

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO, “AUTO-VENTURI”

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A SYSTEM AUTOMATED DATA ACQUISITION FOR FLOW RATE MEASUREMENT, “AUTO-VENTURI”

Robson André ARMINDO¹; Tadeu Miranda de QUEIROZ²; Tarlei Arriel BOTREL³; Tiago Capello GARZELLA⁴

1. Professor, Doutor, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, PR, Brasil. rarmindo@ufpr.br; 2. Professor, Doutor, Departamento de Engenharia de Produção Agroindustrial, Universidade do Estado do Mato Grosso – UNEMAT, Barra do Bugres, MT, Brasil; 3. Professor, Doutor, Departamento de Engenharia de Biosistemas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, Universidade de São Paulo - USP, Piracicaba, Brasil; 4. Doutor em Irrigação e Drenagem, ESALQ-USP, Piracicaba, Brasil.

RESUMO: Visando obter um instrumento, de fácil construção e baixo custo, para medição de vazão por meio de *software* e *hardware*, neste trabalho, teve-se por objetivo desenvolver e avaliar um sistema automatizado de aquisição de dados para medição de vazão por meio de um medidor Venturi com comunicação via rádio frequência. Para tal desenvolvimento, avaliou-se também a melhor forma de calibração de um transdutor utilizado em equipamentos de medição de vazão que se baseiam em diferencial de pressão. O trabalho foi realizado no Laboratório de Hidráulica, pertencente ao Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, localizado no campus de Piracicaba. Utilizou-se um medidor Venturi de material acrílico que possui diâmetro maior principal (D) de 0,069 m e diâmetro menor de “garganta” (d) de 0,0352 m. Calibrou-se o transdutor diferencial de pressão utilizado de maneira estática (ausência de fluxo de água na calibração) e de maneira dinâmica, observando-se diferença significativa entre esses dois processos de calibração. Para a calibração, comunicação e transmissão dos dados desenvolveram-se rotinas computacionais em linguagem “Tbasic”. Para o desenvolvimento do *software* denominado Auto-Venturi utilizou-se o programa computacional *Delphi 3* da Borland. Os resultados obtidos mostraram que o sistema automatizado de aquisição de dados com calibração dinâmica apresentou excelentes índices de precisão e exatidão sendo indicado para esse processo. Realizando-se o processo de calibração estática, encontrou-se um excelente índice de precisão, porém um inadequado índice de exatidão, sendo sua realização não recomendada.

Palavras - Chave: Medidor de Vazão. Rádio Frequência. Automação.

INTRODUÇÃO

A água doce é utilizada nas mais diversas funções e em diversos setores do país, tais como:

industrial, doméstico, turismo, lazer e, sobretudo no agroindustrial. No setor agroindustrial, a irrigação é o principal consumidor deste recurso natural. Essa “concorrência” pelo o uso da água gera maior

necessidade na busca por otimização no uso dos recursos disponíveis, objetivando-se atingir maior eficiência no uso e manejo da água. Dessa forma, entende-se que tanto na irrigação convencional quanto na irrigação de precisão, torna-se imprescindível a medição da vazão em tempo real. Medições precisas e exatas de vazão são extremamente importantes para que se tenha maior controle da prática de irrigação, a fim de evitar possíveis erros decorrentes entre a vazão de projeto e a vazão real na condução e na avaliação da irrigação (SOUSA et. al, 2011). Contudo, o investimento na utilização de sistemas mais precisos e exatos de controle e medição de vazão ainda é pouco realizado, seja pelo custos dos sistemas ou seja pelo desconhecimento dos sistemas disponíveis no mercado.

Diversos métodos e instrumentos como tubo *pitot*, medidor magnético e célula de carga são utilizados para a determinação de vazão em condutos forçados (CAMARGO, 2011). Alguns desses métodos são baseados no teorema de Bernoulli e com eles, torna-se possível a determinação indireta da vazão. De acordo com Deniculi (1990), por meio da determinação do diferencial de pressão em seções de diferentes áreas pode-se estimar a vazão por meio de medidores, como exemplo o medidor Venturi.

