

PESQUISA DE GRADUAÇÃO: CALIBRAÇÃO DOS ERROS DE MEDIÇÃO DE PLUVIÔMETRO AUTOMÁTICO DE BÁSCULAS PARA CHUVAS INTENSAS NO BRASIL

Alexandre Gurfinkel Reda ¹; Daniel Massashi Uehara ²; André Luiz de Lima Reda ³

Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Escola de Engenharia
Praça Mauá 1

CEP: 09580-900, São Caetano do Sul, SP

¹ alexandre.greda@ceun.maua.br, ² danuehara@maua.br, ³ andrereda@maua.br

Resumo: O artigo apresenta resultados da pesquisa de dois alunos de graduação. No Brasil, usam-se os dados de diferentes tipos de pluviômetros em observações em tempo real, para a proteção da população e de infra-estrutura, bem como em planejamento e projeto. Muitos adotam o modelo do tipo basculante, amplamente aceito para monitoramento automático e telemétrico. A literatura enfatiza a importância da confiabilidade na precisão de pluviômetros, particularmente na medição de chuva intensa – o que se pode verificar em ambiente controlado, de laboratório. Problemas relacionados ao modelo do aparelho; inspeções regulares; limpeza; efeitos hidrodinâmicos durante períodos de enchimento e esvaziamento dos basculantes e duração de cada período, levaram pesquisadores a identificar desvios em função da intensidade pluvial e recomendar a correta interpretação das medições, baseada em aferição desses desvios em função da intensidade, especificamente para cada aparelho, além de melhoras simples nos modelos. Uma simples relação de calibragem do erro foi obtida por meio de experimentos volumétricos de laboratório, ainda preliminares, envolvendo um protótipo de pluviômetro automático cedido pelo fabricante e realizados na Escola de Engenharia Mauá. Isto permite ao final maior confiabilidade nos dados, pelo usuário – o que enfatiza a necessidade de processos similares para todos os tipos de aparelhos de medição. Os experimentos constituíram trabalho de iniciação científica do primeiro autor (estudante de Engenharia) e estágio do segundo (em Gestão Ambiental), orientados pelo terceiro e inaugurando linha de pesquisa para futuros acadêmicos – podendo atingir resultados mais detalhados a serem aplicados comercialmente.

Palavras-chave: *Pluviometria com basculantes, Medição de chuva, Aferição de pluviômetros, Desvios de medição, Correção de erros em metrologia.*

1. INTRODUÇÃO

Pluviômetros automáticos do tipo basculante (ou de básculas) operam baseados no volume vertido em cada basculamento. Toda vez que certo volume de água é coletado por uma das duas básculas (como ilustra a Figura 1), esta cede para um lado devido ao peso da água, vertendo-a e dando espaço para que a outra continue a coletar a água. Esse processo se mantém enquanto a chuva persiste. Cada movimento de báscula é considerado, por um sensor eletromagnético, como sendo uma fração de 1mm de altura de chuva e, então, é salvo na memória de um data logger acoplado do conjunto sensor hidroeletrômnico. As frações mais comuns disponíveis no mercado são de 0,1; 0,2 e 0,254mm (esta última, igual a 0,1 polegada).

Publicações de pesquisas anteriores têm demonstrado que muitos pluviômetros desse tipo padecem de erro. Além da incerteza geralmente presente em medidas físicas, há também um erro tendencioso, em geral determinístico, que deve ser levado em consideração e corrigido depois da identificação dos seus padrões. Registros pluviométricos com tal problema certamente irão afetar decisões de Engenharia dependentes deles (por exemplo, uma previsão de enchente fluvial, a interdição temporária de uma pista de pouso, o cancelamento da concretagem de uma laje ou do asfaltamento de uma pista, etc.); logo, é necessário algum ajuste antes se serem considerados como base para tomada de decisão.

A pesquisa do padrão de erro, no caso de um aparelho de medição específico nunca testado antes, foi considerada, aqui, tarefa interessante e construtiva para o aprendizado de dois alunos – um do tronco de Engenharia Mecânica (primeiro autor, segundanista) e outro na área de Gestão Ambiental (terceiro autor, formando realizando estágio) – o que foi confirmado pela motivação e aprendizado observados durante a pesquisa.

