

AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE PLUVIÔMETROS DE BÁSCULA: sub-medição durante eventos extremos e novos esquemas de medição

Sergio Michelotto Braga¹; Artur Sass Braga²; Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes³; Iraní dos Santos⁴

RESUMO – Vários estudos recentes visam estudar a performance dos pluviômetros de báscula (*tipping buckets*) e melhorar o entendimento do desempenho destes equipamentos quando da ocorrência de chuvas intensas. Neste artigo, serão apresentados os resultados de investigação efetuada em 7 aparelhos, considerados como de alta performance, os quais foram avaliados em sua capacidade de responder adequadamente à ocorrência de chuvas intensas, no Laboratório de Monitoramento Eletrônico do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná.

ABSTRACT – In recent years, many studies have been published on the subject of “tipping buckets” performance assessment, in especial during the occurrence of heavy rains. This is related to widespread use of this sort of rain gauge and also to obtain better field data for the calibration of meteorological radars. This study presents the results of laboratory tests carried out in the Electronic Monitoring Laboratory of the Department Hydraulics and Sanitation of the Paraná State Federal University, on seven high performance tipping buckets. The goal of this study was to assess the real performance of the rain gauges under different rain conditions.

¹ Professor Assistente – Departamento de Hidráulica e Saneamento – Curitiba – PR CEP: 81.531-990 Fone: (+55)(41) 33613142 Fax: (+55)(41) 33613045 e-mail: sergio.dhs@ufpr.br

² Bolsista de Iniciação Científica da Universidade Federal do Paraná – Departamento de Hidráulica e Saneamento – Curitiba – PR CEP: 81.531-990 e-mail: tui_d2@hotmail.com

³ Professor Adjunto da Universidade Federal do Paraná – Departamento de Hidráulica e Saneamento – Curitiba – PR CEP: 81.531-990 Fone: (+55)(41) 33613142 Fax: (+55)(41) 33613143 e-mail: cris.dhs@ufpr.br

⁴ Professor Assistente da Universidade Federal do Paraná – Departamento de Geografia – Curitiba – PR CEP: 81.531-990 Fone: (+55)(41) 3361-3304 e-mail: irani@ufpr.br

INTRODUÇÃO:

O entendimento do ciclo hidrológico e dos fenômenos desencadeados pela precipitação atmosférica depende, em último grau, da determinação adequada dos índices pluviométricos.

Até recentemente, a determinação da quantidade de precipitação dependia inteiramente de pluviômetros de leitura manual, a exemplo do largamente utilizado Ville de Paris.

O avanço da eletrônica e da tecnologia para aquisição e registro de dados tornou possível o acompanhamento mais detalhado das precipitações atmosféricas, progresso este fundamentalmente baseado em registradores eletrônicos, também conhecidos como “dataloggers” e em pluviômetros de báscula. Esses últimos, também conhecidos pela expressão inglesa “*tipping buckets*”, são aparelhos mecânicos conceitualmente simples. Um funil faz a captura da chuva, e leva a água coletada para um mecanismo basculante, semelhante a um pequeno monjolo duplo. Ao acumular um certo volume de água, o mecanismo se desequilibra, tombando para o lado, despejando a água coletada e emitindo um pulso eletrônico que será registrado no “datalogger”.

Os aparelhos de melhor qualidade são montados com tecnologia de relógios mecânicos e sua precisão é razoável para chuvas de pequena intensidade. Entretanto, mesmo no caso dos melhores aparelhos, é sabido que a performance destes equipamentos muda conforme a intensidade da precipitação (Nystuen, 1999; Habib *et al.*, 2001), havendo uma significativa tendência à sub-medição em casos da ocorrência de chuvas mais intensas.

O interesse internacional pelo desempenho dos pluviômetros de báscula foi aumentado nos últimos anos devido a sua larga utilização em estações automáticas e, também, pela necessidade de se obter informações mais precisas para melhorar a calibração dos radares meteorológicos (La Barbera *et al.*, 2002; Gordon, 2003; Sevruck, 2002; Srikanthan *et al.*, 2002).

Estudos anteriores realizados por esta equipe de pesquisa procuraram alertar a comunidade brasileira de pesquisadores em recursos hídricos para esse fato (Braga *et al.*, 2007; Braga e Fernandes, 2007). Também se procurou chamar atenção para o baixo desempenho de alguns equipamentos de menor custo, ainda utilizados no país.

Este estudo apresenta resultados de testes realizados em 7 pluviômetros de báscula de alta qualidade, de três modelos diferentes, sendo que um deles possui embarcado um sistema eletrônico de compensação de erros.

Os aparelhos foram testados com o auxílio de uma plataforma de testes desenvolvida no Laboratório de Monitoramento Eletrônico do Departamento de Hidráulica e Saneamento a Universidade Federal do Paraná.

METODOLOGIA:

Plataforma de testes:

Na realização dos testes foi utilizada uma bateria de sete bombas peristálticas de alta precisão, marca Braun, modelo NUTRIMAT II, originalmente utilizadas como bombas para alimentação parenteral em unidades hospitalares de terapia intensiva (Fig 1).



