Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Análise de incerteza de um sistema automatizado para ensaios de aspersores de irrigação

Ezequiel Saretta

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

Piracicaba
2016

Ezequiel Saretta
Engenheiro Agrônomo

Análise de incerteza de um sistema automatizado para ensaios de aspersores de irrigação

Versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **TARLEI ARRIEL BOTREL**

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

Saretta, Ezequiel
Análise de incerteza de um sistema automatizado para ensaios de aspersores de irrigação / Ezequiel Saretta. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016.
74 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Normatização 2. Metrologia 3. Incerteza de medição 4. Eletrônica 5. Instrumentação I. Título

CDD 631.7
S247a

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e por sempre me guiar por caminhos onde encontro pessoas que me ajudam.

A meus pais, José e Terezinha, pelo amor, pela educação e apoio em todos os momentos.

Aos meus irmãos e toda a minha família, sempre presentes nos momentos importantes, preenchendo-os com muita alegria.

À Juliana, pelo apoio, cumplicidade, dedicação e atenção em todos os instantes, com muito amor e carinho.

Aos amigos, com quem compartilho momentos agradáveis. Agradeço em especial a todos os colegas de Pós-Graduação pela amizade e pela troca de experiências.

Ao amigo Antonio Pires de Camargo, pelos conhecimentos compartilhados, pela ajuda na elaboração deste e de outros trabalhos e por todo apoio.

Ao Professor Tarlei Arriel Botrel, pela orientação tanto profissional quanto pessoal, sempre incentivando na busca pelo melhor.

Ao Professor José Antônio Frizzone, incentivador e orientador de nossos trabalhos, por todo conhecimento compartilhado e todas as oportunidades de aprendizado.

À ESALQ/USP, pela oportunidade de aperfeiçoamento, treinamento e atuação profissional.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI).

À FAPESP pela concessão da bolsa de estudos, sob número de processo 2013/14370-4.

Às agências de fomento à pesquisa, CAPES e CNPq pelas concessões de bolsas de estudos durante o doutorado.

À Universidade do Estado de Santa Catarina pela minha formação.

Aos Professores Olívio José Soccol e Mário Nestor Ullman, pela confiança em mim depositada e pelos conhecimentos compartilhados.

A todos os professores que não mediram esforços em prol da minha formação, em especial aqueles do PPG-Engenharia de Sistemas Agrícolas durante a pós-graduação.

A toda equipe do Departamento de Engenharia de Biossitemas/ESALQ, pela ajuda durante o curso de doutorado e pelas sugestões para a realização dos trabalhos.

E a todos aqueles que sempre acompanharam e contribuíram para concluir essa fase!

“Toda decisão acertada é proveniente da experiência.
E toda experiência é proveniente de uma
decisão não acertada.”

(*Albert Einstein*)

SUMÁRIO

RESUMO 9
ABSTRACT 11
LISTA DE ILUSTRAÇÕES 13
LISTA DE TABELAS 15
1 INTRODUÇÃO 17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
2.1 Ensaios de distribuição de água de aspersores para irrigação 19
2.1.1 Ensaios automáticos 21
2.2 Expressão dos resultados de medição 23
3 MATERIAL E MÉTODOS 35
3.1 Sistema de pressurização 35
3.2 Sistema de medição 37
3.3 Sistema de gerenciamento 39
3.4 Incerteza de medição para ensaios de aspersores 41
3.4.1 Medição de massa 41
3.4.2 Medição de nível 43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 45
4.1 Análise de incerteza para ensaios com medição de massa 45
4.2 Análise de incerteza para ensaios com medição de nível 47
4.2.1 Contribuição das fontes de incerteza na incerteza combinada 51
4.2.2 Efeito da temperatura da água na incerteza de medição 52
4.3 Ensaios de distribuição de água do aspersor avaliado 53
4.4 Avaliação de desempenho do sistema automático 57
4.4.1 Uniformidade de medição nos tubos de coleta 57
4.4.2 Tempo de abertura das válvulas de medição 58
4.4.3 Estanqueidade do sistema de medição 59
4.4.4 Tempo total de ensaio 59
5 CONCLUSÕES 61
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 63
REFERÊNCIAS 65
APÊNDICES 67

RESUMO

Análise de incerteza de um sistema automatizado para ensaios de aspersores de irrigação

Ensaios de distribuição de água de aspersores são convencionalmente realizados manualmente, requerendo tempo e mão de obra treinada. A automação desses ensaios proporciona redução da demanda por esses recursos e apresenta potencial para minimizar falhas e/ou desvios de procedimento. Atualmente, laboratórios de ensaio e calibração acreditados junto a organismos legais devem apresentar em seus relatórios a incerteza de medição de seus instrumentos e sistemas de medição. Além disso, normas de ensaio e calibração apresentam especificação de incerteza aceitável, como a norma de ensaios de distribuição de água por aspersores, ISO 15886-3 (2012), a qual exige uma incerteza expandida de até 3% em 80% dos coletores. Os objetivos deste trabalho foram desenvolver um sistema automatizado para os ensaios de aspersores em laboratório e realizar a análise de incerteza de medição, para sua quantificação nos resultados de ensaio e para dar suporte ao dimensionamento dos tubos de coleta. O sistema automático foi constituído por um subsistema de gerenciamento, por meio de um aplicativo supervisório, um de pressurização e um de coleta, por meio de módulos eletrônicos microprocessados desenvolvidos. De acordo com instruções do sistema de gerenciamento o sistema de pressurização ajustava a pressão no aspersor por meio do controle da rotação da motobomba, e o sistema de coleta realizava a medição da intensidade de precipitação de água ao longo do raio de alcance do aspersor. A água captada por cada coletor drenava para um tubo de coleta, que estava conectado a uma das válvulas solenoides de um conjunto, onde havia um transmissor de pressão. Cada válvula era acionada individualmente numa sequência para a medição do nível de água em cada tubo de coleta, por meio do transmissor. Por meio das análises realizadas, as menores incertezas foram obtidas para os menores diâmetros de tubo de coleta, sendo que se deve utilizar o menor diâmetro possível. Quanto ao tempo de coleta, houve redução da incerteza de medição ao se aumentar a duração, devendo haver um tempo mínimo para se atingir a incerteza-alvo. Apesar de cada intensidade requer um tempo mínimo para garantir a incerteza, a diferença mínima de nível a ser medida foi a mesma. Portanto, para os ensaios visando atender a incerteza, realizou-se o monitoramento da diferença de nível nos tubos, ou diferença de nível, facilitando a realização do ensaio. Outra condição de ensaio considerou um tempo de coleta para 30 voltas do aspersor, também exigido pela norma ISO 15886-3 (2012). A terceira condição considerou 1 h de coleta, como tradicionalmente realizado. As curvas de distribuição de água obtidas por meio do sistema desenvolvido foram semelhantes às obtidas em ensaios convencionais, para as três situações avaliadas. Para tempos de coleta de 1 h ou 30 voltas do aspersor o sistema automático requereu menos tempo total de ensaio que o ensaio convencional. Entretanto, o sistema desenvolvido demandou mais tempo para atingir a incerteza-alvo, o que é uma limitação, mesmo sendo automatizado. De qualquer forma, o sistema necessitava apenas que um técnico informasse os parâmetros de ensaio e o acionasse, possibilitando que o mesmo alocasse seu tempo em outras atividades.

Palavras-chave: Normatização; Metrologia; Incerteza de medição; Eletrônica; Instrumentação

ABSTRACT

Analysis of uncertainty of an automated system for testing irrigation sprinklers

Sprinkler water distribution tests are usually done manually, requiring time and trained labor. Automation of these tests allows saving such resources, and offers potential to minimize failures and/or procedure deviations. Nowadays, calibration and testing laboratories accredited by legal bodies have to present the uncertainty of their instruments and measurement systems. Besides, testing and calibration standards specify acceptable uncertainty, as the standard for sprinkler water distribution test, ISO 15886-3 (2012), which requires an expanded uncertainty up to 3% for 80% of the collectors. The purposes of this work were to develop an automated system for testing sprinkler at laboratory, and perform the analysis uncertainty of measurement, to quantify its magnitude on the testing results, and to support the sizing of collection tubes. The automatic system consisted of a management system, by the supervisory program, a pressurization system, and a collection system, by microprocessed electronic modules developed. According to instructions of the management system, the pressurization system adjusted pressure at the sprinkler by controlling pump rotation, and the collection system measured water application rate through the sprinkler radius. The water from each collector drained to a collecting tube, which was connected to a manifold of valves that contained a pressure transmitter. Each valve was individually triggered in sequence to allow measuring water level within each collection tube, by the transmitter. The analysis of uncertainty showed that the lower diameters of collection tubes presented the lower uncertainty, hence lower diameters should be used when possible. For the collection time, uncertainty decreased as time increased, and should be a minimum value to reach the target uncertainty. Although each application rate requires a minimum time to reach uncertainty, the difference of pressure to be measured stayed the same. Thus, for the tests addressing uncertainty, the difference of pressure was monitored, facilitating the test. Another test condition considered the collection time for 30 laps of the sprinkler, also required by ISO 15886-3 (2012). The third condition considered 1 h of collection, as traditionally done. Water distribution curves obtained from the automated system were similar as those of the conventional tests, for the three situations evaluated. For durations of 1 h or 30 laps of the sprinkler, the automated system required lower total time than the conventional test. However, the system developed demanded more time to perform the test to reach the maximum uncertainty, which is a limitation, even been automatized. In any case, a technician was required just to set parameters and then start the system, so he could allocate his time for other activities.

Keywords: Standardization; Metrology; Uncertainty in measurement; Electronics; Instrumentation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Componentes básicos do sistema de medição de nível nos tubos de coleta utilizando-se um medidor para cada tubo (A) ou um para todos os tubos (B) 22

Figura 2 – Relação entre tipo de erro, característica de desempenho qualitativa e sua expressão quantitativa 25

Figura 3 – Acurácia e incerteza de medição como resultados da combinação de fatores sistemáticos e aleatórios 26

Figura 4 – Ambiente do laboratório para ensaios de aspersores 36

Figura 5 – Esquema hidráulico do sistema e circuitos de controle e aquisição..... 36

Figura 6 – Componentes do sistema de medição: (A) coletor e tubo de coleta; (B) conjunto de válvulas de medição..... 37

Figura 7 – Esquema resumido das tarefas executadas pelo sistema..... 40

Figura 8 – Incerteza expandida nos ensaios convencionais para diferentes intensidades e tempos de coleta..... 45

Figura 9 – Contribuições de cada fonte para a incerteza de medição de massa para diferentes tempos de coleta e intensidades..... 46

Figura 10 – Tempo mínimo de coleta para se atingir incerteza-alvo menor que 3% (k=2) no sistema convencional..... 47

Figura 11 – Incerteza expandida relativa para diferentes intensidades de precipitação e diâmetros do tubo de coleta..... 48

Figura 12 – Intervalos de tempo disponíveis para coleta de água para tubos de diâmetros de 17 e 21,6 mm (A e B) e 27,8 e 35,2 mm (C e D) 50

Figura 13 – Contribuição de cada fonte de incerteza para a incerteza-alvo de 3% (k = 2) para o tubo de 17 mm..... 52

Figura 14 – Efeito do aumento ou diminuição em 1 °C da temperatura da água na incerteza relativa ao se utilizar um tubo de coleta de 17 mm e tempo de coleta de 30 minutos, para intensidades de 0,25 mm h^{-1} (A) e 10 mm h^{-1} (B) 53

Figura 15 – Curvas de distribuição de água do aspersor obtidas nos sistemas convencional (massa) e automático durante 1 h de coleta de água (A) e 30 voltas do aspersor (B)..... 54

Figura 16 – Tempos de coleta mínimo, para incerteza-alvo menor que 3%, e máximo, sem extravasamento do tubo, conforme a intensidade de precipitação do aspersor testado..... 55

Figura 17 – Curvas de distribuição de água do aspersor com tempo de coleta para incerteza-alvo de 3% 57

Figura 18 – Uniformidade de medição de nível nos tubos de coleta..... 58

Figura 19 – Teste do tempo de abertura de cada válvula de medição..... 58

Figura 20 - Estanqueidade no sistema de coleta, com medições de nível no início e após 1 h de teste 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações dos tempos de coleta mínimo e máximo para cada tubo de coleta.....50

Tabela 2 – Tempos totais de ensaio nos sistemas convencional e automático de acordo com critérios das normas.....60

1 INTRODUÇÃO

A uniformidade de distribuição é quantificada por medidas de dispersão, sendo o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) o mais utilizado para avaliar a aplicação de água por aspersão. Ensaios de aspersores fornecem uma curva de distribuição de água ou uma matriz de intensidades de aplicação para se calcular o CUC, podendo ser realizados pelo método completo a campo, ou pelo método radial em laboratório. A campo, condições ambientais como vento e evaporação influenciam as medições, por isso, passou-se a realizar os mesmos em laboratório, onde as interferências são menores. Assim, simplificações do método completo resultaram no método radial, ou seja, apenas uma linha de coletores ao longo do raio de distribuição do aspersor, o que também proporciona maior rapidez na realização do ensaio.

Ensaios dessa natureza dispõem de rotinas bem definidas, longas e repetitivas, sendo que a realização manual de tais tarefas demanda tempo, mão-de-obra e apresenta riscos de falhas na execução dos procedimentos devido a excessiva repetição de rotinas. Por isso, também se tem buscado automatizar os ensaios de distribuição, com alguma estratégia de medição da quantidade de água coletada ao longo do raio do aspersor.

A automatização dos ensaios consiste no emprego de algum tipo de sensor acoplado aos coletores, cuja finalidade seja o monitoramento da variação da quantidade de água coletada. As células de carga são uma das opções para essa finalidade e podem propiciar os melhores resultados em termos de incerteza de medição. Entretanto, esses transdutores de força apresentam o inconveniente de sofrerem influência de vibrações ou mesmo de correntes de ar, além do problema do molhamento da parte externa do coletor, que pode superestimar a intensidade de aplicação. Já os transdutores de pressão, usados para medição da variação de nível no interior de coletores, apesar de apresentar uma incerteza de medição de menor qualidade, não são suscetíveis aos problemas descritos para as células de carga.

Novas estratégias para melhoria nos sistemas de ensaio devem ser implementadas a fim de se atender às exigências atuais de incerteza de medição nas variáveis medidas. Nesse sentido, sabe-se que o estado da arte atual não dispõe de tais informações acerca da incerteza dos ensaios com medição do nível nos tubos de coleta, e com detalhamento que possa ajudar na tomada de decisão por parte de laboratórios interessados. Portanto, este trabalho teve como objetivos: (1) o desenvolvimento de um sistema automatizado para realização de ensaios radiais de aspersores em laboratório; (2) realizar análises de incerteza para dar suporte ao dimensionamento dos tubos de coleta e para quantificação da incerteza dos resultados de ensaio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ensaios de distribuição de água de aspersores para irrigação

Um único aspersor operando a campo não apresenta um padrão de distribuição de água uniforme. Como o objetivo é aplicar a mesma quantidade de água em toda área irrigada, sempre haverá necessidade de se instalar um conjunto de aspersores, cujos padrões individuais serão sobrepostos, buscando-se maior uniformidade do que para um único aspersor (KARMELI, 1978). Assim, o espaçamento entre os aspersores passa a ser um dos fatores que determina a uniformidade de irrigação. Espaçamentos maiores implicam em menores uniformidades de distribuição de água e menor custo, sendo que se deve buscar o equilíbrio por meio de simulações e ensaios de uniformidade (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009).

Os métodos mais utilizados para ensaio de distribuição são o completo e o radial, sendo que o primeiro é utilizado para um conjunto de aspersores a campo, e o segundo para um aspersor individual num ambiente protegido, como um laboratório por exemplo. O ensaio completo é realizado no intuito de verificar a uniformidade e, dependendo do caso, tomar medidas de melhoria. Os coletores são distribuídos equidistantemente em uma malha no campo e se mede o volume coletado durante certo tempo (MERRIAM e KELLER, 1978; MERRIAM; SHEARER; BURT, 1980). No entanto, a principal dificuldade desse método está relacionada com o controle das condições ambientais, principalmente vento, temperatura e umidade relativa do ar. A velocidade do vento não deve ultrapassar 0,9 m s^{-1} (ABNT NBR ISO 7749-1, 2000; ISO 15886-3, 2012), pois seu principal efeito é a alteração do padrão de distribuição (TARJUELO et al., 1999). A temperatura do ar deve estar entre 15 e 30 °C, que aliada à umidade relativa do ar influenciam na evaporação da água nos coletores, devendo-se medir essa evaporação por meio de três coletores colocados próximos à área sob ensaio (ABNT NBR ISO 7749-1, 2000; ISO 15886-3, 2012).

Já no ensaio radial esses efeitos do ambiente podem ser minimizados quando realizado em ambiente protegido (laboratório). Para tanto, a temperatura do ambiente deve estar entre 15 e 30 °C, mesmo requisito para o ensaio completo (ABNT NBR ISO 7749-1, 2000). Assim, as condições são padronizadas, facilitando a comparação de aspersores (TARJUELO et al., 1999). Enquanto no ensaio completo se utiliza uma malha de coletores, no ensaio radial apenas se dispõe uma linha reta de coletores ao longo do raio, com igual espaçamento entre si (ABNT NBR ISO 7749-1, 2000). Logo, uma vantagem desse método é sua simplicidade em relação ao completo, pois requer menos tempo e mão de obra. Um dos primeiros relatos da utilização do ensaio radial foi de Vories e von Bernuth (1986), e desde então tem sido preferido.

Como o ensaio radial é realizado em laboratório utiliza-se um único aspersor, ao invés da necessidade de se ter todo o sistema montado no ensaio completo. Como se obtém a curva de distribuição de água (ABNT NBR ISO 7749-1, 2000), pode-se chegar ao padrão de distribuição do aspersor em todo seu círculo. Posteriormente, por meio desse padrão se estimam as uniformidades para diferentes espaçamentos. Essa é outra vantagem do ensaio radial, pois permite planejar a geometria mais adequada antes da instalação dos aspersores no campo.

Para os dois métodos de ensaio, após o posicionamento dos coletores, inicia-se a coleta da água, para uma pressão preestabelecida. O tempo mínimo de coleta é de 1 h (ABNT NBR ISO 7749-1, 2000), sendo que ao final do mesmo mede-se a quantidade de água nos coletores, por medição da massa ou do volume. No primeiro caso utiliza-se uma balança, sendo que é obrigatória a secagem da parte externa do coletor antes da medição, para não haver superestimativa da quantidade de água. Assim, essa forma de medição requer cuidados e atenção para se minimizar falhas, demandando maior tempo do que quando se mede volume. Para a medição do volume geralmente se utiliza uma proveta, buscando-se utilizar uma resolução adequada (1 mL por exemplo) e medir com atenção para se minimizar o efeito de paralaxe durante as leituras.

Quanto aos coletores utilizados nos ensaios, os mesmos devem ser cilíndricos, com altura mínima de 15 cm e diâmetro entre metade e uma vez a sua altura, mas não menor que 8,5 cm (ISO 15886-3, 2012). Coletores com altura menor que 15 cm podem receber água de respingos do chão, superestimando a quantidade de água coletada.

Para os ensaios realizados a campo, outra preocupação é quanto à influência do vento na coleta de água, especialmente para gotas menores que 2 mm de diâmetro (HENDAWI et al., 2005). Esses autores estudaram o efeito do vento em quatro formas de coletores de 25 cm de diâmetro, sendo que o modelo com altura total de 35 cm e parede lateral superior de 10 cm de altura apresentou os melhores resultados. Adicionalmente, para minimizar a evaporação, a drenagem do mesmo ocorria por um orifício de 10,5 mm de diâmetro na sua base. Deve-se frisar que nos ensaios radiais não há necessidade de um coletor com essas características, pois o mesmo é realizado sem presença de vento.

