

4

Análise de Resultados

4.1

Medição de vazão com extensômetro

Inicialmente, a resistência de cada extensômetro foi medida com um multímetro Agilent 34970 A, para cada valor de vazão, na faixa de 0 a 14 m³/h. Foram registrados os valores de resistência de cada extensômetro, juntamente com a respectiva faixa de variação.

Para o projeto do sistema de medição, os valores constantes na tabela 3 foram utilizados, os quais correspondem à máxima vazão encontrada em campo, para uma tubulação de 1,5 in (3,81 mm) de diâmetro nominal. Calculou-se tais parâmetros usando-se as Eq. (4), (5) e (9), juntamente com os dados da Tabela 1.

Tabela 3: Parâmetros Calculados

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Área do escoamento	A_{flow}	m ²	0,001313
Velocidade do fluido	V	m/s	1,48
Área transversal da parede	A	m ²	0,0004731
Força sobre o tubo	F	N	2,880
Deformação relativa	ε	μs	0,0294
Variação de resistência	ΔR	$\mu\Omega$	7,42

Pode-se observar que a variação de resistência do extensômetro é muito pequena para ser medida por um equipamento comercial. Neste, deformações no valor de 1 μs podem ser medidas, o que resulta numa variação de resistência de 240 $\mu\Omega$, ou seja, cerca de 32 vezes maior do que o requerido pelo presente experimento. Uma amplificação deste sinal no experimento aqui descrito foi conseguida através do uso de dois tipos básicos de circuitos :

- Divisor de tensão.
- Ponte de Wheatstone

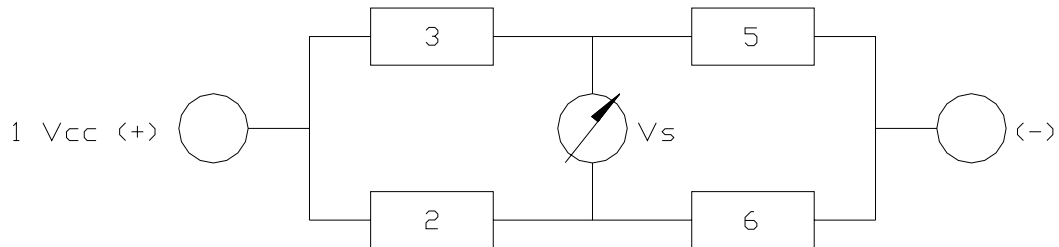


Figura 22 – Extensômetros – Ponte de Wheatstone

A Tabela 4 apresenta a média e duas vezes o desvio padrão (2σ) obtidos com 357 pontos aquisitados.

Tabela 4: Variação da resistência dos extensômetros com a vazão de água na tubulação (0 a 14 m³/h)

Strain-gage	Média	2σ
	mΩ	mΩ
1	120101	27
2	120150	1
3	120303	1
4	120186	1
5	120545	34
6	120121	1
7	120020	3
8	120050	1

Pode-se observar que somente os extensômetros 1 e 5, colocados antes da curva, sofreram deformações mensuráveis com o equipamento utilizado. Assim, foi escolhido o de nº 5 para outros testes, disponibilizado na ponte de Wheatstone de acordo com a Fig. 22. Nela, os extensômetros 2, 3 e 6 são

considerados como resistências constantes. Conforme indicado, uma tensão de 1 V é aplicada, e a tensão V_s é medida em μV . Foi feita a correlação da vazão do fluido com a tensão lida na ponte de Wheastone na configuração mostrada. A Fig. 23 indica os resultados obtidos:

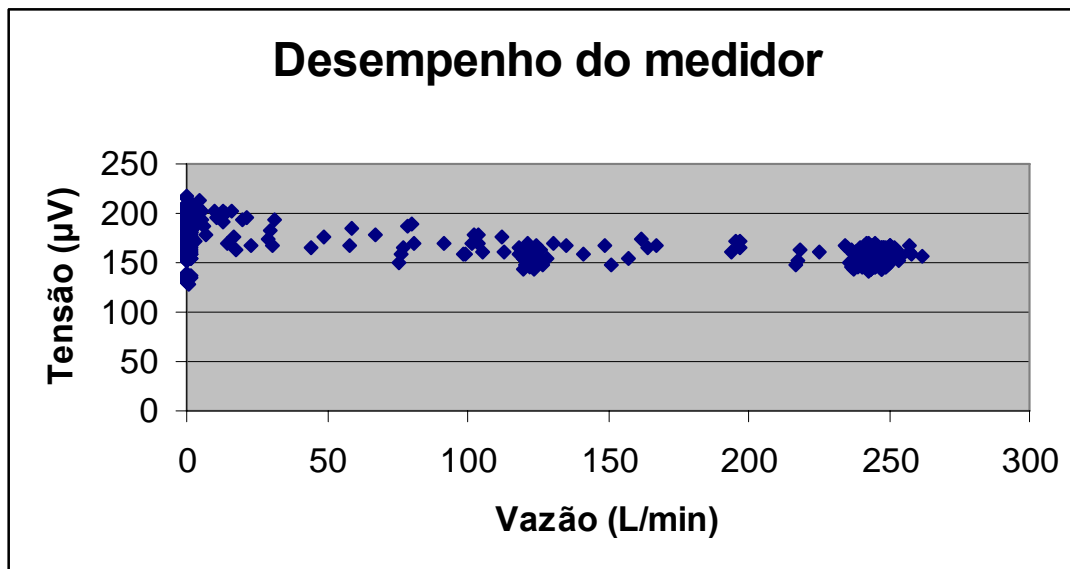


Figura 23 – Extensômetro – Resposta do Medidor para medição de Vazão.

Observou-se que a tensão da ponte não varia significativamente com a vazão, pois ela varia de $(190 \pm 29) \mu\text{V}$ para vazão igual a zero e estabiliza em $(158 \pm 14) \mu\text{V}$ em vazões acima de 70 L/min.

Uma análise dos dados e do experimento mostrou que esta diferença é devido à pressurização da tubulação quando existe vazão. Portanto, a deformação devido à pressão é muito maior do que aquela devido às forças hidrodinâmicas. Logo, o medidor não intrusivo com extensômetros resistivos pode ser, portanto, utilizado para identificar se a tubulação está ou não pressurizada, e não para medir a vazão.

Após esta conclusão, optou-se por prosseguir às investigações utilizando-se acelerômetros.

4.2

Medição de vazão com acelerômetros

Após aberta a válvula de passagem da água, a massa de água no vaso de pressão foi medida em intervalos regulares de tempo, definidos pelo relógio do microcomputador. O volume deslocado foi calculado a partir do conhecimento da massa específica da água. A relação entre a variação de volume e o tempo decorrido forneceu a vazão de água.

Vários testes exploratórios foram feitos para determinar as condições ótimas de medição, os quais são:

- Tubulação engastada no reservatório de suprimento de ar.
- Tubulação acoplada ao reservatório de suprimento de ar através de um acoplamento flexível

Foi observado que se a tubulação estiver engastada no reservatório de suprimento de ar, qualquer vibração neste último se propaga para a tubulação, o que caracteriza um ruído que deve ser filtrado para que os resultados sejam significativos. Desta forma, foi colocado um acoplamento flexível entre a tubulação e o reservatório, diminuindo significativamente o ruído caracterizado por elevadas frequências. Portanto, chegou-se à conclusão que o sinal relacionado à formação dos vórtices deve ser diferenciado do sinal de ruído. Em todos os dois casos foi testada a influência do filtro já presente no circuito do acelerômetro, sobre os resultados. Novamente, o filtro é importante para não deixar passar as altas frequências. Portanto, concluiu-se que a melhor situação para se efetuar as medições é quando há um acoplamento flexível colocado entre a tubulação e o reservatório de suprimento de ar e, simultaneamente, se utiliza o filtro do acelerômetro. Os resultados dos testes aqui apresentados são para as condição com e sem acoplamento rígido, para o eixos x, de acordo com a Fig. 24.

