

## Estudo dos Conceitos e Metodologias Envolvidas em Sistemas de Medição de Vazão

Richard Thomas Lermen (FAHOR) [richard@fahor.com.br](mailto:richard@fahor.com.br)

### Resumo

*O presente trabalho tem como objetivo descrever sete principais medidores de vazão, os quais são chamados de fluxímetros. Esta descrição consiste em revisar os conceitos fundamentais e mecanismos envolvidos nos fluxímetros por pressão diferencial (placa de orifício, tubo de Venturi; tubo de Pitot), eletromagnético, ultrassônicos, por efeito vortex e por efeito Coriolis. Também, faz parte deste trabalho, a apresentação de um dispositivo medidor de vazão que consiste em uma roda d'água conectada ao eixo de um motor CC de baixo custo, o qual pode funcionar como um gerador, isto é, quando a água escoar sobre a roda d'água fazendo girar o eixo do motor, o mesmo induz uma diferença de potencial elétrico devido à indução eletromagnética. Essa diferença de potencial, fornecida pelo motor, aumenta com o aumento da vazão d'água. Portanto, o conteúdo deste trabalho pode auxiliar na escolha de uma metodologia a ser empregada na determinação da vazão em fluidos.*

*Palavras chave: Vazão; Tipos de Fluxímetros; Eletromagnetismo.*

### 1. Introdução

A medição de vazão é um acontecimento cotidiano. Esse tipo de medição está presente na maioria das operações realizadas na agricultura (quantidade de água consumida), no comércio (combustíveis para automóveis) e principalmente nos processos industriais, onde é muito importante efetuar medição e o controle da quantidade de fluxo de líquidos, gases, e até sólidos granulados, não só para fins contábeis, como também para a verificação do rendimento do processo.

As tecnologias envolvidas na medição de vazão evoluíram rapidamente na última década, onde algumas sobreviveram, enquanto outras sumiram ou nunca tiveram um desenvolvimento comercial. Atualmente, os desenvolvimentos nas áreas de eletrônica, microprocessador, óptica, acústica e eletromagnetismo, são aplicados na melhoria e no projeto de medidores de vazão, também conhecidos como fluxímetros. A evolução e diversificação das tecnologias possibilitaram, aos medidores de vazão modernos, aplicações difíceis, as quais eram descartadas e impossíveis anteriormente. Isto devido às faixas de medição muito pequenas ou muito grandes e também pela manipulação de fluidos complexos, como pseudoplásticos, sólidos, gases,

corrosivos, entre outros. Com o aumento da quantidade de medidores de vazão, comercialmente disponíveis, aumentou a dificuldade da escolha do medidor mais conveniente para determinada aplicação. A seleção correta do medidor de vazão envolve e requer o conhecimento da tecnologia envolvida do processo e do fluido sendo medida (Ribeiro, 1997).

O presente trabalho tem como objetivo fazer uma revisão de conceitos gerais envolvidos em diferentes tipos de fluxímetros. Esta revisão consiste em descrever os conceitos fundamentais e mecanismos dos fluxímetros por pressão diferencial (placa de orifício, tubo de Venturi; tubo de Pitot), eletromagnético, ultrassônicos, por efeito vortex e por efeito coriolis. Também, um dispositivo medidor de vazão de baixo custo foi desenvolvido. Este dispositivo consiste em uma roda d'água conectada ao eixo de um motor CC retirado de um aparelho CD-ROOM, o qual pode funcionar como um gerador.

## 2. Revisão da Literatura

A seguir são apresentados os conceitos fundamentais de vazão e os principais tipos de medidores de vazão (fluxímetros). Esta apresentação consiste em descrever os modelos diagramáticos, físico-matemáticos e também representações gráficas.