Há aproximadamente três décadas, Calder e Kidd (1978) concluíram que pluviômetros automáticos devem ser verificados e calibrados antes de entrarem em operação. Encontraram regras simples de calibragem de erro para alguns aparelhos baseados no fato de que certa quantidade de água é perdida no instante de tempo em que uma balança dá lugar à outra, para que comece a encher. Nesse caso, a hipótese básica seria que, quanto maior for a intensidade da chuva, maior seria a perda de água – logo, mais considerável seria a subestimativa da quantidade de água precipitada. Foram então propostas por aqueles autores regras de calibragem lineares para duas variações de um modelo básico de pluviômetro. Atualmente, tem-se conhecimento de que outras razões podem causar diferentes tipos de erros, sejam negativos ou positivos, como segue.

Três modelos de pluviômetros desse tipo foram verificados por Marsalek (1981), que desenvolveu um procedimento de calibragem de laboratório, tanto ajustando o volume necessário para a balança encher, quanto corrigindo as informações de saída do pluviômetro. Esses aparelhos mostraram erros de subestimativa de até 10% em geral, para as intensidades medidas. Segundo aqueles autores, a razão para ocorrência de tais erros foi, novamente, a perda de água durante a transição entre dois basculantes. De acordo com tal conclusão, o sincronismo do movimento dos basculantes assume um papel chave na busca pelo método de calibragem proposto por aqueles autores – que incluiu outros fatores físicos, tais como umedecimento da balança e influência da tensão superficial entre líquido e superfícies sólidas.

Há dez anos, experiências foram conjuntamente realizadas pelo Serviço Genovez de Hidrografia e Maremetria e pelo Instituto de Hidráulica da Universidade de Gênova (LOMBARDO e STAGI, 1998), de uma maneira abrangente, considerando dez pluviômetros de diferentes origens, modelos e materiais constituintes. Diferentes conclusões foram obtidas para cada aparelho, com as intensidades de chuva medidas variando de valores muito baixos até aproximadamente 300mm/h. Como resultado, os valores corrigidos das intensidades passaram dos 500mm/h. Os experimentos geraram as seguintes conclusões:

a) a maioria dos aparelhos investigados (todos exceto dois) tenderam a subestimar a quantidade de chuva mais e mais, à medida em que a intensidade medida aumentava até 300mm/h; um deles tendeu a superestimar levemente a intensidade até 20mm/h, depois subestimá-la até 150mm/h e, acima dessa intensidade, novamente superestimar a chuva, alcançando um erro de +15% na intensidade medida de aproximadamente 350mm/h; outros aparelhos sofreram erros de medição oscilando entre -3% e +4% de uma forma aparentemente aleatória.

b) a heterogeneidade entre os aparelhos é grande desde que tenham diferenças consideráveis em sua regulação e concepção mecânica;

c) a verificação de equipamentos no campo poderia eventualmente, em alguns casos, mostrar incompatibilidade entre a quantidade de chuva real e a medida por desregulação paulatina

com o tempo – recomendando então, para os piores casos, programas regulares de manutenção do equipamento em campo;

d) dentre os fabricantes dos aparelhos considerados, nenhum havia produzido curvas de calibragem completas – apenas valores típicos, percentuais, de erros para algumas intensidades fixadas, foram eventualmente fornecidos para permitir correções, para uma ou duas diferentes faixas de intensidade medida;

e) no caso de eventos extremos, a ausência de uma curva de calibragem impede a correta avaliação de intensidades e alturas pluviométricas totais.

Após suas conclusões, Lombardo and Stagi (1998) apresentaram as seguintes sugestões principais:

a) que cada aparelho a ser lançado no mercado pelo fabricante traga consigo uma curva de calibragem dinâmica;

b) que qualquer pluviômetro automático seja provido de software, acoplado ao seu sistema de aquisição, pronto para corrigir automaticamente as leituras de saída baseadas numa curva de calibragem, de modo dinâmico;

c) que certos aparelhos sofram uma revisão em seu projeto mecânico, tornando as medições mais confiáveis.

Em Londrina (Paraná, Brasil), foi conduzido um estudo (SENTELHAS e CARAMORI, 2002) com o intuito de avaliar erros entre pluviômetros comuns (volumétricos) e automáticos (basculantes). Durante cinco anos, alturas pluviométricas diárias medidas puderam ser analisadas e as principais conclusões foram que: na maioria das chuvas – 81,7% delas para um aparelho com balsa de 0,1mm e 65,6% para um de 0,2mm – o volume total coletado pela balsa era menor que o coletado pelos pluviômetros tradicionais, totalizadores. As diferenças entre volumes de chuva registrados e reais foram de aproximadamente 14% para o aparelho com resolução de 0,1mm, enquanto para a balsa de 0,2mm resultaram diferenças de aproximadamente 2%, apenas. Dessa maneira, a tentativa de obter medidas mais precisas com balsas menores pode, pelo contrário, torná-las menos confiáveis.

