

Rodolfo Siqueira Santana

**Implementação de uma malha de controle para um sistema de bombeamento – Um estudo de caso para a modulação de vazão em uma planta piloto**

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Escola de Engenharia  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Belo Horizonte, Junho de 1998

## *Agradecimentos*

Como por muitos já dito, o ato de fazer agradecimentos é, de certa forma, ingrato pois nunca se consegue agradecer realmente a todos que de uma forma ou outra auxiliaram nesta jornada. Porém, o mesmo é indispensável.

Agradeço a um Ser maior que possibilita e possibilitou estarmos aqui. À minha família que sempre me apoiou em todas as minhas decisões e me deu grande amor. À Namorada, Shirley, que entre altos e baixos sempre esteve presente me fornecendo força para continuar e sempre buscar o melhor. Aos velhos amigos que ao me tirarem dos estudos me propiciavam um grande descanso mental e revitalização das minhas energias. Aos novos amigos que me acolheram aqui no CPDEE.

Agradeço ao Leonardo Torres uma pessoa ímpar que muito me ajudou. Fabrício Moraes, Francisco Magalhães e Gustavo Parma, dentre outros, também são pessoas que muito me auxiliaram neste trabalho. Agradeço ao Márcio Fantini, ao Valter Júnior e ao Luiz Cláudio Araújo pelas discussões que sempre foram enriquecedoras.

Ofereço os meus mais sinceros agradecimentos a dois grandes "mestres", Luís Antônio Aguirre e Carlos Barreira Martinez pessoas possuidoras de grande paciência e dedicação que muito me ensinaram.

Finalizando, agradeço à FAPEMIG pelo auxílio financeiro, a todos que de uma forma ou outra me ajudaram e à compreensão dos que aqui não foram citados explicitamente.

## *Resumo*

Este trabalho descreve a instrumentalização e controle de uma planta piloto de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica da UFMG com o fim de adequá-la para a geração de perfis de vazão. A planta inicialmente, operava em malha aberta impossibilitando a geração de perfis de vazão predefinidos. Implementou-se um sistema de controle no qual a planta de bombeamento de água opera em malha fechada e permite a geração de perfis de vazão.

A implementação do sistema de controle constou basicamente da adição à planta piloto de bombeamento de água de medidores/transmissores de diferença de pressão e de um controlador do tipo PID que atua sobre o conversor de frequência existente. Os medidores/transmissores e o controlador foram instalados e interligados com os demais componentes da planta.

Paralelamente foi efetuada a modelagem da planta piloto e a disponibilização da mesma para simulações em ambiente Matlab. Para efetuar-se a geração dos perfis de vazão, a sintonia do controlador do tipo PID foi necessária e para tal estudou-se alguns métodos de sintonia.

Após a implementação do sistema de controle e definidos os métodos de sintonia do controlador do tipo PID a serem utilizados, foram gerados perfis de vazão em simulações e utilizando-se a planta de bombeamento de água. Conclusões e sugestões referentes ao modelo adquirido, aos métodos de sintonia utilizados e a geração de perfis de vazão são apresentadas no final deste trabalho.

## ***Abstract***

This work describes the connection of instrumentation and the control of a pilot plant located in the Laboratory of Hydraulics at UFMG. This pilot plant consists basically of a water tank which receives water from a pump driven by an induction motor connected to a frequency converter. Originally, the pilot plant operated in open-loop and consequently it was not possible to generate prespecified water flow profiles required to test reduced models of hydraulic structures. The purpose of this work was to implement a closed-loop control system in order to enable the pilot plant to produce the aforementioned water flow profiles.

The implemented closed-loop consists basically of a differential pressure sensor and transmitter, a PID controller connected to the frequency converter and a PC computer. These devices were connected to the pilot plant and tuned in order to achieve the goal of water flow control.

Besides connecting the equipment, a mathematical model based on first principles was derived for the pilot plant. Such a model was coded in MATLAB programming language and can be used to simulate the pilot plant operating both in open and closed-loop.

Some PID tuning methods were implemented in order to tune the controller. After this was done, it was possible to successfully produce standard water flow profiles using the pilot plant. Some of such results are presented and discussed in this work.

## *Nomenclatura e Simbologia*

$a$	Amplitude das oscilações mantidas;
$A$	Área do reservatório, em $m^2$ ;
Atuador	Elemento responsável por atuar na variável manipulada;
$b$	<i>Bites</i> ;
$C_{m1}$	Primeiro valor de vale da variável de processo (PV);
$C_{p1}$	Primeiro valor de pico da variável de processo (PV);
$C_{p2}$	Segundo valor de pico da variável de processo (PV);
$C_{\infty}$	Valor de estado estacionário da variável de processo (PV);
PID	Controladores que utilizam ação Proporcional, Integral e Derivativa;
$d$	Tempo morto da resposta em malha fechada;
D	Tempo derivativo;
$e(t)$	Diferença entre a variável de processo (PV) e o valor de referência (SP). Erro ou desvio;
$E(s)$	Transformada de Laplace do sinal de erro ou desvio;
EEPROM	Memória somente para leitura, programável e apagável eletricamente ( <i>Electrical Erased Programmable Read Only Memory</i> );
$f$	Frequência de alimentação do motor de indução, em Hertz (Hz);
FE_01	Elemento primário para a medição de fluxo, placa de orifício;
FE_02	Elemento primário para a medição de fluxo, tubo Venturi;
$g$	Aceleração da gravidade, em $m/s^2$ ;
$G_{cl(s)}$	Função de transferência em malha fechada;
$h$	Nível do reservatório, em m;
$H$	Sobressinal da variável de processo (PV) [Chen, 1989];
HV_01	Válvula manual de recalque;
HV_02	Válvula manual A da saída principal do reservatório;

HV_03	Válvula manual B da saída principal do reservatório;
HV_04	Válvula manual A da saída secundária do reservatório;
HV_05	Válvula manual B da saída secundária do reservatório;
I	Ganho integral;
IHM	Interface Homem × Máquina;
$k$	Constante hidráulica;
$K$	Ganho do sistema em malha fechada;
$K_c$	Ganho proporcional;
$K_{cr}$	Ganho crítico;
$ki$	Constante hidráulica da entrada do reservatório;
$ki_1$	Elemento 1 do vetor $ki$ ;
$ki_2$	Elemento 2 do vetor $ki$ ;
$ko$	Constante hidráulica da saída principal do reservatório;
$K_p$	Ganho proporcional;
$ku$	Constante de proporcionalidade entre $P_b$ e $U$ ;
$ku_1$	Elemento 1 do vetor $ku$ ;
$ku_2$	Elemento 2 do vetor $ku$ ;
$m(t)$	Saída do controlador (sinal de controle);
$m1$	Massa de água dentro do reservatório, em kg;
$M(s)$	Transformada de Laplace do sinal de controle;
MV	Variável Manipulada;
$MV_{ss}$	Estado estacionário da variável Manipulada;
NA	Normalmente Aberto;
NF	Normalmente Fechado;
$P1$	Pressão no nível da saída principal do reservatório, em $\text{kgf/m}^2$ ;
$P_1$	Pressão no ponto 1, em $\text{kgf/m}^2$ ;
$P_2$	Pressão no ponto 2, em $\text{kgf/m}^2$ ;
$Patm$	Pressão atmosférica <sup>1</sup> , em $\text{kgf/m}^2$ ;

---

<sup>1</sup> A pressão atmosférica foi considerada constante em qualquer ponto da planta.

$P_b$	Pressão na saída da bomba de recalque, em $\text{kgf/m}^2$ ;
PB	Banda proporcional;
$P_{b_{cheio}}$	Pressão $P_b$ quando o reservatório está cheio;
$P_{b_{vazio}}$	Pressão $P_b$ quando o reservatório está vazio;
$P_{cr}$	Período crítico;
PV	Variável de processo;
$PV_{ss}$	Estado estacionário da variável de processo;
PWM	Modulação por largura de pulso ( <i>Pulse Width Modulation</i> );
$q$	Vazão volumétrica, em $\text{m}^3/\text{s}$ ;
$q_i$	Vazão volumétrica na entrada do reservatório, em $\text{m}^3/\text{s}$ ;
$q_o$	Vazão volumétrica na saída principal do reservatório, em $\text{m}^3/\text{s}$ ;
$R(s)$	Transformada de Laplace do sinal de referência;
RAM	Memória de acesso aleatório ( <i>Random Access Memory</i> );
$s$	Variável de Laplace;
$S_1$	Seção reta no ponto 1, em $\text{m}^2$ ;
$S_2$	Seção reta no ponto 2, em $\text{m}^2$ ;
SISO	Uma entrada e uma saída ( <i>single input single output</i> );
SP	Valor de referência ( <i>set point</i> );
SVGA	Super video graphic adapter;
$t$	Tempo, em segundos (s);
$T_d$	Tempo derivativo;
$T_i$	Tempo integral;
$T_{m_1}$	Tempo correspondente ao primeiro vale da variável de processo;
$T_{p_1}$	Tempo correspondente ao primeiro pico da variável de processo;
TQ_01	Reservatório da planta de bombeamento de água;
TQ_02	Poço de sucção da planta de bombeamento de água;
$T_s$	Tempo de amostragem;
$U$	Entrada remota do conversor, em mA;
$V$	Volume do reservatório, em $\text{m}^3$ ;
$v_1$	Velocidade média no ponto 1, em m/s;

$v_2$	Velocidade média no ponto 2, em m/s;
$v_b$	Velocidade de bombeamento de água;
$w$	Vazão mássica, em kg/s;
$w_i$	Vazão mássica na entrada do reservatório, em kg/s;
$w_o$	Vazão mássica na saída principal do reservatório, em kg/s;
$w_u$	Frequência crítica, em rad/s;
$z$	Variável da transformada $z$ ;
$Z_1$	Cota da tubulação, em relação a um plano horizontal, no ponto 1, em m;
$Z_2$	Cota da tubulação, em relação a um plano horizontal, no ponto 2, em m;
$\frac{d}{dt}$	Operador derivada de uma variável em relação ao tempo;
$\int$	Operador integral;
$\alpha$	Define a alocação do pólo do filtro;
$\beta$	Peso do valor de referência;
$\gamma$	Peso específico da água, em kgf/m <sup>3</sup> ( $1 \times 10^3$ kgf/m <sup>3</sup> );
$\sum \lambda$	Perdas de carga por atrito e localizadas devidas às mudanças de direção ou de seção, ou a peças especiais e demais singularidades, em m;
$\rho$	Massa Específica da água, em kg/m <sup>3</sup> ( $1 \times 10^3$ kg/m <sup>3</sup> );
$\tau$	Constante de tempo do processo;
$\zeta$	Quociente de amortecimento;
$\Delta MV$	Desvio no valor da variável manipulada (MV);
$\Delta P$	Diferença de pressão;
$\Delta P_{b_{rel}}$	Diferença relativa da pressão $P_b$ em função do nível do reservatório;
$\Delta P_o$	Diferença de pressão sobre o tubo Venturi na saída principal;
$\Delta SP$	Amplitude do valor de referência aplicado ao sistema durante os testes de sintonia propostos pelo método de Chen (1989).

## Sumário

### 1. Introdução

1.1 RELEVÂNCIA E OBJETIVOS DO TRABALHO .....	1-1
1.2 DESCRIÇÃO DO TRABALHO.....	1-5
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA DO CAPÍTULO .....	1-7

### 2. Descrição da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica

2.1 PLANTA DISPONÍVEL .....	2-1
2.1.1 Reservatório (TQ_01).....	2-3
2.1.2 Poço de sucção (TQ_02) .....	2-4
2.1.3 Tubulação.....	2-4
2.1.4 A bomba d'água .....	2-5
2.1.5 Motor de indução .....	2-5
2.1.6 O conversor de frequência .....	2-6
2.1.7 Sistema de proteção .....	2-7
2.1.8 Elemento primário de medição .....	2-8
2.1.9 Tomadas de pressão .....	2-10
2.2 OPERAÇÃO DA PLANTA ANTERIORMENTE À IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE.....	2-10
2.3 IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE.....	2-11
2.3.1 Medidor de diferença de pressão (PT_02) e de nível (PT_01).....	2-13
2.3.2 Controlador.....	2-17
2.3.3 Placa de aquisição de dados .....	2-19
2.3.4 Microcomputador.....	2-21
2.3.5 Console de operação.....	2-21
2.3.6 Tomadas de pressão .....	2-22
2.3.7 Interligação dos novos componentes do sistema .....	2-23

2.3.8 Software para a placa de aquisição de dados .....	2-24
2.4 OPERAÇÃO DA PLANTA APÓS A IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE .....	2-26
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA DO CAPÍTULO .....	2-29

### **3. Modelagem do processo de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica**

3.1 EQUACIONAMENTO DO MODELO .....	3-2
3.2 LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS DO MODELO.....	3-6
3.3 VALIDAÇÃO DO MODELO .....	3-13
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA DO CAPÍTULO .....	3-19

### **4. Controladores tipo PID - Proporcional, Integral e Derivativo**

4.1 CONTROLADORES E ALGORITMOS TIPO PID .....	4-1
4.2 PROBLEMAS DE SINTONIA DE CONTROLADORES TIPO PID.....	4-6
4.3 MÉTODOS PARA A SINTONIA DE CONTROLADORES TIPO PID .....	4-8
4.3.1 Descrição do método de sintonia de Ziegler e Nichols.....	4-11
4.3.2 Descrição do método de sintonia de Chen .....	4-13
4.3.3 Descrição do método de sintonia de Aström e Hägglund.....	4-16
4.4 SINTONIA AUTOMÁTICA PARA CONTROLADORES TIPO PID, <i>AUTO-TUNING</i> .....	4-18
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA DO CAPÍTULO .....	4-19

### **5. Geração de perfis de vazão utilizando-se a planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica**

5.1 SINTONIA DO CONTROLADOR .....	5-2
5.1.1 Sintonia através do método proposto por Ziegler e Nichols.....	5-3
5.1.2 Sintonia através do método proposto por Chen .....	5-3
5.1.3 Sintonia através do método proposto por Aström e Hägglund.....	5-9

5.1.4 Auto-sintonia .....	5-9
5.1.5 Comparação entre as sintonias obtidas .....	5-11
5.2 GERAÇÃO DE PERFIS DE VAZÃO EM SIMULAÇÕES .....	5-13
5.3 GERAÇÃO DE PERFIS DE VAZÃO UTILIZANDO-SE A PLANTA DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA .....	5-15
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA DO CAPÍTULO.....	5-19

