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

**Desenvolvimento de um medidor eletrônico de vazão
utilizando célula de carga**

Antonio Pires de Camargo

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem**

**Piracicaba
2009**

**Antonio Pires de Camargo
Engenheiro Agrônomo**

Desenvolvimento de um medidor eletrônico de vazão utilizando célula de carga

Orientador:

Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem**

**Piracicaba
2009**

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

Camargo, Antonio Pires de

Desenvolvimento de um medidor eletrônico de vazão utilizando célula de carga / Antonio Pires de Camargo. - - Piracicaba, 2009.
126 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.
Bibliografia.

1. Agricultura 2. Eletrônica 3. Hidrometria 4. Inovações tecnológicas I. Título

CDD 630.2375
C172d

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

DEDICATÓRIA

A meus pais, Hélio e Shirley. Para eles não há palavras que representem minha gratidão e amor. A eles agradeço pela vida, pelos ensinamentos, pela educação, pelos princípios, pela confiança e pelo caráter que hoje tenho. A eles dedico e dedicarei todos os meus esforços e realizações.

A minha avó, Celita, dedico esta conquista e agradeço pelo carinho, atenção, compreensão e incentivo em todos os momentos.

Dedico e ofereço a minha irmã, Meyriele, como um grande incentivo a seguir em frente sempre com dedicação, empenho e humildade.

A minha namorada, Camila, pela companhia, apoio e compreensão.

Ao Prof. Tarlei dedico este trabalho assim como dedico a minha família. A ele tenho grande admiração pela humildade, caráter e sabedoria.

AGRADECIMENTOS

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, pela oportunidade e estrutura disponibilizada para a realização do mestrado.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro à pesquisa.

Ao Prof. Tarlei Arriel Botrel pela atenção e dedicação às atividades desenvolvidas, pelos ensinamentos e pela preocupação demonstrada com meu bem estar durante todo o período.

Ao Prof. Feitosa Filho pelos ensinamentos e sabedoria compartilhados, pela confiança, atenção e amizade.

Aos amigos de sala Alessandro, Robson, Wanderley, Dinara e Stanley pela ajuda, companhia e boa convivência.

A Marinaldo e Velame pela amizade e grande contribuição na realização da pesquisa.

Aos professores do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP pelo conhecimento transmitido.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, pela atenção e disposição durante a realização dos trabalhos, em especial a Hélio, Luiz, Antonio, Juarez e Áureo, pela contribuição e participação na execução da pesquisa.

A Ricardo G. Vieira sou especialmente grato por ter construído uma amizade duradoura, pela contribuição em vários trabalhos e pelos conhecimentos compartilhados durante longo período.

A Universidade do Estado de Santa Catarina pela formação, em especial ao Prof. Olívio José Soccol e ao Prof. Mário Nestor Ullmann pelos conhecimentos transmitidos e pela confiança depositada ao conduzirem-me a uma excelente oportunidade.

A todos os professores do ensino fundamental e médio, pela formação sólida, pelos conhecimentos iniciais transmitidos e por me guiarem durante vários anos.

E, a todos aqueles que me acompanharam e contribuíram para a conclusão desta etapa.

“Nenhum vapor ou gás consegue mover alguma coisa até estar confinado. Nenhuma queda d’água se transforma em luz e energia até ser canalizada. E nenhuma vida cresce até estar concentrada, dedicada e disciplinada.”

(Harry Emerson Fosdick)

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Irrigação no Brasil	23
2.2 Histórico e importância da hidrometria	24
2.3 Métodos de estimativa de vazão.....	26
2.4 Medidores de vazão do tipo força.....	29
2.4.1 Princípio hidráulico de medidores de vazão do tipo força.....	29
2.4.2 Histórico dos medidores de vazão baseados no princípio de força	32
2.5 Métodos de calibração de medidores.....	41
2.5.1 Método gravimétrico.....	42
2.5.2 Método volumétrico.....	42
2.5.3 Método do medidor mestre ou padrão	43
2.6 Análise de incerteza nos processos de medição de vazão	43
2.6.1 Erro aleatório	45
2.6.2 Erro sistemático	46
2.6.3 Erros anômalos	46
2.6.4 Incerteza nas medições	47
2.6.5 Identificação e classificação de erros elementares nas medições	48
2.7 Características e classes de exatidão de medidores de vazão.....	50
2.7.1 Linearidade	50
2.7.2 Histerese.....	51
2.7.3 Repetitividade	51
2.7.4 Desvios de zero.....	51
2.7.5 Largura de faixa	52
2.8 Eletrônica na agricultura.....	52
2.9 Célula de carga	52

2.10	Microcontrolador PIC 18F4550.....	53
3	MATERIAL E MÉTODOS	57
3.1	Generalidades.....	57
3.2	Desenvolvimento do hardware.....	57
3.2.1	Protótipo de hardware I.....	57
3.2.2	Protótipo de hardware II.....	62
3.3	Desenvolvimento da parte mecânica do medidor de vazão	65
3.4	Medidor de vazão eletrônico utilizando célula de carga.....	69
3.4.1	Protótipo de hardware final – III.....	70
3.4.2	Software embarcado	72
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4.1	Determinação do número de dados a coletar por ciclo de amostragem e pertinência da implementação do Teste de Grubbs no software embarcado do medidor de vazão	81
4.2	Parâmetros de desempenho do medidor de vazão eletrônico utilizando célula de carga ...	89
4.2.1	Erro de repetitividade	91
4.2.2	Erro de histerese	94
4.2.3	Curva de calibração	96
4.2.4	Erro de linearidade / conformidade	98
4.2.5	Erro máximo admissível.....	102
4.3	Estimativas de forças de arraste e carga máxima à qual a célula de carga foi submetida	104
4.3.1	Estimativa da força de arraste sobre o anteparo.....	105
4.3.2	Estimativa da força de arraste sobre a alavanca.....	106
4.3.3	Estimativa da força máxima transmitida para a célula de carga	107
4.4	Determinação da perda de carga localizada causada pelo medidor de vazão	108
5	CONCLUSÃO	113
	REFERÊNCIAS.....	115
	ANEXOS	121

RESUMO

Desenvolvimento de um medidor eletrônico de vazão utilizando célula de carga

Novos equipamentos e tecnologias disponíveis no mercado vêm desempenhando papel crucial para o desenvolvimento e modernização do setor agrícola. A eletrônica e a automação têm-se mostrado cada vez mais importante e necessária neste processo de evolução, agilizando atividades, bem como reduzindo custos, principalmente aqueles associados à mão-de-obra demandada para execução de tarefas rotineiras. No contexto de irrigação verifica-se um objetivo comum referente à adoção de técnicas que propiciem a otimização da utilização de água pelas culturas, maximizando a eficiência dos processos de distribuição e aplicação de água e minimizando as perdas. Acerca disto, o conhecimento ou estimativa da vazão em um sistema de irrigação torna-se imprescindível ao se pensar em um plano de irrigação ou manejo de água eficiente. Existem diversos instrumentos e métodos de estimativa de vazão, cada qual com suas vantagens e limitações. Portanto, considerando um ideal de inovação tecnológica, foi proposto o desenvolvimento de um instrumento de medição de vazão utilizando dispositivos eletrônicos, de fácil utilização e baixo custo. Deste modo, este trabalho teve como objetivos: a) Desenvolver um medidor eletrônico de vazão utilizando célula de carga; b) Realizar testes hidráulicos e gerar uma equação matemática que represente a vazão instantânea em um conduto forçado, no qual o medidor estará instalado; e c) Determinar parâmetros de desempenho para o medidor desenvolvido. O experimento foi realizado no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/ USP em Piracicaba – SP. Desenvolveu-se um medidor de vazão que se enquadra na categoria de medidores do tipo força, no qual estão disponíveis opções de acesso a rotinas de medição, calibração e configurações. Na rotina de medição a leitura de vazão é atualizada aproximadamente a cada 7 segundos, sendo possível selecionar e alterar a unidade de exibição da vazão instantânea. O equipamento consta de uma rotina de calibração, na qual foi implementado o Método dos Mínimos Quadrados para definição de coeficientes de ajuste de uma equação de regressão ao conjunto de dados coletados nesta rotina. O procedimento de calibração do medidor foi desenvolvido com o objetivo de dispensar a necessidade de mão-de-obra especializada, bem como equipamento, computadores e métodos mais complexos e de difícil acesso. A tela de configurações permite observar e ajustar a equação de regressão utilizada, bem como ativar ou desativar a transmissão de dados via serial (RS-232) para computadores. O medidor proposto é capaz de operar na faixa de 7 a 28 m³.h⁻¹ com erro máximo de ±1,4 m³.h⁻¹ (±2,7%), sendo o coeficiente K de perda de carga localizada aproximadamente 0,55. Para as condições de estudo, a força de arraste máxima esperada sobre o conjunto anteparo-alavanca é próxima de 1,87 N, acarretando um esforço na célula de carga de até 3 N.

Palavras-chave: Inovação tecnológica; Hidrometria; Eletrônica na agricultura

ABSTRACT

Development of an electronic drag-force flow meter by using load cell

New available equipments and technologies in the market are each time more important for the agricultural section development and modernization. The electronics and automation area have great value on this evolution, speeding up activities as well as decreasing costs, mainly those costs regarding with necessary labor to execute routine tasks. On irrigation there is a common objective of choosing techniques that optimize crops water use, increasing efficiency and reducing losses of water distribution and application processes. The flow metering in an irrigation system is indispensable stuff when an efficient water management is desired. There are many tools, devices and methods of flow metering each one with its respective features. Considering a technology innovation principle this work had the purpose to develop an electronic flow meter easy to use and low cost, using electronic devices. Nevertheless this research had the following objectives: a) An electronic flow meter development by using load cell; b) Hydraulics tests in order to determine a math equation that matches the instantly flow inside a pipeline; and c) Flow meter assess determining performance parameters. The research was done at Hydraulics Laboratory, Rural Engineering Department (*Laboratório de Hidráulica - Departamento de Engenharia Rural*), ESALQ/USP on Piracicaba-SP-Brazil. The developed equipment is based on drag force that a body experiences when immersed in a fluid stream. The flow meter developed has some screen options allowing user tasks definition like: metering, calibration, and make some internal configurations. In the metering task the flow value is updated on intervals close to 7 seconds being possible to select or change units showing flow results. The calibration task was developed to avoid or release the specialized labor need, equipments, computers or any sophisticated and complex method. In this task, it was implemented Least Square Method in order to calculate coefficients of a fitting equation. This equation was used to estimate flow from digital signals acquired from the electronic circuit. The configuration interface allows the visualization and change the fitting equation used by the system. It also allows the data transmission for computers by serial port (RS-232 protocol). The proposed flow meter is able to work from 7 to 28 m³.h⁻¹ with uncertainty of $\pm 1.4 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ($\pm 2.7\%$). The coefficient of local head loss (K) was close to 0.55 for Reynolds number values higher than 10⁵. In this work, the greatest drag force expected acting on the flat circular body and cylindrical object is about 1.87 N, resulting in a force on load cell up to 3 N.

Keywords: Technology innovation; Flow measurement; Electronics on agriculture

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Medidor e controlador de vazão proposto por Graemiger(1922)	33
Figura 2 - Medidor de vazão tipo força proposto por Gent (1935)	33
Figura 3 - Medidor de vazão tipo força proposto por Kleiss (1953)	34
Figura 4 - Medidor de vazão tipo força proposto por Brous (1956)	35
Figura 5 - Medidor de vazão tipo força proposto por Reiley (1958).....	35
Figura 6 - Medidor de vazão tipo força proposto por Akeley (1970)	36
Figura 7 - Medidor de vazão tipo força proposto por Head (1977).....	36
Figura 8 - Medidor de vazão tipo força proposto por Buike (1981)	37
Figura 9 - Medidor de vazão tipo força proposto por Scarpa (1986)	37
Figura 10 - Medidor de vazão tipo força apresentado na NBR 10396 (1988)	38
Figura 11 - Medidor de vazão tipo força proposto por Samuelson et al. (2001).....	39
Figura 12 - Medidor de vazão tipo força proposto por Feller (2004).....	39
Figura 13 - Medidor de vazão do tipo força proposto por Peters e Ruppel (2005)	40
Figura 14 - Medidor de vazão tipo força proposto por Yowell et al. (2006).....	40
Figura 15 - Aparato para medição de vazão e direção de fluxo proposto por Li (1988).....	41
Figura 16 - Distribuição de frequência de erros em medições	44
Figura 17 - Intervalo de incerteza e tipos de erro	45
Figura 18 - Modelos comerciais de célula de carga	53
Figura 19 - PIC 18F4550 com encapsulamento do tipo DIP.....	56
Figura 20 - Circuito eletrônico do protótipo de hardware I.....	60
Figura 21 - Protótipo I - Hardware de transmissão de dados da célula de carga para o computador via porta paralela	61
Figura 22 - Fluxograma da rotina utilizada no Protótipo I.....	61
Figura 23 - Dados e equação de regressão para estimar peso em função de bytes – Protótipo I..	62
Figura 24 - Programa em Delphi para pesagem utilizando célula carga.....	62
Figura 25 - Balança digital com capacidade de 4,9N (0,5 kgf)	63
Figura 26 - Célula de carga com capacidade de 4,9N (0,5 kgf)	63
Figura 27 - Circuito do protótipo de hardware II	64
Figura 28 - Protótipo II - Hardware de transmissão de dados da célula de carga para o computador utilizando o Basic Step M8: (a) Protótipo de hardware II montado em uma placa de	

trilhas; (b) Alimentação do hardware com bateria de 12Vcc – 7,7A.h.; (c) Célula de carga conectada ao hardware; (d) Hardware enviando dados para processamento no computador..... 64

Figura 29 - Projeto em ambiente CAD da parte mecânica do medidor de vazão: (a), (b) e (c) Vistas do projeto mecânico do medidor; (d) Detalhe do mecanismo de transmissão de força da alavanca para a célula de carga; (e) Peça de PVC e fio de aço utilizados no mecanismo de transmissão de força; (f) Peça de PVC roscável utilizada para vedação; (g) Alavanca, arruela, anéis de vedação, peça de PVC e anteparo parafusado à alavanca; (h) Célula de carga acoplada à peça de PVC; (i) Colar de PVC 66

Figura 30 - Constituintes da parte mecânica do medidor: (a) Alavanca com pino de aço e suporte de PVC; (b) Alavanca, anéis de vedação, suporte de PVC, pino de aço, arruela e peça roscável; (c) Colar de PVC; (d) Anel de vedação 1 posicionado no colar; (e) Alavanca com pino de aço e suporte posicionados; (f) Anel de vedação 2; (g) Arruela; (h) Peça roscável de PVC sobre a arruela..... 67

Figura 31 - Constituintes da parte mecânica do medidor e ferramentas utilizadas: (a) Torno mecânico utilizado para fabricação das peças de PVC; (b) Peça de acoplamento da célula de carga; (c) Célula de carga; (d) Peça de acoplamento posicionada sobre o colar; (e) Manufatura da peça intermediária entre o fio de aço e a alavanca; (f) e (g) Detalhes da parte mecânica do medidor 68

Figura 32 - Bancada de ensaios hidráulicos: (a) e (b) Parte mecânica do medidor instalada na canalização; (c) União instalada a montante do equipamento; (d) Trecho retilíneo da canalização com registros de controle; (e) Canalização de ensaios contendo medidor de vazão eletromagnético instalado em série com o medidor desenvolvido 69

Figura 33 - Hardware final: (a) Parte inferior da placa de fenolite exibindo trilhas de condução e soldas; (b) Parte superior da placa mostrando componentes eletrônicos e conectores; (c) Conectores interligando dispositivos do circuito eletrônico; (d) Envoltório e interface de operação do medidor 71

Figura 34 - Fluxograma de inicialização e de opções gerais 74

Figura 35 - Fluxograma da rotina de medição 76

Figura 36 - Fluxograma da rotina de calibração 79

Figura 37 - Sinal digital de resposta obtido de 3 repetições com 500 amostras cada, a partir de uma vazão de referência constante e ajustada em $0 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ 82

Figura 38 - Sinal digital de resposta obtido de 3 repetições com 500 amostras cada, a partir de uma vazão de referência constante e ajustada em $15 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$	82
Figura 39 - Sinal digital de resposta obtido de 3 repetições com 500 amostras cada, a partir de uma vazão de referência constante e ajustada em $22,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$	83
Figura 40 - Sinais digitais filtrados de resposta obtidos de 3 ensaios realizados para vazões fixadas em 0, 15 e $22,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, sendo cada ensaio composto por 3 repetições de 500 dados cada repetição.....	84
Figura 41 - Sinal digital de resposta obtido de 3 repetições com 30 amostras cada, a partir de uma vazão de referência constante e ajustada em $0 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$	86
Figura 42 - Sinal digital de resposta obtido de 3 repetições com 30 amostras cada, a partir de uma vazão de referência constante e ajustada em $15 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$	86
Figura 43 - Sinal digital de resposta obtido de 3 repetições com 30 amostras cada, a partir de uma vazão de referência constante e ajustada em $22,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$	87
Figura 44 - Sinais digitais filtrados de resposta obtidos de 3 ensaios realizados para vazões fixadas em 0, 15 e $22,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, sendo cada ensaio composto por 3 repetições de 30 dados cada repetição.....	88
Figura 45 - Valores obtidos em quatro ensaios de carregamento (C) e descarregamento (D) do medidor de vazão.....	91
Figura 46 - Determinação da repetitividade segundo Beck (1983).....	92
Figura 47 - Determinação da histerese segundo Beck (1983).....	94
Figura 48 - Dados médios obtidos de 4 ensaios com o objetivo de avaliar as diferenças entre o sinal de resposta obtido para a condição de carregamento e descarregamento	96
Figura 49 - Equação de ajuste utilizada para correlacionar sinal digital e vazão	97
Figura 50 - Determinação de desvio de linearidade segundo Beck (1983).....	98
Figura 51 - Média dos sinais digitais de resposta x Reta de referência para análise de linearidade	100
Figura 52 - Dimensões construtivas para a estimativa da força de arraste sobre o anteparo e a alavanca	104
Figura 53 - Representação das tomadas de pressão para avaliação da perda de carga causada pelo medidor de vazão.....	109
Figura 54 - Curva K x Número de Reynolds para o medidor de vazão desenvolvido	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de princípios de medição de vazão para líquidos.....	26
Tabela 2 - Valores comparativos de desempenho de medidores de vazão (AWWA, 1989).....	50
Tabela 3 - Principais características do microcontrolador PIC 18F4550	55
Tabela 4 - Valores obtidos em milivolts segundo esforços conhecidos provocados na célula de carga.....	59
Tabela 5 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios coletando 500 dados por conjunto amostral	84
Tabela 6 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios coletando 30 dados por conjunto amostral	87
Tabela 7 - Valores obtidos em quatro ensaios do medidor de vazão	90
Tabela 8 - Erros de repetitividade para 4 ensaios na condição de carregamento	93
Tabela 9 - Desvios do sinal digital de resposta para a condição de carregamento e descarregamento	95
Tabela 10 - Média dos ensaios de avaliação do medidor	97
Tabela 11 - Dados para análise de linearidade	99
Tabela 12 - Desvios entre vazões de referência e vazões calculadas utilizados para análise de conformidade.....	101
Tabela 13 - Resumo dos resultados de desempenho do medidor de vazão desenvolvido.....	103
Tabela 14 - Dados médios de deflexão manométrica utilizados para determinação da perda de carga localizada causada pelo medidor de vazão	110
Tabela 15 - Valores calculados do coeficiente K de perda de carga localizada para cada vazão testada	111

1 INTRODUÇÃO

Com a modernização do setor agrícola, a concorrência entre entidades de produção buscando mercados consumidores vem tornando-se cada vez mais acirrada. Neste contexto, alternativas que tornem o processo de produção cada vez mais eficiente, de menor custo, mantendo-se níveis de qualidade aceitáveis, podem ser consideradas pontos decisivos para a viabilidade econômica e sucesso de determinada atividade.

Atualmente a irrigação ocupa importante posição nos processos de modernização das técnicas agrícolas, sendo uma ferramenta essencial para a obtenção de incrementos de produtividade, qualidade e rentabilidade na agricultura. É compreensível a importância que a irrigação possui no cenário socioeconômico e no agronegócio brasileiro, além do papel desempenhado na produção mundial de alimentos.

Sabe-se que o Brasil é um país privilegiado em abundância de recursos hídricos, contando com cerca de 8% do total das reservas mundiais de água potável, bem como 18% do potencial de água de superfície do planeta (MAIA NETO, 1997). Todavia, estima-se que aproximadamente 80% destes recursos estejam concentrados na Bacia Amazônica (PAZ et al., 2000), justamente a região menos habitada e explorada do país. Além disso, a região nordeste, bem como locais próximos a aglomerações urbanas na região sudeste, sofrem de problemas de escassez de água havendo disputa pelo uso da água entre o setor urbano e agrícola.

Considerando os fundamentos e a quantidade de informações disponíveis correlacionando solo, água, planta e atmosfera, torna-se possível determinar com precisão a quantidade de água a disponibilizar para as plantas, para que estas expressem adequado desempenho produtivo. É de objetivo comum ao se tratar de irrigação, a adoção de técnicas que otimizem a utilização de água pelas culturas, reduzindo perdas e melhorando a eficiência dos processos de distribuição e aplicação de água. O combate ao desperdício e às perdas de água deve ser tratado como uma preocupação permanente, não só em sistemas agrícolas, mas também no meio urbano e industrial, havendo, portanto a necessidade de que estes eventos negativos sejam amenizados cada vez mais.

Acerca disto, o conhecimento ou estimativa da vazão em um sistema de irrigação é algo imprescindível ao se pensar em um plano de irrigação ou manejo de água eficiente. No que diz respeito à determinação de vazões, diversos são os métodos disponíveis para realizar estimativas, havendo peculiaridades respectivas a cada um deles. Parte dos métodos disponíveis e utilizados

onera investimento considerável para instalação, além de demandar equipamentos, infra-estrutura e mão-de-obra especializada para sua adequada operação e manutenção.