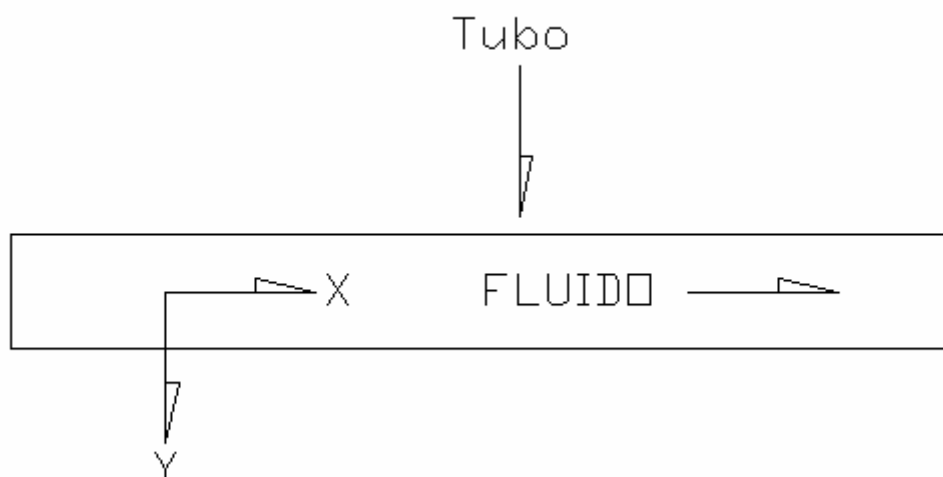


Figura 24 – Posição dos eixos X e Y na tubulação

As Fig. 25 e 26 apresentam os resultados de frequência e voltagem (mV) respectivamente, com acoplamento rígido, como função de vazão, incluindo todos os pontos das corridas realizadas.

Como pode ser observado nestas figuras, a resposta em frequência apresenta uma relação um pouco mais estável com a vazão do que a resposta em mV. Assim, as análises que se seguem levam em consideração os valores em frequência.

Como foi observada uma dispersão grande dos resultados, isto é, em cada corrida a frequência varia muito mais do que a vazão, para análise dos dados, optou-se por calcular uma frequência média e a sua dispersão para cada corrida, supostamente com vazão constante e representada pela sua respectiva média. Os resultados estão apresentados na Fig. 27.

Com estes valores de vazão média aplicados nas Eq. 17 e 18 obteve-se o gráfico apresentado na Fig. 28, que relaciona o número de Strouhal como função do número de Reynolds.

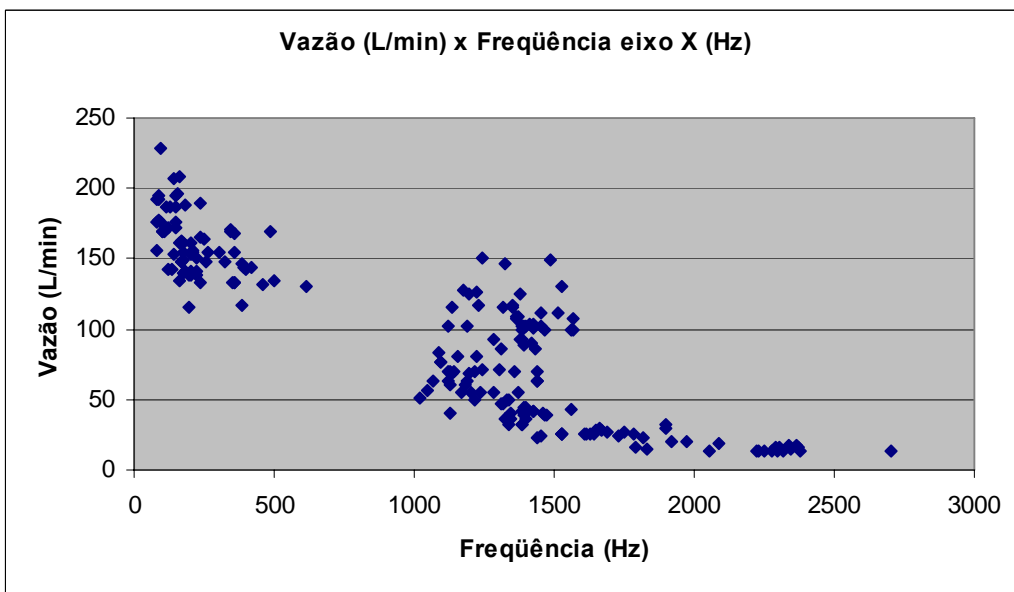


Figura 25 – Acelerômetro - Variação de frequência com vazão, eixo x.