### 2.1 Conceito de Vazão

Ribeiro (1997), Webster (1999) e Lipták (2003) consideram que a quantidade de fluido que escoar em um determinado elemento condutor por unidade de tempo é a vazão. Para o primeiro autor, existem dois tipos de vazão, a vazão volumétrica e a vazão mássica. A vazão volumétrica é igual ao produto da velocidade do fluido pela área da seção transversal da tubulação. A vazão mássica é igual ao produto da vazão volumétrica pela densidade do fluido. Na prática, como é difícil a medição direta da densidade do fluido e a composição dos gases é constante, usam-se as medições da temperatura e da pressão para inferir a densidade. A partir da vazão volumétrica ou mássica pode obter-se a sua totalização, através da integral da vazão instantânea.

A classificação de vazão pode ser de muitos modos, tais como: laminar ou turbulenta; ideal ou real; compressível ou incompressível; homogênea ou com mais de uma fase; viscosa ou sem viscosidade; regime estável ou instável; rotacional ou irrotacional; isentrópica; adiabática; isotérmica; vazão de Couette; Rayleigh ou Stokes. Para cada vazão, há hipóteses simplificadoras e as correspondentes equações permitem a sua análise. As simplificações se referem à viscosidade, densidade, pressão, temperatura, compressibilidade e energia em suas diferentes formas. Sempre há aspectos teóricos e informações experimentais (Ribeiro, 1997).

## 2.2 Fluxímetros por Pressão Diferencial

Os medidores de vazão que geram pressão diferencial podem ser descritos, simplificada, pela equação de Bernoulli, a qual estabelece que a soma da energia estática, da energia cinética e da energia potencial do fluido se conserva na vazão através de uma restrição em uma tubulação e também pela continuidade (Lipták, 2003; Ribeiro 1997). Três tipos de fluxímetros por pressão diferencial são apresentados a seguir.

### 2.2.1 Placa de Orifício

A placa de orifício é o elemento primário de vazão do tipo restrição mais usado. Ela é aplicada na medição de vazão de líquidos limpos e de baixa viscosidade, da maioria dos gases e do vapor d'água em baixa velocidade. Embora simples, a placa de orifício é um elemento de precisão satisfatória e pode ser construída com qualquer material que não se deforme com a pressão e não se dilate com a temperatura e, também, que seja de fácil manipulação mecânica. Os materiais mais comuns são: aço carbono, aço inoxidável, bronze, latão (Webster, 1999; Lipták, 2003).

A Figura 1 representa um sistema medidor de vazão do tipo placa de orifício, onde a placa consiste de uma pequena chapa de espessura fina, circular, plana, com um furo com cantos vivos (chanfros). A posição, o formato e o diâmetro do furo são matematicamente estabelecidos. O desempenho da placa depende criticamente da espessura e da planura da placa e do formato dos cantos de furo central. O desgaste do canto do furo, a deposição de sujeira no canto ou na superfície da placa e a curvatura na placa podem provocar erros grosseiros na medição da vazão. As dimensões de uma placa de orifício padrão podem ser determinadas através da norma ISO 5167, 1991 (Ribeiro, 1997).

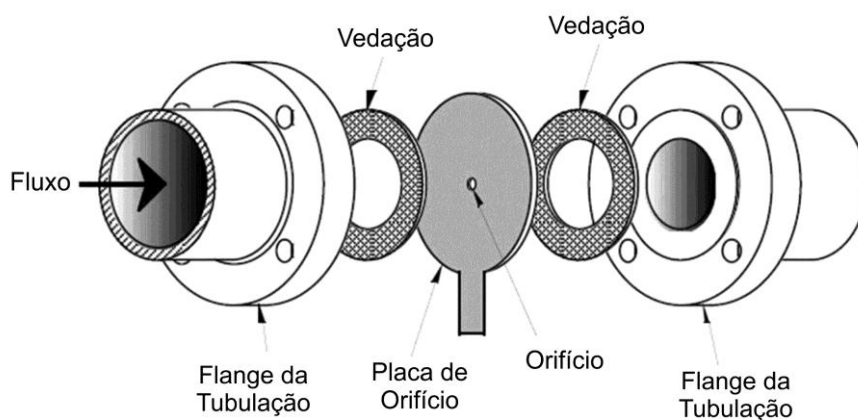


Figura 1 – Representação de fluxímetro do tipo Placa de Orifício. Fonte: Ribeiro (1997)