Novos equipamentos e tecnologias disponíveis no mercado vêm desempenhando papel crucial para o desenvolvimento e modernização do setor agrícola. A eletrônica e a automação têm-se mostrado cada vez mais importante e necessária neste processo de evolução, agilizando atividades, bem como reduzindo custos, principalmente aqueles associados à mão-de-obra demandada para execução de tarefas rotineiras.

A importância de disponibilizar equipamentos de baixo custo e fácil construção ao setor de produção agrícola constitui um assunto de interesse, já que está diretamente associada à redução de custos na atividade. A criação de dispositivos que congreguem, ao mesmo tempo, exatidão e qualidade, bem como baixo custo, institui a linha de pesquisa proposta no presente trabalho.

Portanto, visando obter um instrumento de medição de vazão por meio de dispositivos eletrônicos, de fácil construção e baixo custo, este trabalho se propõe: a) Desenvolver um medidor eletrônico de vazão utilizando célula de carga; b) Realizar testes hidráulicos e gerar uma equação matemática que represente a vazão instantânea em um conduto forçado, no qual o medidor estará instalado, e; c) Determinar parâmetros de desempenho para o medidor desenvolvido.

O medidor de vazão proposto deverá ser de simples instalação, bem como de baixo custo, adequando-se às condições de pequenos produtores. Uma vez construído, será praticamente dispensada a necessidade de mão de obra especializada para instalação, operação e manutenção do equipamento, tornando-o mais acessível ao produtor.

Além disso, o equipamento proposto vem ao encontro de ideologias inovadoras, visto que disponibilizará ao setor agrícola uma nova opção para mensuração de vazão em condutos forçados. Assim sendo, o presente trabalho visa contribuir para a evolução tecnológica e automatização de sistemas de irrigação e distribuição de água.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Irrigação no Brasil

De acordo com o Banco Mundial (1990) o potencial de irrigação do Brasil é estimado em cerca de 29 milhões de hectares, excluídas as bacias do Amazonas e do Tocantins, na região Norte. No entanto, em 1998 a área irrigada era de apenas 2,87 milhões de hectares (CHRISTOFIDIS, 1999).

Testezlaf (2002) afirma que a irrigação apresenta enorme potencial para se expandir e se aperfeiçoar no Brasil, podendo proporcionar contribuição importante para aumentar a disponibilidade de alimentos e auxiliar no desenvolvimento econômico nacional. A adoção da agricultura irrigada pode significar o aumento da produção e produtividade agrícola, a elevação dos níveis de renda e a conquista de melhoria das condições de vida da população rural.

Por outro lado, considerando as questões de outorga e uso racional de água, a irrigação precisa ser utilizada de forma eficiente e adequada pelos agentes que empregam seu uso, para que não venha a tornar-se mais um elemento gerador de problemas ambientais. Portanto, desenvolver e aperfeiçoar tecnologias que minimizem impactos ambientais, melhorando e viabilizando a atividade agrícola irrigada, constituem assunto de interesse neste contexto.

Segundo Queiroz (2007), a evolução da irrigação nos últimos anos introduziu uma série de inovações tecnológicas que possibilitam aos equipamentos controlar de forma mais adequada e automatizada a aplicação da água. Isto se traduz em um processo mais eficiente, permitindo manejar de forma mais precisa as exigências hídricas das culturas, de forma a possibilitar aumentos significativos na qualidade e na quantidade dos produtos explorados.

São inúmeras as pesquisas que demonstram o resultado positivo de sistemas de irrigação, quando bem instalados e manejados, contribuindo para a elevação de rendimentos.

Um dos pontos críticos para a adoção de tecnologias necessárias para a obtenção de melhores desempenhos em sistemas de irrigação está relacionado ao custo dos equipamentos utilizados. A maior parte da tecnologia disponível no mercado está detida em poucas empresas, as quais estabelecem preços de comercialização que tornam a aquisição destes equipamentos inviável para determinadas atividades agrícolas. Portanto, o desenvolvimento de equipamentos de menor custo, mantendo-se boa qualidade evidentemente, emerge como tema que pode auxiliar no processo de evolução tecnológica no meio agrícola.

2.2 Histórico e importância da hidrometria

Segundo Lee (2003) a necessidade de quantificar o fluxo de líquidos tem sido reconhecida desde o início da civilização e com o avanço da mesma. Muitas das teorias básicas da hidráulica de medição foram desenvolvidas nos séculos XVII e XVIII, por cientistas como Torricelli, Pitot, Woltman e Venturi.

Segundo Silva (1997) e também Molina (2008), em 2000 a.C. sistemas de medição de vazão já eram utilizados nos canais de irrigação da civilização egípcia. Spink (1973) cita que o desenvolvimento dos princípios básicos da medição de vazão teve início no império romano, na época do imperador Caio Julio César (101 – 44 a.C.), quando se utilizavam orifícios e clepsidras (relógios d'água) para a medição do tempo e para a medição da água utilizada pelos habitantes das áreas urbanas.

Com o desenvolvimento da sociedade e a evolução dos processos de produção, a demanda e as disputas pelo uso da água aumentaram, conseqüentemente evidenciou-se um aumento na importância da medição de vazão. Com isso, o desenvolvimento de métodos e instrumentos de medição de vazão aplicados para diferentes situações, tornou-se necessário para solucionar estas questões.

A partir do século XV, contribuições científicas realmente importantes sobre o assunto foram apresentadas. Leonardo Da Vinci publicou o trabalho intitulado “Sobre o movimento das águas e as obras Fluviais” em que tratou do assunto da medição de vazão. No século XVII, Galileu Galilei publicou estudos sobre a hidrostática, assunto de fundamental importância para o desenvolvimento dos conceitos de medição de vazão (DELMÉE, 2003). Também no início do século XVII, Castelli e Torricelli precederam a fundação da teoria dos medidores de vazão deprimogênios com o desenvolvimento de conceitos que demonstraram que a vazão é proporcional à velocidade e a área da seção transversal de escoamento, e que a descarga através de um orifício varia em função da altura da coluna d'água ou carga hidráulica sobre o centro do dispositivo de descarga (SPINK, 1973).

No início do século XVIII Giovanni Poleni, professor de matemática na Universidade de Pádua, teve resultados promissores com orifícios de descarga, precursores dos medidores de vazão (SPINK, 1973).

Henri Pitot, em 1732, apresenta um artigo intitulado “Descrição de uma máquina para medição da velocidade do escoamento da água e da velocidade nas tubulações”, sendo que várias aplicações para essa máquina chamada de “tubo de Pitot” foram desenvolvidas (SPINK, 1973).

Por volta de 1738 Johann Bernoulli e Daniel Bernoulli desenvolveram o Teorema de Bernoulli com as equações hidráulicas que governam parte do comportamento do escoamento de líquidos, bem como o funcionamento dos medidores de vazão deprimogênicos (SPINK, 1973).

Em 1755, o matemático suíço Leonhard Euler estabelece pela primeira vez as equações diferenciais gerais relativas ao movimento dos líquidos (SPINK, 1973).

Em 1797, o físico italiano Giovanni Battista Venturi publica os resultados de seu experimento, em que foram apresentados os princípios do tubo de Venturi (SPINK, 1973).

Clemens Herschel, em 1887, desenvolveu a partir das teorias de Venturi, um medidor de vazão do tipo tubo Venturi, com fabricação comercial, que era formado de um elemento primário muito parecido com o dos medidores deprimogênicos utilizados de 1910 até hoje (SPINK, 1973).

No início de 1900, em razão dos problemas apresentados na medição de gás natural com medidores Venturi, devido a expansões e transformações adiabáticas, surgiram os medidores do tipo placa de orifício (SPINK, 1973).

A partir do século XX até hoje, o desenvolvimento de medidores e o surgimento de novos conceitos de medição de vazão continuam ocorrendo, sendo este processo cada vez mais voltado para o emprego de dispositivos eletrônicos no processo construtivo, tornando os equipamentos cada vez mais exatos e precisos, bem como de fácil operação por parte dos usuários. Devido a evolução da eletrônica, processos de coleta, monitoramento, transmissão e registro de dados, em tempo real, tornam-se possíveis e viáveis para utilização em medidores de vazão.

Pode-se afirmar que todo projeto relacionado à utilização ou manejo da água tem como ponto de partida o conhecimento ou estimativa da vazão. Segundo Leopoldo e Souza (1979), o capítulo da Hidráulica que trata do estudo dos métodos de medição de vazão é denominado Hidrometria.

A Hidrometria, quando encarada do ponto de vista mais amplo, ou seja, o estudo das variáveis envolvidas nos fenômenos hidráulicos, é uma das partes mais importantes da Hidráulica, justamente porque ela cuida de questões tais como medidas de profundidade, de variação do nível da água, de seções de escoamento, de pressões, de velocidade e vazões, entre outras. Portanto, determinações de vazão realizam-se para diversos fins (IBARS, 2004).

Para Baum et al. (2003) a demanda de água pela agricultura, indústria, uso urbano e atividades recreativas, está aumentando. A demanda crescente exige manejo adequado e conservação dos limitados recursos hídricos. Sobre isto, medidores de vazão adequadamente selecionados para cada situação, permitem mensurações precisas do fluxo de água.

A medição precisa da vazão é essencial para garantir uma distribuição uniforme da água dentro de uma área irrigada. Um bom manejo do recurso hídrico disponível é dependente de quantificações utilizando técnicas precisas de medição. Outorgas de água e procedimentos de manejo requerem freqüentemente a instalação de instrumentos de medição e controle da vazão (HILL, 2003).

2.3 Métodos de estimativa de vazão

Vazão fundamentalmente pode ser definida como o volume de um fluido (gás ou líquido) que passa através de uma seção transversal de escoamento durante um dado intervalo de tempo. Segundo Delmée (2003) a quantidade do fluido pode ser medida em volume (vazão volumétrica) ou em massa (vazão mássica).

De outro modo, a vazão também pode ser expressa pela Equação da Continuidade, sendo função da velocidade e área da seção transversal de escoamento.

Delmée (2003) afirma que a classificação de medidores de vazão pode ser feita de várias maneiras, sendo proposta uma tabela que separa os medidores segundo o princípio de medição (Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação de princípios de medição de vazão para líquidos

Pressão diferencial	Medidores lineares	Volumétricos	Em canais abertos
Placa	Área variável	Disco de nutação	Calhas
Bocal	Coriolis	Palheta	Vertedores
Venturi	Eletromagnético	Pistão oscilante	
Pitot	Térmico	Pistões recíprocos	
Pitot de média	Turbina	Engrenagem	
	Ultra-sônico		
	Vórtice		

Adaptado de Delmée (2003)

A estimativa de vazão adotando o princípio de pressão diferencial resulta em instrumentos chamados de medidores deprimogênicos (DELMÉE, 2003). Estes medidores possuem um elemento primário em contato com o líquido que escoar e acessórios para determinação da variação de pressão provocada pelo próprio elemento primário. Leis físicas fundamentam o funcionamento destes medidores, sendo que equações teóricas existentes geralmente são complementadas com coeficientes obtidos através de experimentação.

Para a medição de vazão nos condutos forçados, destaca-se o uso de diafragmas e medidores Venturi pela simplicidade e qualidade de medição, todos originados da aplicação do teorema de Bernoulli, que indiretamente permitem a determinação de vazões por meio da medição do diferencial de pressão em seções de escoamento distintas (DENÍCULI, 1990).

Estima-se que na atualidade pelo menos 75% dos medidores de vazão industriais sejam dispositivos de pressão diferencial. Dentre as vantagens destacam-se a construção simples, não possuindo partes móveis e com funcionamento de fácil entendimento; não são caros, comparado a outros tipos de medidores de vazão; podem ser utilizados para a maior parte dos fluidos, existindo muitas publicações sobre as aplicações potenciais. As principais desvantagens que podem ser citadas são: amplitude de medição menor que outros tipos de medidores; sinal de saída não linear com a vazão; necessidade de trechos compridos de tubulação para a montagem; precisão menor que a de medidores mais modernos (GUTIÉRREZ, 2003).

São considerados lineares os medidores de vazão que produzem um sinal de saída diretamente proporcional à vazão, com fator de proporcionalidade constante ou aproximadamente constante na faixa de medição (DELMÉE, 2003). Geralmente são fornecidos por empresas de instrumentação especializadas, sendo que o elemento primário que interage com o fluxo de líquido e o elemento transmissor constitui um conjunto único.

Os medidores volumétricos mensuram essencialmente volumes. A vazão pode ser calculada derivando matematicamente volume em um determinado intervalo de tempo. Portanto, são necessários acessórios de medição do tempo, quando utilizados estes medidores.

Os medidores de vazão utilizados para a mensuração em canais abertos destinam-se a líquidos que escoam por gravidade e apresentam uma superfície livre, em contato com a pressão atmosférica. Os principais medidores são vertedores e medidores de regime crítico (calhas).

Existem ainda medidores lineares especiais e dentre estes é importante destacar os medidores tipo força. Este tipo de medidor apresenta um disco como obstáculo parcial ao

deslocamento do fluido, sendo que o fluido exerce força sobre a superfície do disco. A força transmitida ao disco é proporcional a vazão no interior do conduto, podendo ser transmitida a um sensor pneumático ou eletrônico (DELMÉE, 2003).

Botrel (2008) apresentou de forma didática uma divisão de processos de medição de vazão, sendo estes: (1) processos diretos, (2) processos que empregam a relação velocidade área e, (3) processos que empregam estreitamento na seção de escoamento. A categoria (1) engloba processos de estimativa de vazão que utilizam a equação fundamental ($Q = \text{Volume}/\text{Tempo}$), sendo incluídos aqui dispositivos e meios de medição de princípio volumétrico ou mássico. Na categoria (2) estão incluídos medidores que estimam a velocidade de escoamento, sendo a vazão determinada utilizando a Lei de Castelli ou Equação da Continuidade ($Q = A.V$). E, na última categoria, podem ser incluídos, orifícios, bocais, venturímetros, vertedores, medidores de regime crítico, dentre outros que reduzem a área da seção de escoamento.

A NBR 10396 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 1988) classifica os medidores de vazão em dois tipos básicos: (1) volumétricos ou mássicos, nos quais o volume é determinado pelo enchimento e esvaziamento alternado de câmaras de capacidade determinada; (2) vazão instantânea, nos quais a indicação da vazão é em tempo real, sem a necessidade de enchimento de câmaras.

Os medidores de vazão se agrupam conforme a sequência apresentada abaixo, seguindo a NBR 10396 (1988):

• Volumétrico	• Eletromagnético	• Área variável
• Rotor semi-submerso	• Térmico	• Velocidade
• Pistão recíproco	• <u>Força</u>	• Turbina
• Pistão rotativo	• Canal aberto	• Hélice
• Palheta	• Pressão diferencial	• Anemômetros
• Diafragma	• Resistência linear	• Ultra-sônico
• Multi rotor	• Tubo de Pitot	• Coriolis
• Lóbulo	• Centrífugo	
• Engrenagem	• Placa de orifício	
• Disco de nutação	• Tubo de Venturi	
• Vazão instantânea	• Bocal	
• Vórtice	• Tubo multifuros	

No ANEXO A são apresentadas algumas das vantagens e desvantagens dos principais medidores de vazão. As informações são apresentadas de forma geral, sem qualquer hierarquia ou ponderação entre as vantagens e desvantagens dos medidores de vazão. A tabela tomou por base dados apresentados por Delmée (2003) e Bean (1971).

Para o presente trabalho ênfase será dada a medidores de vazão instantâneos que utilizam o princípio de força.

2.4 Medidores de vazão do tipo força

Na literatura inglesa são tratados como *Target flowmeters* ou ainda *Drag-force flowmeters* dentre outras variações similares. Esta categoria de medidores de vazão mensura a velocidade de escoamento de um líquido com base na força que a corrente líquida exerce em um corpo ou objeto disposto no interior da tubulação. A maioria desses medidores consta de um obstáculo parcial ao deslocamento do fluido, que pode ser tratado como anteparo, sendo este preso a uma haste rígida. Por meio de diferentes mecanismos esta haste transmite a força exercida no anteparo para um elemento ou dispositivo sensor. Sabendo que a força exercida no anteparo é proporcional a velocidade de escoamento pode-se determinar a vazão na tubulação. Na sequência será discutido de modo simplificado o princípio hidráulico desta categoria de medidores de vazão e serão apresentados alguns equipamentos que utilizam este princípio para medição de vazão.

2.4.1 Princípio hidráulico de medidores de vazão do tipo força

De acordo com Neves (1974), pode-se estimar a força de uma corrente líquida pelo Teorema das Quantidades de Movimento, segundo o qual a variação da quantidade de movimento, durante certo tempo, é igual à impulsão da força durante esse tempo.

$$\int_{t_1}^{t_2} F \cdot dt = \int_{V_1}^{V_2} m \cdot dV$$

Segundo Neves (1974), no regime permanente, como as diferentes grandezas são constantes em um mesmo lugar, pode-se considerar o fenômeno durante o período de 1 segundo, no qual a massa que escoar é:

$$m = \frac{\gamma \cdot Q}{g}$$

Sendo assim, a expressão do Teorema das Quantidades de Movimento pode ser reescrita da seguinte forma (NEVES, 1974):

$$F = \frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot (V_2 - V_1)$$

Em que:

F: Força da corrente líquida (N)

γ : Peso específico do fluido ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)

Q: Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

g: Aceleração da gravidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

V: Velocidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

De forma bastante similar e apresentada por Almeida (2008) a força ou empuxo de um jato líquido sobre um anteparo pode ser estimada por:

$$F = \gamma \cdot \frac{V^2}{2g} \cdot A$$

Em que:

A: Área útil da seção transversal de escoamento (m^2)

Delmée (2003) cita medidores de vazão do tipo força afirmando que, quando o fluido atravessa a área anular reduzida entre o anteparo e o corpo do medidor ou a canalização, o anteparo é submetido a uma força produzida pela pressão diferencial sobre sua área. Considerando que o anteparo se prende a uma alavanca que transmite a força a um sensor apropriado, o autor aponta que a força sobre o anteparo pode ser estimada considerando a pressão diferencial sobre a área do mesmo, pela seguinte equação:

$$F = S \cdot \Delta p$$

Na sequência Delmée (2003) menciona ainda que a pressão diferencial (Δp) é proporcional ao quadrado da vazão (Q), obtendo-se então:

$$F = S \cdot \frac{Q^2}{K}$$

Portanto, a vazão pode ser determinada a partir de força do seguinte modo:

$$Q = \sqrt{\frac{K \cdot F}{S}}$$

Em que:

F: Força sobre o anteparo (N)

S: Área da superfície do anteparo perpendicular ao fluxo (m^2)

Δp : Diferencial de pressão ($N.m^{-2}$)

K: Coeficiente de proporcionalidade (-)

Q: Vazão ($m^3.s^{-1}$)

Délmee (2003) reporta que levantamentos feitos em laboratório mostram que o coeficiente K é praticamente constante quando o escoamento se dá com Número de Reynolds superior a 10000.

Procedimentos criteriosos para determinação da força devida ao escoamento de fluidos em torno de objetos imersos são estudados detalhadamente na Mecânica dos Fluidos. Vennard (1978) cita que, quando o escoamento ocorre em torno de objetos imersos, estes são submetidos a duas componentes principais de força, sendo elas: força de sustentação (*lift force* - F_L) e força de arraste (*drag force* - F_D). Para Fox (1988) a força de arraste é a componente da força atuando em um corpo paralelamente à direção do escoamento, enquanto que a força de sustentação é a componente perpendicular ao movimento do fluido. Hughes (1974) comenta que a força de sustentação é importante quando a área da superfície paralela à direção do escoamento é grande em comparação com a normal, por exemplo, o corpo de uma asa de avião. Todavia, a força de arraste é dominante em corpos ditos bojudos (HUGHES, 1974), como seria o caso de discos e cilindros posicionados perpendicularmente ao fluxo. Afirma-se ainda que a força total que atua em um corpo imerso pode ser interpretada como a resultante de todas as forças de pressão e de atrito que atuam sobre o corpo. Vennard (1978) menciona que a previsão e o cálculo da força de arraste sobre objetos submersos são de difícil determinação, sendo necessárias medidas experimentais e tanto a pressão quantos as forças de atrito devem ser consideradas.

Como resultado de uma série de procedimentos matemáticos, incluindo análise dimensional do arraste e da sustentação, Vennard (1978) deduz as seguintes equações simplificadas para determinação da força de arraste e força de sustentação:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A \cdot \rho \cdot V^2$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot A \cdot \rho \cdot V^2$$

Em que:

F_D : Força de arraste (N)

C_D : Coeficiente de arraste (-)

A: Área de projeção do corpo imerso (m^2)

ρ : Massa específica do fluido ($kg.m^{-3}$)

V: Velocidade do escoamento ($m.s^{-1}$)

F_L : Força de sustentação (N)

C_L : Coeficiente de sustentação (-)

De acordo com Hughes (1974) tanto o coeficiente de arraste (C_D) quanto o coeficiente de sustentação (C_L) são função do Número de Reynolds para a maioria das situações com fluidos incompressíveis.

Fox (1988) e Hughes (1974) apresentam com detalhes a mecânica dos fluidos envolvida no escoamento em torno de corpos imersos especificando coeficientes de arraste para determinadas geometrias de objetos imersos, sendo estes coeficientes válidos para faixas específicas determinadas pelo Número de Reynolds.

2.4.2 Histórico dos medidores de vazão baseados no princípio de força

Graemiger (1922) desenvolveu um dispositivo de medição e controle de velocidade de escoamento de fluidos utilizando o princípio de força da corrente líquida. O dispositivo consta de um anteparo em contato com a corrente líquida, preso a uma haste com uma extremidade em contato com uma câmara de ar pressurizada. Utilizando de mecanismos auxiliares e relações de variação de pressão na câmara possibilitavam-se a medição e controle da velocidade do escoamento na tubulação (Figura 1).