Ibars (2004) comenta que o medidor Venturi se constitui em um dos métodos mais utilizados para a medição de vazão, por se tratar de um método preciso e que ocasiona menores valores de perda de carga, comparado a outros instrumentos de medição de vazão. O autor ainda cita que o medidor Venturi é utilizado não somente para medição de vazão na irrigação, mas também em instalações agro-industriais (tratamento de água, condução de gases,

vinhaças e produtos corrosivos). Dois aspectos positivos dessa utilização são a facilidade em sua operação e a diversidade de materiais utilizáveis para sua construção como: aço, bronze, alumínio, ferro, PVC, resina plástica reforçada com fibra de vidro, entre outros.

Del Pino (2005) comenta que existem diversas tecnologias que permitem o gerenciamento confiável e seguro da produção, além de um controle eficaz sobre a realização do trabalho. Sendo assim, esse autor desenvolveu um sistema computacional de auxílio ao desenho, simulação e desenvolvimento de projetos de irrigação localizada. Vilela et. al (2004) apresentaram *hardware* e *software* para o controle de pulsos de válvulas solenóides que, por sua vez, atuavam no sistema de pulverização acoplado a pivô central, Notliada. Armindo et. al (2009) relatam ainda que o mecanismo desenvolvido viabilizou a redução do volume de aplicação e apresentou alta durabilidade e confiabilidade.

Queiroz et. al (2008) desenvolveram um *hardware* e *software* que alteravam a velocidade de deslocamento do pivô central a fim de permitir o controle de lâminas de irrigação, em taxa variada, para irrigação de precisão utilizando-se pivô central, de acordo com o manejo adotado pelo produtor. Armindo et. al (2010) desenvolveram um aspersor de taxa variada (ATV) para irrigação de precisão automatizando-se o controle de um motor de passo que, por sua vez, atuava na alteração da vazão do bocal por meio de uma agulha de ajuste. Com esses exemplos, percebe-se que partir do desenvolvimento e da evolução dos microcontroladores, torna-se cada vez mais prático o uso da automação nas mais diversas áreas, sobretudo na engenharia de biosistemas.

De fato, a automação é uma ferramenta que pode auxiliar na determinação mais precisa e exata da vazão, diminuindo assim possíveis erros humanos em sua obtenção. Neste trabalho, teve-se por objetivo avaliar a melhor forma de calibração de um transdutor diferencial de pressão, além de desenvolver e avaliar um sistema automatizado de medição de vazão, com o uso de componentes eletro-eletrônicos e de um microcomputador, ambos de baixo custo.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, no campus de Piracicaba - SP. Utilizou-se um medidor Venturi cilíndrico soldável de acrílico que possui um diâmetro interno maior (D) de 0,069 m e um diâmetro interno menor (d), “garganta”, de

0,0352 m. Acoplou-se esse medidor a um sistema pressurizado de adução com registro tipo gaveta, a fim de se variar a vazão do sistema de 0 a $2,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Um circuito eletro-eletrônico para a aquisição dos dados de diferencial de pressão foi construído com o intuito de se medir e monitorar a vazão através de um *software*. Esse circuito constituiu-se de: um transdutor diferencial de pressão; um módulo de rádio frequência; um microcontrolador tipo Basic Step; um visualizador “display” e duas fontes de alimentação de 12Vcc.

Utilizou-se um transdutor diferencial de pressão modelo MPX 5010DP CASE 867C, que possui uma faixa de pressão de atuação de 0 a 10 kPa (Figura 1). Esse dispositivo possui duas entradas, sendo uma de maior e outra de menor pressão, com pinos de alimentação (5Vcc), terra (GND) e saída de dados (OUT) que completam sua configuração.

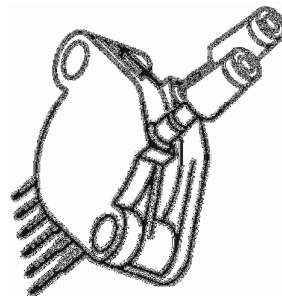


Figura 1. Imagem do transdutor diferencial de pressão utilizado nos ensaios.