## **6. Conclusões**

6.1 CONCLUSÕES GERAIS .....	6-1
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	6-3

## **7. Referência bibliográfica**

## **8. Apêndice A**

## **9. Apêndice B**

## Índice de figuras

<i>Figura 1.1- Diagrama em blocos do sistema em malha aberta da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica.</i>	<i>1-4</i>
<i>Figura 1.2 - Diagrama em blocos do sistema em malha fechada da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica.</i>	<i>1-5</i>
<i>Figura 2-1 - Diagrama de instrumentação da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica anteriormente à implantação do sistema de controle.</i>	<i>2-2</i>
<i>Figura 2-2 - Fotografias das instalações do Laboratório de Hidráulica.</i>	<i>2-2</i>
<i>Figura 2-3 - Fotografia do conversor de frequência.</i>	<i>2-6</i>
<i>Figura 2-4 - Fotografia do sistema de proteção do motor.</i>	<i>2-8</i>
<i>Figura 2-5 - Fotografia do tubo Venturi instalado na saída principal do reservatório.</i>	<i>2-8</i>
<i>Figura 2-6 - Diagrama de instrumentação da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica após a implantação do sistema de controle.</i>	<i>2-12</i>
<i>Figura 2-7 - Diagrama em blocos do sistema em malha fechada da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica.</i>	<i>2-12</i>
<i>Figura 2-8 - Fotografia das instalações do Laboratório de Hidráulica após a implantação do sistema de controle.</i>	<i>2-13</i>
<i>Figura 2-9 - Fotografia dos medidores/transmissores de pressão e nível.</i>	<i>2-14</i>
<i>Figura 2-10 - Fotografia do controlador do tipo PID UT 37 da Yokogawa.</i>	<i>2-19</i>
<i>Figura 2-11 - Fotografia da console de operação.</i>	<i>2-22</i>
<i>Figura 2-12 - Fotografia de uma das tomadas de pressão instalada.</i>	<i>2-23</i>
<i>Figura 2-13 - Fotografia da tela do microcomputador quando o software da placa de aquisição de dados estava em operação.</i>	<i>2-25</i>
<i>Figura 3.1 - Diagrama de instrumentação da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica após a implementação do sistema de controle.</i>	<i>3-3</i>
<i>Figura 3.2 - Curva <math>q_i \times \sqrt{P_b - \gamma h}</math> medida (linha tracejada) e curva aproximada (linha contínua).</i>	<i>3-8</i>
<i>Figura 3.3 - curva <math>q_o \times \sqrt{\gamma h}</math> medida (linha tracejada) e curva aproximada (linha contínua).</i>	<i>3-9</i>
<i>Figura 3.4 - Curva <math>P_b \times U</math> medida (linha tracejada) e curva aproximada (linha contínua).</i>	<i>3-12</i>

<i>Figura 3.5 - Resposta medida da planta (traço ponto) e do modelo (linha contínua) ao degrau positivo de 0,73 mA.</i>	3-16
<i>Figura 3.6 - Resposta medida da planta (traço ponto) e do modelo (linha contínua) ao degrau negativo de 0,73 mA.</i>	3-16
<i>Figura 3.7 - Resposta medida da planta (traço ponto) e do modelo (linha contínua) ao degrau positivo de 0,71 mA.</i>	3-17
<i>Figura 3.8 - Resposta medida da planta (traço ponto) e do modelo (linha contínua) ao degrau negativo de 0,71 mA.</i>	3-17
<i>Figura 3.9 - Resposta medida da planta (traço ponto) e do modelo (linha contínua) ao degrau positivo de 0,85 mA.</i>	3-18
<i>Figura 3.10 - Resposta medida da planta (traço ponto) e do modelo (linha contínua) ao degrau negativo de 0,85 mA.</i>	3-18
<i>Figura 4.1- Malha típica de controle de processos</i>	4-2
<i>Figura 4.2 - Resposta, esperada, ao degrau de um sistema em malha fechada com controlador tipo PID ajustado pelo método de Ziegler e Nichols.</i>	4-12
<i>Figura 4.3 - Sistema em malha fechada com controlador proporcional.</i>	4-12
<i>Figura 4.4 - Resposta, ao degrau, do sistema em malha fechada com controlador proporcional. Ajustado com ganho crítico.</i>	4-13
<i>Figura 4.5 - Resposta típica de um sistema subamortecido de segunda ordem ao degrau</i>	4-15
<i>Figura 4.6 - Oscilações produzidas durante o procedimento para sintonia de controladores tipo PID utilizando-se o método de Aström e Hugglund.</i>	4-18
<i>Figura 5.1 - Diagrama em blocos da malha de controle da planta de bombeamento de água.</i>	5-1
<i>Figura 5.2 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na primeira faixa. Controlador somente em modo proporcional e com <math>PB = 0,5</math></i>	5-4
<i>Figura 5.3 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na segunda faixa. Controlador somente em modo proporcional e com <math>PB = 0,5</math>.</i>	5-4
<i>Figura 5.4 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na terceira faixa. Controlador somente em modo proporcional e com <math>PB = 1</math>.</i>	5-4
<i>Figura 5.5 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na primeira faixa com controle do tipo PI. <math>PB = 1,1</math> e <math>I = 24</math> obtidos através de Chen [1989].</i>	5-5
<i>Figura 5.6 - Sinal de saída do controlador para a primeira faixa com controle do tipo PI. <math>PB = 1,1</math> e <math>I = 24</math> obtidos através de Chen [1989].</i>	5-5
<i>Figura 5.7 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na segunda faixa com controle do tipo PI. <math>PB = 1,1</math> e <math>I = 22</math> obtidos através de Chen [1989].</i>	5-6
<i>Figura 5.8 - Sinal de saída do controlador para a segunda faixa com controle do tipo PI. <math>PB = 1,1</math> e <math>I = 22</math> obtidos através de Chen [1989].</i>	5-6

Figura 5.9 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na terceira faixa com controle do tipo PI. $PB = 2,3$ e $I = 17$ obtidos através de Chen [1989].	5-6
Figura 5.10 - Sinal de saída do controlador para a terceira faixa com controle do tipo PI. $PB = 2,3$ e $I = 17$ obtidos através de Chen [1989].	5-6
Figura 5.11 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na primeira faixa com controle do tipo PID. $PB = 0,9$ $I = 15$ e $D = 4$ obtidos através de Chen [1989].	5-7
Figura 5.12 - Sinal de saída do controlador para a primeira faixa com controle do tipo PID. $P = 0,9$ $I = 15$ e $D = 4$ obtidos através de Chen [1989].	5-7
Figura 5.13 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na segunda faixa com controle do tipo PID. $PB = 0,8$ $I = 13$ e $D = 3$ obtidos através de Chen [1989].	5-7
Figura 5.14 - Sinal de saída do controlador para a segunda faixa com controle do tipo PID. $PB = 0,8$ $I = 13$ e $D = 3$ obtidos através de Chen [1989].	5-7
Figura 5.15 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na terceira faixa com controle do tipo PID. $PB = 1,7$ $I = 10$ e $D = 3$ obtidos através de Chen [1989].	5-8
Figura 5.16 - Sinal de saída do controlador para a terceira faixa com controle do tipo PID. $PB = 1,7$ $I = 10$ e $D = 3$ obtidos através de Chen [1989].	5-8
Figura 5.17 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na primeira faixa. Sintonia efetuada através da auto-sintonia do controlador. $PB = 8,0$ $I = 14$ e $D = 3$ .	5-10
Figura 5.18 - Sinal de saída do controlador para a primeira faixa. Sintonia efetuada através da auto-sintonia do controlador. $PB = 8,0$ $I = 14$ e $D = 3$ .	5-10
Figura 5.19 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na segunda faixa. Sintonia efetuada através da auto-sintonia do controlador. $PB = 6,1$ $I = 10$ e $D = 2$ .	5-10
Figura 5.20 - Sinal de saída do controlador para a segunda faixa. Sintonia efetuada através da auto-sintonia do controlador. $PB = 6,1$ $I = 10$ e $D = 2$ .	5-10
Figura 5.21 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na terceira faixa. Sintonia efetuada através da auto-sintonia do controlador. $PB = 6,3$ $I = 7$ e $D = 2$ .	5-11
Figura 5.22 - Sinal de saída do controlador para a terceira faixa. Sintonia efetuada através da auto-sintonia do controlador. $PB = 6,3$ $I = 7$ e $D = 2$ .	5-11
Figura 5.23 - Hidrograma gerado através de simulação (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 5040s.	5-14
Figura 5.24 - Hidrograma gerado através de simulação (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 2520s.	5-14
Figura 5.25 - Hidrograma gerado através de simulação (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 1260s.	5-14
Figura 5.26 - Perfil de diferença de pressão gerado na planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 5040s.	5-16

- Figura 5.27 - Sinal de saída do controlador em % quando da geração de perfil de vazão. Tempo total do hidrograma de 5040s. \_\_\_\_\_ 5-16*
- Figura 5.28 - Perfil de vazão gerado na planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 5040s. 16*
- Figura 5.29 - Perfil de diferença de pressão gerado na planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 2520s. \_\_\_\_\_ 5-17*
- Figura 5.30 - Sinal de saída do controlador em % quando da geração de perfil de vazão. Tempo total do hidrograma de 2520s. \_\_\_\_\_ 5-17*
- Figura 5.31 - Perfil de vazão gerado na planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 2520s.5-17*
- Figura 5.32 - Perfil de diferença de pressão gerado na planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 1260s. \_\_\_\_\_ 5-18*
- Figura 5.33 - Sinal de saída do controlador em % quando da geração de perfil de vazão. Tempo total do hidrograma de 1260s. \_\_\_\_\_ 5-18*
- Figura 5.34 - Perfil de vazão gerado na planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 1260s.5-18*

## Índice de tabelas

<i>Tabela 3-1 - Tabela de dados coletados em teste estático na planta.</i>	3-7
<i>Tabela 3-2 - Tabela de dados coletados no teste para determinação da relação <math>U \times PB</math></i>	3-10
<i>Tabela 3-3 - Tabela de dados coletados no teste para verificar a relação <math>U \times Pb</math></i>	3-12
<i>Tabela 3-4 - Relação de ajustes efetuados nos parâmetros do modelo.</i>	3-15
<i>Tabela 3-5 - Relação de degraus aplicados ao processo de bombeamento de água com respectivas respostas do processo ao degrau.</i>	3-15
<i>Tabela 4.1 - Regras de determinação dos parâmetros de Ziegler e Nichols baseada no ganho e período crítico.</i>	4-13
<i>Tabela 5.1 - Valores dos parâmetros do controlador tipo PID obtidos através do método de Chen [1989].</i>	5-5
<i>Tabela 5.2 - Valores dos parâmetros do controlador tipo PID obtidos através da auto-sintonia do controlador utilizado.</i>	5-10
<i>Tabela 5.3 - Valores encontrados para a ISEU.</i>	5-12

# **1** *Introdução*

Descrevem-se neste capítulo os objetivos, as atividades executadas e a organização deste trabalho. Dá-se uma visão geral do trabalho efetuado, dos motivos para o qual foi executado e como se desenvolveu. O capítulo foi dividido nas seguintes seções: relevância e objetivo do trabalho (seção 1.1) e descrição do trabalho (seção 1.2).

## **1.1 Relevância e objetivos do trabalho**

"O aproveitamento dos recursos hídricos requer concepção, planejamento, projeto, construção e operação de meios para o domínio e a utilização das águas... Cada projeto de aproveitamento hídrico supõe um conjunto específico de condições físicas às quais deve ser condicionado, razão pela qual dificilmente podem ser aproveitados projetos padronizados que conduzam a soluções simples, estereotipadas." [Linsley and Franzini, 1978].

No contexto destas afirmações vê-se que o estudo dos fatores envolvidos em um projeto hídrico é da maior importância. Assim, a utilização de modelos reduzidos para o estudo destes fatores se torna extremamente necessária, pois, através destes modelos reduzidos poderão ser estudados os tipos de estruturas e conseqüente forma, dimensionamento dos diversos componentes do projeto, vida útil do mesmo, comportamento dinâmico, entre outros. Um dimensionamento correto dos componentes do projeto pode ser alcançado

diminuindo-se desperdícios e coeficientes de segurança exagerados além de possibilitar o estudo de alternativas até então não utilizadas. Um exemplo da necessidade de utilização destes modelos está relacionado aos dissipadores de energia.

Devido às características dos escoamentos em dissipadores de energia, considera-se que a sua descrição analítica deva ser desenvolvida através de pesquisas, pois os fenômenos têm caracter bifásico e não linear, portanto, os seus mecanismos são complexos e requerem relativamente muito tempo para serem simulados. Para a compreensão deste fenômeno é necessário que o mesmo seja monitorado para diferentes condições de funcionamento. Desta forma, baseiam-se os estudos na aquisição de dados de variação de pressão, nível e velocidade no sistema em questão utilizando-se os seguintes itens:

- Velocímetro a Laser-Doppler (LDV): É um equipamento que permite, por meio ótico não intrusivo, a medição instantânea de velocidades pontuais e de suas respectivas medidas de turbulência;
- Transdutores de pressão para obtenção de dados de pressão e de nível ao longo do modelo;
- Sondas capacitivas para obtenção de dados de variação de nível ao longo do modelo;
- Placas de aquisição de dados, e
- Programas de aquisição de dados.

Os ensaios são realizados de modo a permitir uma compreensão das características de funcionamento das estruturas. Para isto se tem uma série de tomadas de pressão ao longo de todo o sistema. As tomadas de pressão fornecem dados relativos ao escoamento e juntamente com as informações fornecidas pelo velocímetro laser e pelas sondas capacitivas permitem o mapeamento dos fenômenos que ocorrem nesta estrutura.

O sistema de velocimetria a laser, também comumente denominado de Anemômetro a Laser-Doppler (LDV), é uma técnica experimental e compõe-se de uma fonte laser, um módulo ótico de emissão, um módulo ótico de recepção, um sistema de análise do sinal e um aparato eletrônico para o processamento dos dados. Este tema foi objeto específico

do trabalho de Durst, *et alli* [1976] e Fiedler [1992] e, mais resumidamente, em Rios [1988] e Araújo [1993].

De posse deste tipo de equipamento pode-se fazer um mapeamento das características de funcionamento de uma estrutura hidráulica. Entretanto, o funcionamento sob condições transitórias tem sido pouco explorado devido às limitações do sistema de instrumentação e do acionamento do conjunto moto-bomba. A instrumentação se encontra parcialmente resolvida faltando o sistema de controle das bombas para geração de perfis de vazão.

Pelo exposto, vê-se a necessidade eminente de se disponibilizar plantas de utilidades para abastecer modelos reduzidos, nos quais poderão ser efetuados vários tipos de estudos incluindo-se o da dinâmica de projetos hídricos.

A fim de possibilitar tais estudos, neste trabalho objetivou-se a adequação de uma planta de bombeamento de água existente no Laboratório de Hidráulica da UFMG para a geração de perfis de vazão. Os perfis de vazão irão abastecer modelos reduzidos dotando o Laboratório de capacidade de efetuar grande quantidade de estudos em projetos hídricos. Como ganho, torna-se possível através do Laboratório de Hidráulica, a realização de estudos tais como: controle de enchentes, sistemas de drenagem, aproveitamento hidroelétrico, abastecimento de água e sistemas de irrigação [Linsley and Franzini, 1978], etc. *e.g.*: nos estudos de navegabilidade e/ou estabilização de fundo e margens, em hidráulica fluvial, a vazão modeladora aplicada é constante (margens plenas -  $Tr = 1,5$  a  $2,0$  anos) e existem dificuldades quanto ao equacionamento do sistema. Com o desenvolvimento deste trabalho, a aplicação de perfis de vazão será possível e conseqüentemente o equacionamento, que é fruto de limitações nos laboratórios, torna-se passível de redução.