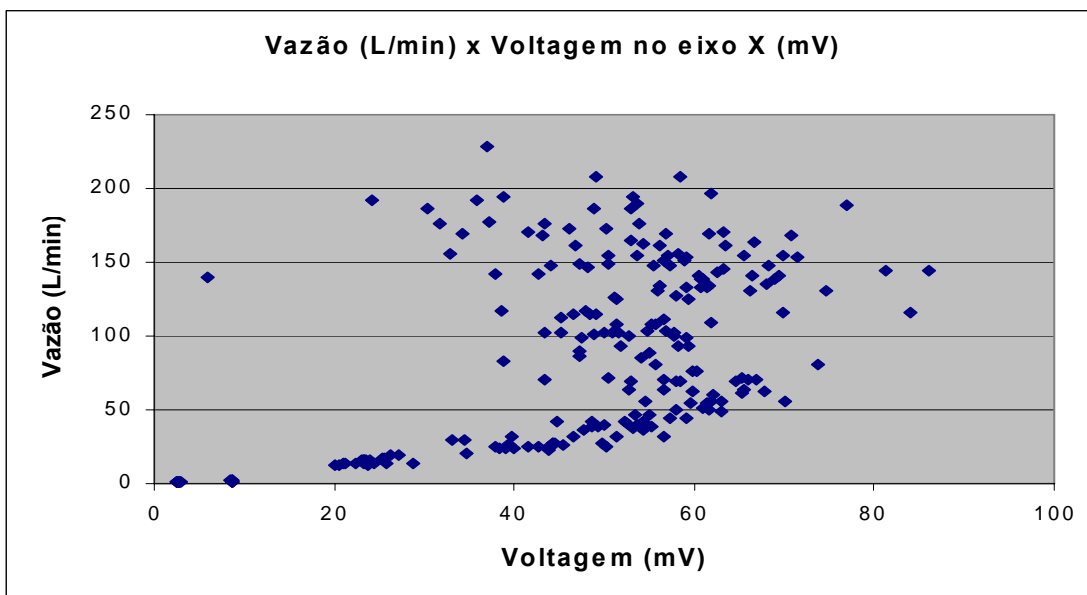


Figura 26 – Acelerômetro - Variação de voltagem (mV) com vazão, eixo x.

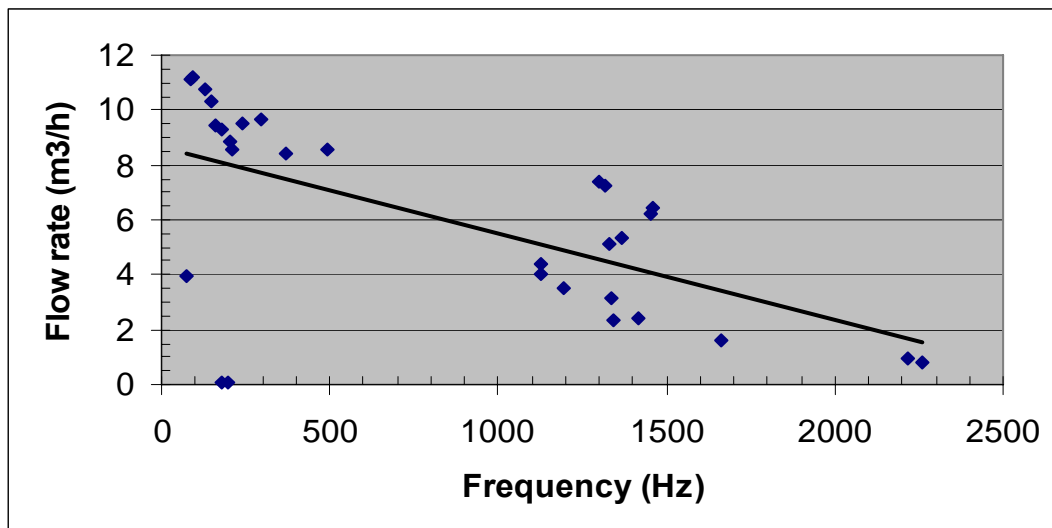


Figura 27 – Acelerômetro - Variação da Vazão com Frequência, acoplamento rígido, eixo x

