

## MEDIÇÃO DE VAZÃO COM TURBINA AXIAL POR PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

**Sonia Magalhães dos Santos**  
e-mail: [ynsantos@mikrus.com.br](mailto:ynsantos@mikrus.com.br)

**Jorge Alberto Almeida**  
e-mail: [dfsjaa@furg.br](mailto:dfsjaa@furg.br)

**Leandro Jorge Carvalho**  
e-mail: [leanjorcar@bol.com.br](mailto:leanjorcar@bol.com.br)

**Luciano Vaghetti de Oliveira**  
e-mail: [lvaghetti@vetorialnet.com.br](mailto:lvaghetti@vetorialnet.com.br)

Departamento de Física – Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG)  
CP 474 – Rio Grande/RS – Brasil – CEP: 96201-900

**Resumo.** O trabalho visa o estudo de um dispositivo de medição de vazão, uma turbina axial, através do conhecimento de sua rotação. São utilizados dois sistemas distintos para medir-se a rotação: uma câmera de vídeo CCD, que captura imagens a cada 1/30 segundos através de um tubo cilíndrico de acrílico transparente, que são armazenadas num microcomputador para posterior processamento, ou são adquiridas e processadas ON-LINE, e um sensor ótico que conta quantas vezes uma pá é observada, durante um limite de tempo pré-determinado. Para o experimento foi montada uma bancada, que consiste de um reservatório de água, uma bomba que movimenta a água em circuito fechado, tubulações e uma válvula que regula a vazão do escoamento.

**Palavras-chave:** turbina axial; medidor de vazão; processamento digital de imagens; processamento de sinais

### 1. Introdução

Vestígios da medição de vazão em tempos remotos, na civilização egípcia e no ano 90 de nossa era, apontam-na como uma das mais antigas realizações de física aplicada de que temos conhecimento, segundo Delmée (1989).

Recentemente, Ferreira, Souto e Shuller (1991), estudaram sistemas de aquisição e processamento de dados via microcomputador para a observação da curva de calibração de um medidor de fluxo, onde tem-se o microcomputador trabalhando como terminal inteligente comandando uma bancada de calibração de medidores do tipo gravimétrica.

Posteriormente, Ferreira e Favaretto (1993), estudaram o torque resistivo devido ao sensor magnético, utilizado em medidores de fluxo do tipo turbinados. Trabalharam em uma bancada de ensaios composta de uma célula de carga à base de extensômetros de resistência elétrica, um dispositivo de movimentação contínua da célula e um sistema de aquisição de dados via microcomputador foi empregado. O rotor de uma turbina de medição foi submetido ao campo magnético produzido pelo captor de sinal e o registro da variação do torque em relação à posição das pás foi feito para diversas situações de testes.

A turbina axial é utilizada atualmente como hidrômetro de acordo com Gonçalves Jr (2000), onde a rotação da turbina é transmitida por acoplamento magnético a sensores do módulo registrador eletrônico. Um microprocessador interno avalia os sinais recebidos reconhecendo a direção de rotação e medindo o tempo requerido por revolução. Além destes dados o microprocessador calcula os valores de medição e em curtos intervalos de tempo executa rotinas de auto-teste.

O elevado número de instrumentos destinados à medição de vazão indica os esforços e investimentos em pesquisas e desenvolvimento na busca de sistemas mais precisos, práticos e competitivos. Contribuem para isso, as diferentes condições de serviço deste tipo de sistema de medição, pois podem variar desde o estado físico do fluido (sólido, líquido ou gasoso) como propriedades e características dos mesmos – viscosidade, resistência à corrosão e abrasão, presença ou não de impurezas, sistema de transporte do fluido, pressão, temperatura, e regime de escoamento.

Neste trabalho pretende-se simplificar consideravelmente estas variáveis, visto que será utilizado apenas um fluido – água – em condições de temperatura ambiente e pressões e vazões controladas, além de ser utilizado um “tranqüilizador” para ter-se um escoamento desenvolvido, diminuindo o erro de medição.