Calibração do transdutor diferencial de pressão

Antes do transdutor diferencial de pressão (TDP) ser conectado ao medidor Venturi para a realização dos ensaios, submeteu-se o mesmo a um processo de calibração estática e, posteriormente, a um processo de calibração dinâmica para seguida análise dos resultados.

Calibração estática

Realizou-se a calibração estática com a inexistência do fluxo de água pelo TDP (Figura 2), instalando-se na entrada de maior pressão (P_e) do TDP um tubo piezômetro. O valor de pressão exercido em P_e é função da altura de coluna de água

(h) inserida nesse tubo piezômetro e para se completar o diferencial de pressão, expôs-se a

entrada de menor pressão do TDP a pressão atmosférica (Pa).

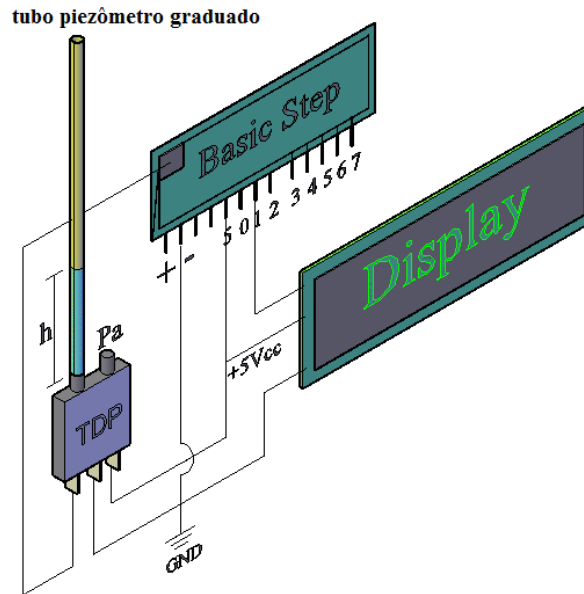


Figura 2. Esquema da calibração estática realizada no transdutor diferencial de pressão.

Os valores analógicos de diferença de pressão “sentidos” pelo TDP foram convertidos para digitais, armazenados e enviados a um visor display para a tomada de leituras. Instantaneamente, realizaram-se as leituras das alturas h correspondentes no tubo piezômetro. Por se trabalhar com pressão relativa, desconsiderou-se a pressão atmosférica ($P_a = 0$), ou seja, considerou-se que DH possui o mesmo valor de h , eq. (1).

$$DH = P_e - P_a$$

$$DH = P_e = h \quad (1)$$

Confrontando-se os valores observados no display aos valores da eq. (1), realizou-se uma análise de regressão, por meio do *software Systat* pertencente ao pacote estatístico do *SigmaPlot 11*, para determinação da equação de calibração estática do transdutor diferencial de pressão.

Calibração dinâmica

Em busca da minimização dos possíveis erros gerados pela calibração estática realizou-se uma calibração dinâmica instalando-se o TDP diretamente no medidor Venturi. Nesse caso, admitiu-se a existência de fluxo de água no processo de calibração (Figura 3).

No medidor Venturi, instalou-se a entrada de maior pressão (P_e) do TDP no cilindro de maior diâmetro (D), onde ocorre menor energia de velocidade ($V^2/2g$) e conseqüentemente maior energia de pressão (P/γ). Dessa forma, instalou-se a entrada de menor pressão do transdutor na tomada de pressão da “garganta” (d) onde ocorre maior energia de velocidade ($V^2/2g$). Dessa vez, dois tubos piezômetros com régua de aferição foram instalados em ligação paralela ao TDP.