Figura 1 – Bombas NUTRIMAT II

Cada bomba pode ser programada para produzir vazões entre 0,1 a 999,9 ml/h. Neste estudo, todas as bombas foram programadas para a vazão máxima, posto o volume produzido em cada uma delas ser suficiente para simular precipitações entre 25 e 30 mm/h, dependendo do diâmetro de coleta do pluviômetro.

As bombas foram instaladas em paralelo para permitir o gotejamento controlado de qualquer quantidade de água, oferecendo condições de simular precipitações de até 220 mm/h.

Os pluviômetros foram montados em uma mesa de testes em granito, especialmente construída no formato de uma pequena capela. Este formato facilita a montagem de vários tipos de pluviômetros de báscula e diversos esquemas para a coleta da água despejada, que é realizada por sob o pluviômetro, em jarras plásticas independentes para

a coleta individual do volume descartado pelos dois lados do mecanismo de báscula (Fig 2).



Figura 2 – Capela para testes de pluviômetros

O volume de água coletado em ambos lados foi pesado, separadamente, em uma balança eletrônica de precisão, marca BIOPRECISA, modelo BS3000A, com escala de 0 a 3000 g, com resolução de 0,1g. O equipamento é novo, e possui certificado de calibração INMETRO nº 2.057.204-9 (Fig 3).



Figura 3 – Balança de precisão

Pluviômetros

Foram testados 7 aparelhos de três modelos diferentes, fabricados por dois dos mais conceituados fornecedores do setor.

Os dois primeiros aparelhos, aqui identificados como A e B, são aparelhos de um modelo mais antigo, que estiveram em operação durante alguns anos, recebendo manutenção e cuidados adequados. O aparelho A foi retirado diretamente do campo, e testado nas condições em que se encontrava. O aparelho B foi limpo e revisado, tendo sido preparado para retorno à operação. A diferença de tratamento entre eles visa comparar o efeito do uso em campo no desempenho dos equipamentos deste modelo.

O terceiro e o quarto e o quinto aparelhos, aqui identificados como C e D e E, são aparelhos de um modelo recente, que estiveram em operação durante alguns meses, recebendo manutenção e cuidados adequados. O aparelho C foi retirado diretamente do campo, e testado nas condições em que se encontrava. O aparelho D foi limpo e revisado, tendo sido preparado para retorno à operação. A diferença de tratamento entre eles visa comparar o efeito do uso em campo no desempenho dos equipamentos deste modelo. O aparelho E é um aparelho novo, que foi testado na exata condição em que foi retirado da caixa.

Os pulsos produzidos pelas basculadas dos aparelhos A a E foram registrados em um datalogger da marca Campbell Scientific, modelo CR 510, programado para registrar a o total do número de pulsos ocorridos em intervalos de 2 minutos.

O sexto e o sétimo aparelhos, aqui identificados como F e G são aparelhos novos, sem uso. Estes aparelhos são dotados de um chip que, medindo o tempo decorrido entre duas basculadas subseqüentes, corrige automaticamente os volume medido, de forma a compensar a sub-medição característica dos pluviômetros de báscula durante a ocorrência de precipitações intensas.

O processo de registro dos dados é realizado de maneira diferente. A medida real é realizada pelo chip do próprio aparelho, sendo transmitida ao “datalogger” de maneira digital, pela porta de comunicação SDI-12, em intervalos regulares de tempo.

No chip destes aparelhos está carregada uma função matemática, desenvolvida pelo fabricante, que tenta compensar a tendência mecânica à sub-medição que é inerente aos pluviômetros de báscula. Os testes nos pluviômetros deste modelo visaram acessar a precisão desse sistema de compensação.

Testes

Para cada aparelho, foram realizados três testes por faixa de precipitação, perfazendo 18 testes em cada pluviômetro.

Para os cinco primeiros equipamentos, foi registrado o número de pulsos ocorridos em um período de meia hora acrescido do tempo necessário à ocorrência da última basculada. O número de pulsos registrados é transformado em mm de precipitação na base de 0,20 mm por basculada

Para o sexto e o sétimo aparelhos o registro do volume basculado é realizado em chips instalados nos próprios equipamentos. A transmissão dos resultados é feita de forma digital por meio de uma porta de comunicação SDI-12. Neste caso, o volume registrado no “datalogger” é comparado diretamente com o volume coletado e pesado na balança de precisão.

RESULTADOS:

Pluviômetro A:

Os resultados dos testes realizados no pluviômetro A são apresentados na Tabela 1 e na Figura 4, a seguir.