Definida a intenção de se disponibilizar a planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica para a geração de perfis de vazão, tornou-se necessário o acréscimo de alguns itens à mesma.

Inicialmente, com a planta operando em malha aberta<sup>1</sup>, não era possível gerar perfis de vazão predefinidos, pois, em malha aberta, não dispo de nenhum tipo de realimentação (conforme visto na figura 1.1), não se tinha meios para eliminar possíveis erros na saída da mesma (variável de processo) em relação ao valor desejado (valor de referência). Outros problemas relativos à dinâmica e operação da planta também contribuíram para a necessidade de inclusão de itens à planta (e.g. resposta ao degrau muito lenta).

Com o acréscimo de alguns itens, a planta de bombeamento de água foi levada a operar em malha fechada<sup>2</sup>, conforme visto na figura 1.2, e passou a ser possível gerar perfis de vazão preestabelecidos a partir da mesma.

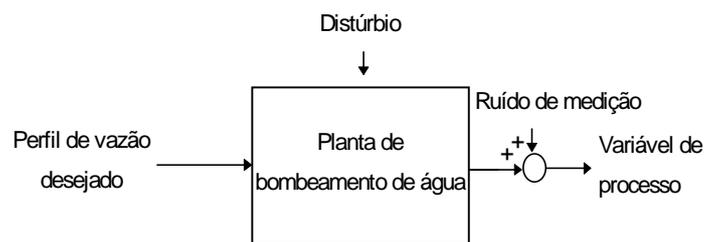


Figura 1.1- Diagrama em blocos do sistema em malha aberta da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica.

---

<sup>1</sup> Sistemas em que a saída do processo não tem nenhum efeito sobre a entrada do mesmo.

<sup>2</sup> Sistemas em malha fechada são sistemas em que a saída é medida e realimentada a fim de ser comparada com um valor desejado e assim influenciar na entrada do processo.

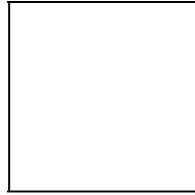


Figura 1.2 - Diagrama em blocos do sistema em malha fechada da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica.

Salienta-se que este trabalho é de cunho prático, que como fruto do desenvolvimento do mesmo obteve-se uma planta piloto capaz de executar testes de grande relevância em hidráulica; uma preocupação que permeou as etapas do mesmo foi a de se fazer alterações de baixíssimo custo e de não se alterar a planta original.

Ressaltamos ainda que o desenvolvimento deste trabalho faz parte de um esforço de aproximação entre as diversas áreas na Escola de Engenharia da UFMG e resultou em um estudo que irá flexibilizar o laboratório de Hidráulica, permitindo a execução de trabalhos que incorporem características de fenômenos transitórios.

## 1.2 Descrição do trabalho

Nesta seção são apresentadas as atividades envolvidas na elaboração desta dissertação e a sua organização em capítulos.

No capítulo 2 descreve-se a planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica da UFMG. As atividades envolvidas nesta etapa do trabalho foram: levantamento de dados, operação da planta, implementação do sistema de controle e determinação do modo de operação da planta após a implementação do sistema de controle.

A partir do levantamento de dados foram definidos os componentes da planta, seu modo de operação e as necessidades relativas à implantação do sistema de controle. A seguir,

de posse dos equipamentos necessários, foi efetuada a montagem e instalação destes. Como última atividade desenvolvida nesta etapa, foi definido o modo de operação da planta com o sistema de controle implementado.

No capítulo 3 descreve-se a modelagem do processo de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica. O mesmo é dividido nas seguintes seções: equacionamento do modelo, levantamento dos parâmetros do modelo e validação do modelo. As atividades envolvidas nesta etapa do trabalho foram: equacionamento, através do balanço de massa, aplicação de testes em regime permanente na planta, codificação do modelo em ambiente Matlab<sup>3</sup>, aplicação de testes dinâmicos na planta, sintonia e validação do modelo.

No capítulo 4 são estudados os controladores do tipo PID (proporcional, integral e derivativo). Os controladores, em geral, podem ser considerados o centro do sistema de controle pois, são os responsáveis por levar o sistema ao ponto desejado. Alguns tipos de algoritmos PID, problemas encontrados e métodos de sintonia também são discutidos nesse capítulo.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos. Em particular, descreve-se a geração de perfis de vazão utilizando-se a planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica. O mesmo é dividido nas seguintes seções: sintonia do controlador, geração de perfis de vazão em simulações e geração de perfis de vazão na planta de bombeamento de água.

---

<sup>3</sup> Aplicativo utilizado para resolução de problemas matemáticos com o auxílio de computador.

A sintonia do controlador foi efetuada através de teste aplicado diretamente ao processo. Com o controlador sintonizado foram gerados perfis de vazão utilizando-se a planta de bombeamento de água e também em simulações. Para serem efetuadas as simulações foi criado no ambiente Matlab um programa que simula o processo em malha fechada.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões do trabalho e nos apêndices as listagens dos programas gerados em Matlab.

---

## Referência bibliográfica do capítulo

Araújo, j. c. (1993). Velocimetria a Laser-Doppler e Sua Aplicação à Hidráulica. *Rev. Engenharia*, ASTEF e CT-UFC, Fortaleza, n. 10, p.61-69.

Durst, Melling E Whitelaw (1976). *Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry*. Academic Press. London. 405p.

Fiedler, O. (1992) *Strömungs- und Durchflußmeßtechnik*. Oldenburg Verlag. München. Kap..7.

Linsley, R. K. and Franzini, J. B. (1978). Engenharia de recursos Hídricos, *McGraw-Hill do Brasil Ltda*.

Lopardo, R.A., Vernet, G.F. and Chicidini, M.F. (1985), Modelling the behaviour of high head hydraulic jump energy dissipators under flood conditions, Proc. 2nd International Conference on the Hydraulic of Floods & Flood Control, Cambridge, England, BHRA, The Fluid Engineering Center. Paper G1.p.313-323.

Marques, M. G. (1995). Nouvelle approche pour le dimensionnement des dissipateurs à auge. These de doctorat a presentada a Faculté de 'tudes supérieures da Université Laval - 328p.

Rios, J.L.P. (1988). Construção e Utilização do Anemômetro a Laser no Estudo de Escoamentos Turbulentos. RBE - *Caderno de Rec. Hídricos*. V.6, n.2

# **2** *Descrição da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica*

Neste capítulo descreve-se a planta de bombeamento de água anteriormente disponível e sua operação, as alterações efetuadas na mesma e como, efetuadas as alterações, a planta é operada. A divisão do mesmo foi executada da seguinte maneira: planta disponível (seção 2.1); operação da planta anterior à implantação do sistema de controle (seção 2.2); implantação do sistema de controle (seção 2.3) e operação da planta após a implantação do sistema de controle (seção 2.4).

## **2.1 Planta disponível**

Na realização deste trabalho utilizou-se a planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica da EEUFMG. A mesma, conforme visto no diagrama da figura 2-1 e nas fotografias da figura 2-2, é composta por:

- 01 (um) reservatório de  $2,5 \text{ m}^3$  (2 500 l) - TQ\_01;
- 01 (um) poço de sucção de  $12,3 \text{ m}^3$  (12 300 l) - TQ\_02;
- Tubulação;
- 01 (uma) bomba d'água com capacidade de  $25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  (25 l/s);
- 01 (um) motor de indução trifásico de 5 cv;
- 01 (um) conversor de frequência de 6,1 kVA;

- 01 (um) sistema de proteção e comando elétrico;
- 02 (dois) elementos primários de medição, uma placa de orifício (FE\_01) e um tubo Venturi (FE\_02), e
- 03 (três) tomadas de pressão (PI\_01, PI\_02 e PI\_03).

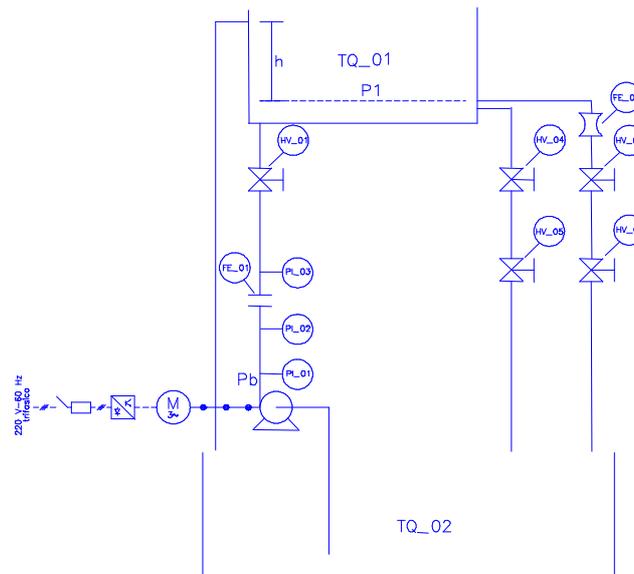


Figura 2-1 - Diagrama de instrumentação da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica anteriormente à implantação do sistema de controle<sup>1</sup>.

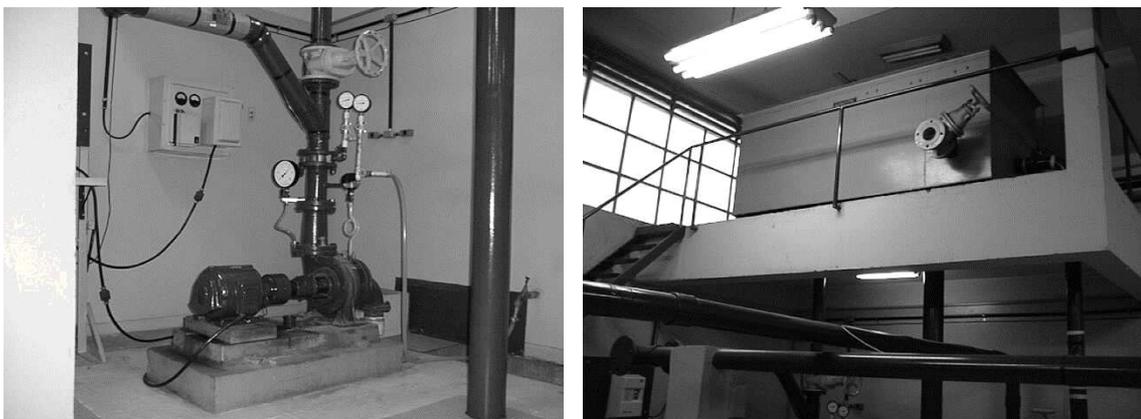


Figura 2-2 - Fotografias das instalações do Laboratório de Hidráulica.

<sup>1</sup> A nomenclatura utilizada nos diagramas de instrumentação deste trabalho está de acordo com a norma ANSI/ISA - S5.1-1994 (R1992) [ISA, 1994].

A planta de bombeamento de água encontrasse submetida às seguintes condições de serviço<sup>2</sup>:

- Pressão atmosférica: 10.300 kgf/m<sup>2</sup>;
- Água sujeita a eventuais impurezas;
- Vazão máxima:  $25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  (25 l/s);
- Altura manométrica de sucção máxima: 3,45 m;
- Altura manométrica de sucção mínima: 0,80 m;
- Altura manométrica de recalque máxima: 3,60 m, e
- Altura manométrica de recalque mínima: 2,70 m;

A seguir será descrito com mais detalhes todos os componentes da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica da UFMG.

### 2.1.1 Reservatório (TQ\_01)

A planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica possui um reservatório com capacidade de 2,5 m<sup>3</sup> (2 500 l) e, conforme pode ser verificado na figura 2-2, ao mesmo está conectada uma tubulação de entrada e três tubulações de saída de água.

Através da tubulação de entrada é efetuado o bombeamento (recalque) de água do poço de sucção para o reservatório e utilizando-se as tubulações de saída (total de três) é executado o esvaziamento do mesmo. A entrada de água do reservatório situa-se na parte inferior do mesmo enquanto as saídas estão conectadas nas laterais.

---

<sup>2</sup> Condições de serviço são as condições de temperatura, pressão, etc. às quais os equipamentos estão submetidos.

Das três saídas do reservatório uma objetiva evitar o transbordamento (extravasor) enquanto as outras duas são utilizadas para o esvaziamento do mesmo e definidas como saída de esvaziamento principal e secundária. A saída principal é a que possui um tubo Venturi e é de interesse no presente trabalho ao passo que a outra foi mantida constantemente fechada e é definida como secundária.

### 2.1.2 Poço de sucção (TQ\_02)

O poço de sucção que compõe a planta de bombeamento de água possui capacidade de armazenamento de 12,3 m<sup>3</sup> (12 300 l), localiza-se abaixo da bomba d'água e possui duas funções que são: o abastecimento da água que será bombeada para o reservatório e a captação da água proveniente do esvaziamento do reservatório.

### 2.1.3 Tubulação

A tubulação<sup>3</sup> da planta, que provê a interligação das diversas partes da mesma, pode ser dividida em cinco partes: tubulação de sucção, tubulação de recalque, extravasor, tubulação de esvaziamento principal e tubulação de esvaziamento secundária.

Solidárias à tubulação, têm-se cinco válvulas manuais: uma na saída da bomba (válvula de recalque - HV\_01), duas na saída principal (válvula principal A<sup>4</sup> - HV\_02 e válvula principal B - HV\_03) e duas na saída secundária de água do reservatório (válvula secundária A - HV\_04 e válvula secundária B - HV\_05).

---

<sup>3</sup> Toda a tubulação da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica é de ferro fundido e com diâmetro compreendido entre 50 e 150 mm.

<sup>4</sup> As válvulas principal A e secundária A são as primeiras válvulas da tubulação de esvaziamento principal e secundária, respectivamente, em relação ao sentido do fluxo d'água.

Neste trabalho, as válvulas HV\_04 e HV\_05 foram mantidas totalmente fechadas enquanto as demais foram mantidas totalmente abertas.

#### 2.1.4 A bomba d'água

A bomba d'água juntamente com o motor de indução, que podem ser vistos na figura 2-2, são os componentes do sistema responsáveis pela transformação da energia elétrica disponível em cinética e pela transferência desta energia para a água. As características<sup>5</sup> da mesma são:

- Bomba do tipo centrífuga;
- Eixo horizontal;
- Carcaça de ferro fundido;
- Capacidade de bombeamento de  $25 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  (25 l/s);
- Montagem horizontal, e
- Fabricação de Societa Italiana Pompe Aturia, em 1956.

Na planta, em questão, a bomba d'água trabalha desafogada, isto é, o reservatório de sucção está abaixo do nível em que a bomba se encontra.

#### 2.1.5 Motor de indução

A bomba centrífuga do Laboratório de Hidráulica é acionada por um motor trifásico de indução e possui as seguintes características:

- Frequência nominal de alimentação: 60 Hz;
- Tensão: 220 V;

---

<sup>5</sup> As características descritas neste trabalho para a bomba d'água e motor de indução são as sugeridas por Nogami, *et alli* [1975].

- Velocidade nominal: 1.150 rpm;
- Potência: 5 cv;
- Modelo: AT6/6;
- Montagem horizontal, e
- Fabricação de Societa Italiana Pompe Aturia, em 1956.