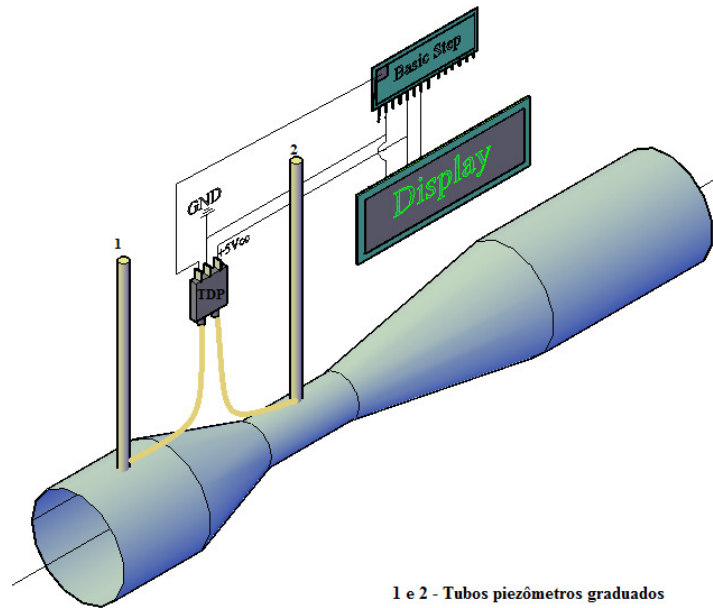


Figura 3. Esquema da calibração dinâmica realizada no transdutor diferencial de pressão.

O sistema de adução foi acionado e com o registro tipo agulha variou-se a carga hidráulica obtendo-se vazões de 0 até $2,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, tomando-se as leituras h_1 e h_2 , referentes aos dois tubos piezômetros. Os testes foram realizados aumentando e reduzindo a carga hidráulica para verificar uma possível existência de histerese.

Assim como na calibração estática, os valores analógicos resultantes da diferença de pressão sentidos pelo TDP foram lidos, convertidos em digitais, armazenados e enviados pelo microcontrolador ao visor display. Para o processo de calibração dinâmica do transdutor diferencial de pressão, considerou-se a eq. (2).

$$DH = h_1 - h_2 \quad (2)$$

Com esses valores realizou-se uma análise de regressão, valendo-se do pacote estatístico do *software* Sigma Plot, para determinação da equação de calibração do TDP, em regime dinâmico, instalado ao medido Venturi.

Depois de geradas as equações de calibração do TDP, realizou-se vários testes utilizando-as, em regime estático e dinâmico, para posterior análise dos valores de vazão disponibilizados pelo Auto-Venturi.

Transmissão dos dados via rádio frequência

Depois de realizadas as duas formas de calibração, instalou-se o TDP nas tomadas de pressão do medidor Venturi. Essa instalação se deu como no processo de calibração dinâmica descrito anteriormente. Contudo, nesta vez, o microcontrolador foi programado para ler os sinais do TDP e, por meio de um módulo de rádio frequência transmissor, enviá-los a um módulo de rádio frequência receptor. Os dados recebidos pelo receptor rádio frequência foram enviados ao microcomputador, por meio de um cabo receptor de dados que foi conectado a porta serial RS232 do microcomputador. A faixa de frequência de operação desses módulos é de 315 MHz e a tensão de alimentação empregada neles é de 5 Vcc.

Desenvolvimento do *software* Auto-Venturi

Para se trabalhar com os dados no microcomputador, utilizou-se o *software* Delphi 3 da Borland, para desenvolver um programa computacional de monitoramento de vazão denominado “Auto-Venturi”. Nele, os dados foram processados e enviados como dados de entrada para as equações de calibração estática e dinâmica do TDP.

Uma opção de informação fornecida pelo Auto-Venturi são dados de diferencial de pressão existentes no medidor Venturi. Em outra opção, o Auto-Venturi fornece os dados de vazão, tanto para

o processo de calibração estática quanto o processo dinâmico.

O *software* Auto-Venturi (Figura 4) fornece as seguintes opções como dados de entrada: diâmetro maior (D); diâmetro da “garganta” (d), coeficiente de descarga (cd), parâmetros da equação linear de calibração do TDP, além do número total de vazões instantâneas tomadas para o cálculo da vazão média. Como dados de saída são apresentados: vazões média ocorrente no medidor Venturi ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ e L s^{-1}); vazões instantâneas, a constante k da eq. (3) e o valor do diferencial de pressão (DH).