Precipitação (mm/h)	Pulso Médio (mm)	Variação Percentual (%)
23,07	0,2021	1,07
48,72	0,2128	6,42
71,53	0,2142	7,11
101,07	0,2116	5,79
128,31	0,2144	7,18
153,75	0,2209	10,43

Tabela 1 – Resultados dos testes no pluviômetro A

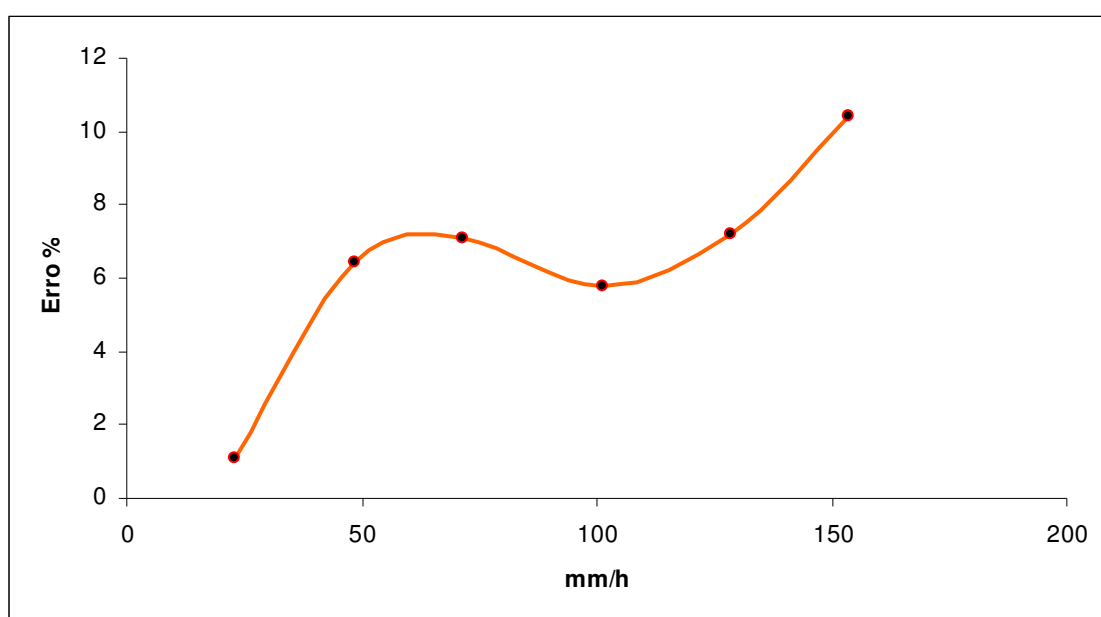


Figura 4 – Resultados dos testes no pluviômetro A

Pluviômetro B:

Os resultados dos testes realizados no pluviômetro B são apresentados na Tabela 2 e na Figura 5, a seguir.

Precipitação (mm/h)	Pulso Médio (mm)	Variação Percentual (%)
24,70	0,215	7,29
50,88	0,220	10,04
75,51	0,225	12,42
104,98	0,231	15,58
136,55	0,232	15,93
168,88	0,236	17,77

Tabela 2 – Resultados dos testes no pluviômetro B

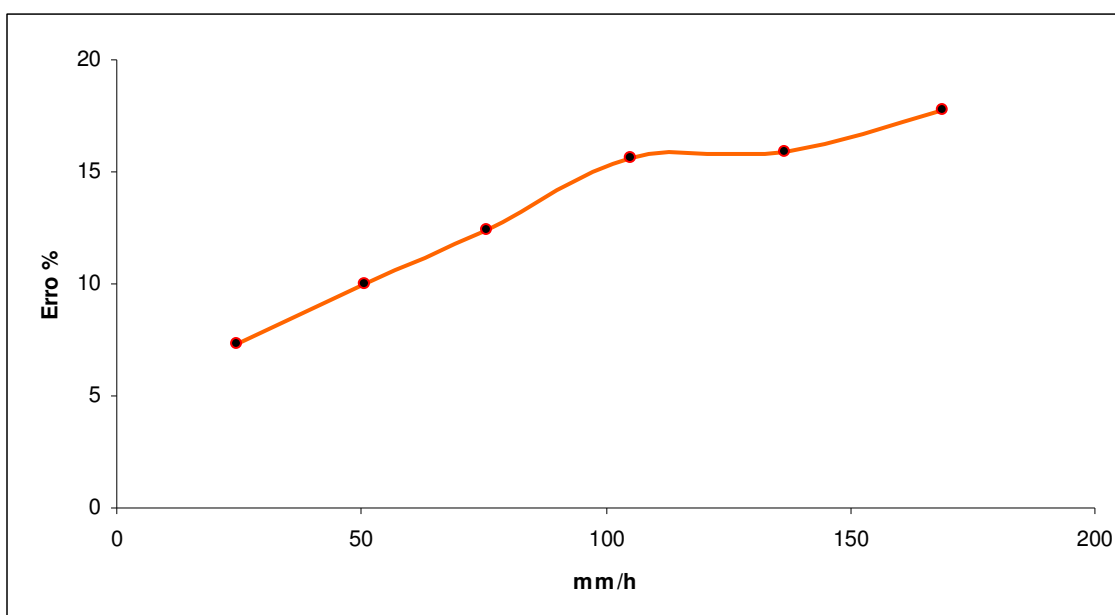


Figura 5 – Resultados dos testes no pluviômetro B

Pluviômetro C:

Os resultados dos testes realizados no pluviômetro C são apresentados na Tabela 3 e na Figura 6, a seguir.