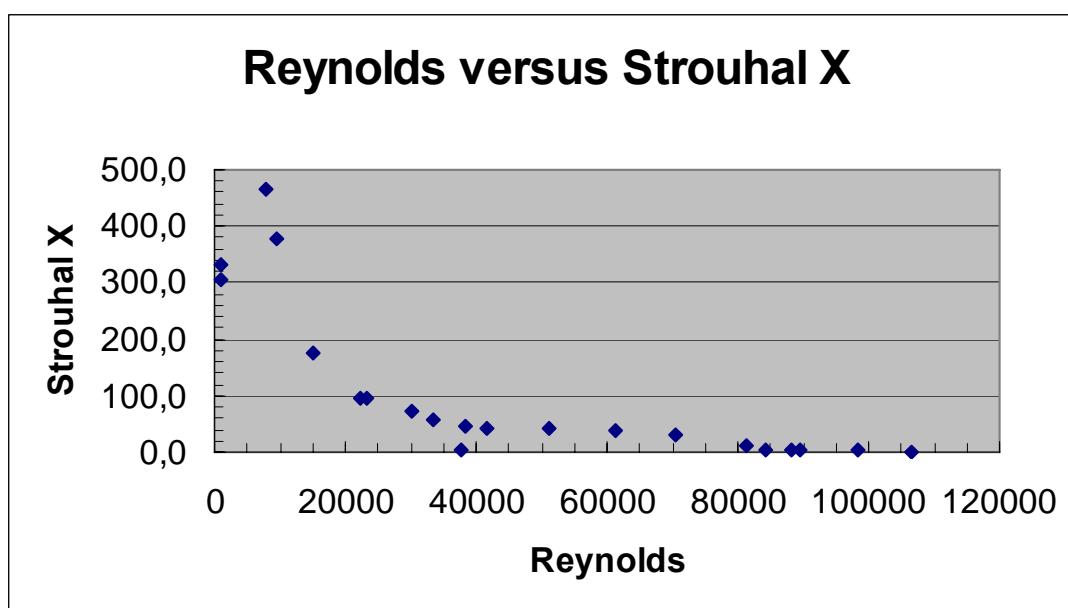


Figura 28 – Acelerômetro - Variação de Strouhal com Reynolds, eixo x.

Os dados preliminares, conforme Fig. 25, indicaram que a frequência dos vórtices decresce com o aumento da vazão e se estabiliza em cerca de 1250 Hz, para uma vazão abaixo de 50 L/min ($3\text{ m}^3/\text{h}$), ou seja, um pouco menos da metade da vazão máxima requerida ($7\text{ m}^3/\text{h}$).

Na Fig. 28 pode-se observar que o número de Strouhal (S) diminui quando o número de Reynolds (Re) aumenta, a partir de aproximadamente $Re = 10000$, tendendo a um valor constante para cerca de $Re = 100000$. Este comportamento é

semelhante ao da Fig. 18, para cilindros, para a mesma faixa do número de Reynolds (Re). Valores médios de Strouhal (S) foram utilizados para cada valor médio de vazão, em cada corrida.

A Tab. 5 mostra os valores medidos e os parâmetros calculados das Fig. 27 e Fig. 28, e suas incertezas.

Tabela 5: Valores medidos, parâmetros calculados e incertezas com acoplamento rígido entre a tubulação e o vaso de pressão.

Vazão (m ³ /h)		Frequência (Hz)		Strouhal	Reynolds
Q	U _r	n	U _n	S	Re
Eq. (22)	Eq. (23)	Eq. (25)	Eq.(27)	Eq. (17)	Eq. (18)
11,21	0,43	92	12	1,38	106625
10,34	0,43	146	17	2,36	98368
9,42	0,22	157	13	2,80	89580
9,28	0,37	181	24	3,27	88257
8,87	0,09	203	45	3,83	84343
8,56	0,22	493	76	9,66	81393
7,41	0,15	1300	108	29,42	70500
6,46	0,27	1457	47	37,82	61439
5,37	0,06	1370	51	42,74	51119
4,37	0,07	1125	55	43,15	41587
3,52	0,15	1195	33	56,86	33518
2,45	0,01	1418	79	97,20	23272
3,95	0,02	72	6	3,04	37617
0,81	0,00	2259	128	465,70	7734
0,10	0,00	178	41	306,88	927
0,10	0,00	196	42	331,61	944
0,98	0,01	2220	141	378,77	9345
1,60	0,02	1665	90	174,39	15227
2,33	0,02	1341	53	96,51	22159
3,17	0,03	1339	89	70,92	30112
4,04	0,13	1124	36	46,67	38401
5,12	0,11	1332	80	43,60	48723
6,24	0,05	1453	64	39,04	59348
7,27	0,08	1318	92	30,39	69173
8,41	0,31	369	23	7,35	80005
8,54	0,12	212	22	4,15	81275
9,49	0,11	237	46	4,19	90239
9,68	0,12	295	85	5,11	92111
10,74	0,12	127	18	1,98	102144
11,10	0,14	83	11	1,26	105608

