

MODELAGEM, OTIMIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM CARNEIRO HIDRÁULICO

RICARDO NICOLÁS ZÁRATE ROJAS

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de
São Paulo, para a obtenção do título de Doutor
em Agronomia, Área de Concentração:
Irrigação e Drenagem.

PIRACICABA
Estado de São Paulo – Brasil
Outubro- 2002

MODELAGEM, OTIMIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM CARNEIRO HIDRÁULICO

RICARDO NICOLÁS ZÁRATE ROJAS

Engenheiro Agrônomo

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

Tese apresentada à Escola Superior de
Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de
São Paulo, para a obtenção do título de Doutor
em Agronomia, Área de Concentração:
Irrigação e Drenagem.

PIRACICABA

Estado de São Paulo – Brasil

Outubro - 2002

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Zárate Rojas, Ricardo Nicolás

Modelagem, otimização, construção e avaliação de um protótipo de
carneiro hidráulico / Ricardo Nicolás Zárate Rojas. - - Piracicaba, 2002.

70 p. : il.

Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2002.
Bibliografia.

1. Carneiro hidráulico 2. Hidráulica aplicada I. Título

CDD 627

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

Aos meus pais, Darío e Noelia
e a todos meus familiares.

OFEREÇO.

À minha esposa Verônica e aos nossos
filhos Nicolás, Lucas e Andrés

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela fé e perseverança concedidas em todos os momentos.

À Organização dos Estados Americanos (OEA), pela concessão de recursos financeiros, para a realização deste curso de Doutorado.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, por intermédio do Departamento de Engenharia Rural, pela acolhida e efetivo apoio concedidos.

Ao Professor Dr. Tarlei Arriel Botrel, pela orientação e amizade no decorrer do curso.

Aos Professores do Departamento de Engenharia, em especial aos Professores José Antonio Frizzone, Marcos Folegatti, Sergio Nascimento Duarte pelo apoio constante.

Aos colegas Diniz, Alexandre, Eder, Luis Geraldo, Juan, Valeria, Luis Arthur, Olívio, Silvana, Andrés Lai e Denis.

À Dra. Rosimeire L. C. Buchidid do posto médico da ESALQ.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia, em especial César e Hélio, pela ajuda prestada durante a realização do trabalho.

Enfim a todos aqueles que, direta ou indiretamente, tenham contribuído para o êxito deste trabalho.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE QUADROS	xi
RESUMO	xii
SUMMARY	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Princípios de funcionamento	6
2.2 Tubulação de alimentação	9
2.3 Modelagem	11
2.3.1 Velocidade na tubulação de alimentação	13
2.3.2 Relação de pressões e vazões	16
2.4 Rendimento	17
2.5 Aquisição de dados	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 Material	23
3.1.1 Carneiro hidráulico	23
3.1.2 Válvula de escape	25
3.1.3 Medidor de velocidade da água	27
3.2 Métodos	28
3.2.1 Modelo teórico	28
3.2.2 Validação do modelo	35
3.2.3 Avaliação do protótipo de carneiro hidráulico	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 Modelo teórico (linha azul) vs. dados observados (linha roxa) para tubulação de alimentação de PVC	41
4.2 Modelo teórico (linha azul) vs. dados observados (linha roxa) para a tubulação de alimentação de aço galvanizado	48
5 CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE FIGURAS

Página

1	Carneiro original dos irmãos Montgolfier.....	4
2	Instalação do carneiro hidráulico.....	5
3	Esquema para a obtenção de dados, utilizando a mecatrônica.....	19
4	Vídeo câmara, gravador de vídeo, monitor, processador de vídeo, computador, estação de trabalho para gráficos e unidade de impressão.....	20
5	Fluxograma de atividades.....	23
6	Protótipo de Carneiro Hidráulico.....	25
7	Eletroválvula construída a partir de automático de partida de carro.....	26
8	Interfase para o comando da eletroválvula.....	27
9	Montagem dos equipamentos para a medição da velocidade.....	28
10a	Fluxograma do modelo teórico.....	33
10b	Fluxograma do modelo teórico.....	34
11	Esquema da bancada de prova.....	37
12	Principais componentes do carneiro hidráulico.....	38
13	Carneiro hidráulico instalado e em funcionamento, comandado pelo microprocessador.....	39
14	Comparação do modelo teórico (linha azul), com os dados observados, sendo a linhas roxa para NR = 43.500 e amarela para NR = 4.000, quando a velocidade da água na tubulação de alimentação de PVC de 25 mm em função do tempo.....	41
15	Velocidade da água na tubulação de alimentação de PVC de 25 mm de diâmetro em função do tempo, com 5,95 m de comprimento, para alturas de alimentação de 0,55 m (a), 1,52 m b) e (c) 2,34 m.....	42
16	Velocidade da água na tubulação de alimentação de PVC de 25 mm de diâmetro em função do tempo, com 11,81 m de comprimento, para alturas de alimentação de 0,55 m (a), 1,52 m (b) e (c) 2,34 m.....	44
17	Velocidade da água na tubulação de alimentação de PVC de 25 mm de diâmetro em função do tempo, com 16,9 m de comprimento, para alturas de alimentação de 0,55 m (a), 1,52 m (b) e (c) 2,34 m.....	45

18	Vazão de Recalque vs. Pressão de Recalque com a tubulação de alimentação de PVC, para diferentes tempos de pulso da eletroválvula.	47
19	Rendimento vs. Pressão de Recalque utilizando a tubulação de alimentação de PVC de 25 mm, para diferentes tempos de pulso da eletroválvula.....	47
20	Velocidade da água na tubulação de alimentação de aço galvanizado de 19,05 mm de diâmetro em função do tempo, com 6,0 m de comprimento, para alturas de alimentação de 0,55 m (a), 1,46 m (b) e 2,28 m (c).	49
21	Velocidade da água na tubulação de alimentação de aço galvanizado de 19,05 mm de diâmetro em função do tempo, com 12,0 m de comprimento, para alturas de alimentação de 0,55 m (a), 1,46 m (b) e (c) 2,28 m.	50
22	Velocidade da água na tubulação de alimentação de aço galvanizado de 19,05 de diâmetro em função do tempo, com 18,0 m de comprimento, para alturas de alimentação de 0,55 m (a), 1,46 m (b) e 2,28 m (c).	51
23	Vazão de Recalque vs. Pressão de Recalque com a tubulação de alimentação de aço galvanizado, para diferentes tempos de pulso da eletroválvula.....	53
24	Rendimento vs. Pressão de Recalque com a tubulação de alimentação de aço galvanizado, para diferentes tempos de pulso da eletroválvula comandado pelo microprocessador.	53
25	Rendimento máximo vs. tempo de pulso utilizando a tubulação de alimentação de PVC de 25 mm.	54
26	Rendimento máximo vs. tempo de pulso com a tubulação de alimentação de aço galvanizado de 19,05 mm.	54
27	Vazão vs. Pressão de recalque para o tempo de fechamento de 0,6 s., sendo a tubulação de alimentação de PVC.	60
28	Vazão vs. Pressão de recalque para os tempos de fechamento de 0,8 s (a)., 1,0 s. (b), e (c) 1,2 s., sendo a tubulação de alimentação de PVC.....	61
29	Vazão vs. pressão de recalque para os tempos de fechamento de 1,4 s (a) e (b) 1,6 s., sendo a tubulação de alimentação de PVC.....	62
30	Vazão vs. pressão de recalque para os tempos de fechamento de 0,6 s., sendo a tubulação de alimentação de aço galvanizado.....	63

31	Vazão vs. pressão de recalque para os tempos de fechamento de 0,8 s (a)., 1,0 s. (b), e (c) 1,2 s., sendo a tubulação de alimentação de aço galvanizado.....	64
32	Vazão vs. Pressão de recalque para os tempos de fechamento de 1,4 s (a).e (b) 1,6 s., sendo a tubulação de alimentação de aço galvanizado	65

LISTA DE QUADROS

Página

1	NR de transição sendo a tubulação de alimentação de PVC, para diferentes comprimentos e alturas de alimentação.	46
2	NR de transição sendo a tubulação de alimentação de aço galvanizado, para diferentes comprimentos e alturas de alimentação.	52
3	Valores de entrada do modelo sendo a tubulação de alimentação de PVC.	56
4	Valores de entrada do modelo sendo a tubulação de alimentação de aço galvanizado.	56
5	Valores gerados pelo modelo para a tubulação de alimentação de PVC.	57
6	Valores gerados pelo modelo para a tubulação de alimentação de aço.	58

MODELAGEM, OTIMIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM CARNEIRO HIDRÁULICO

Autor: RICARDO NICOLÁS ZÁRATE ROJAS

Orientador: Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL

RESUMO

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, com o objetivo de modelar, otimizar e avaliar um carneiro hidráulico. Para isso foi desenvolvido um modelo teórico, validado no laboratório através da construção de uma eletroválvula comandada eletronicamente por computador. Através da filmagem do jato de água e utilizando método das coordenadas determinou-se a velocidade do jato de água da tubulação de alimentação do carneiro, para três alturas de alimentação e três comprimentos diferentes. Posteriormente foi construído o carneiro hidráulico em PVC, sendo utilizada a eletroválvula como válvula de escape e, por meio de um microprocessador, obteve-se diferentes tempos para o fechamento da válvula, variando entre 0,2 s e 1,6 s. Foram testados dois materiais como tubulação de alimentação, PVC 25mm de diâmetro nominal e aço galvanizado 19,05 mm de diâmetro nominal para três comprimentos e alturas de alimentação. A máxima vazão de recalque obtida foi de 224 L/h, sendo a pressão de recalque de 54 kPa, sendo a tubulação de alimentação PVC, e a altura de alimentação de 2,23 m, para um tempo de pulso da eletroválvula de 0,2 s. O maior rendimento obtido foi 62 % sendo a tubulação de alimentação de PVC, para um tempo de pulso de 0,2 s com uma pressão de 74 kPa e vazão de recalque de 112 L/h.

MODELING, OPTIMIZATION And EVALUATION OF A HYDRAULIC RAM

Author: RICARDO NICOLÁS ZÁRATE ROJAS

Adviser: Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL

SUMMARY

This work was developed in the Hydraulics Laboratory of the Department of Rural Engineering at ESALQ/USP., with the goal of modeling, optimize and to evaluate a hydraulic ram. For that was developed a theoretical model, validated in the laboratory through the construction of an electronic valve commanded by a computer. Through the filming of water jet and using method of the coordinates tot determined the speed of water jet of the alimentation piping of the ram for three different heights and lengths. It afterwards was built the hydraulic ram in PVC, being used an electronic valve as pulse valve, and by means of the microprocessor Basic Step, was obtained different times to the shutdown of the valve, varying between 0,2 s and 1,6 s. Were tried two material as alimentation piping, PVC 25mm nominal diameter and galvanized steel 19,05 mm nominal diameter for three alimentation lengths. The flow maxim obtained was 224 L/h, being the pressure of emphasizes of 54 kPa, having as alimentation piping PVC, and the height of alimentation of 2,23 m for, for a time of .shutdown of electronic valve of 0,2 s. The biggest obtained revenue was 62%, being the alimentation piping of PVC, for a time of shutdown of 0,2 s with a pressure 74 kPa and a flow of 112 L/h.

1 INTRODUÇÃO

A problemática do abastecimento de água no setor rural não é nova e vem se acentuando principalmente pelo aumento do custo da energia elétrica e seu racionamento. Para a captação de água superficiais e subterrâneas, na maior parte dos casos, precisa-se de energia elétrica ou de combustível para o acionamento do conjunto motobomba. Quando utiliza-se energia elétrica adiciona-se, o custo da condução da mesma, desde a fonte até o lugar desejado, que na maioria dos casos, quando o recurso hídrico é superficial, encontra-se localizado nos pontos mais baixos da propriedade.

Em geral a força para a elevação da água provém principalmente de motores elétricos principalmente, ou também de animais, humanos, ou fontes renováveis (climáticas); no contexto particular das áreas rurais nos países pobres, a escolha é mais restrita. Em muitos destes países, no setor rural não há eletricidade, os motores apresentam problemas atribuídos ao combustível e à manutenção, animais podem ser inviáveis ou difíceis de aplicar na elevação e transporte de água. Por isso a elevação e transporte da água pelo homem ainda é comum, apesar do alto custo da energia humana (US\$ 2 a 20 por kW/hora) (Thomas, 1994).

Quando dispõe-se de uma fonte superficial de água e pretende-se utilizar uma parte dela de forma racional, econômica e sustentável, pode ser utilizado o carneiro hidráulico. O mesmo trabalha de dia e noite sem agredir o meio ambiente, utilizando a energia hidráulica, dispensando outro tipo de

energia suplementar. Também a roda de água pode ser uma opção para as condições citadas mas o preço do carneiro é mais baixo e os requerimento de manutenção são menores.

Segundo Denículi (1992), o carneiro hidráulico foi inventado pelos irmãos Montgolfier em 1796, sendo uma máquina simples e de grande utilidade, quando se deseja elevar pequenas vazões.

De acordo com Kitani & Willardson (1984), em um sítio de 24,3 ha com pastagem e usando o sistema de irrigação de aspersão sobre rodas com deslocamento lateral, foram suficientes quatro carneiros hidráulicos para o fornecimento da água. Os mesmos foram instalados em paralelo obtendo-se a pressão e o volume suficiente para o sistema de irrigação.

De acordo com Azevedo Netto & Alvarez (1988), o aparelho é instalado em nível inferior ao do manancial na cota mais baixa possível. A água que chega ao carneiro hidráulico inicialmente sai por uma válvula externa (escape) até o momento em que é atingida uma determinada velocidade elevada. Nesse instante, a válvula fecha-se, repentinamente, ocasionando uma sobrepressão que possibilita a elevação da água.

O carneiro hidráulico normalmente pode bombear até um máximo de $3,154 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ com uma elevação máxima de 122 m (Jennings, 1996).

Para Daker (1987), o rendimento do carneiro hidráulico depende principalmente da relação da altura de queda do reservatório de alimentação até o carneiro hidráulico, e altura de elevação do aparelho ao reservatório superior e da perfeição com que é fabricado o aparelho. O mesmo apresenta um rendimento hidráulico que varia entre 50 a 75%. Para Capetti (1930) e

Dornig (1958), o rendimento hidráulico do aríete pode atingir, em condições favoráveis, até 60%.

Conforme Rennie & Bunt (1990), são precisos novos trabalhos para auxiliar aos projetistas de carneiro hidráulico, modelando a teoria possível em forma computarizada pela manipulação das principais variáveis envolvidas no funcionamento do equipamento.

Procurando dar subsídios para a utilização e fabricação de carneiros hidráulicos, este trabalho teve por objetivo desenvolver a modelagem do funcionamento, a construção de um protótipo visando as avaliações para validação do modelo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O carneiro hidráulico é um artifício para bombear água, propellido somente pela energia potencial de alimentação. Sua construção é simples com somente duas partes móveis; é barato e livre de poluição (Young,1995).

No desenho original dos irmãos Montgolfier (Figura 1), apresentado por Cat (1998), o fluxo de água faz rolar a bola de ferro ao longo da tubulação e sobe a curva ate bloquear a saída da água, ocasionando um incremento da pressão da água detrás da bola, o qual empurra a água através da válvula de um só sentido. Logo a pressão desce e a bola de ferro volta atrás, para ponto de inicio do ciclo.

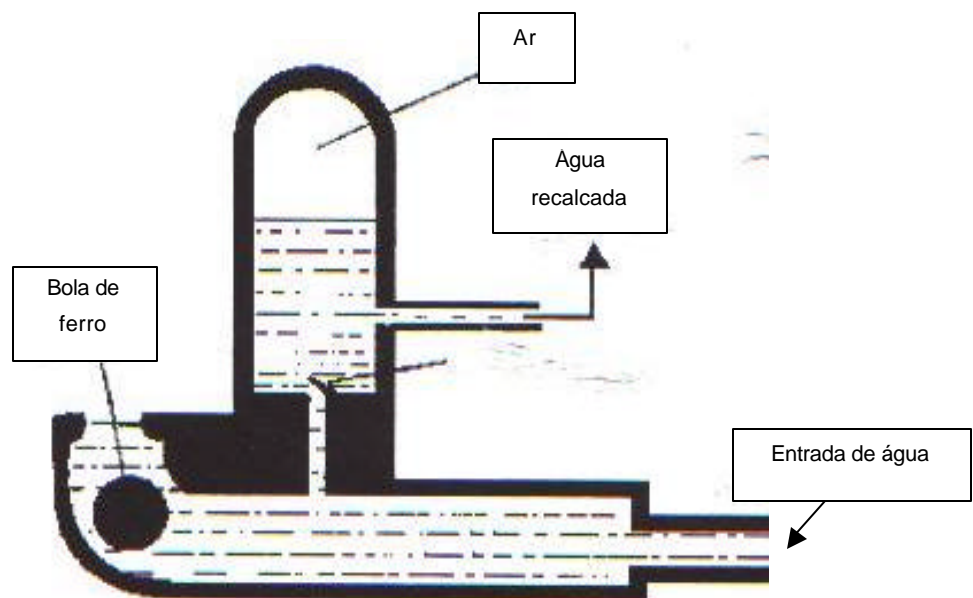


Figura 1 - Carneiro original dos irmãos Montgolfier.

O carneiro hidráulico, é ainda fabricado em mais de dez países. Eles foram substituídos por bombas motorizadas nos países ricos, enquanto que nos países em desenvolvimento seu uso está concentrado na China, Nepal e Colômbia (Thomas, 1994).

De acordo com Young (1995), um sistema de bombeamento por carneiro consiste em um tanque elevado de alimentação, a tubulação de alimentação, o carneiro com as válvulas de escape e recalque, a câmara de ar, e a tubulação de recalque. A função da câmara de ar é armazenar água na pressão de recalque entre golpes e absorver o choque do bombeamento.

Verspuy et al.(1993), apresenta o desenho esquemático da instalação do carneiro hidráulico (Figura 2).

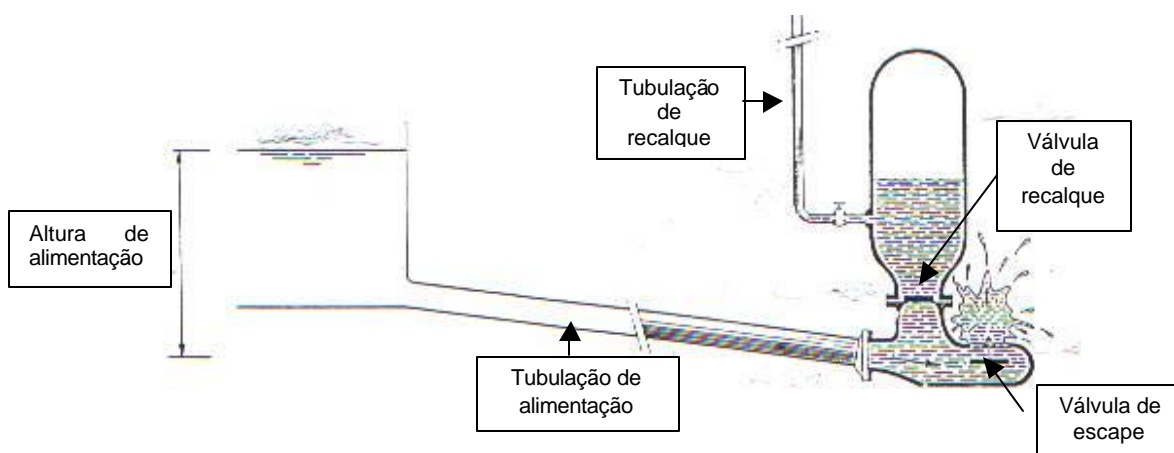


Figura 2- Instalação do carneiro hidráulico.