Para medição da vazão são utilizados como elementos primários, que farão contato direto com o fluido, uma turbina axial e uma placa de orifício.

A turbina usada nos testes possui rotor do tipo axial para que cause a menor perturbação e perda de carga possíveis no fluxo. Ela é constituída por dois rotores tipo axial de pás retas e dois difusores que orientam o fluxo em direção às pás, conforme Fig. (1).

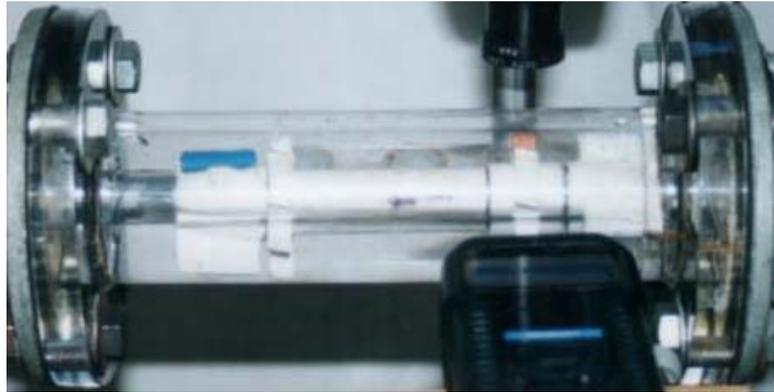


Figura 1. Turbina axial e tubo translúcido

Na placa de orifício a vazão é obtida através de pressão diferencial e, num transmissor há a transformação desta pressão diferencial em grandeza elétrica para que possa ser transportada e lida à distância, conforme Delmée (1989).

Como elemento secundário, responsável pela aquisição do sinal do elemento primário – rotação da turbina –, são utilizados dois sistemas distintos: uma câmera de vídeo CCD, que captura imagens a cada 1/30 segundos, que são armazenadas num microcomputador para posterior processamento, ou são adquiridas e processadas ON- LINE, e um tacômetro óptico digital que possibilita a leitura da rotação da turbina, conforme Minipa (2000).

## 2. Procedimento Experimental

### 2.1 Esquema da bancada

A Fig. (2) mostra o esquema da bancada experimental para calibração da rotação da turbina axial.