Em pesquisa realizada com coletores de 40, 127 e 235 mm de diâmetro indicou-se que poderia haver menor incerteza nas medições para os maiores diâmetros (FISHER e WALLENDER, 1988), porém sem conclusões contundentes. Outro caminho, a princípio óbvio, apontado foi de que maiores tempos de coleta também proporcionariam menor incerteza. Nessa pesquisa apenas se obteve que para um coeficiente de variação de 4% na lâmina coletada, com coletores de 235 mm, ter-se-ia que conduzir o ensaio por aproximadamente 7,5 h. Desde então,

não se estudou o efeito do diâmetro e tempo de coleta na incerteza de medição, sendo ainda uma questão em aberto para a pesquisa.

Atualmente a norma ISO 15886-3 (2012) passou a exigir que a incerteza de medição dos ensaios de aspersores seja no máximo de 3% em no mínimo 80% dos coletores no seu raio de alcance. Quanto ao tempo de coleta, a mesma não fixou valor mínimo, mas sim que o aspersor deve completar 30 voltas. Isso pode flexibilizar o tempo de coleta, mesmo se tendo que garantir aquela incerteza de medição. Assim, um estudo acerca das fontes de incerteza envolvidas no ensaio pode ajudar no dimensionamento dos componentes do sistema.

2.1.1 Ensaios automáticos

Ensaios de aspersores e de qualquer material de irrigação constituem uma rotina rigorosa e repetitiva, muitas vezes realizada por operadores treinados. Cada modelo de aspersor a ser avaliado requer a execução de vários testes para que as características operacionais do aspersor sejam expressas. Pressões de ensaio e várias amostras de um mesmo modelo de aspersor precisam ser ensaiadas para que se possa caracterizar adequadamente o material. Acerca disto, a automação de ensaios pode apresentar várias vantagens sobre a execução manual dos mesmos, especialmente no que diz respeito ao tempo requerido para os ensaios. Adicionalmente, pode-se evitar as falhas humanas na medição ou anotação, bem como as perdas de dados quando ocorrem quedas dos coletores no manuseio ou transporte até o equipamento de medição (balança, proveta, etc.).

A automação dos ensaios de aspersores não é uma tentativa recente, já tendo sido utilizada com mais ou menos sofisticação, como se pode verificar em alguns trabalhos realizados por Fisher e Wallender (1988), Hermsmeier (1972), Seginer et al. (1992), Tarjuelo et al. (1999) e Zanon; Testezlaf; Matsura (2000). Na maioria dessas pesquisas se buscou automatizar o ensaio radial, por se ter uma menor quantidade de coletores. A estratégia básica consistia em se transferir a água do coletor para um tubo de coleta, no qual se realizava a medição de nível, conforme ilustrado na Figura 1. O nível pode ser medido diretamente no tubo, utilizando-se um transdutor de pressão em cada um (Figura 1A), ou ligando cada tubo a um conjunto de válvulas que permitem a comunicação com um único medidor (Figura 1B). Por meio do peso específico da água a pressão medida nos tubos é convertida para o valor de nível. Adicionalmente, válvulas de drenagem dos tubos permitem seu esvaziamento para novo ensaio.

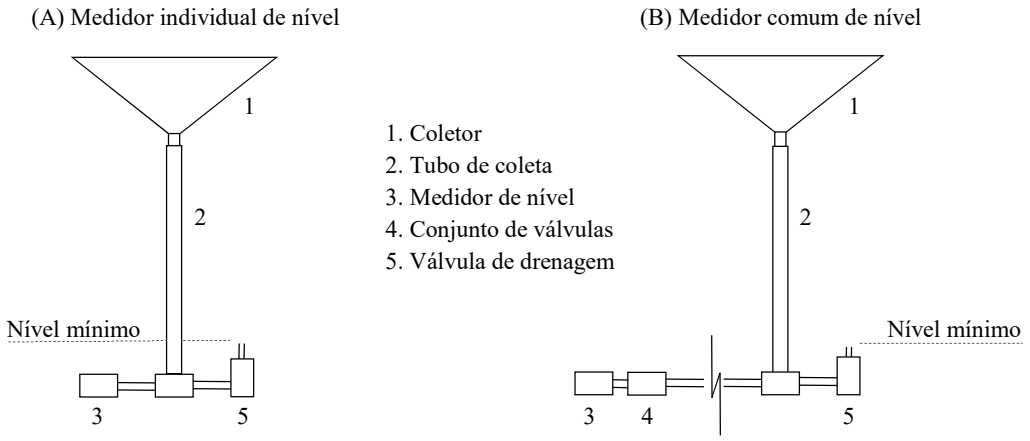


Figura 1 – Componentes básicos do sistema de medição de nível nos tubos de coleta utilizando-se um medidor para cada tubo (A) ou um para todos os tubos (B)

A principal desvantagem de se utilizar um medidor para cada tubo de coleta é o custo de aquisição de todos os medidores, e também a necessidade de calibração periódica dos mesmos. No caso de se utilizar apenas um medidor para todos os tubos, economiza-se com a aquisição de medidores e com a calibração, porém se deve ter uma válvula para cada tubo, interligando-o ao conjunto ("manifold") onde está instalado o medidor por meio de um microtubo. A transmissão da pressão do tubo para o medidor, desde o momento da abertura da válvula até a estabilização do movimento para se proceder a leitura, não é instantânea, com relatos de valores de 15 s (TARJUELO et al., 1999) e 17 s (SEGINER et al., 1992).

Uma alternativa aos medidores de nível nos tubos de coleta pode ser a utilização de uma célula de carga para cada coletor (ZANON, TESTEZLAF e MATSURA, 2000). Isso permite a aquisição de dados em tempo real, contudo apresenta a mesma limitação de se ter que dispor de uma célula para cada coletor. Um problema adicional é que a calibração das mesmas deve ser realizada in situ, o que é mais cara que para um medidor de nível que pode ser enviado a um laboratório de calibração. Cabe ressaltar que nesse tipo de aplicação se deve tomar um cuidado quanto ao molhamento da parte externa do coletor, caso contrário haverá superestimativa da massa de água coletada. Os autores salientam que esse efeito foi mais pronunciado nos primeiros coletores, a partir do aspersor, uma vez que há maior quantidade de gotas de menor diâmetro, e maior intensidade de aplicação. Já quando se mede nível esse problema é minimizado, pois o volume externo ao coletor não drena para o tubo de coleta. As medições com célula de carga também sofrem alguma influência de vibrações e de vento, como no caso de balanças, que requerem instalações apropriadas visando evitar esse tipo de influência.

Para facilitar o ensaio a campo em malha completa Hodges et al. (1990) utilizaram um sistema de báscula nos coletores, que drenava os mesmos quando coletava uma lâmina de água de 0,25 mm. Um sistema monitorava o sinal elétrico de um sensor magnético instalado no coletor toda vez que ocorria uma drenagem, sendo realizado o cálculo da intensidade de aplicação com o número e o tempo dos sinais. Apesar dos autores relatarem haver confiabilidade no sistema e facilidade de operação, a resolução do mesmo (0,25 mm) seria insuficiente para atender um ensaio radial, no qual o raio de alcance é definido por uma intensidade de aplicação de 0,25 mm h^{-1}.

Muitos desses trabalhos utilizaram a automação do ensaio como ferramenta, não tendo, portanto, respondido algumas questões relacionadas às características do sistema em si. Apenas Zanon, Testezlaf e Matsura (2000) relataram que o sistema com células de carga não apresentou diferença significativa nos valores de uniformidade quando compararam a leitura manual com a automática.

Com o interesse em se tornar o ensaio automático, e considerando os novos requisitos das normas, torna-se importante estudar a relação entre os componentes do sistema com a incerteza de medição. Assim, poder-se-á abrir espaço para novas discussões a respeito das características do sistema de ensaios, bem como, novas possibilidades acerca das formas de medição.

2.2 Expressão dos resultados de medição

O resultado de uma medição é apenas uma das possíveis estimativas de serem realizadas do valor verdadeiro de uma grandeza de interesse. Isso porque o valor verdadeiro nunca é conhecido. Consequentemente, nunca se conhecerá a magnitude do erro presente numa medição. Portanto, tanto o conceito de valor verdadeiro quanto o de erro são tidos como abstrações, logo não são adequados para expressão de resultados de medições. Se realmente o erro pudesse ser quantificado então bastaria utilizá-lo para corrigir uma estimativa da medição e se teria o valor verdadeiro.

Por outro lado, o erro de medição é um conceito que pode ser utilizado para algumas aplicações (VIM, 2012). Na calibração de um manômetro, por exemplo, pode-se utilizar esse conceito para expressar a diferença entre o valor indicado pelo manômetro padrão e pelo manômetro sob calibração.

Uma vez que instrumentos de medição são imperfeitos e a medição é puramente experimental, os resultados não podem ser exatos. Por consequência, a teoria da medição recai sobre os seguintes aspectos (Cacuci, 2003):

a) Existe um valor verdadeiro de uma quantidade mensurável;

b) O valor verdadeiro de uma quantidade mensurável é constante; e

c) O valor verdadeiro não pode ser conhecido.

De certa forma se pode pensar que um erro δ é uma quantidade que possui magnitude e sinal (posteriormente se esclarece que erro não possui valores quantitativos). Seguindo esse raciocínio, um erro específico δ_i é uma diferença causada por uma fonte de variação i entre a quantidade mensurada e o valor verdadeiro. Geralmente se assume que um erro cujo sinal e magnitude são conhecidos deve ser removido do resultado de medição. Assim, qualquer erro remanescente no resultado de medição se deve ao desconhecimento do seu sinal e magnitude, portanto a incerteza U é estimada com a ideia de que $\pm U$ caracteriza o intervalo que contém δ (COLEMAN e STEELE, 2009). Da mesma forma, o valor verdadeiro está contido no intervalo $\bar{x} \pm U$, com uma probabilidade de abrangência p. Portanto, U não é um valor pontual, mas sim um intervalo, que reflete a falta de conhecimento associado ao valor da grandeza a ser medida.

A incerteza U é a variável aceita como uma expressão da confiabilidade do resultado de medição $\bar{x}$. Por conseguinte, na declaração do resultado além do valor $\bar{x}$ se deve informar a incerteza de medição U presente (INMETRO, 2012a,b).

Apesar de se ter alguns documentos norteadores como o Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM) (INMETRO, 2012a) e o Vocabulário Internacional de Medição (VIM) (INMETRO, 2012b) definindo os conceitos de erro e incerteza, muitas vezes há algum equívoco no seu emprego. Mesmo algumas normas e documentos elaborados por organizações metrológicas contém discrepância dos mesmos. Muitas bibliografias também não apresentam harmonia na utilização dos termos, o que gera confusão. Traduções de bibliografias e normas talvez sejam os casos mais delicados, devendo-se sempre seguir os documentos acima citados. Isso é totalmente aceitável, visto que o termo incerteza é ainda pouco praticado.

A expressão de um resultado de medição passou a ser aceita somente quando acompanhada de sua incerteza. Para tanto, deve-se denominar as fontes de incerteza apenas como Incerteza Tipo A ou Incerteza Tipo B (INMETRO, 2012a). A separação de incerteza quanto ao seu tipo tem a intenção de identificar a fonte mais significativa, porém o interesse sempre é a incerteza total.

Uma maneira clara de se pensar na relação entre os diferentes conceitos utilizados em metrologia está apresentada na Figura 2. Na mesma se pode distinguir erro e incerteza, por exemplo, além de se poder caracterizá-los qualitativamente.

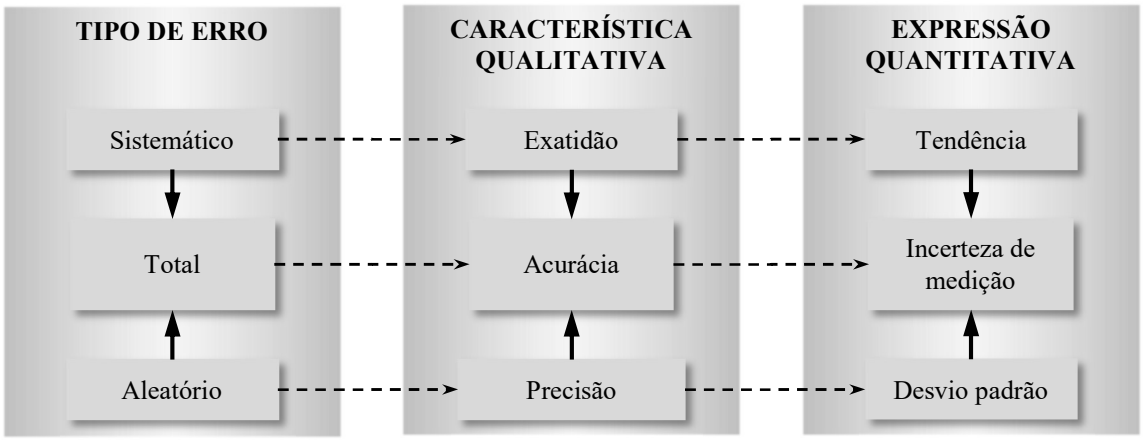


Figura 2 – Relação entre tipo de erro, característica de desempenho qualitativa e sua expressão quantitativa

Fonte: Menditto; Patriarca, Magnusson (2007)

Há algum tempo, tratar de erro de medição passou a ser incorreto, apesar dos erros sistemáticos e aleatórios causarem as variações detectadas pela incerteza (Figura 2). Erros aleatórios incluem as variações temporais ou espaciais e ocorrem de forma imprevisível, sendo que seus efeitos causam variações em observações repetidas da grandeza. Os sistemáticos, por sua vez, originam-se de uma causa fixa, isto é, que se mantém constante ao longo do tempo, resultando numa tendência, não causando variações entre observações repetidas.

Cabe ressaltar que embora os tipos de erro sejam distinguíveis, nenhum deles recebe qualquer valor numérico. Para isso, utilizam-se o desvio padrão – para o erro aleatório – e a tendência – para o erro sistemático (Figura 2). Dependendo da área de estudo, a tendência também é denominada tendenciosidade ou viés, proveniente do termo “bias”, do inglês.

Quando se diz que determinada medição foi pouco precisa, entende-se que houve grande dispersão dos valores em relação à média. Em termos numéricos, obteve-se um valor elevado de desvio padrão. Uma medição é dita exata quando há concordância entre o valor médio obtido e o valor de referência (INMETRO, 2012b). A tendência, portanto, é a diferença entre a média do valor medido e o valor de referência (pois não se conhece o valor verdadeiro). Por fim, tem-se que a acurácia expressa a proximidade entre o resultado de medição e o valor verdadeiro ou de referência.

A Figura 3 também ajuda no entendimento dos conceitos, principalmente quanto às características da medição. Os diagramas de ponto e alvo ilustram cada situação de maior ou menor exatidão e precisão, resultando na acurácia. Deseja-se que todas as estimativas estejam próximas ao centro do alvo, logo a situação desejada é a do alvo superior direito, pois é quando se consegue a maior acurácia, visto que se tem elevadas exatidão e precisão. O diagrama inferior esquerdo ilustra a situação menos desejada, ou seja, baixas precisão e exatidão. Caso se pudesse

atribuir valor numérico à acurácia, poder-se-ia afirmar que a mesma é inversamente proporcional à incerteza de medição. Assim, a acurácia seria tão maior quanto menor fosse a incerteza de medição.

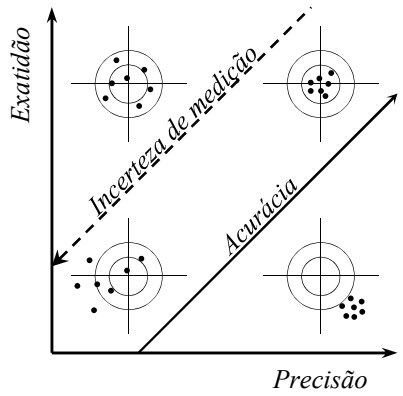


Figura 3 – Acurácia e incerteza de medição como resultados da combinação de fatores sistemáticos e aleatórios

Fonte: Adaptado de Royal Society of Chemistry (2003)

A metodologia mais utilizada para o cálculo de incerteza é baseada no GUM (INMETRO, 2012a). Suas fases principais incluem: i) definição do mensurando, ii) estabelecimento do modelo de equação, iii) levantar todas as fontes de incerteza e as associar a uma variável do modelo, iv) calcular a incerteza padrão combinada, v) calcular os graus de liberdade efetivos e vi) calcular a incerteza expandida.

Apesar de parecer simples, o cálculo e a análise de incerteza não são tarefas simples, uma vez que não é rotina puramente matemática. Para tal, deve-se ter um conhecimento detalhado da natureza do mensurando e do procedimento de medição. Então, nem mesmo um guia é capaz de incluir todos os conhecimentos e substituir o raciocínio crítico, a honestidade intelectual e a habilidade profissional (INMETRO, 2012a).

A metodologia do GUM permite uma análise aprofundada a respeito da contribuição de cada uma das componentes envolvidas, devido ao detalhamento que proporciona. Contudo, um equacionamento complexo exige um esforço extra em relação a outras aproximações, como a validação intralaboratorial (baseada no NordTest TR 537, 2012), a validação interlaboratorial baseada no ISO 5725 (1994) e no ISO TS 21748 (2010) e os testes de proficiência (ISO/IEC 17043, 2010; ISO 13528, 2015). O menos rigoroso de todos é o teste de proficiência e deve ser apenas utilizado como uma aproximação inicial do valor da incerteza. Não se farão aprofundamentos acerca dessas metodologias, pois todos os resultados deste trabalho são baseados em equações. Portanto, as considerações a seguir, bem como a estimativa da incerteza, estão fundamentadas pelo GUM.

A determinação da incerteza consiste, basicamente, em se estimar todas as fontes de variação das medições e combiná-las para se obter o valor de incerteza (INMETRO, 2012a). Como por definição a incerteza deve abranger o valor verdadeiro, obrigatoriamente se deve realizar a calibração do equipamento de medição, pois permite obter essa incerteza, etapa fundamental para início do cálculo. A calibração é a comparação das indicações do instrumento com a de um padrão, de acordo com um procedimento criterioso[1].

As operações de calibração são realizadas por laboratórios de calibração com acreditação de um organismo legalmente responsável. No Brasil as acreditações de laboratórios de calibração e/ou ensaio são de responsabilidade da Coordenadoria Geral de Acreditação (CGCRE), incluída na estrutura organizacional do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

Pode-se considerar que os custos de calibração de equipamentos são altos, razão pela qual muitos usuários não contratam tal serviço. Algumas indústrias, por exemplo, possuem laboratórios próprios acreditados, para calibrarem apenas seus equipamentos, pois seria inconveniente enviar a um laboratório terceirizado. Laboratórios de ensaio e calibração também mantém calibrados os equipamentos utilizados nas medições, visto que é um dos requisitos de sua acreditação.

Em casos particulares, como o de química, o termo calibração muitas vezes é utilizado para descrever o que na verdade é o ajuste do sistema de medição de um equipamento. Nesse caso, tem-se por finalidade adequá-lo para que forneça indicações correspondentes a determinados valores da grandeza a ser medida. A calibração propriamente dita é realizada após o ajuste, com medições de padrões de calibração (geralmente soluções, em química), o que permite obter a incerteza de calibração do equipamento (DOQ-CGCRE-017, 2013).