Conforme Denículi (1992), para que uma fração da água que desce pela tubulação de alimentação seja elevada a alturas maiores que o reservatório de alimentação, é necessário que esta fração aumente seu estado de energia. A energia adicional desta fração é cedida pela água que sai pela válvula de escape que diminui o seu estado de energia. Essa cessão de energia ocorre por transformações desta, durante o ciclo do carneiro hidráulico da

seguinte forma: energia potencial em energia cinética (quando a válvula de escape se abre), energia cinética em energia de pressão (quando a válvula de escape se fecha) e energia de pressão em energia potencial (quando o ar empurra a água e esta se eleva no tubo de recalque).

2.1 Princípios de funcionamento

De acordo com Azevedo Netto & Alvarez (1988), denomina-se golpe de aríete ao choque violento que se produz sobre as paredes de um conduto forçado quando o movimento do líquido é modificado bruscamente. É a sobrepressão que as canalizações recebem quando, por exemplo, se fecha um registro, interrompendo-se o escoamento.

Conforme Denículi (1992), a variação da velocidade introduz uma perturbação no escoamento chamada onda de pressão, que se propaga através do líquido a elevada velocidade denominada de celeridade (velocidade de propagação do som no fluido). Essa perturbação percorre a tubulação tanto num sentido como no outro até seu amortecimento total provocado pelo atrito do fluido com o tubo, pela compressibilidade do fluido e pela elasticidade dos tubos.

Segundo Dornig (1958), a sobrepressão devida ao fechamento brusco pode ser expressa em coluna de líquido e é igual a

$$h_1 = j \sqrt{2 \cdot h \cdot l \cdot \text{sen} \cdot \frac{a}{A}} \quad (1)$$

em que:

h_1 Sobrepessão devida ao golpe de aríete, m;

h Altura de alimentação, m;

a	Área da tubulação de alimentação, m ² ;
A	Área da tubulação de recalque, m ² ;
j	Resistência passiva da tubulação de alimentação, m;
s	Angulo de inclinação da tubulação de recalque e
l	Comprimento da tubulação de alimentação, m.

O funcionamento do carneiro hidráulico é contínuo e se inicia quando se abre a válvula de escape, fazendo com que a água desça pela tubulação de alimentação. O empuxo sobre a válvula de escape faz com que esta se feche, de modo que a massa líquida em movimento pelo tubo de alimentação, pare bruscamente, promovendo assim, a elevação da pressão no tubo de alimentação (golpe de aríete), fazendo com que a válvula de recalque se abra e a água penetre na campânula. Isto alivia a pressão no interior do tubo de alimentação e, associado, a onda de depressão (pressão negativa) que se segue faz com que a válvula de escapamento se abra, fechando o ciclo. A água, ao penetrar na campânula, comprime o ar contido nesta; por reação, o ar empurra a água e esta é elevada até o reservatório superior. Para que isto ocorra, é necessário que a pressão na campânula seja superior a altura de elevação e que o golpe de aríete seja superior à pressão na campânula (Denículi, 1992).

A propagação das ondas de pressão na tubulação de alimentação, aqui descritas dimensionalmente por Verspuy (1993), é governada pela equação da continuidade e momento, juntas conhecidas como as equações de golpe de aríete.

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{g}{c^2} \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{f}{2D} V[V] \quad (3)$$

em que:

V	Velocidade da água na tubulação de alimentação, m.s ⁻¹ ;
x	Distancia ao longo da tubulação de alimentação, m;
g	Aceleração devida à gravidade, m.s ⁻² ;
H	Pressão no inicio, m;
t	Tempo, s;
f	Fator de atrito de Darcy-Weisbach e
c	Velocidade da onda de pressão, m.s ⁻¹ .

De acordo com Denículi (1992), a celeridade de propagação da onda de pressão c, na água, através de tubos é dada por:

$$c = \frac{9900}{\sqrt{\left(48,3 + k \frac{D}{e}\right)}} \quad (4)$$

em que:

c	celeridade; m.s ⁻¹ ;
D	diâmetro interno do tubo; m;
e	espessura do tubo, m;
k	constante que depende da natureza do tubo:

k = 0,5 para aço;

k = 1,0 para ferro fundido;

k = 4,4 para cimento amianto;

k = 5,0 para concreto e chumbo;

$k = 18,0$ para plástico e

$k = 10,0$ para madeira.

2.2 Tubulação de alimentação

De acordo com Kitani & Willardson (1984), o material de que é feito a tubulação de alimentação também afeta a performance do carneiro hidráulico. O módulo de elasticidade do material da tubulação provoca alteração no aumento da pressão, causado pelo golpe de aríete, pelas mudanças na velocidade acústica da onda de pressão na tubulação de alimentação. Desde que os carneiros hidráulico são operados com sucessivas ondas de pressão ocasionadas pelo golpe de aríete, a espessura da parede da tubulação de alimentação deve ser suficiente para prevenir o rompimento e uma excessiva flexibilidade. O material comumente utilizado é o ferro.

Segundo Calvert¹ citado por Young (1995), a relação entre o comprimento da tubulação de alimentação (L) e o diâmetro (D) para um desempenho satisfatório deve estar compreendida entre $150 < L/D < 1000$. De fato, o limite menor na tubulação de alimentação não é dependente totalmente do tamanho do carneiro hidráulico, desde que L não deve ser menor que 5 m, para evitar a possibilidade de que a primeira onda de pressão retorne à válvula de escape antes de estar totalmente fechada.

De acordo com Azevedo Netto & Alvarez (1988), o comprimento L deve satisfazer as seguintes relações: $L \geq 1,0 H$ a $1,2 H$; $10 h > L > 5h$ e $8m < L < 75 m$. Em que L é o comprimento da tubulação de alimentação, H a diferença

¹ CALVERT, N.G. Drive pipe of a hydraulic ram. **The Engineer**, v.206, n° 5379, p.1001, 1958.

de nível entre o carneiro hidráulico e o reservatório de recalque e h é a altura de alimentação.

De acordo com Das (1989), em experimento com 5 inclinações da tubulação de alimentação ($4,90^\circ$, $6,02^\circ$, $7,03^\circ$, $7,75^\circ$ e $10,64^\circ$), o carneiro fornece a máxima descarga e eficiência com a tubulação de alimentação tendo uma inclinação de $7,25^\circ$. Em relação ao fator de amplificação (H/h), com o acréscimo do mesmo, a vazão de descarga diminui. Para baixos valores do fator de amplificação, a eficiência cresce com o incremento do fator citado, sendo máxima com o valor de 3,96.

Conforme Daker (1987) e Denículi (1992), a altura de queda deve estar compreendida entre 1 e 9 m. Um $h < 1$ m, ocasiona baixo rendimento e $h > 9$ m ocorre um desgaste excessivo da válvula de escape. O comprimento do tubo de alimentação deve variar entre 8 a 15 m e deve ser o mais reto possível.

Com relação à tubulação de alimentação, PVC pode ser utilizado se a carga não exceder 25 m e se a mesma é seis vezes menor que a altura de alimentação. Caso contrário sugere-se utilizar tubulação de aço galvanizado (Aqua Environment Co, 1997).

A tubulação de alimentação deve ser de um material não flexível para sua máxima eficiência e ter no mínimo um diâmetro maior que a tubulação de recalque. Usualmente é utilizado aço galvanizado apesar de que outros materiais revestidos em concreto também podem ser empregados. Dessa maneira pode-se reduzir a perda de pressão, devido ao atrito. O comprimento da tubulação de alimentação dividido pelo diâmetro deve estar compreendido dentro da faixa de 150 – 1000. Para uma tubulação de 25 mm o comprimento mínimo é de 4 m e máximo de 25 m (Lifewater, 1998).

Os parâmetros tradicionais de desenho como comprimento da tubulação de alimentação e pressão de alimentação (L/h), e a tubulação de alimentação com o diâmetro (L/D) tem limitada relevância para a performance do carneiro hidráulico (Young,1996).

2.3 Modelagem

As quatro principais variáveis dependentes que afetam a performance de um carneiro hidráulico são: pressão de alimentação, pressão de recalque, comprimento da tubulação de alimentação e assentamento da válvula de escape.

Young (1996), considera que as tentativas para uma análise teórica completa do carneiro hidráulico falham principalmente pelos efeitos indeterminados em perdas devido à geometria da válvula de escape e pela magnitude da velocidade acústica.

Rennie & Bunt (1990), em trabalho de modelagem de um carneiro hidráulico, afirmam que foi preferível começar analisando o período de recalque para o carneiro com uma válvula de escape com o mecanismo aperfeiçoado. Os resultados matemáticos obtidos usando os princípios de fluidos compreensíveis foram descritos como difíceis de manejar e foram simplificados a uma forma mais utilizável. A escolha dos princípios para fluidos compressíveis foi comprovada como eficiente, por estar de acordo com os valores estimados e os valores experimentais de quantidades recalcadas e pelas velocidades e pressões obtidas. De qualquer maneira os princípios de fluidos incompreensíveis foram utilizados no tratamento do período de aceleração na crença de que erros quantitativos incorridos poderiam ser

pequenos. Porém, foi encontrado experimentalmente que grandes pressões relativas, e flutuações de velocidade persistiram neste período.

Verspuy & Tijsseling (1993), simularam a operação hidráulica do aríete utilizando a teoria padrão de golpe de aríete. Foi modelado como um aparelho com três posições: (1) a válvula de escape é aberta e a válvula de recalque está fechada; na posição (2) a válvula de recalque é aberta e válvula de escape fechada; e na posição (3) ambas válvulas estão fechadas. Começando com uma situação inicial na qual ambas válvulas estão fechadas (posição 3), e o líquido em descanso, o carneiro hidráulico é colocado na posição (1). A válvula de escape é aberta agora e as ondas de pressão estão viajando acima e abaixo, na tubulação de alimentação, incrementando a velocidade do líquido. Quando a velocidade do fluido atinge o valor crítico, V_c , o aríete hidráulico passa instantaneamente da posição (1) à posição (2). Nesta posição, uma onda de pressão severa conduz o líquido a repousar, em um tempo relativamente curto. Uma vez que a velocidade do fluido torna-se menor que zero (refluxo), o aríete hidráulico passa à posição (1) novamente, e todo o ciclo repete-se.

Para Young (1995), o ciclo de operação de um carneiro hidráulico automatizado pode ser idealizado pela consideração de três fases distintas: (a) aceleração, (b) bombeamento e (c) recuo. A aceleração da água na tubulação de alimentação acontece quando a válvula de escape é aberta e a válvula de recalque é fechada. Em uma certa velocidade crítica, a válvula de escape é fechada, dado que as forças hidrodinâmicas superam as outras forças (como peso morto estático e/ou a resistência da mola) tendendo manter a válvula aberta. O bombeamento agora toma lugar como impactos de onda induzido pelo golpe de aríete circulando para cima e para baixo da tubulação de alimentação à velocidade do som, a abertura da válvula de recalque, é em reposta a cada pulso de pressão. O recuo, o retrocesso do fluxo na tubulação

de alimentação, acontece no final do estado de bombeamento após o fechamento da válvula de recalque. A sucção resultante do recuo ocasiona a abertura da válvula de escape e o ciclo está pronto para começar novamente.

2.3.1 Velocidade na tubulação de alimentação

Young (1996), trabalhando na otimização do sistema de operação fez uma análise bem simplificada, onde somente as fases de aceleração e bombeamento precisam ser consideradas. Adicionalmente uma aproximação linear é adotada para descrever a velocidade na tubulação de alimentação, durante a aceleração.

De acordo com Azevedo Netto & Alvarez (1988), no método das coordenadas para determinar a velocidade do jato e a vazão, a velocidade teórica (V_t) de um jato é descrita a seguir:

O movimento da veia líquida pode ser descomposto segundo os eixos horizontal (x) e vertical (y). O primeiro movimento é uniforme e o segundo acelerado devido à ação da gravidade (g).

As equações desses movimentos serão:

$$x = V_t t \quad (5)$$

e

$$y = \frac{1}{2} g t^2 \quad (6)$$

em que t é o tempo.

Tomando-se o valor de t da Eq. (6) e substituindo-se na Eq. (7),

$$y = \frac{1}{2} g \frac{x^2}{V_r^2} \quad (7)$$

Verifica-se portanto, que a trajetória é uma parábola do 2º grau:

$$Vt = 2,21 \frac{x}{\sqrt{y}} \quad (8)$$

Este é um dos processos mais simples para medida da velocidade, no caso de descarga livre.

Segundo Young (1996) para um carneiro hidráulico em particular, a velocidade crítica u_c é determinada pelo impulso (distância de abertura) da válvula de escape e seu peso. A partir de testes em um carneiro Wilcox com uma válvula de massa de 0,83 kg, foi encontrado que $u_c = 0,135 s_v$. ($R^2 = 0,995$), onde s_v é o curso da válvula de escapamento em mm.

Uma aproximação simplificada para a análise de um carneiro automático pode ser encontrada tendo em consideração:

(a) o diagrama do ciclo da velocidade para condições de recuo zero;

(b) uma aproximação linear para a velocidade na tubulação de alimentação durante a fase de aceleração. A velocidade durante a fase de aceleração é dada por $u(t) = u_c (t/t_a)$, onde u_c é a velocidade crítica requerida para fechar a válvula de impulso. A expressão correta para o tempo de

aceleração t_a , se o fluido é tratado como uma coluna rígida sob uma aceleração inicial gH/L e sujeito a uma resistência por atrito é:

$$t_a = \left(\frac{L}{u_o k} \right) \ln \left(\frac{1+a}{1-a} \right) \text{ para } a < 1 \quad (9)$$

Uma aproximação ($R^2 = 0,96$) para t_a na faixa de $0 < a < 0,85$ é

$$t_a = \frac{2,5aL}{u_o k} = \left(\frac{1,25u_c}{g} \right) \left(\frac{L}{H} \right) \quad (10)$$

desde que

$$u_o^2 k = 2gH. \quad (11)$$

em que:

t_a - tempo de aceleração, s;

a - taxa de velocidade = u_c / u_o , adimensional;

L - comprimento da tubulação de alimentação, m;

u_o - velocidade no estado de estabilização, $m \cdot s^{-1}$;

u_c - velocidade para fechar a válvula de impulso, m/s;

H - altura de alimentação, m;

k - coeficiente de perda do sistema;

g - aceleração devida à gravidade = $9,81 \text{ m/s}^2$.

As condições de abertura e fechamento dependem das características das válvulas (Young, 1996).

2.3.2 Relação de pressões e vazões

As principais limitações estão em relação à limitada faixa de relações de pressões (pressão de recalque dividida pela pressão de alimentação) de 5 a 30, onde o carneiro é eficiente. Por outro lado, nem a pressão de alimentação nem a pressão de recalque deveria exceder as taxas particulares do carneiro (freqüentemente 20 e 100 m respectivamente). Porém sendo muito menor para carneiros de plásticos (Thomas, 1994).

De acordo com Capetti (1930), a relação de transformação H/h , cresce ao aumentar a velocidade média com o líquido flui ao longo da tubulação de alimentação (onde H é a altura de recalque e h a altura de alimentação). Mas por outro lado, uma vez que cada kg de líquido que foge com a velocidade V , dissipa a energia $V^2/2g$, assim crescendo V diminui o rendimento do aparelho, portanto o rendimento do aríete hidráulico diminui ao crescer a relação de transformação.

Conforme Denículi (1992), o rendimento do carneiro hidráulico depende da citada relação, da perfeição com que o aparelho é fabricado e do número de golpes por minuto que a válvula de escape produz. Maior número de golpes implica em maior rendimento, porém a vazão elevada é menor. Para menor número de golpes o rendimento é menor e a vazão elevada maior.

Conforme Roech (1968), a vazão que o aríete pode fornecer está entre 0,0001 a 0,05 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e em muitos casos pode substituir com vantagens outros sistemas de recalque.

2.4 Rendimento

Para carneiros hidráulico comerciais a eficiência esperada será no máximo de 60 %. A eficiência se converte em um importante fator principalmente quando o carneiro hidráulico é instalado em lugares onde a água é escassa. O carneiro pode ser operado em um ponto onde a eficiência é menor porém a vazão de entrega maior ou uma pressão de recalque alta (Kitani & Willardson, 1984).

Conforme Young (1996), sob certas circunstâncias, ditadas pela amplitude da altura de queda, a água na tubulação de alimentação pode recuar, ou fluir em direção ao tanque de suprimento. Este efeito pode acontecer no final da fase de bombeamento e representa perda de energia no sistema. O desempenho ótimo, por essa razão, provavelmente ocorre com um valor de zero recuo, ou de mínimo recuo.

De acordo com Abate (2000), na avaliação do desempenho de um carneiro hidráulico para dois tipos de materiais diferentes na tubulação de alimentação, PVC e aço galvanizado e sob três alturas de queda (2,1 m, 3,8 m, e 4,7 m), verificou que pode-se conseguir o rendimento máximo com até 4,2 m de desnível; além desse valor, a tubulação de aço galvanizado é mais eficiente e há influência do número de batidas no desempenho de carneiro hidráulico.

Conforme Young (1995), uma forma tradicional de medir o desempenho é dado pela eficiência Rankine:

$$\eta_R = q (h - H) / (Q_w H), \quad (12)$$

em que:

- η_R eficiência Rankine, decimal;
 q vazão de descarga, $m^3 s^{-1}$;
 h pressão de recalque, m;
 H pressão de alimentação, m;
 Q_w vazão perdida pela válvula de escape, $m^3 s^{-1}$.

No carneiro hidráulico testado, este autor, encontrou um incremento na eficiência com o decréscimo na abertura da válvula de impulso. Este efeito é devido ao correspondente decréscimo na quantidade de água perdida, para valores dados de altura de alimentação e de recalque. A eficiência Rankine adquire relevância se a capacidade da fonte de água é limitada, mas na maioria das situações de desenho, um aríete não será recomendado se a fonte não satisfaz os requerimentos mínimos.

Para o cálculo da eficiência do carneiro hidráulico, Mead² citado por Kitani & Willardson (1984) apresenta a fórmula, a de D'Aubisson onde

$$Eff = \frac{q_d h_d}{(Q_w + q_d) H_s} = \frac{q_d h_d}{Q_s H_s} \quad (13)$$

Sendo que :

Eff = eficiência do aríete hidráulico, decimal;

q_d = vazão recalcada, $m^3.s^{-1}$;

h_d = pressão obtida, m;

Q_w = vazão inaproveitada, $m^3.s^{-1}$;

H_s = pressão de alimentação, m;

Q_s = vazão de descarga ($=Q_w + q_d$), $m^3.s^{-1}$.

² MEAD, D.W. 1933 Hydraulic Machinery. McGraw-Hill Book Co.

2.5 Aquisição de dados

De acordo com Adamowski & Furukawa (2001), a mecatrônica é entendida como a aplicação combinada de conhecimentos de áreas tradicionais como a Engenharia Mecânica, Eletrônica e Computação de forma integrada, conforme à Figura 3.