### 2.1.6 O conversor de freqüência

O conversor de freqüência existente na planta de bombeamento de água, conforme visto na figura 2-3, foi fabricado pela WEG, é da série CFW-02, possui potência de 6,1 kVA e é alimentado em 220 V trifásico (código CFW-02 6,1 / 220). A série CFW-02 consiste em conversores de freqüência do tipo PWM (Modulação por Largura de Pulso) senoidal, projetado para alimentar motores de indução trifásicos [Weg Automação Ltda, 1993].



Figura 2-3 - Fotografia do conversor de freqüência.

O circuito de potência destes conversores utiliza um retificador não controlado na entrada, um filtro capacitivo e um inversor transistorizado (com transistores de alto ganho). A eletrônica de controle é baseada em um microprocessador de 16 bits, sendo que as funções de regulação e proteção são desenvolvidas via software.

Na parte frontal dos mesmos está instalada uma IHM (Interface Homem × Máquina) composta de: um visor luminoso, um botão liga, um botão desliga, um botão para incrementar e outro para decrementar a velocidade. Através da IHM todos os ajustes de operação, regulação e proteção do conversor são efetuados e, após definidos, são armazenados em memória EEPROM. A operação local do conversor (ligar, desligar e alterar a frequência) também é possível através da IHM deste. Porém, para aplicação neste trabalho foi utilizado um sistema de controle em malha fechada e o conversor foi operado remotamente, através do sinal proveniente do controlador. Assim, a IHM foi utilizada somente para ajustar os parâmetros, ligar e desligar o conversor ao passo que a alteração da frequência foi efetuada através de uma entrada remota em 4 a 20 mA.

### 2.1.7 Sistema de proteção

A fim de se promover a proteção do motor de indução existe, interligado entre o motor e a rede de alimentação, um conjunto de proteção composto por:

- Chave de faca blindada tipo D, 60 A, 250 V, 3 pólos. Fabricação Westinghouse, e
- Conjunto de proteção/operação de fabricação Siemens, que possui os seguintes componentes:
  - ✓ Fusível 500 V, 25 A ultra rápido, Silized;
  - ✓ Relé térmico modelo 3AUA11;
  - ✓ Contator trifásico modelo 3TA21 11-OA;
  - ✓ Botoeira liga, NA, e
  - ✓ Botoeira desliga, NF.

A figura 2-4 mostra uma fotografia do sistema de proteção do motor.



Figura 2-4 - Fotografia do sistema de proteção do motor.

### 2.1.8 Elemento primário de medição

Os elementos primários de medição existentes na planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica, uma placa de orifício e um tubo Venturi, são do tipo deprimogênio [Delmée, 1983]. Então, a partir de uma diferença de pressão ( $\Delta P$ ) gerada por estes elementos é inferido a vazão.

A placa de orifício (FE\_01) está instalada na tubulação de recalque, logo à saída da bomba de recalque, e o tubo Venturi (FE\_02) na tubulação de esvaziamento principal (ver figura 2-5). Neste trabalho, as medições referentes a vazão foram efetuadas somente utilizando o tubo Venturi. Portanto, a placa de orifício não foi utilizada.

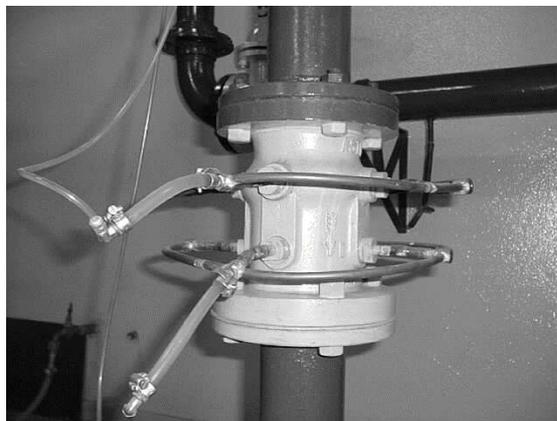


Figura 2-5 - Fotografia do tubo Venturi instalado na saída principal do reservatório.

As características do tubo Venturi utilizado e a equação que relaciona a vazão com a diferença de pressão são apresentados a seguir:

- Para uso com água;
- Garganta com diâmetro de 100 mm;
- Possui quatro tomadas de pressão individuais conectadas através de uma câmara anular que é responsável por equalizar as tomadas de pressão individuais, e
- Cone divergente com diâmetro de 69 mm e quatro tomadas de pressão individuais conectadas através de uma câmara anular.

$$q = k \sqrt{\frac{\Delta P}{\gamma}}, \quad (2.1)$$

onde:

$q$  é a vazão, em  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$\Delta P$  é a diferença de pressão no tubo Venturi, em  $\text{kgf}/\text{m}^2$ ;

$\gamma$  é o peso específico da água, em  $\text{kgf}/\text{m}^3$ , e

$$k = \frac{63,7}{3600}.$$

Anteriormente à instalação do sistema de controle, as medições eram todas efetuadas através de instrumentos indicadores locais, tubo em U e manômetros, sem saída para indicação e/ou controle remoto.

### **2.1.9 Tomadas de pressão**

A planta de bombeamento de água possui no total três tomadas de pressão manométrica com indicação local do ponto ao qual está instalada. Conforme visto na figura 2-1, as tomadas estão todas localizadas na tubulação de recalque e indicam: a pressão de saída da bomba (PI\_01) e a pressão nas extremidades da placa de orifício (PI\_02 e PI\_03). O valor da pressão em PI\_01 e PI\_02 é a mesma a menos de uma pequena coluna de água que as separa.

As tomadas de pressão foram amplamente utilizadas quando do levantamento das características do sistema para fins de modelagem, conforme descrito no capítulo 3.

## **2.2 Operação da planta anterior à implantação do sistema de controle**

A planta de bombeamento de água era anteriormente operada através dos seguintes procedimentos:

- A chave de faca era fechada manualmente;
- A botoeira liga, NA, do conjunto de proteção era acionada;
- Através da IHM, no frontal do conversor, as seguintes operações eram efetuadas:
  - ✓ O motor era energizado;
  - ✓ A frequência era alterada, e
  - ✓ O motor era desenergizado.
- A botoeira desliga, NF, do conjunto de proteção era acionada, e
- A chave de faca era aberta.

Com este tipo de operação os seguintes inconvenientes eram observados:

- A operação, através da IHM do conversor de frequência, impossibilitava a alteração rápida e em pequenos intervalos de tempo da frequência;
- Era necessário um mapeamento prévio, em frequência, dos valores de vazão desejados;
- Em função de operar em malha aberta, qualquer alteração no sistema, distúrbio, conduzia o sistema a um valor errôneo de vazão, e
- A resposta do sistema era relativamente lenta impossibilitando variações de vazão mais agressivas.

Conseqüentemente, era inviável a geração de perfis de vazão. Assim, foi necessária a implantação de um sistema de controle que visa possibilitar a geração de perfis de vazão que venham atender às necessidades do Laboratório de Hidráulica.

### **2.3 Implantação do sistema de controle**

A implantação do sistema de controle consistiu na adição à planta existente dos seguintes itens:

- 01 (um) medidor/transmissor de diferença de pressão (PT\_02);
- 01 (um) medidor/transmissor de nível (PT\_01);
- 01 (um) controlador do tipo PID (PC\_01);
- 01 (uma) placa de aquisição de dados PCL 711;
- 01 (um) microcomputador PC 486 DX2 66;
- 01 (uma) console de operação;
- 02 (duas) tomadas de pressão;
- Calibração e ajustes;
- Interligação dos novos componentes do sistema entre si e à planta existente, e
- Software para a placa de aquisição de dados.

Com a instalação e interligação destes novos itens obteve-se um sistema em malha fechada, conforme visto na figura 2-6 e um novo procedimento de operação. A fim de facilitar a leitura a representação em blocos do sistema em malha fechada, ver figura 2-7, é novamente apresentada neste capítulo.

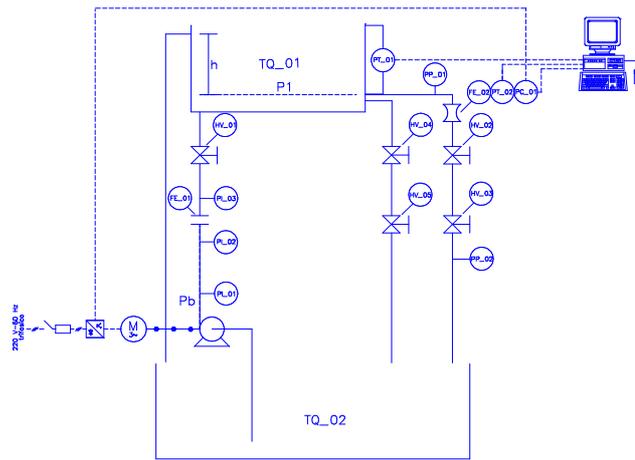


Figura 2-6 - Diagrama de instrumentação da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica após a implantação do sistema de controle.

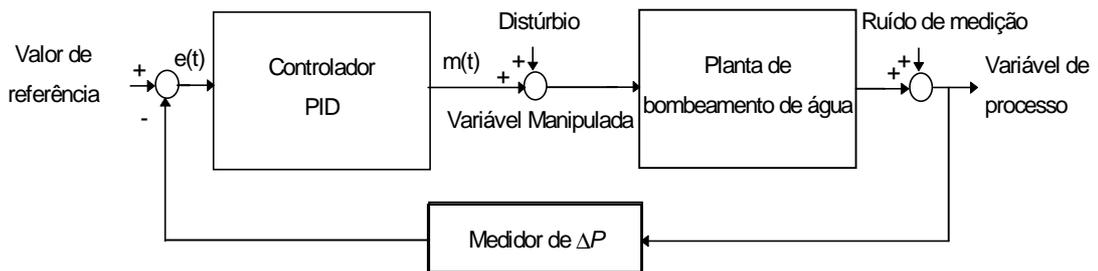


Figura 2-7 - Diagrama em blocos do sistema em malha fechada da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica. O bloco planta de bombeamento de água representa a planta existente (ver seção 2.1).

A fim de promover uma melhor visão da planta de bombeamento de água, após a implementação do sistema de controle, uma fotografia da mesma é apresentada na figura 2-8 e os novos itens integrantes do sistema serão descritos com mais detalhes nas seções a seguir.

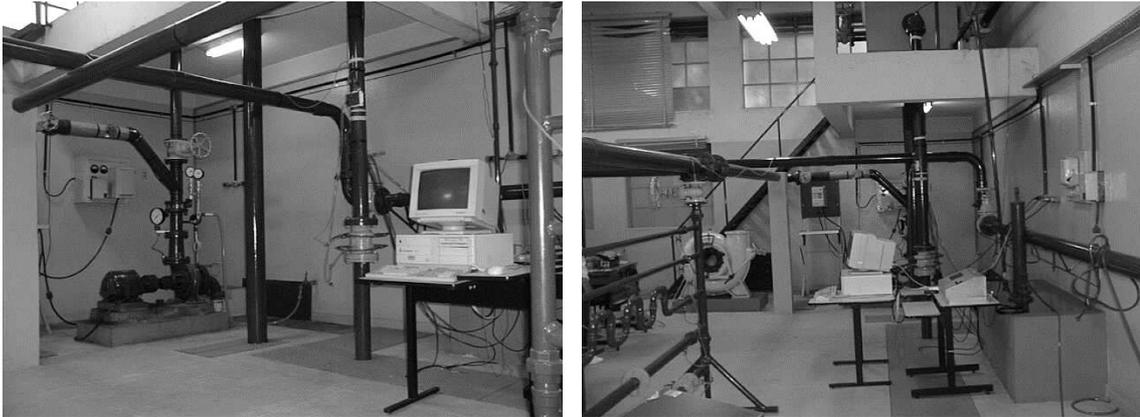


Figura 2-8 - Fotografia das instalações do Laboratório de Hidráulica após a implantação do sistema de controle.

### 2.3.1 Medidor de diferença de pressão (PT\_02) e de nível (PT\_01)

O medidor de diferença de pressão e o de nível utilizados nesta aplicação são derivados de um medidor de nível projetado por ex-alunos do curso de graduação de Engenharia Elétrica da UFMG [Magalhães, *et alli*, 1996] e foi aprimorado por Morais [1998]. Tanto o projeto como o aprimoramento dos medidores foram desenvolvidos sob a orientação do professor Luís Antônio Aguirre e foram anteriormente também utilizados com sucesso em outro trabalho de pós graduação [Camargo, 1997]. Uma fotografia de cada um destes medidores/transmissores é apresentada na figura 2-9.

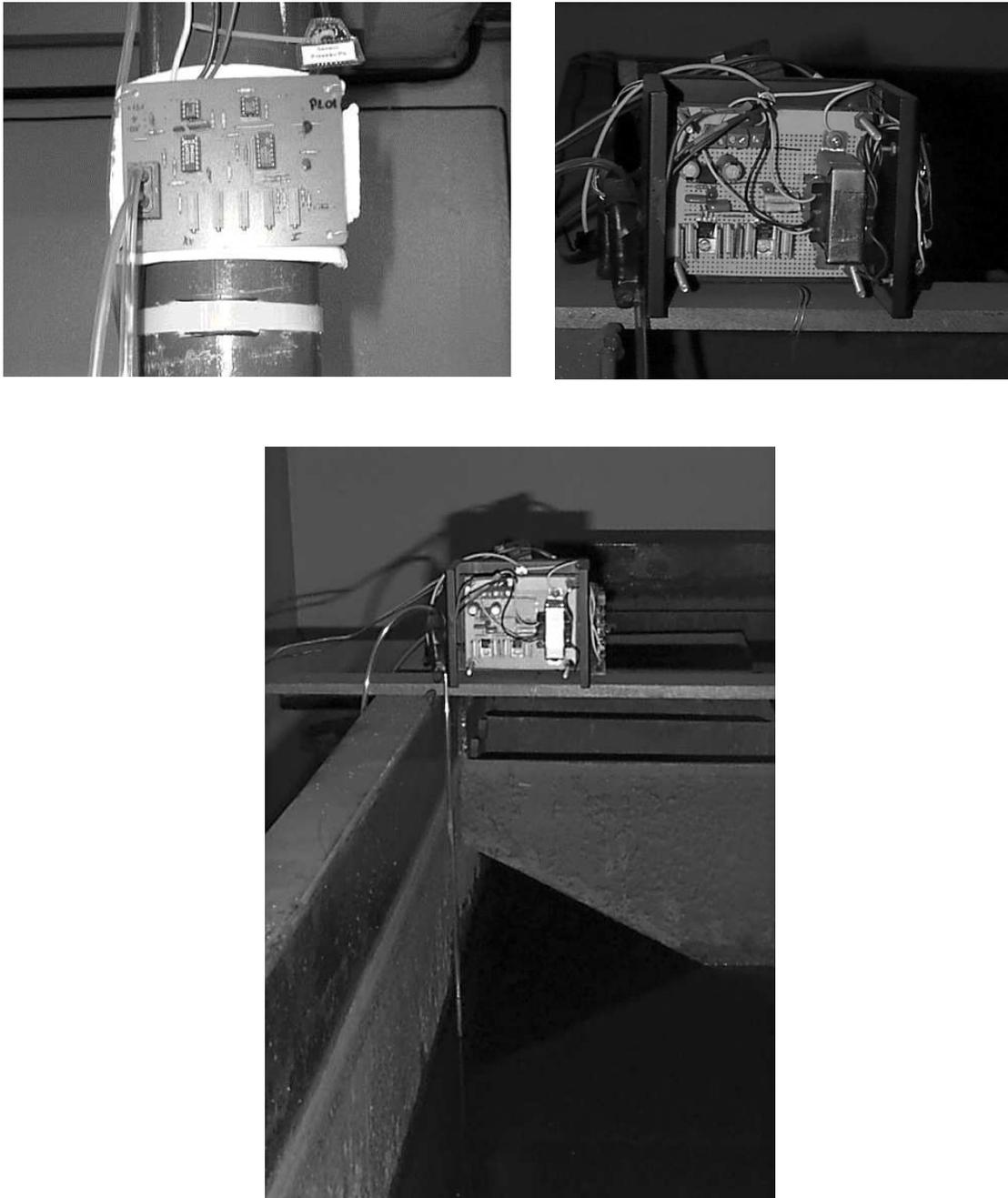


Figura 2-9 - Fotografia dos medidores/transmissores de pressão e nível. O medidor da esquerda mostra o medidor/transmissor de pressão . Os outros dois são vistas do medidor/transmissor de nível.

