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

Desenvolvimento de um sistema para ensaios de molinetes

Ezequiel Saretta

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Agrícolas**

**Piracicaba
2013**

Ezequiel Saretta
Engenheiro Agrônomo

Desenvolvimento de um sistema para ensaios de molinetes

Versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2013**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Saretta, Ezequiel

Desenvolvimento de um sistema para ensaios de molinetes / Ezequiel Saretta.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.
77 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Automação 2. Eletrônica 3. Equipamentos agrícolas 4. Hidrometria 5. Inovações Tecnológicas I. Título

CDD 630.2375
S247d

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

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, por sempre me guiar pelos caminhos que passei e, nestes, sempre ter encontrado pessoas que me ajudaram.

A meus pais, José e Terezinha, pela minha educação, pela confiança e apoio nos momentos difíceis. Agradeço-lhes por terem acreditado em meus sonhos e me apoiado em tudo que precisei para sua realização.

Aos meus irmãos e toda a minha família, sempre presentes nos momentos importantes, preenchendo-os com muita alegria, apoio e felicidade, em especial naquele período de graduação e neste de Pós-Graduação.

A todos os amigos, sempre presentes em minha vida e que, mesmo distantes, apoiam-me e preenchem os momentos com muita alegria. Agradeço em especial a todos os colegas de Pós-Graduação pela amizade, companheirismo e troca de experiências.

Ao amigo Antonio Pires de Camargo, pelos conhecimentos transmitidos desde a época de estágio, pela ajuda na elaboração deste trabalho, especialmente no desenvolvimento dos *softwares*. Sou muito grato pela sua preocupação com meu bem estar, além de toda paciência, atenção e dedicação em todos os momentos que necessitei.

A ESALQ/USP, pela oportunidade de aperfeiçoamento e aprendizado.

Ao Professor Tarlei Arriel Botrel, pela orientação, atenção e dedicação às minhas necessidades em todos os momentos desta convivência.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos durante este curso de mestrado.

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).

A Universidade do Estado de Santa Catarina pela graduação.

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

A todos os professores que não mediram esforços em prol da minha formação, em especial àqueles do PPG-Engenharia de Sistemas Agrícolas durante este curso de mestrado.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas/ESALQ, pela ajuda durante o curso de mestrado e pelas sugestões para a execução desta pesquisa.

E a todos aqueles que sempre me 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
LISTA DE SÍMBOLOS	17
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Medição de vazão em cursos d'água	21
2.2 Molinetes hidrométricos.....	23
2.3 Calibração de molinetes	26
2.4 Incerteza e erro em medições	28
2.5 Automação e eletrônica	33
2.5.1 Comunicação serial e transmissão de dados.....	35
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	39
3.1 Estruturas hidráulica e mecânica	39
3.2 Módulos de controle do sistema de tração (MCT) e de aquisição de dados (MAD)	41
3.3 Lógica de controle do sistema	45
3.4 Ensaios de calibração	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1 Velocidade de deslocamento	53
4.2 Aquisição de dados e ensaios de calibração	56
CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
CONCLUSÕES	67
REFERÊNCIAS	69
APÊNDICES	73

RESUMO

Desenvolvimento de um sistema para ensaios de molinetes

Molinetes hidrométricos são instrumentos utilizados para estimar a velocidade da água em cursos d'água, tais como rios e canais. Tradicionalmente se utiliza esses equipamentos no monitoramento da vazão dos rios de bacias hidrográficas, sendo uma informação importante para a análise das concessões de outorga de direito de uso dos recursos hídricos. Com isso, evidencia-se a necessidade da tomada de medidas exatas e precisas, o qual deve ser realizado por meio da calibração periódica dos medidores. Todavia, necessita-se de ampla estrutura técnica de suporte para realização deste procedimento, o que justifica a carência de instituições que realizem calibração de equipamentos. Com o avanço da eletrônica e do desenvolvimento de sistemas automáticos de menor interação humana, fundamenta-se a busca pelo aperfeiçoamento da estrutura de realização da calibração de molinetes, visando automatizar o procedimento laboratorial e aumentar a exatidão e precisão na obtenção da equação de calibração. De acordo com o exposto, o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema automatizado para ensaios de molinetes. O sistema desenvolvido foi composto por: um carrinho de reboque; um canal trapezoidal com talude 1:1, 12 m de comprimento, 2,30 m de largura e 0,72 m de profundidade; um motor de passo, comandado por um *driver* e um microcontrolador, constituindo o módulo de controle do sistema de tração (MCT); e, de um microcontrolador de medição e processamento de dados, constituindo o módulo de aquisição de dados (MAD). Adicionalmente desenvolveu-se um programa no computador para interação amigável com o usuário, no qual se exibiam as informações do ensaio, com opções para escolha da velocidade de deslocamento e para armazenamento dos dados obtidos. Avaliou-se o sistema proposto com o ensaio laboratorial para velocidades do carrinho de reboque entre 0,07 e 2,13 m s⁻¹, sendo realizadas dez repetições por velocidade avaliada. Aplicou-se o teste estatístico ESD (*Generalized Extreme Studentized Deviate*) para se detectar a presença de *outliers* nos conjuntos de dados para cada velocidade medida, sendo os mesmos descartados na elaboração da equação de calibração do molinete. Os resultados mostraram que a máxima velocidade de deslocamento do carrinho de reboque foi de 2,13 m s⁻¹. Ao se avaliar o sistema automático de calibração de molinetes na faixa de velocidade estudada, verifica-se que o mesmo proporcionou a obtenção de dados precisos, com uma incerteza expandida de 1,45% na velocidade e coeficientes de determinação da equação de calibração superiores a 90%. Dessa forma, pode-se concluir que o sistema desenvolvido, operando nas condições definidas acima, apresentou um bom desempenho na calibração de molinetes e permitiu atingir os objetivos da pesquisa.

Palavras-chave: Hidrometria; Eletrônica; Automação; Tecnologia

ABSTRACT

Development of a system for testing current meters

The stream flow can be determined by multiplying the area of the cross section and the velocity of the flow at this cross section. A current meter is a most common instrument that has been used to measure the velocity of flowing water for over a hundred years. The current meters are calibrated by moving the meter at known velocities in a towing tank with still water and recording the rates of revolution of the rotors. The current meter calibrations are normally expressed as a linear equation. Although this method provides high accuracy, it requires large and specialized structures for calibrations. Thus, this research proposed the development of a system to test current meters using a channel with trapezoidal side slope 1:1, 12 m length, 2.30 m width and 0.72 m depth and the rotor of the current meter remained immersed in a water depth of about 0.30 m. The current meter was mounted on a tow cart that was supported on wheels and guided by rails above the channel with known velocities. A step motor performed the movement of the tow cart and it was controlled by a driver and a microcontroller, forming the Driver Control Module (DCM). Another microcontroller was used to record the rates of revolution of the rotor of the current meter on the Data Acquisition Module (DAM). The modules worked responding to requests from a computer by wire serial communication (DCM), or wireless using radio frequency modules (DAM). A computer application displayed information about the test to the user with options to choose velocity and save data. The highest velocity obtained in the towing car was about 2.10 m s^{-1} and the highest uncertainty was 1.45%. A vertical-axis type current meter (Price pygmy meter) was used because it generates one signal per revolution. However, the data sets obtained from DAM exhibited dubious values from the average; therefore, a statistical test was used to detect the presence of outliers. The Extreme Studentized Deviate (ESD) “many outliers” procedure provided the criteria for outlier’s detection and elimination, improving the average of angular velocity of the current meter. So, the equations obtained for the current meter showed high precision in estimating the angular velocity. The system developed was effective in performing the tests and the modules showed high reliability in responding to requests from the computer, actuating on the current meter movement (DCM) or recording data (DAM).

Keywords: Hydrometry; Electronics; Automation; Technology

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Molinetes hidrométicos: tipos europeu (a) e americano (b).....	24
Quadro 1 - Principais características do microcontrolador PIC 16F876A	35
Figura 2 – a) Sistema de tração e de trilhos montados sobre o canal trapezoidal de alvenaria; b) detalhe da instalação do motor, das polias de movimentação e do cabo de aço da tração; e c) Quadro de comando dos acionamentos do motor de passo	39
Figura 3 – Diagrama do Módulo de Aquisição de Dados (MAD) e do Módulo de Controle do Sistema de Tração (MCT) empregado no controle do sistema de ensaios de molinetes.....	42
Figura 4 – Circuitos eletrônicos do Módulo de Controle do Sistema de Tração (MCT) (a); e do Módulo de Aquisição de Dados (MAD) (b).....	42
Figura 5 – a) Molinete utilizado, com detalhe para a distância entre os contatos elétricos; b) Diagrama elétrico esquemático do tratamento de sinais enviados pelo molinete	45
Figura 6 – Modelos de funções utilizados para cálculo do tempo de meio pulso conforme a velocidade de ensaio do molinete	47
Figura 7 – Equação característica da velocidade máxima possível de ser atingida com os menores tempos de meio pulso.....	53
Figura 8 - Equações gerais que relacionam o tempo de meio pulso com a velocidade de deslocamento	54
Figura 9 – Velocidade angular do molinete para a velocidade de deslocamento de $0,10 \text{ m s}^{-1}$	57
Figura 10 – Velocidade angular do molinete para a velocidade de deslocamento de $0,10 \text{ m s}^{-1}$, após a exclusão dos <i>outliers</i> e das quatro primeiras observações	58
Figura 11 – Equações ajustadas do molinete sem ajustes no contato elétrico.....	59
Figura 12 – Equações ajustadas do molinete após ajustes no contato elétrico e com os <i>outliers</i>	60
Figura 13 – Equação ajustada do molinete após ajustes no contato elétrico e sem os <i>outliers</i>	61
Figura 14 – Equação ajustada do molinete após ajustes no contato elétrico, sem os <i>outliers</i> e sem as observações de maior velocidade de deslocamento.....	61
Figura 15 – Curvas de sensibilidade obtidas para o molinete	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tamanho de hélice dos molinetes europeus e respectivas velocidades de medição	25
Tabela 2 – Critérios para interpretação do desempenho da equação de acordo com o valor do coeficiente de confiança	51
Tabela 3 – Análise de incerteza da velocidade de deslocamento do molinete	55
Tabela 4 – Número e proporção de <i>outliers</i> conforme a velocidade de deslocamento do molinete	58

LISTA DE SÍMBOLOS

- v – velocidade de deslocamento do molinete
 r – velocidade angular sem *outliers*
 t – tempo entre meio pulso informado ao Módulo de Controle do Sistema de Tração (MCT) pelo computador
 ms – milissegundo
 $m\ s^{-1}$ – metros por segundo
 d – índice de concordância de Willmott
 c – coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas
 $\bar{v}$ – velocidade média de deslocamento do molinete medida no ensaio
 v_s – velocidade selecionada pelo usuário no *software de controle*
 v_i – velocidade de deslocamento do molinete em cada repetição i
 $S^2(v_i)$ – variância experimental das i repetições de velocidade
 $S(v_i)$ – desvio-padrão experimental das i repetições de velocidade
 $S^2(\bar{v})$ – variância experimental em relação à média das i velocidades
 $S(\bar{v})$ – desvio-padrão experimental em relação à média das i velocidades
 $U(\bar{v})$ – incerteza padrão em relação à média das i velocidades
 $U(\bar{v})_{exp}$ – incerteza expandida em relação à média das i velocidades
 r_o – velocidade angular com *outliers*
 r – velocidade angular sem *outliers*
 k – número de *outliers*
 n – número de dados
 $\bar{r}_o$ – velocidade média angular com *outliers*
 $\bar{r}$ – velocidade média angular sem *outliers*

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de medição de vazão tem evoluído rapidamente nas últimas décadas. Muitos fenômenos físicos há muito tempo conhecidos, como a óptica, acústica e o eletromagnetismo, têm sido utilizados para o desenvolvimento de dispositivos medidores de vazão. No entanto, o molinete ainda é o instrumento mais utilizado para medição da vazão de cursos de água, estando nesse posto por mais de 100 anos.

O uso racional da água tornou-se uma preocupação mundial há algumas décadas, pois é um recurso que se torna cada vez mais escasso no que tange aspectos ligados à qualidade e quantidade disponível para uso. Isso se deve a poluição dos recursos hídricos, ao crescimento populacional desordenado e sem planejamento e ao aumento do consumo de água em todos os setores. Esses fatos levaram à criação de programas regionais e nacionais para uso racional da água, tanto a nível urbano quanto rural.

Os bancos de dados das agências e órgãos governamentais, que tratam dos processos de concessão de outorga de uso da água, dependem dos estudos de vazão dos corpos d'água em questão. Esses estudos passam fundamentalmente pela série histórica de estimativa da vazão, sendo o método área-velocidade o mais utilizado.

Vários equipamentos podem ser utilizados no método área-velocidade, tendo destaque atualmente o *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP), que mede a velocidade das partículas – bolhas de ar ou sólidos em suspensão – dissolvidas na água em movimento. Neste caso, determina-se a velocidade média do fluxo por meio da relação entre a velocidade relativa das partículas em suspensão e a velocidade do equipamento. A área é obtida pela reflexão de ondas específicas no fundo do rio. Esses equipamentos tiveram muito estudo para seu desenvolvimento, e apresentam alta precisão, além da rapidez nas medições. Todavia, possuem o inconveniente de apresentarem alto custo de aquisição, tornando-se, por vezes, inacessíveis.

Para o método área-velocidade o molinete hidrométrico é o equipamento mundialmente aceito como o padrão para estimativa da velocidade da água, determinada por meio de uma equação própria. Esta equação relaciona a velocidade da água com a velocidade angular da hélice do molinete e geralmente é linear. Naturalmente, os coeficientes de calibração são alterados após certo tempo, sendo as principais causas: o atrito interno, a falta de lubrificação, o desgaste dos constituintes e a utilização inadequada do equipamento. Portanto, existe a necessidade de se fazer a calibração do molinete periodicamente.

A aferição ou calibração dos molinetes é feita em tanques com água parada, no qual o

equipamento é movimentado sob velocidade conhecida e se mede a velocidade angular da hélice. Há necessidade de se ter uma estrutura grande (canal de 60 a 100 m) para se conseguir velocidades de cerca de 10 m s^{-1} e abranger toda a faixa de medição do equipamento. Apesar dos poucos sistemas de calibração existentes no mundo atingirem essa velocidade, o principal problema está relacionado com as baixas velocidades – cerca de $1,0 \text{ m s}^{-1}$ – onde apresentam menor precisão. Essas estruturas são caras e utilizadas somente para essa finalidade, pois possuem diversos componentes para deslocar o molinete e, principalmente, para a aquisição dos dados da velocidade angular.

Com o avanço da eletrônica e o emprego cada vez mais acentuado da automação nos procedimentos laboratoriais, torna-se factível aplicar a tecnologia existente para aperfeiçoar a aquisição de dados, com a minimização dos erros e da interação humana. Adicionalmente, faz-se necessário a elaboração de um sistema de calibração estruturalmente menor, a fim de possibilitar a sua adoção por um maior número de instituições, facilitando o acesso desse recurso pelos usuários.