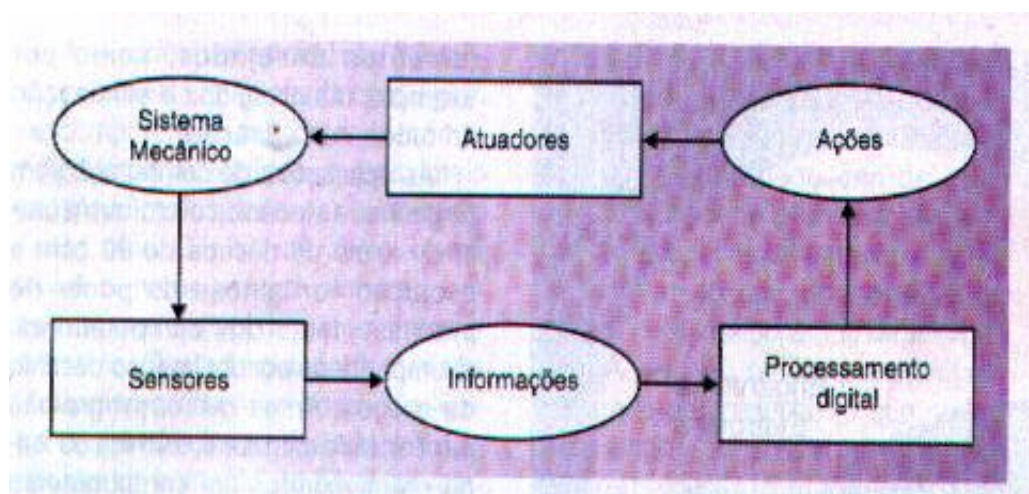


Figura 3 – Esquema para a obtenção de dados, utilizando a mecatrônica.

Conforme Dally et al.(1993), referindo-se às análises do movimento por meio de uma câmara de vídeo, cita que o desenvolvimento das mesmas obtendo-se alta performance, acoplada com gravadores de vídeo e computadores digitais, tem produzido uma nova geração de sistema de medição. Os principais elementos destes sistemas são mostrados na Figura 4 e consiste em uma câmara de vídeo, um gravador de vídeo, um monitor, um processador de vídeo, um computador com disco para armazenamento, uma estação de trabalho para gráficos e uma unidade de ploter ou impressora.

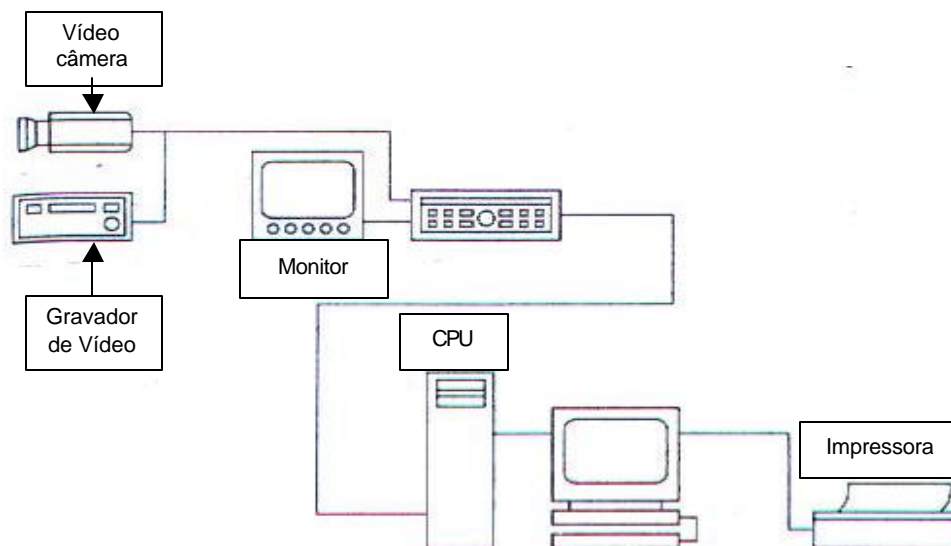


Figura 4 - Vídeo câmara, gravador de vídeo, monitor, processador de vídeo, computador, estação de trabalho para gráficos e unidade de impressão.

A análise do movimento consiste de um número básico de passos. O primeiro envolve a gravação das imagens de interesse. Numerosas câmaras são disponíveis que suportam uma ampla faixa de condições de iluminação, campos de visão e quadros de imagens com taxas variando desde 1 até 2.000 quadros por segundos. Os dados representam a imagem guardada em um videocassete pelo gravador de vídeo. Estes dados estão disponíveis para edição, observação no monitor, ou processamento do vídeo. O segundo passo é reduzir a grande quantidade de dados disponíveis em um dado quadro para os requerimentos da análise do movimento. O terceiro passo consiste em analisar a posição dos pontos, linhas e o que for de interesse. A tecnologia de vídeo está se desenvolvendo rapidamente e é aplicável a uma ampla variedade de medições na engenharia e outros campos.

De acordo com Braga (2001), os computadores pessoais do tipo PC (IBM e compatíveis) se comunicam com o mundo exterior por meio de “portas”. Exatamente como o nome indica, por elas podem entrar e sair sinais que o computador utiliza tanto para “sentir” o que passa fora dele como para

“comandar” dispositivos que não estejam no seu interior. As portas encontradas no computador são: as Seriais, as Paralelas e as USB (Universal Serial Bus). As portas paralelas, podem transmitir um byte inteiro, levando cada bit por um conduto separado. Os bits “correm” paralelos por um cabo de muitos condutores. A vantagem principal deste tipo de transmissão é que podemos ter todos os bits de um byte, ao mesmo tempo na saída do dispositivo (ou na entrada), o que significa uma velocidade maior de transmissão de dados ou ainda o controle simultâneo de oito linhas ou dispositivos. Por meio de comandos apropriados podemos colocar em qualquer um dos 25 pinos 0 Volts ou 5 Volts.

A interface é um circuito responsável por conectar o computador ao ambiente externo. É ela quem interliga o computador a qualquer dispositivo (placa ou máquina), de tal forma que possamos utilizar o computador para controlar ou interpretar dados do meio exterior (Oliveira, 2001).

O circuito eletrônico pode ser manufaturado em placas de circuito impresso. É constituído basicamente de acoplador ótico (TIL 111 ou similar), este vai ligado à base de transistores (BC 548) que operam como chaves, estabelecendo os contatos com os relés, que por sua vez acionam dispositivos como bombas e válvulas. (Gervácio et al., 2001)

3 MATERIAL E MÉTODOS

O protótipo do carneiro hidráulico foi desenvolvido e avaliado no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, localizado no Município de Piracicaba, Estado de São Paulo.

Para a elaboração do trabalho primeiramente foi desenvolvido o modelo teórico em planilha eletrônica com o propósito de prever a velocidade da água na tubulação de alimentação. A simulação foi feita através de uma eletroválvula, que possibilitou simular a velocidade da água para diferentes tempos de pulsos da mesma. Com os dados obtidos foi validado o modelo.

Posteriormente foi construído o protótipo de carneiro hidráulico, o qual foi calibrado e finalmente avaliado, o fluxograma das atividades observa-se na Figura 5.

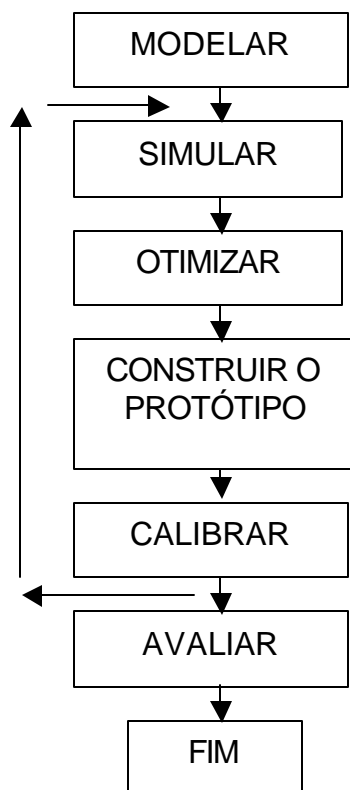


Figura 5 - Fluxograma de atividades.

3.1 Material

3.1.1 Carneiro hidráulico

O protótipo foi desenvolvido e construído levando em consideração as recomendações de Barreto (2000) & Clemson University (2001).

Utilizou-se uma tubulação de PVC de 110 mm, com um comprimento de 60 cm como campana (câmara de ar), onde ocorre a interface ar-água. Na parte superior colou-se uma capa soldável de 110 mm, na parte inferior utilizou-se um adaptador soldável rosca de 110 mm X 101,6 mm, sendo a base a capa rosca de 101,6 mm. A mesma foi perfurada no centro de maneira

a poder instalar uma união dupla que permiti-se a vedação e sua vez a instalação no interior do aríete de uma válvula de retenção vertical de 19,05 mm (válvula de recalque) e por outro lado a união com um te de 19,05 mm de galvanizado.

O te unia-se com a eletroválvula a qual fazia o papel de válvula de escape, por meio de um niple de 19,05 mm e do outro lado com a tubulação de alimentação por meio de outro niple e uma união dupla de 19,05 mm. Com relação à válvula de escape, a mesma consistiu de uma eletroválvula.

Também foi feito uma perfuração de 20 mm a uma altura de 15 cm da base, em que foi colada um tubo de PVC de 20 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento para o recalque, onde foi instalado o manômetro e uma válvula tipo agulha para as regulagem das pressões de recalque.

O desenho esquemático do protótipo construído pode ser observado na Figura 6.

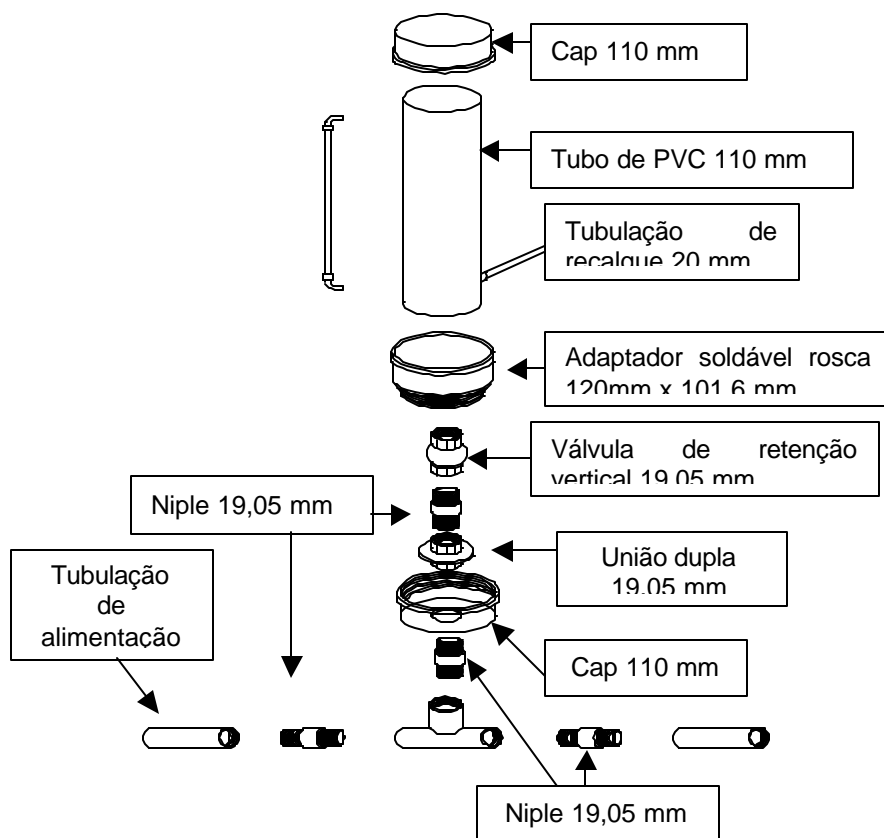


Figura 6 - Protótipo de Carneiro Hidráulico

3.1.2 Válvula de escape

Para construção da mesma utilizou-se um registro tipo gaveta de 20 mm de diâmetro nominal, em bronze. A mesma foi modificada no comando de fechamento tirando-se a rosca, permitindo o percurso vertical sem obstruções. Para o comando utilizou-se um sistema de alavancas de maneira a aumentar o percurso, pois a válvula solenóide utilizada foi o avanço de um motor de partida de carro, cujo percurso era de 0,9 cm obtendo-se uma amplificação para 2,1 cm o que permitiu o fechamento e abertura total da válvula. A Figura 7 apresenta a eletroválvula construída a partir de automático de partida de carro.

Para o comando da válvula foi utilizada a porta paralela de um microcomputador por onde eram enviados os pulsos para o fechamento e abertura do solenóide através de uma interfase (composto de um circuito eletrônico, de modo a enviar o sinal para o acionamento da eletroválvula pelo rele) comandado por um programa feito em Delphi 3.0.

Na Figura 8, observa-se a interfase para o comando da eletroválvula.

Utilizou-se uma fonte de 9 volts para o relé e duas baterias associadas em série (24 V) para o acionamento da eletroválvula. No início o programa permitiu a abertura e fechamento da válvula através de botões que aparecem na tela do computador, posteriormente o fechamento foi executado em intervalos pré-estabelecidos, sendo estes intervalos definidos no software de comando desenvolvido.



Figura 7 - Eletroválvula construída a partir de automático de partida de carro.

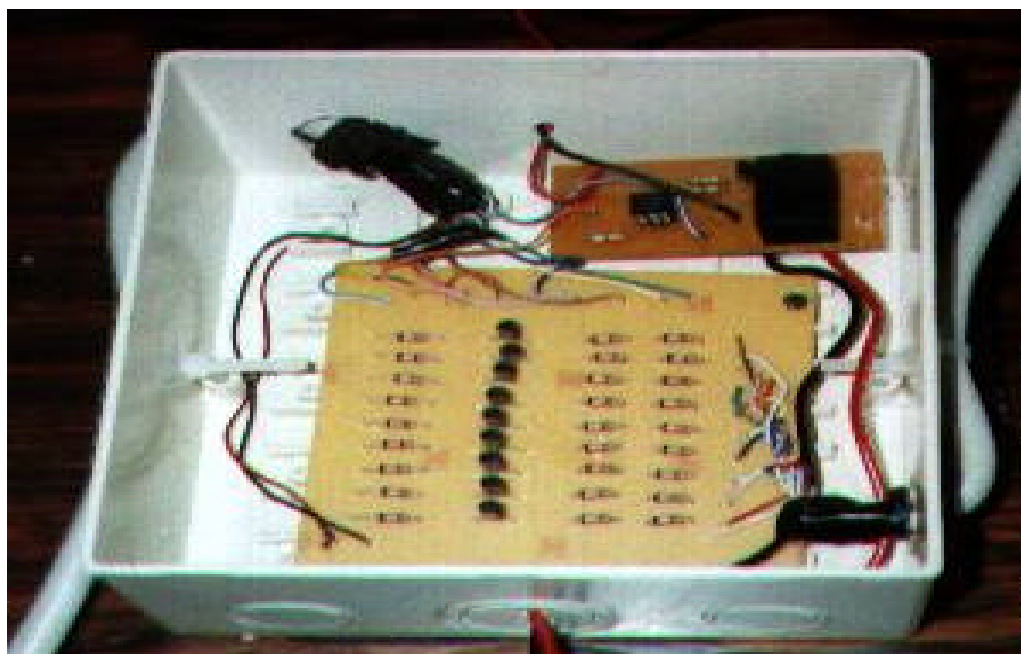


Figura 8 - Interface para o comando da eletroválvula

3.1.3 Medidor de velocidade da água

Utilizou-se o método das coordenadas onde os parâmetros foram obtidos com o auxílio de uma máquina filmadora autofocus com uma lente de 46 mm e de formato digital em 8 mm, sendo a velocidade da fita 28,7 mm/s. A filmadora foi apoiada em um tripé.

Também instalou-se duas tábuas de madeira paralelas, cortadas por fios cada 5 cm, intercalados com cores vermelho e preto, onde era observada a distância percorrida pela água. Foi utilizado um cronômetro com um “led” de lado para indicar a abertura da válvula, os tempos foram determinados com precisão de centésimo de segundo. Na Figura 9 observa-se a montagem dos equipamentos para a medição da velocidade no Laboratório de Hidráulica.

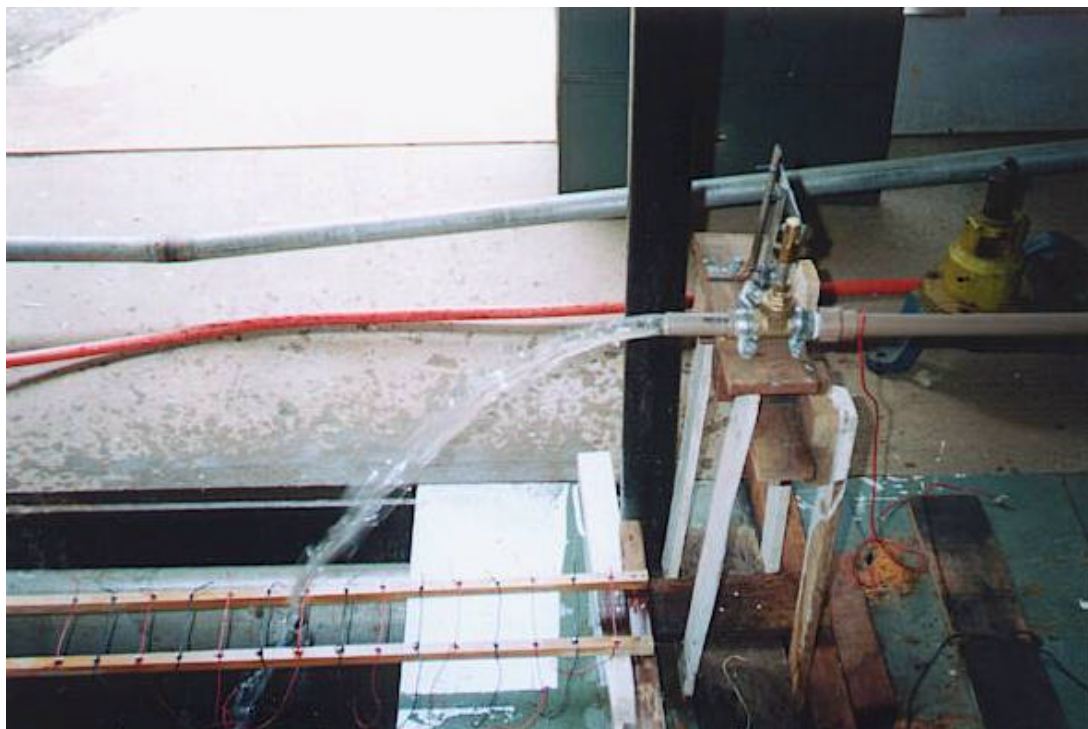


Figura 9 – Montagem dos equipamentos para a medição da velocidade

3.2 Métodos

3.2.1 Modelo teórico

Na primeira etapa, foi desenvolvido o modelo teórico para determinar a velocidade crítica para o fechamento da válvula de escape. Para isso considerou-se como dados de entrada: massa específica da água: (ρ), a altura de alimentação (H), aceleração devida à gravidade (g), comprimento da tubulação de alimentação (L), diferença de nível (z), diâmetro interno da tubulação de alimentação (D), o incremento de tempo (t) e viscosidade cinemática (ν). Calculouse a área da tubulação de alimentação (A), o número de Reynolds limite (NR_{limite}), o seno do ângulo de inclinação da tubulação de alimentação (\sin). Para o cálculo da perda de carga H_f , utilizou-se a Formula Universal, por ser considerada bastante precisa para o cálculo de perda de

carga para os diâmetros adotados e para todos os regimes de fluxo, ela é expressa da seguinte forma:

$$H_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (14)$$

sendo,

- H_f perda de carga no comprimento “L” (m);
- f coeficiente de atrito;
- L comprimento do trecho (m);
- D diâmetro interno da tubulação (m);
- V velocidade (m.s⁻¹) e
- g aceleração da gravidade (m.s⁻²).