Ajustes do sistema de medição (para obtenção de equações por exemplo) são corriqueiros, em especial quando há degradação do material, como os químicos. Um indicador da necessidade de ajuste é a inconsistência dos resultados de medição na calibração, ou verificação periódica, resultando numa tendência ou desvio padrão elevados, ou seja, uma incerteza elevada. Obviamente, uma nova calibração é necessária posteriormente ao ajuste, para que se obtenha a nova incerteza de medição.

Para uma série de equipamentos se necessita de uma equação característica, para que se converta o valor de medição da unidade de medida do mesmo para aquela de interesse. Isso ocorre, por exemplo, para transmissores de pressão, cujo sinal de resposta comumente é

[1] A título de exemplo de procedimentos de calibração, podem-se consultar os documentos normativos e orientativos da CGCRE, como aqueles para calibração de medidores de pressão, transmissores de temperatura, etc.

corrente elétrica (4 a 20 mA), contudo a unidade de pressão é Pa. Naturalmente, para a calibração são utilizados os valores de pressão obtidos pela equação, na unidade final (Pa), com uma incerteza também na respectiva unidade. Essa sim passa a se denominar equação de calibração, em concordância com a metrologia (DOQ-CGCRE-017, 2013).

Como se busca obter o valor da incerteza presente numa determinada medição, deve-se incluir todas as fontes de incerteza (INMETRO, 2012a). No caso simples de uma calibração de um medidor de pressão[2], as principais fontes de incerteza são: repetição das indicações do instrumento no ponto, incerteza da calibração do padrão, equação de calibração do padrão e a resolução do instrumento (DOQ-CGCRE-017, 2013). Entre as fontes de maior contribuição pode-se destacar a repetição das indicações do instrumento (erro aleatório), e entre as de menor, a equação de calibração do padrão. Inicialmente todas as fontes são inseridas no cálculo, porém conforme se aprofunda os estudos as fontes de menor contribuição podem até ser excluídas, caso não houver prejuízo na declaração final de incerteza.

Cada fonte de incerteza representa quantitativamente um erro sistemático ou aleatório, conforme a Figura 2. Entretanto, o GUM (INMETRO, 2012a) passou a denominar de incerteza tipo A e incerteza tipo B, provavelmente para desmembrar os conceitos e evitar conflitos. Deve-se esclarecer que embora bibliografias anteriores ao GUM utilizem essas designações de incerteza sistemática e incerteza aleatória, elas não são mais aceitas.

Diz-se que uma fonte é do tipo A quando seu valor provém de uma análise estatística, de um conjunto de repetições de uma medida. Já a incerteza tipo B corresponde a todos os outros meios de avaliação, tais como o valor de um material de referência, certificados de calibração, classe de exatidão de um instrumento de medição, etc. Em termos numéricos essa separação das fontes não altera o cálculo de incerteza, pois todas são tratadas de mesma forma. Por isso, a princípio, não há uma vantagem clara nessa separação, tanto que nem se denomina as fontes como tipo A ou B no momento do cálculo. No exemplo anterior, da calibração do medidor de pressão, tem-se apenas a repetição das indicações do instrumento no ponto, também chamada de repetitividade, como incerteza tipo A. Todas as outras são consideradas tipo B, mesmo a incerteza de calibração do padrão, pois seu valor é obtido do certificado.

No caso de uma incerteza tipo A, toda vez que se utiliza uma medição individual como resultado de medição, deve-se utilizar o desvio padrão como a incerteza padrão. Quando o resultado for a média de diversas medições, deve-se utilizar o desvio padrão da média, e esse se torna a incerteza padrão da média.

---

[2] DOQ-CGCRE-017. **Orientação para a realização de calibração de medidores analógicos de pressão**. Rev. 03. Rio de Janeiro, 2013. 13p.

Em termos matemáticos toda quantidade medida é aleatória, logo pode ser descrita como uma função de distribuição de probabilidade. A distribuição mais comum é a normal, na qual se aumenta a probabilidade à medida que se aproxima do valor médio, no meio da curva. Conforme de afasta do centro a probabilidade diminui, porém nunca chega a ser zero, logo sempre há uma probabilidade de se obter qualquer valor. Apesar de nunca se chegar a zero de probabilidade, a área abaixo da curva é finita, e igual a 100% de probabilidade.

Como é impossível realizar todas as medições para se obter a curva característica da distribuição normal, estima-se a média e o desvio padrão de um conjunto de observações, que são as duas medidas mais importantes. A distribuição normal é bilateral, ou seja, para os dois lados em torno da média. Assim, a relação entre a área delimitada por um desvio padrão abaixo e um acima da média e a área total retorna uma proporção de 68,3%. Caso se continue para dois desvios padrão a proporção aumenta para 95,5%, e para três, 99,7%. Essa contextualização permite entender porque se utiliza a incerteza expandida (U) na declaração da incerteza, cujo fator de abrangência geralmente é 2: para que a probabilidade de abrangência do valor verdadeiro seja de 95,5%.

A contabilização da incerteza de uma variável y consiste em se considerar todas as fontes de incerteza na equação de propagação de incerteza. Cada fonte deve corresponder a uma variável de entrada x_i, e todas devem ser colocadas num mesmo nível, no mesmo padrão. Assim, as incertezas contribuintes devem ser as incertezas padrão, que no caso a incerteza tipo A é o desvio padrão. Para as incertezas tipo B deve-se utilizar o divisor apropriado à distribuição. No caso de uma incerteza de calibração, o valor declarado é o de incerteza expandida que provém de uma distribuição normal, com coeficiente de abrangência (k) igual a 2. Para se obter a incerteza padrão, então, divide-se a incerteza expandida pelo coeficiente de abrangência.

Após se definir o mensurando y, a equação que o define $y = f(x_1, x_2, \cdots, x_n)$, e as incertezas padrão das grandezas de entrada x_i, calcula-se sua a incerteza padrão combinada. Quando todas as grandezas de entrada são independentes, ou seja, não há correlação, a incerteza padrão combinada é obtida por meio da Eq. 2. Para o caso de haver correlação entre grandezas de entrada, deve-se utilizar a Eq. 2, pois a mesma contém um termo com coeficiente de correlação (INMETRO, 2012a).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) \quad (1)$$

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} \frac{\partial y}{\partial x_i}\frac{\partial y}{\partial x_j} u(x_i)\, u(x_j)\, r(x_i, x_j) \quad (2)$$

em que,

u_{c_y} – incerteza padrão combinada do mensurando y

$\frac{\partial y}{\partial x_i}$ – coeficiente de sensibilidade de y em relação a cada variável de entrada x_i

u_{x_i} e u_{x_j} – incertezas padrão das variáveis de entrada x_i e x_j, respectivamente.

$r(x_i, x_j)$ – coeficiente de correlação entre os conjuntos de dados de x_i e x_j.

O valor do coeficiente de correlação varia no intervalo [-1, 1]. Se as estimativas de x_i e x_j são independentes, $r(x_i, x_j) = 0$, então a variação de uma delas não implica em variação na outra. Quando houver correlação, basta incluir o valor do coeficiente de correlação entre as duas variáveis na equação e prosseguir com o cálculo.

Sabe-se que apenas a incerteza tipo A possui distribuição normal. As incertezas tipo B assumem outras distribuições, como a retangular e a triangular. Por isso, deve-se utilizar o divisor correto no momento de se obter a incerteza padrão de cada fonte. O caso mais comum de distribuição retangular é a resolução de um equipamento analógico, para a qual a incerteza padrão (metade da resolução) é obtida pela divisão $\sqrt{3}$, devido à probabilidade de ocorrência de um ou outro valor. Para a distribuição triangular o caso frequente é a resolução de um equipamento com indicação digital, cujo divisor utilizado é $\sqrt{6}$. Mais detalhes sobre essas e outras características das distribuições de probabilidade são encontrados em bibliografia de estatística, nos guias específicos de redes de laboratório como o RM 68 (2013)[3], ou no próprio GUM. Para o cálculo de incerteza as distribuições normal, retangular e triangular são as mais comuns, logo esses divisores são os mais utilizados.

A incerteza padrão combinada de y ainda abrange apenas 68,3% do intervalo em torno do valor verdadeiro. Geralmente se aumenta sua abrangência para 95,5% por meio do fator k, que deve ser obtido para y, por meio do cálculo dos graus de liberdade efetivos, utilizando-se a equação de Welch-Satterthwaite (Eq. 3) (INMETRO, 2012a).

[3] REDE METROLÓGICA RS. **RM 68 – Incerteza de medição: Guia prático do avaliador de laboratórios**. Porto Alegre, 2013. 32p.

$$\nu_{ef} = \frac{u_c(y)^4}{\sum \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{u_{x_i}}{\nu_{x_i}} \right)^4} \quad (3)$$

em que,

ν_{ef} – graus de liberdade efetivos para a variável y

u_{c_y} – incerteza padrão combinada de y, Eq. 2

u_{x_i} – incerteza padrão da variável de entrada x_i

ν_{x_i} – graus de liberdade da variável x_i

$\frac{\partial y}{\partial x_i}$ – coeficiente de sensibilidade de y em relação a x_i (derivada parcial)

O uso dessa equação se faz necessário pois cada incerteza individual possui uma distribuição de probabilidade característica, seja normal, retangular, triangular, etc. Assim, a distribuição de probabilidade da incerteza combinada é obtida pela combinação das distribuições individuais, a qual se aproxima da distribuição normal. Contudo, utiliza-se a distribuição t-Student, uma vez que se trabalham com amostras e não a população (que seria o caso da normal).

Com o valor dos graus de liberdade efetivos (Eq. 3) e um nível de confiança (geralmente 95,45%) calcula-se o valor de t, ou se utiliza uma tabela da distribuição. Esse valor, para o cálculo de incerteza, passa a ser o coeficiente de abrangência (k), utilizado no cálculo da incerteza expandida pela seguinte equação:

$$U_y = k\, u_c(y) \quad (4)$$

Como boa prática deve-se informar o nível de confiança que a incerteza expandida representa. Além disso, arredondar o resultado final para somente dois algarismos significativos.

Em alguns casos o intuito é comparar sistemas de medição quanto à incerteza de medição, para escolha do melhor, ou mesmo para melhorias em algum. Ou quando se quer analisar a incerteza de medição para toda a faixa de medição, ou seja, cada valor medido apresentará uma incerteza, de acordo com a Eq. 2. Para esses casos pode-se utilizar a incerteza padrão relativa, obtida por meio da relação entre a incerteza expandida *U* e o valor medido y.

Em outros casos a medição não apresenta fundo de escala, especialmente naquelas que envolvem tempo, visto que o valor medido está sempre se alterando. Então, não há sentido em se falar em incerteza em relação ao fundo de escala, como utilizado para equipamentos. O

ensaio das características de distribuição de aspersores é um caso típico no qual não há como se definir um fundo de escala, pois se pode conduzir a coleta de água pelo tempo que se julgar conveniente. Assim, por exemplo, a norma ISO 15886-3 (2012) define que a incerteza-alvo deve ser menor que 3%, o que se entende como sendo a incerteza em relação ao valor medido e não a um fundo de escala.

Durante a análise da incerteza, posterior ao cálculo, pode-se explorar o efeito de cada fonte de incerteza na contribuição para a incerteza total. Assim se tem como comparar as fontes de maior contribuição e as de menos contribuição, podendo-se aprofundar os estudos para a melhoria da medição. Essa análise é realizada para cada componente de incerteza da Eq. 2, ou seja, cada um dos termos, por meio da Eq. 5.

$$Contribuição(x_i) = \frac{\left(\frac{\partial y}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}{u_c^2(y)} 100 \qquad 5$$

Para ilustrar as etapas envolvidas no cálculo da incerteza de medição, utilizar-se-á o exemplo de medição de diâmetro de um tubo por meio de um paquímetro, semelhante a um dos exemplos abordados pela ISO 5168 (2005). A incerteza de calibração do equipamento era de 0,01 mm (k = 2), retornando então uma incerteza padrão de 0,005 mm. Sua resolução era de 0,01 mm, considerada como distribuição retangular ($k = \sqrt{3}$), logo a incerteza dessa fonte será metade da resolução (0,005 mm) dividida por $\sqrt{3}$, ou seja, 0,0029 mm. Considera-se que as repetições de medições (incerteza tipo A) resultam numa incerteza de 0,03 mm (desvio padrão), sendo resultado de um conjunto de medições (n = 10).

Sabendo-se que não há correlação entre nenhuma das fontes, e que o coeficiente de sensibilidade de cada fonte é igual a 1, por meio da Eq. 2 a incerteza de medição será:

$$u_{c_d} = \sqrt{0{,}005^2 + 0{,}0029^2 + 0{,}03^2} = 0{,}031\ mm$$

Utilizando-se a Eq. 3 se calcula os graus de liberdade efetivos:

$$\nu_{ef} = \frac{0{,}031^4}{\frac{0{,}005^4}{\infty} + \frac{0{,}0029^4}{\infty} + \frac{0{,}03^4}{9}} \cong 9$$

Para a fonte incerteza de calibração se consideram infinitos graus de liberdade, como no exemplo acima. Da mesma forma, para as incertezas tipo B, como a resolução. Já para a incerteza tipo A, o número de graus de liberdade é obtido pelo tamanho do conjunto amostral ($\nu = n - 1 = 10 - 1 = 9$).

Para uma probabilidade de abrangência de 95,5% e $\nu_{ef} = 9$, obtém-se o valor de 2,33 para o fator de abrangência (k). Assim, a incerteza expandida (U) resultante é de 0,072 mm, de acordo com a Eq. 4. No caso da medição de um diâmetro de 100 mm, a incerteza relativa é de 0,072%.

Analisando-se a contribuição de incerteza de cada fonte do exemplo acima, por meio da Eq. 5, obtém-se que a repetitividade foi a fonte de maior contribuição (96,4%), 2,68% da incerteza de calibração e apenas 0,9% da resolução. Isso permitiria uma investigação acerca do procedimento adotado para se repetir as medições (repetitividade), caso necessário.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O sistema automático para ensaios de aspersores foi desenvolvido no Laboratório de Ensaios de Material de Irrigação (LEMI) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da USP, em Piracicaba. O LEMI realiza ensaios normatizados de material de irrigação, e possui acreditação junto à Coordenação Geral de Acreditação (CGCRE) para realização de ensaios de aspersores, microaspersores e gotejadores. Além disso, o laboratório também se destina à atividades de ensino e pesquisa, com apoio e fomento de diversas instituições, inclusive estrangeiras.

O sistema desenvolvido foi constituído de três subsistemas: pressurização, medição e gerenciamento. O primeiro continha todos os componentes para se manter vazão e pressão no aspersor; o segundo realizava toda a medição de intensidade de precipitação ao longo do raio molhado do aspersor; e o terceiro consistiu de um aplicativo supervisório para gerenciamento das tarefas.

A interface entre todos os sistemas foi realizada por módulos eletrônicos desenvolvidos no LEMI especificamente para esta pesquisa, pois as soluções comerciais não se mostraram viáveis para utilização no sistema. Portanto, esses módulos não são produtos comerciais, mas sim resultados de uma série de pesquisas há tempo desenvolvidas pela equipe do laboratório, utilizando-se circuitos eletrônicos para aplicações em Hidráulica e Irrigação.

3.1 Sistema de pressurização

Este sistema foi composto, basicamente, por um conjunto motobomba equipado com inversor de frequência para controle de rotação, medidores de vazão e pressão, aspersor e cuba de proteção do aspersor. As dimensões da área de ensaio permitem a realização de ensaios com aspersores de altura de jato de até 5 m e raio de alcance de até 18 m (Figura 4).

As pressões de ensaios eram ajustadas manualmente por meio de registro, contudo, para um sistema automático houve necessidade de se dispor de um ajuste automático. Para tanto, utilizou-se um controlador automático de pressão apto a operar em malha fechada, realimentado por um transmissor de pressão, com tomada de pressão no tubo de subida do aspersor, que atuava no sistema por meio de inversor de frequência acoplado a motobomba. A pressão de ensaio era definida no aplicativo supervisório e transmitida ao controlador, que dispunha de uma lógica de controle PID (proporcional, integrativa e derivativa) sintonizada especificamente para as condições de pressurização. O módulo eletrônico desenvolvido para o controlador realizava a comunicação entre o aplicativo e o sistema de pressurização.

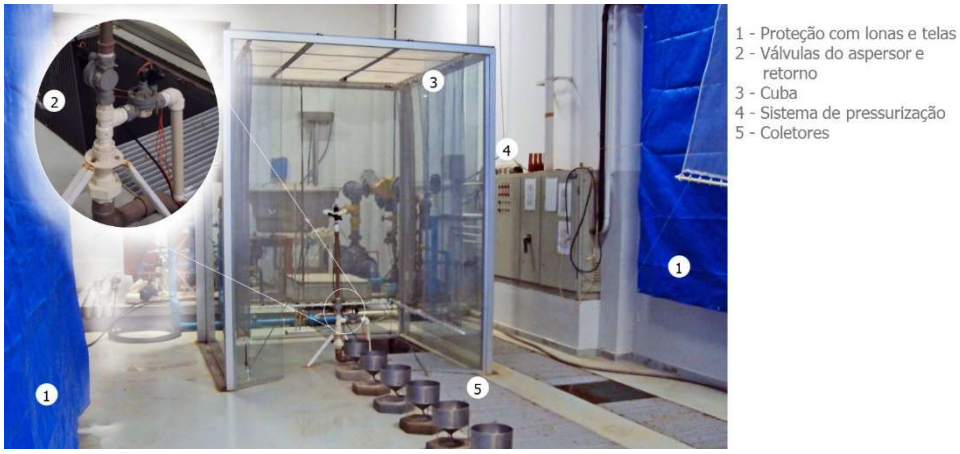


Figura 4 – Ambiente do laboratório para ensaios de aspersores

A vazão foi monitorada utilizando-se um medidor eletromagnético, apenas para fins de controle da condição de ensaio. As leituras eram transmitidas ao aplicativo supervisório, por meio do módulo de aquisição de dados (Figura 5). Na sequência do medidor de vazão, e finalizando a tubulação dentro da cuba de proteção, fixou-se um tubo de subida com ponto de tomada de pressão a 0,2 m abaixo do bocal principal do aspersor. A altura desse tubo foi tal que possibilitou um desnível de 1 m entre o bocal principal e o topo dos coletores.

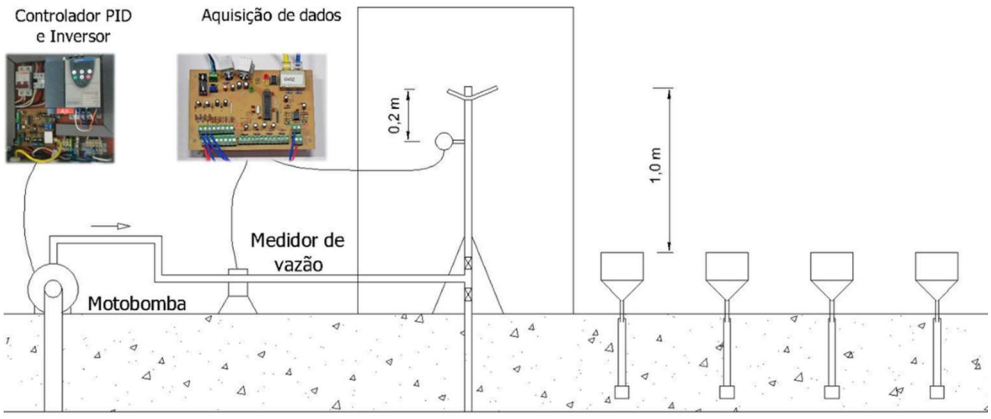


Figura 5 – Esquema hidráulico do sistema e circuitos de controle e aquisição

Para o início/fim do ensaio houve necessidade de se desviar o fluxo de água entre o aspersor e um retorno (Figura 4). Duas válvulas hidráulicas acionadas por válvulas solenoides foram responsáveis pela mudança de direção, instaladas no tubo de subida, e também acionadas pelo módulo do controlador obedecendo às requisições do sistema de gerenciamento.