Gent (1935) propôs um medidor de vazão do tipo força, cujo principal objetivo foi a construção simples e barata além de oferecer baixa interferência ao escoamento. Os resultados de vazão eram apresentados em uma escala graduada em função da tensão exercida em uma mola (Figura 2).

Figura 1 - Medidor e controlador de vazão proposto por Graemiger(1922)

Figura 2 - Medidor de vazão tipo força proposto por Gent (1935)

Kleiss (1953) apresentou um sistema medidor, regulador e capaz de registrar dados de velocidade de fluxo de fluidos. Para isso utilizou um sistema de alavancas para transmissão da força devida ao escoamento, um conjunto de válvulas e dispositivos de ajuste do fluxo e ainda, dispositivos mecânicos de registro dos dados (Figura 3).

Figura 3 - Medidor de vazão tipo força proposto por Kleiss (1953)

Brous (1956) criou um medidor de vazão recomendado para fluidos contendo material sólido em suspensão. A força exercida pela velocidade do escoamento sobre o anteparo era transmitida para um mecanismo de transmissão e alavancas que devidamente calibrado apresentava a leitura de vazão em uma escala graduada (Figura 4).

Reiley (1958) apresentou um dispositivo medidor de velocidade de escoamento de líquidos ou gases bastante simples com uma escala calibrada exibindo leituras em unidades de força e vazão (Figura 5).

Figura 4 - Medidor de vazão tipo força proposto por Brous (1956)

Figura 5 - Medidor de vazão tipo força proposto por Reiley (1958)

Akeley (1970) propôs um medidor cuja força aplicada no anteparo era mensurada por um medidor de pressão diferencial adaptado ao equipamento (Figura 6).

Figura 6 - Medidor de vazão tipo força proposto por Akeley (1970)

Head (1977) desenvolveu um medidor do tipo força apto a operar em velocidades de escoamento extremamente baixas (Figura 7). Neste trabalho foram adotados elementos sensores de natureza eletromagnética.

Figura 7 - Medidor de vazão tipo força proposto por Head (1977)

Buiké (1981) propôs um medidor de vazão para condutos, baseado no efeito de força ou arraste (Figura 8). A parte mecânica do medidor é constituída de uma alavanca metálica com uma extremidade conectada a um disco de interceptação parcial do fluxo, outra extremidade tensionando um arame e um eixo central da alavanca sujeito a movimento de rotação. O arame submetido ao esforço de tensão proveniente da alavanca foi posicionado envolto por um dispositivo gerador de campo magnético. Com base na tensão do arame e frequência de vibração obtém-se um sinal de saída proporcional a força e velocidade de escoamento.

Figura 8 - Medidor de vazão tipo força proposto por Buiké (1981)

Scarpa (1986) apresentou um medidor de vazão do tipo força utilizando extensômetros, comentando que estes medidores são menos sensíveis ao desgaste por abrasão quando submetidos ao escoamento de líquidos contendo sedimentos (Figura 9).

Figura 9 - Medidor de vazão tipo força proposto por Scarpa (1986)

Na NBR 10396 (1988) cita-se um medidor do tipo força que segue o mesmo princípio dos medidores apresentados neste tópico (Figura 10).

Figura 10 - Medidor de vazão tipo força apresentado na NBR 10396 (1988)

Samuelson et al. (2001) desenvolveram um medidor constituído por uma haste fixada a um suporte rígido, em uma das extremidades, e a um anteparo em contato com o líquido na outra (Figura 11). Nas laterais longas da haste fixaram-se extensômetros e um sensor de temperatura, ficando ambos imersos. Com base na deformação das hastes obteve-se a velocidade de escoamento. O sensor de temperatura foi utilizado para corrigir efeitos de variação de temperatura na resistência elétrica dos extensômetros e melhorar a qualidade da medição.

Figura 11 - Medidor de vazão tipo força proposto por Samuelson et al. (2001)

Outro medidor tipo força foi apresentado por Feller (2004). Neste medidor o elemento sensor também funciona segundo fenômenos eletromagnéticos. Como se evidencia na Figura 12, proporcionalmente a velocidade na seção de escoamento há uma inclinação na alavanca o que acarreta interferência nas linhas de campo magnético, gerando um sinal que pode ser lido e correlacionado com a velocidade de escoamento.

Figura 12 - Medidor de vazão tipo força proposto por Feller (2004)

Peters e Ruppel (2005) apresentaram um medidor de vazão do tipo força próximo do modelo proposto no presente trabalho. Conforme a Figura 13, há uma haste cilíndrica de 8 mm de diâmetro posicionada centralizada no conduto, atravessando toda a seção de escoamento. Na extremidade superior da haste há uma célula de carga que recebe o esforço devido à velocidade

de escoamento no interior do conduto. Este autor ainda utilizou uma tela distanciada em duas vezes o diâmetro do tubo a montante da haste, a fim de prover a estabilização ou homogeneização do perfil de velocidade de escoamento. Aspectos hidráulicos de grande interesse são apresentados e discutidos no trabalho do referido autor.

Figura 13 - Medidor de vazão do tipo força proposto por Peters e Ruppel (2005)

Yowell et al. (2006) apresentaram um medidor constituído de uma haste rígida, na qual em uma das extremidades há um anteparo e na outra há uma base rígida. Em uma região entre a base e a haste há extensômetros instalados. Estes transdutores medem a deformação ocorrida permitindo correlacionar esta com a velocidade de escoamento no conduto (Figura 14).

Figura 14 - Medidor de vazão tipo força proposto por Yowell et al. (2006)

Leigh Jr. (1962) e Jendrzeczyk (1982) apresentaram transdutores similares para medição da magnitude e direção da força causada pela ação de uma corrente líquida em um anteparo acoplado a uma haste. Este transdutor consta de extensômetros, tendo aplicação para medidores de vazão tipo força.

Li (1988) também criou um aparato de medição de vazão e direção do fluxo similar aos dois anteriores (Figura 15).

Figura 15 - Aparato para medição de vazão e direção de fluxo proposto por Li (1988)

Ben-Mansour et al. (2008) propuseram um dispositivo similar ao proposto por Leigh Jr. (1962), Jendzejczyk (1982) e Li (1988), sendo constituído por vários sensores de força instalados em um corpo piramidal sujeito a deformação pela ação da corrente líquida.

Os equipamentos apresentados constituem praticamente toda a literatura disponível e encontrada para medidores de vazão do tipo força, sugerindo que este tipo de medidores foram pouco estudados e explorados.

2.5 Métodos de calibração de medidores

Ao longo da vida útil do medidor há a necessidade de que sejam efetuadas rotinas de calibração, para que seja assegurada a qualidade da mensuração realizada pelo equipamento. Mudanças indesejáveis podem ocorrer em função de vários motivos, como, por exemplo, incrustações no interior do medidor, alterando o escoamento, as tomadas de pressão e a área da seção transversal da tubulação. Portanto, pode ocorrer que as constantes definidas na fabricação, com o tempo, já não correspondam à realidade.

American Water Works Association - AWWA (1989) afirma que a confiança e a exatidão do sinal de saída de um medidor de vazão é altamente dependente das condições de instalação e que uma posição de instalação inadequada pode degradar a exatidão do medidor abaixo de níveis

aceitáveis. Neste sentido a calibração do medidor em campo é condição necessária para a determinação da exatidão do medidor após sua instalação.

Pode-se afirmar que ao longo da vida útil do medidor, caso se esteja interessado em manter a confiabilidade do valor mensurado pelo mesmo, a calibração do medidor deve ser algo freqüente, desde a sua fabricação e instalação.

2.5.1 Método gravimétrico

No método gravimétrico de calibração a descarga líquida ocorre em um recipiente, cujo peso pode ser determinado utilizando uma balança ou outro dispositivo de pesagem. De acordo com o peso específico do líquido e a variação de peso na unidade de tempo, torna-se possível determinar com exatidão a vazão da canalização. Este método é discutido com maiores detalhes na norma ISO 4185 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO, 1980).

Assim sendo, a vazão (Q) pode ser determinada pelo quociente do peso coletado em função do tempo de aquisição. Este valor é então comparado com o valor indicado pelo medidor que se deseja calibrar.

$$Q = \frac{(P_{final} - P_{inicial})}{\gamma \cdot t}$$

Em que:

Q: Vazão de referência ou padrão ($m^3.s^{-1}$)

γ : Peso específico do líquido ($N.m^{-3}$)

$P_{inicial}$: Peso no início da medição (N)

P_{final} : Peso no final da medição (N)

t: Tempo de medição (s)

2.5.2 Método volumétrico

Neste método a descarga ocorre em um recipiente de volume conhecido. Com base na variação de nível do líquido no recipiente, pode-se determinar a variação de volume na unidade de tempo e, conseqüentemente a vazão do conduto. Neste método a calibração é efetuada confrontando o valor mensurado pelo medidor em calibração com a vazão determinada pela

variação de nível ao longo do tempo no reservatório de referência. O princípio deste método segue a norma ISO 8316 (1987).

Portanto, a vazão pode ser determinada pela razão do volume coletado em função do tempo de aquisição. Este valor é então comparado com o valor indicado pelo medidor em calibração.

$$Q = \frac{(V_{o_{final}} - V_{o_{inicial}})}{t} = \frac{(h_{final} - h_{inicial}) \cdot A}{t}$$

Em que:

Q: Vazão de referência ou padrão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

$V_{o_{inicial}}$: Volume no início da medição (m^3)

$V_{o_{final}}$: Volume no final da medição (m^3)

$h_{inicial}$: Nível do líquido no reservatório no início da medição (m)

h_{final} : Nível do líquido no reservatório no final da medição (m)

A: Área da superfície do reservatório (m^2)

t: Tempo de medição (s)

2.5.3 Método do medidor mestre ou padrão

O método do medidor mestre ou padrão, apresentado na NBR ISO 9104 (2000), consiste em utilizar um medidor previamente calibrado por um laboratório de reconhecimento legal, com exatidão maior do que a do medidor a ser calibrado, instalado em série com o medidor a ser calibrado, estando os dois medidores em condições de instalação adequadas. O procedimento então compara a vazão apresentada pelo medidor padrão, tomando-a como valor real ou verdadeiro, com a vazão observada no medidor em calibração.

2.6 Análise de incerteza nos processos de medição de vazão

É inevitável que todo e qualquer processo de medição contenha erros, mesmo se realizadas todas as correções e calibrações possíveis. Os erros podem ser positivos ou negativos, variando em magnitude e ao longo do tempo.

Erros são as diferenças observadas entre as medições e o valor verdadeiro, sendo este último sempre desconhecido. Para contornar este problema, em alguns casos, pode-se adotar um valor verdadeiro definido a partir de uma rotina específica de medição em laboratório.

Cada valor observado em uma medição é constituído de um erro total de medição (δ), o qual ainda pode ser dividido em dois componentes: erro sistemático (β) e erro aleatório (ϵ), como é ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Distribuição de frequência de erros em medições

Outro termo pertinente a este assunto é Incerteza. A incerteza é uma estimativa do erro, o qual se espera que não seja ultrapassado. É comum definir-se um intervalo de valores no qual é esperado que o valor verdadeiro esteja contido, com alta probabilidade, sendo este intervalo denominado Intervalo de Incerteza. O intervalo de incerteza, de modo simplificado, pode ser expresso por um valor “U” acima e abaixo da média dos dados observados ($\bar{X} \pm U$), sendo que “U” expressa a incerteza ou a combinação dos erros sistemático e aleatório. Além dos erros sistemático e aleatório existem também erros anômalos ou discrepantes (*outliers*), que serão discutidos na seqüência. Para elucidar o significado dos conceitos discutidos é conveniente observar a Figura 17.

Uma abordagem bastante detalhada sobre análise de incerteza na medição de vazão é apresentada na norma ISO 5168 (1985). A maior parte dos conceitos aqui apresentados segue recomendações da referida norma.

Figura 17 - Intervalo de incerteza e tipos de erro

2.6.1 Erro aleatório

Erros aleatórios (*random errors*) são causados por inúmeras, pequenas e independentes influências que impedem que o sistema de medição apresente sempre um mesmo resultado para um valor de entrada constante. A variação entre medições repetitivas para valores de entrada constantes é chamada de erro aleatório.

O desvio-padrão amostral (S) é usado para a estimativa do erro aleatório (ϵ), sendo que desvio-padrão elevado significa alta dispersão dos dados e, conseqüentemente, alto erro aleatório. O desvio-padrão amostral (S) pode ser calculado como mostrado abaixo.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}}$$

Em que:

N : Número de amostras

X_i : i -ésima amostra

$\bar{X}$: Média das amostras

Geralmente as variações dos dados a partir do valor médio seguem uma distribuição próxima a Distribuição Normal, sendo que, quanto maior o número de dados, maior é o ajuste a esta distribuição. Seguindo procedimento apresentado na ISO 5168 (1985), para uma Distribuição Normal, o valor verdadeiro estará contido, com 95% de probabilidade, no intervalo definido por:

$$\bar{X} \pm \frac{t_{95} \cdot S}{\sqrt{N}}$$

Quando o número de amostras for pequeno ($N < 30$), recomenda-se utilizar os valores t de Student ao nível de 95%. Para amostras grandes ($N \geq 30$), t_{95} pode ser substituído por 2, ou seja, dois desvios-padrão são utilizados para estimar o limite do erro aleatório (ISO 5168, 1985).

2.6.2 Erro sistemático

Erros que permanecem constantes durante um teste ou medição são chamados de erros sistemáticos (*bias errors* ou *systematic errors*). O erro sistemático pode ser determinado apenas quando os valores das medições forem comparados com referências verdadeiras ou exatas, o que raramente é possível. Dificilmente estes erros são exatamente conhecidos, de modo que, para isso são adotados limites para estimar os mesmos.

O erro sistemático pode ser acumulado a partir de imperfeições de: (1) Correções adotadas na calibração; (2) Instalação dos instrumentos; (3) Aquisição e ajuste dos dados; (4) Erros de operador, e; (5) Erros do método (ISO 5168, 1985).

2.6.3 Erros anômalos

Erros anômalos são valores anômalos, atípicos ou discrepantes (*outliers*) detectados durante as medições. Todos os sistemas de medição podem produzir dados deste tipo, sendo estes geralmente provenientes de erros humanos ou de mau funcionamento temporário do instrumento, de modo que acabam por invalidar a medição. Estes erros não podem ser incluídos como parte da incerteza de medição, devendo ser negligenciados e descartados.

Muitas análises estatísticas são sensíveis a presença de *outliers*, sendo que estes atuam aumentando o erro aleatório do sistema de medição. Cálculos de média e desvio-padrão podem ser altamente distorcidos por um simples valor discrepante, portanto a identificação de *outliers* deve fazer parte da rotina de qualquer análise de dados. Potenciais *outliers* devem ser examinados e corrigidos se possível, caso contrário devem ser eliminados.

Para detecção e eliminação de erros desta natureza existem alguns testes estatísticos que podem ser utilizados, sendo o Método de Grubbs utilizado neste trabalho.

O Método de Grubbs, recomendado pela norma ISO 5168 (1985), é usado para detectar *outliers* em conjuntos de dados, partindo do pressuposto que os dados seguem a Distribuição Normal. Este método detecta um *outlier* de cada vez, de modo que a cada valor extremo detectado que seja caracterizado como *outlier* efetua-se o descarte. O teste deve ser repetido até que não haja mais *outliers*. Filliben (2009) recomenda que este teste não seja aplicado para conjuntos com menos do que 6 dados.

O teste de Grubbs é definido pelas seguintes hipóteses:

H_0 : Não há *outliers* no conjunto de dados;

H_1 : Há pelo menos um *outlier* no conjunto de dados.

A análise adotada neste teste segue a seguinte equação:

$$G = \left(\frac{|X_i - \bar{X}|}{S} \right)$$

Em que:

G : Valor de Grubbs

X_i : Valor extremo a ser testado (possível *outlier*)

$\bar{X}$: Média amostral

S: Desvio-padrão amostral

Esta equação representa a versão bicaudal do teste, a qual é de interesse para o presente estudo. Para esta versão, a hipótese de não haver *outliers* é rejeitada se:

$$G > G_{\text{tabelado}} \quad \text{ou} \quad G > \frac{(N-1)}{\sqrt{N}} \cdot \sqrt{\frac{t_{(\alpha/N; N-2)}^2}{N-2 + t_{(\alpha/N; N-2)}^2}}$$

A tabela dos valores contendo os valores críticos ou tabelados de Grubbs pode ser observada no ANEXO B.

2.6.4 Incerteza nas medições

ISO 5168 (1985) afirma que o objetivo e duração de testes, bem como o número de calibrações relacionadas aos testes afetam a classificação dos erros em componentes sistemáticos e aleatórios. Recomenda-se nesta norma que, após todos os erros elementares possíveis serem

identificados é necessário um método para combinar os erros elementares aleatórios e sistemáticos, definindo faixas ou limites de erros aleatórios e erros sistemáticos. Para isto efetuam-se os seguintes cálculos:

Limite de erro aleatório

$$S = \sqrt{\sum_i (S_i)^2}$$

Limite de erro sistemático

$$B = \sqrt{\sum_i (B_i)^2}$$

A análise de incerteza pode ser dita completa quanto forem obtidos os limites do erro sistemático e os limites do erro aleatório, os quais devem ser combinados para se obter um único valor que expressa o limite do intervalo de incerteza. O limite do intervalo de incerteza possui uma interpretação simples, sendo o maior erro esperado dentro das condições de operação previstas.

Para tanto, o limite do intervalo de incerteza (U) pode ser calculado pela combinação dos dois outros limites de erro, da seguinte forma:

$$U = \sqrt{B^2 + (t_{95} \cdot S)}$$

Adotando este modo de cálculo, a probabilidade do valor verdadeiro estar incluso na faixa de valores considerada é de 95%. Novamente, se o número de amostras for pequeno ($N < 30$), recomenda-se utilizar os valores t de Student ao nível de 95%, caso contrário, t_{95} pode ser substituído por 2.

2.6.5 Identificação e classificação de erros elementares nas medições

Segundo a norma ISO 5168 (1985), recomenda-se que seja elaborada uma lista contendo todos os possíveis erros que afetam os resultados das medições. Por conveniência, estes erros podem ser agrupados nas seguintes categorias:

- **Calibração:** O maior objetivo do processo de calibração é determinar os erros sistemáticos e eliminá-los. O processo de calibração adequado permite que se obtenha uma mínima

combinação de erros sistemático e aleatório entre o instrumento avaliado e o instrumento padrão.

- Aquisição de dados: Dados podem ser adquiridos a partir de medições de sinais elétricos de resposta em um circuito elétrico conectado a transdutores, de modo que há uma série de erros que podem interferir nesta etapa.
- Ajuste dos dados: Erros nesta fase são normalmente associados à resolução computacional ou ao ajuste dos dados a um modelo matemático. Estes erros normalmente podem ser negligenciados.
- Erros do método: São aqueles associados a um procedimento particular de medição ou relativos ao princípio de operação de determinado instrumento, podendo ser constituído de incertezas quanto as constantes adotadas para a obtenção de resultados. De modo geral, erros de método constituem fontes de erros sistemáticos.
- Erros subjetivos: Podem ser causados por erros de operador ao calibrar, operar ou processar dados de um instrumento de medição.

Em cada uma destas categorias, os erros devem ser subdivididos em erros sistemáticos e aleatórios.

Exemplos típicos de erros sistemáticos em medições de vazão são:

- Erro devido uma única calibração do medidor de vazão;
- Erro de determinação das constantes utilizadas no método de medição;
- Erro devido ao arredondamento de resultados de medição.

Uma vez que os erros sistemáticos não sejam detectados e corrigidos, continuarão a afetar os resultados das medições.

Por outro lado, erros aleatórios podem ser causados pela baixa exatidão de leitura do instrumento de medição ou ainda, por uma variação ou dispersão do sinal de saída do instrumento. O efeito de erros aleatórios pode ser minimizado aumentando o número de amostras a partir das quais é calculada uma média para mostrar o resultado (ISO 5168,1985).

Considerando que sistemas de medição estão sujeitos a dois tipos de erros, sistemático e aleatório, pode concluir que um sistema de medição de qualidade (exato e preciso) é aquele que congrega mínimos erros aleatório e sistemático. Deve-se salientar que o objetivo sempre é construir um intervalo de incerteza dentro do qual o valor verdadeiro estará contido.

2.7 Características e classes de exatidão de medidores de vazão

Delmée (2003) afirma que as medições de vazão não são realizadas com uma exatidão semelhante às de comprimento ou massa, devido às limitações dos métodos de medição e à diversidade das variáveis que podem exercer influência no processo de medição. Para caracterizar e distinguir os medidores de vazão, o mesmo autor sugere que sejam delimitadas classes de exatidão, nas quais se considera o Erro Máximo Admissível (EMA), que inclui erros de linearidade, histerese e repetitividade. Fontes de erros de medição também incluem desvios de zero, que são um tipo de erro sistemático passível a correção. É importante deixar claro que o EMA conduz a resultados semelhantes àquele determinado pelo Limite do Intervalo de Incerteza (U), já discutido e recomendado pela ISO 5168 (1985).

A Tabela 2, elaborada com base nas informações contidas em AWWA (1989) mostra um comparativo de desempenho para valores de exatidão, repetitividade e rangeabilidade para alguns dos principais medidores de vazão.