Diante desse cenário, esta pesquisa propõe o desenvolvimento de um sistema mais simples para os ensaios de molinetes, que facilite o gerenciamento dos ensaios, tanto em relação ao deslocamento do molinete, quanto à aquisição de dados. Desse modo, o objetivo do presente trabalho foi construir um sistema que apresente confiabilidade no gerenciamento dos ensaios, utilizando-se a eletrônica e a computação como ferramentas de suporte visando facilitar o procedimento laboratorial, com minimização da interferência humana, e possibilitar maior exatidão e precisão na obtenção da equação de calibração para velocidades menores que $2,0 \text{ m s}^{-1}$.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Medição de vazão em cursos d'água

Segundo Sousa Pinto (1976) e USGS (1982) a medida de vazão num curso d'água pode ser feita das seguintes maneiras:

- a) Diretamente;
- b) Pelo nível da água;
- c) Por processos químicos;
- d) Pela área e velocidade.

Esta última é a mais utilizada (denominado método área - velocidade), sendo que nesse método a vazão (Q) é medida pelo produto da velocidade média da água (v) e da área da seção (s), ou seja, $Q = S v$. Para as medições de velocidade, o molinete é o instrumento mais utilizado (MEINZER, 1942; USGS, 1982; VENNARD e STREET, 1978).

A velocidade da água em cursos de água (rios, principalmente) varia entre limites muito estreitos, comumente $0,5$ a 2 m s^{-1} . Com isso, deve-se tomar cuidado na estimativa da área da seção, pois a vazão depende essencialmente da medida confiável desse componente (SOUSA PINTO, 1976).

Os métodos de medição de vazão mais comumente utilizados consistem em se medir as profundidades (h_i) em alguns pontos da seção transversal, as distâncias horizontais (d_i) entre esses pontos e a velocidade média (v_i) em cada vertical considerada. Uma vez conhecidas cada uma dessas grandezas, calcula-se a vazão de toda a seção pelo somatório das vazões individuais (q_i), ou seja, $Q = \sum q_i = \sum v_i S_i$, onde v_i é a velocidade média da água através do elemento de área S_i (CHEVALLIER, 2009; MEINZER, 1942; USGS, 1982; VENNARD E STREET, 1978).

A profundidade pode ser medida diretamente por meio de uma haste graduada ou pelo cabo de aço que sustenta o molinete. Para medir a distância horizontal entre as margens do rio e entre os pontos de medição (cada uma das verticais de medida da velocidade) pode-se utilizar um cabo graduado estendido, se a largura não for muito grande, ou por meio de equipamentos para medição, para as grandes distâncias, como por exemplo, equipamentos de medição à laser.

Brikowski (2011) descreve uma metodologia para se determinar a vazão de um rio, através da medição de sua área e velocidade. Segundo este autor a maneira mais simples de se determinar a área transversal é medir a profundidade a partir da superfície da água em distâncias regulares. Desenhando-se essas medidas de profundidades da água e a superfície da água em um papel milimetrado, facilmente se determina a área através da contagem dos

quadrados que ficam dentro do desenho. Ou, de outra maneira, desenhando-se uma série de retângulos dentro do desenho e calculando-se a área de cada um, determina-se a área transversal do rio.

A velocidade da água varia no tempo e no espaço, sendo que, em uma seção transversal de um curso, decresce da superfície para o fundo, e do eixo para as margens. Por isso, há certa dificuldade na sua medida. A distribuição das velocidades ao longo de uma seção costuma ser representada pelo traçado das curvas isotáqueas (de igual velocidade). Num trecho reto e regular do curso de água, as curvas isotáqueas são contínuas, regulares e acompanham a forma da seção (GARCEZ e ALVAREZ, 2009).

Em relação à velocidade máxima, verifica-se, na prática, que muitas vezes não ocorre na superfície. Além disso, a natureza do perímetro influencia a distribuição da velocidade, de maneira que, para um perímetro mais rugoso, a velocidade máxima é mais profunda, a velocidade no fundo é mais reduzida e a curva de distribuição de velocidades ao longo da vertical, mais encurvada. Em um grande número de casos, as velocidades máximas ocorrem a 20% da profundidade, a partir da superfície, e as médias a cerca de 60% (CHEVALLIER, 2009; FOX e McDONALD, 1992; GARCEZ e ALVAREZ, 2009; LEOPOLDO e SOUSA, 1979).

Com a utilização de molinetes pode-se medir a velocidade em vários pontos da vertical, sendo o número destes limitado pela distância do lastro ao aparelho; pelo contato da hélice com o leito do curso d'água; ou, ainda, na superfície do curso d'água, pela impossibilidade da hélice sair da água (LEOPOLDO e SOUSA, 1979; SOUSA PINTO, 1976).

O número de verticais a ser adotado deve ser fixado em função da forma da seção e da distribuição de velocidades. Quando a velocidade ou vazão da água é alta o número de pontos de medição deve ser aumentado. Assim, o espaçamento entre as verticais não é necessariamente fixo, devendo-se proceder algumas medições preliminares pelo processo dos pontos múltiplos, descrito a seguir, e fazer a escolha com base no traçado das isotáqueas.

Naturalmente não são feitas infinitas medidas de velocidade entre esses extremos. Existem quatro processos principais normalmente utilizados (SOUSA PINTO, 1976):

- a) Pontos múltiplos;
- b) Dois pontos;
- c) Um ponto;
- d) Integração.

O primeiro consiste em realizar uma medida no fundo (0,15 m a 0,20 m do leito do rio), uma na superfície (0,10 m de profundidade) e, depois, entre esses dois extremos, em

vários pontos que permitam um bom traçado da curva de velocidades em função da profundidade. A velocidade média em cada vertical é obtida dividindo-se a área do diagrama de velocidades pela profundidade.

Pelo segundo processo se encontra a velocidade média de uma vertical pela média das velocidades a 20% e 80% de profundidade, a partir da superfície de água (FOX e McDONALD, 1992; USGS, 1982). Atualmente é o mais difundido, apesar de ser limitado a profundidades maiores que cinco vezes a distância entre o eixo do aparelho e o leito do rio (cerca de 1 m). Quando essa condição não for satisfeita, será usado o processo do ponto único, que consiste em medir a velocidade a 60% da profundidade, a partir da superfície. Esse valor é aproximadamente igual à velocidade média.

Pelo processo de integração se calcula a velocidade média diretamente, entretanto só pode ser utilizado com molinetes de eixo horizontal (modelo europeu). Para isso, desloca-se o aparelho na vertical com velocidade constante e se anota a profundidade total, o número de revoluções da hélice e o tempo para chegar até a superfície. Segundo o USGS (1982) este método não é utilizado para molinetes de eixo vertical, pois o movimento vertical afeta as medidas de velocidade angular.

A constante medição do nível de rios com réguas linimétricas e das velocidades do fluxo de água para aquele nível possibilita construir um gráfico, para aquele ponto do rio. Esse gráfico é denominado curva-chave e relaciona a vazão e o nível da água (BRIKOWSKI, 2011; CHEVALLIER, 2009; MEINZER, 1942). Depois de se obter a curva-chave, basta se medir o nível de água do rio e, pela curva-chave, encontra-se a vazão do rio de maneira direta. No entanto, devido, principalmente, ao assoreamento dos rios, a área da seção é alterada. Por isso, de tempos em tempos deve-se construir uma nova curva-chave, necessitando-se utilizar o molinete.

2.2 Molinetes hidrométricos

Apesar dos avanços tecnológicos nos equipamentos de medição de vazão, o molinete ainda mantém a liderança centenária quanto a sua adoção (JOHNSTONE, 2008). Existem dois tipos fundamentais de molinetes: o tipo europeu, de hélice, com eixo horizontal (Figura 1a); e o tipo americano, de conchas, com eixo vertical (Figura 1b), menos preciso que o europeu, contudo, mais robustos e resistentes que aqueles (GARCEZ e ALVAREZ, 2009; SOUSA PINTO, 1976; USGS, 1982).

Dependendo do tipo de molinete, o elemento que fornecerá a velocidade angular imposta pelo fluxo de água pode ser do tipo hélice ou concha, apoiada sobre rolamentos

esféricos de aço inoxidável. Alguns modelos possuem uma chave magnética no eixo da hélice: um ímã permanente e um sensor, montados de tal forma que, a cada revolução, fecha-se um circuito elétrico. Desse modo são produzidos pulsos a cada uma, cinco, dez ou vinte voltas realizadas, de acordo com a velocidade a ser medida. Esses pulsos são conduzidos por um fio até a superfície da água, onde são transformados em sinal luminoso ou sonoro ao operador. Assim, marca-se o tempo decorrido entre alguns sinais, de forma a se ter o número de revoluções por segundo.

Figura 1 – Molinetes hidrométicos: tipos europeu (a) e americano (b)

Existem modelos de molinetes que utilizam componentes eletrônicos para registro de dados (CHEVALLIER, 2009; MEINZER, 1942), ou exibição em *LCD* (*Liquid Cristal Display*), além da possibilidade de *interface* com computador por meio de conexão serial RS-232. Isso substitui fones de ouvido, cronômetro, blocos de anotação, entre outros, permitindo maior eficiência e rapidez nas medições da vazão de cursos de água. Segundo Garcez e Alvarez (2009) sistemas registradores conjugados com cronômetro podem diminuir erros na operação de medição.

Em alguns modelos atuais o usuário tem a possibilidade de manipular os dados no próprio instrumento de forma interativa. Adicionalmente, pode-se inserir a área da seção transversal do canal para se obter a vazão de forma direta, bem como de outras características hidráulicas, como coeficientes (coeficiente de rugosidade de Manning (n), por exemplo).

Quanto à sustentação da hélice ou concha dentro da água, podem-se encontrar aqueles suspensos por cabos e os sustentados por hastes verticais apoiadas no fundo do curso d'água. No primeiro caso, necessita-se de um lastro que o mantenha na profundidade desejada, com um ângulo de arraste pequeno. Além disso, um leme deve orientar o aparelho na direção da corrente. Esses lastros (de 15, 30, 50 ou 100 kgf) podem estar abaixo do aparelho ou fazer parte do corpo do mesmo, presos a um cabo, que é desenrolado por um guincho especial, muitas vezes incorporado a um sistema graduado para medir a profundidade de imersão. O emprego de molinetes sustentados por hastes possibilita maior segurança e garantia da correta

posição de medida, porém é limitado a profundidades máximas de 5 ou 6 m, pois para valores superiores as hastes devem ser robustas e longas, impossibilitando o uso prático (GARCEZ e ALVAREZ, 2009; SOUSA PINTO, 1976; USGS, 1982).

Os limites de medição de velocidade da água com molinete variam dependendo do modo de sustentação: $2,5 \text{ m s}^{-1}$ quando sustentado por haste, e 5 m s^{-1} com utilização de lastro, resultando numa precisão relativa de 5% na medida da vazão. A velocidade limite para cada tipo de hélice deve ser indicada na calibração do instrumento (CHEVALLIER, 2009; JOHNSTONE, 2008).

Além disso, para diferentes faixas de velocidades da água devem ser usados diferentes tamanhos de hélices (Tabela 1). Geralmente o fabricante disponibiliza três ou quatro tamanhos de hélice, construídas em alumínio, aço inox ou plástico, que são de fácil substituição no molinete.

Tabela 1 – Tamanho de hélice dos molinetes europeus e respectivas velocidades de medição

Diâmetro (mm)	Passo (mm)	Velocidade máxima (m s^{-1})	Velocidade de partida (m s^{-1})
125	500	10,0	0,04
125	250	10,0	0,025
100	125	5,0	0,025
80	125	4,0	0,04
50	500	5,0	0,05
50	250	2,5	0,03
50	100	1,0	0,025
50	50	0,5	0,025
30	100	1,0	0,03
30	50	0,5	0,03

Cada molinete, quando calibrado, recebe uma equação de calibração com o seguinte formato: $v = ar + b$, onde r é a velocidade angular, a e b constantes de calibração do aparelho, permitindo o cálculo da velocidade v (m s^{-1}) em cada ponto que o instrumento é imerso (CHEVALLIER, 2009; LEOPOLDO e SOUSA, 1979; MEINZER, 1942; SOUSA PINTO, 1976). As constantes a e b são fornecidas pelo fabricante do instrumento, podendo-se fazer seu aferimento de tempos em tempos. Pelo valor do coeficiente b (coeficiente linear) percebe-se que a reta não passa pela origem do plano cartesiano. Isso fica evidente ao se pensar que a hélice necessita de uma velocidade mínima da água para iniciar seu movimento (Tabela 1), que é igual a b (CAMNASIO e ORSI, 2011; JOHNSTONE, 2008).

Para velocidades menores que $0,3 \text{ m s}^{-1}$ a curva de calibração geralmente não é linear (ENGEL, 1999). Por isso se constrói um gráfico que relaciona a velocidade de deslocamento (V) com a relação entre velocidade angular e velocidade de deslocamento (r/v). Este gráfico possui uma curva denominada curva de sensibilidade, que representa o estado do equilíbrio da

velocidade angular do rotor para cada metro de distância que é movimentado.

Segundo Engel (1999) e Johnstone (2008) as curvas de sensibilidade mostram que a sensibilidade da grande parte dos molinetes é menor para menores velocidades, aumentando rapidamente com o aumento da velocidade da água. Por isso, as curvas de sensibilidade não são lineares nas baixas velocidades, mas para valores de velocidade da água acima de $0,7 \text{ m s}^{-1}$ a sensibilidade torna-se praticamente constante. Na velocidade máxima que o instrumento é capaz de detectar, a relação entre o número de rotações da hélice e a velocidade da água se torna constante e independente do aumento da velocidade da água. Cabe ressaltar que a curva de sensibilidade também permite identificar medidas discrepantes em relação ao padrão de atuação do medidor. Com isso, podem-se descartar certos pontos, checar o medidor e repetir a calibração.

Dentre os diversos problemas mais frequentes desses instrumentos, destacam-se aqueles relacionados com o atrito do eixo nos mancais, com os contatos elétricos, com a vedação e com o equilíbrio da hélice (GARCEZ e ALVAREZ, 2009).

2.3 Calibração de molinetes

A aferição dos molinetes é feita em tanques, calhas ou canais com água em repouso, deslocando-se o instrumento com velocidade constante, contando-se o número de revoluções do elemento na unidade de tempo. Para se movimentar o molinete, fixa-se o mesmo em um carrinho de reboque. A relação entre a velocidade da água e a velocidade angular é chamada de equação do molinete, em geral representada pela forma $V=ar + b$, como já descrito anteriormente (ENGEL, 1999; JOHNSTONE, 2008; MEINZER, 1942; SANCHEZ e ESPÍRITO SANTO, 1998; STAUBLI, 1988; STAUBLI e HEGLAND, 1982; USDI, 2001).