A principal de todas as conclusões acima é que todo aparelho no mercado deve estar acompanhado de uma curva de calibragem que seja dinamicamente incluída em seu software de aquisição, acoplado ao conjunto de hardware. Além disto, tais equipamentos de campo devem receber manutenção e calibragem regulares, para que se mantenha a precisão.

Os dois últimos autores, na tentativa de criar condições para contribuir para a solução desses problemas, construíram uma coluna de teste de pluviômetros automáticos no Laboratório de Hidráulica e Hidrologia do Instituto Mauá de Tecnologia. Dois aparelhos foram calibrados sob a supervisão da Coordenação de Engenharia Civil da Escola de Engenharia, com a colaboração do primeiro autor. Mais recentemente, os dois primeiros autores trabalharam, então, em novos testes, preliminares, com um terceiro modelo de pluviômetro de balsas em fase de desenvolvimento – o abordado neste artigo.

A seção seguinte mostra a curva de calibragem da coluna de testes e a correlação de intensidade x erro preliminar para o aparelho analisado. A seção de Conclusões, finalmente, resume as conclusões práticas apresentadas pelos presentes experimentos.

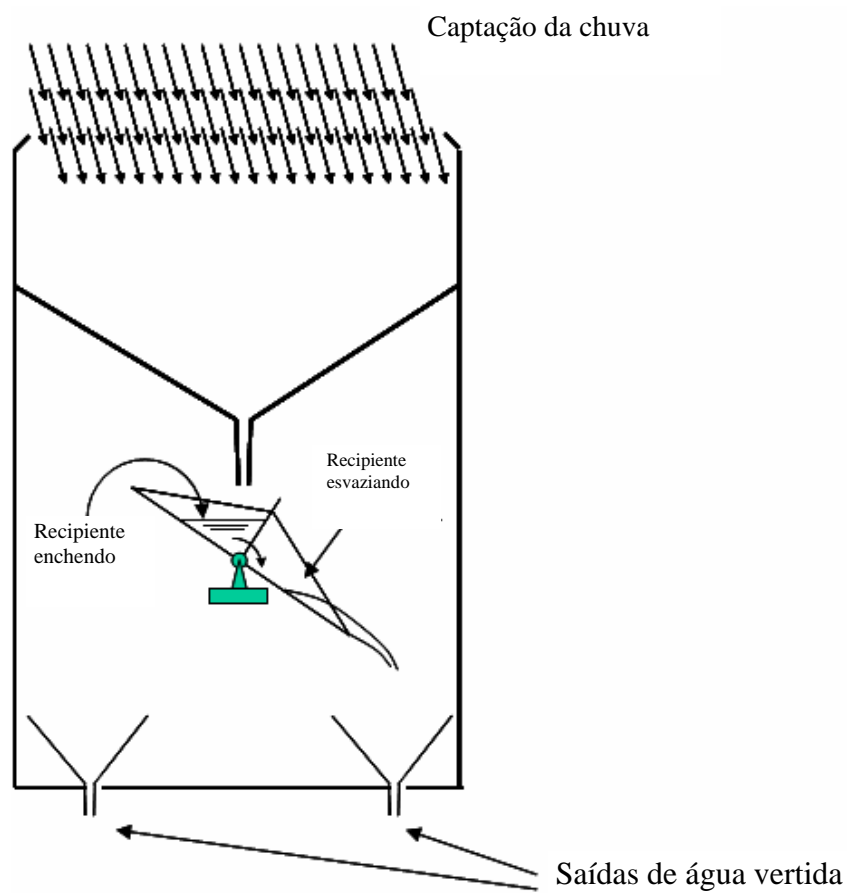


Figura 1 – Medidor automático de chuva do tipo basculante: esquema do processo de medição

2. METODOLOGIA E EQUIPAMENTO

A coluna de testes é vertical e construída a partir de um tubo de PVC de seção circular, com as seguintes características e equipamentos auxiliares:

- diâmetro nominal de 100mm;
- altura interna de 1,50m, no total;
- uma tampa horizontal no fundo do tubo com dois furos, para gerar um fluxo de água constante na situação em que permanece uma coluna d'água constante acima do fundo.
- um tripé de metal capaz de suportar a coluna a aproximadamente 0,5m acima da uma pia de bancada cujo interior tem espaço para cada pluviômetro sob análise;
- seis orifícios na parede lateral da coluna, cada um ligado a uma mangueira de descarga, e todos capazes de conduzir a água derramada à pia – para que cada furo possa ser escolhido como alternativa para derramar o excesso de água e garantir um nível constante de água dentro da coluna – garantindo desse modo a simulação de intensidades de chuva constantes a escolher. As medidas das alturas dos orifícios da coluna são de: 96cm, 49,6cm, 25,4cm, 13,7cm, 6,9cm e 4,2cm;

- fornecimento de água pelo condutor principal a uma taxa constante, para que seja garantido um transbordo contínuo e, conseqüentemente, uma coluna de água constante – à medida em que somente um dos orifícios laterais de extravasamento está operando;
- um recipiente de vidro cilíndrico – proveta – graduado em mm de chuva real para medir a quantidade de chuva para um medidor totalizador tradicional, não automático, o pluviômetro volumétrico Apager MI-034, que possui uma área horizontal de recepção de 350cm^2 . Após correção proporcional baseada na relação entre as áreas de recepção do Apager e do aparelho testado, foram determinadas adequadamente as quantidades de água coletadas pelos resultados finais.



Figura 2 – Primeiro autor ajustando a coluna de calibragem para simular uma intensidade pluviométrica específica.