Como se tratava de um ensaio radial apenas uma linha de coletores ao longo do raio molhado precisava receber água do aspersor. Assim, uma cuba de vidro (2 m de lado e 2,5 m de altura) protegia os demais quadrantes (Figura 4 e Figura 5), e também possuía uma tela

interna para evitar respingos provindos de suas paredes nos coletores. Proteções laterais nas paredes do laboratório evitavam que respingos atingissem os coletores.

Na área de ensaios havia um canal para drenagem da água utilizada no laboratório, possibilitando o retorno da mesma ao reservatório principal. Assim, a água é mantida em circulação, sem perdas desnecessárias. Além disso, utilizou-se uma das paredes do canal para fixação dos tubos de coleta, onde era realizada a medição de água, como explicado na sequência.

3.2 Sistema de medição

Tradicionalmente a estimativa da intensidade de aplicação é realizada por meio da medição de massa ou do volume de água coletada (sistemas convencionais). Nesse caso, o próprio coletor é o recipiente levado à balança, ou do qual se drena água para uma proveta. No entanto, para o sistema desenvolvido a medição não foi realizada diretamente no coletor, mas sim, num tubo de coleta que recebia a água drenada do coletor (Figura 6A).

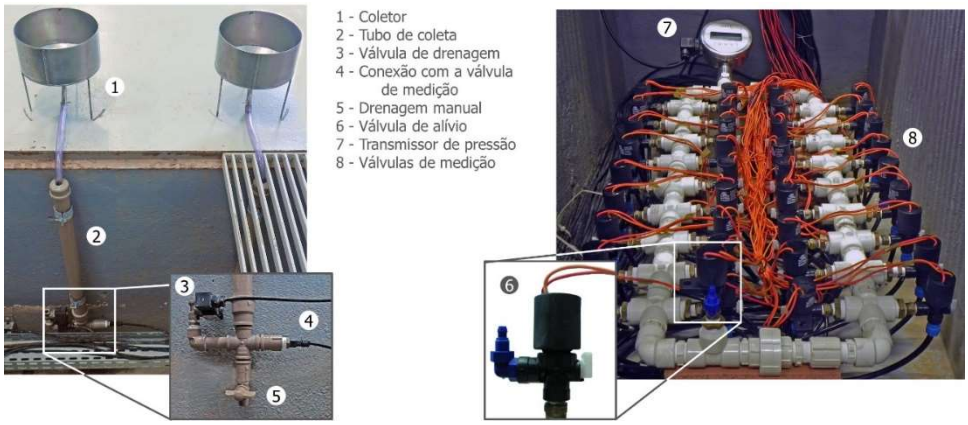


Figura 6 – Componentes do sistema de medição: (A) coletor e tubo de coleta; (B) conjunto de válvulas de medição

Os coletores utilizados eram de aço inoxidável e possuíam 20 cm de diâmetro e 20 cm de altura, em conformidade com as normas ISO 15886-3 (2012) e ABNT NBR ISO 7749-1 (2000). O espaçamento entre coletores foi de 0,5 m, sendo também essa a distância entre o primeiro coletor e o aspersor. A área de ensaios do laboratório possibilitou a utilização de 36 coletores, logo pode-se realizar ensaios para aspersores com até 18 m de raio de alcance, o que atende uma diversidade de aspersores de pequeno e médio porte utilizados em sistemas de irrigação convencionais.

Cada coletor foi conectado a um tubo de coleta por um segmento de tubo (Figura 6A) permitindo a drenagem de toda água coletada. A condição ideal seria o tubo de coleta instalado

diretamente no coletor, contudo esse desalinhamento era uma restrição física da área de ensaios, visto que a linha de coletores estava no centro das paredes do laboratório para minimizar a coleta de respingos.

Os tubos de coleta foram fixados numa das paredes de um canal retangular existente na frente da cuba de proteção do aspersor (Figura 4), cuja profundidade permitia instalar tubos de até 70 cm de altura (com 10 cm de folga). Para o dimensionamento do diâmetro dos tubos considerou-se uma intensidade de precipitação máxima de 20 mm h^{-1}, por meio do histórico de ensaios de aspersores do LEMI, e um tempo de coleta mínimo de 1 h, uma vez que o laboratório ainda realiza ensaios de acordo com a ABNT NBR ISO 7749-1 (2000). Como todo o volume de água captado no coletor de 200 mm de diâmetro nesse tempo deve ser armazenado pelo tubo de coleta, o diâmetro interno do mesmo deveria ser de 36,5 mm. Utilizaram-se tubos de PVC rígido cujo diâmetro interno era de 35,2 mm, logo a intensidade máxima a ser medida nesse tempo de coleta poderia ser de 18,6 mm h^{-1}.

Na parte inferior dos tubos de coleta conectou-se uma válvula para drenagem do tubo a um nível mínimo, um registro na parte inferior para limpeza periódica e um tubo de ligação com o conjunto de válvulas de medição (Figura 6B).

Para cada tubo de coleta/coletor havia uma válvula de medição, sendo que todas foram reunidas num conjunto (“manifold”), no qual se instalou um transmissor de pressão com faixa de operação de 0 a 100 mbar, para medição do nível em cada tubo. O valor de nível era obtido por meio da pressão nos tubos, da massa específica da água e da aceleração da gravidade. De acordo com o sequenciamento de medição requisitado pelo sistema de gerenciamento cada válvula era acionada individualmente, permitindo a comunicação de pressão entre tubo de coleta e transmissor. Nesse conjunto também havia uma válvula responsável pelo alívio de pressão na câmara do conjunto, após uma medição. Opcionalmente à utilização de um único transmissor de pressão e as válvulas de controle reunidas num conjunto, pode-se empregar um transmissor para cada tubo de coleta, caso desejado. Contudo, o custo de aquisição de um transmissor dessa natureza é elevado, pela sua capacidade de medição, além da necessidade de calibração periódica (anualmente, por exemplo), o que pode inviabilizar financeiramente o sistema de ensaios.

Um transmissor de temperatura foi instalado junto ao aspersor para medição da temperatura da água durante o ensaio. Concomitantemente às medições de nível nos tubos de coleta, também eram realizadas medições de temperatura, para posterior utilização nas equações de estimativa de intensidade de aplicação.

A interface do sistema de medição com o de gerenciamento foi realizada por meio de um módulo eletrônico (módulo de aquisição de dados), provido de microcontrolador PIC e uma série de componentes eletrônicos para seu funcionamento. Além da aquisição dados de nível de cada tubo de coleta, esse módulo também adquiria as leituras dos transmissores de pressão no aspersor e temperatura da água.

Outro circuito importante foi aquele para acionamento das válvulas de medição e das de drenagem dos tubos. O mesmo também possuía um PIC, responsável pela comunicação com o sistema de gerenciamento e pelo acionamento das válvulas.

3.3 Sistema de gerenciamento

Este sistema foi responsável por comandar todas as tarefas de ensaios, desde o acionamento do conjunto motobomba até a emissão dos resultados de ensaio. O controle era executado a partir de um computador provido de um aplicativo supervisório, que se comunicava com os módulos de controle e aquisição de dados por meio de uma rede RS-485, com protocolo próprio e caracterizada como uma aplicação Mestre/Escravo. No aplicativo o usuário configurava os parâmetros necessários para a realização do ensaio (como o tempo de coleta), e acompanhava as condições do ensaio. O mesmo foi desenvolvido em linguagem Pascal, em ambiente Delphi.

Uma vez definida a pressão de ensaio e iniciado o sistema, o aplicativo supervisório acionava o controlador PID do sistema de pressurização, que ajustava a pressão até o valor desejado, tomando como base os sinais do transmissor de pressão do aspersor. Esses valores de pressão medidos foram continuamente transmitidos para o aplicativo supervisório, onde foram armazenados. As leituras de vazão também foram transmitidas pelo módulo ao aplicativo, pois os medidores de vazão eletromagnéticos dispõem de sinal de saída 4 a 20 mA.

Uma vez iniciado o ensaio, o aplicativo realizava uma série de tarefas (Figura 7) por meio do comando dos módulos dos sistemas de pressurização e medição. A primeira tarefa foi acionar a motobomba para pressurização do sistema, sendo esse o momento que o controlador PID iniciava a atuação. Houve uma etapa de funcionamento do aspersor para se ter um molhamento dos coletores e tubos de coleta antes de se iniciar a coleta, cerca de 10 min. Após isso, os tubos de coleta eram drenados para que o sistema de medição adquirisse leituras da nível inicial e temperatura da água. Entre essas etapas se desviava o fluxo de água entre aspersor e retorno, conforme necessário.

As medições de nível nos tubos de coleta eram realizadas após estabilização do valor, visto que a válvula de medição do respectivo tubo era acionada. Utilizou-se um tempo de

estabilização de 12 s, que foi obtido por meio de testes preliminares. Após a medição do nível, o sistema fechava essa válvula e acionava a válvula de alívio da pressão no conjunto, durante um tempo de 5 s.

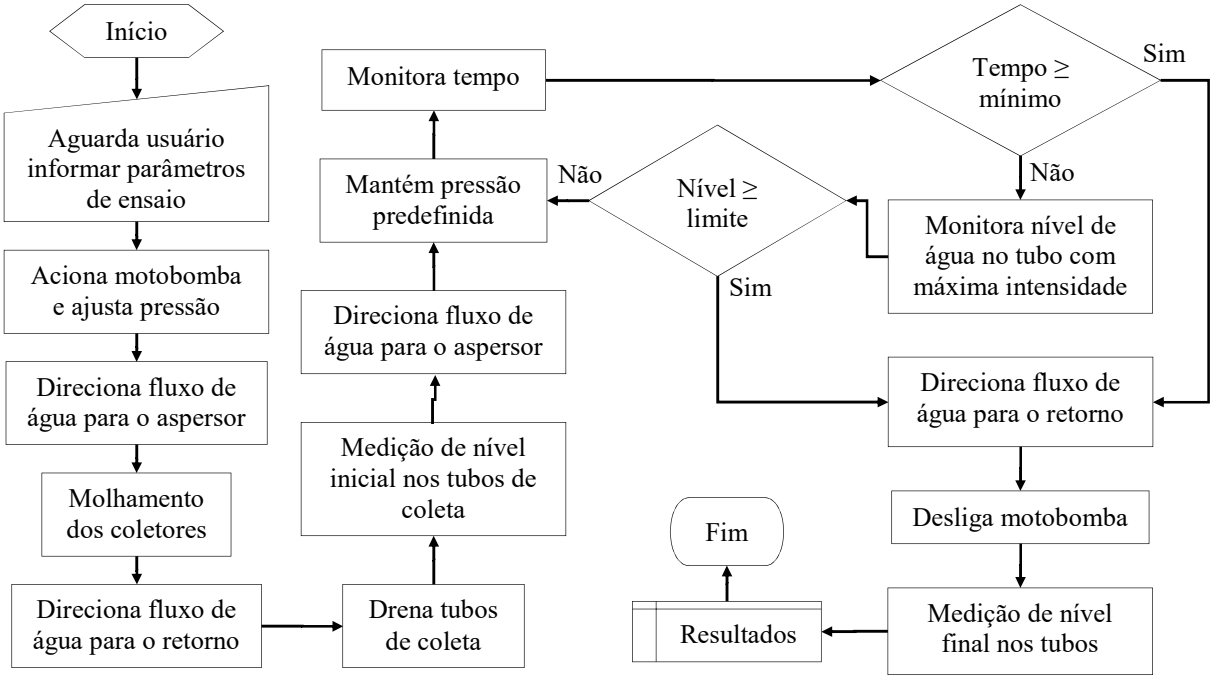


Figura 7 – Esquema resumido das tarefas executadas pelo sistema

Durante o funcionamento do aspersor o módulo de aquisição realizava medições periódicas de nível no primeiro tubo de coleta, pois é onde geralmente ocorre a maior intensidade de precipitação. Isso permitiu o monitoramento do nível de água no tubo, com possibilidade de encerramento do ensaio caso houvesse risco de extravasamento de água.

Adicionalmente, o módulo de aquisição dispunha de recursos para realizar medições em todos os tubos de coleta durante a etapa de coleta de água do aspersor. Isso porque nos ensaios de longa duração, para atender a incerteza, o tempo de coleta em cada tubo era diferente. Os mesmos tempos de estabilização e alívio de pressão no transmissor eram utilizados pelo sistema.

Em relação ao tempo de coleta, o sistema desenvolvido permite conduzir ensaios durante 1 h (ABNT NBR ISO 7749-1, 2000), ou por tempo mínimo para que o aspersor complete 30 voltas (ISO 15886-3, 2012). Adicionalmente, deve-se atender à incerteza-alvo de 3% nas medições de intensidade de aplicação, conforme estabelecido por essa última norma, o que requer um tempo mínimo, a ser definido para cada tubo de coleta. Para isso, posteriormente será apresentada a metodologia para essa finalidade.

Findado o tempo de coleta exigido, o sistema novamente passava às medições de nível nos tubos de coleta e temperatura da água. Todas as informações obtidas durante o ensaio foram

devidamente processadas e salvas em arquivo de texto. Posteriormente, os valores de intensidade de aplicação poderiam ser utilizados para cálculos de uniformidade.

3.4 Incerteza de medição para ensaios de aspersores

Num ponto *k*, distante *L* metros do aspersor, a água é aplicada a uma intensidade *i*, que pode ser considerada constante ao longo do tempo. A intensidade é calculada por meio da lâmina aplicada nesse ponto durante um determinado tempo. Para se medir a lâmina de água coletada foram consideradas a medição de massa (convencional) e a medição de nível num tubo de coleta (utilizado no sistema automático proposto).

A norma ABNT ISO NBR 7749-1 (2000) especifica um tempo mínimo de coleta de 1 h. A mesma não menciona critérios de incerteza de medição de intensidade de precipitação a serem atendidos. Por isso, baseando-se em uma série histórica de ensaios realizados pelo LEMI, os tubos de coleta foram dimensionados para comportarem a água coletada durante 1 h, o que resultou num tubo de 35,2 mm de diâmetro. A partir disso, realizou-se o cálculo e a análise da incerteza para esse diâmetro de tubo.

O cálculo e a análise de incerteza foram realizados tanto para o sistema convencional, com medição de massa, quanto para o sistema automático, com medição de nível, de acordo com o GUM. Para tanto, realizaram-se ensaios de distribuição de um aspersor de impacto equipado com bocal principal de 5,6 mm e bocal secundário de 2,4 mm, com pressão de operação de 1,5 kgf cm^{-2}, bocal principal 1 m acima do topo dos coletores. Foram realizados ensaios com duração de 1 h (ABNT NBR ISO 7749-1, 2000), 13,5 minutos (para o aspersor completar 30 voltas), e pelo tempo necessário para se atingir a incerteza-alvo em 80% dos coletores, para ambos os sistemas convencional e automático, com três repetições para cada condição de ensaio.

3.4.1 Medição de massa

A intensidade de precipitação é medida por meio da diferença entre a massa final (água e coletor) e a massa do coletor, do diâmetro do coletor e do tempo de coleta (Eq. 6).

$$i = \frac{1{,}44 \times 10^{10} \left(m_f - m_i\right)}{\pi \, \rho \, d^2 \, t} \tag{6}$$

$$\rho = -0{,}00361 \, T^2 - 0{,}06383 \, T + 1000{,}4342 \tag{7}$$

$$20 \, °C < T < 30 \, °C$$

em que,

i – intensidade de precipitação, mm h^{-1}

m_f – massa final de água e coletor, g

m_i – massa do coletor, g

ρ – massa específica da água, kg m^{-3}

T – temperatura da água, °C

d – diâmetro do coletor, mm

t – tempo de coleta, s.

Sabe-se que a massa específica da água varia com sua temperatura. O laboratório utiliza a Eq. 7 para essa relação, obtida por meio do ajuste de dados tabelados para temperatura da água entre 20 e 30 °C. A Eq. 6 considera um valor de massa específica que é resultante da temperatura média da água durante o tempo de coleta.

Aplicando-se a equação de propagação de incerteza (Eq. 2) na Eq. 6 se obtém a expressão de incerteza relativa na medição de intensidade por massa (Eq. 8). Para tanto, um dos passos inclui a obtenção dos coeficientes de sensibilidade de cada variável de entrada, cujas equações estão apresentadas no APÊNDICE C devido a sua extensão. À medida que se aumenta o tempo de coleta, aumenta-se a massa coletada, logo há correlação entre as mesmas, que foi incluída no cálculo.

$$\left[\frac{u_i}{i}\right]^2 = \left[\frac{u_m}{m_f - m_i}\right]^2 + \left[-\frac{u_m}{m_f - m_i}\right]^2 + \left[-\frac{(-0{,}00722T - 0{,}06383)\,u_T}{-0{,}00361\,T^2 - 0{,}06383\,T + 1000{,}4342}\right]^2 + \left[-\frac{2\,u_d}{d}\right]^2 + \left[-\frac{u_t}{t}\right]^2 + 2\left[\frac{-\,u_m\,u_t}{m_f - m_i}\right] \quad (8)$$

em que,

$\frac{u_i}{i}$ – incerteza relativa de intensidade de aplicação

u_m – incerteza na medição de massa, g

m_f – massa final de água e coletor, g

m_i – massa do coletor, g

T – temperatura da água, °C

u_T – incerteza na medição de temperatura, °C

u_d – incerteza de medição do diâmetro, mm

d – diâmetro interno do coletor, mm

u_t – incerteza de medição do tempo, s

t – tempo de coleta, s

Os valores de incerteza de medição de cada variável da Eq. 8 foram aqueles apresentados no APÊNDICE A. Vale ressaltar que os equipamentos considerados para as medições foram: uma balança (cuja unidade de medida é o grama, g), termômetro de líquido de vidro (°C), trena (mm), paquímetro (mm) e cronômetro (s). Assim, para o cálculo da incerteza sempre se deve utilizar a equação que necessita a unidade de medida dos equipamentos.

Para a temperatura da água de 20 °C, diâmetro do coletor de 200 mm e massa do coletor de 1300 g, simplificou-se a Eq. 8 como apenas função de massa final e do tempo de coleta. Portanto, para intensidades de 0,25 a 20 mm h^{-1} calcularam-se essas duas variáveis por método numérico, para que se atingisse uma incerteza expandida relativa de 3%.

3.4.2 Medição de nível

Considerando-se que todo volume de água aplicado no coletor deve ser drenado ao tubo de coleta, no qual são feitas medidas de nível inicial e final, a intensidade pode ser calculada por meio da Eq. 9. As medições de nível e temperatura provieram dos respectivos transmissores, cujos sinais são em corrente elétrica (4 a 20 mA). Por isso, necessita-se utilizar suas equações de resposta (Eqs. 10 e 11) obtidas por comparação com um padrão. Portanto, as mesmas são particulares de cada equipamento/calibração, e se alteram a cada ajuste.

$$i = \frac{3{,}6 \times 10^8 \ d_{TC}^2}{d_C^2 \ t \ g}\left(\frac{p_f}{\rho_f} - \frac{p_i}{\rho_i}\right) \quad (9)$$

$$p = \alpha i_p + \beta \quad (10)$$

$$T = \varphi i_T + \omega \quad (11)$$

em que,

i – intensidade de precipitação, mm h^{-1}

p_i e p_f – pressões inicial e final no tubo de coleta (Eq. 10), mbar

ρ_i e ρ_f – massas específicas inicial e final (Eq. 7), kg m^{-3}

d_{TC} – diâmetro interno do tubo de coleta, mm

d_C – diâmetro interno do coletor, mm

t – tempo de coleta, s

g – aceleração da gravidade, 9,81 m s^{-2}

T – temperatura da água, °C

i_p – corrente elétrica como sinal do transmissor de pressão dos tubos de coleta, mA

i_T – corrente elétrica como sinal do transmissor de temperatura da água, mA

α, β, φ e ω – coeficientes de ajuste das equações dos transmissores.