Para cada velocidade de deslocamento do molinete sobre o canal tem-se uma velocidade angular da hélice. Geralmente os molinetes são calibrados individualmente e esta calibração é normalmente expressa como uma equação linear (ENGEL, 1999). A aferição ou calibração periódica de medidores é essencial, pois o simples desgaste mecânico das peças é suficiente para modificar a equação em alguns meses de uso; além de possíveis e prováveis impactos, comprometendo a precisão das medições (CAMNASIO e ORSI, 2011). Segundo Herschy (1982) essas ocorrências muitas vezes são negligenciadas, justamente pelo fato de se ter que calibrar novamente o medidor. Esse autor sugere que uma inspeção nos molinetes seja realizada a cada 100 horas de utilização ou, concordando com o USDI (2001), no mínimo uma vez ao ano, devido às condições de operação, tais como o atrito dos componentes. Esse procedimento pode ser feito comparando-se suas medidas com as de outro molinete na mesma

posição de medição do anterior. Faz-se essa verificação para baixas, médias e altas velocidades de água, abrangendo toda a faixa de medição do instrumento. Caso as medidas entre os dois instrumentos forem muito diferentes, ou outro instrumento não estiver disponível para essa comparação, deve-se levar o mesmo a um laboratório para devida calibração.

Antes de se iniciar a calibração em cada velocidade, a água no tanque deve permanecer em repouso por cerca de 30 minutos, para que se consiga maior precisão nos resultados, especialmente para as baixas velocidades. Além disso, as mesmas peças de suporte da hélice ensaiadas (lastro, cabo de aço, etc.) devem ser combinadas durante o uso do molinete no campo, assegurando-se, assim, as condições para utilização daquela curva de calibração (STAUBLI, 1988). Porém, de acordo com Sanchez e Espírito Santo (1998), uma calibração em si já exige muito tempo, e se acaso se aguarde esse tempo para estabilização da água, a elaboração da equação do molinete irá requerer mais tempo; além de aumento do custo para o cliente.

A precisão da calibração depende, principalmente, da estabilidade do deslocamento do carrinho de reboque e da precisão das medidas de sua velocidade. Porém, para permitir um tempo adequado de estabilização do teste o tanque deve ser suficientemente grande. Isso pode ser um problema devido à dificuldade em se conseguir uma instalação que funcione em toda faixa de medição do medidor (SANCHEZ e ESPÍRITO SANTO, 1998).

Em razão do tempo elevado requerido nas calibrações e da disponibilidade de estrutura física para sua realização, iniciaram-se as calibrações de grupos de medidores. Isso reduziu o tempo de calibração e, principalmente, custos. A exigência que se tem é que os molinetes devem possuir características semelhantes, tais como: mesmo tipo, construção e mesma uniformidade de produção. Recomenda-se que o grupo contenha no mínimo 10 instrumentos, que podem ser novos, ou com boa manutenção, ou ainda, uma mistura dos dois. Empiricamente, obtém-se apenas uma única curva de calibração para o grupo de molinetes, que é a média do conjunto, e que pode apresentar um elevado nível de confiança. De qualquer forma, os cuidados que se deve ter com cada medidor independem do tipo de calibração realizada (CARTER e ANDERSON, 1963; HERSCHEY, 1982; USGS, 1982).

Camnasio e Orsi (2011) empregaram uma maneira mais prática para calibração de molinetes de eixo horizontal: utilizaram orifício de 247 mm de diâmetro e bocal de 105 mm de diâmetro, submersos, com nível de água constante, conforme a velocidade necessária, com saída do jato apontada para a hélice. Para um modelo com hélice de 120 mm calibraram com o orifício e, para outro modelo, com hélices de até 40 mm calibraram com bocal. Obtiveram

duas curvas para cada hélice calibrada: uma utilizando um medidor de vazão eletromagnético para mensuração da velocidade, e outra pela carga hidráulica sobre o orifício ou bocal, por meio da fórmula de Torricelli. Compararam a diferença relativa, em cada velocidade angular, entre: a) o medidor magnético e a equação original; b) Torricelli e a equação original; e c) o medidor magnético e Torricelli. Os maiores valores de diferença média obtida foram: a) entre o medidor magnético e a equação original, 20%; b) entre Torricelli e a equação original, 14,3%; e c) entre o medidor magnético e Torricelli, 3,6%. Com base nesses resultados, além do teste “F” para a variância, que indicou não haver diferença entre o medidor magnético e Torricelli, os autores sugeriram que a equação preexistente não possuía mais validade.

O método descrito no parágrafo anterior, por possuir simplicidade de execução e montagem, serve para uma checagem rápida da equação preexistente antes de seu uso no campo. No entanto, sob o ponto de vista dos autores do estudo, para que este método seja uma alternativa ao tanque com água em repouso, ainda é necessário melhorias para diminuir as diferenças entre os resultados.

2.4 Incerteza e erro em medições

Segundo o Bureau International des Poids et Mesures – BIPM (2008), A Focus for Analytical Chemistry in Europe – EURACHEM (2000) e o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO (2012), a declaração do resultado de uma medição somente é completa se contiver tanto o valor atribuído ao mensurando, quanto a incerteza de medição associada a este valor. A incerteza de medição é um parâmetro que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando, pois está associado ao resultado de uma medição, refletindo a falta de conhecimento exato do mensurando.

O resultado de uma medição após a correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos é, ainda, tão somente uma estimativa do valor do mensurando, devido à incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado no que diz respeito aos efeitos sistemáticos.

Incerteza caracteriza uma faixa de dispersão ou intervalo, e não um valor pontual. O termo incerteza significa dúvida, e em um sentido mais amplo, incerteza de medição significa dúvida sobre a validade do resultado da medição (BIPM, 2008). Este parâmetro leva a forma de um intervalo, e, se estimada por um procedimento analítico e um tipo de amostra definida, pode ser aplicada a todas as determinações descritas. Geralmente, o valor da incerteza não pode ser utilizado para corrigir o resultado de uma medição (EURACHEM, 2000).

É importante se distinguir os termos incerteza e erro, pois este último é a diferença entre um valor individual e o valor verdadeiro do mensurando, isto é, um valor pontual e não uma faixa. Usualmente o erro pode ser corrigido, quando aplicado um fator de correção adequado.

A incerteza padrão de medição $u(\bar{y})$ (Eq. 1) associada à estimativa de uma grandeza específica y , submetida à medição, é o desvio padrão experimental de y (Eq. 2). A incerteza de medição é avaliada de acordo com métodos de avaliação, os quais podem ser do tipo A ou do tipo B. O do tipo A é aquele em que se realiza uma análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a incerteza padrão é o desvio padrão experimental da média que se obtém de um procedimento de cálculo da média aritmética ou de uma análise de regressão adequada. A avaliação do tipo B é o método de avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a avaliação da incerteza padrão é baseada em algum outro conhecimento científico.

$$u(\bar{y}) = s(\bar{y}) \quad (1)$$

$$s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{S^2(y)}{n}} \quad (2)$$

em que,

$S^2(y)$ - variância de uma grandeza específica y ; e,
 n - número de medições.

A avaliação do tipo A da incerteza padrão pode ser aplicada quando tenham sido feitas várias observações independentes para uma das grandezas de entrada sob as mesmas condições de medição. Caso haja suficiente resolução no processo de medição haverá uma dispersão nos valores obtidos.

Para determinação da incerteza padrão se deve realizar, quando possível, mais que 10 medições, pois se for baixo ($n < 10$) a confiabilidade da avaliação de incerteza padrão do tipo A pode ser comprometida. Se o número de observações não puder ser aumentado, outros meios de avaliação da incerteza padrão devem ser considerados (INMETRO, 2012).

A incerteza de medição expandida $U(\bar{y})$ é obtida pela multiplicação da incerteza padrão $u(\bar{y})$ por um fator de abrangência k . Nos casos em que uma distribuição normal (Gaussiana) possa ser atribuída à grandeza submetida à medição e a incerteza padrão tenha um número suficiente de medições ($n \geq 10$), o fator de abrangência padronizado $k=2$ deve ser utilizado. A incerteza expandida atribuída à grandeza corresponde, portanto, a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95% dos valores obtidos, satisfazendo a

maioria dos casos de calibração (BIPM, 2008). Portanto, $U(\bar{y})$ é a faixa de dispersão em torno de $\bar{y}$ equivalente a um desvio padrão.

Nos certificados de calibração o resultado completo da medição deve ser fornecido na forma $(y \pm U)$, consistindo da estimativa y do mensurando e da incerteza expandida associada U (INMETRO, 2012; BIPM, 2008).

As medidas de grandezas realizadas por equipamentos sempre possuem erros, que podem ser agrupados em dois grandes grupos: os erros sistemáticos e os aleatórios. Erros sistemáticos são aqueles que persistem nas medidas e não podem ser considerados inteiramente aleatórios. Esses erros são causados por desvios da medida padrão do dispositivo, não sendo possíveis de serem eliminados apenas por repetições das medidas. Segundo USDI (2001) um exemplo desse tipo de erro nos molinetes é a falta de lubrificação do eixo da hélice, alterando as medições. Esse tipo de erro pode ser corrigido por manutenção ou troca de partes do medidor.

Equações de calibração podem conter erros sistemáticos, dependendo da qualidade de sua origem e da seleção do tipo de equação. Algumas formas de equação não se ajustam adequadamente aos dados de calibração, causando um erro sistemático na estimativa do valor verdadeiro, caso venham a ser utilizadas. Isso pode ser reduzido encontrando-se uma equação de melhor ajuste, ou utilizando-se mais de uma equação para cobrir mais de uma faixa de medidas do molinete (USDI, 2001).

Tratando-se de erros aleatórios, sabe-se que estes são aqueles que causam variações imprevisíveis nos valores medidos, acima e/ou abaixo do valor médio. Embora não seja possível compensar o erro aleatório de um resultado de medição, ele pode geralmente ser reduzido aumentando-se o número de observações (ABNT e INMETRO, 2003). Nos molinetes, exemplos destes fatores são: a existência de folga entre o eixo da hélice e os mancais, atrito entre os elementos móveis e fixos, e a instabilidade na geração de pulsos pelo circuito elétrico interruptor, entre outros.

Além dos erros sistemáticos e aleatórios, podem ocorrer “erros” grosseiros, que não são erros segundo a teoria dos erros, mas sim, enganos. Estes geralmente ocorrem pelo mau uso do sistema de medição, pela falta de prática ou distração do operador, bem como a escolha de escalas erradas ou erros de cálculo. Nos molinetes esses erros podem ocorrer na geração de pulsos: alguns modelos possuem um ressalto metálico no eixo que fecha o circuito elétrico; no momento do contato o circuito pode ser fechado diversas vezes, devido às imperfeições na superfície. Além disso, esses diversos pulsos podem ocorrer somente em uma

revolução da hélice e não em outra, principalmente quando a configuração está ajustada para gerar um sinal por revolução.

No caso de se utilizar molinetes, espera-se um erro na estimativa da velocidade que pode ir de 2%, quando as condições forem excelentes, até 15%, em casos muito desfavoráveis. Em condições normais, considera-se o erro na medição em torno de 5% (SOUSA PINTO, 1976).

Como a sensibilidade do molinete é maior para as menores velocidades, há também maior incerteza nessas medições. Segundo Engel (1999) para velocidades menores que $1,0 \text{ m s}^{-1}$ há maior incerteza, sendo cerca de 5% quando a velocidade for de $0,1 \text{ m s}^{-1}$; enquanto que para velocidades maiores que $1,0 \text{ m s}^{-1}$ pode-se conseguir uma incerteza menor que 0,3%. Dessa maneira, torna-se importante a calibração dos molinetes para as baixas velocidades, sendo recomendado o valor inicial da velocidade de calibração de $0,025 \text{ m s}^{-1}$ ou menor, se possível (JOHNSTONE, 2008).

Segundo Carter e Anderson (1963), a precisão nas medidas de velocidade estimadas com molinetes depende do desempenho do instrumento e do número de pontos amostrados, obtidos pelo número de verticais e pelo número de pontos de medição de velocidade em cada vertical, em uma dada seção transversal. Além disso, o USGS (1982) destaca que o equipamento precisa estar em boas condições de manutenção, as características da seção do curso d'água submetida à medição (profundidade, forma da seção), que permita empregar um método de medição adequado, espaçamento entre verticais, tempo de aquisição em cada ponto, precisão na medida da seção e a presença de vento.

Já no que diz respeito à calibração dos molinetes, Carter e Anderson (1963) indicam quatro principais fontes de erros: a) repetibilidade na aquisição de dados; b) calibração individual ou em grupo; c) efeito da turbulência; e d) erros globais do medidor.

Além dos erros presentes nas medições, uma amostra de tamanho n pode apresentar observações tão distantes dos demais valores que se acredita que não pertençam à mesma população. Para se rejeitar essas observações busca-se uma análise de variância, que indica um valor extremo significativamente diferente dos demais. Ou também, se este valor é significativamente diferente, mas não causa uma mudança significativamente diferente na análise. Portanto, necessita-se de um critério de rejeição de observações discrepantes (DIXON, 1950).

Os valores que se apresentam tão distantes dos outros são ditos *outliers*, e, segundo Grubbs (1969), a estatística sempre deve ser utilizada como suporte para julgamento a respeito da existência de uma razão física para sua ocorrência. Além disso, a estatística pode

ser utilizada frequentemente como base para se iniciar uma ação de busca para a causa física.

Alguns testes estatísticos foram desenvolvidos a fim de se ter um critério de julgamento de observações suspeitas em amostras de dados. Um deles é o de Dixon, simples e rápido, inteiramente baseado na relação entre diferenças entre observações, sendo uma alternativa para quando for oportuno evitar o cálculo do desvio padrão, ou quando se necessita um julgamento rápido da amostra (GRUBBS, 1969). Sua desvantagem é que se tem que arranjar os valores em ordem crescente.

O teste de Dixon pode ser utilizado somente para um ou dois *outliers* na amostra. Quando se está testando apenas um *outliers* o teste de Grubbs deve ser preferido como base de julgamento de rejeição, ao invés do teste de Dixon. No entanto, esses dois testes foram desenvolvidos apenas para um ou dois *outliers* e, no caso do teste de Grubbs, há um mascaramento quando utilizado em sequência na mesma amostra (GRUBBS, 1969). Isso ocorre porque o teste é baseado no desvio padrão e na média dos valores da amostra, que também são afetados pela magnitude dos valores. Dois valores discrepantes são suficientes para esse mascaramento, fazendo com que o teste não os detecte.

Tratando-se de uma amostra de dados na qual há suspeitas da presença de mais de um *outlier*, um teste que pode ser utilizado é o ESD (*Generalized Extreme Studentized Deviate*) (ROSNER, 1983). Este teste é utilizado para detectar a presença de um ou mais *outliers* em uma amostra de dados univariada que segue aproximadamente uma distribuição normal. O teste ESD exige apenas que se especifique um número k de *outliers* suspeitos.