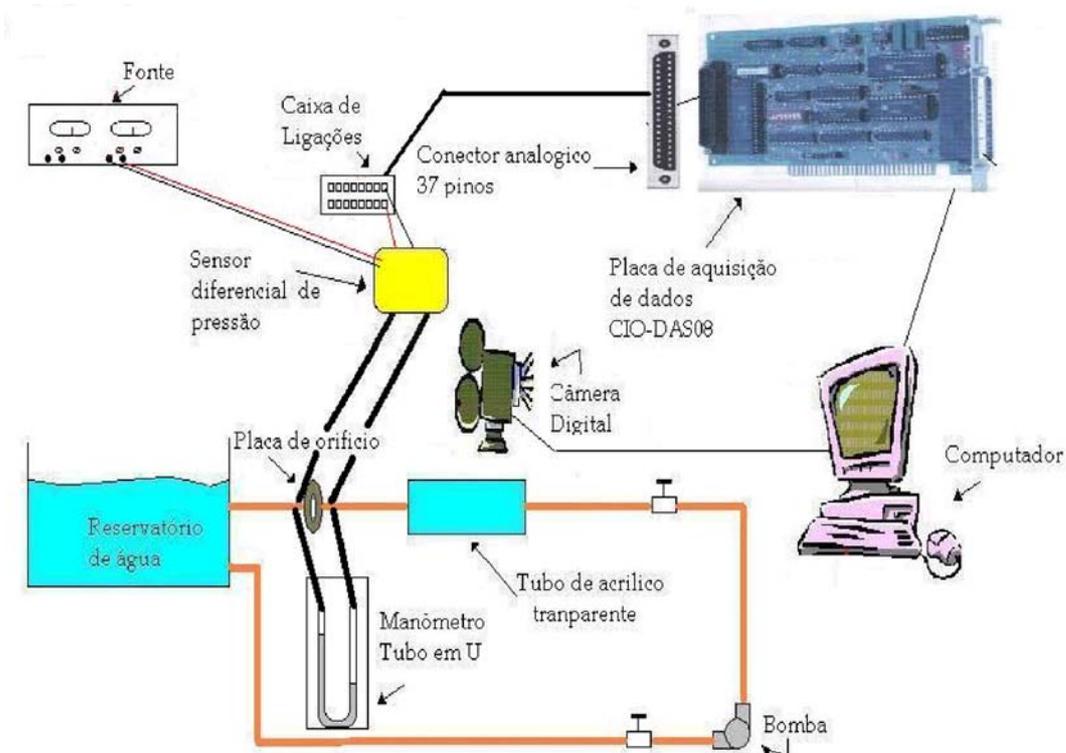


Figura 2. Esquema da bancada

## 2.2 Calibração do sensor de membrana ligado à placa de orifício

Para calibração do sensor de membrana ligado à placa de orifício, é aplicada uma tensão de alimentação de 38,5 Volts e medida a diferença de potencial (ddp) nos terminais de um resistor de 270 ohms ligado a um dos fios de alimentação da fonte. A ddp no resistor é enviada como sinal a uma placa de aquisição de dados sendo proporcional à diferença de pressão no sensor, e também à vazão na tubulação de acordo com Smar (1996).

A vazão foi medida com o auxílio de um cronômetro e um recipiente de 8,5 litros calibrado. Para cada um dos quatro ângulos de abertura da válvula de esfera, foram realizadas quatro medições dos tempos que o fluido demorava a completar o volume estipulado. Os tempos médios e as vazões em volume assim obtidas são mostradas na Tabela (1).

Enquanto isso, o programa computacional LABTECH, segundo Laboratory Technologies Corporation © (1998), armazenava o sinal de tensão medido pelo sensor a uma frequência de 1Hz, e o tempo em que eram realizadas as quatro medições de vazão em volume, em cada ângulo de abertura, conforme Tabela (1).

Com base nas vazões médias e todas as médias dos sinais de tensões equivalentes a essas vazões, e usando o método dos mínimos quadrados foi traçado o gráfico da Fig. (3).

## 2.3 Metodologia para calibração da rotação da turbina com câmera digital

As imagens foram capturadas por uma câmera digital CCD a uma frequência de 30 imagens por segundo e enviadas para o microcomputador. Uma das pás da turbina foi pintada, o que permite identificar o tempo que a turbina leva para completar uma revolução, isto é, o período de rotação da turbina (em segundos), pela contagem dos quadros (imagens) onde esta pá aparece na mesma posição duas vezes consecutivas. Invertendo-se este valor tem-se a rotação da turbina em rps (rotações por segundo).

O processamento das imagens pode ser feito de duas formas: OFF-LINE, onde as imagens são armazenadas como filme sendo posteriormente usado um programa que extrai do filme uma seqüência de imagens, ou ON-LINE, segundo Santos *et. al.* (2000), onde a análise acontece ao longo do ensaio, ou seja, as imagens capturadas já estão disponíveis na tela do computador, sendo detectada a pá pintada por processamento digital de imagens, tornando o processo extremamente ágil. A aquisição e processamento das imagens ON-LINE poderá permitir ajustar a vazão de um escoamento pelo conhecimento da rotação da turbina.

Ao estipular um tempo para a aquisição da imagem, que no caso foi de 5 segundos, pôde-se fazer uma média dos vários valores de rotação que foram medidos em cada vazão. Simultaneamente, foi medida a vazão através do sensor de membrana ligado à placa de orifício, conforme seção 2.2.

Posteriormente altera-se o ângulo de abertura da válvula de esfera e repete-se o processo, para obter-se um novo valor médio de rotação da turbina para outra vazão. Foram feitos quatro ângulos de abertura da válvula de esfera. A Tabela (2) e a Fig.(5) apresentam os resultados de vazão em função da rotação da turbina, por processamento digital de imagens.