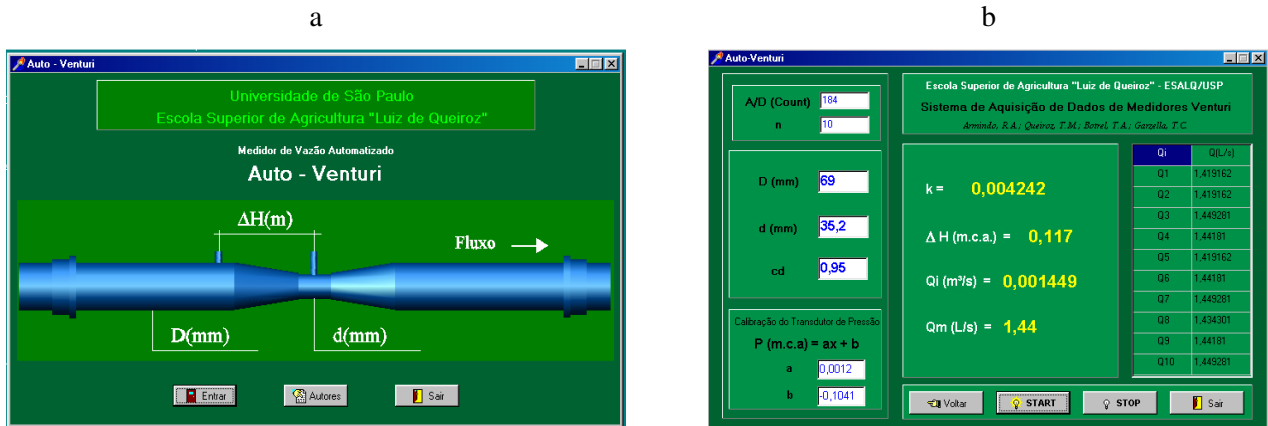


Figura 4. Imagem das telas de abertura (a) e trabalho (b) do *software* desenvolvido Auto-Venturi.

As vazões disponibilizadas pelo Auto-Venturi foram comparadas às vazões estimadas pelo processo não automatizado de medida dos piezômetros. Ressalta-se que a vazão apresentada pelo Auto-Venturi se dá por um valor médio, calculado com base em dez valores instantâneos. A vazão é então estimada em função da diferença de pressão existente entre as tomadas de pressão do medidor Venturi e pode ser descrita pela eq. (3).

$$Q = k\sqrt{DH} \quad (3)$$

em que:

Q : vazão, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

k : constante que engloba as variáveis conhecidas no medidor Venturi, $\text{m}^{5/2} \text{s}^{-1}$;

DH : diferencial de pressão, mca.

Para validar as vazões fornecidas pelo Auto-Venturi nos dois processos de calibração, valeu-se dos seguintes indicadores estatísticos: o coeficiente de correlação de Pearson (r) para avaliar a precisão ou o grau de repetibilidade dos valores fornecidos pelo Auto-Venturi, como utilizado por Jerszurki e Souza (2010) e Armindo et. al (2010); o índice de concordância de Willmott (d), que avalia a exatidão

do método proposto, ou seja, o quão distante estão os valores estimados em relação aos observados (WILLMOTT et. al, 1985); e o índice de desempenho de Camargo (C), dado pelo produto entre os dois índices anteriores. A recomendação é que valores de C maiores que 0,80 indicam alto grau de precisão e exatidão dos dados testados em relação aos valores observados (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Confrontando-se os resultados obtidos do processo de calibração estática e dinâmica do TDP, determinou-se as equações de calibração que, posteriormente foram inseridas no algoritmo de programação do Auto-Venturi (Figura 5).