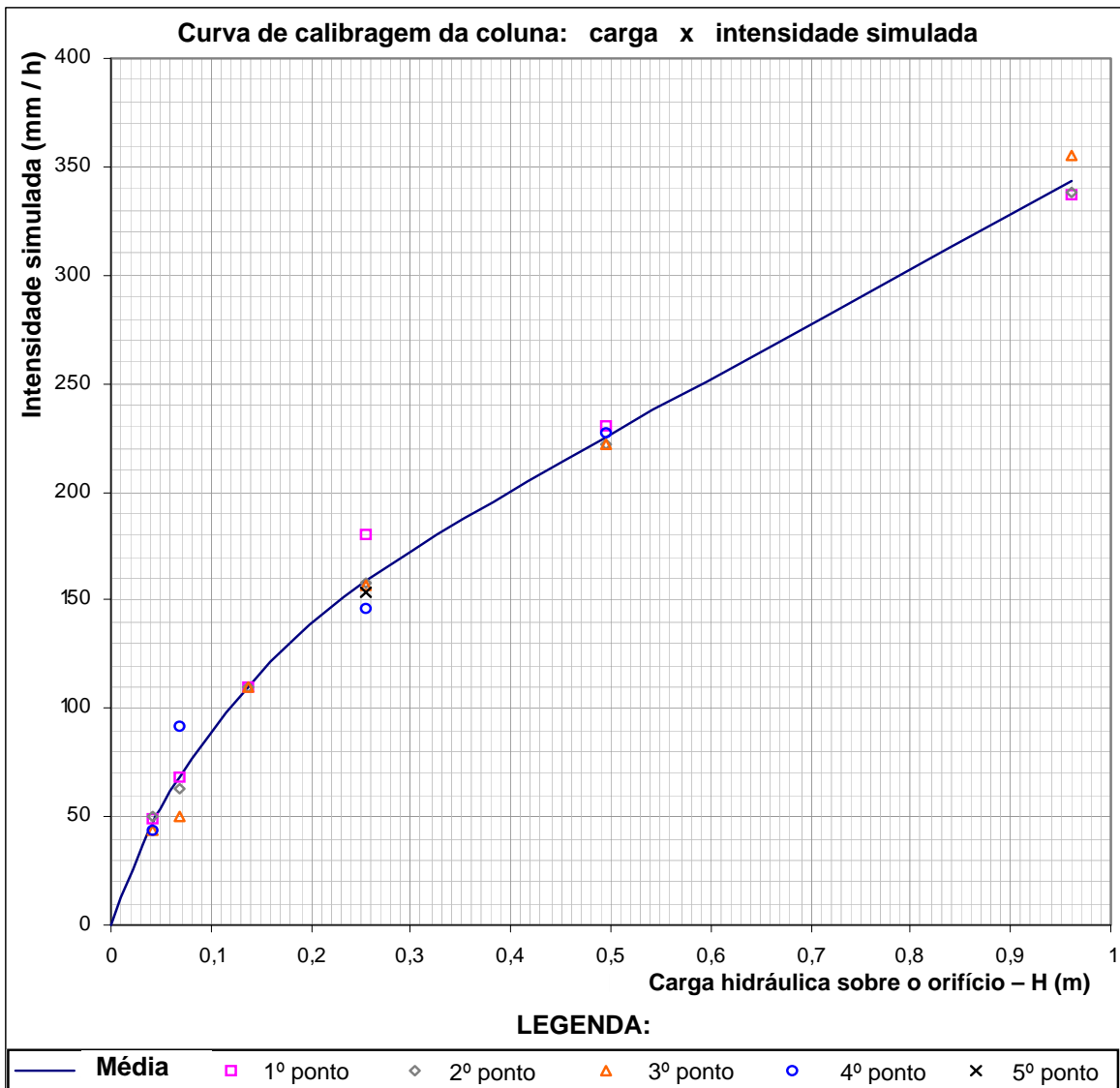


Figura 3 – Curva de calibragem: altura da coluna de água x intensidade simulada.

Com o intuito de calibrar a coluna, a seguinte operação foi realizada: para cada altura de coluna d'água H mantida constante sob um fluxo estável, certo volume foi coletado por proveta graduada de vidro durante certo período (medido por um cronômetro), permitindo então a estimação da intensidade de água estimada, i , correspondente. Este processo foi repetido algumas vezes para cada constante H , resultando alguns pontos $\{i; H\}$ para esse valor de H na correlação $i \times H$ – também chamada de “curva de calibragem da coluna”, na Figura 3. Esse processo inteiro foi repetido para cada um dos seis valores de H possíveis na bancada de testes, produzindo os seis grupos de pontos naquele gráfico – cada um representando uma constante H . A reta do gráfico foi ajustada para passar pelo valor médio de i para cada H . O formato exponencial esperado para a relação entre a velocidade (relacionada, linearmente, à taxa de fluxo e à intensidade simuladas) pelo orifício e a altura da coluna de água, H , acima é apresentada no gráfico da Figura 3. Um número variável (de orifício para orifício) de até cinco pontos foi identificado para cada um dos seis orifícios – como indica a legenda do gráfico.

O pluviômetro do tipo basculante testado aqui tem uma área de captação de $0,03142\text{m}^2$. Foi conectado ao conjunto de hardware sensor e a um software de aquisição de dados capaz de carregar resultados (uma tabela de quantidade de chuva acumulada ao longo do tempo) a uma planilha de cálculo em computador. Para cada altura de coluna de água, H , a intensidade de chuva foi medida pelo aparelho diversas vezes (até 6 vezes para cada par de valores intensidade simulada \times altura da coluna d'água) por períodos de aproximadamente uma hora cada. Em cada uma dessas vezes, o erro na medida da intensidade (mediu uma intensidade simulada menor) foi computado e, finalmente, determinou-se a correlação entre intensidade simulada e erro. Um ajuste de tipo polinomial foi escolhido nesse caso, pois sua aproximação aos pontos foi melhor do que uma simples tendência linear – visualmente, neste estudo preliminar. Na seqüência destes experimentos e para futuras publicações, um ajuste estatístico mais refinado deverá ser obtido. À medida que esses futuros testes produzam mais pontos experimentais para a correlação, diferentes modelos também poderão ser testados.

A próxima seção resume os resultados de tais experiências.

3. RESULTADOS

A Figura 4 mostra os seis grupos de valores {intensidade; erro} – pares ordenados (i.e., pontos no gráfico) – obtidos e o ajuste da correlação polinomial para a variação do erro como uma função da intensidade média.