As Eqs. 7, 10 e 11 foram substituídas na Eq. 9 para se obter a expressão geral de medição de intensidade de aplicação por meio das unidades de medição dos equipamentos (Eq. 12). Da mesma forma adotada para os procedimentos baseados em medição de massa, aplicou-se a equação de propagação de incerteza (Eq. 2) na equação resultante, proveniente dessa substituição, para se obter a equação de incerteza de medição de intensidade. As equações para o cálculo dos coeficientes de sensibilidade de cada variável de entrada da Eq. 12 são apresentadas no APÊNDICE D, uma vez que são extensas.

$$i = \frac{3{,}6 \times 10^8 \ d_{TC}^2}{d_C^2 \ t \ g}\left[\frac{\alpha \ i_{pf} + \beta}{-0{,}00361\left(\varphi \ i_{Tf} + \omega\right)^2 - 0{,}06383\left(\varphi \ i_{Tf} + \omega\right) + 1000{,}4342} - \frac{\alpha \ i_{pi} + \beta}{-0{,}00361\left(\varphi \ i_{Ti} + \omega\right)^2 - 0{,}06383\left(\varphi \ i_{Ti} + \omega\right) + 1000{,}4342}\right] \quad 12$$

Três variáveis de entrada apresentam correlação: a corrente elétrica para a nível final com o tempo, e a corrente elétrica para a nível final com o diâmetro do tubo de coleta. Quanto maior o tempo de coleta maior o volume de água coletado, logo maior o nível de água no tubo, resultado em maior corrente elétrica. Nesse caso a correlação é positiva, com um coeficiente r de Pearson igual 1. Tubos de coleta de maior diâmetro apresentam menor nível final, para o mesmo volume de água, portanto a correlação foi negativa, com um coeficiente igual a -0,79. Esses valores dos coeficientes foram obtidos por meio dos valores de intensidade e das variáveis de entrada da Eq. 12. No caso de qualquer alteração no valor das mesmas, dever-se-á calcular novamente os coeficientes.

Para intensidades de 0,25 a 20 mm h^{-1} calcularam-se o nível final e o tempo de coleta para que a incerteza relativa fosse menor que 3%, por meio da Eq. 12 e da equação de incerteza (APÊNDICE D). Um método numérico foi utilizado para a solução do tempo de coleta e do nível final, com restrição de nível máximo correspondente à pressão nos tubos de 100 mbar ($i_{pf} = 20 \ mA$). Para as demais variáveis de entrada foram utilizados os seguintes valores:

- Diâmetros internos do tubo de coleta: 17,0, 21,6, 27,8, 35,2, 44,0, 53,4, 66,6, 75,6 e 97,8 mm
- Diâmetro dos coletores: 200 mm
- Nível inicial correspondente à pressão de 0 mbar ($i_{pi} = 4 \ mA$)
- Temperatura inicial da água: 20 °C ($i_{Ti} = 10{,}77 \ mA$)
- Temperatura final da água: 21 °C ($i_{Tf} = 11{,}06 \ mA$)

Esses valores de diâmetro dos tubos de coleta são provenientes de tubos comerciais de PVC marrom, utilizado para água fria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de incerteza para ensaios com medição de massa

Os ensaios de aspersores com medição de massa são comumente conhecidos por apresentarem elevada acurácia. Isso pode ser verificado na Figura 8, por meio dos baixos valores de incerteza expandida na medição de intensidade. Os maiores valores de incerteza relativa foram obtidos para intensidades baixas e curtos tempos de coleta. Para o caso mais crítico, com intensidade de 0,25 mm h^{-1} e tempo de coleta de 15 minutos, a incerteza relativa atingiu 11,92% (k = 2). O aumento do tempo de coleta proporcionou redução da incerteza, pois mais água é coletada, chegando-se a 2,96% para 1 h de coleta. Na faixa de intensidades de 0,25 a 20 mm h^{-1}, o menor valor de incerteza obtido foi de 0,70%, para intensidades maiores que 2,0 mm h^{-1} num tempo de coleta de 1 h. Isso evidencia que menor incerteza é obtida ao se aumentar o tempo de coleta, e que o tempo de 1 h de coleta foi suficiente atender o critério de 3% de incerteza, e para todos os coletores, pois a intensidade de 0,25 mm h^{-1} apresentou incerteza menor que esse limite.

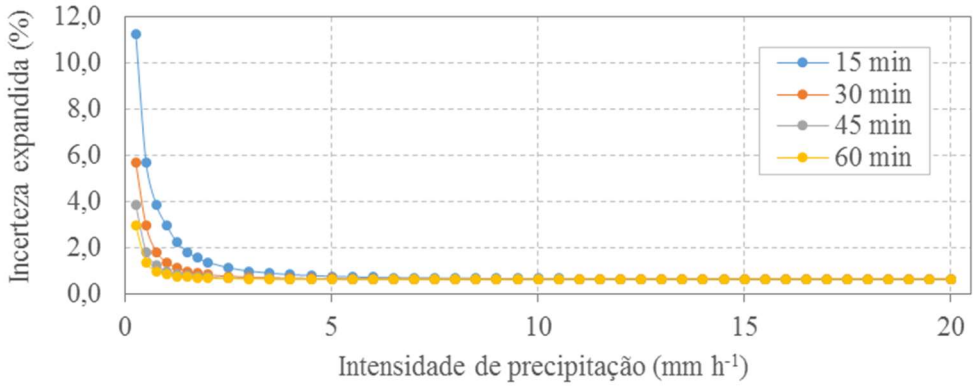


Figura 8 – Incerteza expandida nos ensaios convencionais para diferentes intensidades e tempos de coleta

Para os mesmos tempos de coleta da Figura 8, pode-se analisar a contribuição de cada fonte para a incerteza relativa total, conforme apresentado na Figura 9 para as intensidades de 0,25, 4 e 20 mm h^{-1}. Para o tempo de 15 minutos (Figura 9A), o aumento da intensidade proporcionou a redução da contribuição das massas e aumentou a do diâmetro do coletor. Isso porque o aumento da intensidade aumenta a massa de água coletada, reduzindo sua contribuição na incerteza relativa. Portanto, quando a intenção for reduzir a incerteza na medição em torno das menores intensidades, deve-se buscar menor incerteza na medição de massa. Uma das formas de se reduzir a incerteza é a utilização de um equipamento de melhor qualidade, cuja incerteza de medição seja menor.

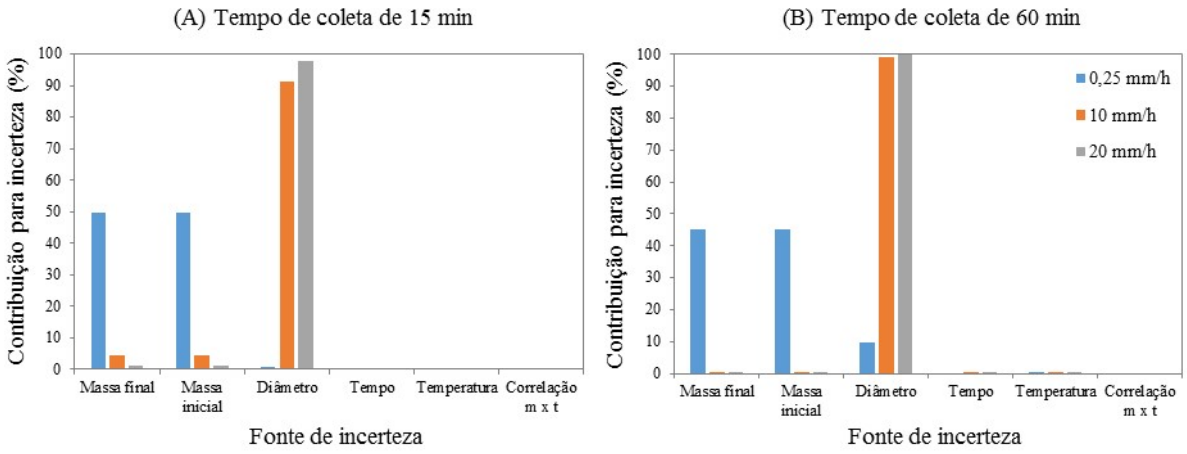


Figura 9 – Contribuições de cada fonte para a incerteza de medição de massa para diferentes tempos de coleta e intensidades

Por outro lado, para intensidades maiores que 4 mm h^{-1} o diâmetro passou a ter maior contribuição, visto que sua incerteza pode ser considerada elevada (0,32 mm, APÊNDICE A). Portanto, pode-se reduzir a contribuição do diâmetro por meio da utilização de um instrumento com menor incerteza, o que também irá reduzir o valor da incerteza de medição.

O aumento do tempo de coleta de 15 minutos (Figura 9A) para 60 minutos (Figura 9B) não alterou a contribuição da massa e do diâmetro do coletor para a incerteza final. Além disso, tanto o tempo quanto a temperatura foram fontes que apresentaram pequena contribuição na incerteza final. Por isso, não é tecnicamente viável, em termos de incerteza, um grande investimento na aquisição de instrumentos (medidores de tempo e temperatura) com menor incerteza, pois pouca alteração será obtida no resultado final de incerteza. Isso não quer dizer que se deve negligenciar a medição dessas variáveis durante os ensaios, apenas não é necessária a utilização de instrumentos com elevada acurácia.

Por meio das Eqs. 6, 7 e 8, para cálculo de incerteza para ensaios convencionais, pode-se estimar os tempos mínimos de coleta em função das intensidades de precipitação ao longo do raio de alcance do aspersor. Assim, para coletores de 200 mm de diâmetro e intensidades entre 0,25 e 20 mm h^{-1} os tempos mínimos de coleta para que se atinja a incerteza alvo de 3% (ou melhor) variou entre 59,1 minutos (i = 0,25 mm h^{-1}) até 0,74 minutos (i = 20 mm h^{-1}) (Figura 10). O modelo potencial ajustado às estimativas facilita o cálculo do tempo mínimo de coleta, como por exemplo para uma intensidade de 10 mm h^{-1}, resultando um tempo de 1,48 min. Porém, além do requisito de incerteza de medição, a norma ISO 15886-3 (2012) especifica que deve-se conduzir o ensaio por um tempo mínimo que permita que o aspersor complete 30 voltas. Desse modo, para intensidade de precipitação mais elevadas, o tempo mínimo de coleta seria definido pelo critério de 30 voltas, o que resultaria em incertezas de medição menores que 3%.

Com o tempo mínimo obtido para cada intensidade entre 0,25 e 20 mm h^{-1} (Figura 10) chegou-se a uma massa mínima de água de 7,7 g, a ser coletada a fim de se garantir uma incerteza-alvo de 3% (k = 2). Não houve possibilidade de se obter os resultados experimentais para confirmar a equação da Figura 10, pois iria requerer um sistema automatizado para medição durante o ensaio, sendo que cada coletor apresenta uma intensidade.

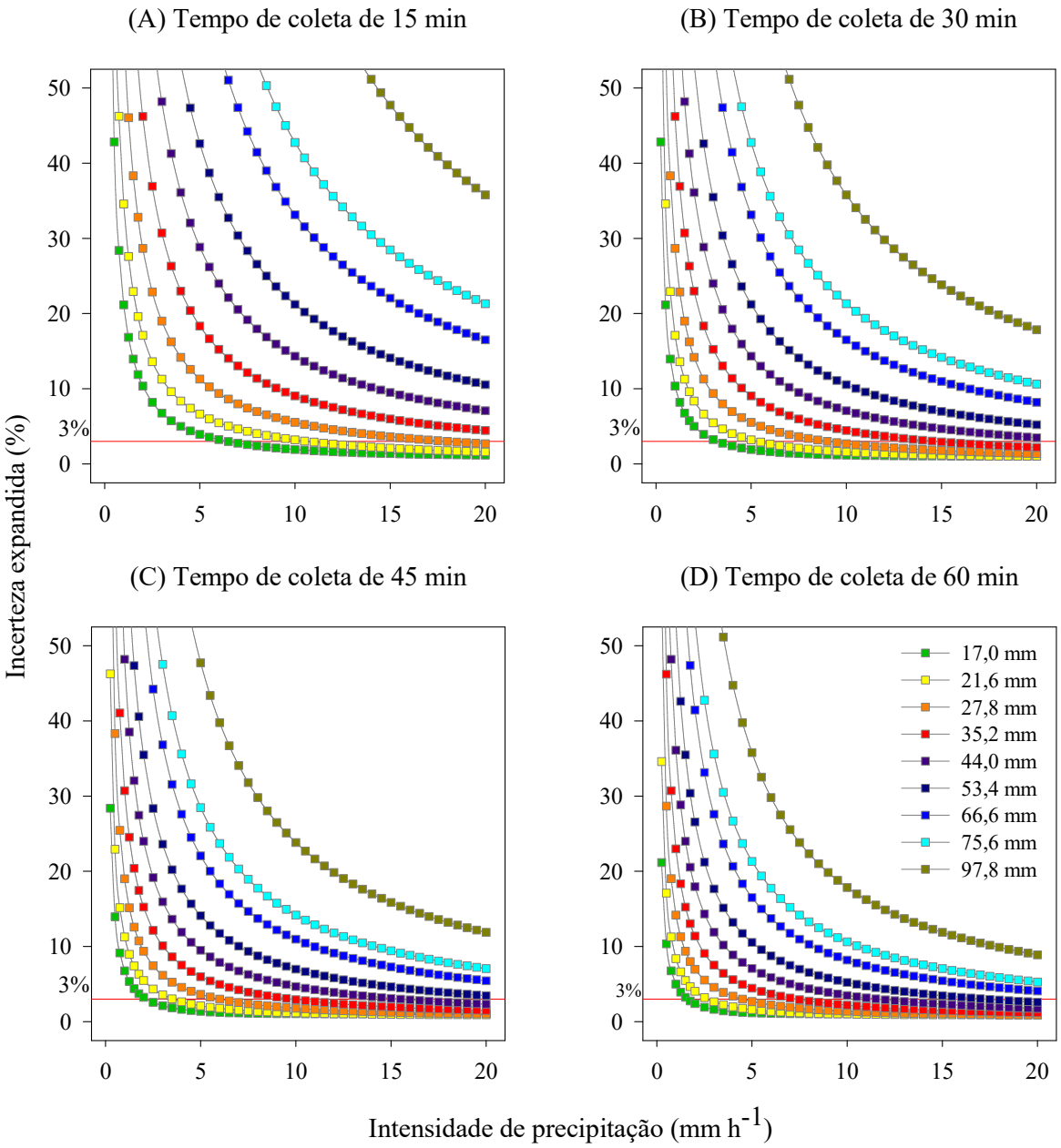
Figura 10 – Tempo mínimo de coleta para se atingir incerteza-alvo menor que 3% (k=2) no sistema convencional

Os resultados da Figura 10 enfatizam, mais uma vez, que o tempo de coleta de 1 h é adequado para ensaios baseados na medição de massa. Isso porque, mesmo para a intensidade de 0,25 mm h^{-1} a incerteza foi menor que 3%, atendendo integralmente tal critério de incerteza.

4.2 Análise de incerteza para ensaios com medição de nível

Analisando-se a incerteza expandida de medição para intensidades de precipitação entre 0,25 e 20 mm h^{-1} constata-se que a mesma foi sempre maior para menores intensidades (Figura 11). Assim, as maiores dificuldades sempre estarão presentes acerca das menores intensidades, tanto que a norma ISO 15886-3 (2012) requer que se tenha uma incerteza-alvo menor que 3% em 80% dos coletores. Portanto, o desafio do sistema de medição é assegurar uma incerteza menor que esse limite. Os 20% restantes são justamente para esses casos de menor intensidade, uma vez que seria impraticável garantir uma incerteza menor que 0,0075 mm h^{-1} para uma intensidade de 0,25 mm h^{-1} no último coletor.

A incerteza expandida relativa para a medição de nível foi sempre maior que para medição de massa, para a mesma intensidade. Para um tempo de coleta de 60 min e intensidade de 0,25 mm h^{-1}, por exemplo, a incerteza de medição proporcionada utilizando-se tubo de coleta de 17 mm de diâmetro foi de 21,2% (Figura 11D), enquanto no sistema convencional foi de 2,96% (Figura 8).



*Resultados de incerteza-padrão maiores que 50% foram omitidos por dificuldade de apresentação
**Análise realizada considerando temperaturas da água de 20 ˚C no início do ensaio e 21 ˚C no fim

Figura 11 – Incerteza expandida relativa para diferentes intensidades de precipitação e diâmetros do tubo de coleta

O aumento do tempo de coleta, por outro lado, proporcionou redução da incerteza. Assim, por exemplo, para um tubo de coleta de 97,8 mm de diâmetro e tempo de coleta de 15 minutos, a incerteza foi de 7,17 mm h^{-1} para 20 mm h^{-1} de intensidade, resultando numa incerteza de 35,9%. Aumentando-se os tempos para 30, 45 e 60 minutos (Figura 11B, C e D), as incertezas reduziram para 3,57, 2,38 e 1,78 mm h^{-1}, respectivamente, ou seja, 17,9, 11,9 e 8,9%.

No outro extremo, para um tubo de 17 mm, a incerteza relativa foi de 86,17% para um tempo de 15 minutos e intensidade de 0,25 mm h^{-1}, reduzindo para 42,83, 28,39 e 21,17% para

tempos de 30, 45 e 60 minutos, respectivamente. E, para intensidade de 20 mm h^{-1}, as incertezas relativas foram de 1,17, 1,07, 1,05 e 1,04% para os mesmos tempos, respectivamente.

Naturalmente, de acordo com a Eq. 9, para uma determinada intensidade *i*, tempos menores implicam em menor nível final no tubo de coleta. Logo, tempos de coleta curtos, como 15 minutos, resultaram em maior incerteza relativa do que tempos maiores, como 60 minutos (Figura 11). Intensidades maiores, como 20 mm h^{-1}, permitem coletar mais água que 0,25 mm h^{-1}, proporcionando maior nível no tubo e, por isso, menor incerteza. Portanto, duas são as formas de se atingir a incerteza-alvo: aumentando-se o tempo de coleta e/ou se utilizando tubos de coleta de menor diâmetro.