Precipitação (mm/h)	Pulso Médio (mm)	Variação Percentual (%)
24,35	0,199	-0,45
53,54	0,197	-1,42
79,62	0,203	1,72
111,11	0,206	3,20
143,17	0,210	4,76
174,01	0,211	5,62

Tabela 3 – Resultados dos testes no pluviômetro C

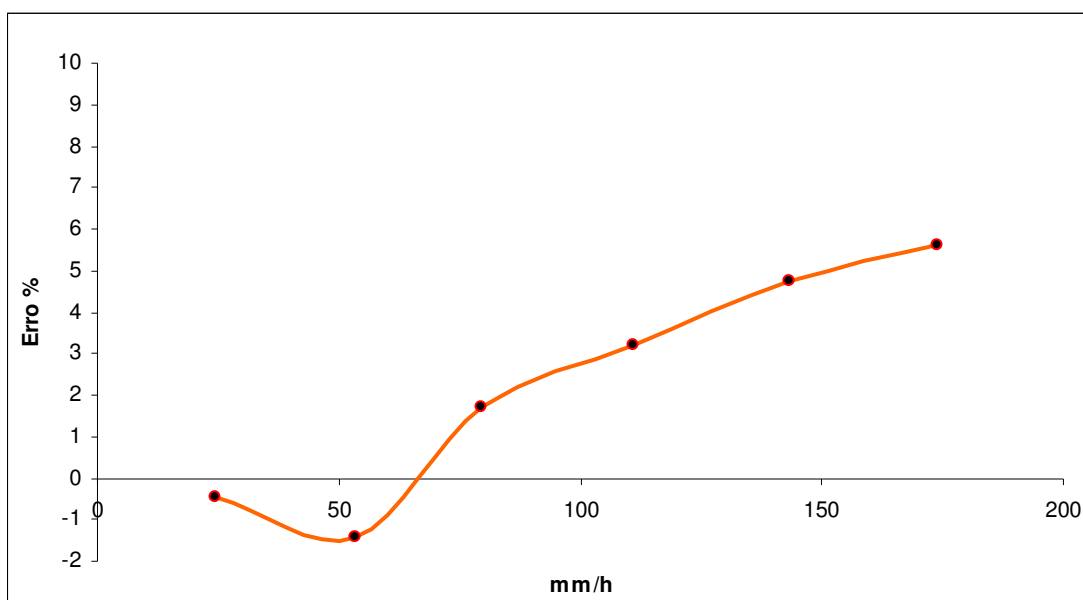


Figura 6 – Resultados dos testes no pluviômetro C

Pluviômetro D:

Os resultados dos testes realizados no pluviômetro D são apresentados na Tabela 4 e na Figura 7, a seguir.

Precipitação (mm/h)	Pulso Médio (mm)	Variação Percentual (%)
25,78	0,204	2,04
50,54	0,210	4,94
81,10	0,212	5,83
104,94	0,217	8,56
133,71	0,209	4,51
165,99	0,212	6,13

Tabela 4 – Resultados dos testes no pluviômetro D

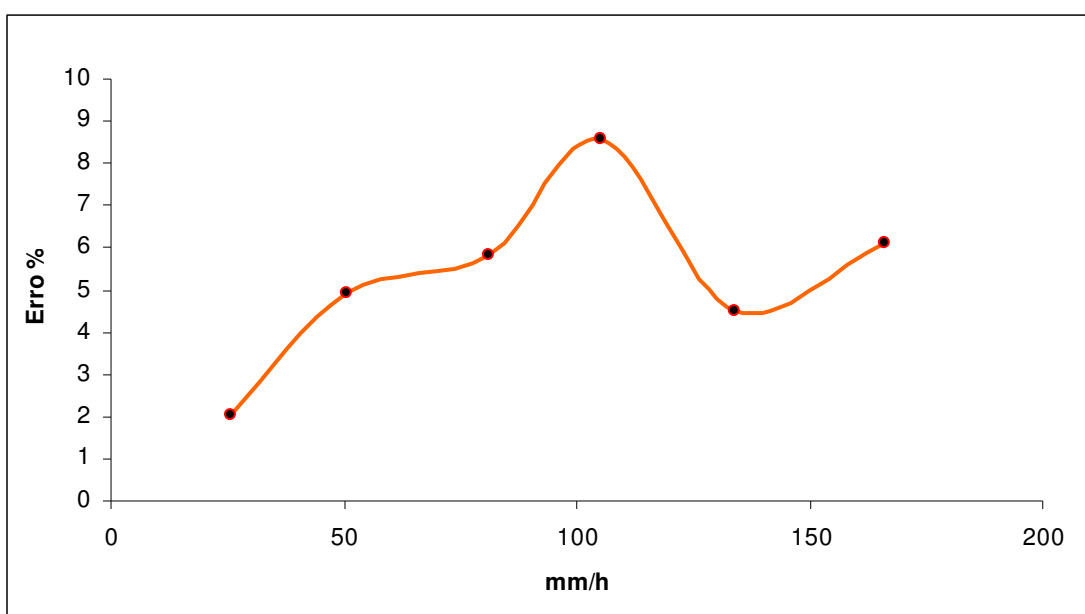


Figura 7 – Resultados dos testes no pluviômetro D

Pluviômetro E:

Os resultados dos testes realizados no pluviômetro E são apresentados na Tabela 5 e na Figura 8, a seguir.

Precipitação (mm/h)	Pulso Médio (mm)	Variação Percentual (%)
23,80	0,199	-0,65
53,58	0,195	-2,41
78,01	0,198	-1,09
108,87	0,202	1,09
139,93	0,204	2,21
173,49	0,208	3,83

Tabela 5 – Resultados dos testes no pluviômetro E

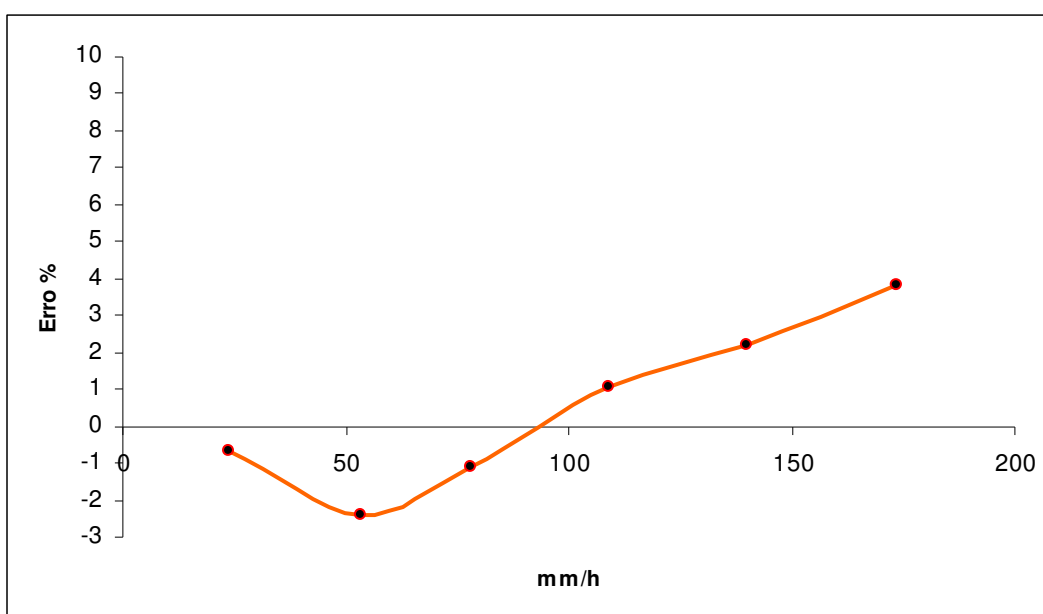


Figura 8 – Resultados dos testes no pluviômetro E

Pluviômetro F:

Os resultados dos testes realizados no pluviômetro E são apresentados na Tabela 6 e na Figura 9, a seguir. Entretanto, como o processo de registro é diferenciado, será apresentada uma tabela contendo o volume despejado, o volume medido, e a variação percentual entre eles.

Precipitação (mm/h)	Volume precipitado (ml)	Volume lido (ml)	Variação Percentual (%)
26,24	422,1	425,44	0,79
58,37	946,5	946,42	-0,01
117,53	1899,35	1905,61	0,33
192,51	3086,6	3121,37	1,13