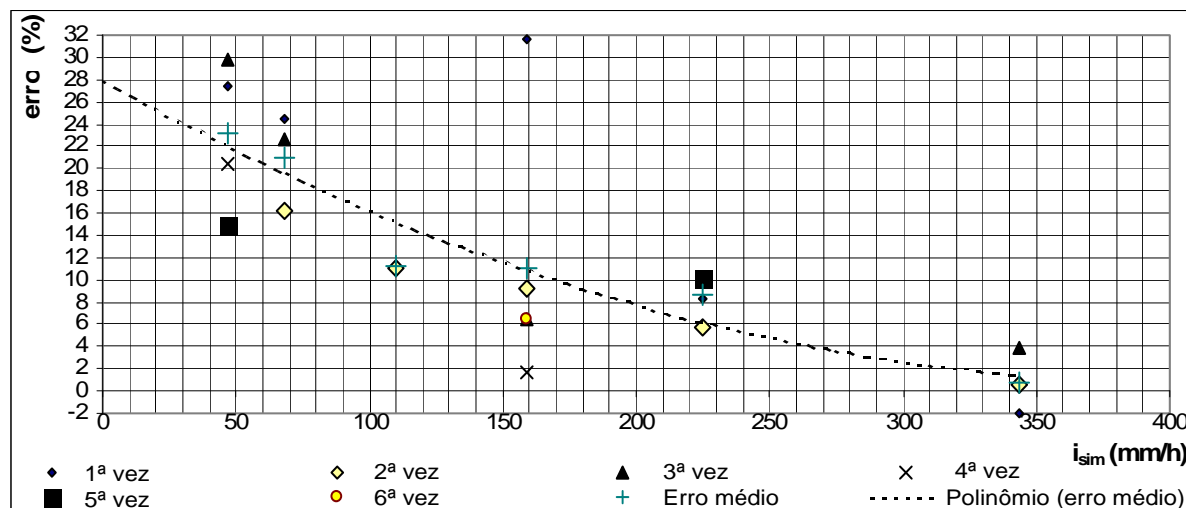


Figura 4 – Pontos da amostra e correlação: intensidade simulada \times erro estimado.

Apesar de três pontos terem-se aproximado do valor de 30% de erro, mesmo assim eles foram mantidos na amostra considerada, já que a dispersão de pontos altos parece ser uma característica genuína desse experimento.

A tendência de correlação obtida sugere que o erro percentual diminui à medida que a intensidade de chuva medida aumenta. Isso sugere também que esse pluviômetro, da maneira que foi enviado para teste, havia sido calibrado anteriormente para uma avaliação correta de chuvas intensas – dessa maneira, produzindo erros positivos quando usado para medir baixas intensidades. Se, por acaso, o aparelho tivesse sido calibrado para avaliar bem baixas intensidades, ele iria, então, subestimar a chuva intensa.

Apesar de que ajustes de correlação assim simples possam ser aplicados a dados de chuva bem medidos, obtendo-se então valores representativos da chuva real – como proposto freqüentemente pelos fabricantes de aparelhos de medição – experimentos futuros devem ser

efetuados com o intuito de levantar diversos pontos intensidade x erro para outros valores de intensidade não cobertos aqui. Com isto, pode ser que outros tipos de relação matemática possam ajustar-se para estas duas variáveis. Para este ajuste polinomial, em particular, o coeficiente de determinação foi de 0,9226.

4. CONCLUSÕES

No início desse artigo, foi apresentada uma revisão da literatura para auxiliar o leitor interessado a compreender a generalidade, a diversidade e a magnitude dos problemas de precisão e acuracidade que afetam os pluviômetros do tipo basculante geralmente utilizados em registros automáticos de chuva, de modo crescente, em alguns casos de monitoramento em tempo real. Essa revisão mostrou que erros de medição podem variar de maneiras diferentes à medida que a intensidade da chuva muda – logo, é importante identificar, para cada aparelho, a variação de erro característica como uma função da intensidade medida.

Esta investigação preliminar, focando este particular pluviômetro automático ainda em desenvolvimento, confirmou muitos aspectos mostrados por prévios experimentos laboratoriais por parte de outros autores, permitindo as seguintes conclusões:

a) Os erros na intensidade medida podem ser tanto positivos quanto negativos neste caso. Se o aparelho for calibrado para baixas intensidades, o erro será cada vez mais negativo à medida que a intensidade cresce; se calibrado para chuva muito intensa, o erro irá crescendo, positivo, à medida que a intensidade for caindo.

b) A relação entre erro de medição e intensidade simulada parece, a princípio, não-linear com gradiente crescente com a intensidade – o que ameaça a confiança nas intensidades e alturas pluviométricas estimadas para eventos de intensidade muito alta – mas isto deve ainda ser confirmado por futuras investigações nesse campo.