O princípio de funcionamento dos medidores é o mesmo. Um sensor<sup>6</sup> piezo-resistivo com duas tomadas de pressão gera um sinal elétrico de tensão que é proporcional ao  $\Delta P$

---

<sup>6</sup>A escala do sensor utilizado no medidor de diferença de pressão é de 0 a 15 PSI e o do utilizado no medidor de nível é de 0 a 30 PSI.

entre as tomadas. Então, o sinal elétrico é amplificado e condicionado de forma a fornecer um sinal entre 1 e 6 Volts.

Desta forma, as tomadas de pressão do sensor piezo-resistivo podem ser conectadas às extremidades de um tubo Venturi ou em pontos distintos de um reservatório, por exemplo, fornecendo a vazão e o nível que são inferido através da diferença de pressão no Venturi e no reservatório respectivamente.

Nesta aplicação, a partir da diferença de pressão obtida nas extremidades do tubo Venturi e da relação entre a vazão e a diferença de pressão ( $\Delta P$ ), que pode ser observada através das equações (2.1), (2.2), equação da continuidade e (2.3), equação de Bernoulli, será inferida a vazão.

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = q \quad (2.2)$$

onde:

$S_1$ ,  $S_2$  são as seções retas nos pontos 1 e 2 respectivamente;

$v_1$ ,  $v_2$  são as velocidades médias nos pontos 1 e 2 respectivamente, e

$q$  é dada pela equação (2.1).

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \sum \lambda, \quad (2.3)$$

onde:

$g$  é a aceleração da gravidade, em  $m/s^2$ ;

$P_1$ ,  $P_2$  são as pressões nos pontos 1 e 2 respectivamente, em  $kgf/m^2$ ;

$Z_1$ ,  $Z_2$  são as cotas da tubulação, em relação a um plano horizontal, nos pontos 1 e 2 respectivamente, em m, e

$\sum \lambda$  são as perdas de carga por atrito e as localizadas devidas às mudanças de direção ou de seção, ou a peças especiais e demais singularidades, em m.

Para o medidor de nível, que foi utilizado somente na modelagem do sistema, os valores de nível foram inferidos a partir da diferença de pressão entre a atmosfera e o fundo<sup>7</sup> do reservatório. As equações que relacionam nível (altura) e diferença de pressão são apresentadas em (2.4), (2.5) e (2.6).

$$P1 = h\gamma + Patm, \quad (2.4)$$

onde:

$P1$  é a pressão no nível da saída principal do reservatório, em  $\text{kgf/m}^2$ ;

$h$  é a altura do nível do reservatório, em m, e

$Patm$  é a pressão atmosférica, em  $\text{kgf/m}^2$ .

Portanto,

$$\Delta P = P1 - Patm \quad (2.5)$$

e logo

$$h = \frac{\Delta P}{\gamma}. \quad (2.6)$$

A fim de prover alimentação para o sensor de diferença de pressão está sendo utilizada uma fonte de alimentação simétrica de 15 Volts enquanto a alimentação do medidor de nível é obtida através da rede elétrica em 127 Volts.

---

<sup>7</sup> Pressão no nível da saída principal do reservatório.

### 2.3.2 Controlador

O controlador é o elemento do sistema responsável por efetuar a comparação entre o valor de referência (SP) e a variável de processo (PV) e, em função desta comparação e do seu algoritmo de controle, o mesmo irá atuar no processo, através de sua saída ( $m$ ), a fim de tornar o valor de PV coincidente ao valor de referência (SP).

Neste trabalho, o algoritmo que encontra-se implementado no controlador utilizado foi obtido através de testes e de informações contidas no manual do controlador, é do tipo PID posicional e é apresentado em (2.7).

$$m(t) = \frac{100}{PB} \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int edt + T_d \frac{de}{dt} \right], \quad (2.7)$$

onde:

$m(t)$  é a saída do controlador no tempo;

$e(t)$  é a diferença entre SP e PV (erro) no tempo;

PB é a banda proporcional;

$T_i$  é o tempo integral, e

$T_d$  é o tempo derivativo.

A configuração do controlador utilizado é flexível, sendo definida de acordo com a necessidade do usuário que, através de duas chaves (uma chave tipo DIP e uma tipo rotativa) situadas na parte interna do chassi do controlador, opta entre as possibilidades

oferecidas. Então, de acordo com o posicionamento das chaves teremos a configuração desejada que é definida a partir dos seguintes itens:

- Tipo de entrada (Termopar, RTD ou tensão elétrica<sup>8</sup>);
- Tipo de saída (a relé ON/OFF ou proporcional ao PID, em pulso ou contínua de 4 a 20 mA);
- Estado da saída em caso de anormalidades;
- Existência de múltiplos valores de referência ou não, e
- Seleção entre definição de parâmetros de inicialização ou de operação.

Além da flexibilidade de configuração, o controlador (UT37) utilizado, através da sua IHM, possibilita a definição dos parâmetros de inicialização e de operação. A escolha destes parâmetros é efetuada com base nos itens a seguir:

- Parâmetros de inicialização:
  - ✓ Habilita/Desabilita alterações de parâmetros através da IHM do controlador;
  - ✓ Definição do máximo e do mínimo valor de PV de acordo com o máximo e mínimo valor de entrada;
  - ✓ Definição do máximo e do mínimo valor para o valor de referência;
  - ✓ Escolha entre ação direta<sup>9</sup> ou reversa;
  - ✓ Escolha do modo de operação do controlador no retorno de faltas;
  - ✓ Ajuste dos parâmetros da função de anti-sobressinal, e
- Parâmetros de operação:
  - ✓ Definição dos valores de alarme;
  - ✓ Ajuste para o sinal de referência remoto;
  - ✓ Escolha entre referência local ou remota;

---

<sup>8</sup> O tipo do termopar, RTD e tensões de entrada aceitáveis estão disponíveis no manual do controlador [Yokogawa Electric Corporation, 1995].

<sup>9</sup> Na ação direta, a saída do controlador é diretamente proporcional ao erro. Na ação reversa a saída do controlador é inversamente proporcional ao erro.

- ✓ Habilita/desabilita função que suprime sobressinal;
- ✓ Habilita/desabilita sintonia automática;
- ✓ Ajuste para o sinal de entrada;
- ✓ Ajuste do valor de referência;
- ✓ Ajuste do parâmetros P, I e D do controlador;
- ✓ Limitação da saída, e
- ✓ Escolha de zonas de controle (uma ou três).

O modelo do controlador e indicador digital utilizado nesta aplicação é UT37/RSP. O mesmo é de fabricação Yokogawa Electric Corporation [Yokogawa Electric Corporation,1995] e é apresentado na figura 2-10. Maiores informações a respeito deste podem ser verificadas nos manuais do mesmo (Manual de operação e Manual de instalação) [Yokogawa Electric Corporation,1995].



Figura 2-10 - Fotografia do controlador do tipo PID UT 37 da Yokogawa.

### 2.3.3 Placa de aquisição de dados

Uma placa de aquisição de dados foi utilizada para obter dados analógicos provenientes do processo e também para gerar um sinal analógico de referência para o sistema de controle. Os dados analógicos aqisitados, provenientes do medidor de diferença de pressão, do medidor de nível e da saída do controlador ( $m$ ), foram utilizados para análise

*off line* do sistema sendo que o sinal analógico de referência foi gerado *on line* e mandado como referência para o controlador.

Na planta de bombeamento de água, a placa de aquisição de dados utilizada foi a PCL-711 B de fabricação Advantech Co., Ltda. Esta placa de aquisição é compatível com o barramento IBM PC/XT/AT e possui as seguintes características:

- Conversor A/D com resolução de 12 bits;
- 08 (oito) entradas analógicas com tensão de entrada programável;
- 01 (uma) saída analógica (0 a +5 ou 0 a +10 volts);
- 01 (uma) entrada digital;
- 01 (uma) saída digital, e
- Configuração através de hardware e software.

A configuração através de hardware é efetuada utilizando-se uma chave tipo DIP e uma conexão entre pinos (*jumper pins*). Utilizando-se a chave tipo DIP é selecionado o endereço da placa no barramento de dados e com a conexão dos pinos, a tensão da saída analógica. As demais possibilidades de configuração permitidas (tensão de entrada, número de canais aquisitados, frequência de amostragem, etc.) são efetuadas através de software que deve ser desenvolvido nos software's de programação suportados pela placa PCL-711 B que são: BASICA, GWBASIC, QUICKBASIC, Microsoft C/C ++ e PASCAL, Borland C/C ++ e Turbo PASCAL.

Maiores informações sobre a placa PCL-711 B podem ser obtidas no manual da mesma [Advantech Co., Ltda, 1992].

### 2.3.4 Microcomputador

O microcomputador utilizado na planta de bombeamento de água é um PC 486 DX2-66 de fabricação Gateway2000 que abriga a placa de aquisição de dados e também o software desenvolvido para a mesma. As características do microcomputador são:

- Frequência de processamento de 66 MHz;
- Disco rígido de 350 Mb;
- Dispositivo para leitura e escrita em disco flexível de 3,5";
- Dispositivo para leitura e escrita em disco flexível de 5,25";
- Monitor de vídeo colorido de 14" SVGA, e
- Memória RAM de 8 Mb.

### 2.3.5 Console de operação

A fim de abrigar alguns elementos do sistema de controle da planta de bombeamento de água, foi montada ao longo do presente trabalho uma console de operação. Nesta console estão instalados: o controlador, a fonte de alimentação simétrica de 15 Volts, um disjuntor de 1 A, um filtro passa baixas e bornes. Através da console de operação, mais precisamente do controlador, é possível operar a planta de bombeamento de água.

Dos componentes da console: a fonte simétrica, conforme descrito anteriormente, supre energia para o medidor de  $\Delta P$ , o disjuntor, é utilizado para energizar/desenergizar a console de operação e também como proteção para os dispositivos da console, o filtro passa baixas, tem como função filtrar os sinais elétricos provenientes dos medidores e os bornes são utilizados para conectar a fiação da planta e os dispositivos da console. Uma fotografia da console de operação é apresentada na figura 2-11.

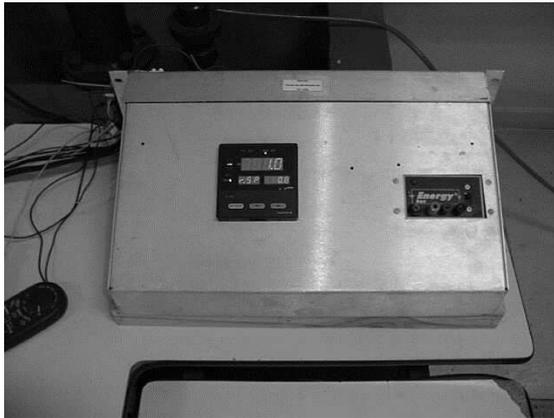


Figura 2-11 - Fotografia da console de operação.

### 2.3.6 Tomadas de pressão

Além das tomadas de pressão existentes foram instaladas duas outras que têm por objetivo permitir a medição das perdas de carga da planta de bombeamento de água. Através destas medições também é possível equacionar o sistema hidráulico.

A instalação destas tomadas foi efetuada da seguinte maneira:

- A tubulação, no ponto desejado, foi perfurada;
- Foram retiradas as imperfeições causadas pela perfuração, e
- Alinhado à perfuração foi instalado o ponto de tomada de pressão.

O ponto de tomada de pressão é constituído de uma braçadeira, de um adaptador e de uma borracha de vedação, conforme visto na figura 2-12. O adaptador permite a conexão do ponto de tomada de pressão ao medidor de  $\Delta P$  ou ao tubo em U enquanto a braçadeira e a borracha de vedação propiciam a fixação do conjunto.

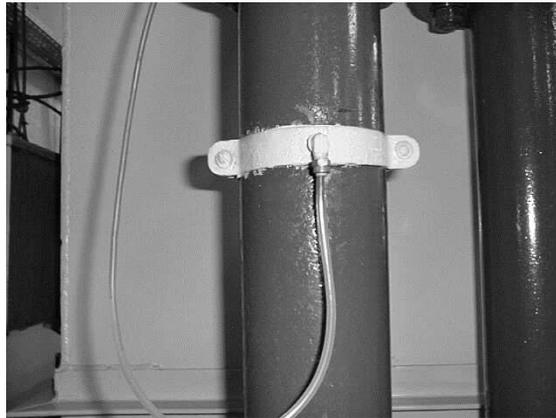


Figura 2-12 - Fotografia de uma das tomadas de pressão instalada.

### 2.3.7 Interligação dos novos componentes do sistema

A interligação dos componentes do sistema foi efetuada através do lançamento de cabos entre os mesmos. Os cabos utilizados foram:

- Cabo com um par trançado e blindado de  $0,75 \text{ mm}^2$ ;
- Cabo múltiplo com três vias de  $2,5 \text{ mm}^2$ ;
- Cabo singelo de  $1,5 \text{ mm}^2$ , e
- Cabo multivias.

A utilização dos cabos foi efetuada da seguinte maneira: o cabo com par trançado foi utilizado para interligar a saída dos medidores e o conversor de frequência à console de operação; o cabo múltiplo com três vias utilizado para a alimentação da console; o cabo singelo utilizado para as interligações na console de operação e alimentação dos medidores, e o cabo multivias para interligar a console à placa de aquisição de dados.

Também, a fim de promover a interligação dos componentes do sistema, foram instaladas tomadas a partir das quais a console de operação e o microcomputador foram alimentados. Para interligar as tomadas de alimentação ao bandejamento<sup>10</sup> existente foi utilizado cabo singelo de 2,5 mm<sup>2</sup>.

### 2.3.8 Software para a placa de aquisição de dados

O software para utilização da placa de aquisição de dados foi desenvolvido na plataforma DOS e em linguagem de programação C++ versão 4.5 da Borland.