## 2.4 Metodologia para calibração da turbina com tacômetro

Foi instalado o tacômetro ótico digital sobre uma plataforma fixa para não vibrar e não haver o contato com o operador, sendo que este fará somente a leitura da rotação em rpm. A altura foi ajustada de modo que o feixe de luz do tacômetro incidisse perpendicularmente à fita refletora aplicada na pá da turbina. Foi posicionado o mais próximo possível do tubo de acrílico translúcido para evitar distorções no feixe e deixar mais estável e precisa a leitura. No entanto, o tacômetro ainda conseguirá responder até uma distância de aproximadamente 25cm, dependendo do ajuste do foco conforme Minipa (2000).

Para cada vazão, espera-se até que a medição de rotação se estabilize e faz-se a leitura. A vazão foi calculada como na seção 2.2. Com os valores de rotação da turbina e de vazão para cada abertura, montou-se a Tabela (3) e o gráfico da Fig. (6) que relaciona a vazão com a rotação da turbina.

## 3. Resultados

A Tabela (1) mostra os resultados da calibração do sensor de membrana ligado à placa de orifício.

Tabela 1. Resultados da calibração do sensor de membrana ligado à placa de orifício

Abertura da válvula de esfera	Médias		Vazão	
	Tempos [seg]	Leitura do sensor [volts]	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /h
Abertura 1	5,85	1,830	0,001452	5,229
Abertura 2	6,51	1,719	0,001306	4,700
Abertura 3	9,01	1,420	0,000943	3,395
Abertura 4	16,44	1,177	0,000517	1,861

O gráfico da Fig. (3) mostra a curva do sensor de membrana ligado à placa de orifício.

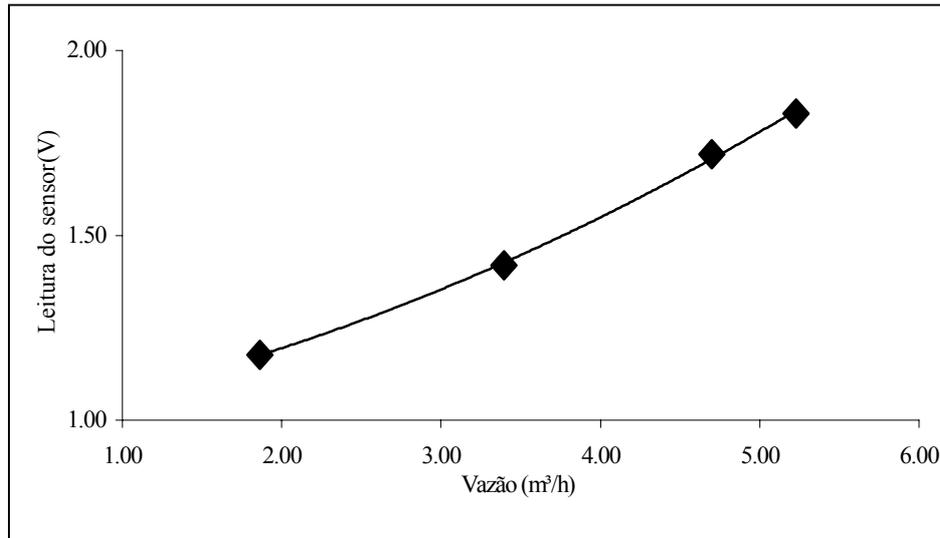


Figura 3. Curva de calibração do sensor de membrana ligado à placa de orifício.

Do gráfico da Fig. (3) (coeficiente de correlação de 99,95%) obteve-se a Eq. (1) que relaciona o valor da leitura do sinal do sensor de membrana (Volts) com a vazão (m³/h) calculada a partir de um volume conhecido.

$$y = 0,0181x^2 + 0,068x + 0,9863 \tag{1}$$

onde:

x= vazão em volume em m³/h

y= sinal da ddp do sensor de membrana em V

A Tabela (2) mostra os resultados da calibração da rotação da turbina com câmera digital.