Os dados experimentais podem ser representados por uma linha reta que determina a vazão volumétrica média (Q) em função da frequência média (n), conforme Fig. 27. Verifica-se que o valor de incerteza é alto, e que os dados devem ser melhor interpretados e processados para aumentar a repetibilidade dos resultados. Entretanto, quando o número de Strouhal é plotado em função do número de Reynolds o espalhamento é muito menor (Fig. 28).

$$Q = 8,6482 - 0,031 n \quad (28)$$

O passo seguinte nesta análise foi identificar quais as frequências que seriam decorrentes do desprendimento dos vórtices e, quais seriam inerentes ao sistema de medição. Para isto, novo teste foi realizado, desta vez desfazendo-se o engaste da tubulação ao vaso de pressão, acoplando-se a este uma conexão flexível. Esta conexão foi inserida entre a saída do reservatório de água e a válvula de ajuste de vazão.

Valores médios de cada corrida foram utilizados na determinação dos parâmetros para as Fig. 29 e Fig. 30. Pode-se observar um comportamento semelhante ao da Fig. 28, porém, com frequências bem mais baixas, indicadas pelos valores mais baixos do número de Strouhal (S).

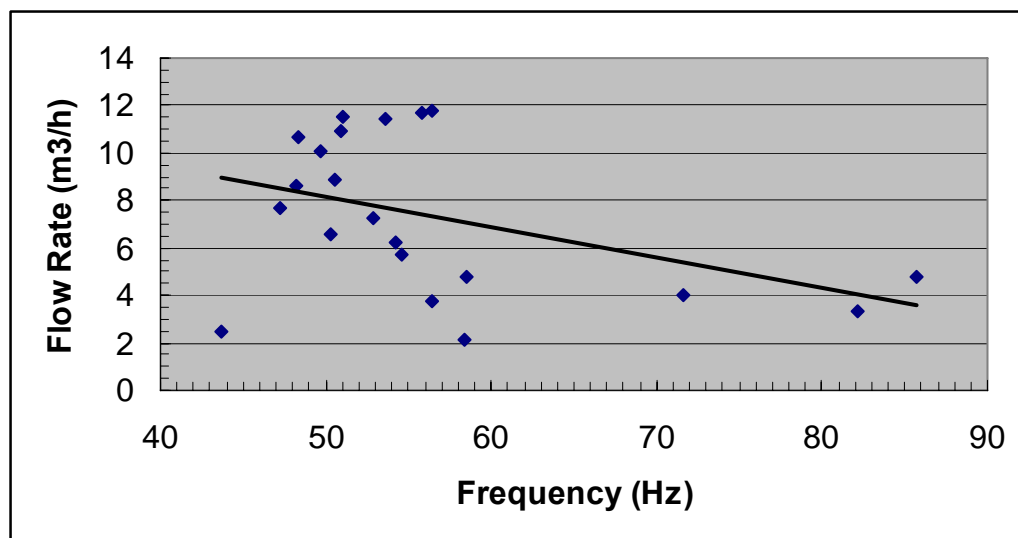


Figura 29 – Acelerômetro - Variação da Vazão com Frequência, acoplamento flexível, eixo x