Para se utilizar o software da placa de aquisição basta digitar **placa** após o prompt do DOS<sup>11</sup>. Uma janela com oito opções será aberta. O usuário deverá acessar as janelas a fim de personalizar a sua coleta de dados assim como o valor de referência a ser utilizado. O acesso às janelas é efetuado digitando-se o número correspondente à janela ou através do deslocamento via setas de subir e descer (↑, ↓). A seguir, ver figura 2-13, é apresentada uma fotografia da tela do microcomputador quando com software da placa em operação.

---

<sup>10</sup> Dispositivo em forma de canaleta no qual os cabos de uma instalação elétrica são lançados. O bandejamento tem por finalidade conduzir/sustentar o cabeamento.

<sup>11</sup> O usuário deverá estar no diretório onde foi instalado o programa da placa ou o diretório onde foi instalado o programa da placa deverá constar no *path* do arquivo autoexec.bat.



Figura 2-13 - Fotografia da tela do microcomputador quando o software da placa de aquisição de dados estava em operação.

As informações que devem ser preenchidas nas janelas são:

- Janela 1. Selecionar o número de canais a serem amostrados (min de 1 e máx de oito);
- Janela 2. Definir o tempo total do experimento/teste;
- Janela 3. Definir o tempo no qual as entradas dos canais serão amostrados;
- Janela 4. Definir o nome do arquivo onde os dados serão gravados (formato DOS);
- Janela 5. Definir o número de canais que serão representados graficamente *on line*, além do valor de referência;
- Janela 6. Definir o valor de referência ou o arquivo que contem o mesmo;
- Janela 7. Definir o valor min e máx da ordenada, o tempo máximo da abcissa e Iniciar, e
- Janela 8. Sair do programa (abortar).

Caso o usuário não defina nenhum valor na janela, valores padrões serão assumidos. Os valores padrões (*default*) da janela são:

- Janela 1. 01 (um) canal;
- Janela 2. Tempo total de 100 segundos;
- Janela 3. Tempo de amostragem de 01 segundo;
- Janela 4. Arquivo de saída ensaio.dat;

Janela 5. Será representado graficamente somente um canal de entrada, além do valor de referência;

Janela 6. O valor de referência deverá ser definido, e

Janela 7. Os valores min. e máx. serão respectivamente 0 e 5 volts e o tempo de 100 s.

O arquivo contendo o valor de referência deverá possuir duas colunas. A primeira com o valor de tempo em segundos e a segunda com o respectivo valor de referência. No final do arquivo, última linha, deverá ter o valor -1 para o tempo e para a referência. As colunas devem ser separadas por espaço, o arquivo tem de ser no formato TXT e com extensão **.sp**.

O arquivo contendo os dados coletados possui número de colunas igual ao número de canais coletados mais um. Na primeira coluna tem-se o tempo em que os dados foram coletados e nas demais os dados dos canais coletados (de 0 a 7, respectivamente). O arquivo é gerado no formato TXT, suas colunas são separadas por espaço e os mesmos possuem extensão **.dat**.

A instalação do programa da placa de aquisição de dados consiste na criação de um diretório e da cópia dos arquivos disponíveis em disquete para o diretório criado. Antes de se utilizar o software desenvolvido para a placa recomenda-se ler o arquivo `readme.txt` que compõe os arquivos do programa.

## **2.4 Operação da planta após a implantação do sistema de controle**

Com a implantação do sistema de controle a operação da planta de bombeamento de água foi alterada drasticamente. A variação da velocidade, que é a maneira de se atuar na planta a fim de obter as vazões desejadas, agora é efetuada através do conjunto controlador/microcomputador/software e não mais pela IHM do conversor de

frequência. Assim, somente os procedimentos básicos foram mantidos na operação da planta.

A seguir apresentamos os novo procedimentos<sup>12</sup> de operação da planta de bombeamento de água:

- A chave de faca é fechada manualmente;
- A botoeira liga, NA, do conjunto de proteção e acionada;
- Através da IHM, no frontal do conversor, as seguintes operações são efetuadas:
  - ✓ O motor é energizado;
  - ✓ O conjunto controlador/microcomputador/software é operado, e
  - ✓ O motor e desenergizado.
- A botoeira desliga, NF, do conjunto de proteção e acionada, e
- A chave de faca é aberta.

A operação do conjunto controlador/microcomputador/software pode ser efetuada de três maneiras: controle manual, controle automático com valor de referência local e controle automático com valor de referência remoto.

No controle manual, o microcomputador/software são utilizados somente para a aquisição de dados enquanto o controle é efetuado pelo usuário no controlador. O próprio usuário determina a ação de controle.

No controle automático com valor de referência local, o conjunto microcomputador/software é novamente utilizado somente para a aquisição de dados. Porém, o controle é efetuado automaticamente pelo controlador sendo o usuário somente responsável por determinar os valores de referência para o controlador. Já no controle automático com valor de referência remoto, que é o mais recomendado, o

---

<sup>12</sup> O item sublinhado representa a inovação efetuada na operação planta de bombeamento de água.

conjunto microcomputador/software é o responsável pela aquisição dos dados como pela geração do valor de referência remotamente enquanto o controlador efetua o controle automaticamente.

A fim de se operar o conjunto controlador/microcomputador/software o seguinte procedimento deve ser adotado:

- O microcomputador deve ser ligado;
- A console de operação, através de seu disjuntor, deve ser energizada;
- A fonte de alimentação dos medidores, instalada na console, deve ser ligada;
- No controlador, após já definidos os parâmetros de inicialização e operação, deve-se optar por um dos três modos de operação descritos anteriormente;
- O programa da placa de aquisição de dados deve ser aberto, e
- Os parâmetros do programa da placa devem ser definidos e o programa iniciado.

Com a implementação do sistema de controle e conseqüentemente do processo de operação da planta de bombeamento de água, os inconvenientes anteriormente existentes foram eliminados. Assim, teremos as seguintes características:

- A alteração rápida do valor de referência, conseqüentemente da frequência é possível. Os únicos limitadores, agora, são as características da planta e do atuador;
- Não é necessário nenhum tipo de mapeamento dos valores de vazão desejados;
- Quando da ocorrência de distúrbios, o controlador atua a fim de eliminar os efeitos dos mesmos;

- A resposta do sistema se tornou mais rápida, permitindo variações de vazão mais agressivas do que as possíveis sem o sistema de controle, e
- São possíveis os seguintes controles:
  - ✓ Controle da vazão na tubulação de esvaziamento principal;
  - ✓ Controle da vazão de recalque, e
  - ✓ Controle de nível, através do controle do próprio nível com a utilização de medidor de nível ou controle do nível através da vazão da tubulação de esvaziamento com a utilização do medidor de vazão na tubulação de esvaziamento principal.

---

## Referência bibliográfica do capítulo

Advantech Co., Ltda. (1992). PCL-711 B - Pc-Multilab CARD - User's Manual. Part nº 2003711010 rev. A1.

Camargo, H. A. (1997). Detecção e Isolação de Falhas Utilizando Estimação de Parâmetros de Modelos Contínuos e Limites de Confiança Adaptativos - Aplicação a uma Planta Piloto, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

Delmée, G. J. (1983). Manual de Medição de vazão. *Editores Edgard Blücher Ltda*, São Paulo, 2º edição.

ISA Instrument Society of America. (1994). Norma ANSI/ISA - S5.1-1994 (R1992) Instrumentation Symbols and Identification. Reaffirmed on July 13, 1992. *Research Triangle Park*, North Carolina 27709.

Magalhães, F., Parma, G. e Filho, R. M. S. (1996). Medidor de Nível - Relatório de Instrumentação Industrial. *Laboratório de Ensino de Controle e Instrumentação UFMG*.

---

Morais, F. (1998). Medidor de diferença de Pressão/Vazão - Relatório de Iniciação Científica. *Laboratório de Ensino de Controle e Instrumentação UFMG*.

Nogami, P. S., Drausio, L.L., Cypriano, J.M., Sartori, J.R. e Merino, R.W.B. (1974). Bombas e Sistemas de Recalque. *Secretaria dos Serviços e Obras Públicas, São Paulo*.

Yokogawa Electric Corporation. (1995). UT37, UT38 Digital Indicating Controller Initial Setting Manual. IM 5B4B7-02E 1995, October 2º Edition.

Yokogawa Electric Corporation. (1995). UT37, UT38 Digital Indicating Controller Operation Manual. IM 5B4B7-21E 1995, June 2º Edition.

Weg Automação Ltda. (1993). Manual do Conversor de Frequência série CFW-02. MAN AO. 4150.1707 novembro de 1993.

# **3** *Modelagem do processo de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica*

Descreve-se neste capítulo a primeira tentativa de modelagem do processo de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica. A modelagem foi efetuada de forma híbrida. Parte do modelo foi obtido baseando-se na física do processo e alguns aspectos foram modelados baseando-se em dados coletados. O objetivo do modelo desenvolvido é permitir a execução de simulação do sistema e, eventualmente, auxiliar na sintonia do controlador.

Os seguintes itens serão abordados neste capítulo: equacionamento do modelo (seção 3.1); levantamento dos parâmetros do modelo (seção 3.2) e validação do modelo (seção 3.3).

### 3.1 Equacionamento do modelo

A fim de se efetuar o equacionamento do modelo simplificado que representasse o processo de bombeamento de água, algumas considerações foram feitas:

- A área do reservatório TQ\_01 foi considerada constante;
- As perdas de carga nas tubulações foram desprezadas (consideradas constantes e incluídas nas constantes hidráulicas de entrada e saída);
- A dinâmica do conjunto moto-bomba foi desprezada, e
- As condições ambientais foram consideradas as mesmas para qualquer ponto da planta.

A partir do balanço de massa no reservatório (TQ\_01), conforme visto na figura 3.1<sup>1</sup>, pode-se escrever:

$$\frac{dm_1}{dt} = w_i - w_o, \quad (3.1)$$

onde:

$\frac{d}{dt}$  é o operador da derivada de uma variável em relação ao tempo;

$m_1$  é a massa de água dentro do reservatório, em kg;

$w_i$  é a vazão mássica de entrada no reservatório, em kg/s, e

$w_o$  é a vazão mássica na saída principal do reservatório, em kg/s.

---

<sup>1</sup> O diagrama de instrumentação da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica após a implementação do sistema de controle, apresentado no capítulo 2, é novamente apresentado para facilitar a leitura.

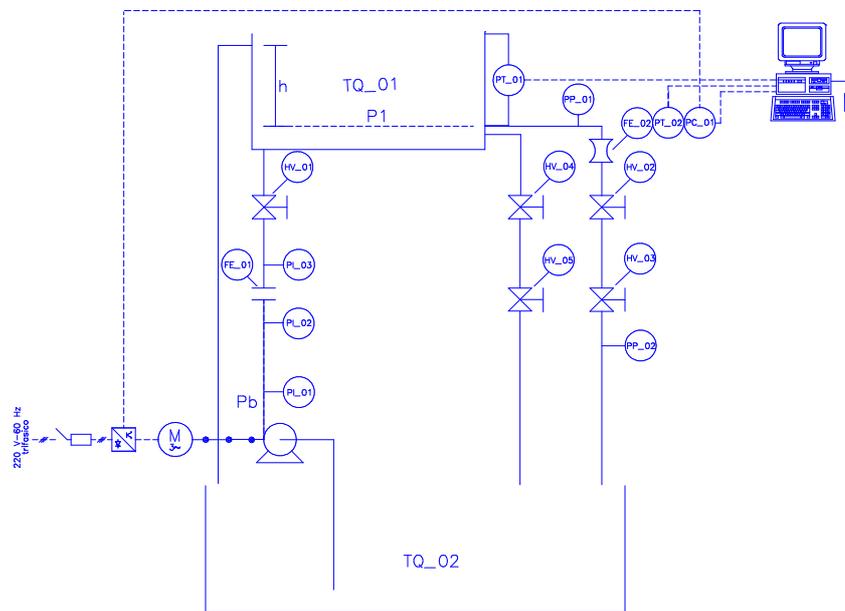


Figura 3.1 - Diagrama de instrumentação da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica após a implementação do sistema de controle.

Considerando-se a área ( $A$ ) do reservatório e a massa específica da água ( $\rho$ ) constantes, pode-se escrever:

$$\rho A \frac{dh}{dt} = w_i - w_o, \quad (3.2)$$

onde:

$\rho$  é a massa específica da água, em  $\text{kg/m}^3$ ;

$A$  é a área do reservatório, em  $\text{m}^2$ , e

$h$  é o nível do reservatório, em m.

Como

$$w = q\rho, \quad (3.3)$$

onde:

$w$  é a vazão mássica, em kg/s, e

$q$  é a vazão volumétrica, em m<sup>3</sup>/s.

Substituindo-se (3.3) em (3.2) tem-se:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{qi - qo}{A}, \quad (3.4)$$

onde:

$qi$  é a vazão volumétrica na entrada do reservatório, em m<sup>3</sup>/s, e

$qo$  é a vazão volumétrica na saída principal do reservatório, em m<sup>3</sup>/s.

A partir da lei de Bernoulli tem-se uma equação que fornece a vazão volumétrica em um trecho de tubulação em função da diferença de pressão e das características hidráulicas desse trecho, conforme visto em (3.5).

$$q = k\sqrt{\Delta P}, \quad (3.5)$$

onde:

$k$  é uma constante hidráulica, e

$\Delta P$  é a diferença de pressão.

A partir de (3.5) podem-se definir outras duas novas relações:

$$q_i = k_i \sqrt{P_b - P_1}, \quad (3.6)$$

$$q_o = k_o \sqrt{P_1}, \quad (3.7)$$

onde:

$k_i$  é a constante hidráulica da entrada do reservatório;

$P_b$  é a pressão manométrica na saída da bomba de recalque, em  $\text{kgf/m}^2$ ;

$P_1$  é a pressão manométrica no nível da saída principal do reservatório, em  $\text{kgf/m}^2$ , e

$k_o$  é a constante hidráulica da saída principal do reservatório.

A pressão no nível da saída principal do reservatório,  $P_1$ , pode ser equacionada como:

$$P_1 = \rho g h = \gamma h, \quad (3.8)$$

onde:

$g$  é a aceleração da gravidade, em  $\text{m/s}^2$ , e

$\gamma$  é o peso específico da água, em  $\text{kgf/m}^3$  ( $1 \times 10^3 \text{ kgf/m}^3$ ).

Substituindo-se (3.6), (3.7) e (3.8) em (3.4) tem-se a equação diferencial que descreve a dinâmica associada ao reservatório da planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k_i \sqrt{P_b - \gamma h} - k_o \sqrt{\gamma h}}{A}. \quad (3.9)$$

### 3.2 Levantamento dos parâmetros do modelo

De posse da equação (3.9), o próximo passo é a determinação dos parâmetros  $ki$ ,  $ko$  e  $A$ , da mesma, através de testes em regime permanente na planta.