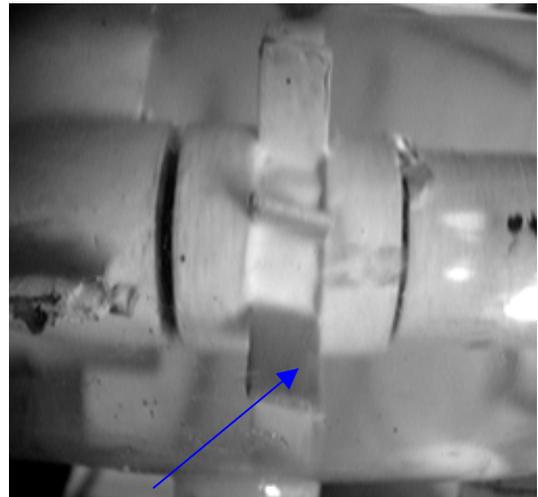
Tabela 2 Rotação por câmera digital x Vazão

Abertura da válvula de esfera	Diferença de quadros	Tempo[s]	rps	rpm	Média dos valores considerados [rpm]	Q [m³/h]
Abertura 1	17	0,5667	1,765	105,88	109,19	4,66
	16	0,5333	1,875	112,50		
Abertura 2	16	0,5333	1,875	112,50	103,62	4,38
	19	0,6333	1,579	94,74		
Abertura 3	20	0,6667	1,500	90,00	90,00	3,93
	20	0,6667	1,500	90,00		
Abertura 4	30	1,0000	1,000	60,00	57,27	1,57
	33	1,1000	0,909	54,55		

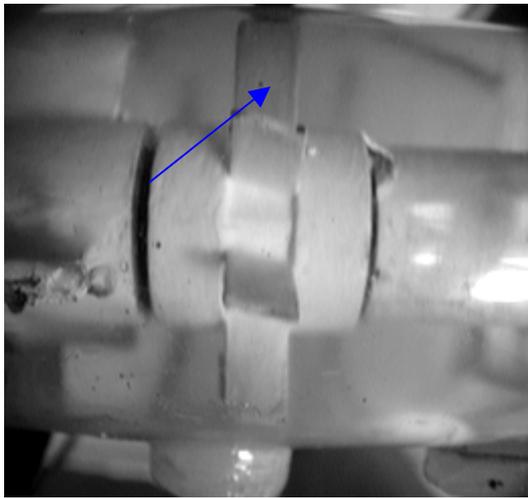
A Fig. (4) mostra 6 imagens para visualização da pá pintada da turbina (1º, 2º, 11º, 13º, 15º e 16º quadros), num período, para a condição da Abertura 1 da Tabela (2).