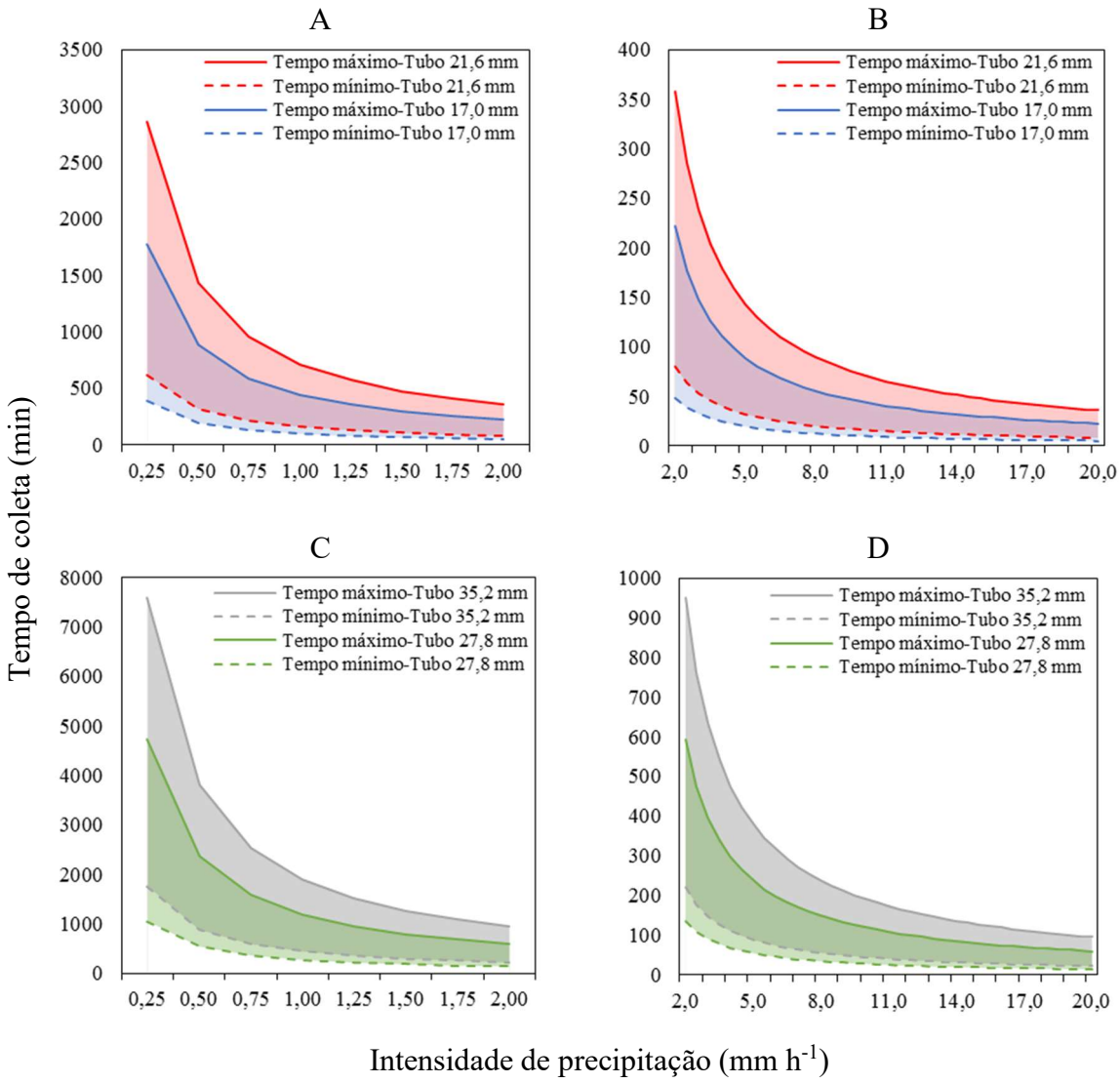
Como maior diâmetro de tubo implica em maior incerteza e maior tempo de coleta, restringiu-se as análises subsequentes apenas para os quatro menores diâmetros. Contudo, para os demais diâmetros as mesmas considerações são válidas.

Para se atingir uma incerteza-alvo requerida de 3% deve-se coletar água durante um tempo mínimo, para cada intensidade. No outro extremo, tem-se um nível máximo que corresponde à pressão de 100 mbar, medida pelo transmissor. Portanto, esses dois requisitos indicam a necessidade de se calcular os limites de tempo mínimo e o máximo de coleta, para cada intensidade e diâmetro de tubo (Figura 12). Assim, obtém-se o um intervalo de tempo dentro do qual se pode coletar água.

Para a menor intensidade (0,25 mm h^{-1}), o tempo mínimo para atender à incerteza de 3% em 80% dos coletores foi de 388 minutos (6,5 h) para o tubo de 17 mm, e o tempo máximo para não haver extravasamento de água foi de 1772 minutos (29,5 h) (Figura 12A). À medida que se aumentou a intensidade, reduziu-se o intervalo de tempo de coleta, como por exemplo, para a intensidade de 20 mm h^{-1}, que apresentou tempo mínimo de 4,8 min e máximo de 22,2 min (Figura 12B).

Ao se aumentar o diâmetro do tubo para 21,6 mm, aumentou-se o tempo mínimo de 388 para 616 minutos, para a intensidade de 0,25 mm h^{-1} (Figura 12A). Na intensidade de 20 mm h^{-1}, o tempo mínimo de coleta aumentou de 4,8 para 8,0 min ao se utilizar o tubo de 21,6 mm ao invés do de 17 mm. Também ocorreu aumento do tempo mínimo ao se utilizar tubos de diâmetro de 27,8 e para 35,2 mm (Figura 12C e D), com valores de 1052,8 e 1762,1 minutos, respectivamente para a intensidade de 0,25 mm h^{-1}.

Portanto, quanto menor o diâmetro do tubo de coleta, menor o tempo mínimo de coleta para atender à incerteza-alvo. No caso estudado, o tubo de 17 mm de diâmetro apresentou as melhores condições de operação para se atender aos critérios da normatização com base na incerteza de medição.



**O tempo mínimo garante incerteza de 3%. O tempo é máximo quando a água atinge a capacidade do tubo*

Figura 12 – Intervalos de tempo disponíveis para coleta de água para tubos de diâmetros de 17 e 21,6 mm (A e B) e 27,8 e 35,2 mm (C e D)

Adicionalmente, os tempos mínimo e máximo da Figura 12 podem ser definidos por equações potenciais, cujos coeficientes de ajuste são apresentados na Tabela 1. As mesmas facilitam o cálculo dos tempos de coleta para os limites de incerteza e nível.

Tabela 1 – Equações dos tempos de coleta mínimo e máximo para cada tubo de coleta

Diâmetro tubo de coleta (mm)	Tempo mínimo (incerteza-alvo = 3%) (min)	Tempo máximo (nível máximo = 100 mbar) (min)
17,0	$t = 96{,}9\ i^{-1}$	$t = 443{,}0\ i^{-1}$
21,6	$t = 159\ i^{-1}$	$t = 715{,}2\ i^{-1}$
27,8	$t = 269{,}2\ i^{-1}$	$t = 1184{,}7\ i^{-1}$
35,2	$t = 440{,}5\ i^{-1}$	$t = 1899{,}3\ i^{-1}$

Para que se consiga realizar a medição de nível de todos os tubos de coleta somente no fim do ensaio, o tempo de coleta máximo é obtido no ponto de intensidade máxima; e o mínimo no ponto da intensidade limite. Caso contrário, haverá extravasamento de água no tubo que recebe a precipitação máxima. Assim, pode-se considerar que o tempo de coleta é igual para os dois extremos, logo, por meio das equações apresentadas na Tabela 1 obtém-se a relação de cerca de 4,5 entre intensidades máxima e limite. Isso permite verificar se um sistema equipado com tubos de coleta com um determinado diâmetro poderá realizar a medição somente no fim do ensaio. Por exemplo, para um aspersor que apresenta intensidade máxima de 15 mm h^{-1}, a intensidade limite deve ser de no mínimo 3,3 mm h^{-1}. Se a intensidade limite for menor, saber-se-á que o sistema deverá realizar medições de nível durante o tempo de coleta. Isso pode impedir o ensaio de algum aspersor que apresente uma relação maior entre as intensidades, logo, a medição ao longo do ensaio se torna mais interessante.

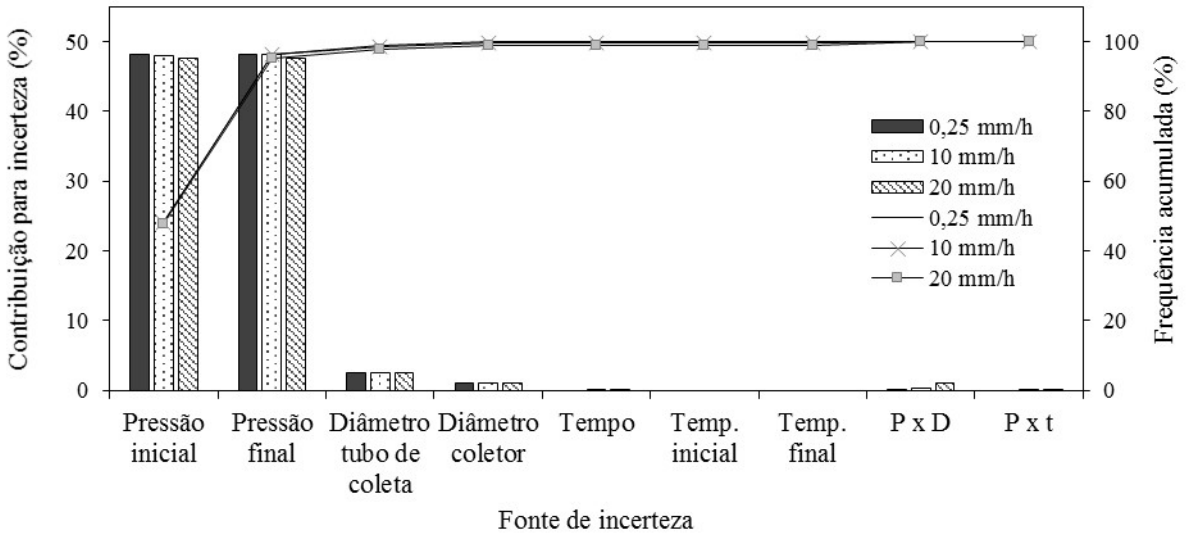
Além da incerteza-alvo, a norma ISO 15886-3 (2012) requer que o jato principal passe 30 vezes sobre os coletores. Isso requer um certo tempo de coleta, definindo também um volume de água a ser armazenado pelo tubo. Assim, o tubo a ser escolhido também precisa comportar esse volume de água e atender aos dois critérios.

4.2.1 Contribuição das fontes de incerteza na incerteza combinada

Esta análise teve por objetivo identificar as fontes com maior contribuição para a incerteza total. A mesma foi realizada para o tubo de coleta de 17 mm de diâmetro, temperaturas da água de 20 °C no início e 21 °C no fim da coleta, e tempo ajustado para se obter uma incerteza-alvo de 3% (k = 2).

Para qualquer intensidade entre 0,25 e 20 mm h^{-1} os fatores que mais contribuíram para a incerteza total foram as medições de nível inicial e final, conforme ilustrado na Figura 13 para as intensidades de 0,25, 10 e 20 mm h^{-1}. Essas duas componentes corresponderam a cerca de 95% da incerteza total, seguidas dos diâmetros do tubo de coleta (2,5%) e do coletor (1,1%). As contribuições das outras fontes foram praticamente desprezíveis quando comparadas a essas.

Numa análise mais profunda, nota-se que a calibração do transmissor de pressão teve o maior peso na incerteza final, pois teve o maior valor de incerteza em relação à resolução e incerteza experimental (APÊNDICE B). A incerteza de calibração do mesmo era de 0,02% em relação ao fundo de escala, sendo que o mesmo pertence à classe de exatidão 5A (DOQ-CGCRE-014, 2010), que é a melhor classe. Portanto, mesmo se utilizando um transmissor da melhor qualidade, o mesmo ainda foi a principal fonte de incerteza para o ensaio.



** P x D: Correlação entre nível final e diâmetro do tubo de coleta*
P x t: Correlação entre nível final e tempo de coleta

Figura 13 – Contribuição de cada fonte de incerteza para a incerteza-alvo de 3% (k = 2) para o tubo de 17 mm

Para o sistema automatizado desenvolvido, cujo diâmetro do coletor não poderia ser alterado, a única maneira de se obter uma incerteza relativa menor é por meio do ajuste do tempo de ensaio dentro dos limites de operação dos tubos de coleta.

4.2.2 Efeito da temperatura da água na incerteza de medição

Para se obter o nível de água no tubo de coleta, fez-se necessária a medição simultânea da temperatura da água, visto que a mesma influencia na massa específica da água. As medições de temperatura foram realizadas por meio do transmissor, e por meio da equação ajustada calculava-se a massa específica (Eq. 7), utilizada na Eq. 12 e naquelas para cálculo da incerteza. Portanto, também há necessidade de se estudar o efeito da alteração da temperatura no resultado final de incerteza de intensidade, ou seja, o quanto a incerteza em torno da medição da temperatura influencia na incerteza combinada. Para isso, realizou-se o cálculo de incerteza para um tempo de coleta de 30 minutos e para o tubo de coleta de 17 mm, pois é aquele que permite a realização do ensaio em menor tempo.

Quando houve aumento da temperatura de 15 para 16 °C, a incerteza expandida foi de 42,7865% para a intensidade de 0,25 mm h^{-1} (Figura 14A). O resfriamento de 16 para 15 °C para essa mesma intensidade fez com que a incerteza aumentasse para 42,7867%. Essas mesmas variações na temperatura da água, mas para a intensidade de 10 mm h^{-1} (Figura 14B), reduziram a incerteza de 1,17223 para 1,17196%, com o aquecimento e resfriamento, respectivamente.

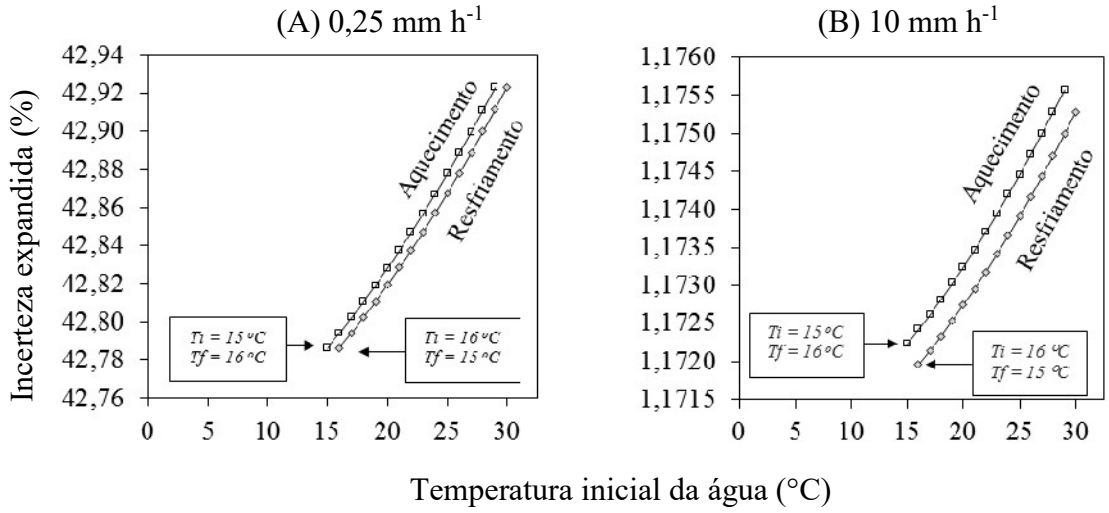


Figura 14 – Efeito do aumento ou diminuição em 1 °C da temperatura da água na incerteza relativa ao se utilizar um tubo de coleta de 17 mm e tempo de coleta de 30 minutos, para intensidades de 0,25 mm h^{-1} (A) e 10 mm h^{-1} (B)

Apesar da curva de aquecimento da água estar acima da curva de resfriamento para a intensidade de 10 mm h^{-1} (Figura 14B), a diferença no valor de incerteza expandida foi desprezível. Além disso, o reservatório utilizado possui capacidade para 20 m³, e não há registros de variação na temperatura da água ao longo de 1 h de coleta nos ensaios realizados pelo laboratório. Num cenário extremo, há possibilidade de realização dos ensaios para variações de até 5 °C na temperatura da água (ABNT NBR ISO 7749-1, 2000; ISO 15886-3, 2012).

Portanto, pode-se considerar que a incerteza de medição de temperatura da água entre o início e final da coleta foi desprezível na incerteza expandida de intensidade. Os resultados anteriores de contribuição para incerteza final (Figura 13) já haviam apontado que a incerteza em torno da medição de temperatura é o fator que menos influencia no resultado de incerteza.

4.3 Ensaios de distribuição de água do aspersor avaliado

Tendo-se definido diâmetro do tubo de coleta de 35,2 mm para atender ensaios de 1 h de duração, o próximo passo foi analisar as curvas de distribuição de um aspersor, obtidas com ambos os sistemas convencional e no sistema automático. As duas primeiras situações foram para ensaios com tempo de coleta fixos, ou seja, de 1 h (ABNT NBR ISO 7749-1, 2000) ou mínimo de 30 voltas do aspersor (ISO 15886-3, 2012), cujos resultados são apresentados na Figura 15.

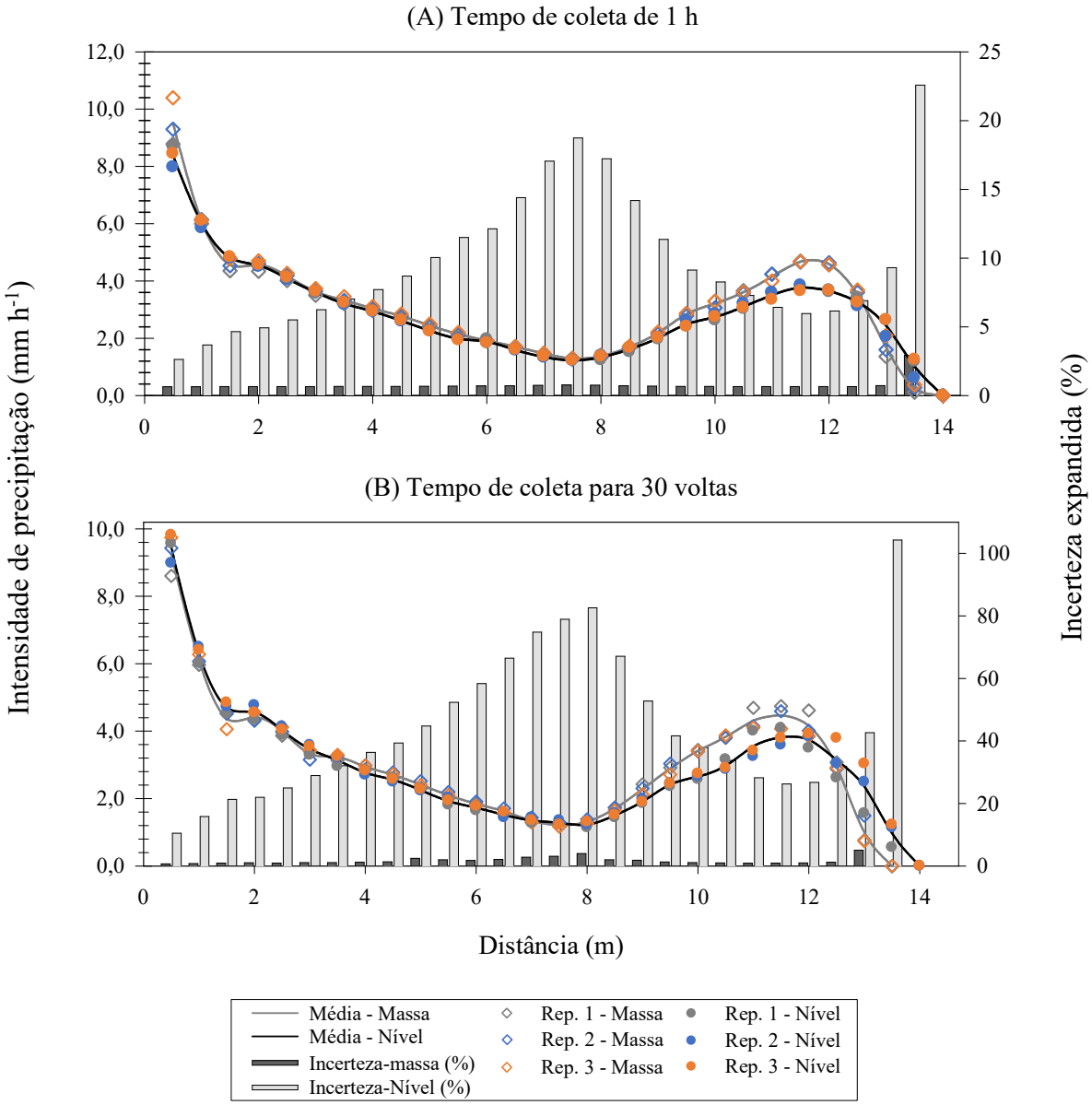


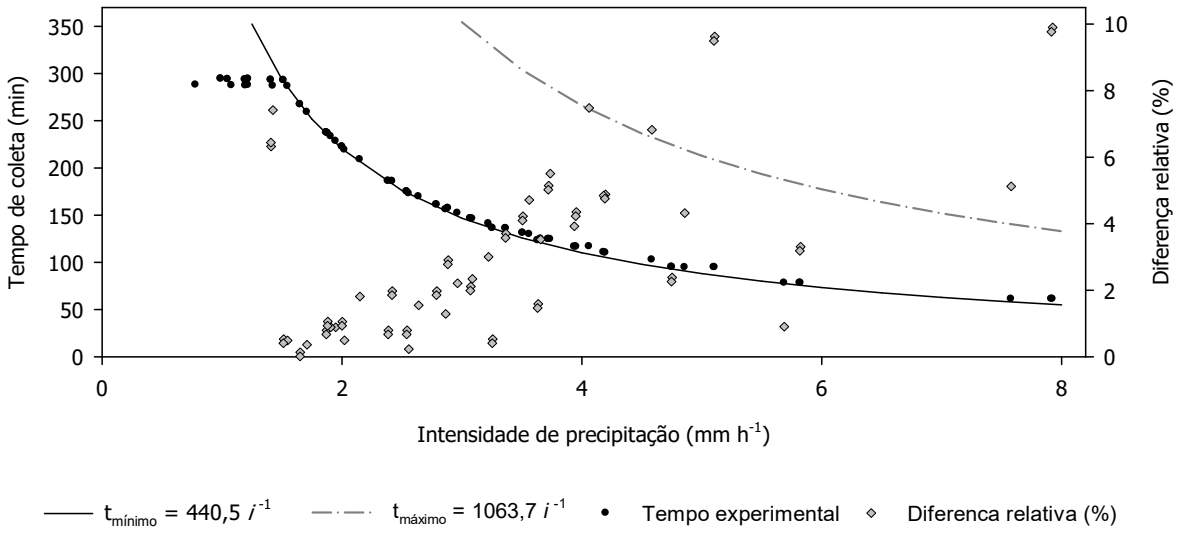
Figura 15 – Curvas de distribuição de água do aspersor obtidas nos sistemas convencional (massa) e automático durante 1 h de coleta de água (A) e 30 voltas do aspersor (B)