O cálculo do número de Reynolds foi feito a partir da seguinte expressão,

$$NR = \frac{V \cdot D}{\mathbf{u}} \quad (15)$$

sendo,

- NR número de Reynolds;
- u** viscosidade cinemática da água (m².s⁻¹), adotando 10⁻⁶.

A partir do número de Reynolds, calcula-se o coeficiente de atrito

Para o regime turbulento a equação de Blasius é:

$$f = 0,316 \cdot NR^{-0,25} \quad (16)$$

Substituindo a equação (15) na (16) temos que:

$$f = 0,316 \left(\frac{V \cdot D}{\mathbf{u}} \right)^{-0,25} \quad (17)$$

$$f = 0,316 \cdot \frac{V^{-0,25} \cdot D^{-0,25}}{\mathbf{u}^{-0,25}} \quad (18)$$

$$f = 0,316 \cdot \frac{\mathbf{u}^{0,25}}{D^{0,25} \cdot V^{0,25}} \quad (19)$$

Substituindo a equação (19) na (14) temos que:

$$H_f = \frac{0,316 \cdot \mathbf{u}^{0,25}}{D^{0,25} \cdot V^{0,25}} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (20)$$

$$H_f = \frac{0,316 \cdot \mathbf{u}^{0,25}}{2g} \cdot \frac{L}{D^{1,25}} \cdot V^{1,75} \quad (21)$$

Logo a expressão final utilizada para o cálculo da perda de carga para o movimento turbulento é:

$$H_f = K_1 \cdot V^{1,75} \quad (22)$$

em que:

$$K_1 = \frac{0,316 \cdot \mathbf{u}^{0,25} \cdot L}{2g \cdot D^{1,25}} \quad (23)$$

No regime laminar, o coeficiente de atrito é inversamente proporcional ao “NR”, e foi calculado pela equação de Hagen-Poiseuille:

$$f = \frac{64}{NR} \quad (24)$$

Substituindo a equação (15) na (24) temos que:

$$f = \frac{64}{\frac{V \cdot D}{\mathbf{u}}} \quad (25)$$

logo,

$$f = \frac{64 \cdot \mathbf{u}}{V \cdot D} \quad (26)$$

Substituindo a equação (26) na (14) temos:

$$H_f = \frac{64 \cdot \mathbf{u}}{V \cdot D} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (27)$$

$$H_f = \frac{64 \cdot \mathbf{u}}{2g} \cdot L \cdot \frac{\mathbf{g}}{D^2} \quad (28)$$

Logo a expressão final utilizada para o cálculo da perda de carga para o movimento laminar foi:

$$H_f = K_2 \cdot V \quad (29)$$

em que:

$$K_2 = \frac{64 \rho L}{2g \cdot D^2} \quad (30)$$

Também foi calculada a massa da água na tubulação de alimentação (m). Posteriormente foi estimada a Força Resultante (FR), sendo igual à soma da força de pressão (f1) e força peso (f2), menos a força resistiva (f3), sendo assim:

$$FR = \text{Pressão} + \text{Peso} - \text{Força Resistiva} \quad (31)$$

$$FR = \rho \cdot g \left(h - \frac{V^2}{2g} \right) \cdot a + \rho \cdot g \cdot L \cdot a \cdot \text{sen} \alpha - \rho \cdot g \cdot J \cdot L \cdot a \quad (32)$$

Sendo

- ρ massa específica da água, kg m⁻³;
- h altura de água no reservatório, m;
- V velocidade na tubulação de alimentação, m.s⁻¹;
- g aceleração devida à gravidade, m.s⁻²;
- a área da tubulação de alimentação, m²;
- J perda de carga unitária, m.m⁻¹ e
- L comprimento da tubulação de alimentação, m.

A Figura 10 apresenta o fluxograma do modelo teórico desenvolvido para determinar a velocidade crítica para o fechamento da válvula de escape.

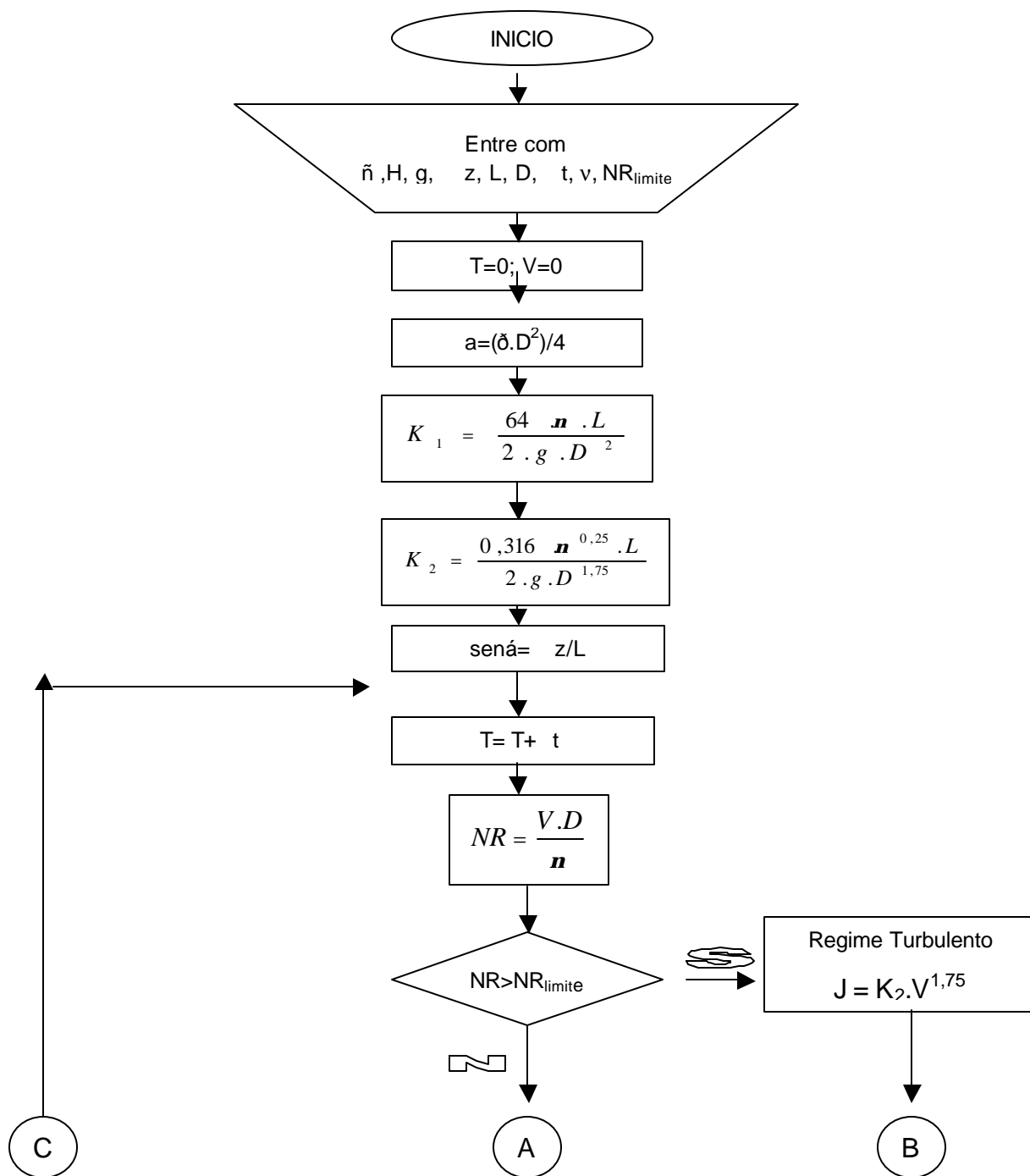


Figura 10a – Fluxograma do modelo teórico.

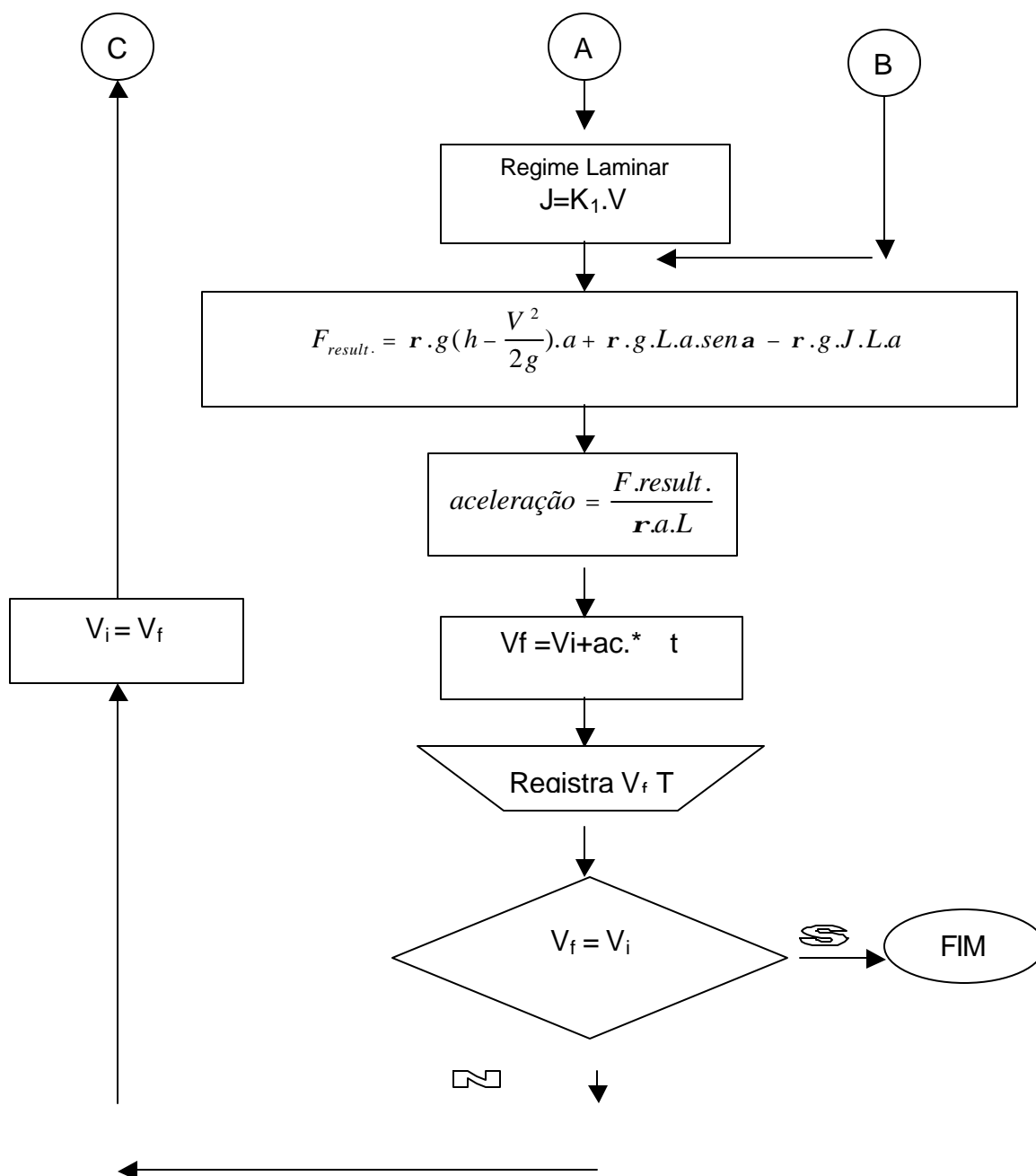


Figura 10b – Fluxograma do modelo teórico.

3.2.2 Validação do modelo

A segunda etapa consistiu na validação do modelo em laboratório. Para isso foi necessário a realização de ensaios no Laboratório da Hidráulica da ESALQ-USP. Uma válvula de escape comandada eletronicamente foi construída com o propósito de determinar a variação de velocidade do jato de água no tempo.

Foi montada a vídeo câmara sobre um tripé, instalou-se duas tábuas de madeira paralelas possuindo marcadores a cada 5 cm, posicionadas estas na direção, do jato de água (Figura 7). Um cronômetro e um led presos a um suporte foram filmados simultaneamente com o jato de água.

Um software foi desenvolvido onde instruíu um computador através da porta paralela para enviar um sinal para a abertura da eletroválvula. Previamente já era ligada a filmadora e acionado o cronômetro. O led era desligado quando a válvula de escape era aberta, o que permitia obter o tempo inicial da saída do jato pela válvula. Por aproximadamente 4 s. era filmado o jato de água.

Posteriormente o filme era editado passando-se para fita tipo VHS e observado posteriormente no vídeo quadro a quadro. De cada quadro observado obteve-se o tempo no cronômetro e a posição do jato com relação aos marcadores, que forneceram parâmetros para o cálculo da velocidade da água pelo método das coordenadas. O tempo para cada observação era obtido pela diferença entre o tempo inicial, e os diferentes tempos de avanço e retrocesso da água. A eletroválvula foi instalada em um suporte de madeira a uma altura de 0,47 m.

Os comprimentos testados com a tubulação de alimentação de PVC de 25 mm de diâmetro nominal foram: 5,95 m, 11,81 m e 16,9 m para as alturas de alimentação de 0,55 m, 1,52 m e 2,34 m. Para a tubulação de alimentação de aço galvanizado de 19,05 mm de diâmetro nominal testaram-se os comprimentos de 6 m, 12 m e 18 m, para as alturas de alimentação de 0,55 m, 1,46 m e 2,28 m.

3.2.3 Avaliação do protótipo de carneiro hidráulico

Na terceira etapa foi avaliado o carneiro hidráulico em laboratório. Foi utilizada a eletroválvula desenvolvida como válvula de escape, a qual foi acoplada ao microprocessador para sua abertura e fechamento.

Para o funcionamento da eletroválvula foram ligadas duas baterias de 12 V em serie, as quais eram conectadas a um carregador de baterias de forma tal que possa ser acionada a eletroválvula e carregadas simultaneamente as baterias, de maneira a obter o maior tempo de funcionamento da eletroválvula.

Para realizar a interfase entre o microprocessador e a eletroválvula foi utilizado um circuito eletrônico semelhante ao desenvolvido por Gervásio et al. (2001), com o adição de um relé a mais que permitia sua ligação em 24 V.

Para a avaliação do carneiro hidráulico foi instalada uma caixa de água de alimentação a uma altura de 2 m, alimentada com água da rede do Laboratório. Utilizou-se dois tipos de tubulações de alimentação PVC de 25mm de diâmetro e aço galvanizado de 19,05 mm de diâmetro, ambas com

comprimentos de 11,81 e 12 m, respectivamente. A Figura 11 apresenta o esquema da bancada de prova.

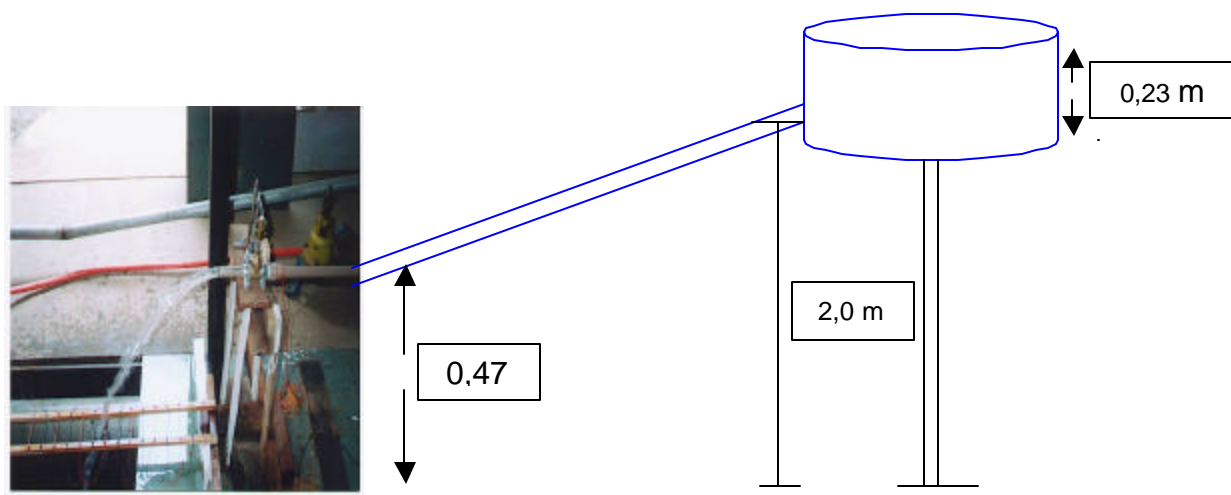


Figura 11 – Esquema da bancada de prova.

Foram testados diferentes intervalos de pulsos da eletroválvula acoplada ao carneiro hidráulico sendo: 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 ; 1,0 ; 1,2 ; 1,4 e 1,6 s. Cada pulso correspondia a um fechamento e abertura, a velocidade foi rápida o bastante, para ser negligenciada quanto comparado com os intervalos entre pulsos. Na figura 12 é apresentado o protótipo de carneiro hidráulico com a eletroválvula acoplada e seu principais componentes.

Para a medição da vazões de recalque e de alimentação foi utilizado o método da pesagem da água por meio de baldes. Para a vazão de alimentação utilizou-se um balde de 10 L e para a vazão de recalque de 2 L, medindo-se o tempo por meio de um cronômetro. Os baldes eram logo pesados em balança digital. A medição da pressão de recalque foi feita através de um manômetro previamente calibrado tipo bordon

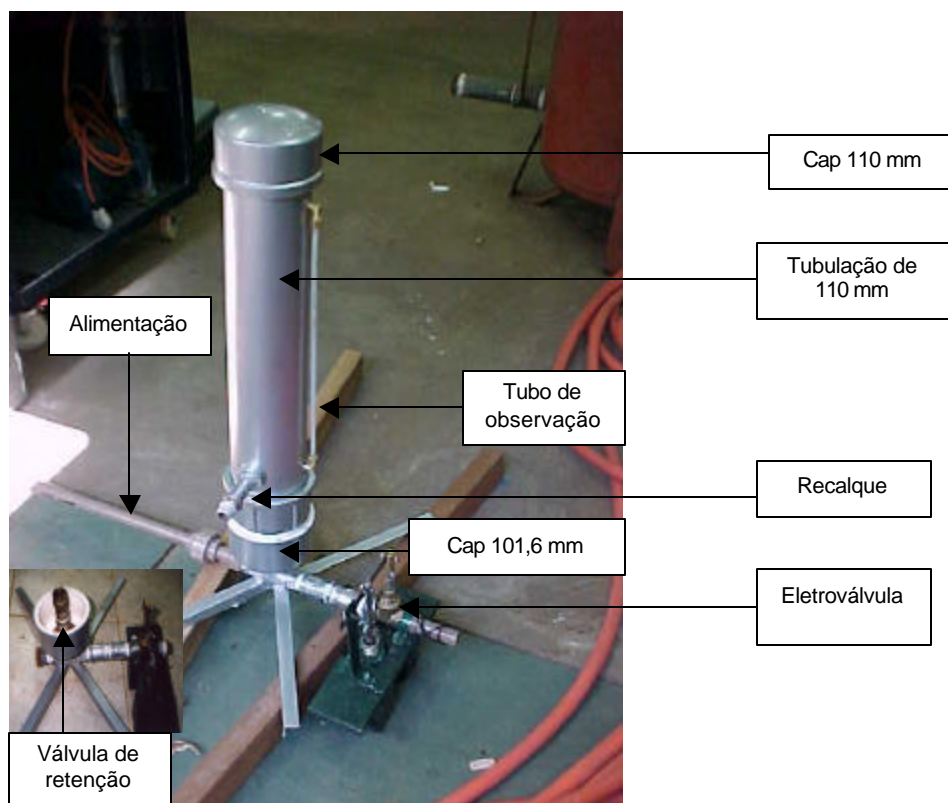


Figura 12 – Principais componentes do carneiro hidráulico.