Tabela 6 – Resultados dos testes no pluviômetro F

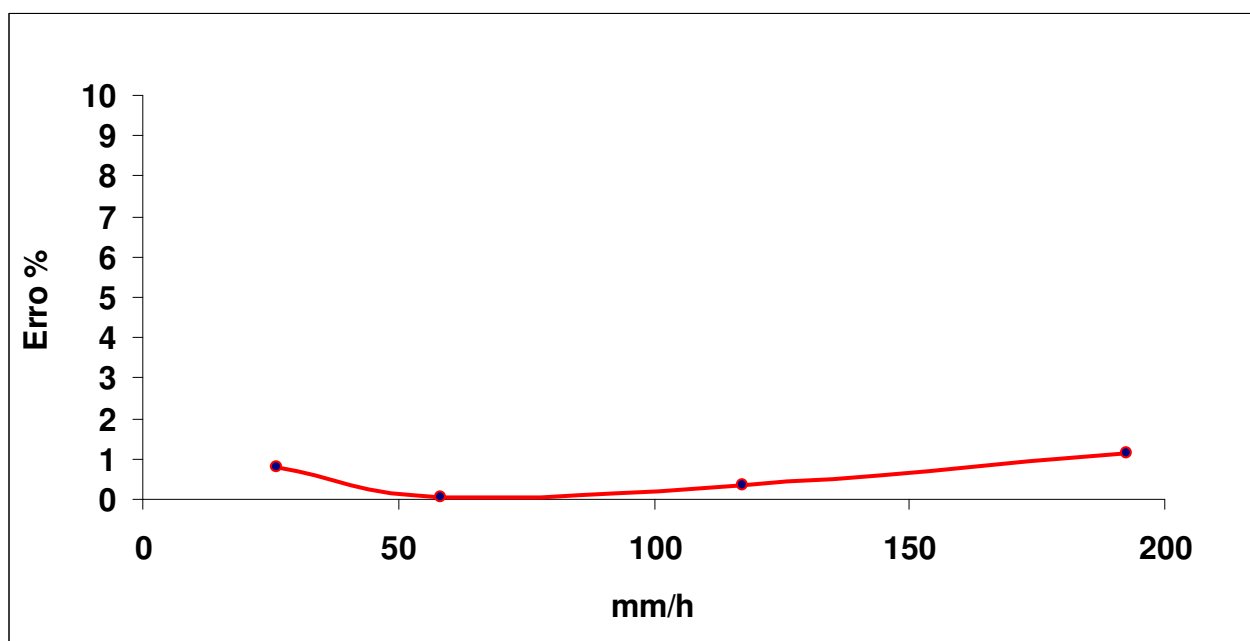


Figura 9 – Resultados dos testes no pluviômetro F

Pluviômetro G:

Os resultados dos testes realizados no pluviômetro E são apresentados na Tabela 7 e na Figura 10, a seguir. Entretanto, como o processo de registro é diferenciado, será apresentada uma tabela contendo o volume despejado, o volume medido, e a variação percentual entre eles.

Precipitação (mm/h)	Volume precipitado (ml)	Volume lido (ml)	Variação Percentual (%)
27,43	443,05	444,79	0,39
54,03	882,50	875,99	-0,74
132,39	2157,90	2146,53	-0,54
214,05	3638,45	3703,72	1,79

Tabela 7 – Resultados dos testes no pluviômetro G

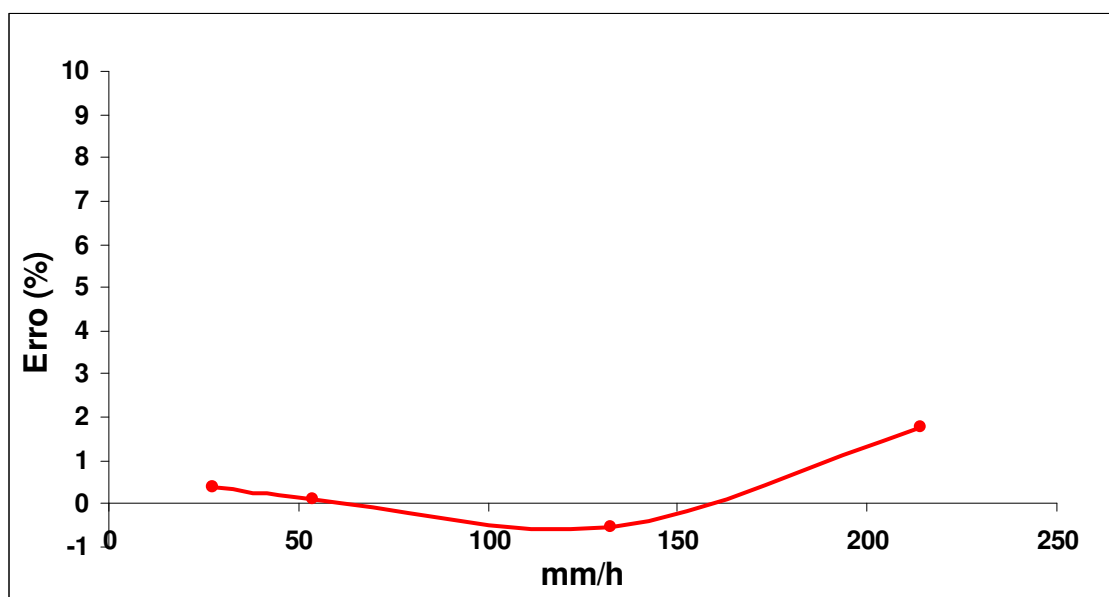


Figura 10 – Resultados dos testes no pluviômetro G

Análise dos Resultados:

Para facilitar a comparação, na Figura 11, são apresentadas todas as curvas de resposta dos aparelhos testados