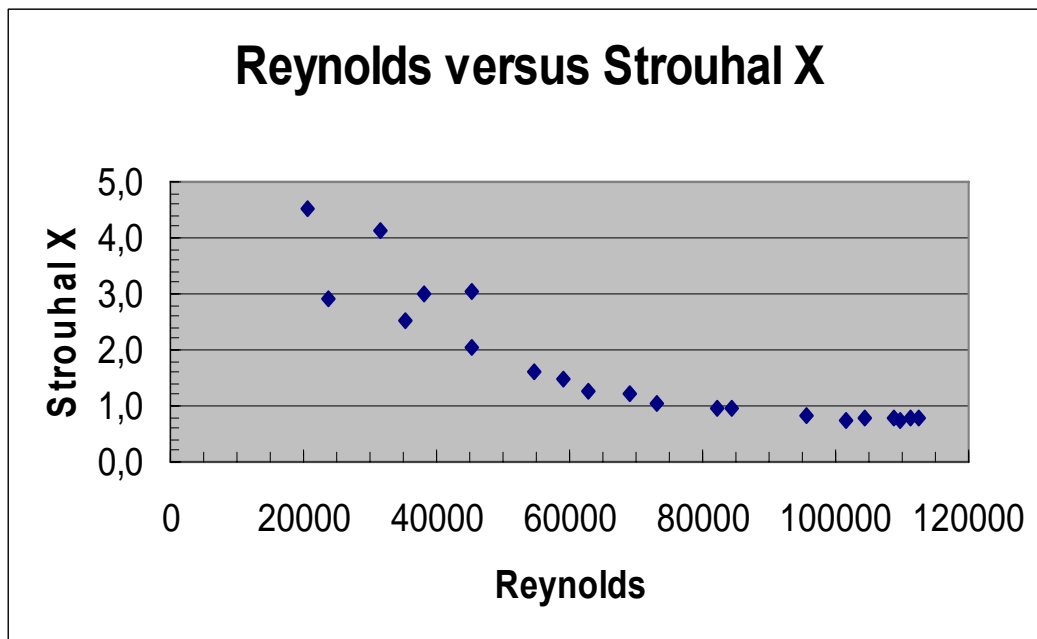


Figura 30 – Calibração do medidor : Strouhal (S) versus Reynolds (Re).
Acoplamento flexível com o vaso de pressão.

Novamente, quando o número de Strouhal é plotado em função do número de Reynolds, Fig 30, o espalhamento é muito menor.

Ficou, pois, demonstrado, que o sistema é muito sensível a ruídos propagados pela tubulação e não apenas aos vórtices gerados no escoamento. Um sistema deve ser implantado para filtrar os sinais não desejados. Este fato ficou evidente quando se retirou o filtro que acompanhava o acelerômetro, produzindo elevados valores de frequência.

A tabela 6 mostra os valores medidos e os parâmetros calculados das Fig. 29 e Fig. 30, e suas incertezas.

Os dados experimentais podem ser representados por uma linha reta que determina a vazão volumétrica média (Q) em função da frequência média (n).

$$Q = 14,481 - 0,1269 n \quad (29)$$

Tabela 6: Valores medidos, parâmetros calculados e incertezas com acoplamento flexível entre a tubulação e o vaso de pressão.

Flow rate (m ³ /h)		Frequency (Hz)		Strouhal	Reynolds
Q	U _v	n	U _d	S	Re
Eq. (10)	Eq. (11)	Eq. (13)	Eq.(15)	Eq. (5)	Eq. (6)
11,81	0,33	56	7,4	0,80	112364
11,44	0,44	54	3,6	0,79	108772
10,97	0,23	51	2,9	0,78	104299
10,04	0,14	50	1,7	0,83	95511
8,87	0,11	51	2,3	0,96	84371
7,25	0,02	53	2,2	1,22	68921
6,20	0,04	54	2,4	1,47	58960
4,77	0,10	59	3,8	2,06	45363
3,73	0,09	56	2,6	2,54	35445
2,50	0,02	44	1,2	2,93	23737
2,16	0,01	58	4,0	4,53	20548
3,33	0,05	82	10,0	4,14	31649
4,00	0,08	72	5,0	3,00	38047
4,75	0,02	86	3,0	3,02	45184
5,75	0,04	55	1,8	1,59	54663
6,61	0,02	50	2,4	1,27	62841
7,69	0,14	47	1,9	1,03	73117
8,63	0,18	48	1,6	0,94	82052
10,67	0,10	48	2,9	0,76	101498
11,53	0,44	51	5,4	0,74	109686
11,70	0,12	56	8,2	0,80	111243