Foram feitas medidas para diferentes intervalos de pulsos da válvula de escape comandado pelo microprocessador, sob uma altura de alimentação constante. Os parâmetros considerados foram:

- a) Vazão de alimentação;
- b) Vazão de recalque;
- c) Altura manométrica de recalque;
- d) Rendimento.

A Figura 13 apresenta o carneiro hidráulico comandado pelo microprocessador.

Para o cálculo do rendimento foi utilizada a expressão apresentada por Young (1995), eq.(12).

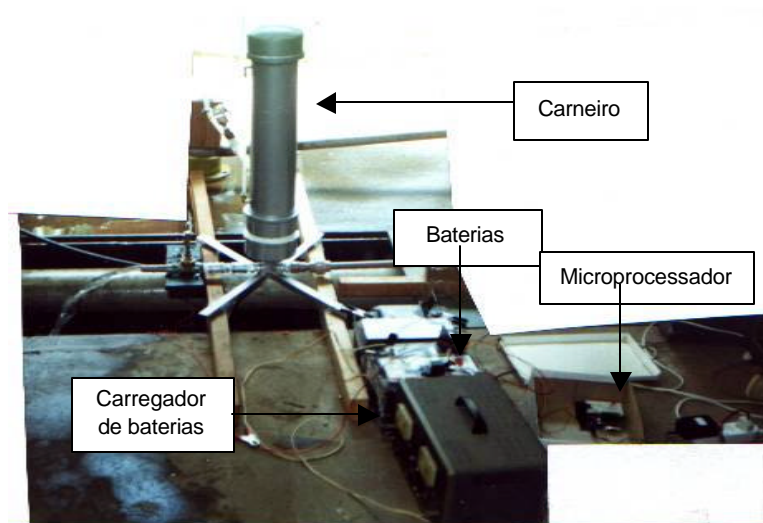


Figura 13 – Carneiro hidráulico instalado e em funcionamento, comandado pelo microprocessador.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a validação do modelo teórico instalou-se a eletroválvula onde o fechamento era comandado pelo computador. A carga hidráulica foi de 1,52 m, sendo a tubulação de alimentação de PVC de 25 mm com o comprimento de 11,81 m (Figura 7).

A Figura 14 mostra que a velocidade do fluxo de água observada, (linha roxa) inicialmente apresenta uma tendência linear crescente, para logo, estabilizar e finalmente diminuir, mantendo-se posteriormente constante ao longo do tempo avaliado. Provavelmente deve-se ao fato de que no início o regime do jato é laminar, até um NR de transição = 45.000, quando ele passa para o regime turbulento, aumentando a perda de carga, e ocasionando a diminuição da velocidade. Com relação à linha azul, a mesma corresponde ao modelo teórico, observando-se uma boa correlação.

A linha verde da Figura 14 corresponde ao modelo teórico para um NR de transição = 4.000, conforme indica a literatura para que o fluxo seja considerado turbulento, observando-se uma discrepância entre os dados observados e o modelo o que indicaria que o regime laminar, neste caso em particular é mantido para valores de NR superiores aos 4.000.

Posteriormente foram avaliadas os comprimentos de 5,95 m, 11,81m e 16,9 m em PVC para as alturas de alimentação de 0,55 m, 1,52 m e 2,34 m.

Para cada observação determinou-se visualmente o NR de transição que melhor ajustava-se aos dados observados para o modelo.

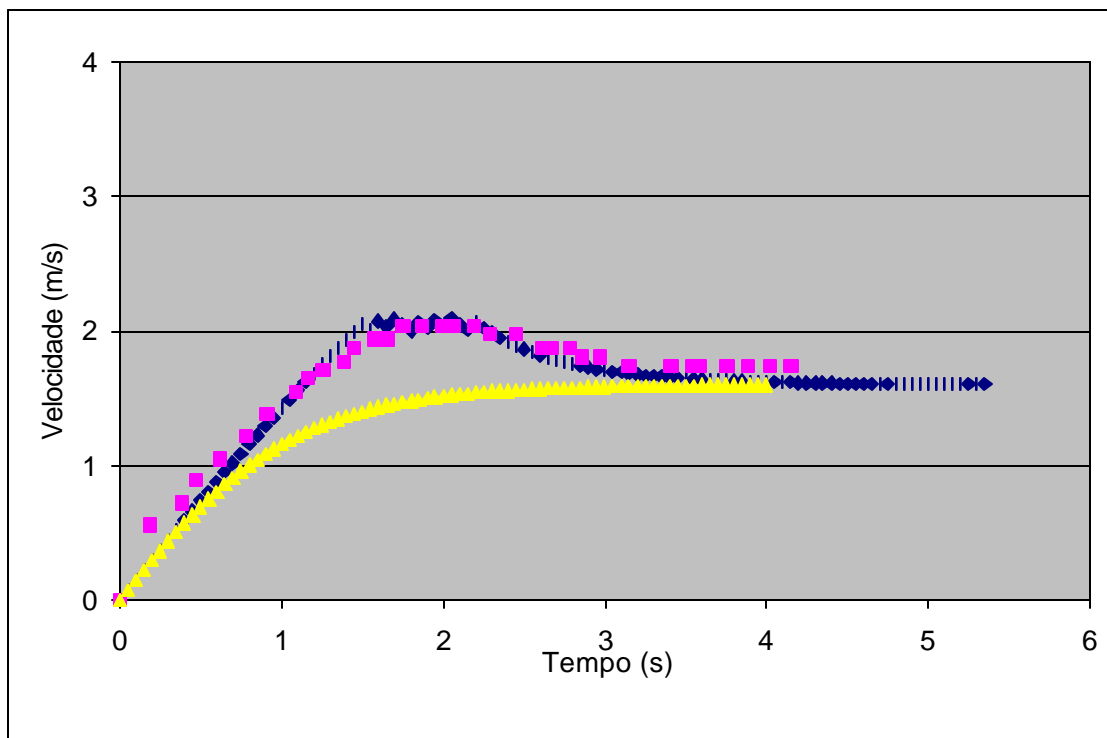
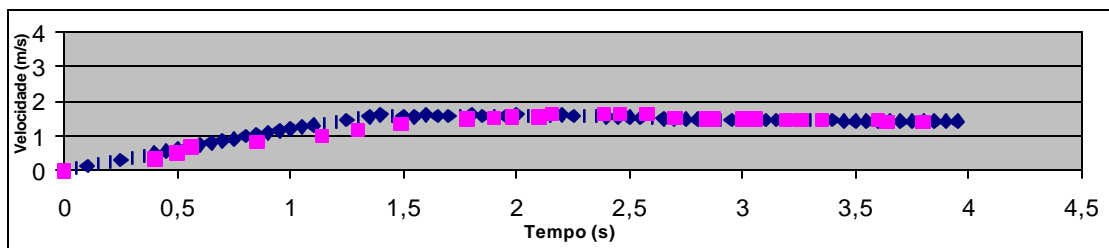


Figura 14 – Comparação do modelo teórico (linha azul), com os dados observados, sendo a linhas roxa para NR = 43.500 e amarela para NR = 4.000, quando a velocidade da água na tubulação de alimentação de PVC de 25 mm em função do tempo.

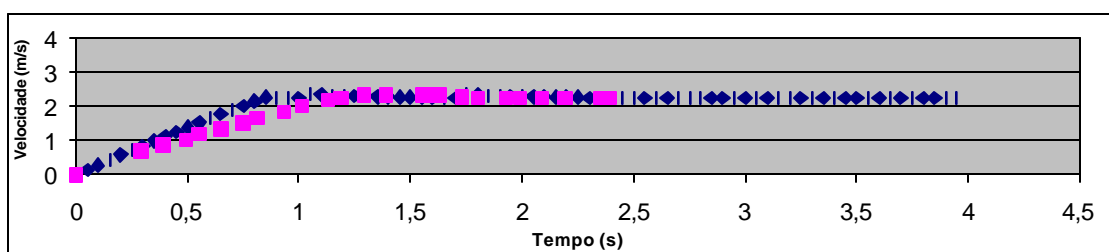
4.1 Modelo teórico (linha azul) vs. dados observados (linha roxa) para tubulação de alimentação de PVC

A Figura 15 apresenta a comparação entre o modelo teórico e os dados obtidos no ensaio, para a tubulação de alimentação de PVC, sendo o comprimento da tubulação de alimentação de 5,95 m para três cargas hidráulicas (altura de alimentação). A velocidade máxima da água foi de 3,03 m.s⁻¹ para a altura de alimentação de 2,34 m.

a)



b)



c)

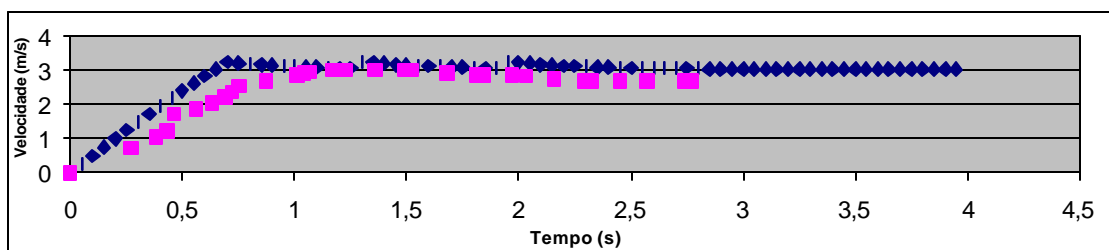


Figura 15 – Velocidade da água na tubulação de alimentação de PVC de 25 mm de diâmetro em função do tempo, com 5,95 m de comprimento, para alturas de alimentação de 0,55 m (a), 1,52 m b) e (c) 2,34 m.

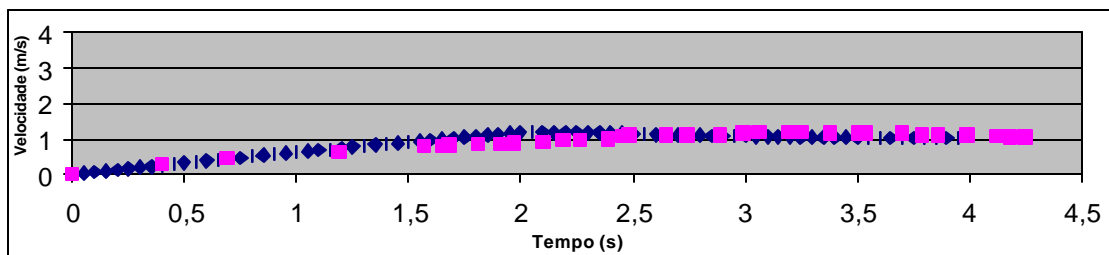
A figura 16 apresenta a comparação entre o modelo teórico e os dados obtidos no ensaio, para a tubulação de alimentação de PVC, sendo o comprimento da tubulação de alimentação de 11,81 m para três cargas hidráulicas. A velocidade máxima da água foi de $2,47 \text{ m.s}^{-1}$ para a altura de alimentação de 2,34 m.

A figura 17 apresenta a comparação entre o modelo teórico e os dados obtidos no ensaio, para a tubulação de alimentação de PVC, sendo o comprimento da tubulação de alimentação de 16,9 m para três cargas hidráulicas. A velocidade máxima da água foi de $2,07 \text{ m.s}^{-1}$ para a altura de alimentação de 2,34 m.

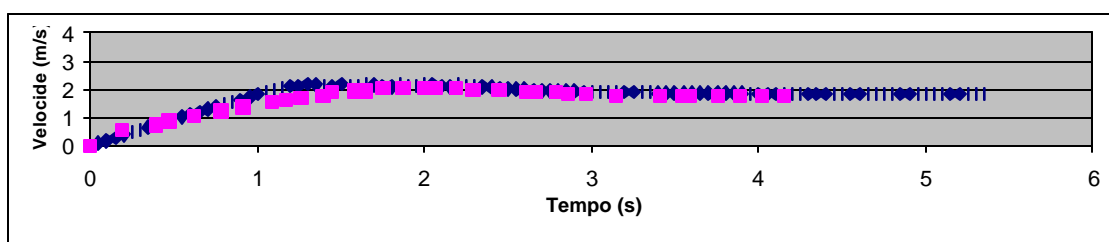
A Figura 18 apresenta a Vazão vs. Pressão de Recalque com a tubulação de alimentação de PVC. As maiores vazões conseguiram-se com os tempos de pulsos menores. Existe uma tendência de diminuir a vazão máxima com o aumento do tempo de pulso.

Na figura 19 observa-se o Rendimento vs. Pressão de Recalque utilizando a tubulação de alimentação de PVC de 25 mm de diâmetro. O rendimento máximo do carneiro hidráulico foi de 63%, sendo a altura de alimentação 2,23 m, comprimento da linha de PVC de 11,81 m, e tempo de pulso de 0,2 s, superando a eficiência máxima esperada por Kitani & Willardson (1984).

a)



b)



c)

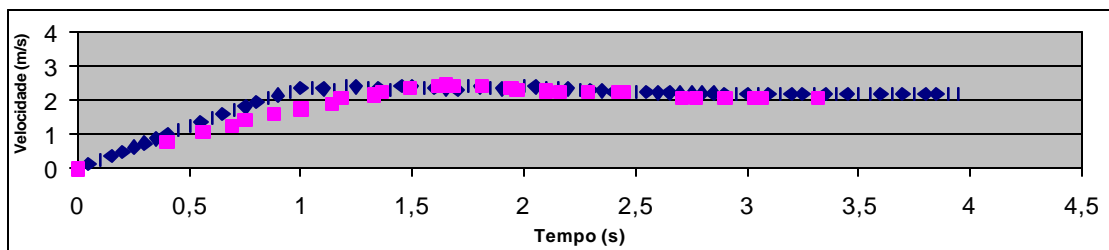
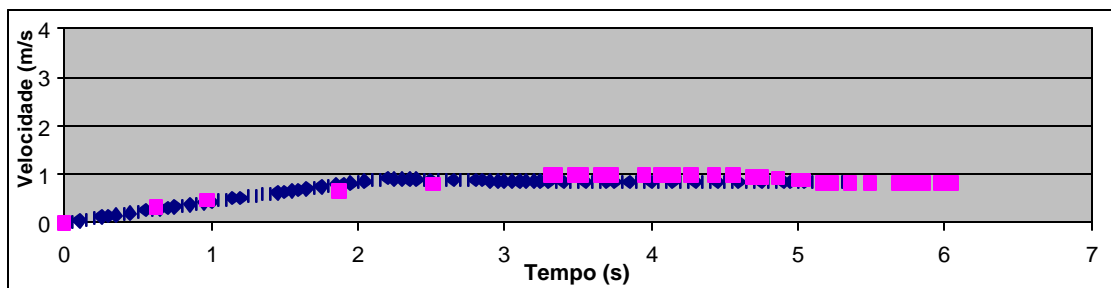
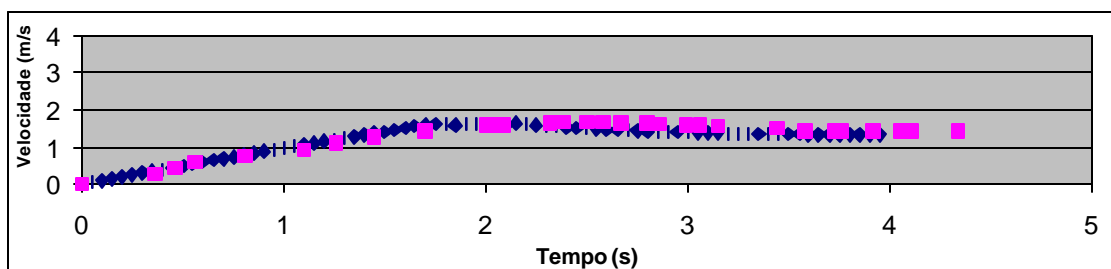


Figura 16 – Velocidade da água na tubulação de alimentação de PVC de 25 mm de diâmetro em função do tempo, com 11,81 m de comprimento, para alturas de alimentação de 0,55 m (a), 1,52 m (b) e (c) 2,34 m.

a)



b)



c)

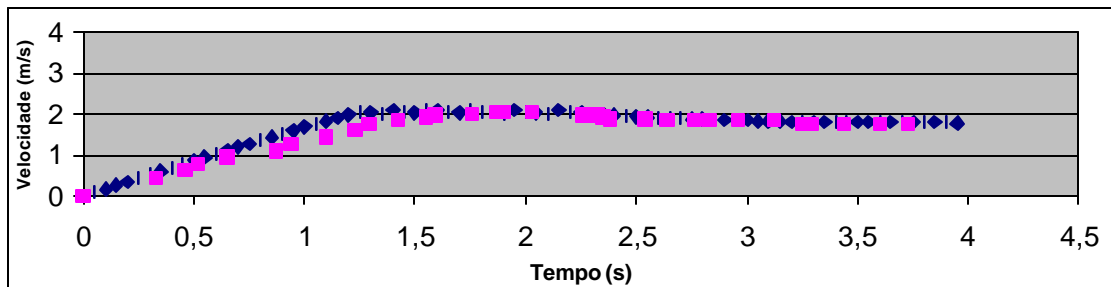


Figura 17 – Velocidade da água na tubulação de alimentação de PVC de 25 mm de diâmetro em função do tempo, com 16,9 m de comprimento, para alturas de alimentação de 0,55 m (a), 1,52 m (b) e (c) 2,34 m.

Com relação ao NR de transição na tubulação de PVC, observa-se uma tendência crescente do mesmo, da menor para a maior altura de alimentação para um mesmo comprimento da tubulação de alimentação nas três situações avaliadas (Quadro 1).

Quadro 1 – NR de transição sendo a tubulação de alimentação de PVC, para diferentes comprimentos e alturas de alimentação.

Comprimento da tubulação de alimentação (m)	Altura de alimentação (m)	NR transição
5,95	0,55	33.500
5,95	1,52	48.000
5,95	2,34	65.500
11,81	0,55	25.000
11,81	1,52	43.500
11,81	2,34	49.500
16,9	0,55	20.000
16,9	1,52	34.000
16,9	2,34	43.500

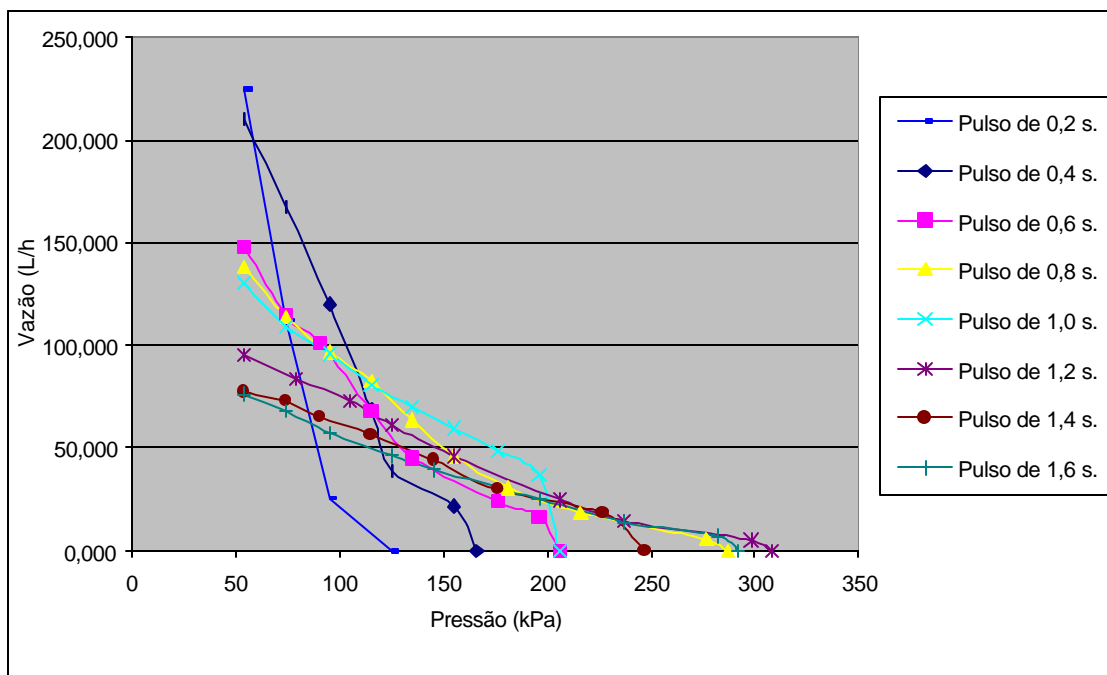


Figura 18 – Vazão de Recalque vs. Pressão de Recalque com a tubulação de alimentação de PVC, para diferentes tempos de pulso da eletroválvula.