O procedimento de aplicação do teste ESD é baseado na estatística $R_1, \dots, R_k$, que são os desvios calculados a partir de amostras sucessivamente reduzidas, de tamanho $n, n-1, \dots, n-k+1$, respectivamente. De modo específico, para a amostra completa tem-se:

$$R_1 = \frac{\max |x_i - \bar{x}|}{S} \quad (3)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5)$$

em que,

$\bar{x}$ – valor médio de uma grandeza específica x ; e
 S – desvio padrão de uma grandeza específica x .

R_2 é calculado da mesma forma, a partir da amostra reduzida de tamanho $n-1$, obtida a partir da eliminação da observação que maximiza R_1 , e assim sucessivamente para $R_3, \dots, R_k$. Isso resulta em k testes estatísticos $R_1, R_2, \dots, R_k$.

No caso de amostras que apresentam valores duvidosos acima e abaixo da média, os valores críticos do teste são determinados com base na distribuição bicaudal t de Student. Para isso, especifica-se um nível α de significância, calculando-se p e λ_i pelas Eq. 6 e 7 (ROSNER, 1983).

$$p = 1 - \frac{\alpha}{2(n-i+1)} \quad (6)$$

$$\lambda_i = \frac{(n-i)t_{p,n-i-1}}{\sqrt{(n-i-1+t_{p,n-i-1}^2)(n-i+1)}} \quad (7)$$

em que,

p – probabilidade associada ao nível de significância α , para a distribuição t de Student;

λ_i – valor crítico para comparação com R_i ;

$t_{p,n-(i+1)}$ – representa o percentual de ordem p da distribuição t de Student, com $n-(i+1)$ graus de liberdade;

$i = 1, \dots, k$; e

n – número de observações.

Se todos os R_i são $\leq \lambda_i$ então não existem *outliers* na amostra. Caso contrário, o número de *outliers* é determinado encontrando-se o maior i , de tal forma que $R_i > \lambda_i$. Portanto, o teste ESD indica o número de *outliers* presente na amostra.

Torna-se importante salientar que Grubbs (1969) recomenda que os testes estatísticos de *outliers* devem ser feitos com um baixo nível de significância – cerca de 1% – e que não se deve utilizar mais que 5%.

2.5 Automação e eletrônica

O termo automação pode ser explicado como um conjunto de técnicas e/ou dispositivos empregados com o objetivo de facilitar, agilizar e, quando possível, elevar a eficiência de um determinado processo. De modo geral, a automação reduz a mão de obra humana envolvida na execução de um processo produtivo e, quando adequadamente desenvolvida e aplicada, pode contribuir para a melhoria do processo. Sistemas automáticos contêm a potencialidade de monitoramento das condições em que determinado processo se encontra e mecanismos para auto-ajuste destas condições. O monitoramento é realizado empregando-se sensores, enquanto que atuadores são responsáveis por agir sobre os

elementos que condicionam o processo.

A utilização de registro automático de dados atualmente é o mais recomendado, pois possibilita, entre outras vantagens: o sincronismo da leitura em vários instrumentos, frequência de leitura com intervalos precisos de registro, a eliminação de erros humanos na leitura de sensores e na digitação (neste caso, erros sistemáticos observacionais e “erros” grosseiros) e a minimização perda de dados (GOMIDE, 1998).

A pesquisa tem demonstrado grande avanço no sentido de facilitar e melhorar o manejo da irrigação, principalmente buscando alternativas no campo da eletrônica, e tem encontrado soluções para os mais diversos problemas. Dessa forma, o desenvolvimento de alternativas de controle automático e de baixo custo deve ser priorizado (QUEIROZ, 2007).

A rápida evolução da eletrônica, associada à expansão crescente do mercado, tem possibilitado o acesso à tecnologia e ferramentas de ponta que antes eram disponíveis apenas em laboratórios bem equipados e centros de pesquisa (GOMIDE, 1998). A Engenharia Agrícola, de um modo geral, tem se beneficiado desse avanço tecnológico, seja no desenvolvimento de novos equipamentos, seja na adaptação dos já disponíveis em outros setores da produção, para uso na agricultura (VILELA et al., 2001).

Para Queiroz (2007) muitos pesquisadores atualmente utilizam computadores pessoais com placas de expansão para aquisição de dados em pesquisas laboratoriais, controle industrial, em testes e medições. Na agricultura, vários cientistas têm trabalhado em diferentes áreas utilizando algum tipo de sistema de aquisição de dados com a finalidade de monitorar eventos em suas pesquisas (GARCIA et al., 2003).

Um sistema automático bem elaborado pode responder às situações de adversidade de forma inteligente, evitando que o problema se agrave. Em último caso, um sistema de alarme pode ser acionado para chamar a atenção do proprietário para possíveis problemas. Além disso, a automação permite monitorar e controlar o funcionamento de um sistema de forma segura, rápida e automática (SOUSA, 2001).

Como exemplo de pesquisa desenvolvida para área de medidores de vazão e que engloba a automação, pode-se citar o trabalho de Camargo (2010), que desenvolveu um medidor eletrônico de vazão utilizando célula de carga e microcontrolador, com opções de acesso a rotinas de medição, calibração e configurações. A rotina de calibração dispensava a necessidade de mão de obra especializada, além de equipamentos, computadores e métodos complexos e de difícil acesso. A faixa de medição de vazão obtida foi entre 7 e 28 m³ h⁻¹.

Um microcontrolador é um sistema computacional integrado, uma vez que possui unidade de processamento, memória, entradas e saídas integradas em um único *chip*

(QUEIROZ, 2007). Sua denominação deve-se ao fato de que, a partir dos dados de entrada, executa algum processamento, mediante um programa armazenado na memória, gerando uma saída. Segundo Figueiredo Junior et al. (2006) e Queiroz (2007) os microcontroladores têm sido usados para as mais variadas aplicações dentre os dispositivos eletrônicos. Para Ibrahim (2008) microcontroladores são ferramentas poderosas que permitem ao desenvolvedor criar sofisticados programas de controle e manipulação de dados de entrada e saídas.

Os PIC's são uma família de microcontroladores fabricados pela Microchip Technology, que operam a 8, 16 e 32 bits, com extensa variedade de modelos e periféricos internos. Funcionam com tensões de alimentação de 2 a 6 V e os modelos possuem encapsulamento de 6 a 100 pinos em diversos formatos.

A série 16F dos microcontroladores PIC é recomendada para uso em aplicações complexas. O PIC 16F876A é um modelo de microcontrolador desta série que consta de 28 pinos, dispositivo de interface serial, cinco canais de conversão analógico-digital de 10 bits de resolução, dentre outras características apresentadas no Quadro 1.

Característica	PIC 16F876A
Frequência de operação	Até 20 MHz
Memória programável	32768 bytes
Memória de dados (bytes)	368 bytes
Memória EEPROM (bytes)	256 bytes
Portas I/O	A, B e C
Timers	3
Módulo de comunicação serial	Sim
Módulo de comunicação USB	Não
Modulação da largura de pulso (PWM)	Sim

Quadro 1 - Principais características do microcontrolador PIC 16F876A

Fonte: Microchip Technology Inc (2011)

2.5.1 Comunicação serial e transmissão de dados

A comunicação de dados entre dispositivos é baseada no sistema binário, onde a unidade básica de informação é o bit (*binary digit*), que pode ser um dos dois valores: 0 (lógica 0) ou 1 (lógica 1). Um conjunto de bits é um número binário, que pode ser interpretado simplesmente como um valor numérico, ou traduzido para um caractere por meio de um sistema de código. Para comunicação digital o padrão mais utilizado é o *American Standard Code for Information Interchange*, ou ASCII. Esse código apresenta um campo binário de sete bits que representam cada caractere, resultando em 128 diferentes combinações de sete dígitos binários (0 ou 1). Um exemplo disso é o valor binário '1000100', que representa 'D' no sistema ASCII (PARK, 2003a).

Toda mensagem precisa estar organizada com certa ordem para que possa ser enviada e entendida efetivamente. Inicialmente a conexão de comunicação de dados está em estado inativo: a linha está carregada por uma tensão negativa constante. O transmissor envia um bit de início, com tensão oposta à do estado inativo, para indicar que está transmitindo um caractere. O receptor interpreta os bits individuais do caractere que chega e, no fim dos bits de dados, um bit de paridade precisa ser incluído para permitir que o receptor detecte possível falha na estrutura do caractere. Após o bit de paridade, um ou dois bits de fim podem ser incluídos para finalizar efetivamente e pôr a linha de comunicação novamente em estado inativo (JAMES, 2000).

Em 1962 a *Electronics Industry Association* (EIA) adotou o *Recommended Standard* (RS) como protocolo padrão de comunicação serial, sendo o RS-232 o mais utilizado. Nesse protocolo de comunicação a transmissão de dados na lógica 0 é feita entre as tensões elétricas de +3Vcc e +25Vcc e entre -3Vcc e -25Vcc para transmissão na lógica 1 (SMITH, 2005).

De acordo com Park (2003a,b), as principais características da comunicação RS-232 são:

- É realizada ponto a ponto;
- Os dados são transmitidos bit a bit em sequência;
- Grande parte é feita em modo ASCII;
- É assíncrona: o intervalo de tempo entre bits é fixo, mas variável entre caracteres;
- Quando utilizadas as duas direções (cada dispositivo é receptor e transmissor) a recepção e a transmissão são simultâneas, com um fio simples para cada uma delas;
- As tensões dos sinais são: -3Vcc até -25 Vcc para lógica 1; +3Vcc e +25Vcc para lógica 0; entre -3Vcc e +3Vcc a lógica é indefinida;
- É confiável até cerca de 15 m;
- Por ser feita ponto a ponto, é uma limitação quando se utilizada dispositivos “inteligentes”;
- A distância de 15 m é limitante para muitos sistemas de controle, além da taxa de transmissão (115200 bits/s) ser muito baixa para muitas aplicações;
- Os níveis de tensão de até -25 Vcc (lógica 1) e + 25 Vcc (lógica 0) não são compatíveis com muitos dispositivos eletrônicos, precisando de outra *interface*.

Existe uma relação entre a velocidade de transmissão de dados e o comprimento do cabo que conecta os dois dispositivos. A taxa de transmissão de dados depende principalmente da capacitância do cabo, que aumenta com seu comprimento. Por isso, o

comprimento do cabo é limitado em função do número aceitável de erros durante a transmissão. A norma EIA-232-DE especifica que o limite total de capacitância do cabo deve ser de 2500 pF, e considerando que os cabos apresentam na média 160 pF m^{-1} , o comprimento máximo deveria ser de 15 m. Com o desenvolvimento de cabos com menor capacitância (cerca de 50 pF/m), pode-se utilizar cabos mais longos, ou pode-se diminuir a taxa de transmissão de dados, porém, pode não ser tão confiável (PARK, 2003a,b).

Os microcontroladores PIC operam com sinais TTL para a lógica digital, sendo +5 Vcc para lógica 1 e 0 Vcc para lógica 0. Como o computador opera com tensões maiores para essa lógica, como já comentado, há necessidade de conversão dos níveis de tensão para níveis compatíveis com o PIC. O componente MAX-232 é amplamente utilizado para essa conversão de nível com grande confiabilidade, convertendo o sinal TTL para RS-232 e vice-versa.

Além da limitação física dos cabos para transmissão serial, em muitas aplicações é mais interessante se utilizar a comunicação sem fio, reduzindo e simplificando a rede. Esse tipo de comunicação também permite o desenvolvimento de aplicações onde seria impossível a utilização de fiação, como em áreas remotas ou em situações de risco, como no monitoramento de desastres naturais (WANG; ZHANG; WANG, 2006).

A linha de módulos de transmissão via radiofrequência XBee fabricados pela Digi International utiliza os protocolos de comunicação de redes IEEE 802.15.4 e ZigBee. Suas principais características são:

- Taxa de transferência de 250 kbps;
- Alcance de 40 m em ambiente fechado ou urbano e até 120 m em ambiente aberto;
- Frequência de operação de 2,4 GHz;
- Comunicação serial com 1200 bps;
- Seis canais A/D de 10 bits;
- Tensão de alimentação de 3,3 Vcc.

O padrão IEEE 802.15.4 (2006) é uma especificação física de rádio prevista para baixas taxas de transmissão de dados entre dispositivos relativamente simples, que consomem pouca energia e estão conectados a curtas distâncias. ZigBee é estabelecido pela ZigBee Alliance e adotada por mais de 70 companhias. Esse protocolo de comunicação adiciona *softwares* de rede, de segurança e de aplicação ao padrão IEEE 802.15.4. Além do baixo consumo de energia e das configurações simples de rede, o ZigBee é considerado o protocolo mais promissor para sensores sem fio, sendo que continua em desenvolvimento. A tecnologia

de comunicação sem fio ZigBee (IEEE 802.15.4) é preferida em relação as outras (*Wi-Fi*, *Bluetooth*, etc.) para desenvolvimento de rede de sensores sem fio, operando na frequência 2,4 GHz, que atende as bandas ISM (industrial, científica e médica).

Um exemplo de rede de controle utilizada na agricultura foi desenvolvido e testado por Damas et al. (2001). Um controlador remoto automático de um sistema de irrigação monitorava sete sub-regiões de uma área irrigada na Espanha. Cada sub-região recebeu um controlador de setor para o monitoramento, e estes foram interligados a um controlador central via WLAN (Wireless Local Area Network). Esse controle se mostrou promissor, uma vez que permitiu conservar entre 30 e 60% de água.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Estruturas hidráulica e mecânica

O sistema foi construído no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP, sobre um canal trapezoidal de alvenaria, com talude 1:1, 2,30 m de largura da base superior, 0,70 m de profundidade total e 12 metros de comprimento (Figura 2a). Para os ensaios, a hélice do molinete foi imersa cerca de 10 cm em uma lâmina d'água em repouso sobre a base menor desse canal. Essa lâmina de água, de aproximadamente 0,30 m de profundidade, era mantida por meio de um vertedor retangular que havia em uma das extremidades do canal.

Figura 2 – a) Sistema de tração e de trilhos montados sobre o canal trapezoidal de alvenaria; b) detalhe da instalação do motor, das polias de movimentação e do cabo de aço da tração; e c) Quadro de comando dos acionamentos do motor de passo

O molinete foi fixado num carrinho de reboque, construído com tubos de metalon de 20 x 20 mm, tendo um comprimento de 2,30 m, coincidente com a largura da maior base do canal, e 0,30 m de largura (Figura 2a). Quatro roldanas de nylon com 60 mm de diâmetro foram utilizadas como rodas, para permitir movimentar o mesmo sobre trilhos.

Sobre um dos lados do canal, e em toda extensão do mesmo, fixou-se uma cantoneira de abas iguais de 16 mm para guiar o carrinho de reboque. No outro lado do canal, também

em toda a extensão, somente se fixou uma barra chata de ferro de 40 x 2 mm para apoiar o carrinho de reboque.