As tomadas da pressão diferencial associadas com a placa de orifício podem ser de cinco tipos básicos: tipo flange (Figura 2a), tipo canto (Figura 2b), tipo raio (Figura 2c), tipo vena contracta (Figura 2d) e tipo tubo (Figura 2e). A placa de orifício gera a pressão diferencial proporcional ao quadrado da vazão medida. Os instrumentos mais usados para medir a pressão diferencial são: o transmissor de vazão e o diafragma. A medida da vazão com fluxímetro do tipo placa de orifício apresenta instalação fácil, economia, construção simples e manutenção e troca simples como vantagens, também, como desvantagens tem-se alta perda de carga e baixa rangeabilidade (SENAI, 1999).

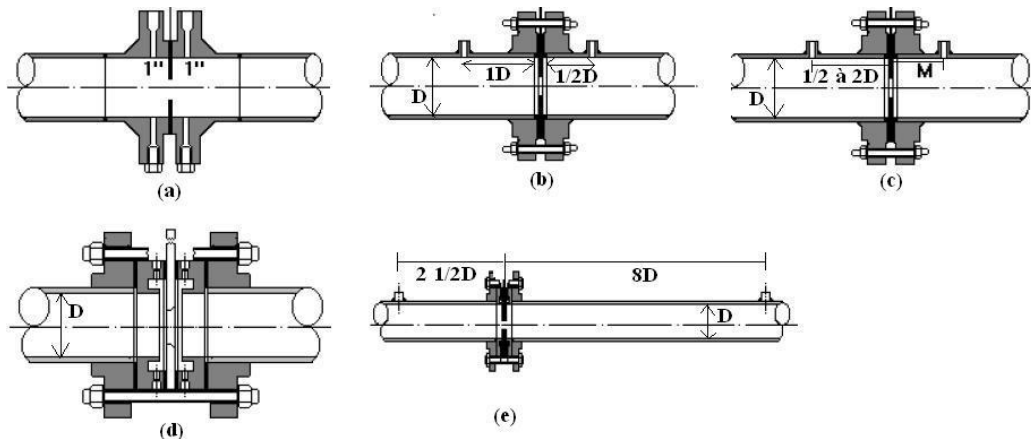


Figura 2. Tipos de tomadas de pressão diferencial. Fonte: SENAI (1999).

### 2.2.2 Tubo de Venturi

O tubo Venturi é um elemento sensor de vazão que produz uma pressão diferencial proporcional ao quadrado da vazão, análogo à placa de orifício. Essencialmente, o tubo Venturi é uma seção curta de tubo (garganta) entre duas seções cônicas, conforme mostrado na Figura 3. Como a sua geometria é suave, diferente da placa de orifício de orifício, que é abrupta, ele tem as seguintes vantagens sobre a placa: o contorno suave da entrada e da saída evita o acúmulo de sujeiras nas restrições; tem uma menor perda de carga permanente através do medidor; possui um coeficiente de descarga bem estabelecido para uma larga faixa de números de Reynolds; sua instalação requer menor comprimento de trecho reto a montante e a jusante; pode medir vazões muito grandes, com melhor desempenho que a placa. Por estas vantagens, o tubo Venturi é usualmente aplicado em situações onde há vazões com sujeiras e onde é crítico o custo do bombeamento do fluido (Lipták, 2003; Ribeiro, 1997; SENAI, 1999).

Os tipos de geometria de um tubo Venturi podem ser: tubo Venturi clássico ou de Herschel; tubo Venturi universal (UVT); bocal Venturi (ISA 1932 e ISO 781); tubos lo-loss (Badger), tubo Foster (Gentile) e o tubo Venturi com garganta gêmea (SENAI, 1999).