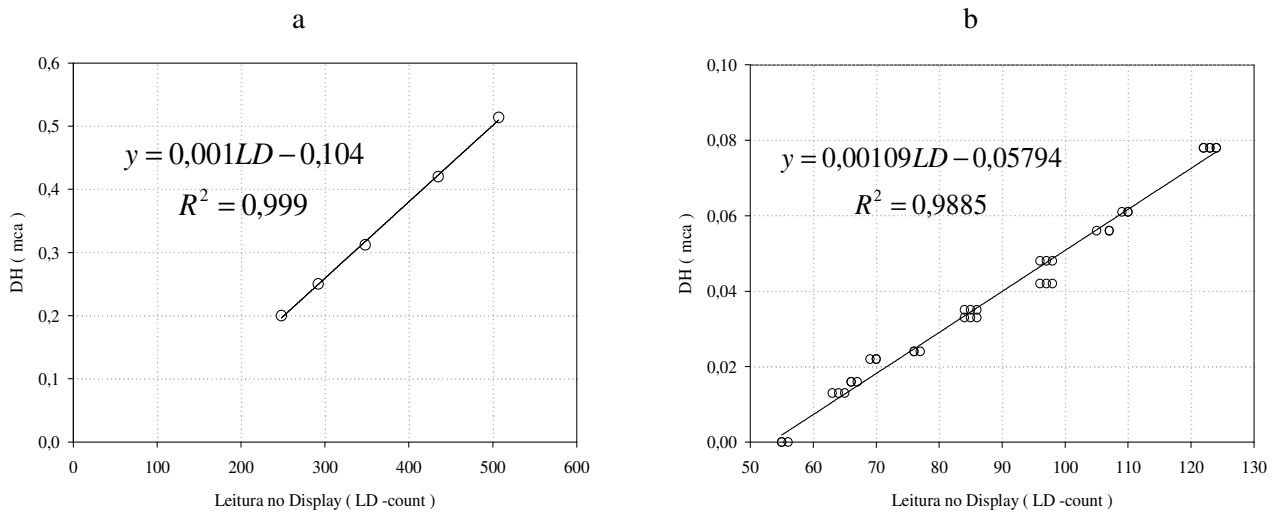


Figura 5. Funções e equações lineares de calibração do transdutor diferencial de pressão. a) calibração estática; b) calibração dinâmica.

O fenômeno da histerese nos dois processos de calibração do TDP não foi significativo, o que permitiu a utilização da média dos valores para regressão. Depois de inseridas as equações de calibração e da estabilização do fluxo de água na estrutura utilizada, o sistema de aquisição de dados

Auto-Venturi foi iniciado identificando-se, em tempo real, o valor de vazão existente no medidor Venturi. Agrupando-se os dados e por regressão, determinaram-se as equações de ajuste da vazão em função do diferencial de pressão (DH), tanto para calibração estática quanto dinâmica (Figura 6).

a - Calibração Estática

b - Calibração Dinâmica

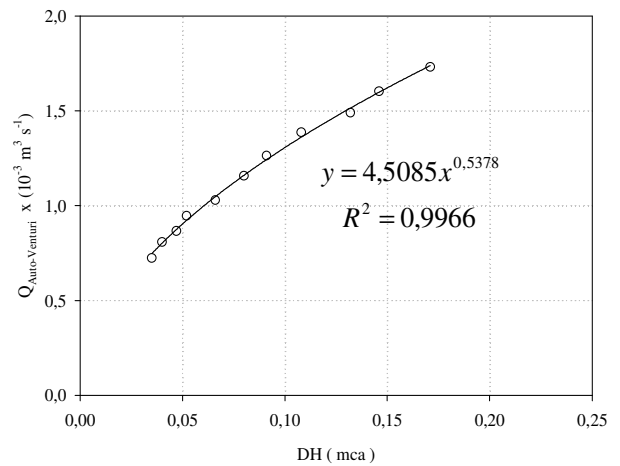
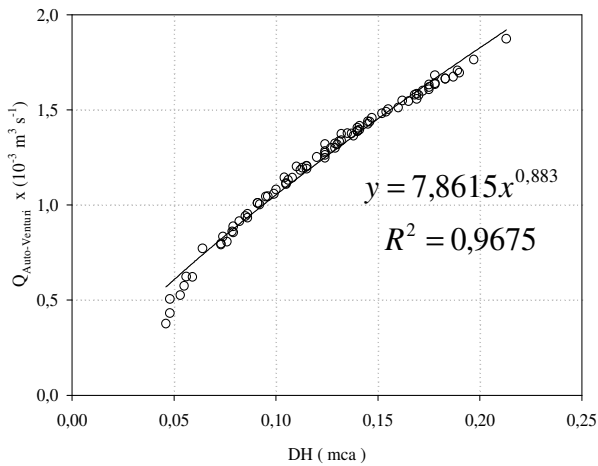


Figura 6. Funções potenciais de vazão versus pressão.