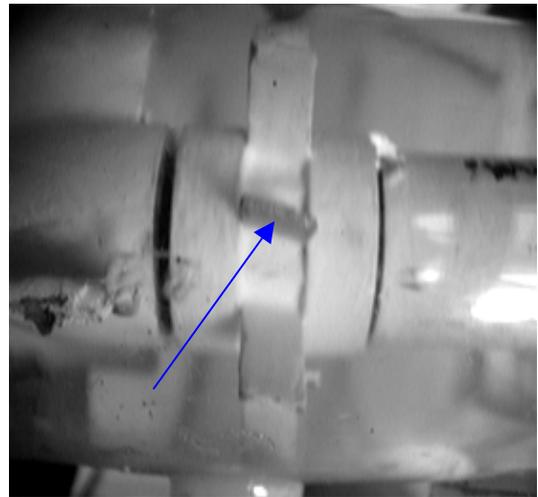
1°Quadro



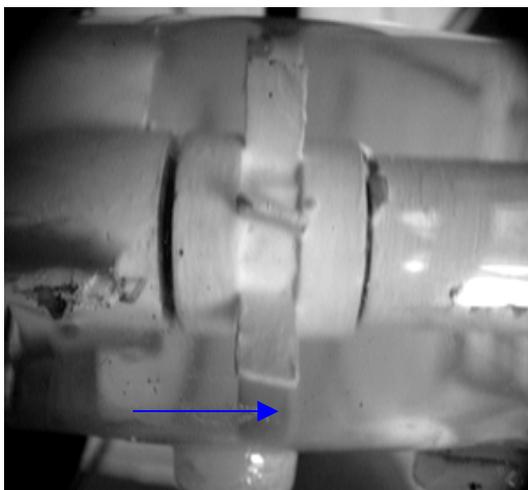
13°Quadro



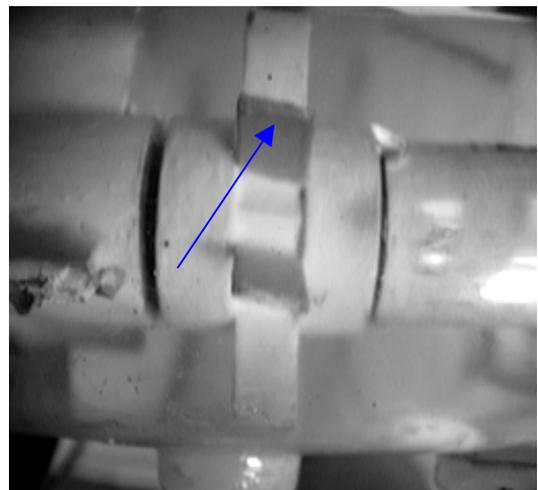
2°Quadro



15°Quadro



11°Quadro



16°Quadro

Figura 4. Visualização da pá pintada da turbina (1°, 2°, 11°, 13°, 15° e 16° quadros) num período.

Com os dados da Tabela (2) construiu-se o gráfico da Fig. (5) que relaciona as vazões calculadas com o uso do sensor de membrana ligado à placa de orifício com as rotações médias da turbina, usando câmera digital e processamento de imagens, para cada abertura da válvula de esfera, o que permite obter-se a Eq. (2) de calibração da turbina, com coeficiente de correlação de 99,98%.

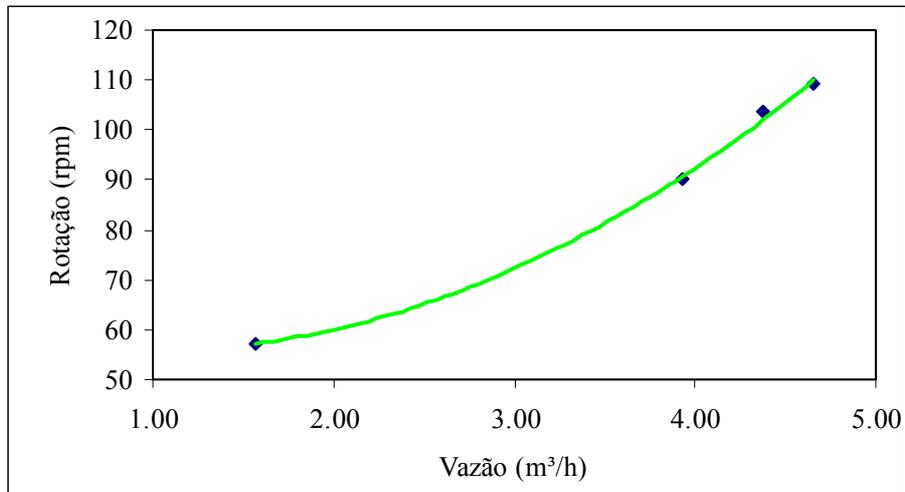


Figura 5. Rotação (por câmera digital) x Vazão (usando placa de orifício e sensor de membrana)

$$y = 3,9905x^2 - 7,7764x + 59,627 \tag{2}$$

onde:

x= vazão em volume em m³/h

y= sinal da ddp do sensor de membrana em V

A Tabela (3) apresenta os resultados da rotação da turbina (rpm) por leitura do tacômetro ótico digital e das vazões (m³/h) medidas com sensor de membrana ligado à placa de orifício, conforme seção 2.2.