A tomada de impulso é realizada através de vários furos espaçados em torno do tubo, os quais são interligados por meio de um anel anular chamado anel piezométrico. Isto, para obter a média das pressões em torno do ponto de medição (SENAI, 1999).

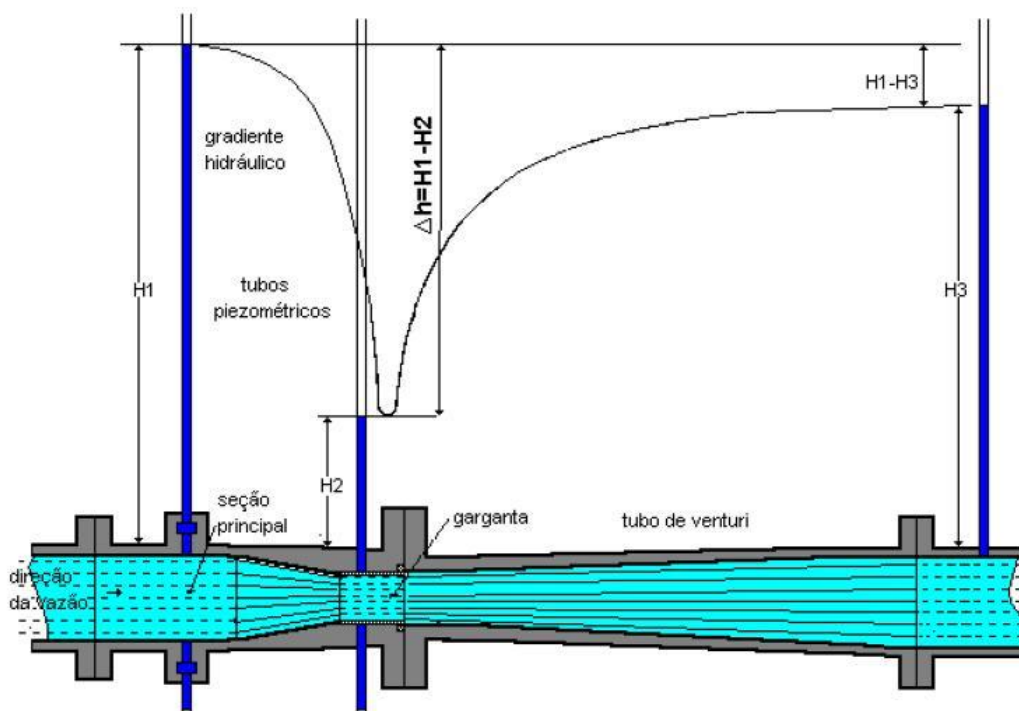
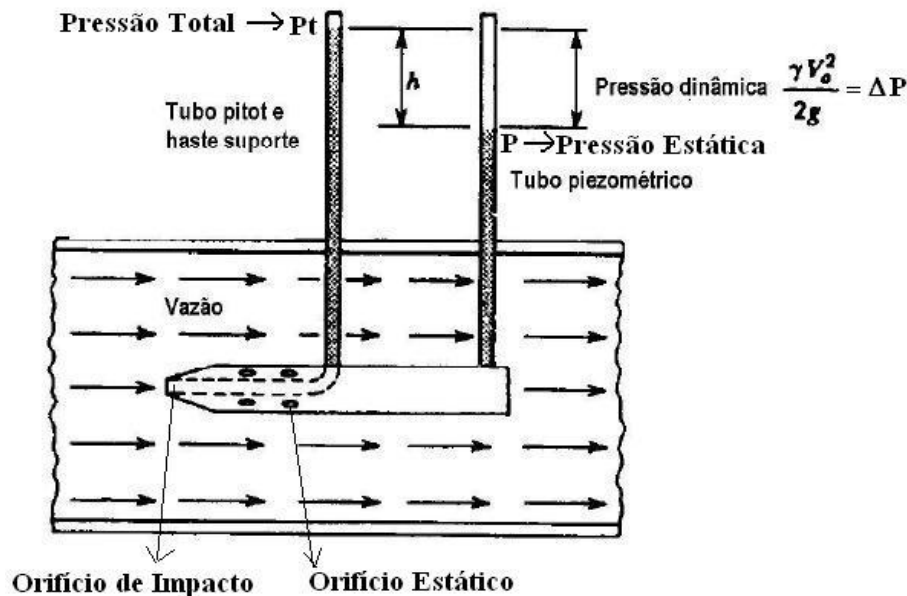