Calculou-se a constante k da eq. (3), obtendo-se o valor igual a $0,004242 \text{ m}^{5/2} \text{ s}^{-1}$, assim, com os valores de k e DH , estimando as vazões

existentes no medidor Venturi e, posteriormente, esses valores de vazão foram comparadas pelo software Auto-Venturi em duas retas 1:1. (Figura 7).

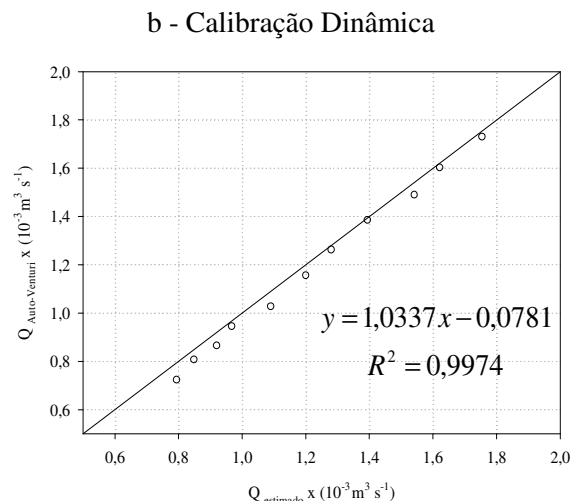
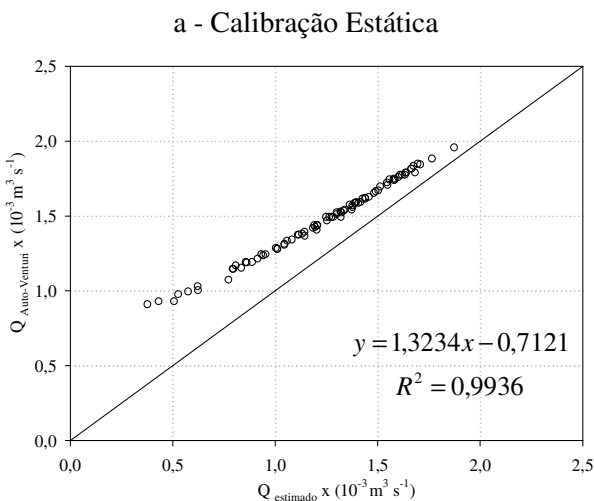


Figura 7. Comparação entre valores disponibilizados pelo Auto-Venturi e os valores estimados.

Analisando-se matematicamente a equação de calibração dinâmica, observa-se que o coeficiente angular tende a um, enquanto o coeficiente linear tende a zero. Para o processo de calibração estática não ocorreu o mesmo. Nota-se que as vazões fornecidas pelo sistema Auto-Venturi, com calibração estática, apresentaram excelente precisão indicadas pelo coeficiente de correlação de Pearson (Tabela 1). Entretanto, o mesmo sistema não apresentou excelente exatidão em seus dados, uma vez que o índice de desempenho de Camargo (C) apresentou um valor menor que 0,85 sendo menor que o valor recomendado por Camargo e Sentelhas (1997). Esse valor foi ocasionado pela baixa exatidão do sistema medida pelo coeficiente de Willmott (d).

Tabela 1. Índices estatísticos de ajuste

Calibração	equação	r	d	C
Estática	Linear	0,9968	0,8483	0,8456
Dinâmica	Linear	0,9987	0,9957	0,9943

As vazões apresentadas pelo sistema Auto-Venturi, com calibração dinâmica, apresentaram excelente precisão (r) e exatidão (d), já que o índice de desempenho de Camargo (C) apresentou valor maior que 0,85. O custo total de montagem do sistema de aquisição de dados foi de R\$ 154,00, totalizados em R\$ 59,00 para o microcontrolador; R\$ 60,00 para o transdutor diferencial de pressão; e R\$ 35,00 para o par de módulos de rádio frequência. O custo do microcomputador utilizado foi desconsiderado por se tratar de um item considerado obsoleto, por atualmente não ser mais encontrado no mercado.