Tabela 3 Rotação da turbina com tacômetro x Vazão

Rotação da turbina por tacômetro [rpm]	Vazão [m³/h]
107	4,66
104	4,38
92	3,93
55	1,57

Com os dados da Tabela (3) construiu-se o gráfico da Fig. (6) que relaciona as vazões calculadas com o uso do sensor de membrana ligado à placa de orifício com as rotações médias da turbina, usando tacômetro ótico digital, para cada abertura da válvula de esfera. Obtém-se assim a Eq.(3) de calibração da rotação da turbina, com coeficiente de correlação de 99,88%.

$$y = 1,5393x^2 + 7,6009x + 39,239 \tag{3}$$

onde:

x= vazão em volume em m³/h

y= sinal da ddp do sensor de membrana em Volts

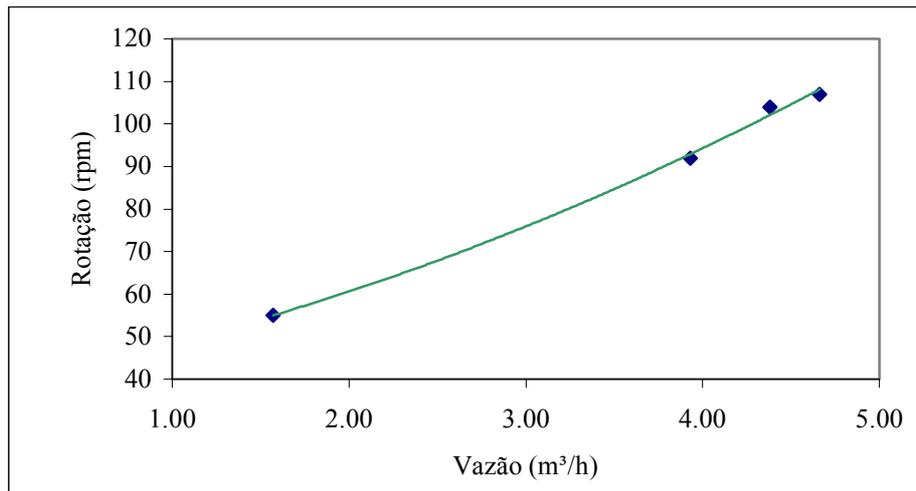


Figura 6. Rotação da turbina com tacômetro x Vazão (com sensor de membrana ligado à placa de orifício)

Na Eq. (2), para vazão em volume de  $3\text{m}^3/\text{h}$ , a rotação da turbina, usando o método de captura de imagens por câmera digital, é de 72,21 rpm.

Na Eq. (3), para vazão em volume de  $3\text{m}^3/\text{h}$ , a rotação da turbina usando a leitura do tacômetro ótico digital é de 66,66 rpm.

As incertezas de todos os procedimentos foram calculadas de acordo com Inmetro *et al*, 1996. A incerteza máxima da rotação da turbina usando o método de captura de imagens por câmera digital foi de  $\pm 4,28\%$  e de  $\pm 0,22\%$  usando a leitura do tacômetro ótico digital.

Considerando a leitura do tacômetro ótico digital como correta, o erro obtido na leitura da rotação da turbina usando o método de captura de imagens por câmera digital foi de 7,63%.

#### 4. Conclusões

Os dois métodos utilizados para medição de rotação da turbina permitem o conhecimento da vazão do escoamento através de suas curvas de calibração.

O método por análise de imagens exige microcomputador adequado preferivelmente com grande velocidade de processamento, placa de aquisição de imagem adequada, programa de aquisição de sinais, câmera de vídeo digital, um tubo translúcido para filmagem da turbina e um controle de iluminação, o que acaba tornando este método o mais exigente e mais caro. Uma velocidade de processamento maior permite a aquisição do sinal de tensão medido pelo sensor a uma frequência menor do que 1Hz, o que aumenta a precisão do experimento.