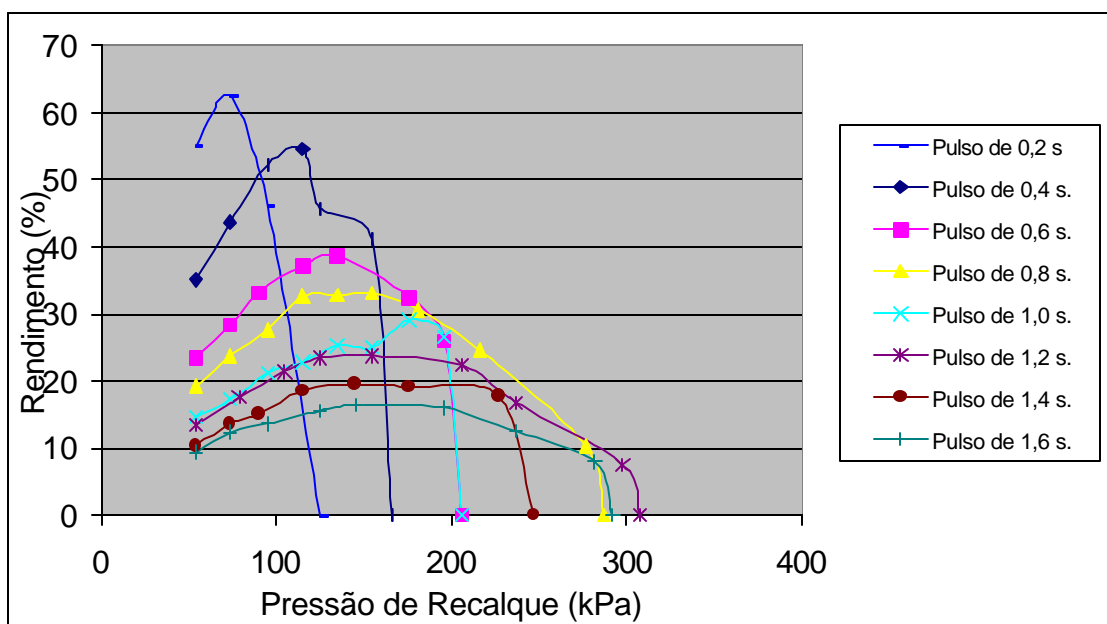


Figura 19 – Rendimento vs. Pressão de Recalque utilizando a tubulação de alimentação de PVC de 25 mm, para diferentes tempos de pulso da eletroválvula.

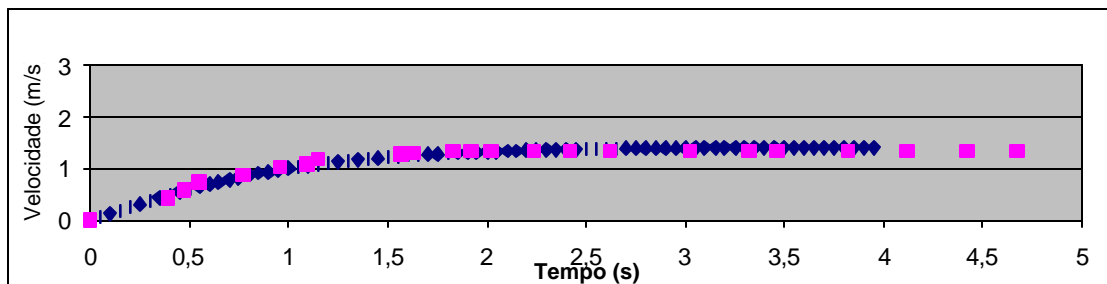
4.2 Modelo teórico vs. dados observados para a tubulação de alimentação de aço galvanizado

A figura 20 apresenta a comparação entre o modelo teórico (linha azul) e os dados obtidos no ensaio, para a tubulação de alimentação de aço galvanizado, sendo o comprimento da tubulação de alimentação de 6 m para três cargas hidráulicas (altura de alimentação). A velocidade máxima da água foi de $2,79 \text{ m.s}^{-1}$ para a altura de alimentação de 2,28 m.

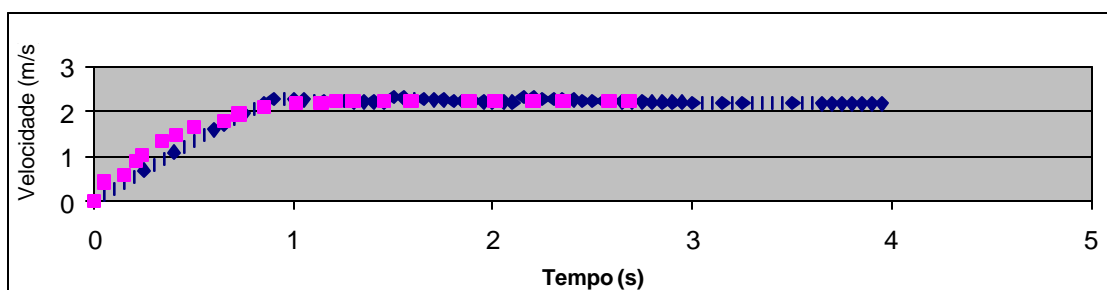
A figura 21 apresenta a comparação entre o modelo teórico e os dados obtidos no ensaio, para a tubulação de alimentação de aço galvanizado, sendo o comprimento da tubulação de alimentação de 12 m, para três cargas hidráulicas (altura de alimentação). A velocidade máxima da água foi de $2,18 \text{ m.s}^{-1}$ para a altura de alimentação de 2,28 m.

A Figura 22 apresenta a comparação entre o modelo teórico e os dados obtidos no ensaio, para a tubulação de alimentação de aço galvanizado, sendo o comprimento da tubulação de alimentação de 18 m, para três cargas hidráulicas (altura de alimentação). A velocidade máxima da água foi de $1,88 \text{ m.s}^{-1}$ para a altura de alimentação de 2,28 m.

a)



b)



c)

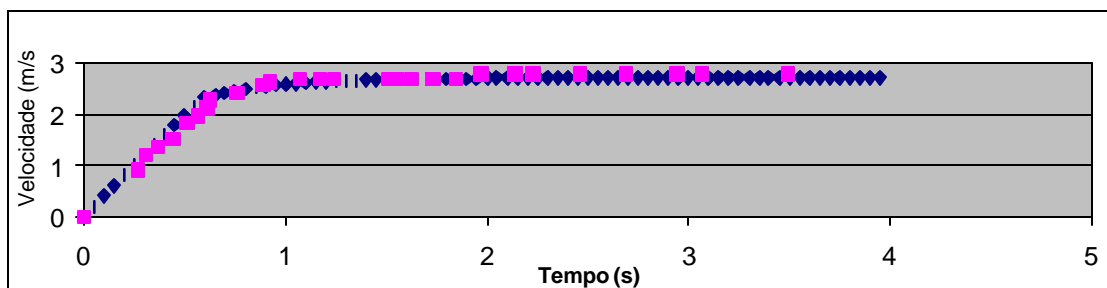
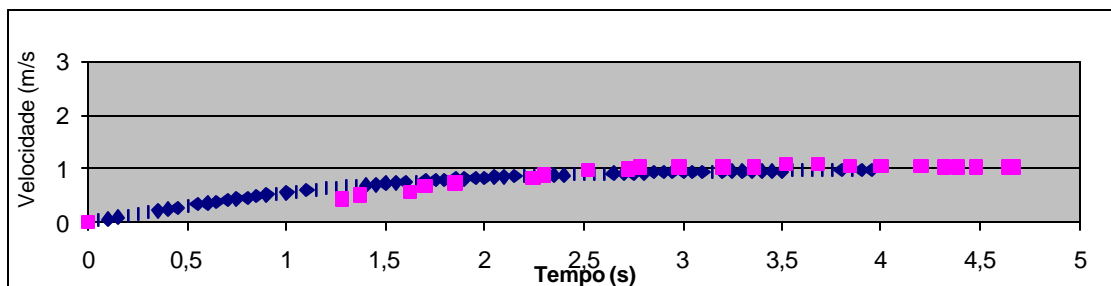
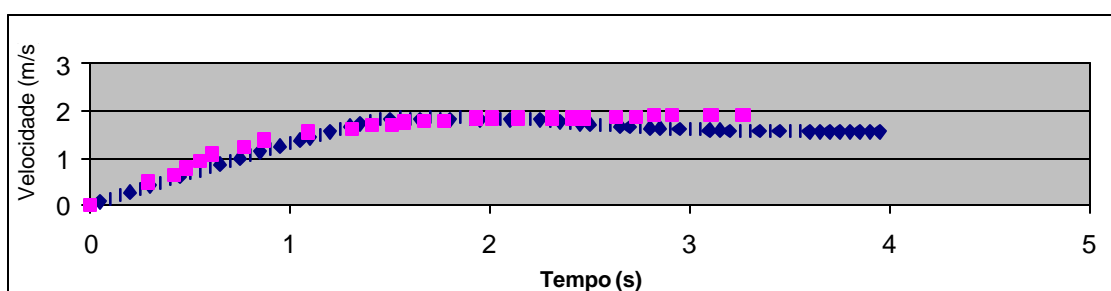


Figura 20 – Velocidade da água na tubulação de alimentação de aço galvanizado de 19,05 mm de diâmetro em função do tempo, com 6,0 m de comprimento, para alturas de alimentação de 0,55 m (a), 1,46 m (b) e 2,28 m (c).

a)



b)



c)

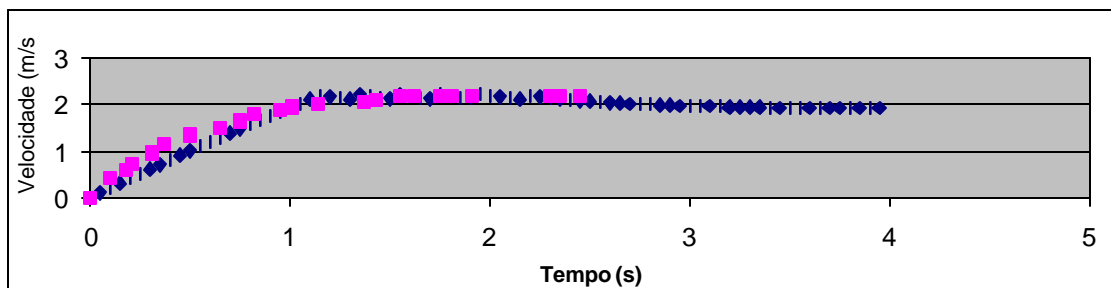
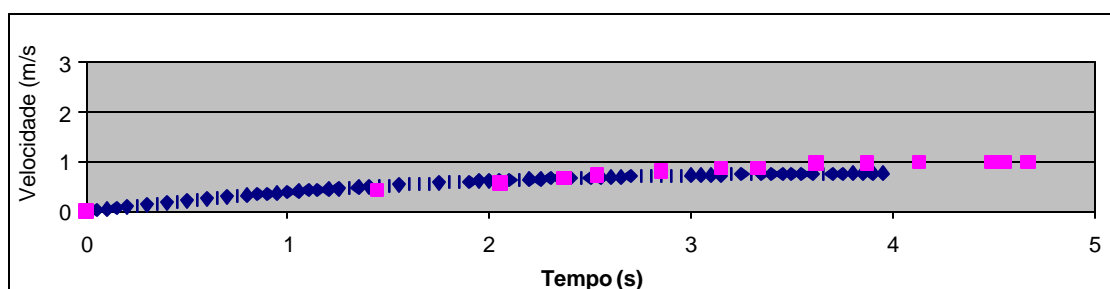
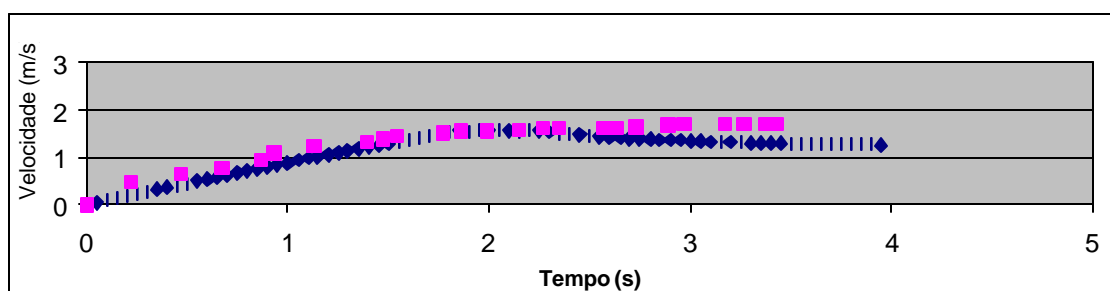


Figura 21 – Velocidade da água na tubulação de alimentação de aço galvanizado de 19,05 mm de diâmetro em função do tempo, com 12,0 m de comprimento, para alturas de alimentação de 0,55 m (a), 1,46 m (b) e (c) 2,28 m.

a)



b)



c)

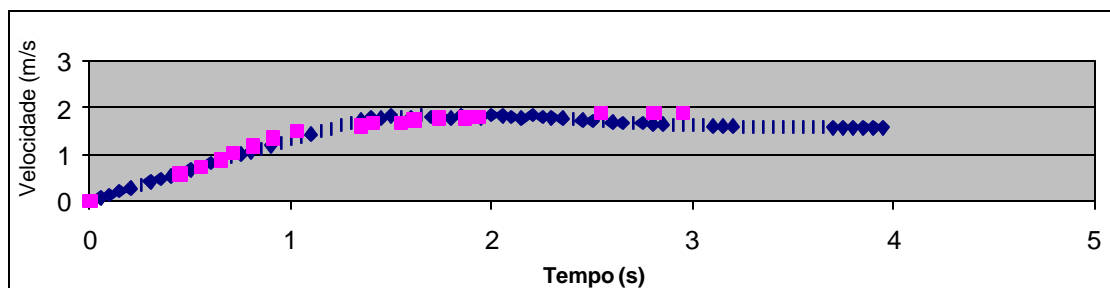


Figura 22 – Velocidade da água na tubulação de alimentação de aço galvanizado de 19,05 de diâmetro em função do tempo, com 18,0 m de comprimento, para alturas de alimentação de 0,55 m (a), 1,46 m (b) e 2,28 m (c).

Com relação ao NR de transição na tubulação de aço, observa-se uma tendência crescente do mesmo, da menor para a maior altura de alimentação para um mesmo comprimento da tubulação de alimentação nas três situações avaliadas.

Também observa-se que na altura de alimentação de 0,55 m para os três comprimentos avaliados o NR de transição esteve nos valores encontrados na literatura como usuais (Quadro 2).

Quadro 2 – NR de transição sendo a tubulação de alimentação de aço galvanizado, para diferentes comprimentos e alturas de alimentação.

Tubulação de alimentação (m)	Altura de alimentação (m)	NR transição
6	0,55	4.000
6	1,46	47.000
6	2,28	49.500
12	0,55	4.000
12	1,46	39.000
12	2,28	45.500
18	0,55	4.000
18	1,46	33.000
18	2,28	38.000

Na Figura 23 observa-se a vazão de Recalque vs. Pressão de Recalque com a tubulação de alimentação de aço galvanizado, para diferentes tempos de pulso. As maiores vazões foram obtidas com os tempos de pulsos menores, 0,4 s e 0,2 s. Existe uma tendência de diminuir a vazão máxima com o aumento do tempo de pulso.

A Figura 24 apresenta o Rendimento vs. Pressão de Recalque com a tubulação de alimentação de aço galvanizado, para diferentes tempos de pulso da eletroválvula, o Rendimento máximo do carneiro hidráulico obtido foi de 59 %, sendo a altura de alimentação 2,23 m, comprimento da linha de aço galvanizado de 12 m, e tempo de pulso de 0,2 s.

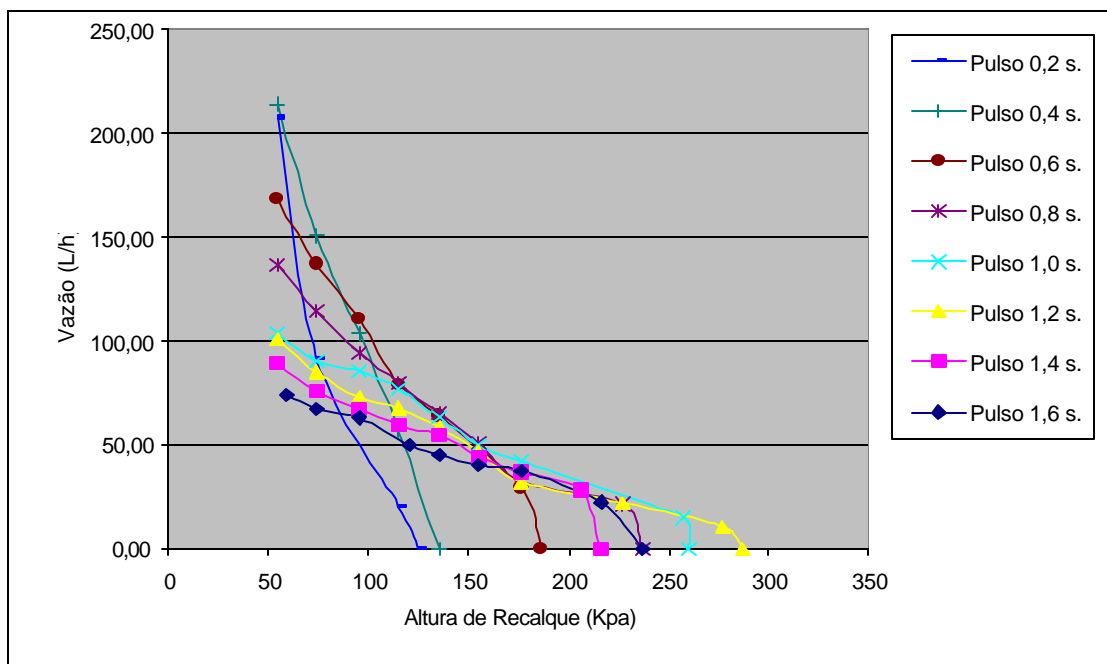


Figura 23 – Vazão de Recalque vs. Pressão de Recalque com a tubulação de alimentação de aço galvanizado, para diferentes tempos de pulso da eletroválvula.