Figura 3. Representação de um tubo Venturi. Fonte: SENAI (1999).

### 2.2.3 Tubo de Pitot

O tubo Pitot foi concebido por Henri de Pitot, em 1732. Este tubo é um medidor de vazão do tipo gerador de pressão diferencial que é utilizado, principalmente, para medir a velocidade de fluidos (Cascetta, 1995).

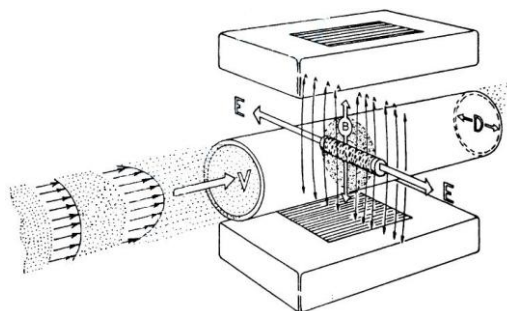
A Figura 4 representa um tubo de Pitot com suas respectivas variações de pressão. A pressão de estagnação ou de impacto em um corpo imerso em um fluido que se move (pressão total) é a soma da pressão estática com a pressão dinâmica (equivalente à energia cinética do fluido considerado como contínuo, isto é,  $P_t = P + \Delta P$ ).



**Figura 4.** Desenho esquemático de um tubo de Pitot. Fonte: Ribeiro (1997).

### 2.3. Fluxímetros Eletromagnéticos

O medidor eletromagnético de vazão é seguramente um dos medidores mais flexíveis e universais dentre os métodos de medição de vazão, o qual pode ser representado pela Figura 5. Sua perda de carga é equivalente a de um trecho reto de tubulação, isto devido a não possuir qualquer obstrução. É virtualmente insensível à densidade e à viscosidade do fluido de medição. Portanto, os medidores eletromagnéticos são ideais para medições dos fluxos de produtos químicos altamente corrosivos, de fluidos com sólidos em suspensão, de lama, de água, de polpa de papel, entre outros. Uma restrição, em princípio, é que o fluido deve ser eletricamente condutivo, também tem ainda como limitação o fato de que os fluidos com propriedades magnéticas adicionam certo erro de medição (Lipták, 2003; Webster, 1999; Ribeiro, 1997).



**Figura 5.** Desenho esquemático de um fluxímetro do tipo Eletromagnético. Fonte: ABNT (1988).

O princípio de funcionamento deste dispositivo é a Lei de Faraday, isto é, quando um objeto condutor se move em um campo magnético, uma força eletromotriz é gerada. Este conceito é discutido mais adiante, na descrição do dispositivo medidor de vazão com motor CC.

## 2.4 Fluxímetros Ultrassônicos

Existem vários tipos de medidores de vazão por ultrassom, sendo o medidor por efeito Doppler e o medidor de tempo de transito os principais deles. O fluxímetro por efeito Doppler faz uso da aparente variação de frequência gerada pela movimentação do emissor em relação ao receptor (princípio Doppler), que no caso é gerado pela reflexão das ondas nas partículas em movimento do fluido. O feixe de ultrassom emitido pelos transdutores-emissores é contínuo, e a alteração da frequência é proporcional a velocidade do fluido no tubo fechado, sabendo a área de secção do tubo e a velocidade de escoamento deste torna-se possível o cálculo de vazão. Já o fluxímetro por tempo de transito utiliza-se duas linhas diametralmente opostas de receptores e emissores, formando um plano que tem uma angulação com o eixo de linha média do curso do tubo. Este tipo de medidor utiliza a diferença no tempo de pulso sonoro para percorrer uma distância fixa, inicialmente um pulso contra o fluxo do fluido e, em seguida, na direção do fluxo. A Figura 6 mostra um desenho esquemático do funcionamento do fluxímetro por tempo de transito, onde o fluxo tem uma velocidade,  $v$ , e o pulso de ultrassom é disparado contra e a favor do fluxo com um ângulo  $\varphi$  (Webster, 1999)