Tabela 2 - Valores comparativos de desempenho de medidores de vazão (AWWA, 1989)

Medidor	Exatidão (%)	Repetitividade	Rangeabilidade
Venturi	$\pm 0,75$	$\pm 0,25$	4:1 a 10:1
Placa de orifício	$\pm 0,25$ a $\pm 2,0$	$\pm 0,25$	4:1
Eletromagnético	$\pm 0,5$	$\pm 0,25$	10:1
Turbina	$\pm 0,25$ a $\pm 2,0$	$\pm 0,25$	10:1
Ultra-sônico	$\pm 1,0$ a $\pm 2,5$	$\pm 0,25$	20:1
Pitot	$\pm 0,25$ a $\pm 5,0$	$\pm 0,5$	4:1

2.7.1 Linearidade

O erro de linearidade é um erro sistemático que exprime o quanto a resposta de um sistema afasta-se de uma reta (GONÇALVES JÚNIOR, 2004). Linearidade também pode ser definida como o erro máximo com que determinada característica se afasta de uma função linear. Usa-se o termo “conformidade” quando a função não é linear, como por exemplo, a saída de um transdutor de pressão que é resultado da raiz quadrada do sinal de pressão diferencial. Neste caso, a conformidade é em relação a função raiz quadrada (DELMÉE, 2003).

2.7.2 Histerese

O erro de histerese pode ser considerado um erro de precisão, pelo fato das respostas não se repetirem a cada leitura, portanto, não podendo ser corrigido ou compensado (COELHO FILHO et al., 2004). O erro de histerese corresponde à máxima diferença entre as leituras quando efetuadas de forma crescente (carregamento) ou decrescente (descarregamento) em todos os ciclos de calibração ou avaliação (WHEELER; GANGI, 1996).

Segundo Delmée (2003) a histerese é o erro máximo com o qual, para um mesmo sinal de entrada, uma leitura de saída afasta-se de outra, dependendo de ter sido alcançada de sinais maiores ou menores. Ao se calibrar um instrumento, os valores de referência são aplicados sucessivamente de 0 a 100% (carregamento) e de 100% a 0 (descarregamento), para verificar-se a histerese.

2.7.3 Repetitividade

Os erros de repetitividade também são de precisão, por não se repetirem a cada leitura, não podendo, portanto, ser compensados (COELHO FILHO et al., 2004). O erro de repetitividade corresponde à máxima diferença entre as medidas seguindo uma única direção, carregamento ou descarregamento, considerando todos os ciclos de avaliação.

Repetitividade refere-se à capacidade do medidor em indicar o mesmo valor em medições consecutivas sob as mesmas condições.

2.7.4 Desvios de zero

Valor de entrada apresentado pelo instrumento quando não há sinal de entrada ou quando o sinal de entrada é muito pequeno, da mesma ordem ou menor que a sensibilidade do equipamento. Este erro pode ser escondido por uma rotina que assuma um valor zero, quando o sinal for inferior a um limite mínimo. Desvios de zero provocam, geralmente, um desvio em toda a escala de medição. Segundo Delmée (2003), este tipo de erro pode ser resultado de mudanças nas condições de operação do instrumento e, nesse caso, são previsíveis e facilmente corrigidos. Ou ainda, de outra forma, são erros que podem ocorrer com o tempo, por envelhecimento de componentes ou outros motivos, e, nestas situações a solução é a recalibração periódica do instrumento.

2.7.5 Largura de faixa

Termo também apresentado como rangeabilidade do instrumento de medição. Diz respeito a relação entre os valores máximo e mínimo, lidos com a mesma exatidão, na escala de um instrumento (DELMÉE, 2003).

2.8 Eletrônica na agricultura

De acordo com Souza (2001), na indústria eletrônica existem muitos componentes, sensores e microcontroladores que podem ser úteis a irrigação. A eletrônica tem um papel fundamental na modernização das atividades agrárias, a qual possibilita a automação dos equipamentos, tornando as atividades mais rápidas e precisas. Portanto, cabe aos profissionais do setor agrícola identificar como e onde esses avanços podem ser utilizados.

Para Braga (1999), grande parte das inovações tecnológicas tem como princípio básico o uso de dispositivos eletrônicos.

Segundo Lopez et al. (1992), com os recentes avanços no campo dos microprocessadores, consegue-se unidades muito compactas a preços interessantes para uso na agricultura.

Os microcontroladores disponíveis no mercado possuem um grande potencial de aplicação na agricultura, existindo unidades compactas com preços acessíveis, possibilitando a automação, com o controle do funcionamento hidráulico da irrigação por meio do uso de diferentes tipos de sensores (IBARS, 2004).

2.9 Célula de carga

Células de carga são dispositivos intensamente utilizados e com vasta aplicação em vários ramos da indústria. As principais razões para sua grande utilização estão intimamente relacionadas à alta fidelidade de resposta, custo baixo, dimensões reduzidas e também porque permitem medições dinâmicas (BECK, 1983). O objetivo elementar de uma célula de carga é fornecer um sinal elétrico sempre que um esforço for aplicado sobre ela, sendo por este motivo classificada como um transdutor eletro-mecânico.

A célula de carga é um transdutor com aplicação desde balanças digitais até processos de automatização e controle industriais. O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se

na variação da resistência elétrica de um sensor denominado extensômetro ou *strain gauge*, quando submetido a uma deformação.

Extensômetros são desenvolvidos para converter esforço mecânico em sinais elétricos. Extensômetro é um transdutor capaz de medir deformações nos corpos. Quando um material é deformado sua resistência é alterada, de modo que a fração de mudança na resistência é proporcional a fração de mudança no comprimento do material. Quando esticados esse elementos sofrem uma variação na resistência proporcional à força aplicada, ocorrendo uma mudança de sua resistência elétrica, o que gera um sinal elétrico proporcional à força aplicada.

Segundo Reggiani (2002), as células de carga dominam a indústria pesada, existem em grande versatilidade, possuem alta precisão e baixo custo. Também cita que as principais características dos extensômetros são: a) Adequada precisão (1%); b) Boa linearidade; c) Fácil instalação; d) Ampla faixa de temperatura; e) São dispositivos pequenos, leves e baratos, f) Adequada resposta estática e dinâmica; g) Aplicável mesmo sob condições severas; e, h) Pequeno custo por ponto de medida.

São diversos os tipos de célula de carga comercializados, cada qual com as respectivas aplicações (Figura 18).

Figura 18 - Modelos comerciais de célula de carga

2.10 Microcontrolador PIC 18F4550

Um microcontrolador é um dispositivo que consiste de componentes interligados capazes de desempenhar diversas funções, apresentando dimensões bastante reduzidas. Também são tratados como controladores embarcados (*embedded controller*) pelo fato de serem instalados

internamente nos equipamentos em que operarão (IBRAHIM, 2008). A importância da integração, além do tamanho reduzido, está no baixo custo e alto desempenho dos circuitos, aliado à confiabilidade e estabilidade de funcionamento. Uma vez que os componentes são encapsulados a resistência mecânica destes permite montagens cada vez mais robustas a choques e impactos mecânicos, permitindo a concepção de portabilidade dos dispositivos eletrônicos.

Em geral, microcontroladores são programados em linguagem de alto nível como PASCAL, BASIC e C. Linguagens de alto nível facilitam bastante o aprendizado, bem como o desenvolvimento de projetos mais complexos.

Segundo Ibrahim (2008), microcontroladores são ferramentas poderosas que permitem ao desenvolvedor criar sofisticados programas de controle e manipulação de dados de entrada e saída. O mesmo autor afirma que estes dispositivos são classificados segundo o número de bits que eles processam. Microcontroladores com 8 bits são os utilizados na maioria das aplicações. Microcontroladores de 16 e 32 bits são recomendados para aplicações mais complexas, sendo também mais caros.

A arquitetura de um microcontrolador, na sua forma mais simples, consiste em uma unidade de processamento (microprocessador), memória e entradas/saídas (*Input/Output*) de sinal. O microprocessador pode ser comparado como um “cérebro” do microcontrolador, no qual todas as operações lógicas e matemáticas são executadas, bem como sinais de periféricos são enviados ou recebidos e interpretados. A memória também é uma parte fundamental do microcontrolador, pois é nela que são armazenadas as instruções ou rotinas a serem executadas pelo microcontrolador, e também são gravados dados de interesse provenientes, por exemplo, de um sensor.

Uma série de outras propriedades e componentes podem estar presentes nos microcontroladores, como temporizadores (*timers*), conversores analógico-digital (A/D), dispositivos de interface serial, dispositivos de interface USB, dentre outros.

Atenção deve ser dada aos conversores A/D que podem estar disponíveis integrados ao microcontrolador, de acordo com o modelo deste. Um conversor A/D tem a função de converter um sinal analógico, como um sinal de tensão (volts), para uma forma digital que pode ser interpretada pelo microcontrolador. Conversores A/D são classificados pelo número de bits que interpretam e também pelo número de canais ou pinos para leitura de sinais provenientes de diferentes sensores ou dispositivos. O número de bits do conversor A/D refere-se a resolução,

detalhamento ou exatidão no processo de conversão do sinal analógico em digital, de modo que, quanto mais bits possui o conversor A/D mais o sinal digital se ajusta ao sinal analógico, ou mais exato e preciso é o sinal convertido. A maioria dos microcontroladores utilizados constam de um ou mais canais de conversão A/D de 8 ou 10 bits, entretanto existem conversores A/D de até 32 bits.

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

A série 18F dos microcontroladores PIC é recomendada para uso em aplicações mais complexas. O PIC 18F4550 é um modelo de microcontrolador desta série que consta de 40 pinos, dispositivo de interface serial e USB, 13 canais de conversão A/D de 10 bits de resolução, dentre outras características apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Principais características do microcontrolador PIC 18F4550

Característica	PIC 18F4550
Número de pinos	40
Frequência de operação	Até 48 MHz
Memória programável	32768 bytes
Memória de dados (bytes)	2048 bytes
Memória EEPROM (bytes)	256 bytes
Portas I/O	A, B, C, D e E
Timers	4
Módulo de comunicação serial	Sim
Módulo de comunicação USB	Sim
Conversor A/D - 10 bits	13 canais

Este microcontrolador é comercializado em diferentes tipos de encapsulamento sendo de pertinência para o presente trabalho o encapsulamento do tipo DIP cuja ilustração é apresentada na Figura 19.

Figura 19 - PIC 18F4550 com encapsulamento do tipo DIP

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Generalidades

O desenvolvimento do medidor de vazão proposto nesta pesquisa, bem como os testes e avaliações foram realizados no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, no município de Piracicaba – SP.

A pesquisa e desenvolvimento foram realizados basicamente em três etapas:

1ª – Desenvolvimento do protótipo de hardware e do software embarcado: Nesta etapa alguns protótipos foram desenvolvidos a fim de permitir a compreensão da eletrônica e programação envolvida com a aquisição e processamento de dados provenientes de uma célula de carga utilizando computadores e/ou microcontroladores.

2ª – Desenvolvimento da parte mecânica do medidor: Consistiu-se no desenvolvimento de um projeto mecânico adequado e funcional para a operação do medidor de vazão proposto.

3ª – Integração do protótipo de hardware com o software embarcado: Etapa final do projeto, na qual se obteve como resultado o medidor de vazão eletrônico utilizando célula de carga.

3.2 Desenvolvimento do hardware

3.2.1 Protótipo de hardware I

a) Hardware

Com o objetivo de realizar testes preliminares, inicialmente foi desenvolvido um circuito eletrônico para aquisição do sinal proveniente de uma célula de carga utilizando a porta paralela do computador. Para isto, foi criado um sistema similar ao de uma balança digital buscando compreender o funcionamento do dispositivo.

A seguir estão descritos os elementos e o procedimento adotado para a elaboração do circuito eletrônico de comunicação da célula de carga com o computador via porta paralela.

Materiais utilizados:

- 1 conector DB25 com fiação (cabo de impressora convencional);
- 1 célula de carga com capacidade de 49,05 N (5 kgf);
- 1 conversor A/D – ADC0831 – 8bits

- 1 amplificador instrumental – INA125;
- Fonte de alimentação de 12 volts corrente contínua (Vcc);
- 1 regulador de tensão LM7805;
- 1 capacitor de 10 μ F e 1 capacitor de 100 μ F;
- resistores de 330 Ω .

A célula de carga possui quatro fios, sendo dois fios de alimentação, geralmente, um vermelho (+) e outro preto (-) e ainda, outros dois fios que enviam o sinal elétrico, sendo eles verde (+) e branco (-). Assim como outros transdutores, a célula de carga necessita de um amplificador de sinal para que as variações de tensão elétrica possam ser detectadas e transcritas corretamente por um conversor A/D. Entretanto, exigem-se amplificadores distintos para aplicação em célula de carga, sendo que para o caso utilizou-se o amplificador de instrumentação INA125. Esta exigência deve-se ao fato de que existe um sinal positivo e um sinal negativo que devem ser associados para se obter o resultado das variações ocorridas no transdutor e também pela razão da necessidade de uma tensão de alimentação altamente estável para a célula de carga. O amplificador INA125 possui a característica de ser um amplificador instrumental com tensões de referência de alta exatidão e estabilidade, adequando-se à aplicação proposta.

Para a alimentação da célula de carga foi utilizada uma tensão de 5 Vcc ajustada pelo amplificador de instrumentação INA125. O amplificador por sua vez foi alimentado com 12Vcc direto de uma bateria de 12Vcc-7,7A.h. Acerca do amplificador instrumental, ainda foi necessário determinar-se o ganho de sinal desejado, o qual é definido por resistores externos ao amplificador, cujo cálculo obedece à seguinte equação, definida na folha de dados do amplificador instrumental.

$$Ganho = 4 + \frac{60000}{R(\Omega)}$$

Para a determinação da amplificação de sinal ou ganho necessário efetuou-se um ensaio preliminar, submetendo a célula de carga a pesos conhecidos entre 0 e 5 kgf (0 e 49,05 N) incrementados a cada 0,5 kgf (4,9 N). Para cada incremento de peso efetuou-se a leitura da respectiva tensão elétrica gerada nos fios de saída de sinal da célula de carga. Para isto utilizou-se um multímetro portátil digital Minipa ET-2651. Os dados obtidos são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores obtidos em milivolts segundo esforços conhecidos provocados na célula de carga

Peso (kgf)	Tensão elétrica (mV)
0,0	0,0
0,5	0,6
1,0	1,3
1,5	2,0
2,0	2,6
2,5	3,3
3,0	4,0
3,5	4,6
4,0	5,3
4,5	6,0
5,0	6,6

A partir destes dados, o ganho de tensão necessário foi calculado da seguinte forma:

Sem amplificação de tensão tem-se que:

$$5kgf \text{ --- } 6,6mV$$

Com amplificação deseja-se que:

$$5kgf \text{ --- } 5000mV$$

$$\therefore \frac{5000mV}{6,6mV} \cong 756$$

Um ganho de aproximadamente 756 vezes seria o ideal para a situação, exigindo uma resistência equivalente a 80Ω , determinada da seguinte forma:

$$G = 4 + \frac{60000}{R} \Rightarrow R = \frac{60000}{G - 4} \Rightarrow R = \frac{60000}{756 - 4} \therefore R \cong 80\Omega$$

Em função da disponibilidade de materiais, utilizou-se 4 resistores de $330\Omega \pm 10\%$ associados em paralelo, obtendo a resistência de $82,5\Omega$. Então, para a aplicação desenvolvida adotou-se um ganho aproximado de 731 vezes.

O amplificador de instrumentação emite na sua saída um sinal analógico, na forma de tensão elétrica, que deve ser convertido para sinal digital para que possa ser corretamente reconhecido e interpretado por um computador ou microcontrolador. Para isso, utilizou-se o circuito integrado ADC0831, que é um conversor analógico-digital com resolução de 8 bits. Este conversor A/D necessita de uma tensão de alimentação e outra de referência, sendo ambas de tensão igual a 5Vcc. Esta tensão de 5Vcc foi ajustada utilizando-se o regulador de tensão LM7805 e dois capacitores de filtragem.

A partir disso, foi elaborado o circuito para transmissão de dados da célula de carga para o computador via porta paralela (Figura 20).

Figura 20 - Circuito eletrônico do protótipo de hardware I

Abaixo está uma imagem do primeiro protótipo de hardware desenvolvido, simulando uma balança digital (Figura 21). O hardware foi construído em uma placa de testes que já disponibilizava uma tensão de referência de 5Vcc, simplificando o circuito.

Figura 21 - Protótipo I - Hardware de transmissão de dados da célula de carga para o computador via porta paralela

b) Software embarcado

Desenvolveu-se uma rotina bastante simples em ambiente Delphi para exibir o sinal digital de resposta da célula de carga a diferentes cargas (Figura 22).

Figura 22 - Fluxograma da rotina utilizada no Protótipo I

Assumindo o ganho de 731 vezes apresentado e explicado anteriormente, efetuou-se um segundo ensaio submetendo a célula de carga a incrementos de peso a cada 0,5 kgf. Para cada incremento de peso foi anotado o respectivo sinal de resposta em bytes (sinal digital). A partir disso pode-se determinar a equação de regressão para estimativa de pesos a partir do sinal digital (bytes) (Figura 23).

Figura 23 - Dados e equação de regressão para estimar peso em função de bytes – Protótipo I

Efetuada-se alguns ajustes na rotina obteve-se uma interface para visualização do esforço na célula de carga (Figura 24).

Figura 24 - Programa em Delphi para pesagem utilizando célula carga

3.2.2 Protótipo de hardware II

Considerando a necessidade de se desenvolver um equipamento de medição eletrônico que dispensasse o uso de um computador, partiu-se para um segundo protótipo utilizando um microcontrolador no lugar do computador. Considerando os microcontroladores disponíveis no mercado e a acessibilidade para o desenvolvimento de rotinas e aplicações, o Basic Step M8 comercializado pela empresa TATO Equipamentos Eletrônicos pareceu uma opção interessante.

Este microcontrolador é programado em uma linguagem similar a BASIC, sendo, portanto bastante simples e de fácil compreensão. Além disso, o microcontrolador possui 8 canais de conversão A/D com 10 bits de resolução, 22 pinos I/O, 8 K de memória e dispositivo integrado para gravação e transmissão de dados para o computador via serial.

Outra modificação necessária no projeto foi a célula de carga. Segundo cálculos preliminares que serão discutidos a frente por questão de conveniência, determinou-se que a força máxima a qual a célula de carga seria submetida não ultrapassaria 4,9N (0,5 kgf). Considerando isto foi adquirida uma balança digital de capacidade máxima de pesagem igual a 4,9N (0,5 kgf) (Figura 25), da qual o único dispositivo de interesse era a célula de carga (Figura 26), que foi removida para utilização no desenvolvimento do protótipo.

Figura 25 - Balança digital com capacidade de 4,9N (0,5 kgf)

Figura 26 - Célula de carga com capacidade de 4,9N (0,5 kgf)

A partir de um circuito muito similar ao apresentado no primeiro protótipo desenvolveu-se o segundo modelo (Figura 27), salientando que neste as principais alterações foram a adição do microcontrolador em substituição ao computador e a remoção do conversor A/D externo, visto que o microcontrolador já possui este dispositivo integrado.

Neste circuito manteve-se a alimentação da célula de carga com 5Vcc, sendo a mesma tensão aplicada como tensão de referência (V_{ref}) para o conversor A/D do microcontrolador. A resistência de ganho do amplificador de instrumentação foi alterada para um resistor de $83\Omega \pm 5\%$. Para a visualização dos dados provenientes da célula de carga optou-se pela transmissão via porta serial do computador, sendo os dados observados no Hyper Terminal do Windows.

Algumas ilustrações do segundo protótipo de hardware podem ser visualizadas na Figura 28.

Figura 27 - Circuito do protótipo de hardware II

Figura 28 - Protótipo II - Hardware de transmissão de dados da célula de carga para o computador utilizando o Basic Step M8: (a) Protótipo de hardware II montado em uma placa de trilhas; (b) Alimentação do hardware com bateria de 12Vcc – 7,7A.h.; (c) Célula de carga conectada ao hardware; (d) Hardware enviando dados para processamento no computador

Partindo da rotina apresentada no fluxograma estabelecido para o protótipo I, vários testes visando aprimorar o software foram efetuados.

Uma vez elaborado este protótipo partiu-se para o desenvolvimento da parte mecânica do medidor de vazão, assunto detalhado no próximo item.

3.3 Desenvolvimento da parte mecânica do medidor de vazão

Conforme discutido na revisão de literatura, os medidores de vazão do tipo força mensuram a velocidade de escoamento de um líquido com base na força que a corrente líquida exerce em um anteparo disposto no interior da tubulação. A maioria desses medidores consta de um anteparo preso a uma haste rígida. Por meio de diferentes mecanismos esta haste transmite a força exercida no anteparo para um elemento ou dispositivo sensor. Sabendo que a força no anteparo é proporcional a velocidade de escoamento pode-se determinar a vazão na tubulação pela Equação da Continuidade.

Todo o planejamento e idealização da parte mecânica do medidor foi efetuado em ambiente CAD 3D. Tempo considerável foi dedicado a elaboração de um protótipo em ambiente computacional, a fim de minimizar possíveis falhas mecânicas por falta de planejamento, bem como evitar o desperdício de tempo e material construindo um protótipo inadequado. Vários colegas e técnicos contribuíram nesta etapa, observando o projeto em CAD, apontando possíveis pontos falhos ou mecanismos que seriam inadequados ou ineficientes e sugerindo modificações para tornar o medidor o melhor possível do ponto de vista mecânico e funcional. Por fim, após alcançar um modelo em CAD considerado adequado partiu-se para a construção propriamente dita do medidor.

A Figura 29 apresenta algumas perspectivas de observação do projeto mecânico elaborado em ambiente CAD, a partir do qual foi construído o medidor.

Para o medidor proposto, o anteparo utilizado foi uma peça metálica de 20 mm de diâmetro e 1 mm de espessura (formato de uma moeda). Esta peça foi parafusada a uma haste cilíndrica de aço (alavanca), de comprimento igual a 118 mm e 7 mm de espessura (Figura 29-g). O anteparo foi posicionado aproximadamente 5 mm de distância a partir da parede inferior do tubo.