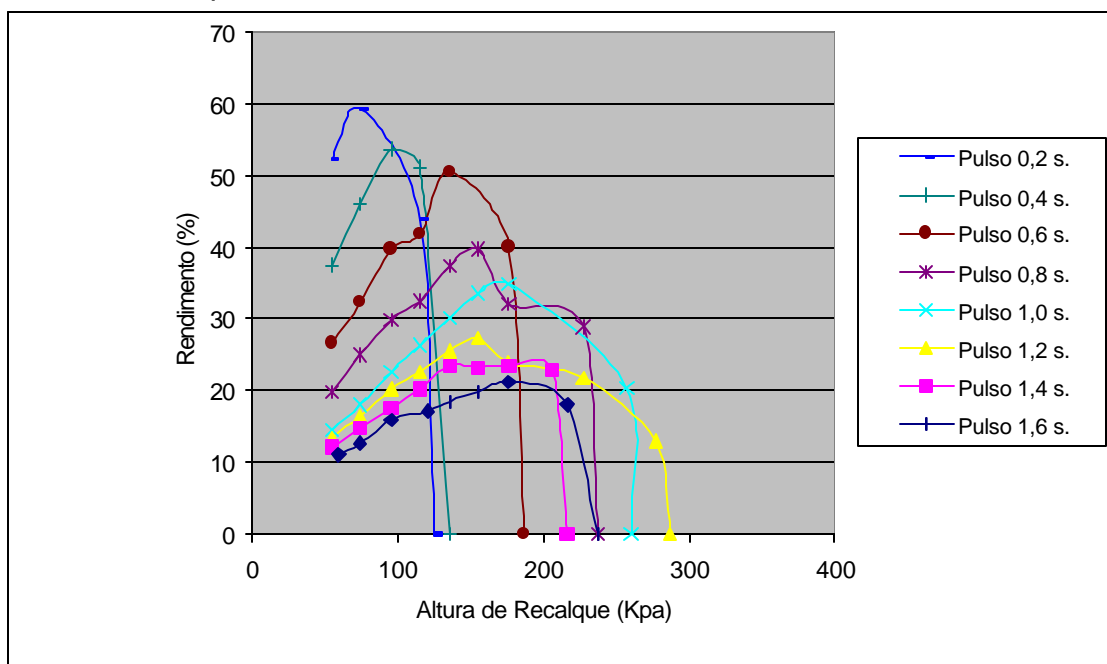


Figura 24 – Rendimento vs. Pressão de Recalque com a tubulação de alimentação de aço galvanizado, para diferentes tempos de pulso da eletroválvula comandado pelo microprocessador.

As Figuras 25 e 26 apresentam os Rendimentos máximos vs. Tempos de pulso para as tubulações de alimentação de PVC e aço galvanizado respectivamente. Com relação ao rendimento máximo observa-se em ambos casos uma tendência decrescente do rendimento máximo com o aumento do tempo de pulso.

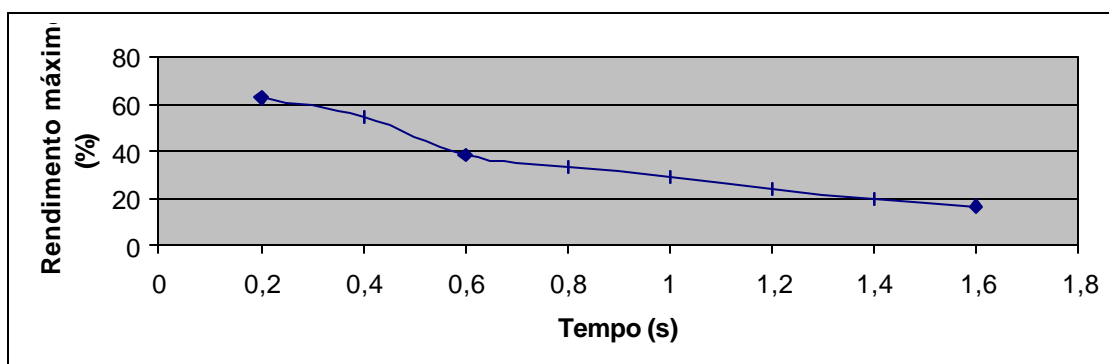


Figura 25 – Rendimento máximo vs. tempo de pulso utilizando a tubulação de alimentação de PVC de 25 mm.

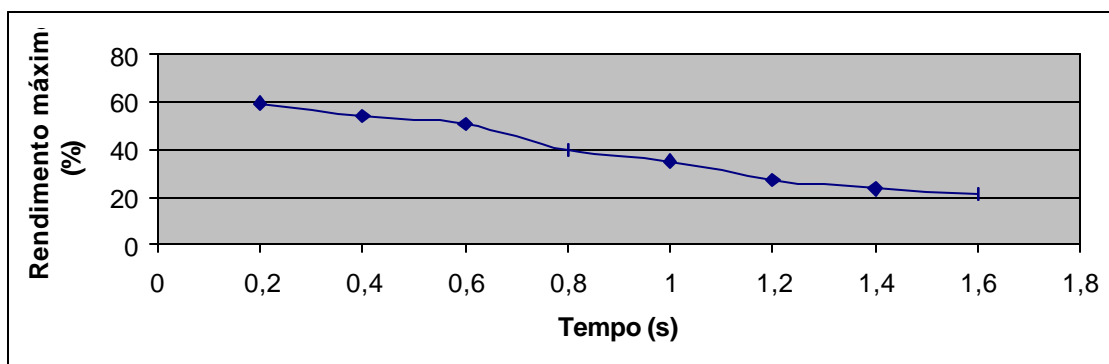


Figura 26 – Rendimento máximo vs. tempo de pulso com a tubulação de alimentação de aço galvanizado de 19,05 mm.

No quadro 3 e 4 apresentam-se exemplos dos dados de entrada, para o modelo na planilha eletrônica sendo estes: altura manométrica, P_i , massa específica, altura do tanque de alimentação (H), força da gravidade, comprimento da tubulação de alimentação (L), altura de alimentação (ΔZ),

diâmetro da tubulação de alimentação, intervalo de tempo (ΔT), viscosidade cinemática da água e NR de transição.

Posteriormente são apresentados os dados calculados de: área da tubulação, ângulo da tubulação de alimentação com relação ao chão, seno do ângulo citado, K1 e K2 constantes para cálculo da perda de carga.

Os quadros 5 e 6 apresentam exemplos dos valores gerados pelo modelo para as tubulações de PVC e aço galvanizado respectivamente.

Nas figuras 27, 28 e 29 são apresentadas as curvas de razão vs. pressão de recalque para diferentes tempos de pulsos, compreendidos entre 0,2 s e 1,6 s, utilizando a tubulação de alimentação de PVC de 11,81 m de comprimento, e sendo a altura de alimentação de 2,23 m.

Quadro 3 – Valores de entrada do modelo sendo a tubulação de alimentação de PVC.

altura manométrica	7,4	m.c.a.
Pi	3,14	
massa específica.	1000	kg/m ³
altura (H)	0,23	metro
g	9,81	m/s ²
coprimento(L)	11,81	metro
delta Z	2	metro
diâmetro	0,0215	metro
delta T	0,05	segundo
viscosidade cinemática	1,01E-06	m ² /s
NR transição	43500	
área	0,00036305	m ²
ângulo	9,74989036	graus
seno	0,16934801	
K1	0,73243695	
K2	0,08417349	
massa	4,28763408	kg

Quadro 4 – Valores de entrada do modelo sendo a tubulação de alimentação de aço galvanizado.

altura manométrica	7,4	m.c.a.
Pi	3,14	
massa específica.	1000	kg/m ³
altura (H)	0,23	metro
g	9,81	m/s ²
coprimento(L)	11,81	metro
delta Z	2	metro
diâmetro	0,0218	metro
delta T	0,1	segundo
viscosidade cinemática	1,01E-06	m ² /s
NR transição	43500	
área	0,00037325	m ²
ângulo	9,74989036	graus
seno	0,16934801	
K1	0,71985944	
K2	0,08187273	
massa	4,40812379	kg

Quadro 5 – Valores gerados pelo modelo para a tubulação de alimentação de PVC.

tempo	f1	f2	f3	f.result.	aceleração	V.inicial	V.final	NR	Hf	Vazão
seg	Newton	Newton	Newton	Newton	m/s ²	m/s	0		m.c.a.	l/h
0	0,82	7,12	0,00	7,94	1,85	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00
0,1	0,81	7,12	0,06	7,88	1,84	0,19	0,37	3943,13	0,02	36,46
0,2	0,79	7,12	0,11	7,81	1,82	0,37	0,55	7855,60	0,03	72,35
0,3	0,76	7,12	0,17	7,72	1,80	0,55	0,73	11731,53	0,05	107,58
0,4	0,72	7,12	0,22	7,63	1,78	0,73	0,91	15565,26	0,06	142,03
0,5	0,67	7,12	0,27	7,52	1,75	0,91	1,08	19351,37	0,08	175,63
0,6	0,61	7,12	0,33	7,40	1,73	1,08	1,26	23084,72	0,09	208,27
0,7	0,53	7,12	0,38	7,28	1,70	1,26	1,43	26760,46	0,11	239,90
0,8	0,45	7,12	0,43	7,14	1,67	1,43	1,59	30374,06	0,12	270,43
0,9	0,36	7,12	0,48	7,00	1,63	1,59	1,76	33921,33	0,13	299,80
1	0,26	7,12	0,53	6,86	1,60	1,76	1,92	37398,43	0,15	327,98
1,1	0,15	7,12	0,57	6,70	1,56	1,92	2,07	40801,91	0,16	354,90
1,2	0,04	7,12	9,34	-2,18	-0,51	2,07	2,02	44128,65	2,62	380,53
1,3	0,08	7,12	0,61	6,59	1,54	2,02	2,18	43046,14	0,17	334,24
1,4	-0,04	7,12	10,17	-3,09	-0,72	2,18	2,10	46319,77	2,86	359,37
1,5	0,02	7,12	9,59	-2,45	-0,57	2,10	2,05	44787,33	2,69	313,58
1,6	0,06	7,12	9,14	-1,96	-0,46	2,05	2,00	43571,34	2,57	278,24
1,7	0,09	7,12	0,60	6,62	1,54	2,00	2,16	42600,58	0,17	250,33
1,8	-0,02	7,12	10,00	-2,90	-0,68	2,16	2,09	45884,91	2,81	274,28
1,9	0,03	7,12	9,46	-2,31	-0,54	2,09	2,03	44443,11	2,66	243,78
2	0,07	7,12	0,61	6,58	1,53	2,03	2,19	43297,06	0,17	219,80
2,1	-0,05	7,12	10,26	-3,19	-0,74	2,19	2,11	46564,63	2,88	242,12
2,2	0,01	7,12	9,66	-2,53	-0,59	2,11	2,05	44980,87	2,71	215,66
2,3	0,05	7,12	9,19	-2,02	-0,47	2,05	2,01	43725,36	2,58	194,93
2,4	0,09	7,12	0,60	6,61	1,54	2,01	2,16	42723,83	0,17	178,35
2,5	-0,03	7,12	10,05	-2,95	-0,69	2,16	2,09	46005,21	2,82	198,52
2,6	0,02	7,12	9,49	-2,35	-0,55	2,09	2,04	44538,40	2,67	178,91
2,7	0,07	7,12	0,61	6,58	1,53	2,04	2,19	43373,03	0,17	163,38
2,8	-0,05	7,12	10,29	-3,22	-0,75	2,19	2,12	46638,75	2,89	182,17
2,9	0,01	7,12	9,68	-2,55	-0,60	2,12	2,06	45039,42	2,72	164,03
3	0,05	7,12	9,21	-2,04	-0,47	2,06	2,01	43771,93	2,59	149,76
3,1	0,09	7,12	0,60	6,61	1,54	2,01	2,16	42761,08	0,17	138,32
3,2	-0,03	7,12	10,06	-2,97	-0,69	2,16	2,09	46041,56	2,83	155,34
3,3	0,02	7,12	9,51	-2,36	-0,55	2,09	2,04	44567,19	2,67	141,14
3,4	0,06	7,12	0,61	6,58	1,53	2,04	2,19	43395,98	0,17	129,88
3,5	-0,05	7,12	10,30	-3,23	-0,75	2,19	2,12	46661,14	2,89	145,87
3,6	0,01	7,12	9,69	-2,56	-0,60	2,12	2,06	45057,10	2,72	132,24
3,7	0,05	7,12	9,22	-2,04	-0,48	2,06	2,01	43785,99	2,59	121,51
3,8	0,09	7,12	0,60	6,61	1,54	2,01	2,16	42772,32	0,17	112,90
3,9	-0,03	7,12	10,07	-2,97	-0,69	2,16	2,09	46052,54	2,83	127,52
4	0,02	7,12	9,51	-2,36	-0,55	2,09	2,04	44575,88	2,67	116,49

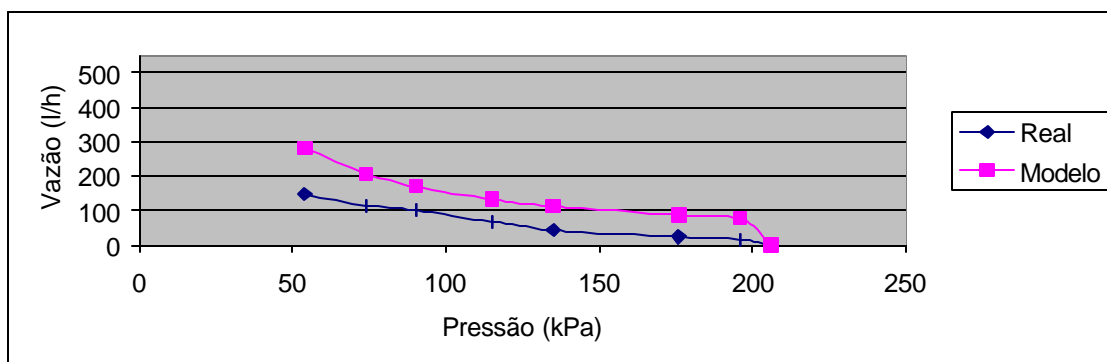
Quadro 6 – Valores gerados pelo modelo para a tubulação de alimentação de aço.

tempo	f1	f2	f3	f.result.	aceleração	V.inicial	V.final	NR	Hf	Vazão
seg	Newton	Newton	Newton	Newton	m/s ²	m/s	0	0,0	m.c.a.	l/h
0,00	0,84	7,32	0,00	8,17	1,85	0,00	0,19	0,0	0,0	0,00
0,10	0,84	7,32	0,06	8,10	1,84	0,19	0,37	3998,2	0,0	37,48
0,20	0,82	7,32	0,11	8,03	1,82	0,37	0,55	7966,0	0,0	74,40
0,30	0,79	7,32	0,17	7,94	1,80	0,55	0,73	11897,5	0,0	110,64
0,40	0,74	7,32	0,22	7,85	1,78	0,73	0,91	15787,0	0,1	146,11
0,50	0,69	7,32	0,27	7,74	1,76	0,91	1,08	19628,9	0,1	180,70
0,60	0,62	7,32	0,33	7,62	1,73	1,08	1,26	23418,0	0,1	214,33
0,70	0,55	7,32	0,38	7,49	1,70	1,26	1,43	27149,3	0,1	246,92
0,80	0,46	7,32	0,43	7,36	1,67	1,43	1,59	30818,2	0,1	278,39
0,90	0,37	7,32	0,48	7,21	1,64	1,59	1,76	34420,5	0,1	308,69
1,00	0,27	7,32	0,53	7,06	1,60	1,76	1,92	37952,2	0,1	337,76
1,10	0,16	7,32	0,58	6,90	1,57	1,92	2,08	41409,7	0,2	365,55
1,20	0,04	7,32	9,46	-2,10	-0,48	2,08	2,03	44789,9	2,6	392,02
1,30	0,07	7,32	9,08	-1,68	-0,38	2,03	1,99	43764,0	2,5	345,48
1,40	0,10	7,32	0,60	6,83	1,55	1,99	2,14	42939,9	0,2	308,84
1,50	-0,02	7,32	10,02	-2,71	-0,61	2,14	2,08	46284,4	2,7	334,90
1,60	0,03	7,32	9,52	-2,16	-0,49	2,08	2,03	44958,1	2,6	296,23
1,70	0,07	7,32	9,13	-1,74	-0,39	2,03	1,99	43898,8	2,5	265,82
1,80	0,10	7,32	0,60	6,83	1,55	1,99	2,15	43048,4	0,2	241,42
1,90	-0,02	7,32	10,06	-2,75	-0,62	2,15	2,09	46390,3	2,7	265,60
2,00	0,03	7,32	9,55	-2,20	-0,50	2,09	2,04	45042,4	2,6	237,87
2,10	0,07	7,32	9,15	-1,76	-0,40	2,04	2,00	43966,3	2,5	215,85
2,20	0,10	7,32	0,60	6,82	1,55	2,00	2,15	43102,7	0,2	198,03
2,30	-0,02	7,32	10,08	-2,77	-0,63	2,15	2,09	46443,3	2,8	219,91
2,40	0,03	7,32	9,57	-2,21	-0,50	2,09	2,04	45084,6	2,6	198,60
2,50	0,07	7,32	9,17	-1,78	-0,40	2,04	2,00	44000,1	2,5	181,59
2,60	0,10	7,32	0,60	6,82	1,55	2,00	2,15	43129,9	0,2	167,77
2,70	-0,02	7,32	10,09	-2,79	-0,63	2,15	2,09	46469,9	2,8	187,55
2,80	0,03	7,32	9,57	-2,22	-0,50	2,09	2,04	45105,7	2,6	170,39
2,90	0,07	7,32	9,17	-1,78	-0,40	2,04	2,00	44017,0	2,5	156,67
3,00	0,10	7,32	0,60	6,82	1,55	2,00	2,15	43143,5	0,2	145,49
3,10	-0,02	7,32	10,09	-2,79	-0,63	2,15	2,09	46483,1	2,8	163,44
3,20	0,03	7,32	9,58	-2,23	-0,51	2,09	2,04	45116,3	2,6	149,16
3,30	0,07	7,32	9,18	-1,79	-0,41	2,04	2,00	44025,4	2,5	137,73
3,40	0,10	7,32	0,60	6,82	1,55	2,00	2,15	43150,3	0,2	128,42
3,50	-0,02	7,32	10,09	-2,79	-0,63	2,15	2,09	46489,8	2,8	144,80
3,60	0,03	7,32	9,58	-2,23	-0,51	2,09	2,04	45121,5	2,6	132,62
3,70	0,07	7,32	9,18	-1,79	-0,41	2,04	2,00	44029,6	2,5	122,86
3,80	0,10	7,32	0,60	6,82	1,55	2,00	2,15	43153,7	0,2	114,92
3,90	-0,02	7,32	10,10	-2,80	-0,63	2,15	2,09	46493,1	2,8	129,97
4,00	0,03	7,32	9,58	-2,23	-0,51	2,09	2,04	45124,2	2,6	119,37

Com relação à vazão vs. pressão de recalque para o comprimento de 11,81 m (PVC) e 12 m (aço galvanizado, sob uma carga de 2,23 m para diferentes tempos de pulso, em ambos os casos observa-se uma maior aproximação entre o modelo e os dados observados para os tempos de pulso de 0,6 s. (Figuras 27 e 30) respectivamente.