c) O pluviômetro investigado está sujeito a erros variáveis, aparentemente, entre zero e cerca de 30% (em termos de valor absoluto) para intensidades de chuva usuais. Portanto, alturas pluviométricas medidas regularmente por este aparelho devem ser altamente sujeitas a incerteza – e, igualmente, qualquer trabalho de Engenharia baseado nesses valores. Portanto, desenvolvimentos mecânicos nesse aparelho já estão em andamento antes que seja oferecido largamente ao mercado. A complementação destes experimentos – com muitos mais pontos experimentais amostrados para o propósito de levantar correlação melhor definida que a da Figura 4 – será fundamental para levar a conclusões mais seguras.

d) Parece que a dispersão entre pontos levantados para cada carga hidráulica em particular é elevada. Os procedimentos laboratoriais devem ser revistos para que se identifiquem possíveis causas desse fenômeno – seja por características de bancada, seja por aquelas do aparelho de pluviometria.

Além disto, uma variedade de outros pluviômetros basculantes poderá ser investigada de forma a provê-los de maior confiança do usuário – com melhor interpretação de seus dados de campo e, também, aumentando o conhecimento geral sobre os problemas possíveis numa larga gama de aparelhos de pluviometria automática.

Finalmente, estes experimentos estão sendo efetivos não somente para o progresso da pluviometria e a maior confiabilidade de um equipamento específico em desenvolvimento, mas também como forma de introduzir os dois primeiros autores ao campo da pesquisa em metrologia de fluidos e pluviometria, praticando conhecimentos adquiridos, em seus respectivos cursos de graduação, sobre Estatística, Mecânica e Meio Ambiente.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Escola de Engenharia do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, através da Coordenação de Engenharia Civil, com a permissão do uso das dependências e instalações dos Laboratórios de Hidráulica e Hidrologia e de Saneamento Básico.

Agradecem, também, ao Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos – CTH, que forneceu o equipamento de campo a ser testado neste estudo e permitiu o uso de um protótipo preliminar do pluviômetro, ainda em desenvolvimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALDER, I.R.; KIDD, C.H.R. A note on the dynamic calibration of tipping-bucket gauges. **Journal of Hydrology**, n.39, 1978, pp.383-386.

LOMBARDO, F.; STAGI, L.. Verifica e taratura dinamica della strumentazione pluviometrica finalizzata alla valutazione degli errori per intensità di pioggia elevata. In: Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, 26, Catania, Sicília, 9-12 de setembro, 1998. **Anais**. Catania: Università degli Studi di Catania, 1998, pp.85-96.

MARSALEK, J. Calibration of the tipping-bucket raingauge. **Journal of Hydrology**. Santa Maria, RS, n.53, 1981, pp.343-354.

SENTELHAS, P.C.; CARAMORI, P.H. Uncertainties in tipping bucket rain gauges measurements used in automated weather stations. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, 10(2), 2002

UNDERGRADUATE RESEARCH: CALIBRATION OF AUTOMATIC TIPPING-BUCKET RAIN-GAUGE ERRORS FOR INTENSE RAIN IN BRAZIL

Abstract: *This work represents the undergraduate research of two students. The importance of rain data for several purposes, including planning and design and protection of infrastructure and population, has introduced in Brazil an increasing number of different models of rain gauges available in the market, particularly those of the tipping-bucket type. Many of such devices are well accepted as suitable for automatic and telemetric monitoring. The importance of reliability on the precision of such gauges has been emphasized in the literature, particularly when measuring intense rain, through practical investigation in controlled, laboratory environment. Depending on each gauge design, problems related to device cleaning; regular checking; fluid dynamical effects during the bucket filling and emptying phases and the duration of each of these two phases, have brought different authors to report measurement deviations as a function of rain intensity – thus recommending device calibration for correct interpretation of measured intensities and, eventually, changes or simple improvement in design. This preliminary research at Mauá School of Engineering*

developed a practical calibration rule which considerably increases measurements reliability, based on laboratory experiments with a gauge prototype provided by the manufacturer. These results reinforce the need for defining similar procedures for all types of automatic gauges. They constitute the graduate research of the first author (an Engineering student) and trainee practice of the second (in Environmental Management), both supervised by the third author – having inaugurated a research line to be continued by further research students that may lead to more definitive results, commercially applicable.

Key-words: *Automatic rainfall measurement, Tipping-bucket rain gauges, Rain-gauge calibration, Measurement deviations, Error correction.*