Somente os trilhos não eram suficientes para garantir um deslocamento retilíneo uniforme do carrinho de reboque em relação ao comprimento do canal. Então, para evitar desvios de trajeto, confeccionou-se um sistema de ortogonalidade, com um conjunto de roldanas de 50 mm parafusadas no chassi do carrinho de reboque e cabos de aço 0,5 mm de diâmetro. Dois cabos de aço foram utilizados na forma de “Z”: presas suas pontas nas extremidades do canal e passando pelas roldanas fixadas no carrinho de reboque. Destaca-se que as roldanas do sistema de ortogonalidade foram fixadas alternando entre lado superior e inferior do chassi, para evitar que os cabos se tocassem, garantindo estabilização. Nas pontas dos cabos de aço utilizaram-se molas de tração para amortecer os impactos de arrancada e parada do carrinho reboque. Este sistema se assemelha àquele utilizado em régua “T” das mesas de desenho técnico, para mantê-la ortogonal a um dos lados.

A tração do sistema foi feita por um motor de passo modelo KTC – 5034 – 350 (Kalatec Automação), de 86,0 mm de diâmetro – norma NEMA 34 (*National Electrical Manufacturers Association*), com oito fios, 1,8 graus por passo e 4,7 N m de torque inicial. O esquema utilizado na ligação do motor foi paralelo para conferir maior velocidade angular. Fixou-se o mesmo em um suporte de madeira de 2,7 m x 11,5 mm x 5,5 mm, colocado numa das extremidades do canal, passando-se um cabo de aço de 0,5 mm de diâmetro pela polia motora de 12,3 cm de diâmetro (Figura 2b). Como o motor ficou num nível 10 cm acima do nível do chassi do carrinho de reboque, rebaixou-se o cabo de aço com outra polia de nivelamento, logo após o motor.

Na extremidade do canal oposta a do motor outro suporte de madeira foi colocado para se fixar os cabos de aço do sistema de ortogonalidade e uma polia de 5 cm de diâmetro para guiar o cabo de aço do motor.

O motor de passo foi acionado com um *driver* de potência modelo STR8 (*Applied Motion Products*), que opera com tensão elétrica entre 24 e 75 Vcc e até 7,8 A por fase. Este *driver* permite controlar passo e sentido da rotação por duas entradas analógicas de 5 a 24 Vcc. As configurações de corrente elétrica e número de passos por volta do motor são feitas em dois seletores, disponibilizando optar por passo normal (*full pass*) ou passo suave (*step smooth*). Selecionando-se passo suave, o *driver* habilita algumas configurações internas que melhoram as faixas de trabalho do motor, especialmente em alta velocidade angular, onde há problemas com ressonância e perda de pulsos. Diante disso, selecionou-se 200 passos por volta, pois se buscava obter a máxima velocidade no motor, na configuração passo suave.

Para os controles do sentido e da velocidade angular do motor, utilizaram-se as entradas analógicas do *driver*, com tensão de 5 Vcc, realizados por um microcontrolador, instalado em um circuito eletrônico denominado Módulo de Controle do Sistema de Tração (MCT). Assim, os pulsos foram enviados com o intervalo de tempo que conferia a velocidade desejada pelo usuário.

Como o *driver* opera sob tensão de 70 Vcc e o microcontrolador do MCT sob tensão de 5 Vcc, utilizaram-se duas fontes de alimentação, específicas para cada um. No caso do *driver*, a fonte utilizada possuía entrada de 220 Vac, saída regulada para 70 Vcc e intensidade máxima de corrente de 8,0 A. Para o MCT a fonte de alimentação utilizada possuía entrada de 220 Vac e saída regulada para 9 Vcc. Finalmente, o *driver* do motor de passo, as fontes de alimentação, o MCT e outros componentes foram instalados em um quadro de comando de 40,0 x 60,0 cm ao lado do canal, servindo para proteção contra água e poeira, para segurança do usuário e para garantir a perfeita conexão elétrica dos cabos. Neste quadro também se instalaram dois disjuntores de proteção (220 Vac), um em cada fase da alimentação (Figura 2c).

3.2 Módulos de controle do sistema de tração (MCT) e de aquisição de dados (MAD)

Como esta pesquisa visou obter a velocidade angular do molinete em função da velocidade de deslocamento do carrinho de reboque, tornou-se mais conveniente separar o controle do sistema em módulos, sendo: um para controlar a velocidade do carrinho e outro para a aquisição de dados de velocidade angular. Por isso, desenvolveram-se dois módulos específicos para cada função, que foram: o Módulo de Controle do Sistema de Tração (MCT) e o Módulo de Aquisição de Dados (MAD). Os módulos não foram interligados entre si, mas a um computador, responsável pelo gerenciamento de todo o sistema de ensaios do molinete. Cada módulo atuava recebendo, interpretando e respondendo somente às solicitações de um *software de controle*, desenvolvido em linguagem de programação Pascal, em ambiente Delphi 7.0. De maneira simplificada a Figura 3 apresenta um diagrama empregado na lógica de controle do sistema.

No MCT utilizou-se um microcontrolador PIC 16F876A (Figura 4a), que responde às solicitações enviadas pelo computador e comanda o sentido e a velocidade de rotação do motor, com sinais de 5 Vcc enviados ao *driver*. A alimentação do MCT foi de 5 Vcc, utilizando-se um circuito de regulação de tensão com o componente LM7805, restringindo a tensão de 9 Vcc da fonte de alimentação utilizada. A comunicação com o computador foi via serial RS-232 através de um circuito conversor de sinal TTL/RS-232, cujo componente

principal foi o MAX-232.

Figura 3 – Diagrama do Módulo de Aquisição de Dados (MAD) e do Módulo de Controle do Sistema de Tração (MCT) empregado no controle do sistema de ensaios de molinetes

O trajeto a ser percorrido pelo molinete obedecia a três interruptores magnéticos do tipo *reed-switch*, posicionados em pontos definidos após alguns ensaios preliminares, acionados por ímãs fixados no chassi do carrinho de reboque. O interruptor 1 localizava-se na extremidade de instalação do motor do carrinho reboque. O interruptor 2 foi instalado na extremidade oposta a do motor do carrinho reboque, a 2 m do final do canal trapezoidal. O interruptor 3 foi instalado na extremidade de instalação do motor do carrinho reboque, próximo ao interruptor 1, para a parada do carrinho de reboque.

Figura 4 – Circuitos eletrônicos do Módulo de Controle do Sistema de Tração (MCT) (a); e do Módulo de Aquisição de Dados (MAD) (b)

O interruptor 1 foi posicionado onde a velocidade de deslocamento já estava constante, com o objetivo de medir o tempo de deslocamento entre este ponto e o interruptor 2. Como a distância entre os interruptores era de 5,10 m, tendo-se o tempo de deslocamento, obtém-se a velocidade real desenvolvida, permitindo compará-la com aquela programada no *software de controle*.

Os interruptores 2 e 3 possuíam a função de sinalizar ao microcontrolador do MCT o fim do percurso, permitindo a desaceleração do carrinho de reboque e a parada deste sem colisão. Assim, o interruptor 2 sinalizava a parada no percurso de ida do carrinho de reboque e o interruptor 3 no percurso de retorno.

Para deslocar o carrinho de reboque do molinete com a velocidade desejada pelo usuário o microcontrolador enviava pulsos de tensão de 5 Vcc ao *driver* do motor de passo. O intervalo de tempo entre os pulsos era enviado ao MCT pelo computador, conforme será discutido no item 3.3, sobre Lógica de controle do sistema. Como o microcontrolador gera pulsos alternando o estado de tensão de um determinado pino entre alto e baixo, mantendo-se cada um desses estados por um tempo de meio pulso, o *software* de controle do sistema enviava o tempo entre meio pulso.

O MCT também comandava o sentido de rotação do motor, para que o molinete fosse deslocado em ambas as direções, mantendo alto ou baixo o estado de tensão da entrada específica para direção no *driver*. Esse controle dependia do interruptor magnético 2, pois, ao sinalizar para o microcontrolador o fim do percurso para o carrinho de reboque ser desacelerado e parado, o microcontrolador também invertia o sentido de deslocamento.

Devido ao movimento do carrinho de reboque, era mais conveniente a comunicação sem fio entre computador e MAD. Em relação ao MCT, a comunicação poderia ser com fio, uma vez que o mesmo é estacionário, contudo, mais uma porta de comunicação do computador seria necessária. Na tentativa de se utilizar apenas uma porta do computador e tornar toda a comunicação sem fio entre módulos e computador, testaram-se três módulos de radiofrequência: um coordenador conectado ao computador e dois roteadores instalados no MCT e no MAD. No entanto, houve limitação na transmissão de dados, principalmente um tempo elevado na solicitação-resposta entre coordenador e roteadores, além de perda de alguns dados. Portanto, a comunicação entre computador e MCT foi com fio, e entre computador e MAD sem fio.

Os módulos de radiofrequência utilizados foram do modelo X-Bee ZB S2, desenvolvidos especialmente para aplicações ponto-multiponto, ou seja, um módulo coordenador da rede de radiofrequência e vários módulos roteadores. Isso confere um maior tempo para transmissão de dados entre módulos, especialmente devido a uma configuração para comunicação com módulos roteadores que estão fora do alcance do coordenador e, para redes de topologia complexa.

Utilizaram-se, portanto, dois módulos de radiofrequência configurados como roteadores (ponto a ponto) na comunicação entre MAD e computador. Uma placa USB/TTL

foi ligada a uma porta USB do computador, própria para módulos X-Bee (Figura 3).

Com o MAD o objetivo foi basicamente registrar a velocidade angular do molinete, por meio de pulsos de tensão recebidos deste, além de enviar os dados ao *software*. Este módulo consistiu de um circuito eletrônico com um microcontrolador PIC 16F876A, um módulo de comunicação por radiofrequência do tipo X-Bee, um circuito de tratamento de interrupção provenientes do molinete e circuitos de regulação de tensão (Figura 4b).

O MAD possui recursos de hardware e software que propiciam a aquisição, condicionamento e conversão de sinais, bem como o processamento destes sinais a fim de que os dados retornados como resposta a uma solicitação já estejam convertidos nas unidades de interesse. É importante ressaltar que esta pesquisa visou desenvolver um sistema capaz de automatizar a obtenção da equação de calibração para os mais diversos tipos de molinetes e, por isso, há distintas formas de geração de sinal, sendo que cada fabricante adota uma delas. Então, dependendo do modelo a ser ensaiado pode haver a necessidade de alterar a configuração da aquisição e condicionamento do sinal elétrico no MAD.

Como este módulo precisava monitorar o molinete e, portanto, ficar próximo a este, fixou-se o mesmo no chassi do carrinho de reboque. A alimentação do MAD foi feita com uma bateria de 12 Vcc, com 9,5 x 4,5 x 5,0 cm, para ser facilmente protegida sobre o chassi do carrinho de reboque.

A comunicação entre microcontrolador e X-Bee foi via serial, por meio dos pinos de recepção e transmissão de dados desses circuitos. Um circuito divisor de tensão, com resistores, foi confeccionado para a transmissão de dados do sentido PIC – X-Bee, pois este último opera com tensão de 3,3 Vcc; e o PIC, com tensão de 5 Vcc. Os resistores utilizados foram: 2,2 k Ω em série com o pino TX do PIC e 3,3 k Ω , em paralelo com o terra.

No molinete o sinal é simplesmente um pulso de tensão (sinal elétrico), com dois condutores conectados em sua estrutura (fase e sinal). Para cada uma ou mais voltas um circuito elétrico é fechado, dependendo do tipo de molinete, gerando o pulso, que permite a determinação da velocidade angular, medindo-se o intervalo de tempo entre os pulsos. No MAD confeccionou-se um circuito de tratamento de sinal com transistor do tipo NPN, resistores, trimpot e capacitor.

O condutor fase do molinete estava ligado à tensão de 5 Vcc. Portanto, na ocorrência de um pulso, o sinal enviado era de 5 Vcc. Entretanto, o condutor do sinal não foi ligado diretamente a um pino do microcontrolador, devido à proximidade entre os condutores do molinete (Figura 5a) e, principalmente, às imperfeições na superfície dos metais do molinete que geram o pulso. Assim, utilizou-se um transistor NPN operando como chave de

interrupção: ocorrendo uma elevação da tensão na base deste transistor, há um aterramento do coletor, estando o emissor aterrado (Figura 5b). O resistor R3 mantém uma tensão no pino do microcontrolador e, na ocorrência de um pulso do molinete, a corrente circula deste resistor para o transistor. Isso é registrado pelo microcontrolador por uma rotina de tratamento de interrupção externa.

Figura 5 – a) Molinete utilizado, com detalhe para a distância entre os contatos elétricos; b) Diagrama elétrico esquemático do tratamento de sinais enviados pelo molinete

Na Figura 5b observa-se que antes do transistor (Q1) utilizaram-se um capacitor (C1) e um trimpot (R1). Esse par de componentes forma um circuito resistor-capacitor (RC), que nesta configuração permite aumentar o tempo de resposta para a base do transistor ser acionada pela tensão do sinal do molinete. Esse circuito, o qual foi denominado filtro RC, foi importante para o registro de pulsos no microcontrolador, diminuindo a interferência das imperfeições da superfície dos contatos do molinete.

3.3 Lógica de controle do sistema

A comunicação do sistema consistiu no envio de solicitações a partir do computador e respostas ou atuação dos módulos, por meio dos microcontroladores. Essas solicitações seguiram o padrão ASCII e possuíram a seguinte estrutura:

- Caractere 1: deve ser um “*” (caractere de validação da mensagem);
- Caractere 2: letra “A” ou “B”, que identifica qual microcontrolador deverá responder a mensagem transmitida, uma vez que se tem dois módulos;
- Caracteres 3 a 7: números ou um caractere especial “?”, solicitando retorno de dados ou atuação do módulo de destino.

As solicitações enviadas ao MAD possuem sempre a estrutura “*B?”, pois a única informação necessária deste módulo é a velocidade angular. Ao MCT pode ser enviada a

mensagem “*A?” (retorno de dados) ou “*A00000”, na qual a sequência de caracteres “0” é um número natural e representa o tempo de meio pulso, em μs , a ser executado pelo motor.

Mesmo utilizando duas portas seriais do computador, os microcontroladores dos módulos foram programados para operar em uma rede, possibilitando a realização de novos testes dos módulos de radiofrequência. Por isso, a solicitação do computador só é processada pelo módulo que contém o microcontrolador especificado na solicitação e programado para interpretá-la.

As respostas do MCT às solicitações do computador apresentaram uma estrutura semelhante às seguintes:

- Caractere 1: deve ser um “*” (caractere de início da mensagem);
- Caractere 2: letra “P” indicando que o destino é o computador;
- Caractere 3: letra “A”, informando o módulo remetente;
- Caracteres 4 a 11: algarismos numéricos, que formam um número racional positivo;
- Caractere 12: caractere especial “#” que indica o fim da mensagem.