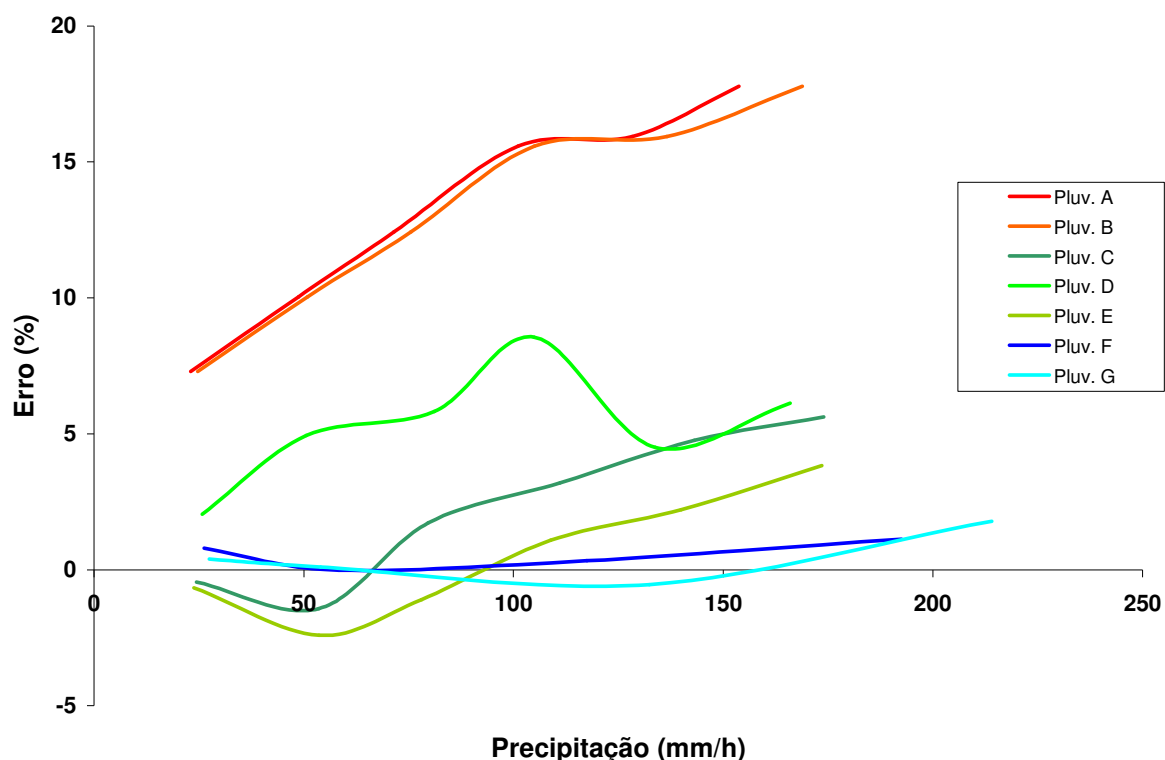


Figura 11 – Curvas de Resposta dos Aparelhos Testados

Como pode ser observado, as curvas de resposta dos aparelhos convencionais – pluviômetros de A a E - mostram a tendência à sub-medição nos instantes em que ocorrem precipitações intensas. Também pode ser observado que, quanto maior for a precipitação instantânea, maior será o erro de medição, erro este sempre a menor para precipitações instantâneas superiores a 100mm/h.

Outro fato interessante que pode ser observado nas curvas dos pluviômetros de A a E é uma inversão momentânea de tendência, inversão essa que pode ser leve, como ocorre no pluviômetro B, ou mais acentuada como o que ocorre nos aparelhos A, C, D e E.

A inversão pode ser explicada pela mudança de regime de escoamento entre o funil de coleta e próprio mecanismo basculante.

Em momentos de precipitação baixa, o escoamento ocorre por gotejamento. Como cada gota que cai sobre a superfície da caçamba impõe uma força contrária ao

movimento de balança, a medida em que aumenta a precipitação, a frequência de gotejamento aumenta, fazendo com que a caçamba carregue mais líquido. Este é o efeito responsável pelo processo de sub-medição intrínseco a todos os pluviômetros de balança.

Quando a precipitação é suficientemente alta, o processo de escoamento passa a ser contínuo, sendo formado um fio de água entre o funil intermediário e mecanismo de basculante. A força exercida pelo fio d'água é, a princípio, ligeiramente inferior àquela exercida pelo processo de gotejamento. Dessa forma ao formar-se o fio d'água o mecanismo balança mais facilmente. O efeito é a inversão momentânea da curva de resposta dos pluviômetros de balança.

Caso a precipitação continue aumentando, o aumento do fluxo do fio d'água novamente faz aumentar a força contrária ao movimento do mecanismo basculante, invertendo novamente a curva de resposta do equipamento.

É importante observar que não existe semelhança entre as curvas de resposta apresentadas pelos aparelhos de A a E. Mesmo entre equipamentos do mesmo modelo e com o mesmo tempo de uso, o formato das curvas de resposta não guarda mais semelhanças além da inversão momentânea da curva de resposta.

As curvas de resposta dos aparelhos F e G mostram, a priori, que estes pluviômetros conseguem reduzir substancialmente os erros decorrentes da sub-medição.