Figura 29 - Projeto em ambiente CAD da parte mecânica do medidor de vazão: (a), (b) e (c) Vistas do projeto mecânico do medidor; (d) Detalhe do mecanismo de transmissão de força da alavanca para a célula de carga; (e) Peça de PVC e fio de aço utilizados no mecanismo de transmissão de força; (f) Peça de PVC roscável utilizada para vedação; (g) Alavanca, arruela, anéis de vedação, peça de PVC e anteparo parafusado à alavanca; (h) Célula de carga acoplada à peça de PVC; (i) Colar de PVC

A fim de prover um mecanismo de alavanca para transmissão de força da corrente líquida para a célula de carga, a haste rígida foi perfurada transversalmente 72 mm acima do centro do anteparo para a colocação de um pino de aço de aproximadamente 2 mm de espessura, cuja a função é permitir um movimento de giro ou estabelecer uma relação de momentos entre a força provocada pela corrente líquida e a força transmitida para a célula de carga. Este pino de aço foi fixado a uma peça de PVC (Figura 30-a) feita com o auxílio de um torno mecânico. Esta peça foi posicionada entre dois anéis de borracha utilizados para vedação. Acima do anel de vedação superior foi colocada uma arruela metálica de 11 mm de diâmetro interno, não interferindo de forma alguma no movimento da alavanca (Figura 29-g e Figura 30-b).

Utilizou-se um colar de PVC marrom com extremidade de saída de 1½" acoplado a um trecho retilíneo de tubulação (Figura 29-i e Figura 30-c). No local de intersecção entre a extremidade de saída do colar e a tubulação foi feito um furo de aproximadamente 15 mm de

diâmetro para a passagem da alavanca, deixando uma pequena folga de modo a não interferir no movimento da alavanca quando submetida a força da corrente líquido.

Uma vez posicionada a alavanca, o eixo de rotação e os elementos de vedação no interior da extremidade de descarga do colar, foi necessário fabricar uma peça para apertar os anéis de vedação e impedir o vazamento do líquido conduzido no interior da tubulação. Para tanto, foi adaptada uma peça de PVC roscável (Figura 29-f e Figura 30-b) sobre a arruela e os anéis de vedação, de modo que não foram verificados vazamentos e o movimento da alavanca praticamente não foi afetado.

Para facilitar a compreensão desta etapa é importante observar a Figura 30, na qual está representado parte do procedimento acima explicado.

Figura 30 - Constituintes da parte mecânica do medidor: (a) Alavanca com pino de aço e suporte de PVC; (b) Alavanca, anéis de vedação, suporte de PVC, pino de aço, arruela e peça roscável; (c) Colar de PVC; (d) Anel de vedação 1 posicionado no colar; (e) Alavanca com pino de aço e suporte posicionados; (f) Anel de vedação 2; (g) Arruela; (h) Peça roscável de PVC sobre a arruela

Também foi necessário criar uma peça para fixar a célula de carga sobre o colar de PVC e mais uma vez foi seguido o protótipo desenvolvido em ambiente CAD. A peça foi fabricada em PVC com o auxílio de um torno mecânico, de modo a se ajustar perfeitamente em volta da extremidade de 1½” do colar. A célula de carga foi encaixada e parafusada na peça de PVC, de modo a estabelecer uma extremidade totalmente imóvel da célula (Figura 29-h e Figura 31-b).

A extremidade da célula de carga submetida ao esforço foi interligada a alavanca por um fio de aço de aproximadamente 1,5 mm de diâmetro. Uma das extremidades deste fio foi parafusada à célula de carga e a outra foi ajustada a outra peça de PVC que também foi criada. Esta última peça foi feita utilizando o torno mecânico e uma micro-retífica dotada de brocas aptas para serviços artesanais. É importante ressaltar que essa peça consta de uma cava interna, por onde passa o fio de aço, de modo que se permite que haja um leve movimento vertical para ajuste do alinhamento entre a alavanca e a célula de carga.

Abaixo ilustram-se os itens e procedimento descrito (Figura 31).

Figura 31 - Constituintes da parte mecânica do medidor e ferramentas utilizadas: (a) Torno mecânico utilizado para fabricação das peças de PVC; (b) Peça de acoplamento da célula de carga; (c) Célula de carga; (d) Peça de acoplamento posicionada sobre o colar; (e) Manufatura da peça intermediária entre o fio de aço e a alavanca; (f) e (g) Detalhes da parte mecânica do medidor

Assim sendo, foi desenvolvida a parte mecânica do medidor de vazão. O equipamento foi instalado em uma bancada de ensaios hidráulicos dotada de uma canalização de PVC de 66 mm de diâmetro interno, com 1,1 m de trecho retilíneo a montante do medidor e 1 m de trecho retilíneo a jusante do mesmo. Em série com esta tubulação foi instalado um medidor eletromagnético marca Conaut, utilizado para os procedimentos de calibração e avaliação do equipamento desenvolvido. Foram instalados registros de gaveta para controle do escoamento e, devido a disposição das canalizações no laboratório onde foram feitos os ensaios, foram inseridas curvas e acessórios conforme mostra a Figura 32. Também foi instalada uma união próxima ao medidor para permitir a verificação da posição dos componentes do equipamento em contato com o líquido e possibilitar possíveis tarefas de substituição do anteparo. Todos os testes e avaliações foram efetuados sob carga hidráulica constante e próxima a 10 m.c.a.

Figura 32 - Bancada de ensaios hidráulicos: (a) e (b) Parte mecânica do medidor instalada na canalização; (c) União instalada a montante do equipamento; (d) Trecho retilíneo da canalização com registros de controle; (e) Canalização de ensaios contendo medidor de vazão eletromagnético instalado em série com o medidor desenvolvido

3.4 Medidor de vazão eletrônico utilizando célula de carga

Por fim, integrou-se a parte mecânica do medidor de vazão ao circuito eletrônico. Diversas alterações foram efetuadas tanto no protótipo de hardware quando no software embarcado, de modo que as mesmas serão descritas separadamente a seguir.

3.4.1 Protótipo de hardware final – III

Devido a grandes limitações verificadas no decorrer da utilização do microcontrolador Basic Step M8, dentre outros aspectos, foi necessária a utilização de um microcontrolador mais robusto que fosse capaz de atender as perspectivas da aplicação a ser desenvolvida. Neste contexto, o microcontrolador PIC 18F4550 anteriormente detalhado mostrou-se uma potencial ferramenta para o desenvolvimento do medidor de vazão proposto.

Uma série de componentes eletrônicos foi adicionada a este circuito e algumas alterações consideradas pertinentes foram efetuadas.

A alimentação da célula de carga foi alterada de 5Vcc para 10Vcc, sendo esta tensão ajustada pelo amplificador de instrumentação INA125. Para a maioria das células de carga comercializadas e inclusive para o modelo utilizado no projeto, a sensibilidade estabelecida pelo fabricante é de $2 \text{ mV/V} \pm 0,1\%$. Portanto, aumentando a tensão de alimentação da célula de carga conseqüentemente obtém-se aumento da sensibilidade ou sinal de resposta da mesma, lembrando que o sinal de resposta de uma célula de carga é proporcional a tensão de alimentação.

Devido a alteração da tensão de alimentação da célula de carga e aumento dos níveis de tensão do sinal de resposta, a resistência de ganho do amplificador instrumental foi determinada e ajustada experimentalmente para 120Ω . Deste modo reduziu-se o ganho para um valor estimado em 504 vezes.

Alguns componentes fundamentais para o funcionamento do microcontrolador como cristal, capacitores e resistores foram inseridos no circuito. Também foi adicionado um display LCD de 20 colunas x 4 linhas, com a finalidade de permitir a visualização de dados de vazão do medidor e acesso a sub-rotinas implementadas no equipamento. É importante ressaltar que o equipamento desenvolvido opera independentemente, não necessitando de computador externo para processamento de dados ou realização de qualquer outra operação. Entretanto, visando possibilitar a transmissão de dados para um computador do tipo IBM-PC, a fim de facilitar procedimentos de coleta e anotações de dados, componentes necessários para a comunicação via serial entre o medidor e o computador também foram inclusos neste protótipo, sendo o circuito integrado MAX232 o principal componente neste aspecto.

Quatro botões para seleção de opções visualizadas no display do medidor também foram incluídos no circuito. Todos os componentes eletrônicos do protótipo III podem ser observados no circuito representado no ANEXO C **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Os componentes foram montados em uma placa de fenolite 10 x 10 cm. Todas as trilhas de condução bem como os furos para posicionamento e solda dos componentes eletrônicos foram feitos manualmente.

O circuito, depois de testado, foi inserido em um envoltório plástico para proteção e fixação junto à parte mecânica do medidor. Vários cortes e entalhes foram feitos neste envoltório para instalação de componentes como display, interruptor, fonte de alimentação, botões e conector DB9 de comunicação serial.

A fim de proteger a célula de carga e também para melhorar a aparência do equipamento, dois CAPs (espécie de tampão utilizado em condutos) adaptados foram utilizados para ocultar alguns constituintes mecânicos do medidor. Algumas imagens do circuito elaborado e do medidor já montado junto a canalização estão apresentadas abaixo (Figura 33).

Figura 33 - Hardware final: (a) Parte inferior da placa de fenolite exibindo trilhas de condução e soldas; (b) Parte superior da placa mostrando componentes eletrônicos e conectores; (c) Conectores interligando dispositivos do circuito eletrônico; (d) Envoltório e interface de operação do medidor

3.4.2 Software embarcado

Utilizando o microcontrolador PIC 18F4550 desenvolveu-se uma rotina de aquisição e processamento de dados mais criteriosa, possibilitando:

- Exibir e acessar menus de navegação no display LCD;
- Acessar uma rotina de medição de vazão instantânea, permitindo a seleção e alteração do sistema de unidades de vazão para cada leitura;
- Acessar uma rotina de auto-calibração;
- Habilitar transmissão de dados via RS-232 (serial) para um computador;
- Implementar procedimentos de filtragem digital dos dados.

A partir deste ponto, a rotina final elaborada será detalhada em blocos com o auxílio de fluxogramas. De certo modo admite-se que os fluxogramas são auto-explicativos, entretanto para cada diagrama serão feitos alguns comentários de maior relevância. É importante salientar que nem todos os detalhes de software implementados no medidor serão citados ou exibidos na presente descrição.

A simbologia adotada nos fluxogramas foi a seguinte:

Na Figura 34 está representado o esquema lógico executado na inicialização do equipamento, bem como as opções gerais disponíveis nos menus de navegação. Configurações de como determinados pinos do microcontrolador vão operar são definidas logo na inicialização

(pinos de interrupção, conversão A/D e comunicação RS-232). Na tela inicial do equipamento são disponibilizadas as seguintes opções:

- (1) Rotina de medição ou leitura da vazão instantânea;
- (2) Rotina de auto-calibração do equipamento; e
- (3) Painel de configurações.

O PIC 18F4550 consta de um tipo de memória volátil, na qual dados são perdidos quando o equipamento é desligado, e também de uma memória não volátil (EEPROM), na qual dados permanecem armazenados mesmo após desligar o equipamento. Neste momento, enfoque será conferido a memória EEPROM. Nela foram armazenados dados que precisam ser recuperados a cada re-inicialização do equipamento, como: coeficientes da equação de regressão, utilizados para conversão de sinais digitais em vazão, e; status da comunicação serial, definindo a transmissão ou não de dados via RS-232.

Nesta mesma ilustração foram detalhadas as opções disponíveis quando selecionado o menu “Configurações” na tela inicial. Selecionada esta opção pode-se:

- (1) Ativar ou desativar a comunicação serial;
- (2) Verificar qual é a equação atual que está sendo utilizada na estimativa da vazão, bem como o coeficiente de determinação (r^2) da equação; e
- (3) Verificar a equação original do equipamento, sendo possível sua restauração substituindo qualquer outra equação que esteja armazenada na EEPROM.

No fluxograma da Figura 35 está esquematizada a rotina executada quando acessado o menu “Medição” na tela principal. Selecionando este menu acessam-se os blocos responsáveis pela coleta e processamento de dados para estimativa da vazão instantânea no conduto.

Na inicialização desta rotina são ativados dois pinos do microcontrolador responsáveis pela alteração entre unidades de vazão a qualquer instante da medição. As unidades implementados para exibição de dados de vazão foram $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$, $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$, $\text{l}.\text{s}^{-1}$ e $\text{l}.\text{h}^{-1}$. Estes dois pinos são tratados como pinos de interrupção, uma vez que, quando pressionados interrompem a rotina principal que está sendo executada e acessam uma rotina secundária independente da primeira. Após executada a rotina secundária retorna-se ao ponto de parada na rotina principal, continuando normalmente a seqüência de operações. Devido a simplicidade a rotina de interrupção não foi inserida no fluxograma.

Figura 34 - Fluxograma de inicialização e de opções gerais

Na sequência verifica-se o status da comunicação serial. Se ativada, informações similares àquelas observadas no display são transmitidas para o computador via RS-232. Em vários blocos

da programação verifica-se o status da serial para transmissão ou não de dados, de modo que no fluxograma não serão detalhadas as informações transmitidas pela serial já que elas são bem similares às disponibilizadas no display.

Em seguida, define-se o número de amostras (N) a serem coletadas e processadas gerando um valor médio de vazão atualizado a cada 7,5 segundos, aproximadamente. Optou-se por uma amostragem de 30 valores para compor cada valor médio de vazão apresentado no display. Cada uma das 30 amostras é coletada a cada 250 ms sendo armazenada em uma posição de um vetor de tamanho N. Coletadas todas as amostras parte-se para uma rotina de processamento dos dados.

A rotina de processamento constitui um filtro digital que foi desenvolvido baseado em recomendações da norma ISO 5168 (1985), que trata da avaliação de incertezas na medição de vazão de fluidos. Toda a fundamentação de interesse tratada nesta norma já foi apresentada e discutida, sendo que neste ponto será tratada somente a lógica para implementação do procedimento no microcontrolador.

De acordo com o que já foi afirmado anteriormente, todos os sistemas de medição podem produzir erros anômalos (*outliers*), os quais devem ser detectados e descartados do conjunto amostral. Para detecção e eliminação de erros desta natureza adotou-se o Método de Grubbs já explicado e recomendado na ISO 5168 (1985). Vale ressaltar que este método detecta um *outlier* de cada vez, de modo que a cada valor extremo detectado que seja caracterizado como *outlier* é executada a eliminação. O teste deve ser repetido até que não haja mais *outliers*.

Uma vez analisado o conjunto de dados e descartados os *outliers*, calcula-se a média dos dados restantes. Verifica-se se este valor médio é inferior a um dado valor residual (desvio de zero), se for, então se admite que a vazão no conduto é zero e reinicia-se o ciclo de amostragem. Outrora, se o valor médio for superior ao valor residual, então se calcula a vazão utilizando coeficientes da equação de regressão armazenados na EEPROM, ajustados de acordo com a unidade de vazão selecionada. Deve-se salientar que o valor residual observado e utilizado foi de 85,9 bytes, o qual será tratado como desvio de zero. O ciclo de amostragem, processamento e cálculo de vazão é repetido até que se pressione a tecla ESC do equipamento medidor de vazão. Pressionada esta tecla a rotina de medição é abortada, retornando ao menu principal de opções.

Parte do procedimento descrito está representado no fluxograma da Figura 35.

Figura 35 - Fluxograma da rotina de medição

O fluxograma da Figura 36 representa a rotina executada quando selecionada a opção “Calibração” no menu principal. Como o próprio nome sugere esta é uma rotina que permite ao usuário calibrar o equipamento. Para a execução desta rotina é necessário ter outro medidor de vazão instalado em série na canalização, caracterizando o método de calibração do medidor mestre ou padrão, já tratado e previsto na NBR ISO 9104 (2000).

Idealizou-se uma sequência de mensagens lançadas no display do equipamento, de modo a conduzir qualquer usuário a execução correta da calibração. Inicializada a calibração, aparecem mensagens para ajustar a vazão do medidor de referência para um dado valor, sempre na unidade $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$. Ajustada a vazão pressiona-se ‘OK’ e a mensagem na tela é alterada pedindo ao usuário que aguarde a coleta e processamento dos dados. Poucos segundos depois, quando finalizado o processamento dos dados referentes àquela vazão, pede-se para ajustar a vazão de referência para um valor $1 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ maior que o anterior, repetindo o ciclo até que sejam coletados dados de 0 a $30 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ incrementados a cada $1 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. Portanto, ao final do processo de coleta e processamento exibe-se uma mensagem de processo concluído com sucesso, sendo armazenados 31 valores médios que poderiam gerar uma curva correlacionando vazão e bytes.

Para as condições de ensaio e em todos os testes e avaliações realizados verificou-se que o modelo que melhor correlaciona bytes e vazão, para o medidor desenvolvido, é do tipo:

$$Q = A + B \cdot \ln(\text{bytes})$$

Considerando isto, ao final da rotina de calibração o equipamento deve ser capaz de estimar os coeficientes de regressão “A” e “B” da equação referida. Para isto implementou-se o procedimento matemático e estatístico chamado Método dos Mínimos Quadrados. O Método dos Mínimos Quadrados é um procedimento de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre a curva ajustada e os dados.

Souza (2009) descreve um procedimento de ajuste pelo Método dos Mínimos Quadrados válido para equações do tipo:

$$Y = A + B \cdot x$$

Para estas equações o procedimento sugerido para determinação dos coeficientes “A” e “B” segue o seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} N.A + \left(\sum_{i=1}^N x_i\right).B = \sum_{i=1}^N y_i \\ \left(\sum_{i=1}^N x_i\right).A + \left(\sum_{i=1}^N (x_i^2)\right).B = \sum_{i=1}^N (x_i.y_i) \end{cases}$$

Em que:

N: Número de dados do conjunto amostral

A e B: Parâmetros de ajuste da equação ao conjunto de dados

x_i : i-ésimo valor observado

y_i : i-ésimo valor estimado

Adequando o sistema apresentado para o modelo de equação selecionado para o medidor de vazão proposto, obtém-se:

$$Y = Q$$

$$x = \ln(bytes)$$

$$N = 30 \text{ dados}$$

$$\begin{cases} 30.A + \left(\sum_{i=1}^{30} [\ln(bytes)]_i\right).B = \sum_{i=1}^{30} Q_i \\ \left(\sum_{i=1}^{30} [\ln(bytes)]_i\right).A + \left(\sum_{i=1}^{30} [\ln(bytes)]_i^2\right).B = \sum_{i=1}^{30} \{[\ln(bytes)]_i.Q_i\} \end{cases}$$

Considerando que, para o sistema apresentado acima, apenas A e B são incógnitas, pode-se perfeitamente solucionar o problema algebricamente. Portanto, este procedimento de cálculos foi implementado no software embarcado para determinação dos coeficientes de regressão, permitindo obter a equação de melhor ajuste ao conjunto de dados analisados a cada procedimento de calibração.

Com a finalidade de avaliar a qualidade do ajuste da equação ao conjunto de dados também implementou-se um procedimento de cálculo do coeficiente de determinação (r^2). De acordo com Souza (2009) o coeficiente de determinação pode ser estimado pela seguinte fórmula:

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - A - B.x_i)^2}{[\sum_{i=1}^N (y_i^2)] - \frac{1}{N} \cdot (\sum_{i=1}^N y_i)^2}$$

Figura 36 - Fluxograma da rotina de calibração

Uma vez calculados, os coeficientes são exibidos na tela juntamente com o coeficiente de determinação (r^2) para aceitação ou não pelo usuário. Se aceitos, os coeficientes são salvos na EEPROM, substituindo coeficientes anteriores havendo o retorno ao menu principal. Caso contrário, a calibração é abortada e ocorre o retorno ao menu principal, sendo mantidos os coeficientes anteriormente armazenados na EEPROM. É importante salientar que para assegurar-se quanto a validade das fórmulas e metodologia apresentadas, foram efetuados vários testes em conjuntos de dados processados pelo software embarcado comparando os resultados obtidos com os mesmos conjuntos analisados em planilhas do Excel no Microsoft Windows.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo a classificação de medidores de vazão proposta por Delmée (2003), o medidor de vazão desenvolvido pode ser enquadrado no grupo de medidores lineares especiais tipo força.

Neste capítulo deseja-se explorar e discutir os seguintes assuntos:

- (1) Determinação do número de dados a coletar por ciclo de amostragem e pertinência da implementação do Teste de Grubbs no software embarcado do medidor de vazão;
- (2) Avaliação e determinação dos parâmetros de desempenho para o medidor de vazão desenvolvido;
- (3) Estimativa das forças de arraste e da carga máxima à qual a célula de carga será submetida; e
- (4) Estimativa da perda de carga localizada causada pelo medidor desenvolvido.

4.1 Determinação do número de dados a coletar por ciclo de amostragem e pertinência da implementação do Teste de Grubbs no software embarcado do medidor de vazão

Segundo Dattalo (2008), a determinação do tamanho da amostra constitui importante e difícil etapa no planejamento de qualquer trabalho. O mesmo autor afirma que, para a determinação do tamanho da amostra os principais fatores a serem considerados são: (1) A amostragem deve ser suficiente para que se atinjam os objetivos da pesquisa; (2) A amostragem deve ser representativa e capaz de prover estimativas com precisão adequada da variabilidade amostral; e (3) A amostragem deve ser viável tecnicamente e economicamente.

Para a presente situação duas situações puderam ser caracterizadas no que diz respeito ao tamanho amostral. Na primeira delas, quanto maior o número de dados coletados por ciclo de amostragem menor é o erro aleatório associado ao resultado da estimativa, afirmação de acordo com Cacuci (2003), Drosig (2007) e Dattalo (2008). Por outro lado, o microcontrolador possui uma memória limitada para o armazenamento de dados e também, quanto maior o número de amostras, maior é o tempo necessário para coleta e processamento, acarretando em maior tempo para atualização de informações no display, sendo este um fator inconveniente para a medição de vazões instantâneas.