Uma exceção a essa estrutura é a mensagem do MCT ao computador quando o ensaio está encerrado, ou seja, o carrinho de reboque está posicionado para novo lançamento. Esta mensagem possui a estrutura “*PA00000FIM#”, possuindo apenas uma diferença nos caracteres de 4 a 11.

Quanto à estrutura das respostas do MAD às solicitações ao computador:

- Caractere 1: deve ser um “*” (caractere de início da mensagem);
- Caractere 2: letra “P” indicando que o destino é o computador;
- Caractere 3: letra “B”, informando o módulo remetente;
- Caracteres 4 a 8: algarismos numéricos, que formam um número natural;
- Caractere 9: caractere especial “;”;
- Caracteres 10 a 17: algarismos numéricos, que formam um número racional positivo;
- Caractere 18: caractere especial “#” que indica o fim da mensagem.

Os dois números presentes na mensagem do MAD entre os caracteres 4 e 17 se referem ao número de pulsos e ao tempo entre pulsos, respectivamente, para que fosse calculada a velocidade angular do molinete. A razão de se utilizar esta configuração será discutida em seguida.

No computador o usuário escolhe a velocidade desejada no *software* e, a partir deste momento, toda execução se torna automática, como apresentado também no APÊNDICE A. Um bloco de funções é executado no programa, de acordo com a velocidade escolhida pelo usuário, para se calcular o tempo de meio pulso, em μs , a ser enviado ao MCT, que é sempre um número inteiro de cinco algarismos. Essas funções foram obtidas a partir de diferentes tempos de meio pulso enviados ao MCT (que constam no item 3.4, Ensaios de calibração) e da velocidade executada por ele, uma vez que a distância percorrida pelo carrinho de reboque era conhecida, medindo-se o tempo deste percurso. Na Figura 6 podem-se observar os diferentes modelos de equações utilizadas no cálculo do tempo de meio pulso a ser enviado ao MCT, dependendo da faixa de velocidade a ser ensaiada escolhida pelo usuário.

Figura 6 – Modelos de funções utilizados para cálculo do tempo de meio pulso conforme a velocidade de ensaio do molinete

A vantagem de se utilizar equações para o cálculo do tempo de meio pulso, ao invés de informar diretamente para o MCT, está relacionada com as diferentes velocidades proporcionadas pelo MCT para os diferentes modelos de molinetes, devido à resistência ao movimento. Por isso, o usuário pode realizar um ensaio preliminar para o ajuste destas equações, para posteriormente alterar no *software* os valores dos coeficientes. Com isso, a velocidade executada pelo MCT poderá ser a mais próxima daquela desejada pelo usuário.

Uma vez calculado o tempo a ser informado ao MCT, o programa monta e envia a mensagem, no mesmo momento em que inicia as solicitações de retorno de dados ao MAD e também ao MCT, com intervalo de tempo de 1,0 s.

O início e o fim do movimento do carrinho de reboque passam por etapas de aceleração e desaceleração, respectivamente. Para isso, o microcontrolador do MCT executa uma rotina de decremento do tempo de meio pulso, quando acelerando, e de incremento do

tempo de meio pulso, quando desacelerando. O fim do decremento termina ao atingir o tempo solicitado pelo computador, pois já chegou à velocidade desejada. Os valores de incremento e decremento utilizados foram de $1,0 \mu\text{s}$, pois para velocidades elevadas ($1,8 \text{ m s}^{-1}$, por exemplo) o tempo entre pulsos é pequeno, tendo-se problemas com ressonância no motor de passo caso se utilizasse um valor maior. O tempo de meio pulso para início de decremento foi grande o bastante para que a velocidade de arrancada fosse a mais baixa possível, tal que não provocasse um impacto elevado no cabo de tração nem nas molas de tração. No entanto, se a velocidade de deslocamento do carrinho de reboque desejada pelo usuário fosse menor que a programada no MCT, o microcontrolador não executava a etapa de aceleração e desaceleração. O algoritmo desenvolvido para o microcontrolador do MCT se encontra no APÊNDICE B, no qual se indica quais são as etapas dependentes da comunicação com o computador para serem realizadas.

O MCT mantém a mesma velocidade angular no motor num espaço do canal delimitado pelos dois interruptores magnéticos: no interruptor 1 a velocidade está constante e ele inicia a medição do tempo de percurso; no interruptor 2, interrompe a medição do tempo e desacelera o carrinho de reboque até parar. Como o computador continua enviando solicitações aos dois módulos, o MCT aguarda a próxima que chegar e, se for válida, envia o tempo de percurso medido. O computador interpreta essa mensagem do MCT e encerra as solicitações ao MAD, uma vez que somente se consideram válidos os dados de velocidade angular do molinete durante o percurso num sentido.

Após o MCT enviar a mensagem com o tempo de percurso ao computador, ele inicia a rotina de retorno do carrinho de reboque. No momento em que o carrinho de reboque passar no interruptor magnético 3, novamente o microcontrolador desacelera o conjunto até a parada. Como o computador continua enviando solicitações a este módulo, o MCT aguarda a próxima solicitação e envia a mensagem de término do ensaio, estando posicionado para o próximo lançamento.

Como citado anteriormente, as respostas do MAD às solicitações do computador contém dois números: o número de pulsos e o tempo entre pulsos. Esses dois valores permitem calcular a velocidade angular do molinete, que é o objetivo específico desta pesquisa.

Como o molinete possui um circuito elétrico que ao ser fechado gera um pulso de tensão, registrado pelo microcontrolador. Neste, utilizou-se um pino específico para interrupções externas, sendo que na ocorrência do pulso, uma rotina de tratamento desta interrupção é executada com prioridade pelo microcontrolador, independente da rotina em

andamento. Nessa rotina de tratamento de interrupções incrementa-se em uma unidade o valor de uma variável de registro de pulsos, que era zerada a cada novo deslocamento do molinete. Portanto, no valor informado ao computador, consta sempre um valor crescente de número de pulsos. Também no momento da interrupção o microcontrolador lê o valor do tempo, em milissegundos (maior resolução), para enviar ao computador na unidade segundo, pois facilita cálculos posteriores. O tratamento da interrupção e outros processos desenvolvidos pelo microcontrolador do MAD são apresentados no APÊNDICE C.

O cálculo de velocidade angular do molinete é realizado, portanto, pelo computador. Com os valores atuais de número de pulsos e de tempo, o programa subtrai o número de pulsos atual pelo anterior, tendo-se o número de voltas entre as solicitações; da mesma forma, subtrai o tempo atual pelo anterior, resultando no intervalo de tempo; a velocidade angular é obtida, finalmente, pela divisão do número de voltas pelo intervalo de tempo, com a unidade em rotações por segundo. Esse cálculo é realizado no momento em que a mensagem de resposta do MAD chega ao computador e o resultado é armazenado pelo *software*.

No fim do ensaio o programa permite salvar todas as informações vindas dos módulos em arquivo de texto, para utilização futura, quando necessário ajustar a equação do molinete. Portanto, todos os registros de velocidade angular do molinete e de velocidade de deslocamento são salvos em arquivo de texto (*.txt).

O programa também apresenta uma rotina para cálculo de *outliers*, na qual se importa os dados armazenados em arquivos de texto (*.txt), salvos anteriormente durante os ensaios. A interface desenvolvida permite importar até 400 observações, necessitando informar o número de observações suspeitas de serem *outliers* para o programa testar automaticamente, comparando com o valor crítico tabelado (λ_i). Após executar os testes, o usuário tem a opção de salvar todos os testes executados, indicando e identificando também o número de *outliers*. O formato deste arquivo também é texto (*.txt) separado por tabulações, que pode ter seus dados facilmente exportados para uma planilha de cálculo.

3.4 Ensaios de calibração

Realizaram-se os ensaios do sistema utilizando um molinete tipo americano (de eixo vertical) fixado em sua haste, a qual foi presa no meio do carrinho de reboque. O cuidado principal nesse momento é manter o suporte da hélice na mesma direção do movimento, sendo que para isso, no carrinho de reboque se construiu uma estrutura de fixação apropriada para a haste.

Esse molinete possui um circuito elétrico que fecha o contato a cada revolução da hélice, o que permite obter um conjunto maior de valores de velocidade angular, pois para as altas velocidades ($1,5 \text{ m s}^{-1}$) o tempo de deslocamento e de aquisição é curto. Como o computador envia solicitações em intervalos de 1,0 s, caso se utilize um molinete que feche o circuito a cada 10 voltas, como é o caso do tipo europeu (de eixo horizontal), o espaço percorrido (menor que 12 m do canal) pode não ser suficiente para coleta de dados em número satisfatório.

Após a fixação do molinete no carrinho de reboque realizaram-se ensaios no sistema para a obtenção das equações que relacionavam a velocidade de deslocamento com o tempo de meio pulso enviado ao MCT. As velocidades reais foram obtidas pelas medições de tempo de deslocamento do carrinho de reboque num espaço conhecido, em 10 repetições.

Os valores de tempo de meio pulso enviados ao MCT, em ms, foram: 0,15, 0,18, 0,20, 0,23, 0,25, 0,275, 0,30, 0,35, 0,40, 0,45, 0,50, 0,60, 0,70, 0,80, 0,90, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0, 4,0, 5,0, 7,5, 10,0, 12,5 e 14,0; abrangendo desde a velocidade máxima (para tempo de meio pulso de 0,15 ms) até a mínima (14 ms), a partir da qual não houve mais movimento da hélice do molinete.

A partir desse ensaio determinou-se a incerteza expandida de medição da velocidade, baseando-se nos documentos que tratam exclusivamente sobre a expressão da incerteza de medição, elaborados pela ABNT e INMETRO (2003), pelo BIPM (2008) e pelo INMETRO (2012).

Com as velocidades conhecidas e as equações ajustadas no *software* realizaram-se os ensaios para obtenção da velocidade angular da hélice do molinete. Os resultados obtidos foram utilizados para se ajustar equações, as quais foram testadas antes e depois da eliminação dos *outliers*, pelo teste ESD. Os testes de precisão das equações foram realizados por meio do índice de concordância “d” de Willmott (Willmott, 1981; Willmott et al., 1985) e do coeficiente de confiança “c” de Camargo e Sentelhas (1997). O índice “d” (Eq. 8) indica a precisão dos valores estimados pela equação em relação aos valores observados, com valores entre 0 e 1, sendo maior a precisão quanto mais perto de 1. Em relação ao coeficiente “c” (Eq. 9), este informa o desempenho da equação através de sua classificação, de acordo com a Tabela 2.

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum [(P_i - \bar{O}) + (O_i - \bar{O})]} \quad (8)$$

em que,

P_i – valor estimado;

O_i – valor observado;

$\bar{O}$ – média dos valores observados.

$$c = r d \quad (9)$$

em que,

r – coeficiente de correlação;

d – índice de concordância de Willmott.

Tabela 2 – Critérios para interpretação do desempenho da equação de acordo com o valor do coeficiente de confiança

Valor de “c”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
< 0,41	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Velocidade de deslocamento

A máxima velocidade possível de ser executada pelo sistema para o modelo de molinete utilizado, foi de cerca de $2,10 \text{ m s}^{-1}$, com tempo de meio pulso de $0,275 \text{ ms}$, de acordo com a equação da Figura 7. Essa relação foi obtida para os menores tempos de meio pulso possíveis de serem executados pelo motor, sem ter problemas com torque, ressonância e perda de pulsos. O menor intervalo de tempo entre meio pulso foi de $0,15 \text{ ms}$, sendo que o motor não conseguiu executar o movimento abaixo desse valor. Além disso, não foi este o valor que maximizou a velocidade de deslocamento do carrinho de reboque, possivelmente por estar muito próximo a faixa de ressonância, para essas condições de trabalho.

Figura 7 – Equação característica da velocidade máxima possível de ser atingida com os menores tempos de meio pulso

A partir de alguns ensaios preliminares, chegaram-se as equações relacionando o tempo de meio pulso, enviado ao MCT pelo *software de controle*, e a velocidade de deslocamento selecionada pelo usuário. Os resultados dessa relação estão apresentados na Figura 8, sendo utilizados para a elaboração dos gráficos os valores médios das dez observações, as quais foram realizadas para cada ponto amostral. Esse bloco de funções foi programado no *software*, permitindo calcular o tempo de meio pulso de forma automática. Observa-se que para uma velocidade elevada ajustou-se uma equação polinomial para a relação entre as variáveis, com base na equação obtida para a velocidade máxima, da Figura 7. Como houve diminuição da velocidade de deslocamento para tempos de meio pulso inferiores a $0,275 \text{ ms}$, ajustou-se a equação de velocidade no *software* somente para tempos de meio pulso maiores. Com isso, também se conseguiu um valor maior para o coeficiente de

determinação (R^2) da função para velocidades próximas a máxima.

Figura 8 - Equações gerais que relacionam o tempo de meio pulso com a velocidade de deslocamento

As equações utilizadas no *software* (Figura 8) somente tiveram a finalidade de calcular o tempo de pulso a ser enviado ao MCT para a execução do ensaio e, portanto, não fazem parte elaboração da equação característica do molinete. Para essa, os valores de velocidade foram obtidos a partir da medição do tempo de deslocamento do molinete nos dez ensaios realizados por ponto amostral.

A velocidade de deslocamento do molinete selecionada pelo usuário não é a mesma executada pelo sistema, pois dependendo do modelo do molinete e também da lâmina de água, existe diferença na resistência ao movimento. Em função disso, o MCT dispunha de uma rotina de medição do tempo de percurso, entre os interruptores 1 e 2, em cada ensaio, para qualquer velocidade, permitindo a obtenção da velocidade real de deslocamento. Hubbard et al. (2001) concordam que a velocidade se altera no decorrer do ensaio e por isso também mediram o tempo de percurso durante os ensaios para o cálculo da velocidade real de deslocamento, pois se trata de uma informação essencial para a obtenção da equação de calibração do molinete.

As maiores velocidades de deslocamento apresentaram os maiores valores de incerteza expandida, conforme a análise da incerteza realizada e apresentada na Tabela 3. A velocidade máxima obtida nos ensaios ($2,13 \text{ m s}^{-1}$) foi maior que aquela selecionada pelo usuário ($2,10 \text{ m s}^{-1}$), e também apresentou o maior valor de incerteza expandida – $U(v)_{exp} - 1,4536\%$, pois se trata de uma faixa de tempo de meio pulso (0,275 ms) muito próxima ao início da faixa de ressonância do motor de passo. Mesmo assim, a maior incerteza expandida pode ser considerada baixa, o que garante a confiabilidade em torno do MCT e do sistema de tração na execução dos ensaios. Além disso, verifica-se que com a diminuição da velocidade há redução

da incerteza em torno da velocidade de deslocamento, chegando a 0,0005% para velocidades de 0,08 e 0,07 m s⁻¹. Da mesma forma, com a diminuição da velocidade houve redução dos valores de variância experimental – $S^2(v_i)$, desvio-padrão experimental – $S(v_i)$, variância experimental da média – $S^2(\bar{v})$, desvio-padrão experimental da média – $S(\bar{v})$ e incerteza padrão – $U(\bar{v})$, uma vez que são as medidas de dispersão utilizadas para o cálculo da incerteza experimental.