Sabendo-se que a vazão de entrada no reservatório é igual à vazão de saída do mesmo, quando o sistema está em estado em regime permanente<sup>2</sup>, o seguinte procedimento foi seguido:

- A válvula de recalque (HV\_01) foi totalmente aberta;
- As válvulas da saída secundária (HV\_04 e HV\_05) foram mantidas totalmente fechadas;
- As válvulas da saída principal (HV\_02 e HV\_03) foram totalmente abertas;
- O sistema foi posto em operação em diversas frequências/velocidades;
- A cada nova frequência/velocidade aguardou-se a acomodação do sistema, e
- Foram registrados os valores da frequência ( $f$ ), da pressão na saída da bomba ( $Pb$ ), da diferença de pressão sobre o tubo Venturi na saída principal ( $\Delta Po$ ) e do nível do reservatório ( $h$ ), conforme mostrado na tabela 3-1.

---

<sup>2</sup> Este sistema é auto regulado. Portanto, o mesmo apresenta equilíbrio ou regime permanente [Shinsky, 1988; McMillan, 1994].

Tabela 3-1 - Tabela de dados coletados em teste em regime permanente na planta.

Frequência, $f$ (Hz)	Pressão $P_b$ (kgf/m <sup>2</sup> )	Dif. Pressão $\Delta P_o$ (kgf/m <sup>2</sup> )	Nível, $h$ (m)
50	4.000	802,1	0
51	4.100	856,5	0,051
52	4.200	897,3	0,093
53	4.400	951,7	0,161
54	4.500	992,4	0,218
55	4.700	1.046,8	0,286
56	4.900	1.114,8	0,361
57	5.100	1.182,8	0,430
58	5.300	1.237,2	0,502
59	5.500	1.291,5	0,567
60	5.600	1.305,1	0,583

Como somente a válvula de recalque (HV\_01) e as válvulas da saída principal (HV\_02 e HV\_03) estão abertas, pode-se afirmar que a vazão de entrada é igual à vazão da saída principal ( $q_i=q_o$ ) quando o sistema estiver em estado em regime permanente. Portanto, transcorrido o tempo de acomodação, teremos os valores das vazões estáticas de entrada e saída ( $q_i$  e  $q_o$ ) a partir dos valores medidos da diferença de pressão sobre o tubo Venturi ( $\Delta P_o$ ) e do conhecimento da relação entre  $q$  e  $\Delta P$  nesse tubo. Para o nosso caso, conforme desenho de projeto do tubo Venturi, tem-se:

$$q = 0,56 \times 10^{-3} \sqrt{\Delta P}, \quad (3.10)$$

onde  $q$  é dado em m/s e  $\Delta P_o$  está em kgf/m<sup>2</sup>.

Também, a partir das equações (3.6) e (3.8) pode-se escrever que:

$$q_i = k_i \sqrt{P_b - \gamma h}, \quad (3.11)$$

Assim, após calcular o valor da vazão de entrada ( $q_i$ ), medir a pressão na saída da bomba de recalque ( $P_b$ ) e o nível do reservatório ( $h$ ) e conhecendo-se a relação entre

estes, conforme visto em (3.11), foi construída a curva  $qi \times \sqrt{Pb - \gamma h}$  e ajustou-se a esta um polinômio pelo método dos mínimos quadrados.

Sabendo-se que a constante hidráulica de entrada do reservatório pode ser traduzida como sendo a inclinação desta curva ( $qi \times \sqrt{Pb - \gamma h}$ ) e observado que um polinômio de primeira ordem apresenta uma boa aproximação aos dados medidos pôde-se afirmar que o parâmetro associado ao elemento do polinômio de primeiro grau representa a constante hidráulica de entrada do reservatório.

A figura 3.2, apresentada a seguir, mostra a curva  $qi \times \sqrt{Pb - \gamma h}$  construída a partir dos pontos da tabela 3-1 e a curva aproximada que foi construída a partir do polinômio de primeira ordem.

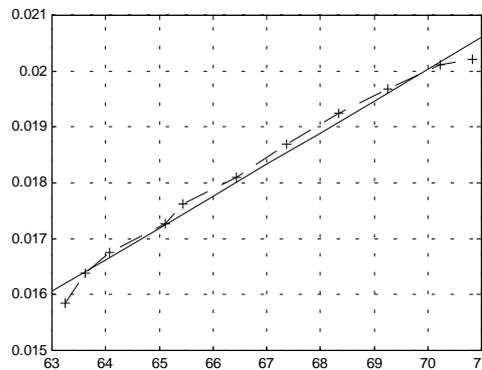


Figura 3.2 - Curva  $qi \times \sqrt{Pb - \gamma h}$  medida (linha tracejada) e curva aproximada (linha contínua). O eixo das abscissas representa  $\sqrt{Pb - \gamma h}$ , em  $(\text{kgf/m}^2)^{1/2}$ , enquanto o das ordenadas a  $qi$ , em  $\text{m}^3/\text{s}$ .

Utilizando-se o mesmo procedimento utilizado para determinar a constante hidráulica de entrada do reservatório ( $ki$ ), define-se a relação (3.12), a partir de (3.7) e (3.8), a fim de determinar a constante hidráulica da saída principal do reservatório ( $ko$ ), ou seja

$$qo = ko \sqrt{\gamma h} . \quad (3.12)$$

Então, a partir do conhecimento da vazão de saída ( $qo$ ), do nível do reservatório ( $h$ ) e da relação entre estes (3.12), foi construída a curva  $qo \times \sqrt{\gamma h}$ , ver figura 3.3. Utilizou-se a aproximação polinomial de primeira ordem e, da mesma forma, o parâmetro associado ao elemento do polinômio de primeiro grau representa a constante hidráulica da saída principal do reservatório. A figura 3.3 sugere que os dados poderiam ser ajustados por um polinômio de segunda ordem porém, aqui optou-se por uma aproximação polinomial de primeira ordem a fim de se obter um modelo mais simples que representa-se o processo.

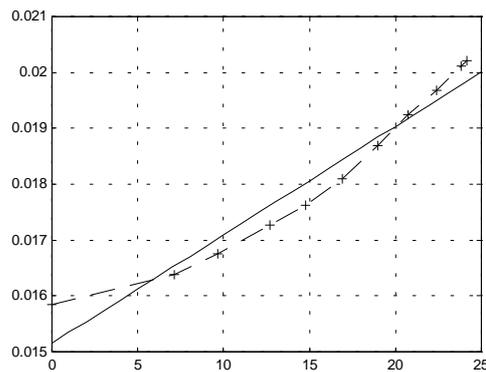


Figura 3.3 - curva  $qo \times \sqrt{\gamma h}$  medida (linha tracejada) e curva aproximada (linha contínua). O eixo das abscissas representa a  $\sqrt{\gamma h}$ , em  $(\text{kgf}/\text{m}^2)^{1/2}$ , enquanto o das ordenadas  $qo$ , em  $\text{m}^3/\text{s}$ .

A área do reservatório ( $A$ ) foi determinada a partir de suas dimensões. Não foram consideradas as variações de área existente no reservatório devido ao sistema de vertedouros. Também para níveis de água perto de zero, devido a diversas estruturas físicas, a área do reservatório não é constante. Como será visto isto resultará na necessidade de uma sintonia mais “forte” do modelo nesta faixa.

Ao final dos testes e das medidas efetuadas obteve-se os seguintes valores para  $k_i$ ,  $k_o$  e  $A$ :

- $k_i = 0,5672 \times 10^{-3} \text{ m}^4/\text{s}(\text{kgf})^{1/2}$ ;
- $k_o = 0,1941 \times 10^{-3} \text{ m}^4/\text{s}(\text{kgf})^{1/2}$ , e
- $A = 2,5 \text{ m}^2$ .

Também através de testes em regime permanente, foi determinada uma relação linear entre  $P_b$  e a entrada do conversor de frequência ( $P_b = k_u U$  onde:  $k_u$  é uma constante e  $U$  é a entrada do conversor de frequência, em mA).

Para se determinar a relação existente entre a entrada de corrente (entrada remota) do conversor ( $U$ ) e a pressão na saída da bomba de recalque ( $P_b$ ) foi executado um teste composto de três etapas. Na primeira e segunda etapas o objetivo era o de verificar a influência do nível do reservatório na pressão  $P_b$ . Já a terceira etapa visava efetivamente verificar a relação existente entre a pressão  $P_b$  e a entrada  $U$ .

Na primeira e segunda etapa com o reservatório totalmente cheio e totalmente vazio respectivamente, foi recalçada água operando o conversor a diversas frequências. Os valores da frequência de recalque ( $f$ ) e da pressão na saída da bomba ( $P_b$ ) foram registrados, conforme visto na tabela 3-2.

Tabela 3-2 - Tabela de dados coletados no teste para determinação da relação  $U \times P_B$

Frequência, $f$ (Hz)	Primeira etapa	Segunda etapa
	Pressão $P_b$ (kgf/m <sup>2</sup> )	Pressão $P_b$ (kgf/m <sup>2</sup> )
50	4.100	4.000
51	4.300	4.100
52	4.400	4.200
53	4.500	4.400
54	4.700	4.500
55	4.900	4.700
56	5.100	4.900
60	5.700	5.500

De posse dos valores coletados, tabela 3-2, verificou-se a maior variação relativa da pressão  $Pb$  em função do nível ( $h$ ), ver (3.13).

$$\Delta P b_{rel} (\%) = \frac{P b_{cheio} - P b_{vazio}}{P b_{vazio}} 100, \quad (3.13)$$

onde:

$\Delta P b_{rel}$  é a diferença relativa da pressão  $Pb$  em função do nível do reservatório;

$P b_{cheio}$  são os valores lidos da pressão  $Pb$  quando o reservatório está cheio, e

$P b_{vazio}$  são os valores lidos da pressão  $Pb$  quando o reservatório está vazio.

Considerando-se então  $Pb$  independente do nível, na terceira etapa, foi recalçada água operando o conversor a diversas frequências e foram registrados, conforme visto na tabela 3-3, os valores da entrada  $U$ , da frequência ( $f$ ) e da pressão  $Pb$ .

Para esta etapa a válvula de recalque (HV\_01) e as válvulas da saída principal (HV\_02 e HV\_03) foram totalmente abertas enquanto as válvulas da saída secundária (HV\_04 e HV\_05) foram mantidas totalmente fechadas. Para a primeira etapa somente a válvula de recalque (HV\_01) foi mantida totalmente aberta e para a segunda etapa todas as válvulas foram mantidas totalmente abertas<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> Em todo o nosso trabalho as válvulas foram mantidas ou totalmente abertas ou totalmente fechadas (*on-off*).

Tabela 3-3 - Tabela de dados coletados no teste para verificar a relação  $U \times Pb$ 

Frequência, $f$ (Hz)	Entrada $U$ (mA)	Pressão $Pb$ (kgf/m <sup>2</sup> )
50	até 15,61	4.000
51	15,90	4.100
52	16,10	4.200
53	16,34	4.400
54	16,58	4.500
55	16,79	4.700
56	17,05	4.900
57	17,23	5.100
58	17,46	5.300
59	17,75	5.500
60	17,90	5.600

A partir dos dados da tabela 3-3 foi construída a curva  $Pb \times U$  e ajustou-se a esta um polinômio pelo método de mínimos quadrados. Conforme verificado anteriormente para  $ki$  e  $ko$ , um polinômio de primeiro grau apresenta uma boa aproximação à curva. Então, um vetor ( $ku$ ) de duas posições que nos fornece a relação entre  $U$  e  $Pb$  foi determinado ( $ku = [ku_1 \quad ku_2]$ , onde  $ku_1$  representa a inclinação da curva e  $ku_2$  é o valor de  $Pb$  para  $U = 0$ , segundo a reta ajustada).

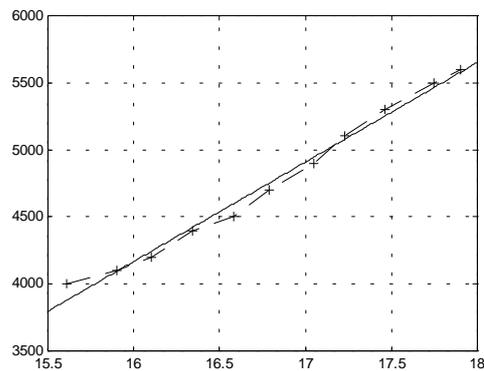


Figura 3.4 - Curva  $Pb \times U$  medida (linha tracejada) e curva aproximada (linha contínua). O eixo das abcissas representa  $U$ , em mA, enquanto o das ordenadas  $Pb$ , em kgf/m<sup>2</sup>.

Portanto, a relação entre  $U$  e  $Pb$  pode ser considerada linear e é dada por:

$$Pb = -7,6929 \times 10^3 + 0,7413 \times 10^3 U \text{ kgf/m}^2, \quad (3.14)$$

onde  $U$  é dado em mA.

Conhecendo-se os parâmetros da equação (3.9), que descreve o modelo do processo de bombeamento de água, pode-se rescrever a mesma conforme visto em (3.15).

$$\frac{dh}{dt} = \frac{ki \sqrt{ku_1 U + ku_2 - \gamma h} - ko \sqrt{\gamma h}}{A}, \quad (3.15)$$

onde:

$h$  é o nível do reservatório, em m, e

$U$  é a entrada remota do conversor, em mA.

Com o sistema de controle implementado  $U$  será a saída do controlador ( $m$ ). Portanto,  $U = m$ .

### 3.3 Validação do modelo

Os testes efetuados até este momento foram em regime permanente. Portanto, como todos os parâmetros do modelo foram determinados a partir desses testes, validou-se o comportamento estacionário do modelo do processo de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica. Então, efetuaram-se testes dinâmicos na planta e simulações com o modelo, (3.15), a fim de validar o mesmo tanto para o comportamento em regime permanente como para o comportamento transiente do processo.

Para efetuar esta validação, optou-se pelo teste em degrau. Portanto, foram aplicados degraus à planta e, em simulações, ao modelo. A partir destes testes foi verificada a similaridade da resposta do modelo à resposta do processo e ajustes ao modelo,

conforme visto na tabela 3-4, foram efetuados para que o mesmo melhor se aproximasse do processo. Após efetuada a sintonia do modelo um outro degrau, de mesma amplitude porém de sentido oposto, foi aplicado afim de se validar o modelo. Os gráficos referentes a estes testes podem ser verificados nas figuras de 3.5 a 3.10.

Quando os testes em regime permanente na planta foram executados, o nível zero do reservatório foi considerado a uma certa altura do fundo, conforme visto na figura 3.1. Porém, quando o nível está nesta posição a vazão de saída é diferente de zero. Como a vazão de saída do reservatório é dependente do nível, conforme visto em (3.7), para nível zero teríamos de ter vazão também zero, o que não ocorreria. Portanto, em função da consideração do nível zero deslocado do fundo deve-se acrescentar um termo constante ao modelo a fim de se obter vazão zero para nível zero. Então, para a situação de nível zero com vazão de saída zero, a partir de (3.15) tem-se:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{ki \sqrt{ku_1 U + ku_2} - \gamma h - ko \sqrt{\gamma h}}{A} - valordc, \quad (3.16)$$

e conseqüentemente

$$valordc = \frac{ki \sqrt{ku_1 U + ku_2}}{A}. \quad (3.17)$$

Substituindo-se os valores dos parâmetros e para  $U = 15,61$  mA conforme pode ser verificado nas tabelas 3-1 e 3-3 conjuntamente, obtemos  $valordc = 14,1288 \times 10^{-3}$  m/s.