Para um estudo mais detalhado de como o escoamento se comporta, o processamento das imagens pode ser feito OFF-LINE, sendo as imagens armazenadas como filme para posterior extração da sequência de imagens, para análise. No processamento ON-LINE, a análise acontece ao longo do ensaio. As imagens capturadas estão visíveis na tela do computador, e a pá pintada é detectada por processamento digital de imagens (segmentação de imagens). O processo é instantâneo, mas não armazena as imagens. Num processo de automação, a aquisição e processamento das imagens ON-LINE permite ajustes da vazão do escoamento de acordo com a rotação da turbina.

O método de medição de rotação usando tacômetro digital é mais prático e simples mas também necessita de equipamentos adequados como o tubo translúcido e o próprio tacômetro digital com leitura de rotação por emissão de luz monocromática. Neste método deverá ser feito um estudo da incerteza da leitura em função da difração do sinal referente à distância da emissão ao ponto de medição e em função da utilização do tubo translúcido.

#### 5. Referências

- Delmée, G. J., 1989. "Manual de Medição de Vazão", Edgard Blücher Ltda., São Paulo, SP, Brasil.
- Ferreira, V. C. S., Souto, S. L. L. e Schuller, M. B., 1991. "Medidores de Fluxo: Obtenção da Curva de Calibração via Terminal Inteligente, Anais do XI COBEM, ABCM.
- Ferreira, V. C. S. e Favaretto, C. F. F., 1993. "Determinação Experimental do Torque Resistivo Magnético de Uma Turbina de Medição, Anais do XII COBEM, ABCM.
- Gonçalves Jr., C., 2000. "Conservação e Racionalização da Utilização de Água, Novas Ferramentas: Registradores e Hidrômetros Eletrônicos", DMAE, Porto Alegre, RS
- Inmetro, ABNT, Programa RH Metrologia, SBM Metrologia Sociedade Brasileira, 1996. "Guia para Expressão da Incerteza de Medição", ISO GUM.
- Laboratory Technologies Corporation ©,1998." Labtech Notebook version 10.1 universal".

Minipa, 2000 - "Manual do tacômetro digital MDT -2238".  
Santos, S.M., Ferreira, V.C.S., Gutkoski, L.L., 2000." Determinação dos Campos de Velocidades de Fitoplantos por Processamento Digital de Imagens (PDI)", Anais do ENCIT 2000, ABCM.  
Smar, 1996. " Manual de instruções, operação e manutenção: Transmissor inteligente de pressão LD301".  
Watec, 2000. "Manual da Câmera digital Wat – 902H", Japan.

## MEASUREMENT OF FLOW WITH AXIAL TURBINE BY DIGITAL IMAGES PROCESSING

**Sonia Magalhães dos Santos**

e-mail: [ynsantos@mikrus.com.br](mailto:ynsantos@mikrus.com.br)

**Jorge Alberto Almeida**

e-mail: [dfsjaa@furg.br](mailto:dfsjaa@furg.br)

**Leandro Jorge Carvalho**

e-mail: [leanjorcar@bol.com.br](mailto:leanjorcar@bol.com.br)

**Luciano Vaghetti de Oliveira**

e-mail: [lvaghetti@vetorialnet.com.br](mailto:lvaghetti@vetorialnet.com.br)

Departamento de Física – Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG)  
CP 474 – Rio Grande/RS – Brasil – CEP: 96201-900

***Abstract.** The work discusses the study of a flow meter, of axial turbine type, through knowledge of their rotation. Two different systems to meter the rotation are used: a CCD video camera, which capture images at 1/30 seconds through a cylindrical acrylic transparent tube, which are load to microcomputer, or are processed ON-LINE, and a digital sensor which count how often one blade is observed, in a period of time. The study was held in a calibration rig for water flow meters which consists of a reservoir, a pump moving the water in closed circuit, tubes and a flow regulator.*

***Keywords:** axial turbine; flow meter; digital image processing; signals processing*