Diante dos resultados, verificou-se que o medidor é capaz de identificar nitidamente quando não existe vazão, pelos baixos valores de frequência encontrados (praticamente zero), correspondentes ao início e ao fim de uma corrida. A Fig 31 apresenta os valores de frequência para uma corrida com vazão igual a 3,28 L/s, comparativamente ao caso de vazão igual a zero. Durante este teste realizado nos laboratórios da PUC, a válvula de ajuste de vazão foi posicionada de forma que a vazão média fosse igual a 3,28L/s. O computador realizou a leitura da frequência de modo automático, com um intervalo de tempo de 3 segundos entre as leituras, nota-se que quando a vazão se estabiliza no valor médio de 3,28L/s, a frequência deixa de ser zero, assumindo um valor próximo a 60Hz. Nos dados coletados no início e fim da corrida, o valor da vazão é próximo a zero, sendo que as frequências correspondentes são praticamente iguais a zero.

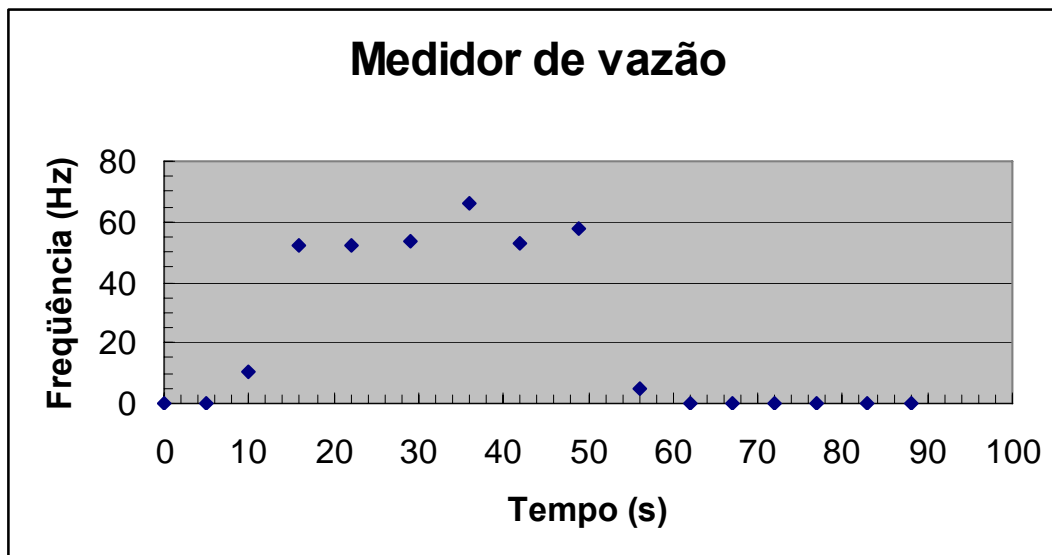


Figura 31 – Identificação da presença de fluido escoando. Vazão de 3,28 L/s. Acoplamento flexível entre tubulação e vaso de pressão.

De forma a dar prosseguimento ao desenvolvimento do sistema de medição, uma análise de Fourier do sinal será feita, assim, a influência de diferentes parâmetros será identificada.

4.3

Montagem do equipamento em campo

Este sistema foi instalado em uma tubulação da Usina Fontes Nova da LIGHT, conforme indicado pela Fig. 32.

O ponto escolhido para instalação do acelerômetro em campo foi logo após uma válvula que, por sua vez, estava localizada após uma curva de 90 graus. A válvula possibilitava a variação da vazão durante os testes.

O ponto foi escolhido após a curva, diferentemente do realizado nos laboratórios da PUC-Rio, porque verificou-se que o nível de vibração era maior nesta região.



Figura 32 – Montagem do acelerômetro na Usina Fontes Nova, após uma válvula.



Figura 33 – Detalhe da montagem do acelerômetro na Usina Fontes Nova, após uma válvula.



Figura 34 – Instrumentação para medição do sinal do acelerômetro.



Figura 35 – Instrumentação para medição do sinal do acelerômetro.

Foi observado que um ruído de 60 Hz aparecia no sinal do acelerômetro, e que um isolamento eletrônico deverá eliminá-lo.