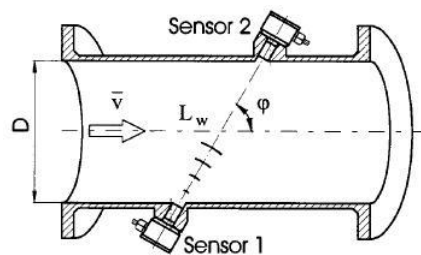


Figura 6. Fluxímetro por ultrassom – configuração do funcionamento de um fluxímetro por tempo de transito. Fonte: Webster (1999).

Este sistema é ideal para medição de fluidos limpos sem presença de partículas, pois estas gerariam diferenças de velocidade de transmissão que inviabilizariam os cálculos de velocidade do fluido.

## 2.5 Fluxímetros por Efeito Vortex

A Figura 7 apresenta um diagrama do sistema de medição de vazão do tipo vortex, no qual um fluido escoava por uma tubulação e passa por um obstáculo gerando vórtices regulares. Estes vórtices são detectados por

sensores que geram sinais em frequência proporcional a vazão (Ribeiro, 1997; Webster, 1999).

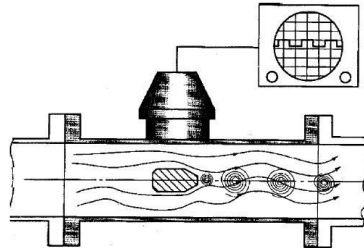


Figura 7. Desenho esquemático de um fluxímetro do tipo vortex. Fonte: ABNT (1988).

Dentre as principais dificuldades encontradas em um medidor de vazão do tipo vortex tem-se o desenvolvimento de obstáculo capaz de formar vórtices regulares com parâmetros suficientemente estáveis proporcionando uma leitura precisa e o desenvolvimento de um sistema eletrônico para detectar e medir a frequência dos vórtices (Ribeiro, 1997).

### 3. Métodos e Técnicas

A Figura 8 apresenta um desenho esquemático do dispositivo desenvolvido no presente trabalho. Este dispositivo é bastante simples, sendo composto por uma roda d'água conectada ao eixo de um motor DC (gerador), o qual tem como princípio de funcionamento a lei de Faraday. A rotação da roda d'água na presença do escoamento de algum tipo de fluido (por exemplo, a água) produz uma variação do fluxo magnético no interior do gerador elétrico. Pela lei de Faraday, surge uma diferença de potencial elétrico induzida (d.d.p.) que pode ser medida por um voltímetro. Este valor pode ser associado à vazão do fluido, desde que seja realizada a calibração adequada do dispositivo (BENDER *et al.*, 2004). Uma curva relacionando diretamente o valor da d.d.p. induzida com a vazão de água foi obtida através da calibração do dispositivo. Para esta calibração foram utilizados os seguintes equipamentos: balança de precisão, a qual foi utilizada para a determinação da quantidade de água (massa) que escoou em um determinado intervalo de tempo; sistema de aquisição de dados (placa NI USB 6009 e software), para determinar o valor da d.d.p. induzida no gerador.