Em termos de incerteza de medição, para um tempo de 1 h de coleta o sistema convencional apresentou valores menores que 3% para todos os coletores do raio de alcance, mesmo para a intensidade de 0,25 mm h^{-1} (Figura 15A). Já para o tempo de coleta de 13,5 min, o qual corresponde a 30 voltas do aspersor, a incerteza chegou a 5% em alguns coletores, contudo, foi menor que 3% para 80% dos coletores do raio de alcance.

Para o sistema automático, ao contrário, para tempo de coleta de 1 h, apenas o primeiro coletor (distância de 0,5 m do aspersor) apresentou incerteza menor que 3% (2,6%, Figura 15A). E, para um tempo de coleta durante 30 voltas do aspersor a incerteza para 80% dos coletores foi maior que 65%. Dessa maneira, como 80% das menores incertezas foi cerca de 14%, não se atingiu o critério da ISO 15886-3 (2012).

A curva de distribuição média obtida com o sistema automático foi semelhante à do convencional, para ambos os tempos de coleta (Figura 15). Isso demostra que o sistema desenvolvido executou os ensaios de distribuição em concordância com o sistema convencional. Deve-se considerar, contudo, a diferença no terço final das curvas médias para os dois tempos. Essa diferença indica que poderia haver algum fator de influência no volume de água coletado no sistema automático. Três principais causas podem ter contribuído para esses problemas, o que originou hipóteses a serem testadas no sistema: i) o tempo de abertura das válvulas de controle dos tubos de coleta era pequeno, necessitando um tempo maior para estabilização da pressão; ii) os tubos de coleta apresentavam diferentes resultados para a mesma quantidade de água medida; iii) havia algum vazamento no sistema de medição. Essas hipóteses foram testadas e seus resultados serão apresentados posteriormente.

O terceiro critério a ser analisado era que a duração da coleta deveria ser suficiente para 80% dos coletores apresentarem incerteza de 3%. No caso do sistema convencional, esse tempo é atingido ao se coletar 7,7 g de água nesses coletores, que pode ser calculado por meio da equação da Figura 10, a partir da informação da intensidade. No sistema automático, os tempos mínimos obedecem às curvas apresentadas na Figura 12, para cada diâmetro de tubo de coleta, que podem ser calculados com suas equações (Tabela 1). Para os tubos de 35,2 mm de diâmetro interno instalados no LEMI as pressões iniciais foram maiores que zero, tendo-se que ajustar suas equações (Figura 16). Para cada intensidade ajustaram-se o tempo de coleta e o nível final no tubo de coleta por meio da Eq. 9 e das equações do APÊNDICE D, para que a incerteza expandida fosse menor que 3%.



**Os resultados para tempos de coleta maiores que 350 min foram omitidos, por dificuldade de apresentação*

Figura 16 – Tempos de coleta mínimo, para incerteza-alvo menor que 3%, e máximo, sem extravasamento do tubo, conforme a intensidade de precipitação do aspersor testado

Por meio desse ajuste o tempo de coleta foi distinto para diferentes intensidades, enquanto a diferença entre pressões inicial e final foi de aproximadamente 23,2 mbar. Da mesma forma que para os ensaios convencionais, onde se deveria coletar 7,7 g de água, esse valor constante era esperado, visto que o nível foi a fonte de maior contribuição para a incerteza final.

A maneira mais fácil de se garantir essa incerteza nos tubos de coleta foi por meio do monitoramento dessa diferença de nível em cada tubo. Assim, cada tubo/coletor apresentou um tempo de coleta diferente, os quais são os resultados experimentais da Figura 16. As diferenças relativas entre todos os tempos estimado e observado foram menores que 10%; e mais de 80% desses apresentaram diferença menor que 5%. Portanto, pode-se considerar que a equação para estimativa do tempo de coleta mínimo foi válida.

As equações apresentadas na Figura 16 mantém a relação intensidade e tempo mínimo, quando se deseja incerteza menor que 3%, e tempo máximo, quando a capacidade do tubo for atingida (70 mbar). Essas equações foram ajustadas para uma intensidade de até 20 mm h^{-1}, porém na figura limitou-se para a intensidade máxima medida do aspersor utilizado. Para uma intensidade de 8 mm h^{-1}, por exemplo, o tempo mínimo estimado foi de 55,1 min, e para 80% dos coletores do raio de alcance desse aspersor (intensidades maiores que 1,5 mm h^{-1}) 293,7 min. Caso fosse necessário que todos os coletores do raio de alcance (intensidades maiores que 0,25 mm h^{-1}) apresentassem incerteza menor que 3% o tempo de coleta mínimo deveria ser de 1762 min (29,4 h), o que se tornaria impraticável mesmo para um sistema automático.

O monitoramento contínuo do nível de água nos tubos de coleta permitiu a interrupção da coleta quanto 80% dos coletores apresentassem uma diferença de nível correspondente uma diferença de pressão de 23,2 mbar. A partir disso, o sistema media o nível nos 20% de tubos restantes, que eram aquelas com menor intensidade de aplicação. Por isso, na Figura 16 os tempos de coleta foram praticamente os mesmos para as menores intensidades, visto que foi o momento de interrupção da coleta, finalizando-se o ensaio.

Os tempos de coleta mínimos para ambos os sistemas foram calculados a partir dos resultados do ensaio convencional com 1 h de coleta (Figura 15A), e da equação da Figura 10. Para o sistema convencional esse tempo foi de 8,8 min, e para o automático, cerca de 293,7 min. As curvas de distribuição de água para ensaios com tempo de coleta suficiente para manter a incerteza menor que 3% em 80% dos coletores foram também obtidas para ambos os sistemas convencional e automático (Figura 17).

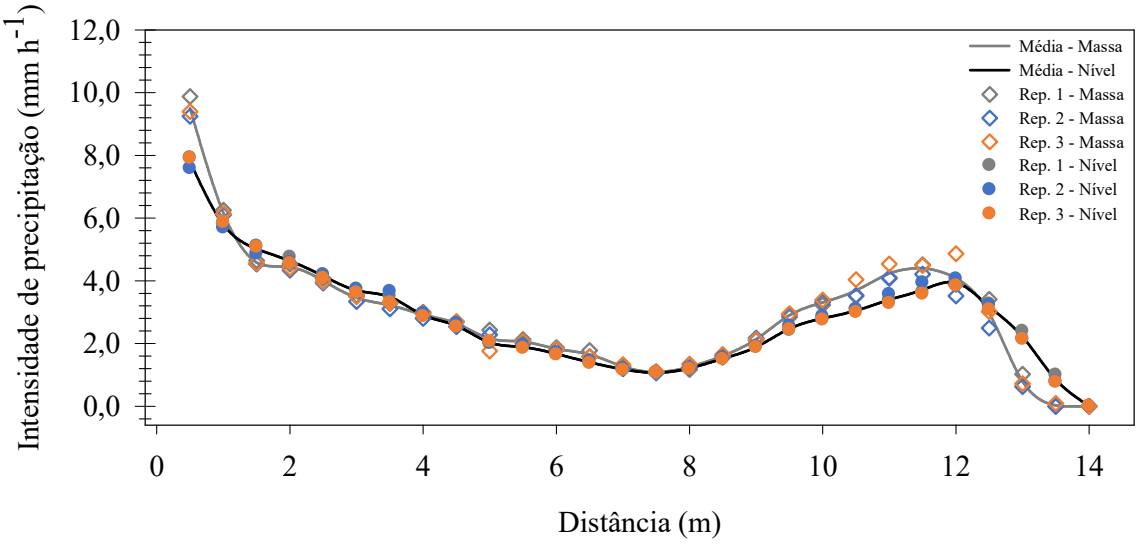


Figura 17 – Curvas de distribuição de água do aspersor com tempo de coleta para incerteza-alvo de 3%

Apesar da incerteza ser menor que 3% para ambos os sistemas, as intensidades medidas pelo automático foram menores a 0,5 m do aspersor e também no terço final da curva, visto que no meio as intensidades foram menores (Figura 17). Esse comportamento foi semelhante aqueles obtidos para os tempos de coleta de 1 h e 13,5 min (Figura 15). As mesmas causas apontadas anteriormente podem ter influenciado nessa diferença, cujas hipóteses foram testadas e seus resultados apresentados a seguir.

4.4 Avaliação de desempenho do sistema automático

4.4.1 Uniformidade de medição nos tubos de coleta

A primeira hipótese para as diferenças nas curvas de distribuição foi de que as medições da mesma quantidade de água eram diferentes para cada tubo de coleta. Por isso, um dos testes consistiu em se fazer as medições de nível em todos os tubos antes e depois de se adicionar 250 mL de água em cada um.

Com essa hipótese se esperava que os tubos não apresentassem as mesmas diferenças de nível, especialmente no terço final da curva, entre 10 e 14 m de distância do aspersor. Entretanto, as diferenças de pressão foram praticamente as mesmas para todos (Figura 18).

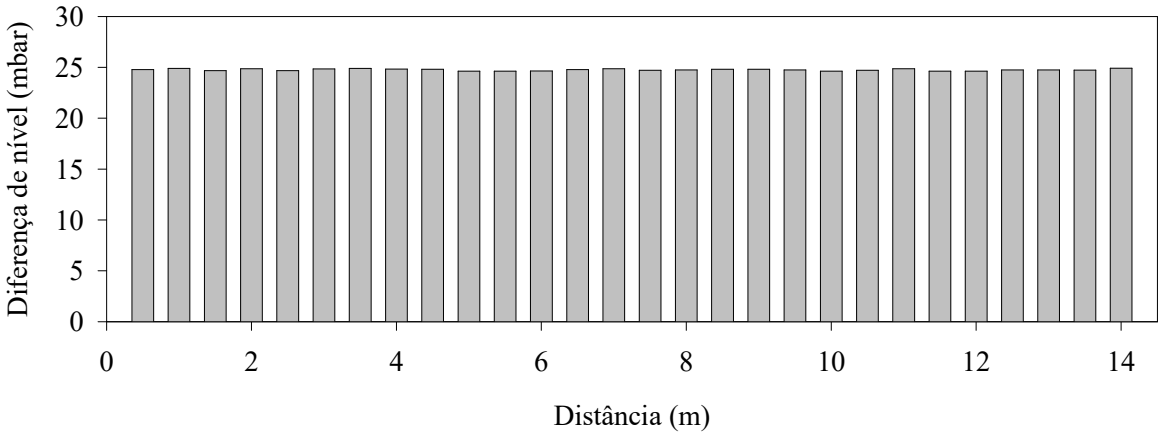


Figura 18 – Uniformidade de medição de nível nos tubos de coleta

O coeficiente de variação (CV) obtido para essas medições de diferença de nível foi de 0,39%, logo a uniformidade (1 – CV) foi de 99,61%, o que pode ser considerada excelente. Dessa forma, descartou-se a hipótese de que os resultados de medição de nível são diferentes em cada tubo de coleta.

4.4.2 Tempo de abertura das válvulas de medição

A segunda provável causa das diferenças entre as curvas de distribuição era o curto tempo de abertura da válvula (12 s), de forma que a pressão poderia não ter sido transmitida do tubo de coleta para o transmissor. A hipótese era de que caso se aumentasse esse tempo a pressão estabilizaria, e a medição estaria correta. Para tal, o tempo de abertura foi aumentado para 30 s, sendo que se manteve os 5 s de abertura da válvula de alívio de pressão.

Ensaios com duração de 1 h foram executados para 12 e 30 s de abertura das válvulas de medição, respectivamente. Obtiveram-se as curvas de distribuição de água para cada um desses tempos (Figura 19). As intensidades medidas para ambos os tempos de abertura podem ser consideradas idênticas, o que rejeita a hipótese de que o tempo de abertura era curto.

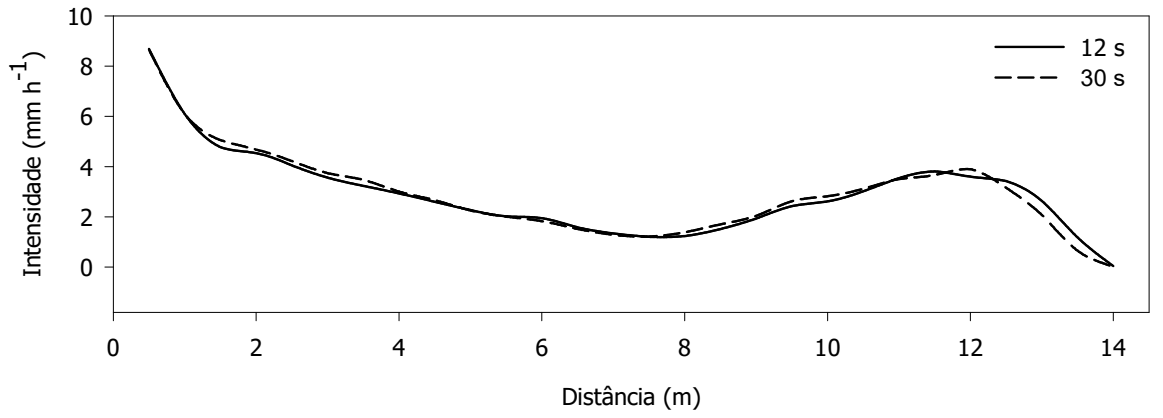


Figura 19 – Teste do tempo de abertura de cada válvula de medição

4.4.3 Estanqueidade do sistema de medição

A última hipótese era de que havia vazamentos em algum componente do sistema de medição, seja nos tubos de coleta ou no conjunto de válvulas de medição. Realizou-se um teste adicionando-se uma quantidade qualquer de água em cada tubo de coleta dentro do raio de alcance do aspersor, medindo-se o nível no tempo inicial e após 1 h. Para haver algum vazamento, após 1 h o nível deveria ser menor que aquele medido no início do teste.

Na Figura 20 são apresentados os resultados desse teste, na qual se percebe que o nível em cada tubo permaneceu a mesma entre início e 1 h depois. Portanto, considerou-se que não houveram vazamentos nos componentes do sistema de medição.

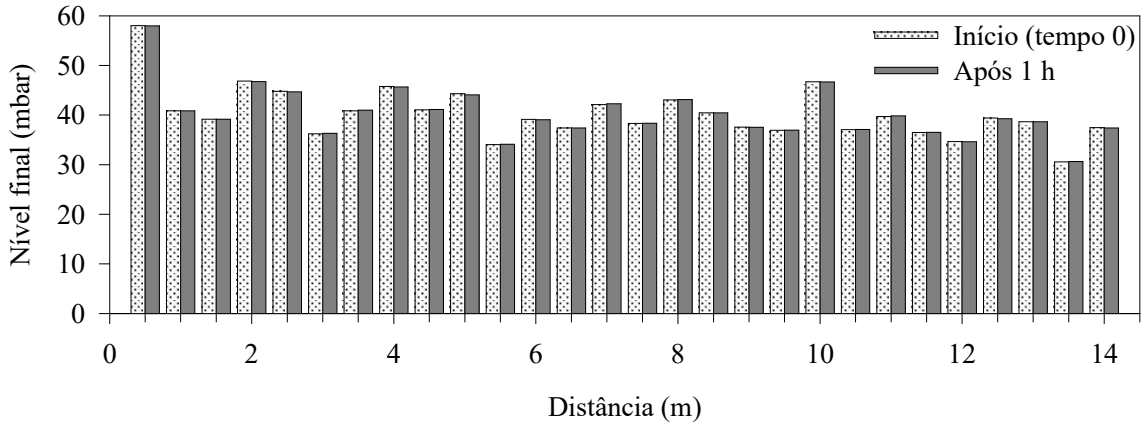


Figura 20 - Estanqueidade no sistema de coleta, com medições de nível no início e após 1 h de teste

As três hipóteses acerca das diferenças nas curvas de intensidade (uniformidade de medição, tempo de abertura de válvulas e estanqueidade) foram descartadas, por meio dos testes realizados.

4.4.4 Tempo total de ensaio

O sistema automático possibilitou redução do tempo total de ensaio, em relação ao sistema convencional, para ensaios de 1 h (Tabela 2). Da mesma forma, o sistema automático foi mais rápido na realização dos ensaios para atender ao critério de 30 voltas do aspersor. No ensaio convencional deve-se recolher os coletores da área de ensaio e os transportar até o sistema de medição, secando-se a parte externa dos mesmos para as medições. Já para o sistema automático não é o técnico quem realiza as medições, apenas aciona o sistema, permitindo que possa alocar seu tempo em outras atividades. Portanto, além do sistema realizar os ensaios com tempo de coleta fixos (1 h, ou 30 voltas do aspersor) em menor tempo que o sistema convencional, também não necessitou de acompanhamento integral de um técnico.

Tabela 2 – Tempos totais de ensaio nos sistemas convencional e automático de acordo com critérios das normas

Sistema	ABNT NBR ISO 7749-1 (2000)	ISO 15866-3 (2012)	
	1 h de coleta	30 voltas	U=3%
	Tempo de ensaio (minutos) [1]		
Convencional	97,7 [a]	49,2 [a]	44,2 [b]
Automático	93,5 [b]	47,1 [b]	314,8 [a]

[1] Médias seguidas de mesma letra minúscula, na coluna, não apresentaram diferença significativa (5%) pelo Teste *t* para amostras independentes.