Tabela 3 – Análise de incerteza da velocidade de deslocamento do molinete

vs (m s ⁻¹)	t (ms)	$\bar{v}$ (m s ⁻¹)	$S^2(v_i)$	$S(v_i)$	$S^2(\bar{v})$	$S(\bar{v})$	$U(\bar{v})(\%)$	$U(\bar{v})_{\text{exp}}(\%)$
2,10	0,275	2,13	0,0005	0,0230	0,0001	0,0073	0,7268	1,4536
2,08	0,300	2,01	0,0004	0,0206	<0,0001	0,0065	0,6520	1,3041
2,04	0,325	1,97	0,0002	0,0135	<0,0001	0,0043	0,4269	0,8537
1,97	0,350	1,97	0,0002	0,0136	<0,0001	0,0043	0,4316	0,8631
1,87	0,375	1,91	0,0002	0,0155	<0,0001	0,0049	0,4915	0,9831
1,94	0,400	1,85	0,0003	0,0181	<0,0001	0,0057	0,5727	1,1454
1,85	0,450	1,88	0,0001	0,0111	<0,0001	0,0035	0,3511	0,7021
1,77	0,500	1,85	0,0001	0,0093	<0,0001	0,0029	0,2926	0,5852
1,59	0,600	1,61	<0,0001	0,0005	<0,0001	0,0002	0,0151	0,0302
1,42	0,700	1,38	<0,0001	0,0003	<0,0001	0,0001	0,0104	0,0207
1,24	0,800	1,21	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
1,07	0,900	1,08	<0,0001	0,0002	<0,0001	0,0001	0,0053	0,0106
0,97	1,000	0,97	<0,0001	0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0041	0,0082
0,65	1,500	0,65	<0,0001	0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0034	0,0069
0,49	2,000	0,49	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0005	0,0009
0,33	3,000	0,33	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0011	0,0022
0,24	4,000	0,24	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0008	0,0017
0,20	5,000	0,20	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0009	0,0018
0,13	7,500	0,13	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0007	0,0013
0,10	10,000	0,10	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0003	0,0007
0,08	12,500	0,08	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0003	0,0005
0,07	14,000	0,07	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0002	0,0005

*Obs.: os valores acompanhados por “<” não se referem a uma probabilidade de um teste estatístico, mas sim, apenas indicam que o valor obtido foi menor que aquele indicado.

Os valores de desvio-padrão experimental – $S(v_i)$ – por si só seriam um bom indicativo da dispersão dos pontos e da qualidade dos valores obtidos. Entretanto, conforme se observa na análise de incerteza da Tabela 3, esta medida se torna muito pequena quando a dispersão em torno da média é pequena, como são os casos de velocidades inferiores a 1,0 m s⁻¹, nas quais os valores de $S(v_i)$ foram inferiores a 0,0001. Por isso, a incerteza é indicada na forma de incerteza expandida, fornecendo valores em porcentagem, que facilitam a expressão ao cliente.

Os sistemas de calibração de molinetes desenvolvidos até o momento atendem com certa precisão os ensaios de molinetes sob velocidades superiores a 2,0 m s⁻¹. Como já comentado, Engel (1999) obteve menor incerteza para velocidades maiores que 1,0 m s⁻¹ e maior incerteza para velocidades abaixo desse valor. Da mesma forma, Carter e Anderson

(1963) relatam que as maiores diferenças nas calibrações de molinetes são obtidas para as menores velocidades de deslocamento do molinete. Estes autores utilizaram dois diferentes instrumentos sob diferentes velocidades e número de repetições, totalizando 48 observações para $0,08 \text{ m s}^{-1}$, 24 para $0,15$ e $0,23 \text{ m s}^{-1}$, e 20 para $0,34$ e $0,46 \text{ m s}^{-1}$. Foi observado que para a menor velocidade, mesmo com mais repetições, o erro padrão em torno da velocidade angular da hélice do molinete de $1,76 \%$ para um dos medidores e $2,77 \%$ para outro; ao passo que, para a maior velocidade, este erro diminuiu para $0,64\%$ e $0,59 \%$, respectivamente.

Como já citado anteriormente, a precisão da calibração depende, principalmente, da estabilidade do deslocamento do carrinho e da precisão das medidas de sua velocidade. Todavia, para permitir um tempo adequado de estabilização do teste seria necessário utilizar um canal suficientemente grande. Isso pode ser um problema devido à dificuldade em se dispor desse canal e um sistema confiável que opere em toda faixa de medição do medidor (SANCHEZ e ESPÍRITO SANTO, 1998). Portanto, o sistema desenvolvido apresentou potencial para ser utilizado em velocidades menores que $2,0 \text{ m s}^{-1}$, podendo ser empregado em consonância com sistemas de calibração de molinetes que possibilitam deslocar o molinete em maiores velocidades, aumentando a precisão em torno das menores velocidades de deslocamento. Além disso, na maior parte dos cursos d'água a velocidade da água é inferior a $2,0 \text{ m s}^{-1}$, podendo-se utilizar um molinete previamente ensaiado no sistema desenvolvido.

4.2 Aquisição de dados e ensaios de calibração

Em testes realizados no sistema desenvolvido os módulos construídos se mostraram precisos nas respostas às solicitações do computador, executando o movimento e medindo o tempo de percurso, no caso do MCT, ou adquirindo os dados de pulso e tempo entre pulsos, no caso do MAD. O sistema apresentou ótimas condições de funcionamento, especialmente em relação à comunicação, por cerca de oito horas, quando houve necessidade de recarga da bateria do MAD.

Em especial à aquisição de dados, realizada pelo MAD, torna-se importante destacar que este módulo foi efetivo em todas as aquisições, independente das velocidades de deslocamento e angular do molinete. Tal resultado comprova que a comunicação por radiofrequência com X-Bee foi eficaz na transmissão dos dados, podendo ser indicado para sistemas com princípios de operação semelhante.

Na Figura 9 apresentam-se os resultados obtidos para uma das velocidades de deslocamento, $0,10 \text{ m s}^{-1}$, na qual se percebe um elevado número de pontos dispersos da média. Adicionalmente, para todos os conjuntos de observações, independentemente da

dispersão, a velocidade angular do molinete aumentava até praticamente a aquisição da quarta observação. Isso ocorreu em função da aceleração do carrinho de reboque do molinete, requerendo certo tempo para o conjunto atingir a velocidade desejada pelo usuário. Por isso, nos dados obtidos pelo MAD, eliminaram-se as quatro primeiras aquisições de todos os conjuntos de observações. Poder-se-ia programar o sistema para adquirir os dados apenas após o carrinho passar o interruptor 1, contudo, este componente estava ligado ao microcontrolador do MCT e, para enviar uma mensagem ao *software* sinalizando que a velocidade estava constante, comprometer-se-ia o envio de pulsos ao *driver* do motor, interferindo no deslocamento do molinete.

Figura 9 – Velocidade angular do molinete para a velocidade de deslocamento de $0,10 \text{ m s}^{-1}$

Na tentativa de identificar a presença de *outliers* utilizou-se o teste estatístico ESD após se eliminar as quatro primeiras aquisições de cada conjunto de observações. Para o caso apresentado na Figura 9 o número total de observações foi 212 e após se utilizar o teste estatístico, constatou-se que 68 eram *outliers*. Eliminando-se os *outliers* do conjunto de pontos, o valor da média alterou de 0,50 para 0,23 rps, conforme se observa na Figura 10. Analisando-se os *outliers*, verificou-se que quase a totalidade apresentava valor elevado em relação à média. Sabendo-se que a velocidade angular é o resultado da divisão entre o número de pulsos e o tempo, constatou-se que foi um tempo muito pequeno o fator que mais influenciou para se obter um número elevado de *outliers*.

Todos os conjuntos de observações obtidos nas aquisições de cada velocidade avaliada foram submetidos ao teste ESD, após a exclusão das quatro primeiras observações. Na Tabela 4 são apresentados os resultados desse teste estatístico, na qual se nota que a proporção de *outliers* para os menores tempos informados ao MCT foi elevada. No entanto, não se testou estatisticamente se houve tendência de aumento dessa proporção com o aumento da velocidade de deslocamento do conjunto; nem a influência dos *outliers* na média da

velocidade angular do molinete com esses dados. Esta última análise foi realizada através das equações características do molinete obtidas nos ensaios, discutido adiante.

Figura 10 – Velocidade angular do molinete para a velocidade de deslocamento de $0,10 \text{ m s}^{-1}$, após a exclusão dos *outliers* e das quatro primeiras observações

A *interface* entre constituintes mecânicos do molinete e a aquisição automática de dados no MAD foi influenciada pelas imperfeições nas superfícies de contato do circuito elétrico do molinete. Essa pode ter sido a principal causa de um registro de dados discrepantes de velocidade angular, apresentando valores maiores que a média (Figura 9). Como o sistema foi efetivo no registro dos dados, a presença de *outliers* pode ser explicada por um caso particular de incompatibilidade entre o sinal do molinete e o MAD.

Tabela 4 – Número e proporção de *outliers* conforme a velocidade de deslocamento do molinete

t (ms)	$\bar{v} \text{ (m s}^{-1}\text{)}$	k	n	k / n (%)	$\bar{r}_0 \text{ (rps)}$	$\bar{r} \text{ (rps)}$
0,275	2,13	30	35	85,7	8,60	6,40
0,300	2,02	33	39	84,6	8,83	6,34
0,325	1,97	30	36	83,3	8,26	7,86
0,350	1,97	0	28	0,0	8,51	7,73
0,375	1,91	25	34	73,5	7,00	6,04
0,400	1,86	0	44	0,0	6,28	6,28
0,450	1,88	25	37	67,6	6,41	5,89
0,500	1,85	22	34	64,7	5,84	5,64
0,600	1,61	12	40	30,0	5,07	4,80
0,700	1,38	16	40	40,0	4,39	4,16
0,800	1,21	3	50	6,0	3,70	3,68
0,900	1,08	8	57	14,0	3,30	3,27
1,000	0,97	29	57	50,9	3,48	2,97
1,500	0,65	48	100	48,0	2,58	1,99
2,000	0,49	21	148	14,2	1,67	1,49
3,000	0,33	160	247	64,8	3,00	1,00
4,000	0,24	52	201	25,9	1,09	0,72
5,000	0,20	42	203	20,7	0,83	0,55
7,500	0,13	4	206	1,9	0,37	0,35
10,000	0,10	68	212	32,1	0,49	0,23
12,500	0,08	103	231	44,6	0,49	0,19
14,000	0,07	57	159	35,8	0,39	0,14

Quando o usuário utiliza o molinete a campo essa diferença é imperceptível, não alterando o registro. No entanto, para circuitos de alta sensibilidade como microcontroladores essas imperfeições influenciam, ocorrendo várias interrupções (pulsos) durante o fechamento do circuito elétrico do molinete.

O filtro RC confeccionado, na tentativa de diminuir o efeito dessas imperfeições, não foi suficiente para melhorar o sinal em todas as faixas de velocidade angular do molinete, pois o tempo de carregamento e descarregamento do capacitor é fixo. Uma opção seria confeccionar dois filtros RC, uma para altas velocidades e outro para as baixas, tendo-se um tempo de carregamento/descarregamento do capacitor de cada filtro ajustado a essas condições. Além disso, poder-se-ia utilizar algum sensor contador de revoluções, ligado ao MAD, eliminando o sinal do molinete. Porém, dependendo do tipo de sensor e principalmente do seu tamanho, pode-se causar uma interferência ao fluxo da água, alterando-se as condições hidrodinâmicas do ensaio. Mesmo assim, um sensor pode ser um indicativo da qualidade dos pulsos gerados originalmente pelo molinete, permitindo inferir se há concordância entre as medidas ou se há algum problema no sistema de geração de pulsos do molinete, necessitando substituição ou revisão.

Além das imperfeições nas superfícies de contato do circuito elétrico do molinete, a distância entre os contatos (Figura 5a) também influenciou nas leituras, como se pode constatar nas Figuras 11 e 12. Houve dificuldade de se manter as duas partes que compõe o circuito elétrico do molinete a uma distância suficiente para gerar apenas um pulso por volta, ou o mais próximo disso. Na Figura 11 apresentam-se três tentativas de ajuste de equações para um ensaio realizado sem a preocupação com esta distância, nem com os *outliers* presentes nos conjuntos de dados; somente eliminando-se as quatro primeiras observações.

Figura 11 – Equações ajustadas do molinete sem ajustes no contato elétrico

Após o ajuste das equações apresentadas na Figura 11, calcularam-se os índices de concordância “d” de Willmott (1981) e os coeficientes de confiança “c” de Camargo e Sentelhas (1997). Para isso, consideraram-se como valores observados aqueles fornecidos pela equação original do molinete, e os estimados aqueles obtidos pelas equações ajustadas. Os valores de “d” obtidos foram de 56,57% para a equação polinomial, 85,87% para a linear e 71,2% para a potencial; e os “c” foram de 43,41%, 85,87% e 45,35% para as equações polinomial, linear e potencial, respectivamente. Apesar do “c” da equação linear ser considerado ótimo, o coeficiente de determinação (R^2) indica que a mesma não estima fielmente os valores de velocidade angular. Portanto, considerou-se que essas equações não poderiam ser utilizadas para reproduzir os valores observados nos ensaios.

Figura 12 – Equações ajustadas do molinete após ajustes no contato elétrico e com os *outliers*

Entretanto, quando se tomou o cuidado com a distância entre os contatos elétricos, ajustando-se esta para que o MAD registrasse apenas um pulso por revolução da hélice do molinete, ou o mais próximo disto, obtiveram-se equações mais representativas (Figuras 12 e 13). Para esse ajuste na distância entre os contatos baseou-se na velocidade angular obtida por meio da equação original do molinete, comparando-se com aquelas obtidas no sistema durante os ensaios, em cada velocidade de deslocamento desejada. Essa distância não foi medida, mas, dependendo da velocidade ensaiada – geralmente aquelas próximas a $2,0 \text{ m s}^{-1}$ – a cada um ou dois ensaios havia necessidade de ajustá-la. Na Figura 12 são apresentadas as equações ajustadas sem as quatro primeiras aquisições nos conjuntos de dados, mas com todos os *outliers* presentes nas amostras. Nesse caso, os valores de “d” foram de 98,97% e 97,96%, e os coeficientes “c” foram de 98,97% e 96,16%, para as equações polinomial e linear, respectivamente.