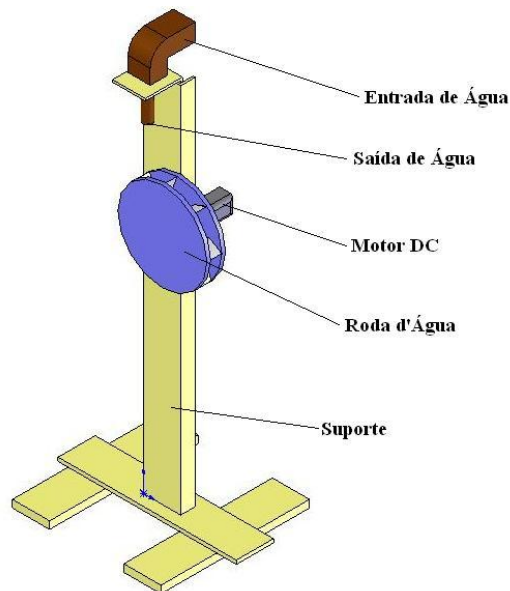


Figura 8. Representação do dispositivo desenvolvido para medir vazão.

#### 4. Resultados e discussões

Na Figura 9 encontra-se a vazão mássica, em g/s, em função da d.d.p., em Volts, obtida experimentalmente. Também, é apresentada uma linha de tendência linear (“Best fit”) para descrever, aproximadamente, a variação entre as grandezas físicas (vazão e d.d.p.).

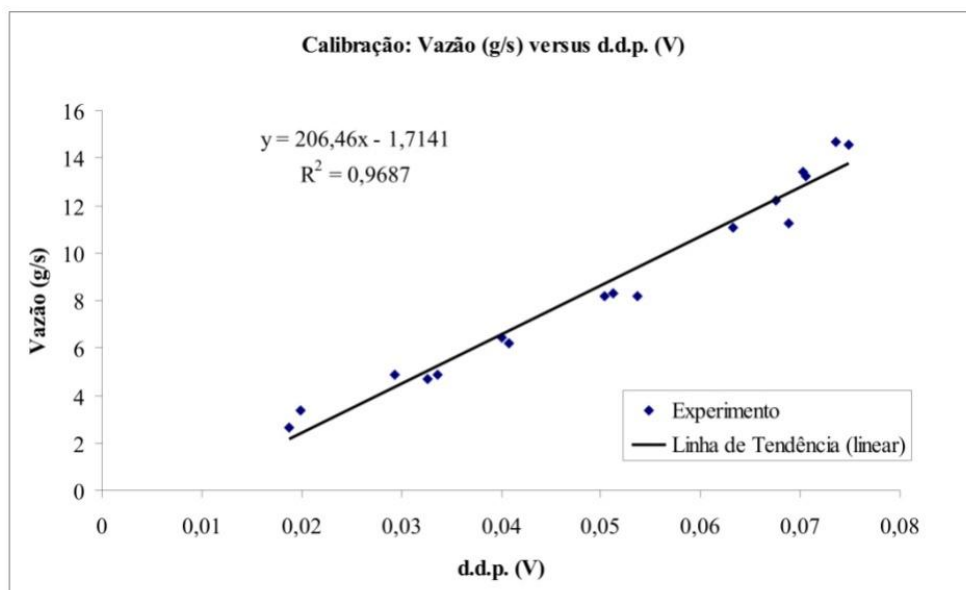


Figura 9. Gráfico da Vazão em função da d.d.p. obtido experimentalmente para o dispositivo.

Os resultados, para quatro experimentos realizados com dispositivo, são apresentados através da Figura 10, a qual mostra o gráfico da vazão mássica em função de um intervalo de tempo. Esta vazão foi determinada através da relação entre a equação linear fornecida pela linha de tendência resultante da calibração do dispositivo.