A fim de avaliar o impacto do tamanho amostral na aplicação em desenvolvimento efetuaram-se ensaios com dois tamanhos amostrais (30 e 500 amostras), em três diferentes vazões (0, 15 e 22,5 m³.h⁻¹), sendo que para cada condição foram realizadas três repetições.

No primeiro ensaio foram coletadas 500 amostras formando pares ordenados de vazão ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) versus sinal digital de resposta do medidor de vazão (bytes). Neste teste a vazão de referência foi fixada em $0 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ (registro totalmente fechado), sendo efetuadas três repetições. A Figura 37 exibe os dados obtidos neste ensaio. Do mesmo modo foram efetuados outros dois ensaios para vazões de referência fixadas em 50% e 75% da faixa de operação, ou seja, 15 e $22,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. Os dados obtidos nestes outros dois ensaios são apresentados respectivamente na Figura 38 e Figura 39.

Figura 37 - Sinal digital de resposta obtido de 3 repetições com 500 amostras cada, a partir de uma vazão de referência constante e ajustada em $0 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$

Figura 38 - Sinal digital de resposta obtido de 3 repetições com 500 amostras cada, a partir de uma vazão de referência constante e ajustada em $15 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$

Figura 39 - Sinal digital de resposta obtido de 3 repetições com 500 amostras cada, a partir de uma vazão de referência constante e ajustada em $22,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$

Observando os gráficos apresentados na Figura 37, Figura 38 e Figura 39 evidencia-se a presença de valores discrepantes no conjunto amostral em cada um dos ensaios, sendo tais valores prováveis *outliers*. Conforme já descrito, o Teste de Grubbs é utilizado para a identificação de *outliers* em um dado conjunto amostral. Rabinovich (2005) afirma que *outliers* devem ser descartados pela razão de que, em geral, sistemas de medição coletam um número pequeno de dados e a probabilidade de existir *outliers* no conjunto amostral é muito pequena, entretanto, se houverem *outliers* provavelmente estes exercerão grande distorção na média do conjunto amostral. Em síntese, estes valores discrepantes atuam aumentando os erros no processo de medição devendo ser eliminados.

O Teste de Grubbs é tratado neste trabalho como um filtro digital que foi implementado no software embarcado do medidor com a finalidade de eliminar esses valores anômalos, que podem ser considerados uma espécie de ruído inerente a qualquer equipamento eletrônico.

Aplicando o procedimento de filtragem digital nos conjuntos amostrais adquiridos nos 3 ensaios, obtiveram-se os dados que são apresentados na Figura 40. No ensaio cuja vazão foi fixada em $0 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, foram identificados e eliminados 15 *outliers* na repetição 1 (R1), 17 *outliers* na repetição 2 (R2) e 18 *outliers* na repetição 3 (R3). Após a eliminação de valores considerados discrepantes, obteve-se um conjunto de dados filtrados no qual a média calculada foi igual a 82,2 bytes, sendo este valor conseqüente e respectivo a uma vazão fixada em $0 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. Aplicando o filtro digital ao conjunto de dados referentes a vazão de $15 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ identificaram-se apenas 2 *outliers* em R3, os quais foram eliminados, de modo que os dados restantes apresentaram média calculada igual a 314,8 bytes correspondente a vazão de $15 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. Processando o conjunto

amostral coletado para a vazão estabelecida em $22,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ excluíram-se 2 *outliers* em R2, sendo a média dos dados restantes igual a 635,3 bytes para a referida vazão.

Figura 40 - Sinais digitais filtrados de resposta obtidos de 3 ensaios realizados para vazões fixadas em 0, 15 e 22,5 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$, sendo cada ensaio composto por 3 repetições de 500 dados cada repetição

Acerca da Figura 40 há outro fenômeno importante que deve ser discutido. Em comparação ao primeiro ensaio (vazão ajustada em $0 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$), também com 500 valores coletados, observou-se uma dispersão maior dos dados nas condições de vazão mais elevada. Sabendo que o desvio padrão é a medida mais comum da dispersão estatística (BUSSAB, 2006), determinou-se o desvio padrão amostral de cada uma das repetições para os ensaios com vazão de referência igual a 0, 15 e $22,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ para fins de comparação, sendo os dados organizados na

Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios coletando 500 dados por conjunto amostral

Vazão (m ³ .h ⁻¹)	Número de amostras	Rep.	Dados puros		Dados filtrados		Nº de <i>outliers</i> detectados
			Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
0	500	R1	82,6	2,5	82,5	1,5	15
0	500	R2	82,7	2,8	82,4	1,5	17
0	500	R3	81,8	3,6	81,8	1,2	18
15	500	R1	312,0	13,2	312,0	13,2	0
15	500	R2	313,4	13,6	313,4	13,6	0
15	500	R3	317,9	23,0	319,0	14,0	2
22,5	500	R1	636,9	17,0	636,9	17,0	0
22,5	500	R2	633,7	35,6	635,7	17,1	2
22,5	500	R3	633,2	16,5	633,2	16,5	0

Portanto, o desvio padrão amostral calculado para os 500 dados filtrados do ensaio com vazão de 0 m³.h⁻¹ foram respectivamente 1,5 em R1, 1,5 em R2 e 1,2 em R3. Em contrapartida, para o ensaio com a mesma quantidade de dados cuja vazão foi de 15 m³.h⁻¹, obtiveram-se desvios padrão de 13,2 em R1, 13,6 em R2 e 14,0 em R3. E por fim, após a filtragem no ensaio cuja vazão de referência foi 22,5 m³.h⁻¹, foram determinados desvios padrão de 17,0 em R1, 17,1 em R2 e 16,5 em R3. Conseqüentemente, observando estes valores comprova-se uma dispersão maior dos dados nas vazões mais elevadas. Tal fato, explica-se provavelmente pela elevação da turbulência no escoamento na proporção em que a vazão aumenta. Aumentando a turbulência observam-se vibrações na canalização, as quais provavelmente são transmitidas ao anteparo e alavanca em contato com o fluxo e, conseqüentemente comunicadas à célula de carga, resultando em oscilações do sinal de resposta para uma mesma condição de vazão. Porto (1998) afirma que, no escoamento turbulento moléculas movimentam-se de forma caótica para camadas adjacentes do fluido, produzindo forças tangenciais de elevada intensidade. Azevedo Netto (1998) cita que as tubulações e seus acessórios, além de esforços internos, geram ou podem gerar esforços externos que necessitam ser absorvidos e transferidos a outras estruturas, que são as estruturas de ancoragem. O mesmo autor afirma que os esforços externos que desequilibram um sistema fechado causando vibração são originados em curvas, reduções e vários outros dispositivos e situações nas quais os vetores de força não se anulam em todas as direções. Azevedo Netto (1998) afirma ainda que é importante tomar cuidado para não se construir trechos aéreos de canalização com intervalo de apoio e engate muito distantes, pois isso facilita a ocorrência de fenômenos de amplificação de ressonâncias oriundas de vibrações. Para a realização dos testes apresentados neste trabalho, não foram tomadas as precauções necessárias com ancoragem

suficiente para absorver as vibrações devidas ao escoamento, sendo que isto provavelmente contribuiu para a maior dispersão dos dados na medida em que se avaliaram vazões mais elevadas.

Com o objetivo de viabilizar a aquisição de um número menor de dados por ciclo de amostragem, efetuaram-se outros 3 ensaios para as vazões 0, 15 e 22,5 m³.h⁻¹, também com 3 repetições, entretanto, com um tamanho de amostra igual a 30 valores. Os dados obtidos nestes ensaios são expostos na Figura 41, Figura 42 e Figura 43.

Figura 41 - Sinal digital de resposta obtido de 3 repetições com 30 amostras cada, a partir de uma vazão de referência constante e ajustada em 0 m³.h⁻¹

Figura 42 - Sinal digital de resposta obtido de 3 repetições com 30 amostras cada, a partir de uma vazão de referência constante e ajustada em 15 m³.h⁻¹

Figura 43 - Sinal digital de resposta obtido de 3 repetições com 30 amostras cada, a partir de uma vazão de referência constante e ajustada em $22,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$

Efetuando o procedimento de filtragem digital nestes 3 ensaios constituídos de conjuntos amostrais de 30 valores e 3 repetições, foram eliminados apenas 3 *outliers* detectados na repetição 2 quando a vazão estabelecida foi de $0 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. O número reduzido de *outliers* detectados vai ao encontro da afirmação de Rabinovich (2005), de que sistemas de medição geralmente coletam um número pequeno de dados e a probabilidade de existir *outliers* no conjunto amostral é muito pequena. Para visualização dos dados filtrados pode-se observar a Figura 44.

O resumo dos resultados obtidos nestes ensaios com 30 dados por conjunto amostral é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Resumo dos resultados obtidos nos ensaios coletando 30 dados por conjunto amostral

Vazão ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$)	Número de amostras	Rep.	Dados puros		Dados filtrados		Nº de <i>outliers</i> detectados
			Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	
0	30	R1	81,2	1,5	81,2	1,5	0
0	30	R2	83,6	3,5	83,1	1,4	3
0	30	R3	81,8	1,2	81,8	1,2	0
15	30	R1	309,8	10,7	309,8	10,7	0
15	30	R2	309,2	16,3	309,2	16,3	0
15	30	R3	316,8	11,0	316,8	11,0	0
22,5	30	R1	636,8	18,4	636,8	18,4	0
22,5	30	R2	638,5	19,5	638,5	19,5	0
22,5	30	R3	631,1	18,6	631,1	18,6	0

Figura 44 - Sinais digitais filtrados de resposta obtidos de 3 ensaios realizados para vazões fixadas em 0, 15 e 22,5 m³.h⁻¹, sendo cada ensaio composto por 3 repetições de 30 dados cada repetição

Analisando a dispersão dos dados para as 3 vazões (0, 15 e 22,5 m³.h⁻¹) obteve-se novamente maior dispersão para as vazões mais elevadas, fato que, da mesma forma discutida anteriormente, é devido provavelmente as vibrações que afetam a célula de carga causando instabilidade no sinal de resposta.

Retomando a questão sobre qual tamanho da amostra a coletar, pode-se verificar pequenas diferenças nas médias filtradas dos conjuntos amostrais compostos por 500 dados e por 30 dados, para as mesmas vazões de referência. Para a vazão de 0 m³.h⁻¹ o conjunto amostral de 500 dados resultou em uma média calculada igual a 82,2 bytes, enquanto que o conjunto amostral de 30 dados acusou uma média de 82 bytes. Para a vazão de 15 m³.h⁻¹, a média para o conjunto de 500 valores foi de 314,8 bytes e para o conjunto de 30 valores obteve-se um valor médio de 311,9

bytes. E, considerando os testes com vazão de $22,5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ a média para os 500 valores foi de 635,3 bytes e para o conjunto de 30 valores o valor médio foi de 635,5 bytes. Portanto, em qualquer dos ensaios realizados ou nas diferentes vazões testadas, a diferença entre a média dos valores filtrados para amostragens de 500 dados e 30 dados praticamente é insignificante. Sendo assim, não se evidencia restrição alguma para a adoção de amostragens contendo apenas 30 dados, uma vez que os valores médios praticamente são equivalentes a amostragens de maior tamanho.

Ainda, acerca desse assunto, adotou-se um intervalo de 250 milissegundos (ms) entre a coleta de cada um dos 30 dados constituintes do conjunto amostral a ser processado e filtrado resultando no valor de vazão apresentado na tela do medidor de vazão. Com ciclos de amostragem de 30 dados e intervalos de coleta de 250 ms, a taxa de atualização da vazão instantânea exibida no display do medidor de vazão também é satisfatória para a maioria das aplicações cotidianas, visto que o valor de vazão é atualizado a cada 7,5 s, aproximadamente. Não foram efetuados testes para viabilizar intervalos de coleta menores que 250 ms, o que permitiria obter-se respostas mais rápidas na leitura de vazão instantânea exibida pelo medidor.

4.2 Parâmetros de desempenho do medidor de vazão eletrônico utilizando célula de carga

Foram realizados quatro ensaios com o medidor de vazão proposto, submetendo-o a aumentos consecutivos de vazão (carregamento) na faixa de 0 a $30 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ e também a reduções sequenciais de vazão (descarregamento) de 30 para $0 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. Tanto o aumento quanto a redução de vazão foram efetuados em variações a cada $1 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. As vazões de referência para calibração e coleta de dados descritas neste procedimento, foram ajustadas manualmente por meio de um registro de gaveta observando-se a vazão determinada pelo medidor eletromagnético instalado em série com o medidor em teste.

Por questões de agilidade e facilidade no processo de coleta e análise de dados, optou-se pelo registro de sinais digitais de resposta do medidor avaliado a cada alteração na vazão de referência. Seria extremamente trabalhoso coletar sinais analógicos (milivolts) na saída da célula de carga a cada variação na vazão de referência.

Portanto, os sinais digitais coletados nos 4 ensaios já descritos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores obtidos em quatro ensaios do medidor de vazão

Vazão (m ³ .h ⁻¹)	Sinal digital de resposta da célula de carga (bytes)							
	1º ensaio		2º ensaio		3º ensaio		4º ensaio	
	C	D	C	D	C	D	C	D
0	81,3	88,8	82,7	90,2	85,4	90,7	79,8	88,4
1	79,9	88,5	85,1	93,1	87,6	89,7	86,0	85,7
2	86,0	94,7	81,2	97,8	86,9	93,3	86,2	90,6
3	88,5	95,8	89,0	101,5	92,4	98,1	96,7	91,2
4	92,5	107,0	91,3	108,8	98,9	103,7	100,1	101,4
5	101,6	111,9	102,5	114,4	108,3	113,3	108,1	111,9
6	112,1	122,4	110,7	121,8	111,9	123,5	119,5	122,5
7	122,7	138,8	122,5	140,1	132,6	136,9	129,1	138,3
8	139,4	150,3	134,0	154,0	142,7	158,3	141,6	150,9
9	152,5	165,9	150,5	171,4	158,5	171,0	152,0	166,6
10	176,6	184,6	173,4	193,0	176,5	192,1	174,3	187,6
11	199,3	207,0	195,9	218,2	199,2	211,7	206,0	211,2
12	227,7	235,0	225,9	244,1	233,3	230,4	228,5	237,6
13	252,7	256,8	256,0	262,3	245,4	262,5	252,5	259,8
14	281,9	283,8	283,5	293,1	278,1	282,7	279,4	284,3
15	321,1	315,9	318,9	321,5	312,2	316,0	308,0	315,6
16	356,6	353,6	355,1	345,9	349,5	356,9	346,3	344,9
17	391,5	399,6	378,2	394,0	382,5	389,4	379,3	391,1
18	428,5	425,6	434,4	427,7	418,3	437,9	429,8	417,8
19	467,5	470,2	465,2	465,1	470,7	467,7	465,9	456,8
20	508,3	508,7	517,7	516,5	511,8	520,0	510,0	515,0
21	565,4	551,6	568,8	555,9	560,1	557,2	561,3	554,8
22	601,4	608,1	608,3	608,7	610,5	597,6	603,6	604,6
23	662,4	657,6	671,9	653,3	657,2	655,2	659,7	655,5
24	700,5	700,3	712,9	706,1	699,4	711,1	718,2	714,0
25	757,5	762,2	764,8	755,6	765,7	769,1	775,7	755,6
26	823,0	811,1	822,2	814,3	816,9	804,9	804,2	808,9
27	879,3	875,8	881,6	865,2	885,5	868,2	871,6	881,3
28	924,8	931,2	931,7	939,5	944,4	941,8	934,9	937,2
29	985,9	989,6	998,3	992,6	980,7	994,4	996,0	988,7
30	1022,7	1011,8	1023,0	1022,6	1022,9	1023,0	1023,0	1023,0

C - Valores obtidos no carregamento (vazão crescente)

D - Valores obtidos no descarregamento (vazão decrescente)

É importante deixar claro o que significa o termo “sinal digital” tratado em várias análises discutidas a frente. Os sinais digitais, para este trabalho, significam e são o resultado da amplificação do sinal analógico (milivolts) de resposta da célula de carga pelo amplificador de instrumentação INA125, e posterior conversão destes sinais amplificados em sinais digitais (bytes) pelo conversor A/D de 10 bits integrado ao microcontrolador PIC 18F4550. Estes sinais digitais são valores que, para a situação, variam de 0 a 1023 bytes, respectivamente para a variação de vazão de 0 a 30 m³.h⁻¹.

De outro modo, a fim de elucidar os dados tabulares apresentados acima, bem como evidenciar o comportamento dos sinais digitais de resposta em função das variações controladas de vazão na canalização, pode-se observar a Figura 45.

Figura 45 - Valores obtidos em quatro ensaios de carregamento (C) e descarregamento (D) do medidor de vazão

4.2.1 Erro de repetitividade

Segundo Beck (1983) para a determinação da repetitividade efetuam-se cinco ensaios, nas mesmas condições e toma-se a máxima diferença ocorrida no valor de tensão (mV). Este valor, dividido pela tensão máxima de fundo de escala vezes cem é a repetitividade (Figura 46).

Figura 46 - Determinação da repetitividade segundo Beck (1983)

Para o medidor de vazão proposto, conforme já justificado, ao invés de valores de tensão elétrica optou-se por efetuar as avaliações de performance a partir de sinais digitais de resposta do circuito eletrônico. Para a avaliação da repetitividade foram considerados 4 ensaios de carregamento (incrementando vazão) cujos dados e erros de repetitividade são apresentados na Tabela 8.

Para os dados apresentados na Tabela 8 o erro máximo de repetitividade foi de 19,6 bytes para a vazão de $28 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. Seguindo o procedimento utilizado por Beck (1983) e admitindo que o valor máximo do sinal de resposta equivale a 1023 bytes, obtém-se que o erro máximo de repetitividade é da ordem de 1,9% em relação ao fundo de escala ou valor máximo de medição, conforme demonstra o cálculo apresentado abaixo.

$$\text{Repetitividade} = \frac{\Delta t}{t} \cdot 100 \Rightarrow \text{Repetitividade} = \frac{19,6}{1023} \cdot 100$$

$$\text{Repetitividade} = 1,9\%$$

Tabela 8 - Erros de repetitividade para 4 ensaios na condição de carregamento

Vazão (m ³ .h ⁻¹)	Bytes observados				Erros de repetitividade (bytes)
	1º ensaio	2º ensaio	3º ensaio	4º ensaio	
0	81,3	82,7	85,4	79,8	5,6
1	79,9	85,1	87,6	86,0	7,7
2	86,0	81,2	86,9	86,2	5,7
3	88,5	89,0	92,4	96,7	8,2
4	92,5	91,3	98,9	100,1	8,8
5	101,6	102,5	108,3	108,1	6,7
6	112,1	110,7	111,9	119,5	8,8
7	122,7	122,5	132,6	129,1	10,1
8	139,4	134,0	142,7	141,6	8,7
9	152,5	150,5	158,5	152,0	8,0
10	176,6	173,4	176,5	174,3	3,2
11	199,3	195,9	199,2	206,0	10,1
12	227,7	225,9	233,3	228,5	7,4
13	252,7	256,0	245,4	252,5	10,6
14	281,9	283,5	278,1	279,4	5,4
15	321,1	318,9	312,2	308,0	13,1
16	356,6	355,1	349,5	346,3	10,3
17	391,5	378,2	382,5	379,3	13,3
18	428,5	434,4	418,3	429,8	16,1
19	467,5	465,2	470,7	465,9	5,5
20	508,3	517,7	511,8	510,0	9,4
21	565,4	568,8	560,1	561,3	8,7
22	601,4	608,3	610,5	603,6	9,1
23	662,4	671,9	657,2	659,7	14,7
24	700,5	712,9	699,4	718,2	18,8
25	757,5	764,8	765,7	775,7	18,2
26	823,0	822,2	816,9	804,2	18,8
27	879,3	881,6	885,5	871,6	13,9
28	924,8	931,7	944,4	934,9	19,6
29	985,9	998,3	980,7	996,0	17,6
30	1022,7	1023,0	1022,9	1023,0	0,3

4.2.2 Erro de histerese

De acordo com Beck (1983) para determinação da histerese em células de carga, recomenda-se a utilização de valores médios obtidos de 5 ensaios e traçadas as correspondentes curvas constituídas pelos sinais de resposta para as condições de carregamento e descarregamento, medindo-se a maior abertura entre as curvas. O valor correspondente a maior abertura dividido pela tensão máxima e multiplicado por cem, fornece o valor percentual do desvio entre carregamento e descarregamento (histerese). A Figura 50 ilustra o procedimento descrito.

Figura 47 - Determinação da histerese segundo Beck (1983)

Partindo dos dados apresentados na Tabela 7, para a avaliação do erro de histerese do medidor de vazão foi efetuada a média dos 4 ensaios de carregamento, bem como dos 4 ensaios de descarregamento, determinando-se as diferenças entre os valores obtidos no carregamento e no descarregamento. Os dados médios utilizados para a análise de histerese são apresentados na Tabela 9.

Considerando os dados expostos verifica-se que a maior diferença entre as médias de carregamento e descarregamento ocorreu para a vazão de referência igual a $9 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, obtendo-se a diferença de 15,4 bytes. Considerando novamente que o valor máximo do sinal digital é igual a 1023 bytes (fundo de escala), conclui-se que o erro máximo de histerese é de aproximadamente 1,5%. Na Figura 48 ilustram-se os dados médios obtidos nos testes para a condição de carregamento e descarregamento, na faixa de operação do medidor de vazão.