Quando esses conjuntos de dados foram submetidos ao teste estatístico ESD, detectaram-se os *outliers* apresentados na Tabela 4. Após a eliminação destes valores, obteve-

se apenas uma equação linear ajustada (Figura 13). Para essa equação os valores de “d” e “c” foram de 99,95% e 98,35%, respectivamente.

Figura 13 – Equação ajustada do molinete após ajustes no contato elétrico e sem os *outliers*

De acordo com a Figura 13 houve maior dispersão na velocidade angular da hélice do molinete para velocidades de deslocamento próximas a $2,0 \text{ m s}^{-1}$. A equação original do molinete utilizado é $r = 3,33 v - 0,0133$, com um limite de $0 \leq v < 1,25$, sendo v a velocidade de deslocamento (m s^{-1}) e r a velocidade angular (rps); ou seja, recomendada para um limite de velocidade que é inferior à máxima velocidade obtida com o sistema desenvolvido. Por isso, caso forem eliminados os valores de velocidade angular com maior dispersão, obtém-se um melhor ajuste da equação (Figura 14). Para a equação linear ajustada os valores de “d” e “c” foram de 99,56% e 99,52%, respectivamente, indicando que a mesma possui alta precisão nas suas estimativas em relação à equação original do molinete.

Figura 14 – Equação ajustada do molinete após ajustes no contato elétrico, sem os *outliers* e sem as observações de maior velocidade de deslocamento

De acordo com Herschey (1982) repetidos ensaios para um instrumento em particular,

sob mesma velocidade de deslocamento, podem fornecer diferentes relações entre a velocidade angular do elemento e a velocidade de deslocamento. Essa constatação pode ser visualizada principalmente na Figura 13, para a velocidade de $1,97 \text{ m s}^{-1}$, onde as velocidades angulares foram de 7,86 e 7,73 rps, para os tempos de meio pulso de 0,300 e 0,325 ms (Tabela 4). Como foi uma faixa de velocidades onde o sistema de tração apresentou maior dispersão é prudente não se utilizá-la na equação característica do molinete.

Hubbard et al. (2001) calibraram, individualmente, molinetes de eixo vertical e horizontal, em tanque com água parada. Para os molinetes de eixo vertical as velocidades foram: 0,076, 0,15, 0,23, 0,34, 0,46, 0,67, 1,52 e $2,44 \text{ m s}^{-1}$; chegaram a novas curvas de calibração, possibilitando comparar com a equação original em duas situações: calibrando como recebido e após limpar, lubrificar e reparar os instrumentos. Segundo os autores, a equação original também falhou na estimativa da velocidade, subestimando o valor real entre 0,4 a 0,7%, em média, para velocidades acima de $0,3 \text{ m s}^{-1}$; e entre 0,5 a 1,0% para as velocidades menores. Após limpeza, lubrificação e reparo, a diferença foi ainda maior: cerca de 0,2% para a velocidade de $0,076 \text{ m s}^{-1}$, até mais de 1% para velocidades acima de $0,67 \text{ m s}^{-1}$.

Devido à modificação na equação do molinete houve também alteração da curva de sensibilidade do rotor (Figura 15). Assim como salientado por Engel (1999) e Johnstone (2008), as curvas mostraram que a sensibilidade foi menor para as menores velocidades e estabilizou em cerca de $0,3 \text{ m s}^{-1}$, que também é menor daquele valor de velocidade indicado pelos autores segundo os quais ocorre a estabilização ($0,7 \text{ m s}^{-1}$). Apesar disso, com a alteração da equação do molinete não houve alteração do valor da velocidade na qual ocorre a estabilização.

Figura 15 – Curvas de sensibilidade obtidas para o molinete

Diante de todas as avaliações realizadas seria prudente indicar o emprego do sistema desenvolvido para o ensaio de molinetes, aliado a análise estatística dos dados, como o teste estatístico ESD aplicado aos dados desta pesquisa, garantindo assim a obtenção de valores de velocidade angular do molinete condizentes com os valores reais. Essa aplicação conjunta contribuirá para obtenção de curva característica com ajuste confiável para uso prático, lembrando-se que a velocidade de deslocamento limite para a estrutura montada foi de até $2,10 \text{ m s}^{-1}$.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Módulo de Aquisição de Dados (MAD) se apresentou como uma solução para o processamento de sinais originados no molinete. Por isso, esse módulo é uma alternativa para aquisição de dados desses medidores, não somente para ensaios de calibração, tornando-se interessante especialmente no monitoramento constante da vazão de cursos d'água para a pesquisa. Nesse caso, pode-se desenvolver um módulo para armazenamento dos dados adquiridos pelo MAD, realizando-se a comunicação entre eles via radiofrequência.

Para trabalhos futuros indica-se fazer uma mudança na *interface* de aquisição de dados nos molinetes mais antigos que não apresentam mecanismo eletrônico para contar as revoluções da hélice, visando melhorar o sinal. Para isso, pode-se utilizar um sensor óptico na hélice ou algum sensor magnético no eixo, dentro da câmara de contatos, pois, como constatado, houve problemas com o sinal elétrico na configuração original do medidor. Aliado a isso, pode-se utilizar um teste estatístico para *outliers*, para se conhecer a qualidade dos pulsos do sistema original do molinete.

Na tentativa de se aumentar a velocidade pode-se utilizar outros motores, como motores DC, controlados pelo microcontrolador por PWM (modulação da largura de pulso). No entanto, haverá necessidade de aumentar o espaço percorrido pelo carrinho de reboque, tendo-se que dispor de um canal maior.

De maneira geral, a principal vantagem do sistema desenvolvido é a possibilidade ensaiar molinetes sob velocidades menores que $2,0 \text{ m s}^{-1}$ com precisão superior aos sistemas atualmente utilizados nesta faixa de velocidade. Assim, pode-se utilizá-lo juntamente com os sistemas existentes, fornecendo-se ao cliente equações com maior precisão na estimativa da velocidade da água em cursos d'água.

Sob o ponto de vista da comunicação entre computador e módulos houve perfeita sincronia, não havendo limitações, podendo-se até utilizar um canal maior.

Por outro lado, existem algumas desvantagens, como por exemplo, ser um sistema artesanal, composto por diversas partes estruturais, hidráulicas e eletrônicas, instalados em um canal previamente existente. Assim, tratando-se de manutenção deste sistema, não há disponibilidade de assistência técnica especializada, por não se tratar de um produto comercial. Além disso, sua constituição em diversas partes, principalmente eletrônicas, dificulta a busca pela causa de problemas, mesmo por técnicos.

CONCLUSÕES

O sistema desenvolvido foi eficiente na realização dos ensaios, com alta precisão no ajuste da equação do molinete utilizado.

O sistema de tração empregado nesta pesquisa, através de motor de passo, apresentou uma incerteza máxima na velocidade de deslocamento de 1,45%, podendo ser utilizado em ensaios de molinetes para velocidades menores que $2,0 \text{ m s}^{-1}$. Para velocidades maiores o *driver* e o motor de passo utilizados operam em faixa de ressonância, não conseguindo executar o movimento uniformemente.

Não foram observadas falhas na comunicação entre os módulos e o computador, possibilitando realizar todos os ensaios sem perda de dados durante cerca de oito horas.

O módulo de aquisição de dados (MAD) conseguiu monitorar a velocidade angular do molinete e enviar ao computador, mostrando-se como uma solução para a aquisição de dados de molinetes.

REFERÊNCIAS

A FOCUS FOR ANALYTICAL CHEMISTRY IN EUROPE (EURACHEM). **Quantifying uncertainty in analytical measurement**. 2nd. ed. London: EURACHEM, 2000. 120p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Guia para Expressão da Incerteza de Medição**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT; Rio de Janeiro: INMETRO, 2003. 120p.

BRIKOWSKI, T. **Streamflow/Stream Gauging**. Disponível em: <http://www.utdallas.edu/~brikowi/Teaching/Hydrogeology/OutdoorLabs/Streamflow_Stream_Gauging.html>. Acesso em: 01 mar.2011.

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES. **Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurements**. Sèvres: Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. 120p.

CAMARGO, A.P. **Desenvolvimento de um medidor eletrônico de vazão utilizando célula de carga**. 2009. 127p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 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, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMNASIO, E.; ORSI, E. Calibration method of current meters. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 137, n. 3, p. 386-392, 2011.

CARTER, R.W.; ANDERSON, I.E. Accuracy of current meter measurements. **Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, Reston, v. 89, n. HY4, p. 105-115, 1963.

CHEVALLIER, P. Aquisição e processamento de dados. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e aplicação**, 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2009. cap. 13, p. 485-525.

DAMAS, M.; PRADOS, A.M.; GÓMEZ, F.; OLIVARES, G. HidroBus system: fieldbus for integrated management of extensive areas of irrigated land. **Microprocessors and Microsystems**, Amsterdam, 25, v. 3, p. 177-184, 2001.

DIXON, W.J. Analysis of extreme values. **The Annals of Mathematical Statistics**, Bethesda, v. 21, n. 4, p. 488-506, 1950.

ENGEL, P. Current meter calibration strategy. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 125, n. 12, p. 1306-1308, 1999.

FIGUEIREDO JUNIOR, L.G.M.; DIAS, N.S.; DUENHAS, L.H.; BOTREL, T.A. Construção e calibração de um manômetro de leituras digital microprocessado. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 4, p. 492-499, 2006.

FOX, R.W.; McDONALD, A.T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Tradução de A. M. SOUZA MELO. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992. 662p.

GARCEZ, L.N.; ALVAREZ, G.A. **Hidrologia**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2009. 291p.

GARCIA, R.F.; QUEIROZ, D.M.; MIYAGAKI, O.H.; PINTO, F.A.D. Programa computacional para aquisição de dados para avaliação de máquinas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p. 375-281, 2003.

GOMIDE, R.L. Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos. In: FARIA, M.A.; SILVA, E.L.; VILELA, L.A.A.; SILVA, A.M. (Eds.). **Manejo da irrigação**. Poços de Caldas: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. p.133-238.

GRUBBS, F. Procedures for detecting outlying observations in samples. **Technometrics**, Alexandria, v. 11, n. 1, p. 1-21, 1969.

HERSCHEY, R.W. Current meter calibration – individual rating versus group rating. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCES IN HYDROMETRY, n. 134, 1982, Wallingford. **Proceedings of the Exeter Symposium**. Wallingford: IAHS, 1982. p. 25-36.

HUBBARD, E.F; SCHWARZ, G.E.; THIBODEAUX, K.G.; TURCIOS, L.M. Price current-meter standard rating development by the U. S. Geological Survey. **Journal of Hydraulic Engineering**, Reston, v. 127, n. 4, p. 250-257, 2001.

IBRAHIM, D. **Advanced PIC microcontroller projects in C: from USB to ZIGBEE with the PIC 18F Series**. New York: Elsevier, 2008. 560p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Standard for Local and metropolitan area networks – Part 15.4: Low rate wireless personal area networks (LR-WPANs)**. New York: IEEE, 2006. 322p.

INMETRO. **NIT-DICLA-021. Expressão da incerteza de medição por laboratórios de calibração**. Rio de Janeiro, 2012. 27p.

JAMES, K. Serial communications. In: JAMES, K. **PC interfacing and data acquisition: Techniques for measurement, instrumentation and control**. Oxford: Newness, 2000. 448p.

JOHNSTONE, D. (Org.) **Current meter calibration equations: A review of the adequacy of limited-range equations for New Zealand requirements**. Christchurch: NIWA, 2008. 27p.

LEOPOLDO, P.R.; SOUSA, A.P. **Hidrometria: medição de vazão**. Botucatu: UNESP, v. 1, 1979. 71p.

MEINZER, O.E. **Hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1942. 712p.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **PIC 18F4550 Datasheet**. Disponível em: <<http://www.microchip.com>>. Acesso em: 25 abril 2011.

PARK, J. Serial data communications. In: PARK, J.; MACKAY, S. **Practical data acquisition for instrumentation and control systems**. Burlington: Newnes, 2003 a. p. 176-203.

_____. Serial communications standards. In: PARK, J.; MACKAY, S.; WRIGHT, E. **Practical data acquisition for instrumentation and control**. Burlington: Newnes, 2003 b. p. 35-101.

QUEIROZ, T.M. **Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central**. 2007. 142p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

ROSNER, B. Percentage points for a generalized ESD many-outlier procedure. **Technometrics**, Alexandria, v. 25, n. 2, p. 165-172, 1983.

SANCHEZ, J.G.; ESPÍRITO SANTO, G. do. Alternative methods for calibration of cole type pitot tubes. In: FLOMEKO '98: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOW MEASUREMENT, 9., 1998. Lund. **Proceedings...** Lund: IMEKO, 1998. p. 27-30.

SMITH, J.R. RS-232 Serial Interface. In: _____. **Programming the PIC microcontroller with MBasic**. Burlington: Zewness, 2005. p. 151-186.

SOUSA, R.O.R.M. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação automatizado para áreas experimentais**. 2001. 83p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

SOUSA PINTO, N.L. Manipulação dos dados de vazão. In: SOUSA PINTO, N.L.; HOLZ, A.C.T.; MARTINS, J.A.; GOMIDE, F.L.S. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1976. cap. 9. p. 167-181.

STAUBLI, T. Propeller-type current meters. In: MULLER, A. (Ed.). **Discharge and velocity measurements**. Zurich: IAHR, 1988. p. 95-100.

STAUBLI, T.; HEGLAND, M. Current meter calibration and three-dimensional displacement effects. **Journal of Hydraulic Research**, Madrid, v. 20, n. 5, p. 453-464. 1982.

USDI. **Water measurement manual**: A water resources technical publication. 3. ed. Washington, DC: U. S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 2001. 317p.

USGS. **Measurement and computation of streamflow**: Measurement of stage and discharge. v. 1. Washington, DC: U. S. Government Printing Office, 1982. 284p.

VENNARD, J.K.; STREET, R.L. **Elementos de Mecânica dos Fluidos**. Tradução de A. M. LUIZ. 5 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. 687p.

VILELA, L.A.A.; GERVÁSIO, E.S.; SOCCOL, O.J.; BOTREL, T.A. Sistema para aquisição de dados de pressão e vazão usando o microcomputador. **Revista Brasileira de Agrocomputação**, Ponta Grossa, v. 1, n. 2, p. 25-30, 2001.

WANG, N.; ZHANG, N.; WANG, M. Wireless sensors in agriculture and food industry – Recent development and future perspective. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 50, p. 1-14, 2006.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, A.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Washington, DC., v. 90, n. C5, p. 8995-9005. 1985.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, Alabama, v. 2, p. 184-194, 1981.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Fluxograma do algoritmo construído para o *software* instalado no computador

APÊNDICE B – Fluxograma do algoritmo do microcontrolador do MCT

Os processos subsequentes ao processo *Recebe mensagem* são dependentes deste, ou seja, o MCT depende das instruções do computador para prosseguir.

APÊNDICE C – Fluxograma do algoritmo do microcontrolador do MAD