Para os ensaios nos quais a incerteza expandida deve ser menor que 3% o sistema convencional foi mais rápido que o automático, requerendo menor tempo (Tabela 2). Além disso, o técnico também só necessitou acionar o sistema para o início dos ensaios, e retornar após o término do mesmo para obter os resultados. Assim, apesar de requerer cerca de 5 h e 15 min para a realização dos ensaios, o sistema funcionou automaticamente para execução de suas tarefas.

Se o objetivo for realizar o ensaio atendendo-se apenas à incerteza-alvo requerida, pode-se utilizar tubos de coleta de menor diâmetro. Assim, os ensaios se tornarão mais rápidos em relação ao tempo atual requerido com o tubo de coleta de 35,2 mm utilizado.

Os ensaios com medição de massa parecem ser mais viáveis do ponto de vista de tempo de ensaio, dada a menor incerteza. Assim, a automação com células de carga ainda é válida, podendo-se estudar algumas estratégias em trabalhos futuros.

5 CONCLUSÕES

O sistema de medição automático possibilitou a obtenção de curvas de distribuição semelhantes ao sistema convencional, tanto para tempos de coleta de 1 h, quanto para se atender critérios de incerteza de medição e tempo de rotação do aspersor.

O sistema desenvolvido realizou os ensaios com tempo de coleta de 1 h e para 30 voltas do aspersor em menor tempo que o sistema convencional. Contudo, requereu maior tempo de ensaio para atender ao critério de 3% de incerteza expandida.

Menores valores de incerteza na medição de intensidade foram obtidos para menores diâmetros de tubo de coleta, logo deve-se utilizar o menor possível, desde que o volume do tubo de coleta comporte a quantidade de água correspondente a pelo menos 30 voltas do aspersor.

A análise da incerteza de medição permitiu dimensionar o diâmetro dos tubos de coleta e o tempo de coleta, a fim de se atingir a incerteza-alvo.

Menores intensidades de precipitação apresentaram maior incerteza expandida relativa em comparação às maiores intensidades.

Para a mesma intensidade de precipitação, reduziu-se a incerteza expandida com o aumento do tempo de coleta.

A incerteza de calibração do transmissor de pressão foi a fonte que mais contribuiu para a incerteza da intensidade no sistema desenvolvido.

O ensaio convencional, com medição de massa e para o mesmo tempo de coleta, apresentou menor incerteza na intensidade em relação ao sistema automático.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apontaram que as medições de massa possuem uma menor incerteza do que as medições de nível. Portanto, indica-se para trabalhos futuros a busca por alguma estratégia de utilização de células de carga para a medição, especialmente para evitar a superestimativa da quantidade de água coletada devido ao molhamento da parte externa do coletor. Uma única célula de carga para medição de todos os tubos reunidos num conjunto pode ser estudada, todavia parece ser um tanto desafiador. Uma célula para cada coletor seria o ideal, como também seria um transmissor de pressão para cada tubo de coleta, porém apresenta altos custos de aquisição e de calibração periódica.

Deve-se ter cuidado para se realizar um molhamento suficiente dos coletores/tubos de coleta antes do início da coleta. Isso minimiza o efeito da água aderida às paredes desses componentes.

O princípio de medição baseado em determinações de variação de nível permite atender as normas para ensaios de aspersores, desde que tomados os devidos cuidados no dimensionamento dos tubo-coletores e na definição do tempo mínimo de ensaio.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 7749-1. **Equipamentos de irrigação agrícola - Aspersores rotativos - Parte 1: Requisitos para projetos e operação**. São Paulo, 2000. 10p.

CACUCI, D.G. **Sensivity and uncertainty analysis**. Washington, D.C.: Chapman & Hall/CRC, 2003. v.1. 285p.

COLEMAN, H.W.; STEELE, W.G. **Experimentation, validation, and uncertainty analysis for engineers**. 3rd ed. New Jersey: John Wiley, 2009. 334p.

DOQ-CGCRE-017. **Orientação para a realização de calibração de medidores analógicos de pressão**. Duque de Caxias, RJ: Coordenação Geral de Acreditação, 2013. 13p.

FISCHER, G.R.; WALLENDER, W.W. Collector size and test duration effects on sprinkler water distribution measurement. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 31, n. 2, p. 538-542, 1988.

HERMSMEIER, L.F. Sprinkler water distribution testing in a desert environment. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, n. 15, v. 3, p.436-439, 1972.

HENDAWI, M.; MOLLE, B.; FOLTON, C.; GRANIER, J. Measurement accuracy analysis of sprinkler irrigation rainfall in relation to collector shape. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 131, n. 5, p. 477-483. 2005.

HODGES, K.J.; EVANS, R.G.; JAMES, L.G.; KROEGER, M.W.; LEY, T.W. Automated facility for sprinkler performance testing. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 6, n. 4, p.437-440, 1990.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição**: Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012a. 141p.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012b. 94p.

ISO 15886-3. **Agricultural irrigation equipment - Sprinklers - Part 3: Characterization of distribution and test methods**. Geneva, 2012. 18p.

ISO 5725-4. **Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 4**: Basic methods for the determination of the trueness of a standard measurement method. Geneva, 1994. 23p.

ISO/TS 21749. **Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation**. Geneva, 2010. 38p.

ISO/IEC 17043. **Conformity assessment - General requirements for proficiency testing**. Geneva, 2010. 39p.

ISO 13528. **Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison**. Geneva, 2015. 90p.

KARMELI, D. Estimating sprinkler distribution patterns using linear regression. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, n. 21, p.682-686, 1978.

MANTOVANI, E.C.M.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L.F. **Irrigação**: princípios e métodos. 3 ed. Viçosa: Ed. UFV, 2009. 355p.

MENDITTO, A.; PATRIARCA, M.; MAGNUSSON, B. Understanding the meaning of accuracy, trueness and precision. **Accreditation and Quality Assurance**, Heidelberg, v.12, 2007. p. 45-47.

MERRIAM, J.L.; KELLER, J. **Farm Irrigation System Evaluation**: A Guide for Management. Logan: Department of Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University, 1978.

MERRIAM, J.L.; SHEARER, M.N.; BURT, C.M. Evaluating irrigation systems and practices. In: JENSEN, M.E. (Ed.). **Design and Operation of Farm Irrigation Systems**. St. Joseph: ASAE. 1980. p.721-760.

NORDTEST TECH REPORT 537. **Handbook for calculation of measurement uncertainty in environmental laboratories**.3rd ed. Oslo: Nordic Innovation, 2012. 52p.

ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY. AMC TECHNICAL BRIEF No. 13. **Terminology – the key to understanding analytical science**. Part 1: Accuracy, precision and uncertainty. London, 2003. 2p.

SEGINER, I.; KANTZ, D.; NIR, D.; von BERNUTH, R.D. Indoor measurement of single-radius sprinkler patterns. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 35, n. 2, p.523-533, 1992.

TARJUELO, J.M.; MONTERO, J.; VALIENTE, M.; HONRUBIA, F.T.; ORTIZ, J. Irrigation uniformity with medium size sprinklers Part I: Characterization of water distribution in no-wind conditions. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 42, n. 3, p. 665-675, 1999.

VORIES, E.D.; von BEMUTH, R.D. Single nozzle sprinkler performance in wind. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, n. 29, v. 5, p.1325-1330, 1986.

ZANON, E.R.; TESTEZLAF, R.; MATSURA, E.J. A data acquisition system for sprinkler uniformity testing. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 16, v. 2, p.123-127, 2000.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Fontes de incerteza para ensaios convencionais

Massa de água coletada

Fonte de incerteza	Distribuição probabilidade	Incerteza	Divisor	Coef. de sensibilidade	Contribuição para a incerteza padrão	Graus de liberdade
Calibração da balança	Retangular	0,10	2	1	0,050	∞
Resolução	Triangular	0,1	2√6	1	0,020	∞
Repetitividade (n=10)	Normal	0,010	√n	1	0,0032	9
Incerteza padrão combinada (g)	t-Student	--	1,96	--	0,054	10578

Temperatura da água

Fonte de incerteza	Distribuição probabilidade	Incerteza	Divisor	Coef. de sensibilidade	Contribuição para a incerteza padrão	Graus de liberdade
Calibração do termômetro	Retangular	0,83	2	1	0,42	∞
Resolução	Triangular	0,5	2√3	1	0,14	∞
Incerteza experimental da média (n=3)	Normal	0,10	√n	1	0,058	2
Incerteza padrão combinada (°C)	t-Student	--	1,96	--	0,44	1082

Diâmetro dos coletores

Fonte de incerteza	Distribuição probabilidade	Incerteza	Divisor	Coef. de sensibilidade	Contribuição para a incerteza padrão	Graus de liberdade
Diâmetro externo						
Incerteza de calibração da trena	Retangular	0,50	2	1	0,25	∞
Incerteza experimental da média (n = 10)	Normal	0,13	1	1	0,13	9
Resolução da trena	Retangular	0,5	2√3	1	0,14	∞
Espessura da parede						
Incerteza de calibração do paquímetro digital	Retangular	0,030	2	1	0,015	∞
Incerteza experimental da média (n = 10)	Normal	0,024	1	1	0,024	9
Resolução do paquímetro digital	Triangular	0,01	2√6	1	0,0020	∞
Incerteza padrão combinada (mm)	t-Student	--	1,97	--	0,32	313

Tempo de ensaio

Fonte de incerteza	Distribuição probabilidade	Incerteza	Divisor	Coef. de sensibilidade	Contribuição para a incerteza padrão	Graus de liberdade
Calibração do cronômetro	Retangular	0,035	2	1	0,018	∞
Resolução do cronômetro	Retangular	0,01	2√3	1	0,0029	∞
Incerteza padrão combinada (s)	t-Student	--	1,96	--	0,018	1054

APÊNDICE B – Fontes de incerteza para ensaios no sistema automático

Diâmetro dos tubos de coleta

Fonte de incerteza	Distribuição probabilidade	Incerteza	Divisor	Coef. de sensibilidade	Contribuição para a incerteza padrão	Graus de liberdade
Diâmetro externo						
Incerteza de calibração do paquímetro digital	Retangular	0,030	2	1	0,015	∞
Incerteza experimental da média (n = 10)	Normal	0,024	1	1	0,024	9
Resolução do paquímetro digital	Triangular	0,01	2√6	1	0,002	∞
Espessura da parede						
Incerteza de calibração do paquímetro digital	Retangular	0,030	2	1	0,015	∞
Incerteza experimental da média (n = 10)	Normal	0,024	1	1	0,024	9
Resolução do paquímetro digital	Triangular	0,01	2√6	1	0,002	∞
Incerteza padrão combinada (mm)	t-Student	--	2,03	--	0,040	35

Nível de água nos tubos de coleta

Fonte de incerteza	Distribuição probabilidade	Incerteza	Divisor	Coef. de sensibilidade	Contribuição para a incerteza padrão	Graus de liberdade
Calibração do transmissor de pressão	Retangular	0,0812	2	1	0,041	∞
Incerteza experimental da média (n=3)	Normal	0,002	√n	1	0,0012	2
Resolução	Triangular	0,001	2√6	1	0,00020	∞
Incerteza padrão combinada (mA)	t-Student	--	1,96	--	0,041	1001

Temperatura da água

Fonte de incerteza	Distribuição probabilidade	Incerteza	Divisor	Coef. de sensibilidade	Contribuição para a incerteza padrão	Graus de liberdade
Calibração do transmissor de temperatura	Retangular	0,021	2	1	0,011	∞
Incerteza experimental da média (n=3)	Normal	0,0050	√n	1	0,0029	2
Resolução	Triangular	0,01	2√6	1	0,0020	∞
Incerteza padrão combinada (mA)	t-Student	--	1,97	--	0,011	321

*As incertezas de medição do diâmetro dos coletores e do tempo foram as mesmas utilizadas no sistema convencional, conforme APÊNDICE A.

APÊNDICE C – Equações para cálculo da incerteza de medição de intensidade no sistema convencional

1) Equação geral de intensidade (mm h^{-1}) por medição de massa:

$$i = \frac{1{,}44 \times 10^{10} \left(m_f - m_i\right)}{\pi\, d^2\, t\, (-0{,}00361\, T^2 - 0{,}06383\, T + 1000{,}4342)}$$

2) Coeficientes de sensibilidade da variáveis de entrada: $c_j = \frac{\partial i}{\partial x_j}$

a. Massa final (água + coletor), m_f:

$$c_{mf} = \frac{1{,}44 \times 10^{10}}{\pi\, d^2\, t\, (-0{,}00361\, T^2 - 0{,}06383\, T + 1000{,}4342)}$$

b. Massa inicial (massa do coletor), m_i:

$$c_{mi} = -\frac{1{,}44 \times 10^{10}}{\pi\, d^2\, t\, (-0{,}00361\, T^2 - 0{,}06383\, T + 1000{,}4342)}$$

c. Diâmetro do coletor, d:

$$c_d = -\frac{2{,}88 \times 10^{10} \left(m_f - m_i\right)}{\pi\, d^3\, t\, (-0{,}00361\, T^2 - 0{,}06383\, T + 1000{,}4342)}$$

d. Tempo de coleta, t:

$$c_t = -\frac{1{,}44 \times 10^{10} \left(m_f - m_i\right)}{\pi\, d^2\, t^2\, (-0{,}00361\, T^2 - 0{,}06383\, T + 1000{,}4342)}$$

e. Temperatura da água, T:

$$c_T = -\frac{1{,}44 \times 10^{10} \left(m_f - m_i\right)(-0{,}00722\, T - 0{,}06383)}{\pi\, d^2\, t\, (-0{,}00361\, T^2 - 0{,}06383\, T + 1000{,}4342)^2}$$

3) Termo de correlação entre os conjuntos de dados de massa final e tempo:

$$2 \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial y}{\partial x_j} u(x_i)\, u(x_j)\, r(x_i, x_j) = 2\, c_{mf}\, c_t\, u(m_f)\, u(t)\, r(m_f, t)$$

em que,

m_f – massa final (água + coletor), g
m_i – massa inicial (coletor), g
d – diâmetro do coletor, mm
t – tempo de coleta, s
T – temperatura da água, °C.

1) Equação geral de intensidade por medição de nível:

$$i = \frac{3{,}6 \times 10^8 \; d_{TC}^2}{d_C^2 \; t \; g}\left[\frac{\alpha \; i_{pf} + \beta}{-0{,}00361\left(\varphi \; i_{Tf} + \omega\right)^2 - 0{,}06383\left(\varphi \; i_{Tf} + \omega\right) + 1000{,}4342} - \frac{\alpha \; i_{pi} + \beta}{-0{,}00361\,(\varphi \; i_{Ti} + \omega)^2 - 0{,}06383\,(\varphi \; i_{Ti} + \omega) + 1000{,}4342}\right]$$

2) Coeficientes de sensibilidade das variáveis de entrada: $c_j = \frac{\partial i}{\partial x_j}$

a. Diâmetro do tubo de coleta, d_{TC}:

$$c_{d_{TC}} = \frac{7{,}2 \times 10^8 d_{TC}}{d_C^2 \; t \; g}\left[\frac{\alpha \; i_{pf} + \beta}{-0{,}00361\left(\varphi \; i_{Tf} + \omega\right)^2 - 0{,}06383\left(\varphi \; i_{Tf} + \omega\right) + 1000{,}4342} - \frac{\alpha \; i_{pi} + \beta}{-0{,}00361\,(\varphi \; i_{Ti} + \omega)^2 - 0{,}06383\,(\varphi \; i_{Ti} + \omega) + 1000{,}4342}\right]$$

b. Corrente elétrica para nível final, i_{pf}:

$$c_{i_{pf}} = \frac{3{,}6 \times 10^8 \; d_{TC}^2}{d_C^2 \; t \; g\left[-0{,}00361\left(\varphi \; i_{Tf} + \omega\right)^2 - 0{,}06383\left(\varphi \; i_{Tf} + \omega\right) + 1000{,}4342\right]}$$

c. Corrente elétrica para nível inicial, i_{pi}:

$$c_{i_{pi}} = -\frac{3{,}6 \times 10^8 \; d_{TC}^2}{d_C^2 \; t \; g[-0{,}00361\,(\varphi \; i_{Ti} + \omega)^2 - 0{,}06383\,(\varphi \; i_{Ti} + \omega) + 1000{,}4342]}$$

d. Corrente elétrica para temperatura final, i_{Tf}:

$$c_{i_{Tf}} = -\frac{3{,}6 \times 10^8 \, d_{TC}^2 \, (\alpha \, i_{pf} + \beta)[-0{,}00722(\varphi \, i_{Tf} + \omega)\varphi - 0{,}06383\varphi]}{d_C^2 \;\; t \; g \; \left[-0{,}00361 \, (\varphi \, i_{Tf} + \omega)^2 - 0{,}06383 \, (\varphi \, i_{Tf} + \omega) + 1000{,}4342\right]^2}$$

e. Corrente elétrica para temperatura inicial, i_{Ti}:

$$c_{i_{Ti}} = \frac{3{,}6 \times 10^8 \, d_{TC}^2 \, (\alpha \, i_{pi} + \beta)[-0{,}00722(\varphi \, i_{Ti} + \omega)\varphi - 0{,}06383\varphi]}{d_C^2 \;\; t \; g \; [-0{,}00361 \, (\varphi \, i_{Ti} + \omega)^2 - 0{,}06383 \, (\varphi \, i_{Ti} + \omega) + 1000{,}4342]^2}$$

f. Tempo, t:

$$c_t = -\frac{3{,}6 \times 10^8 \, d_{TC}^2}{d_C^2 \;\; t^2 \; g}\left[\frac{\alpha \, i_{pf} + \beta}{-0{,}00361 \, (\varphi \, i_{Tf} + \omega)^2 - 0{,}06383 \, (\varphi \, i_{Tf} + \omega) + 1000{,}4342} - \frac{\alpha \, i_{pi} + \beta}{-0{,}00361 \, (\varphi \, i_{Ti} + \omega)^2 - 0{,}06383 \, (\varphi \, i_{Ti} + \omega) + 1000{,}4342}\right]$$

3) Termos de correlação:

a. Entre os conjuntos de dados de corrente elétrica para nível final e tempo

$$2\frac{\partial y}{\partial x_i}\frac{\partial y}{\partial x_j}u(x_i) \, u(x_j) \, r(x_i, x_j) = 2 \, c_{i_{pf}} \, c_T \, u(i_{pf}) \, u(t) \, r(i_{pf}, t)$$

b. Entre os conjuntos de dados de corrente elétrica para nível final e diâmetro do tubo de coleta

$$2\frac{\partial y}{\partial x_i}\frac{\partial y}{\partial x_j}u(x_i) \, u(x_j) \, r(x_i, x_j) = 2 \, c_{i_{pf}} \, c_{d_{TC}} \, u(i_{pf}) \, u(d_{TC}) \, r(i_{pf}, d_{TC})$$

em que,

d_{TC} – diâmetro do tubo de coleta, mm

d_C – diâmetro do coletor, mm

t – tempo de coleta, s

g – aceleração da gravidade, 9,81 m s^{-2}

i_{pi} – corrente elétrica correspondente ao nível inicial, mA

i_{pf} – corrente elétrica correspondente ao nível final, mA

i_{Ti} – corrente elétrica correspondente à temperatura inicial da água, mA

i_{Tf} – corrente elétrica correspondente à temperatura final da água, mA

α, β, φ e ω – coeficientes de ajuste das equações dos transmissores

$r(x_i, x_j)$ – coeficiente de correlação de Pearson, entre os conjuntos de dados das variáveis x_i e x_j.