Um quadro comparativo entre os aparelhos é apresentado na Tabela 8, a seguir:

Aparelho	Tempo de uso	Proveniência	Precipitação do máximo erro (mm/h)	Erro Máximo (%)
A	5 anos	Campo	153,75	10,43
B	5 anos	Revisão	168,88	17,77
C	1 ano	Campo	174,01	5,62
D	1 ano	Revisão	165,99	6,13
E	sem uso	Novo	173,49	3,83*
F	sem uso	Novo	192,51	1,13
G	sem uso	Novo	214,05	1,79

Tabela 8 – Quadro comparativo dos pluviômetros testados

Deste quadro pode-se observar que os pluviômetros A e B, de um modelo mais antigo, apresentaram o pior desempenho. Tal situação era esperada pois a tecnologia embarcada é mais antiga. É importante notar que o aparelho revisado apresenta um erro maior que o seu par, proveniente diretamente do campo. Observando a tabela de desempenho do aparelho (Tabela 2), pode-se notar que o erro inicial é cerca de 7%, ou seja, o aparelho sub-mede a precipitação em 7% em chuvas de baixa intensidade, donde

se deduz que ocorreu um erro na calibração do equipamento durante o revisão do equipamento.

Os aparelhos C, D, e E de um modelo mais recente, fabricados pela mesma empresa que produziu os modelos A e B, apresentaram um desempenho bem superior em relação aos seus pares mais antigos. Os aparelhos C e D apresentaram faixa de erro na ordem de 6% durante precipitações na faixa de 170 mm/h.

O aparelho E é novo, e apresenta um erro máximo de 3,8%, para a faixa de precipitação de 173 mm/h. Entretanto, o mesmo aparelho apresenta um erro de -2,4% (sobrer-medição) para precipitações na faixa de 50 mm/h, do que se pode deduzir que se o aparelho for ajustado para 0,20mm por pulso em momentos de baixa precipitação, apresentaria erros na faixa de 6%, da mesma forma que os aparelhos C e D, do mesmo modelo.

Os pluviômetros F e G são novos, e apresentaram o melhor desempenho entre os aparelhos testados. Os erros observados foram 1,1 e 1,8% para precipitações na faixa de 200 mm/h, o que representa melhora significativa em relação aos outros equipamentos testados, e comprova o bom desempenho do sistema de compensação de erros desenvolvido pelo fabricante.

CONCLUSÃO:

Foi confirmada, mais uma vez, a tendência à sub-medição da precipitação durante instantes em que a chuva é intensa. Também pode ser observada a evolução tecnológica ocorrida nos pluviômetros de báscula de alta performance, sendo que a nova geração de dos equipamentos convencionais de um fabricante consegue reduzir a faixa de variação de 10% para 6%, enquanto que os aparelhos dotados de eletrônica embarcada apresentaram resultado ainda melhor, com faixas de variação inferiores a 2%.

BIBLIOGRAFIA

BRAGA, S.M.; FERNANDES, C.V.S. (2007). “*Performance de Sensores de Precipitação do Tipo “Tipping Bucket” (Báscula) – Um Alerta para a Ocorrência de Erros*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, n. 1, pp. 197–204

BRAGA, S.M.; FERNANDES, C.V.S.; SANTOS, I.; DELARIZZA, R.A. (2007). “*Avaliação da Performance de Pluviômetros de Báscula: Técnicas para a Realização de Ensaios Pluviométricos em Laboratório*” in Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, Nov 2007, 17p. 1cd.

GORDON, J.D. (2003). “*Evaluation of Candidate Rain Gages for Upgrading Precipitation Measurement Tools for the National Atmospheric Deposition Program – Water Resources*

Investigations Report 02-4302 USGS, 2003”. Disponível em:
<http://bqs.usgs.gov/precip/reports/Raingage/wri024302.html>, Acessado em 25/04/2004.

HABIB, E., KRAJEWSKI, W.F., KRUGER, A. (2001). “ Sampling Errors of Tipping-Bucket Rain Gauge Measurements”. In Journal of Hydrologic Engineering, v. 6, n. 2, p. 159-166, March/April, 2001.

LA BARBERA, P., LANZA L.G., STAGI, L. (2002). “Tipping Bucket Mechanical Errors and their Influence on Rainfall Statistics and Extremes” in Water Science and Technology, v. 45, n. 2, p. 1-10, 2002.

NYSTUEN, J.A. (1999). “Relative Performance of Rain Gauges Under Different Rainfall Conditions” in Journal of Atmospheric and Ocean Technology, v. 16, p. 1025-1043, 1999.

SEVRUK, B. (2002) “WMO Questionnaire on Recording Precipitation Gauges: State-Of-The-Art” in Water Science and Technology, v. 45, n. 2 p. 139–145, 2002.

SRIKANTHAN, R., JAMES, R.A., MATHESON, M.J. (2002). “Evaluation of the Performance of Tipping Bucket Rain Gauge Under Field Conditions” Bureau of Meteorology, Melbourne, 2002.