Frizzzone, J.A. Estabilidade e índice de capacidade para processo de medição de perda de carga. In: II Inovagri International Meeting. Fortaleza-CE, Brasil, 2014. Anais... II Inovagri International Meeting. Fortaleza-CE, Brasil, 2014.
- Sanders, F. F. Handling process disturbances and measurement errors. *ISA Transactions*, v.34, n. 2, p.165–173, 1995.
- Silva, G.F.; Pinto Júnior, D.L. Análise da performance de processos multivariados assimétricos. *Revista Eletrônica de Matemática*, n.2, 2010.
- Silva, R.P.; Corrêa, C.F.; Cortez, J.W; Furlani, C.E.A. Controle estatístico aplicado ao processo de colheita mecanizada de cana-de-açúcar. *Engenharia Agrícola*, v.28, n.2, p.292–304, 2008.
- Souza, L.M.; Ribeiro Júnior, J.I.; Reis, G.M.; Ide, M.S. Eficiência dos gráficos de controle Xbarra, EWMA e CUSUM. *Revista Eletrônica Produção & Engenharia*, v.1, n.1, p.81-94, 2008.

- Tsai, C.C.; Chen, C.C. Making decision to evaluate process capability index C_p with fuzzy numbers. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.30, n.3, p.334–339, 2006.
- Vännman, K. Families of capability indices for one-sided specification limits. *Statistics*, v.31, n.1, p.43–66, 1998.
- Vargas, V.C.C.; Lopes, L.F.D.; Souza, A.M. Comparative study of the performance of the CuSum and EWMA control charts. *Computers and Industrial Engineering*, v.46, n.4, p.707–724, 2004.
- Walter, O.M.F.C.; Henning, E.; Cardoso, M.E.; Samohyl, R.W. Aplicação individual e combinada dos gráficos de controle Shewhart e CUSUM: uma aplicação no setor metal mecânico. *Gestão e Produção*, v.20, n.2, p.271–286, 2013.
- Werkema, M.C.C. Ferramentas Estatísticas Básicas para o Gerenciamento de Processos. Vol. II, Editora Fundação Christiano Ottoni - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1995.
- White, T.K.; Borrór, C.M. Two-dimensional guidelines for measurement system indices. *Quality and Reliability Engineering International*, v.27, v.4, p.479–487. 2011.
- Yang, S.F; Tsai, W.C.; Huang, T.M.; Yang, C.C.; Cheng, S. Monitoring process mean with a new EWMA control chart. *Produção*, v. 21, n.2, p.217–222, 2011.
- Yeh, T.; Sun, J. Using the Monte Carlo Simulation Methods in Gauge Repeatability and Reproducibility of Measurement System Analysis. *Journal of Applied Research and Technology*, v.11, n.5, p.780–796, 2013.
- Zanobini, A.; Sereni, B.; Catelani, M.; Ciani, L. Repeatability and Reproducibility techniques for the analysis of measurement systems. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v.86, n.2, p.125–132, 2016.
- Zhou, W.; Beck, B.F.; Pettit, A.J.; Wang, J. Application of water quality control charts to spring monitoring in karst terranes. *Environmental Geology*, v.53, n.6, p.1311–1321, 2008.