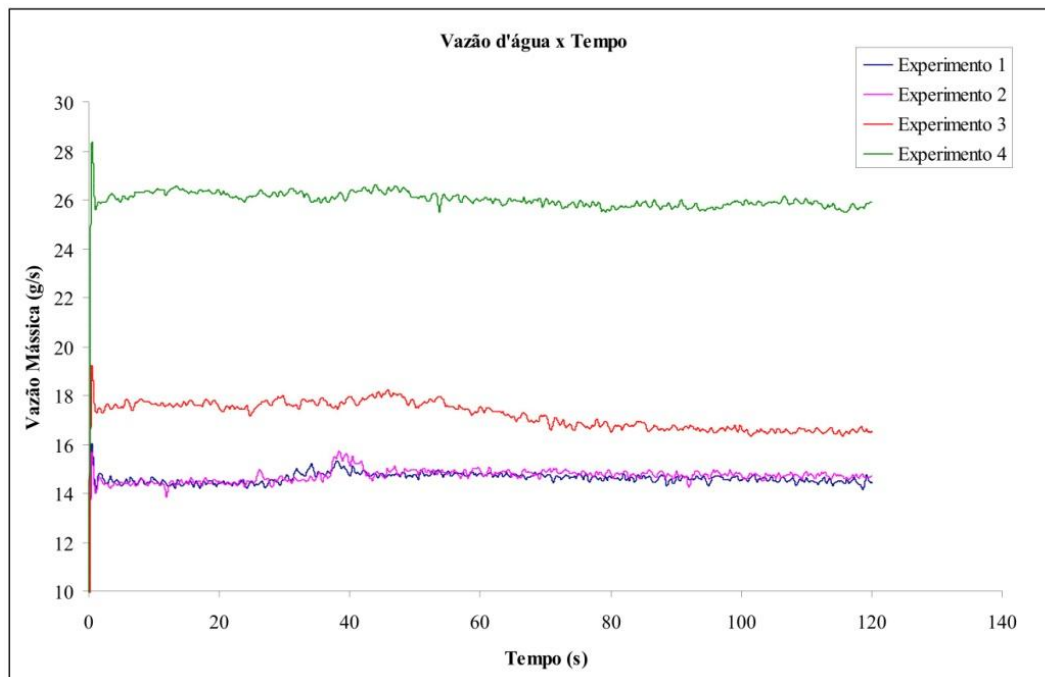


Figura 10. Gráfico da Vazão mássica em função do tempo para quatro diferentes experimentos.

Observa-se que as medidas de vazão com o dispositivo apresentou um comportamento linear, isto é, a d.d.p. varia linearmente com a vazão de água. Também, a exatidão das medidas pode ser melhorada através de uma calibração mais precisa, isto é, fazer com que o valor de  $R^2$  (Figura 9) se aproxime de um.

## 5. Conclusões

De acordo com os conceitos desenvolvidos neste trabalho e as análises realizadas, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- Existem vários tipos de medidores de vazão, porém, para escolher o fluxímetro adequado para algum tipo de medida, devem-se levar em conta alguns tipos de variáveis, tais como: tipo de fluido; precisão; materiais; entre outras.

- Foi desenvolvido um simples medidor de vazão através de um motor DC retirado de um aparelho de CD-ROOM sem funcionamento. Este dispositivo apresentou um comportamento linear e de boa precisão.

## 6. Referências

ABNT, NBR 10396; (1988) **Medidores de Vazão de Fluidos (classificação)**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil.

BENDER, A. L., SBARDELOTTO, D. R. e MAGNO, W. C. Usando motores DC em experimentos de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 4, p. 401 - 405, 2004.

CASCETTA, F.; Short history of the flowmetering. **Isa Transactions**, v. 34, pp. 229-243, 1995.

LIPTÁK, B. G. (2003) **Instrument Engineers' Handbook – Process Measurement and Analysis**. Vol.1, ISA – The Instrumentation Systems, and Automation Society.

RIBEIRO, M.A. (1997) **Medição de Vazão – Fundamentos e Aplicações**. 5ª Edição, TEK Treinamento & Consultoria, Salvador.

SENAI (1999) **Instrumentação Básicas II – Vazão, Temperatura e Analítica**. Programa de Certificação do Pessoal de Manutenção, Espírito Santo.

WEBSTER, J. G. (1999) **The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook**. CRC Press LLC.