Tabela 9 - Desvios do sinal digital de resposta para a condição de carregamento e descarregamento

Vazão (m ³ .h ⁻¹)	Média Carregamento (bytes)	Média Descarregamento (bytes)	Desvios entre Carreg. e Descarreg. (bytes)
0	82,3	89,5	-7,2
1	84,7	89,3	-4,6
2	85,1	94,1	-9,0
3	91,7	96,7	-5,0
4	95,7	105,2	-9,5
5	105,1	112,9	-7,8
6	113,6	122,6	-9,0
7	126,7	138,5	-11,8
8	139,4	153,4	-14,0
9	153,4	168,7	-15,4
10	175,2	189,3	-14,1
11	200,1	212,0	-11,9
12	228,9	236,8	-7,9
13	251,7	260,4	-8,7
14	280,7	286,0	-5,3
15	315,1	317,3	-2,2
16	351,9	350,3	1,5
17	382,9	393,5	-10,7
18	427,8	427,3	0,5
19	467,3	465,0	2,4
20	512,0	515,1	-3,1
21	563,9	554,9	9,0
22	606,0	604,8	1,2
23	662,8	655,4	7,4
24	707,8	707,9	-0,1
25	765,9	760,6	5,3
26	816,6	809,8	6,8
27	879,5	872,6	6,9
28	934,0	937,4	-3,5
29	990,2	991,3	-1,1
30	1022,9	1020,1	2,8

Figura 48 - Dados médios obtidos de 4 ensaios com o objetivo de avaliar as diferenças entre o sinal de resposta obtido para a condição de carregamento e descarregamento

4.2.3 Curva de calibração

Para possibilitar a exibição de valores de vazão na tela do medidor de vazão desenvolvido foi necessário ajustar uma equação de regressão correlacionando sinal digital de resposta da célula de carga (bytes) versus vazão ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$). Considerando os dados obtidos nos 4 ensaios de avaliação do medidor (Tabela 7), calculou-se a média dos dados de carregamento e descarregamento para cada vazão, cujos resultados são exibidos na Tabela 10.

Adotando o coeficiente de determinação (r^2) como parâmetro de avaliação, o melhor ajuste aos dados foi obtido utilizando o modelo logaritmo do tipo $Y=A+B.\ln(X)$. O gráfico exibindo os dados e a equação de ajuste é apresentado na Figura 49. Neste observa-se que o coeficiente de determinação (r^2) para a equação selecionada foi de 0,993.

Tabela 10 - Média dos ensaios de avaliação do medidor

Vazão (m ³ .h ⁻¹)	Sinal digital de resposta Média dos ensaios (bytes)	Vazão (m ³ .h ⁻¹)	Sinal digital de resposta Média dos ensaios (bytes)
0	85,9	16	351,1
1	87	17	388,2
2	89,6	18	427,5
3	94,2	19	466,1
4	100,5	20	513,5
5	109	21	559,4
6	118,1	22	605,4
7	132,6	23	659,1
8	146,4	24	707,8
9	161,1	25	763,3
10	182,3	26	813,2
11	206,1	27	876,1
12	232,8	28	935,7
13	256	29	990,8
14	283,4	30	1021,5
15	316,2

Figura 49 - Equação de ajuste utilizada para correlacionar sinal digital e vazão

4.2.4 Erro de linearidade / conformidade

Segundo Beck (1983) para determinar-se o desvio de linearidade de uma célula de carga efetua-se a média de 5 ensaios de carregamento e descarregamento lentos, incluindo-se o valor máximo de carga para o qual a célula será submetida. Com os valores médios traçam-se as curvas de Força x Tensão elétrica para os carregamentos e descarregamentos. A seguir traça-se uma reta passando pelo ponto (0,0) e pelo ponto de máxima carga e respectiva tensão encontrada. Através da maior diferença existente entre a curva de calibração e a reta, calcula-se o desvio de linearidade, dividindo-se esta diferença máxima (em mV) pelo máximo valor de tensão lido na saída da ponte, multiplicado por 100 (Figura 50).

Figura 50 - Determinação de desvio de linearidade segundo Beck (1983)

Para a avaliação de linearidade também foram utilizados os dados apresentados na Tabela 7, sendo efetuada a média dos ensaios. Após isto, traçou uma reta para referência de linearidade ligando o ponto (0 ; 85,9) ao ponto (30 ; 1021,3). Considerando a equação de regressão linear determinada a partir desta reta de referência, calcularam-se os valores de referência para a análise de linearidade. Por fim, foram quantificados os desvios entre os valores de referência para linearidade perfeita e os valores médios coletados durante os ensaios. Os dados obtidos são expostos na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados para análise de linearidade

Vazão (m ³ .h ⁻¹)	Média do sinal digital (bytes)	Referência para linearidade (bytes)	Desvios entre referência e média observada (bytes)
0	85,9	85,9	0,0
1	87,0	117,1	30,1
2	89,6	148,3	58,7
3	94,2	179,4	85,3
4	100,5	210,6	110,2
5	109,0	241,8	132,8
6	118,1	273,0	154,9
7	132,6	304,2	171,5
8	146,4	335,3	188,9
9	161,1	366,5	205,5
10	182,3	397,7	215,4
11	206,1	428,9	222,8
12	232,8	460,1	227,2
13	256,0	491,2	235,2
14	283,4	522,4	239,1
15	316,2	553,6	237,5
16	351,1	584,8	233,7
17	388,2	616,0	227,8
18	427,5	647,1	219,6
19	466,1	678,3	212,2
20	513,5	709,5	196,0
21	559,4	740,7	181,3
22	605,4	771,9	166,5
23	659,1	803,0	143,9
24	707,8	834,2	126,4
25	763,3	865,4	102,1
26	813,2	896,6	83,4
27	876,1	927,8	51,7
28	935,7	958,9	23,3
29	990,8	990,1	-0,7
30	1021,5	1021,3	-0,2

Efetuada-se os cálculos conforme recomendação de Beck (1983), determina-se um valor para o erro de linearidade de aproximadamente 23,4%, o que leva a conclusão de que a vazão não

tem correlação linear com o sinal de resposta da célula de carga. Acerca disto, o cálculo abaixo exhibe o valor encontrado para a linearidade especificada.

$$Linearidade = \frac{u}{V} \cdot 100$$

$$Linearidade = \frac{239,1}{1021,3} \cdot 100$$

$$Linearidade = 23,4\%$$

Para complementar esta análise pode-se observar a Figura 51, que exhibe claramente a diferença existente entre a reta de referência e a curva relativa aos valores médios que correlacionam sinal digital de resposta e vazão.

Figura 51 - Média dos sinais digitais de resposta x Reta de referência para análise de linearidade

Segundo Delmée (2003) quando a função que descreve o comportamento dos dados não é linear adota-se o termo conformidade àquela função que for considerada adequada. Considerando que a função que melhor ajustou-se aos dados foi uma função logaritmo (Figura 49), “ $Q(m^3.h^{-1}) = -46,42 + 10,77 \cdot \ln(\text{bytes})$ ”, a análise de conformidade avaliando o medidor foi realizada em relação a esta função. Acerca disto, os desvios entre vazões de referência e vazões calculadas são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Desvios entre vazões de referência e vazões calculadas utilizados para análise de conformidade

Vazão de referência (m ³ .h ⁻¹)	Sinal digital de resposta Média dos ensaios (bytes)	Vazão calculada (m ³ .h ⁻¹)	Desvios entre vazão de referência e vazão calculada (m ³ .h ⁻¹)
0	85,9	1,5	-1,5
1	87,0	1,7	-0,7
2	89,6	2,0	0,0
3	94,2	2,5	0,5
4	100,5	3,2	0,8
5	109,0	4,1	0,9
6	118,1	5,0	1,0
7	132,6	6,2	0,8
8	146,4	7,3	0,7
9	161,1	8,3	0,7
10	182,3	9,6	0,4
11	206,1	11,0	0,0
12	232,8	12,3	-0,3
13	256,0	13,3	-0,3
14	283,4	14,4	-0,4
15	316,2	15,6	-0,6
16	351,1	16,7	-0,7
17	388,2	17,8	-0,8
18	427,5	18,8	-0,8
19	466,1	19,8	-0,8
20	513,5	20,8	-0,8
21	559,4	21,7	-0,7
22	605,4	22,6	-0,6
23	659,1	23,5	-0,5
24	707,8	24,3	-0,3
25	763,3	25,1	-0,1
26	813,2	25,7	0,3
27	876,1	26,6	0,4
28	935,7	27,3	0,7
29	990,8	27,9	1,1
30	1021,5	28,2	1,8

Observando a Tabela 12, o desvio máximo entre vazão de referência e vazão calculada foi de 1,8 m³.h⁻¹ para a vazão de 30 m³.h⁻¹. Portanto, o erro de conformidade máximo pode ser estimado em aproximadamente 6%, visto os cálculos apresentados abaixo.

$$Conformidade = \frac{1,8}{30} \cdot 100$$

$$Conformidade = 6\%$$

Observando os desvios, e então, se a faixa de operação do medidor de vazão fosse restringida a vazões entre 1 e 29 m³.h⁻¹, o erro máximo de conformidade já seria significativamente inferior aproximando-se do valor de 3,7%. Limitando-se ainda mais a faixa de medição, para valores entre 7 e 28 m³.h⁻¹, então o erro máximo de conformidade seria de 2,7%.

4.2.5 Erro máximo admissível

Conforme afirmado por Delmée (2003) o Erro Máximo Admissível (EMA) de um medidor de vazão deve incluir erros de repetitividade, histerese e linearidade/conformidade. Considerando que os erros de linearidade/conformidade podem ser caracterizados como erros sistemáticos (GONÇALVES JÚNIOR, 2004) e que os erros de repetitividade e histerese são erros aleatórios (COELHO FILHO et al., 2004), uma possível alternativa para a determinação dos limites de incerteza ou do erro máximo admissível é adotar o procedimento de combinação de erros aleatórios e sistemáticos proposto na ISO 5168 (1985). De acordo com a norma, o limite de incerteza (U) pode ser determinado da seguinte forma, ressaltando que, para amostras grandes (N≥30), o termo t_{95} pode ser substituído por 2.

$$U = \sqrt{B^2 + (t_{95} \cdot S)^2}$$

$$U = \sqrt{B^2 + (2 \cdot S)^2}$$

Conforme já explicado, o limite do erro aleatório (S) pode ser determinado pela combinação dos erros aleatórios da seguinte forma (ISO 5168, 1985):

$$S = \sqrt{\sum_i (S_i)^2}$$

Considerando o erro de repetitividade de 1,9% em relação ao fundo de escala (F.E.) ou 0,57 m³.h⁻¹, e ainda, o erro de histerese de 1,5% (F.E.) ou 0,45 m³.h⁻¹, pode-se calcular o limite do erro aleatório.

$$S = \sqrt{0,57^2 + 0,45^2} \therefore S = 0,73 m^3 \cdot h^{-1}$$

Admitindo que o limite do erro sistemático (B) é representado pelo erro de conformidade, determinam-se 3 valores para o limite do erro sistemático dependendo da faixa de operação

considerada para o medidor. Para a medição de 0 a 30 m³.h⁻¹, o limite do erro sistemático é igual a 6% (F.E.) ou 1,8 m³.h⁻¹. Entre 1 e 29 m³.h⁻¹, o limite do erro sistemático é reduzido para 3,7 % (F.E.) ou 1,1 m³.h⁻¹. E, por fim, entre 7 e 28 m³.h⁻¹, o limite do erro sistemático aproxima-se de 2,7% (F.E.) ou 0,8 m³.h⁻¹.

Combinando os limites de erro sistemático e aleatório para a faixa de operação entre 0 e 30 m³.h⁻¹ obtém-se o limite de incerteza (U) de ±2,2 m³.h⁻¹ ou 7,3% em relação ao F.E., conforme segue:

$$U = \sqrt{1,8^2 + (2,0,73)}$$

$$U = 2,2m^3.h^{-1}$$

Da mesma forma, para a faixa de operação entre 1 e 29 m³.h⁻¹, o limite de incerteza é de aproximadamente 1,6 m³.h⁻¹ e, para vazões entre 7 e 28 m³.h⁻¹, o limite de incerteza aproxima-se de 1,4 m³.h⁻¹.

Sendo assim, com a finalidade de sintetizar os resultados de desempenho do medidor de vazão desenvolvido organizou-se a Tabela 13.

Tabela 13 - Resumo dos resultados de desempenho do medidor de vazão desenvolvido

Parâmetro de desempenho	Valores máximos em relação ao fundo de escala (%)
Erro de repetitividade	1,9
Erro de histerese	1,5
Erro de conformidade para operação entre 0 e 30 m ³ .h ⁻¹	6
Erro de conformidade para operação de 1 e 29 m ³ .h ⁻¹	3,7
Erro de conformidade para operação entre 7 e 28 m ³ .h ⁻¹	2,7
Limite de incerteza para operação entre 0 e 30 m ³ .h ⁻¹	7,3
Limite de incerteza para operação entre 1 e 29 m ³ .h ⁻¹	5,3
Limite de incerteza para operação entre 7 e 28 m ³ .h ⁻¹	4,7

Outro parâmetro que ainda pode ser apontado na finalização deste item é o desvio de zero. O desvio de zero observado na média dos 4 ensaios, foi igual a 85,9 bytes, sendo este o valor utilizado e referido na etapa de detalhamento do software embarcado.

4.3 Estimativas de forças de arraste e carga máxima à qual a célula de carga foi submetida

Conforme já discutido, quando o escoamento ocorre em torno de objetos imersos, estes são submetidos a duas componentes principais de força, sendo elas: força de sustentação (*lift force* - F_L) e força de arraste (*drag force* - F_D). Fox (1988) afirma que a força de arraste é a componente da força atuando em um corpo paralelamente à direção do escoamento, sendo a mesma dominante em corpos ditos bojudos (HUGHES, 1974), como seria o caso de discos e cilindros posicionados perpendicularmente ao fluxo.

Para a estrutura mecânica já descrita e proposta para o medidor de vazão desenvolvido, os corpos imersos e sujeitos as forças do escoamento são: um disco (anteparo) de 20 mm de diâmetro e um cilindro (alavanca) de 7 mm de diâmetro, com 41 mm de comprimento em contato com a água (Figura 52).

Figura 52 - Dimensões construtivas para a estimativa da força de arraste sobre o anteparo e a alavanca

Considerando a afirmação de Hughes (1974) e também de acordo com Peters e Ruppel (2005), discos e cilindros posicionados perpendicularmente ao escoamento estão sujeitos

principalmente a força de arraste, sendo possível negligenciar os efeitos da força de sustentação. Vennard (1978) sugere a fórmula abaixo para a determinação da força de arraste em um objeto imerso:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A \cdot \rho \cdot V^2$$

4.3.1 Estimativa da força de arraste sobre o anteparo

Fox (1988) e Hughes (1974) sugerem coeficientes de arraste para determinadas geometrias de objetos imersos, sendo estes coeficientes válidos para faixas específicas determinadas pelo Número de Reynolds. Para ambos os autores, desde que o Número de Reynolds seja superior a 10^3 , o coeficiente de arraste (C_D) é próximo de 1,17 para um corpo com geometria similar a um disco posicionado normal a direção do escoamento. Considerando que o anteparo utilizado tem a geometria de um disco posicionado normal a direção de escoamento o valor de coeficiente de arraste sugerido pode ser utilizado para a estimativa de força de arraste.

Para o cálculo da força de arraste ainda é necessário determinar-se uma velocidade de escoamento. Admitindo-se que a faixa de medição esperada para o equipamento será de 0 a $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e que a canalização avaliada possui diâmetro interno igual a 66 mm, determina-se que a velocidade média esperada para a vazão de $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, será:

$$\begin{aligned} Q &= A \cdot V \\ V &= \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \Rightarrow V = \frac{4 \cdot 0,00833}{\pi \cdot 0,066^2} \\ V &= 2,44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cong 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

Para a velocidade crítica de $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, sabendo que a viscosidade cinemática (ν) da água a temperatura de 20°C equivale a $1,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, pode-se calcular o Número de Reynolds (NR) para verificação da validade do coeficiente de arraste sugerido. É importante ressaltar que nos cálculos de força de arraste o Número de Reynolds é determinado considerando-se o diâmetro ou dimensão do objeto sujeito a força de arraste. Sendo assim:

$$NR = \frac{V \cdot d_{disco}}{\nu} \Rightarrow NR = \frac{2,5 \cdot 0,02}{1,01 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow NR \cong 4,9 \cdot 10^4$$

Para a condição de vazão máxima o Número de Reynolds é superior a 10^3 e portanto o coeficiente de arraste de 1,17 pode ser adotado para a estimativa da força de arraste que incide no disco ou anteparo. Deve-se admitir ainda que a massa específica da água seja próxima a 1000

kg.m⁻³ para as condições de ensaio. Deste modo, pode-se calcular a força de arraste que atua sobre o anteparo da seguinte forma:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \frac{\pi \cdot d_{disco}^2}{4} \cdot \rho \cdot V^2$$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot 1,17 \cdot \frac{\pi \cdot 0,02^2}{4} \cdot 1000 \cdot 2,5^2$$

$$F_D \cong 1,15 N (0,117 kgf)$$

Portanto, para a condição de máxima vazão, considerando uma velocidade média em toda a superfície do anteparo igual a 2,5 m.s⁻¹, estima-se que a força de arraste que atua sobre o objeto é aproximadamente 1,15 N ou 0,117 kgf.

4.3.2 Estimativa da força de arraste sobre a alavanca

Pelas mesmas razões que o anteparo, a alavanca está sujeita principalmente a força de arraste provocada pelo escoamento. Admitindo que a alavanca consiste em objeto de geometria próxima a um cilindro, com 7 mm de diâmetro e com uma porção de 41 mm de comprimento em contato com a água, Hughes (1974) sugere coeficientes de arraste que são função da relação L/d e do Número de Reynolds (ANEXO D).

Considerando que a razão L/d resulta em um valor próximo a 5,9 obtém-se um valor tabelado para o coeficiente de arraste próximo a 0,8, sendo válido para Número de Reynolds entre 10³ e 10⁵.

$$\frac{L}{d} = \frac{41 mm}{7 mm} \cong 5,9$$

Calculando o Número de Reynolds para o objeto cilíndrico (alavanca), obtém-se que:

$$NR = \frac{V \cdot d_{cilindro}}{\nu} \Rightarrow NR = \frac{2,5 \cdot 0,007}{1,01 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow NR = 1,7 \cdot 10^4$$

Portanto, o coeficiente de arraste de 0,8 é válido para a situação estabelecida e deste modo a força de arraste que atua na região da alavanca em contato com o escoamento pode ser calculada do seguinte modo:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot L \cdot d_{cilindro} \cdot \rho \cdot V^2$$

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot 0,8 \cdot 0,041 \cdot 0,007 \cdot 1000 \cdot 2,5^2$$

$$F_D \cong 0,72N \text{ (0,074 kgf)}$$

4.3.3 Estimativa da força máxima transmitida para a célula de carga

Antes de prosseguir com os cálculos é importante que algumas considerações sejam feitas acerca das forças de arraste calculadas. A primeira delas diz respeito ao fato de que a velocidade não é homogênea ao longo dos corpos imersos sujeitos a força de arraste. Neves (1974) especifica que, no regime turbulento, a velocidade é máxima no centro do conduto de modo que a velocidade média de escoamento pode ser determinada como 0,8 a 0,85 vezes a velocidade máxima. Neves (1974) afirma também que a posição em que a velocidade das partículas é equivalente a velocidade média de escoamento está a uma distância de 0,75 a 0,8 vezes o raio do conduto, a partir do centro do mesmo. Ciente disto, o posicionamento do anteparo apenas 5 mm distante da parede do conduto (Figura 52) é justificado pela intenção de submeter o anteparo a zona de escoamento com velocidade média, tornando as estimativas mais exatas.

Outra consideração diz respeito às incertezas quanto aos coeficientes de arraste adotados. Sabe-se que estes coeficientes são dependentes do Número de Reynolds e este varia de acordo com a velocidade de escoamento. De acordo com Fox (1988), Vennard (1978) e Hughes (1974) a força de arraste ainda pode ser decomposta em duas componentes, a primeira devida a uma força de pressão e a segunda devida a uma força de atrito, sendo que, na medida em que o Número de Reynolds varia essas componentes de força também variam alterando o coeficiente de arraste e conseqüentemente a força de arraste. Deve-se ressaltar que esta variação foi desconsiderada nas estimativas.

De menor intensidade e importância foi negligenciado o efeito da força de sustentação sobre o anteparo e sobre a alavanca, entretanto isto foi feito de acordo com considerações presentes em várias obras (HUGHES, 1974; VENNARD, 1978; FOX, 1988).

Admitindo estas incertezas e outras não previstas pode-se prosseguir com as estimativas objetivando determinar a força máxima que atuará na célula de carga. Assim sendo, a força de arraste total será:

$$F_D = F_{D_{anteparo}} + F_{D_{alavanca}}$$

$$F_D = 1,15N + 0,72N \therefore F_D \cong 1,87N$$

Advertindo que existe uma ampliação da força que é transmitida para a célula de carga, em função do mecanismo e posição do eixo de rotação na alavanca, pode-se estimar que a força que atua na célula de carga é aproximadamente:

$$F_1 \cdot x_1 = F_2 \cdot x_2$$

$$1,87N \cdot 72mm = F_2 \cdot 46mm$$

$$F_2 = 2,93 N$$

Deve-se observar que se admitiu neste cálculo que toda a força de arraste atuou em um só ponto localizado 72 mm abaixo do eixo de rotação da alavanca e também que não houve perdas por atrito na transmissão de força, nos dispositivos de vedação e entre o próprio eixo e a alavanca.

Portanto, conclui-se que a força máxima a qual a célula de carga será submetida será de aproximadamente 3 N (0,306 kgf), para a vazão máxima de 30 m³.h⁻¹ em um conduto de 66 mm de diâmetro interno. É importante lembrar a citação de Vennard (1978) afirmando que a previsão e o cálculo da força de arraste sobre objetos submersos são de difícil determinação, sendo necessárias medidas experimentais e tanto a pressão quantos as forças de atrito devem ser consideradas. Por outro lado deve ser enfatizado que estas determinações rigorosas não constituem objetivo do presente trabalho.