Para os demais tempos as tendências são mantidas, mas deferindo numericamente, provavelmente devido a que o modelo não leva em consideração a elasticidade da tubulação, elasticidade da água e principalmente as perdas por fuga nas válvulas , que sendo maior o tempo de abertura, maior é a vazão que passa pelas válvulas, conseqüentemente maior a perda de carga e menor a vazão.

a)



b)

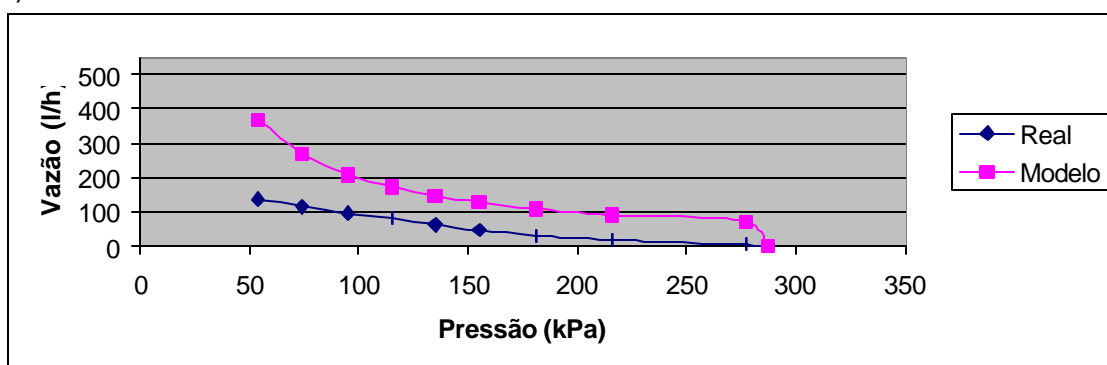
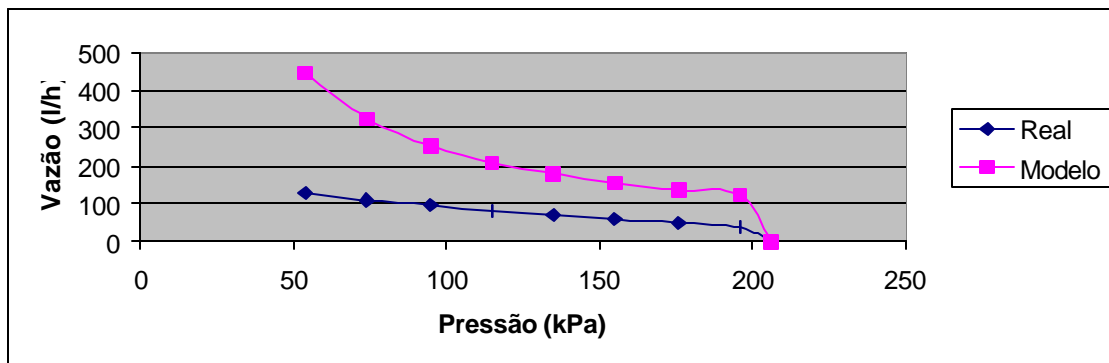


Figura 27 – Vazão vs. Pressão de recalque para o tempo de fechamento de 0,6 s. (a) e 0.8 s. (b), sendo a tubulação de alimentação de PVC.

a)



b)

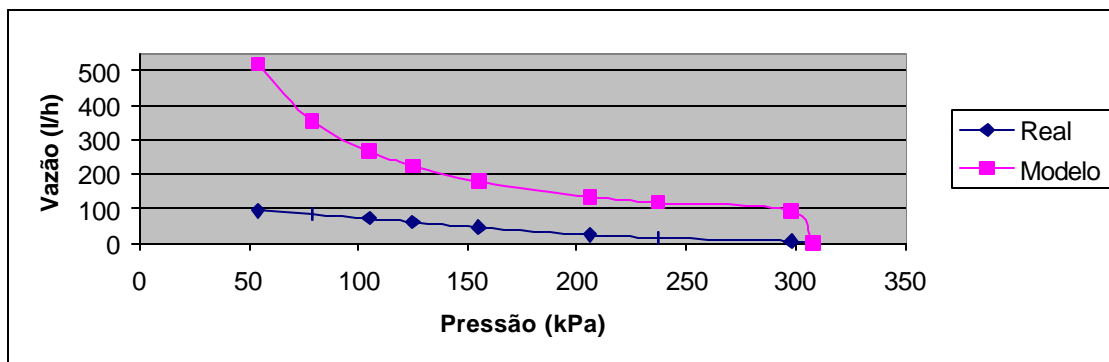
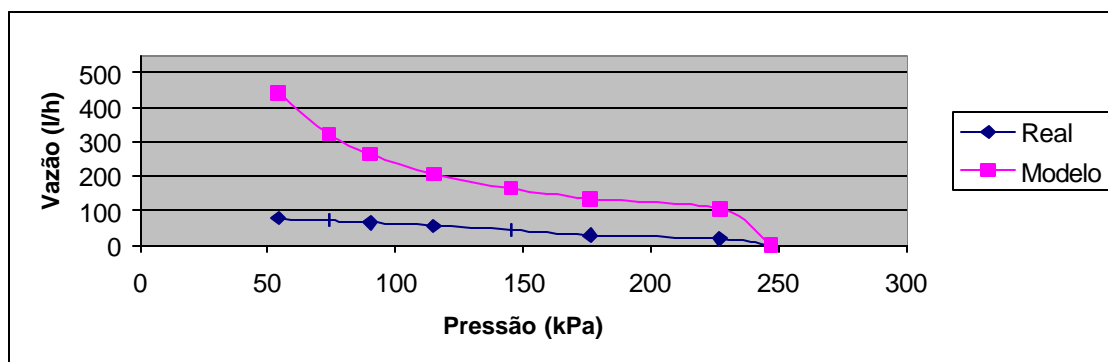


Figura 28 – Vazão vs. Pressão de recalque para os tempos de fechamento de 1,0 s. (b), e (c) 1,2 s., sendo a tubulação de alimentação de PVC.

a)



b)

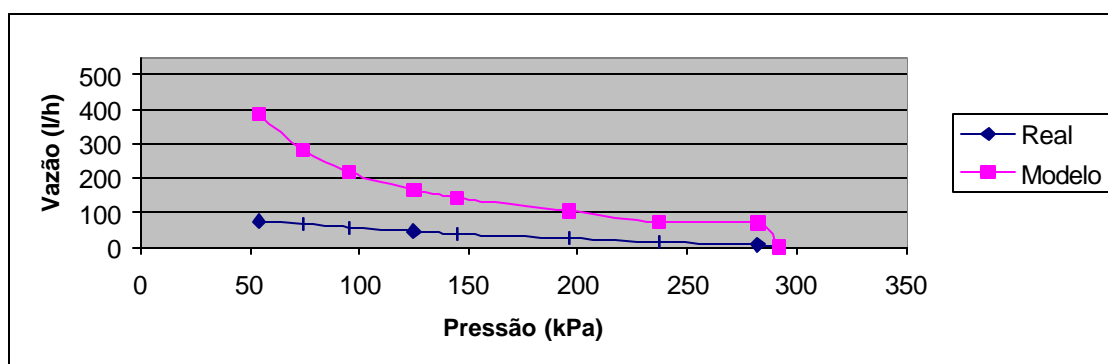
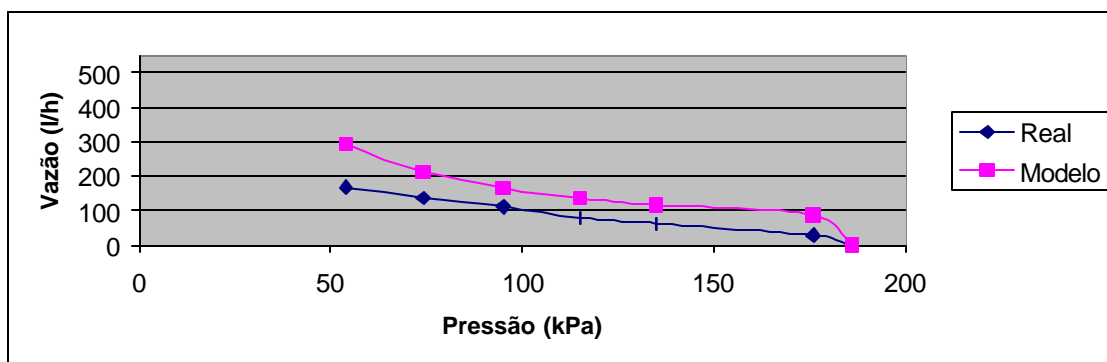


Figura 29 – Vazão vs. pressão de recalque para os tempos de fechamento de 1,4 s (a) e (b) 1,6 s., sendo a tubulação de alimentação de PVC.

a)



b)

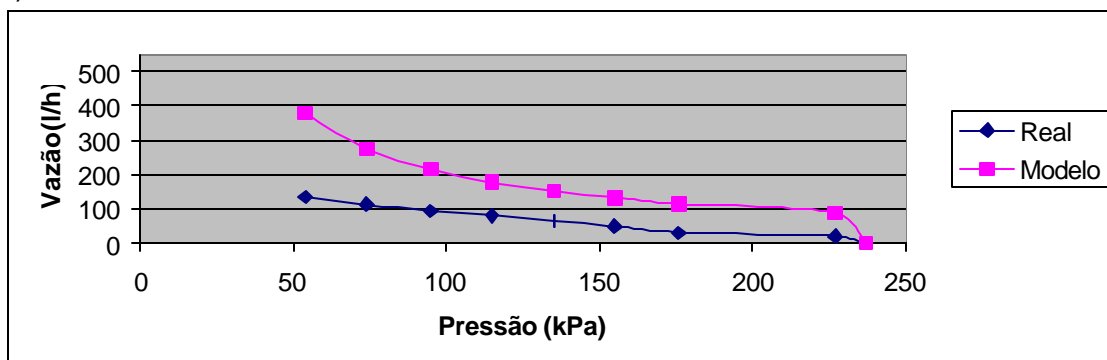
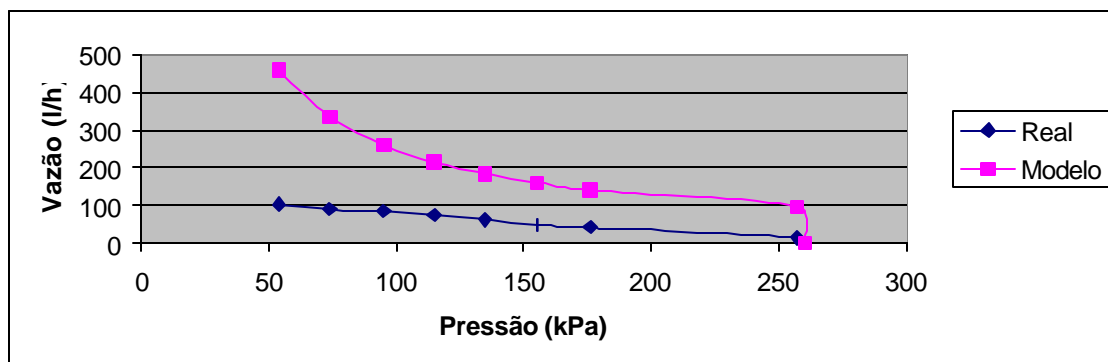


Figura 30 – Vazão vs. pressão de recalque para os tempos de fechamento de 0,6 s. (a) e 0,8 s. (b), sendo a tubulação de alimentação de aço galvanizado.

b)



b)

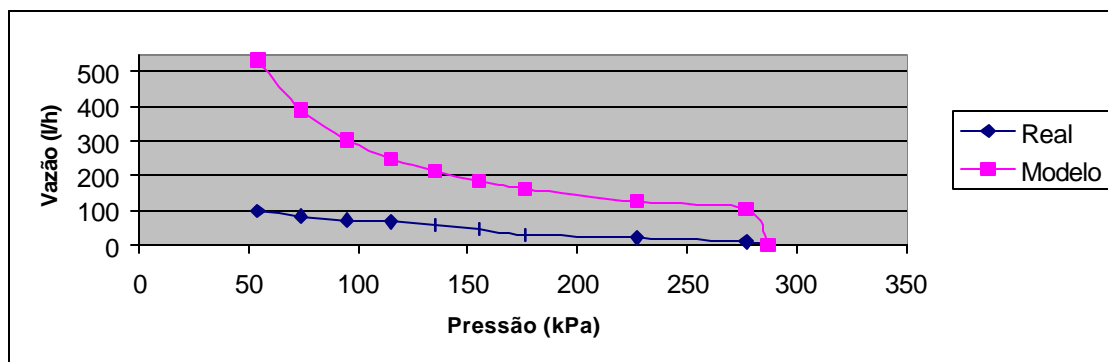
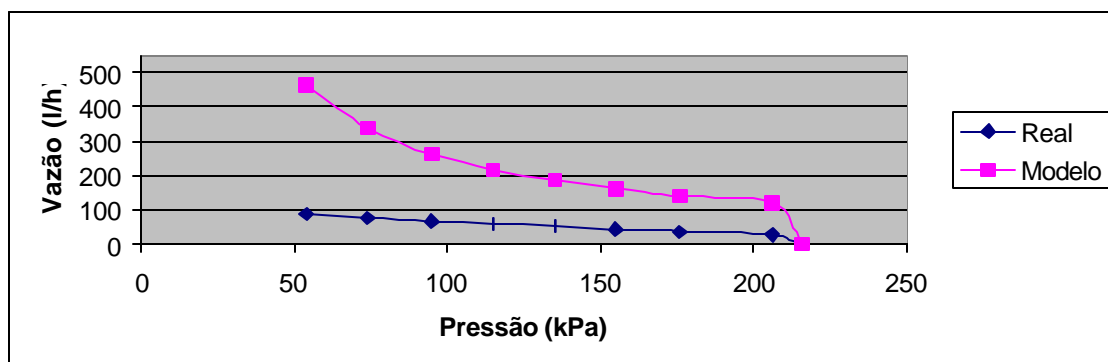


Figura 31 – Vazão vs. pressão de recalque para os tempos de fechamento de 1,0 s. (a), e (b) 1,2 s., sendo a tubulação de alimentação de aço galvanizado.

a)



b)

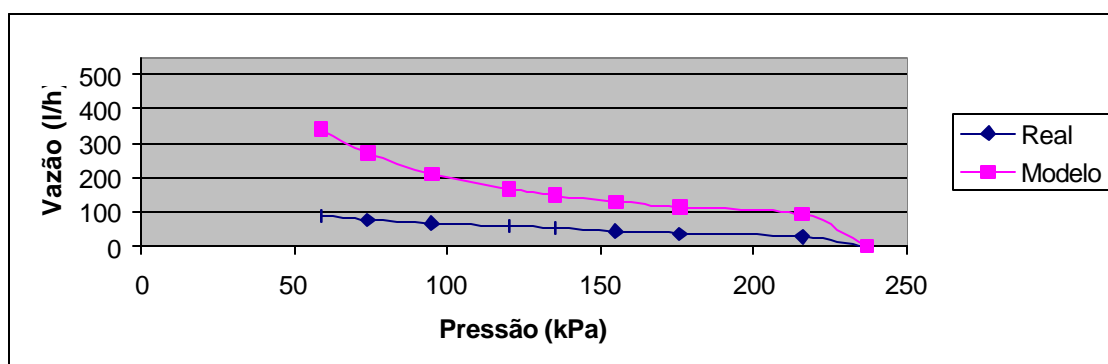


Figura 32 – Vazão vs. Pressão de recalque para os tempos de fechamento de 1,4 s (a).e (b) 1,6 s., sendo a tubulação de alimentação de aço galvanizado

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, para as condições nas quais foram conduzidos os experimentos, pode-se concluir que:

- Há indícios de que o Regime continua Laminar nos instantes iniciais para Numero de Reynolds maior que 4.000.
- Observou-se uma correlação entre o modelo e os dados obtidos com relação à velocidade da água na tubulação de alimentação.
- O maior rendimento obtido, 63%, foi com a tubulação de alimentação de PVC, para um tempo de fechamento de 0,2 s.
- Existe uma tendência decrescente do rendimento máximo na medida que aumenta o tempo de pulso da eletroválvula.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABATE, C. Avaliação do desempenho de um carneiro hidráulico com tubulação de alimentação em aço galvanizado e PVC. Piracicaba, 2000. 35p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

ADAMOWSKI, J.C.; FURUKAWA, C.M. **Mecatrônica**: Uma abordagem voltada à automação industrial. v.1, n.1, p. 8-11, Oct. 2001.

AQUA ENVIRONMENT CO. **Hydraulic water rams**: Bolina: Catalogue 1997. 4p.

AZEVEDO NETTO, J.M.; ALVAREZ, G. A. **Manual de hidráulica**. 2.ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1988. v.1 p.724.

BARRETO, A. C. **Carneiro hidráulico de PVC** Uberaba: Escola Agrotécnica Federal de Uberaba 2000. 6 p.

BRAGA, N.C. **Mecatrônica**. Uma abordagem voltada à automação industrial. v.1, n.1, p. 32-37, Oct. 2001.

CAPETTI, A. **Notizie generali sulle macchine e macchine idrauliche**. Cedam. Roma. 1930. p 231-4.

CLEMSON UNIVERSITY. **Home – made hydraulic ram pump**.
<http://www.clemson.edu/irri/Equip/ram.htm> 23/10/2001.

DAKER, A. **A água na agricultura: captação, elevação e melhoramento da água**. v.2., 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos.v.2, 1987.p.297 – 318.

DALLY, J.W.; RILEY, W.F.; McCONNELL, K.G. **Instrumentation for engineering measurements**. 2.ed. New York: Jhon Wiley. 1993. p.338 – 339.

DAS, K.C.;SHARMA, K.N.;PANIGRAHI, B.; SHARMA, S.D. Effect of magnification factor, supply conditions and valve clearance on performance of an hydraulic ram. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON AGRICULTURAL ENGINEERING, 11., Dublin,1989. **Proceedings**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1989. p.721-725.

DENÍCULI, W. **Hidráulica**. Instalações de recalque. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola. 1992. v.2. 115p.

DORNIG, M. **Trattato generale delle macchine termiche ed idrauliche**:
Libreria Editriee Politenica Cesare Tamburini. Milano: 1958. p.187 - 189

GERVÁSIO, E.S.; VILELA, L.A.A.; BOTEL, T.A.; FRIZZONE, J.A.. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA,30, Foz do Iguaçu, 2001 **Controlador de irrigação via PC**. CONBEA 2001.

JENNINGS, G.D. **Hydraulic ram pumps**. s.l: North Carolina Cooperative Extension Service, 1996. (EBAE 161–92). P. 4 -6

KITANI, K; WILLARDSON, L.S. Hydraulic ram use for sprinkle irrigation. **Transaction of the ASAE**, v.27, p.1788-1791, 1984.

LIFEWATER. **Desgning a hidraulic ram pump**.
<http://lifewater.xc.org/lwhome/wfw/rws4/rws4d5.htm>(29 Set 1998).

OLIVIERA, C.E. **Mecatrônica**. Uma abordagem voltada à automação industrial. v.1, n.1,p. 58-62, Oct. 2001.

RENNIE, L.C.; BUNT, E.A. Proc The automatic hydraulic ram-experimental results. Johannesburg: **Instn Mech Engrs** 24 nov. 1990. p. 23-31.

ROECH, G. **Turbine pompe ed altre macchine idrauliche**. Edituci Torino 1968.

THOMAS, T. Disseminating ram-pump technology.In: WEDC CONFERENCE, 20, PICKFORD, J. (Ed.) **Affordable water supply and sanitation**. Leicestershir: Loughborough University, 1994. – Proceedings/.

VERSPUY, C.& TIJSSELING,A. S. **Journal of hidraulic research**, v. 31, n. 2, p. 267 – 269. 1993.

YOUNG, B. W. **Simplified analysis and design of the hidraulic ram pump. Proc. Instn Mech. Engrs.** V. 210, p. 295 – 303, 1996.

YOUNG, B. W. **Design of the hidraulic ram pump systems. Proc. Instn Mech. Engrs.** V. 209, p. 313 – 322, 1995.