Os resultados mostraram ainda que as leituras realizadas no sistema automático de aquisição de dados, Auto-Venturi, possui maior precisão que leituras humanas realizadas nos tubos piezômetros. O ser humano é sensível a erros de leitura sendo assim limitado, em muitas vezes, a erros devido à variação da carga hidráulica. Ademais a automação permite maior grau repetibilidade das leituras.

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos e considerando-se as condições em que foram realizados os testes de laboratório conclui-se que:

Para a construção de medidores de vazão automatizados, que se baseiam em medidas de pressão, deve-se realizar a calibração do transdutor diferencial de pressão de maneira dinâmica.

O sistema de aquisição de dados desenvolvido Auto-Venturi (*software e hardware*) se mostrou viável tecnicamente e apresentou custo relativamente baixo.

A transmissão dos dados de vazão via rádio frequência se mostrou possível e necessária apresentando excelentes índices de precisão e exatidão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem 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) e em especial ao Luís, funcionário do Laboratório de Hidráulica – ESALQ - USP.

ABSTRACT: Asking for an instrument, of easy construction and low materials costs, to determinate flow rate by software and hardware, the aimed of this work was to project and evaluate a data acquisition automation system to estimate the flow rate existent in a Venturi instrument using frequency radio communication. This work carried out in the Hydraulic Laboratory in Rural Engineer Department in “Luiz de Queiroz” College of Agriculture at Sao Paulo University, in Piracicaba campus. It was used a Venturi instrument composed by a principal diameter (D) of 0,069 m and a lower diameter (d) of 0,0352 m. The pressure transductor calibration carried out by a static way (without flowing rate in the calibration process) and dynamic way presenting difference between these two calibration processes. Computations algorithms were developed in “Tbasic” language and the software called “Auto-Venturi” was designed using Borland Delphi 3 program. According to the results, the data acquisition automation system, with dynamic calibration, had excellent precision and accuracy indices, presenting satisfied results. However, the static calibration system had excellent precision indices and an unsatisfying accuracy isn’t indicated to this process.

KEY-WORDS: Flow Rate Instrument. Frequency Radio Transmission. Automation.

REFERÊNCIAS

ARMINDO, R. A.; BOTREL, T. A.; DOURADO NETO, D.; MOURÃO G. B. Avaliação do sistema de pulverização com funcionamento intermitente, acoplado ao pivô central, Notliada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 26-32, 2009.

ARMINDO, R. A.; BOTREL, T. A.; GARZELLA, T. C. Flow rate sprinkler development for site-specific irrigation. **Irrigation Science**, Springer-Verla, v. 29, n. 3, p. 233-240, 2010.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, p. 89-97, 1997.

CAMARGO, A. P.; BOTREL, T. A.; VIEIRA, R. G.; PINTO, M. F.; VELLAME, L. M. Load cell adoption in an electronic drag force flowmeter. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 68, n. 3, p. 275-284, 2011.

Del PINO, M. IA. I. T. Sistema Computacional de auxílio ao desenho, simulação e desenvolvimento de projetos de irrigação localizada. 2005. 142p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

DENÍCULI, W. Medidores de Vazão tipo orifício. Viçosa: UFV, 1990. 43p.

- IBARS, R. A. F. Desenvolvimento e avaliação de tubos venturi para a medição de vazão. 2004.61p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Curso de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. Estimativa da temperatura média diária do ar em distintas regiões brasileiras empregando métodos alternativos. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 11, n. 5, p. 407-416, 2010.
- QUEIROZ, T. M.; BOTREL, T. A. ; FRIZZONE, J. A. Desenvolvimento de software e hardware para irrigação de precisão usando pivô central. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 44-54, 2008.
- SOUSA, M. B. A.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, J. G. F.; VICENTE, M. R.; VIEIRA, G. H. S.; SOARES, A. A. Manejo da irrigação na cafeicultura irrigada por pivô central nas regiões norte do Espírito Santo e extremo sul da Bahia. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 33, n. 1, p. 23-31, 2011.
- VILELA, L. A.; DOURADO NETO, D.; BOTREL, T. A. Desenvolvimento de um sistema de pulverização acoplado a pivô central. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, p. 311-315, 2004.
- WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.