4.4 Determinação da perda de carga localizada causada pelo medidor de vazão

A presença de peças e acessórios ao longo de canalizações pode causar mudanças abruptas nas condições de escoamento, acarretando aumento da turbulência e conseqüentemente causando perdas de energia (PORTO,1998). Tais perdas de energia são tratadas como perdas de carga localizadas.

De modo geral, as perdas de carga localizadas podem ser expressas por uma equação do tipo:

$$hf_{loc} = K \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Em que:

hf_{loc} : Perda de carga localizada (m)

K: Coeficiente de perda de carga localizada (-)

V: Velocidade média de escoamento ($m.s^{-1}$)

g: Aceleração da gravidade = $9,81 m.s^{-2}$

Para a condição de instalação do medidor de vazão, ilustrada na Figura 53, a perda de carga localizada pode ser estimada experimentalmente e a partir do Teorema de Bernoulli, como apresenta-se na sequência.

Figura 53 - Representação das tomadas de pressão para avaliação da perda de carga causada pelo medidor de vazão

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + hf_{1-2}$$

Sabendo que o trecho analisado entre 1 e 2 está em nível e aceitando que o efeito de variação de energia cinética pode ser negligenciado na situação, a perda de carga é função somente do diferencial de pressão entre os pontos 1 e 2.

$$hf_{1-2} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma}$$

Com o objetivo de estimar a perda de carga localizada causada pelos dispositivos do medidor em contato com o escoamento (anteparo e alavanca), foram coletados dados de perda de carga juntamente com os 4 ensaios de carregamento e descarregamento citados anteriormente e utilizados para determinação do desempenho do equipamento. Para a coleta destes dados de perda de carga, foi instalado um manômetro diferencial, cujo líquido manométrico possui densidade igual a 1,75. As tomadas de pressão foram instaladas a uma distância de 0,4 m a

montante e 0,4 m a jusante do medidor. Os dados médios de deflexão manométrica acusados pelo manômetro diferencial para cada vazão de referência são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Dados médios de deflexão manométrica utilizados para determinação da perda de carga localizada causada pelo medidor de vazão

Vazão (m ³ .h ⁻¹)	Deflexão manométrica Δh (mm)	Vazão (m ³ .h ⁻¹)	Deflexão manométrica Δh (mm)	Vazão (m ³ .h ⁻¹)	Deflexão manométrica Δh (mm)
0	-	11	32,8	21	115,0
1	-	12	40,0	22	125,4
2	1,9	13	45,7	23	136,8
3	3,3	14	52,4	24	148,4
4	5,0	15	60,8	25	159,4
5	7,2	16	68,4	26	170,2
6	10,5	17	76,8	27	182,8
7	14,8	18	87,0	28	195,4
8	19,4	19	94,6	29	207,8
9	22,8	20	105,0	30	220,4
10	28,4				

Baseado nos dados adquiridos efetuarem-se os cálculos para determinação da perda de carga, velocidade, Número de Reynolds e coeficiente de perda de carga localizada (K), para cada vazão de referência (Tabela 15).

Tabela 15 - Valores calculados do coeficiente K de perda de carga localizada para cada vazão testada

Vazão (m ³ .h ⁻¹)	Deflexão manométrica Δh (mm)	hf (m.c.a.)	V (m/s)	NR (-)	K (-)
0	-	-	-	-	-
1	-	-	0,0812	5305,7	-
2	1,9	0,0014	0,1624	10611,4	1,0603
3	3,3	0,0025	0,2436	15917,1	0,8185
4	5,0	0,0038	0,3248	21222,8	0,6975
5	7,2	0,0054	0,4060	26528,5	0,6429
6	10,5	0,0079	0,4872	31834,2	0,6510
7	14,8	0,0111	0,5684	37139,9	0,6742
8	19,4	0,0146	0,6495	42445,6	0,6766
9	22,8	0,0171	0,7307	47751,3	0,6283
10	28,4	0,0213	0,8119	53057,0	0,6339
11	32,8	0,0246	0,8931	58362,6	0,6051
12	40,0	0,0300	0,9743	63668,3	0,6200
13	45,7	0,0343	1,0555	68974,0	0,6036
14	52,4	0,0393	1,1367	74279,7	0,5968
15	60,8	0,0456	1,2179	79585,4	0,6032
16	68,4	0,0513	1,2991	84891,1	0,5964
17	76,8	0,0576	1,3803	90196,8	0,5932
18	87,0	0,0653	1,4615	95502,5	0,5994
19	94,6	0,0710	1,5427	100808,2	0,5849
20	105,0	0,0788	1,6239	106113,9	0,5859
21	115,0	0,0863	1,7051	111419,6	0,5821
22	125,4	0,0941	1,7863	116725,3	0,5783
23	136,8	0,1026	1,8674	122031,0	0,5772
24	148,4	0,1113	1,9486	127336,7	0,5751
25	159,4	0,1196	2,0298	132642,4	0,5693
26	170,2	0,1277	2,1110	137948,1	0,5620
27	182,8	0,1371	2,1922	143253,8	0,5597
28	195,4	0,1466	2,2734	148559,5	0,5563
29	207,8	0,1559	2,3546	153865,2	0,5515
30	220,4	0,1653	2,4358	159170,9	0,5466

De acordo com Porto (1998), em geral, o coeficiente K deve ser determinado experimentalmente, sendo que se observa para valores do número de Reynolds maiores que 10^5 , que o coeficiente K torna-se independente do número de Reynolds, assumindo um valor

praticamente constante. Da mesma forma Azevedo Netto (1998) cita que o valor de K é praticamente constante para valores do número de Reynolds superiores a 50000. Conforme Figura 54, tal fato pode ser observado nos ensaios de perda de carga localizada efetuados para o medidor de vazão desenvolvido.

Figura 54 - Curva K x Número de Reynolds para o medidor de vazão desenvolvido

Portanto, observando a Figura 54 e os respectivos valores apresentados na Tabela 15, é possível afirmar que o coeficiente K para as condições de ensaio, torna-se praticamente constante em um valor próximo a 0,55.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do medidor de vazão eletrônico utilizando célula de carga foi possível, sendo que, para as condições avaliadas pode-se obter ou determinar que:

- (1) O medidor de vazão desenvolvido possui opções de acesso a rotinas de medição de vazão instantânea, calibração e ajuste de configurações;
- (2) Na rotina de medição a leitura de vazão é atualizada aproximadamente a cada 7,5 segundos, sendo possível selecionar e alterar a unidade de exibição da vazão instantânea, de acordo com a preferência do usuário;
- (3) O equipamento consta de uma rotina de calibração, que foi desenvolvida com o objetivo de dispensar a necessidade de mão-de-obra especializada, bem como equipamentos, computadores e métodos mais complexos e de difícil acesso;
- (4) A tela de configurações permite observar e ajustar a equação de regressão utilizada, bem como ativar ou desativar a transmissão de dados via serial (RS-232) para computadores;
- (5) O medidor proposto é capaz de operar na faixa de 7 a 28 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ com erro máximo de $\pm 1,4 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ ($\pm 2,7\%$);
- (6) O coeficiente K de perda de carga localizada causada pelo medidor foi determinado em aproximadamente 0,55.
- (7) Para as condições de estudo, a força de arraste máxima esperada sobre o conjunto anteparo-alavanca é próxima de 1,87 N, acarretando um esforço na célula de carga de até 3 N.

REFERÊNCIAS

AKTIENGESELLSCHAFT DER MASCHINENFABRIKEN ESCHER WYSS & CO (Switzerland). Benjamin Graemiger. **Device for measuring or controlling the velocity of flowing fluids 1407060**. 24 Aug. 1918. 21 Feb. 1922.

ALMEIDA, A.C.S. **Desenvolvimento de um sistema de irrigação por microaspersão com microtubos para hortas agrícolas**. 2008. 88 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. **Flowmeters in water supply**. Denver, 1989. 55 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10396 - Medidores de vazão de fluidos**. Rio de Janeiro, 1988. 13 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9104: medição de vazão de fluidos em condutos fechados. Métodos para avaliação de desempenho de medidores de vazão eletromagnéticos para líquidos**. Rio de Janeiro, 2000.

AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNANDEZ, M.F.; ARAÚJO, R.; ITO, A.E. **Manual de hidráulica**. 8 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669 p.

BAUM, M.C.; DUKES, M.D.; HAMAN, D.Z. **Selection and use of water meters for irrigation water measurement**. Disponível em: <http://edis.ifas.ufl.edu/BODY_AE106>. Acesso em: 30 ago. 2008.

BEAN, H.S. **Fluid meters: their theory and application**. 6th ed. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1971. 273 p.

BECK, J.C.P. **Projeto, construção e análise de células de carga de placa e de anel**. 1983. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1983.

BELL TELEPHONE LABORATORIES. **Flow meter 2024571**. 10 Jan. 1934. 17 Dec. 1935.

THE BENDIX CORPORATION. **Drag flow meter US4291583**. 1 Oct. 1979. 29 Sep. 1981.

BOTREL, T.A. **Anotações de aula da disciplina de Hidráulica Aplicada**. Piracicaba: ESALQ, Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, 2008. 250 p.

BRAGA, N.C. **Curso básico de eletrônica**. São Paulo: Ed. Saber, 1990. v. 1, 140 p.

BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica**. 5. ed. São Paulo: Ed. Saraiva, 2006. 540 p.

CACUCI, D.G. **Sensitivity and uncertainty analysis: theory**. New York: Chapman & Hall; CRC, 2003. v. 1, 285 p.

CHRISTOFIDIS, D. Recursos hídricos e irrigação no Brasil. In: WORKSHOP DISPONIBILIDADE DE ÁGUA E IRRIGAÇÃO NO NORDESTE, 1999, Brasília. Brasília: ISPN, 1999. 34 p.

DATTALO, P. **Determining sample size: balancing power, precision and practicality**. New York: Oxford University Press, 2008. 167 p.

DELMÉE, G.J. **Manual de medição de vazão**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. 346 p.

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

DROSG, M. **Dealing with uncertainties: a guide to error analysis**. Berlin: Springer, 2007. 190 p.

FILLIBEN, J.J. Grubbs' test for outliers. In: _____. **Engineering statistics and handbook**. Disponível em: <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35h.htm>>. Acesso em: 08 maio 2009.

FISCHER & PORTER CO. **Force-type flowmeter US4051723**. 19 Nov. 1976. 4 Oct. 1977.
FLORIDA STATE UNIVERSITY. Paul Z-f. Li. **Apparatus for measuring fluid flow 4788869**. 27 Jun. 1986. 6 Dec. 1988.

THE FOXBORO COMPANY. **Target flowmeter 3530714**. 21 Feb. 1968. 29 Sep. 1970.

GONÇALVES JÚNIOR, A.A. **Metrologia: parte I**. Florianópolis: UFSC, 2004. 129 p. Apostila.

GORDON YOWELL. **Target flow meters US7127953B1**. 20 Apr. 2005. 31 Oct. 2006.

GUTIÉRREZ, L.G. **Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado**. Disponível em: <http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/pdfart2/teoria.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2008.

HILL, R. **How good is your water measurement**. Disponível em: <<http://extension.usu.edu/files/enrpubs/biewm01.pdf>>. Acesso em: 30 agosto 2008

HUGHES, W. F.; BRIGHTON, J.A. **Dinâmica dos fluidos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1974. 358 p.

IBARS, R.A.F. **Desenvolvimento e avaliação de tubos venturi para medição de vazão**. 2004. 61 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

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

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 4185**: measurement of liquid flow in closed conduits. Weighing method. Geneva, 1980.

_____. **ISO 5168**: fluid flow measurement uncertainty (draft). Geneva, 1985.

_____. **ISO 8316**: measurement of liquid flow in closed conduits. Method by collection of the liquid in a volumetric tank. Geneva, 1987.

JAMES L. REILEY. **Velocity sensitive device 2826914**. 27 Feb. 1953. 18 Mar. 1958.

KING FAHD UNIVERSITY OF PETROLEUM AND MINERALS. **Flow meter probe with force sensors 7392710B1**. 9 Jan. 2007. 1 Jul. 2008.

LEE, J. **Open channel flow measurement**. Disponível em: <<http://water.wku.edu/wastewater/readingroom/OpenChannelFlowMeasurement.pdf>>. Acesso em: 30 ago. 2008

LEONARD P. LEIGH JR. **Deflectable probe type transducer 3238773**. 16 Mar. 1962. 8 Mar. 1966.

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

LOIOLA, M. L.; SOUZA, F. Estatísticas sobre irrigação no Brasil segundo o Censo Agropecuário 1995-1996. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 171-180, 2001.

LOPEZ, J.R.; ABREU, J.M.H.; REGALADO, A.P.; HERNÁNDEZ, J.F. **Riego localizado**. Madrid: IRYDA, 1992. 405 p.

MAIA NETO, R.F. Água para o desenvolvimento sustentável. **A Água em Revista**, Belo Horizonte, n. 9, p. 21-32, 1997.

MARTIM, A.L.S.S. **Avaliação do desempenho de um medidor de vazão eletromagnético em situações práticas reais de instalação**. 2005. 199 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil/ Recursos Hídricos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2005.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **PIC 18F4550 Datasheet**. Disponível em: <<http://www.microchip.com>>. Acesso em: 06 out. 2009.

MOLINA, R.V. **Desenvolvimento de procedimentos de auto-teste em sensores de vazão eletromagnéticos**. 2008. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.

MURRAY F. FELLER. **Moving target flow meter US6681645B1**. 1 Apr. 2002. 27 Jan. 2004.

NEVES, E.T. **Curso de hidráulica**. 2. ed. Porto Alegre: Globo, 1973. 577 p.

PAZ, V.P.S.; TEODORO, R.E.F; MENDONÇA, F.C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 465-473, 2000.

PETERS, F., RUPPEL, C. How to design a new flow meter from scratch. In: MERZKIRCH, W. **Fluid mechanics of flow metering**. Berlin: Springer, 2005. chap. 12, p. 201-210.

_____. **Fluid velocity responsive regulating or indicating means 2628499**. 19 May 1949. 17 Feb. 1953.

PHILIPS PETROLEUM COMPANY. **Flow meter 2742784**. 29 Dec. 1952. 24 Apr. 1956.

PREDATOR SYSTEMS INC. **Target flow meters with immersed strain gauges US6253625B1**. 13 Oct. 2000. 3 Jul. 2001.

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. São Carlos: USP, EESC, 1998. 540 p.

QUEIROZ, T.M. **Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central**. 2007. 141p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

RABINOVICH, S.G. **Measurement errors and uncertainties: theory and practice**. 3rd ed. New York: Springer, 2005. 308 p.

REGGIANI, L.P.; MARCICANO, J.P.P. **Célula de carga para matriz de hidroconformação**. Disponível em: <<http://www.poli.usp.br/pesquisapoli/publicacoes/pq/producaoic2002/pdfs/pmrluc02.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2008.

SANTOS, C.D.; SANTOS, W.M.S; BERBAT, S.C. Uma análise da flutuação dos corpos e o princípio de Arquimedes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 295-298, 2007.

SILVA, F.C.; FOLEGATTI, M.V.; MAGGIOTTO, S.R. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, p. 53-58, 1999.

SOUZA, M.J.F. **Ajuste de curvas pelo método dos quadrados mínimos**. Disponível em: <<http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Disciplinas/MetodosNumericoseEstatisticos/QuadradosMinimos.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2009.

THE STRAIN gage. Disponível em: <<http://www.omega.com/literature/transactions/volume3/strain.html>>. Acesso em: 20 dez. 2008.

TESTEZLAF, R.; MATSURA, E.E.; CARDOSO, L.C. **Importância da irrigação no desenvolvimento do agronegócio**. Campinas: UNICAMP, 2002. 45 p.

THOMAS J. SCARPA. **Flowmeter 4604906**. 24 Sep. 1984. 12 Aug. 1986

ULLMANN, M.N.; SOCCOL, O.J. **Manual de hidráulica**. Material didático da disciplina de Hidráulica I – Graduação em Agronomia. Lages: Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, 2005. 253 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Fluid force transducer 4343198**. 9 Dec. 1980. 10 Aug. 1982.

VENNARD, J.K. ; STREET, R.L. **Elementos de mecânica dos fluidos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1987. 687 p.

ANEXOS

ANEXO A – Vantagens e desvantagens dos principais tipos de medidores de vazão

	Vantagens	Desvantagens
Deprimôgenios	<ul style="list-style-type: none"> • Custo relativamente baixo • Usado a mais de 100 anos • Boa resistência (não possui peças móveis) • Medidor de vazão instantânea (resposta imediata) 	<ul style="list-style-type: none"> • Insere perda de carga na linha • Sensível a distúrbios do escoamento • Sensível a qualidade da água • Precisão baixa (2%)
Eletromagnético	<ul style="list-style-type: none"> • Boa resistência (não possui peças móveis) • Medidor de vazão instantânea (resposta imediata) • Não insere perda de carga na linha • Funcionamento bidirecional • Funcionamento vertical/horizontal • Sinal de resposta linear • Boa faixa de velocidade (0,5 a 10 m.s⁻¹) 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensível a distúrbios do escoamento • Interferência eletromagnética e da rede elétrica • Exige fluido condutivo • Problemas de curto nos eletrodos • Exige trechos retos a montante (>10D) e a jusante do medidor (>5D) • Funcionamento necessita energia elétrica • Manutenção exige mão de obra especializada
Velocidade Pontual	<ul style="list-style-type: none"> • Instalação fácil • Permite medir grandes vazões e em grandes diâmetros • Baixo custo • Versatilidade - Serve para vários diâmetros • Manutenção em geral é simples (Pitot) 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensível a distúrbios do escoamento • Sensível a qualidade da água (incrustações) • Trechos retos: montante (>20D) e a jusante (>10D) • Sofre desgaste (possui peças móveis) • Sem padronização
Ultra-sônico	<ul style="list-style-type: none"> • Boa resistência (não possui peças móveis) • Medidor de vazão instantânea (resposta imediata) • Não insere perda de carga na linha • Funcionamento bidirecional • Funcionamento vertical/horizontal • Facilidade de montagem 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo elevado • Interferência de ruídos de válvulas • Sensível a distúrbios do escoamento • Tecnologia relativamente recente • Não existe normalização • A espessura da tubulação pode ser fonte de incerteza
Volumétricos	<ul style="list-style-type: none"> • Custo relativamente baixo • Baixas vazões e pequenos diâmetros • Insensível ao perfil de velocidade • Range de vazão limitado 	<ul style="list-style-type: none"> • Sensível a qualidade da água • Baixa resistência (possui peças móveis) • Insere perda de carga • Desgaste elevado

ANEXO B – Valores críticos de Grubbs considerando 0,05% de significância

N	G _{tab}	N	G _{tab}	N	G _{tab}	N	G _{tab}
3	1,15	31	2,92	59	3,19	87	3,34
4	1,48	32	2,94	60	3,20	88	3,34
5	1,72	33	2,95	61	3,21	89	3,34
6	1,89	34	2,97	62	3,21	90	3,35
7	2,02	35	2,98	63	3,22	91	3,35
8	2,13	36	2,99	64	3,22	92	3,36
9	2,22	37	3,00	65	3,23	93	3,36
10	2,29	38	3,01	66	3,24	94	3,36
11	2,35	39	3,03	67	3,24	95	3,37
12	2,41	40	3,04	68	3,25	96	3,37
13	2,46	41	3,05	69	3,25	97	3,37
14	2,51	42	3,06	70	3,26	98	3,38
15	2,55	43	3,07	71	3,26	99	3,38
16	2,59	44	3,08	72	3,27	100	3,38
17	2,62	45	3,09	73	3,27		
18	2,65	46	3,09	74	3,28		
19	2,68	47	3,10	75	3,28		
20	2,71	48	3,11	76	3,29		
21	2,73	49	3,12	77	3,29		
22	2,76	50	3,13	78	3,30		
23	2,78	51	3,14	79	3,30		
24	2,80	52	3,14	80	3,31		
25	2,82	53	3,15	81	3,31		
26	2,84	54	3,16	82	3,31		
27	2,86	55	3,17	83	3,32		
28	2,88	56	3,17	84	3,32		
29	2,89	57	3,18	85	3,33		
30	2,91	58	3,19	86	3,33		

ANEXO C - Esquema elétrico do hardware final

ANEXO D - Coeficientes de arraste para diferentes geometrias de objeto (HUGHES, 1974)

Objeto	C_D	Faixa de N. ^o de Reynolds	Comprimento característico	Área característica
Placa plana (tangencial)	$1,33(N_R)^{-1/2}$	laminar	L	Área da superfície da placa
	$0,074(N_R)^{-1/5}$	$N_R < 10^7$		
Placa plana (normal)	L/d 1 1,18 5 1,2 10 1,3 20 1,5 30 1,6 ∞ 1,95	$N_R > 10^3$	d	Área da superfície da placa
Disco circular (normal)	1,17	$N_R > 10^3$	d	
Esfera	$24(N_R)^{1/2}$	$N_R < 1$	d	Área projetada
	0,47	$10^3 < N_R < 3 \times 10^5$		
	0,2	$N_R > 3 \times 10^5$		
Hemisfério vazio	0,34	$10^4 < N_R < 10^6$	d	Área projetada
	1,42	$10^4 < N_R < 10^6$		
Hemisfério sólido	0,42	$10^4 < N_R < 10^6$	d	Área projetada
	1,17	$10^4 < N_R < 10^6$		
Cilindro Circular	L/d 1 0,63 5 0,8 10 0,83 20 0,93 30 1,0 ∞ 1,2	$10^3 < N_R < 10^5$	d	Área projetada
Prisma de seção quadrada	2,0	$3,5(10)^4$	d	Área projetada