Tabela 3-4 - Relação de ajustes efetuados nos parâmetros do modelo em função do nível.

1ª faixa (até 10% do reservatório)	2ª faixa (de 10 a 44% do reservatório)	3ª faixa (de 44 a 100% do reservatório)
$1ki$	$1ki$	$1ki$
$1ko$	$1ko$	$1ko$
$0,9ku_1$	$1,22ku_1$	$1,22ku_1$
$0,85ku_2$	$0,972ku_2$	$0,972ku_2$
$2,5A$	$1,32A$	$1,3A$
$0,405valordc$	$1valordc$	$1,02valordc$

Os ajustes efetuados no modelo foram divididos em faixas em função do nível (0 a 10, 10 a 44 e 44 a 100%) do mesmo. Portanto, obteve-se três variações para cada parâmetro da equação do modelo do processo de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica, conforme visto em (3.15).

Na execução dos testes dinâmicos e na validação, ao processo em repouso para uma determinada entrada ( $U$ ), foi aplicado um degrau em sua entrada e a resposta ao degrau foi observada. Na tabela 3-5 pode ser verificado o valor da entrada anterior à aplicação do degrau (condição inicial), o valor do degrau aplicado e a figura na qual as respectivas respostas do processo ao degrau são apresentadas. Nas figuras apresentadas a resposta do modelo ao degrau contempla os ajustes efetuados no mesmo. Toda figura apresenta dois gráficos: um em escala de -10 a 100% do nível (para comparação das diversas faixas) e a outra em detalhe.

Tabela 3-5 - Relação de degraus aplicados ao processo de bombeamento de água com respectivas respostas do processo ao degrau.

Entrada $U$ (mA)	Degrau (mA)	Resposta ao degrau
15,61	+ 0,73 (sintonia)	Figura 3.5
16,34	- 0,73 (validação)	Figura 3.6
16,34	+ 0,71 (sintonia)	Figura 3.7
17,05	- 0,71 (validação)	Figura 3.8
17,05	+ 0,85 (sintonia)	Figura 3.9
17,90	- 0,85 (validação)	Figura 3.10

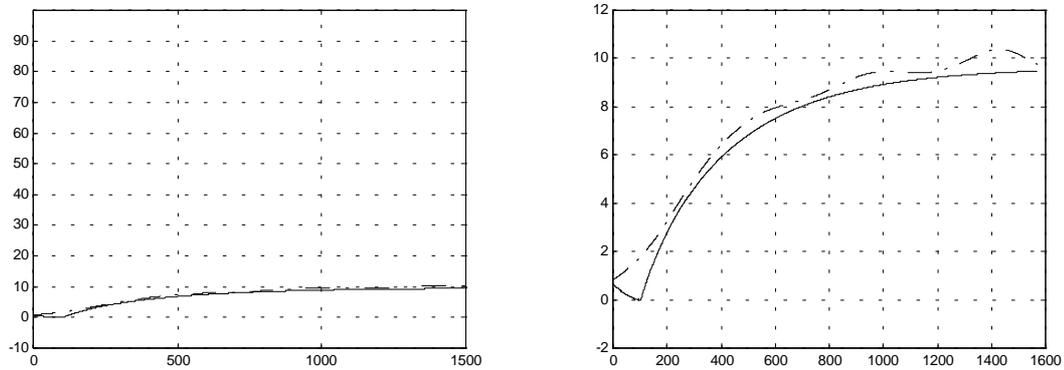


Figura 3.5 - Resposta medida da planta (traço ponto) e do modelo (linha contínua) ao degrau positivo de 0,73 mA durante a sintonia. O eixo das abcissas representa o tempo ( $t$ ), em s, enquanto o das ordenadas o nível ( $h$ ), em %.

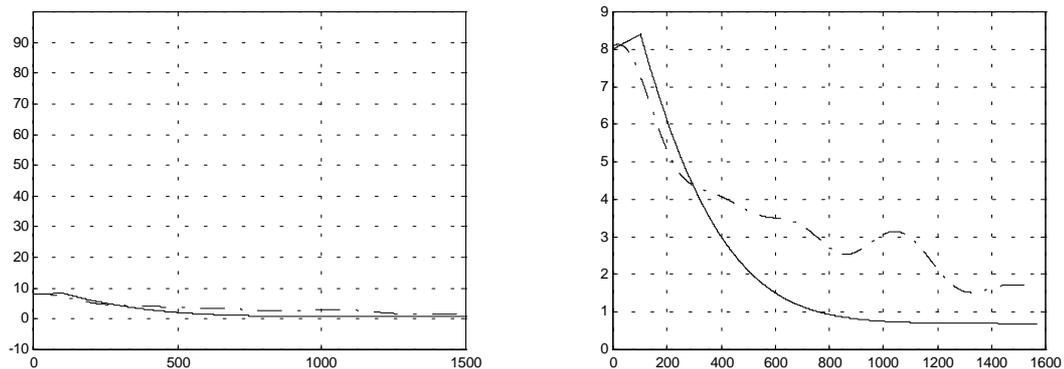


Figura 3.6 - Resposta medida da planta (traço ponto) e do modelo (linha contínua) ao degrau negativo de 0,73 mA durante a validação. O eixo das abcissas representa o tempo ( $t$ ), em s, enquanto o das ordenadas o nível ( $h$ ), em %.

Além de uma boa aproximação do modelo, tanto na sintonia como na validação, à resposta medida da planta é observado nas figuras 3.5 e 3.6 que os valores medidos sofreram algum tipo de distúrbio. Neste caso, os distúrbios se devem à variação de área que ocorre nesta faixa. Esta faixa também está sujeita a ondas criadas na superfície d'água pelo aparato da tubulação de entrada do reservatório e pelo espúrio não preenchimento total do diâmetro da tubulação de saída principal do reservatório.

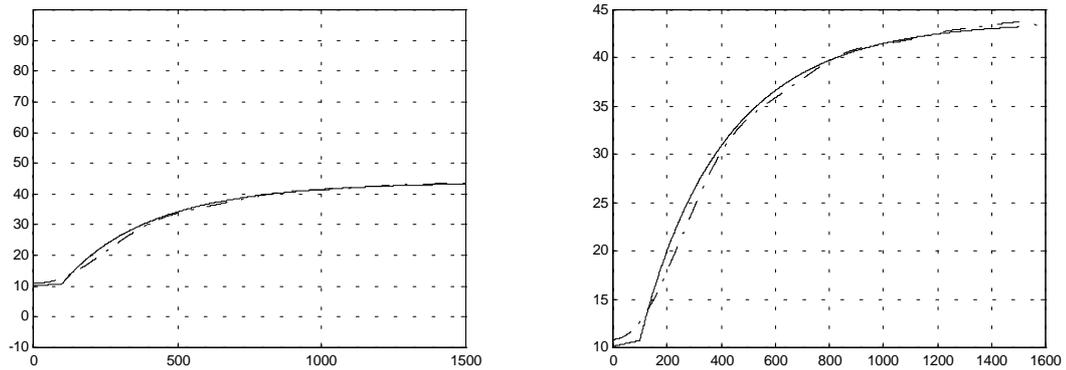


Figura 3.7 - Resposta medida da planta (traço ponto) e do modelo (linha contínua) ao degrau positivo de 0,71 mA durante a sintonia. O eixo das abscissas representa o tempo ( $t$ ), em s, enquanto o das ordenadas o nível ( $h$ ), em %.

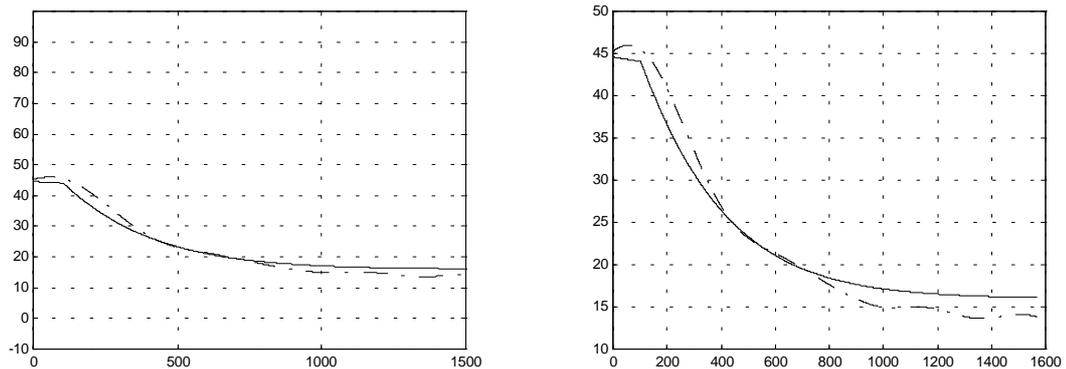


Figura 3.8 - Resposta medida da planta (traço ponto) e do modelo (linha contínua) ao degrau negativo de 0,71 mA durante a validação. O eixo das abscissas representa o tempo ( $t$ ), em s, enquanto o das ordenadas o nível ( $h$ ), em %.

Além de uma boa aproximação do modelo à resposta medida do processo, tanto na sintonia como na validação, a figura 3.8 apresenta um distúrbio no valor medido para baixos valores de nível do reservatório. Estes distúrbios são devidos ao aparato da tubulação de entrada. Possíveis alterações na velocidade de rotação da bomba d'água também podem causar este efeito. Nas demais figuras também é observado uma boa aproximação do modelo à resposta medida do processo.

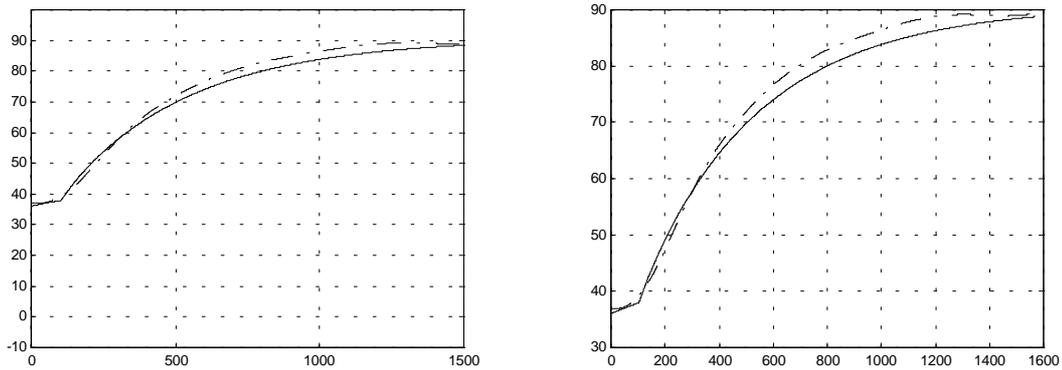


Figura 3.9 - Resposta medida da planta (traço ponto) e do modelo (linha contínua) ao degrau positivo de 0,85 mA durante a sintonia. O eixo das abscissas representa o tempo ( $t$ ), em s, enquanto o das ordenadas o nível ( $h$ ), em %.

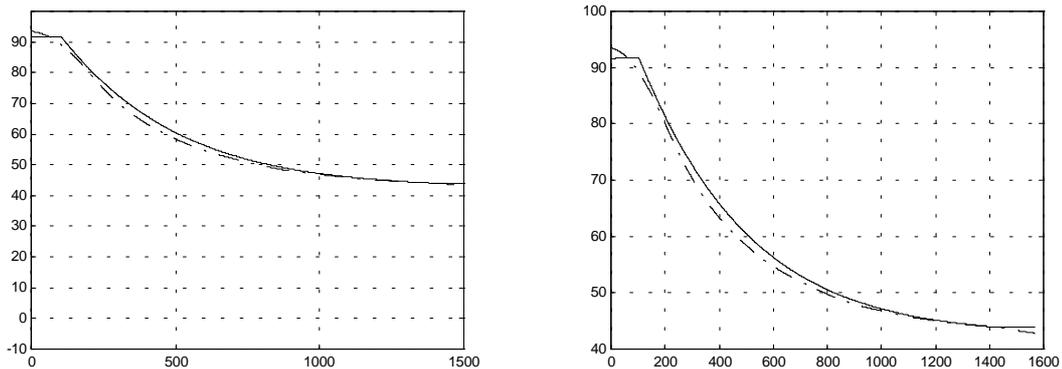


Figura 3.10 - Resposta medida da planta (traço ponto) e do modelo (linha contínua) ao degrau negativo de 0,85 mA durante a validação. O eixo das abscissas representa o tempo ( $t$ ), em s, enquanto o das ordenadas o nível ( $h$ ), em %.

Após efetuados os testes dinâmicos no processo pôde ser verificado que a dinâmica do mesmo é bem representada pelo modelo descrito em (3.15) dividido em faixas e parametrizado conforme os dados da tabela 3-4.

Verificou-se também que, para alguns parâmetros do modelo, o valor ajustado apresenta um desvio relativamente grande em relação ao valor original, como por exemplo o valor de área para a primeira faixa. Esta ocorrência tem como possíveis causas os seguintes fatos: os testes em regime permanente foram efetuados para toda a gama de possíveis valores e não em faixas, conforme o modelo; as aproximações polinomiais efetuadas

foram de primeira ordem, sendo que, em algum caso poderia ser utilizado uma aproximação de maior grau que melhor se adequasse como por exemplo na figura 3.3; as possíveis ocorrências de distúrbios no processo quando da aplicação dos testes, e à não consideração das irregularidades presentes no reservatório.

---

### **Referência bibliográfica do capítulo**

McMillan, G. K., (1994). *Tuning and Control Performance: A Practitioner's Guide*. Research triangle Park, NC 27709, Instrument Society of America. 3º ed.

Shinskey, F.G. (1988). *Process Control Systems*, 3rd ed., *McGraw-Hill*.

# 4

## *Controladores tipo PID - Proporcional, Integral e Derivativo*

Neste capítulo será abordado o assunto “controladores tipo Proporcional, Integral e Derivativo (PID)”. Inicialmente descreve-se o que é um controlador tipo PID e alguns tipos de algoritmos PID. Posteriormente, trata-se de problemas referentes à sintonia dos controladores tipo PID e descreve-se métodos de sintonia. Finalmente será feita uma abordagem sobre controladores tipo PID com sintonia automática (*auto-tuning*).

Em função dos assuntos a serem tratados este capítulo será dividido nas seguintes seções: controladores e algoritmos tipo PID (seção 4.1); problemas de sintonia de controladores tipo PID (seção 4.2); métodos para a sintonia de controladores tipo PID (seção 4.3), e sintonia automática para controladores tipo PID, *auto-tuning* (seção 4.4).

### **4.1 Controladores e algoritmos tipo PID**

O controlador é um dispositivo que compara o valor da variável de processo (PV) com a entrada de referência (SP), determina o desvio  $e(t)$  e produz um sinal de controle  $m(t)$  de forma a levar o desvio a zero ou a um valor pequeno [Ogata, 1993]. Isto pode ser ilustrado usando uma malha de controle, conforme visto na figura 4.1.

A figura 4.1 mostra uma malha típica de controle. O erro é representado por  $e(t)$  e o sinal de controle proveniente do controlador tipo PID por  $m(t)$ .

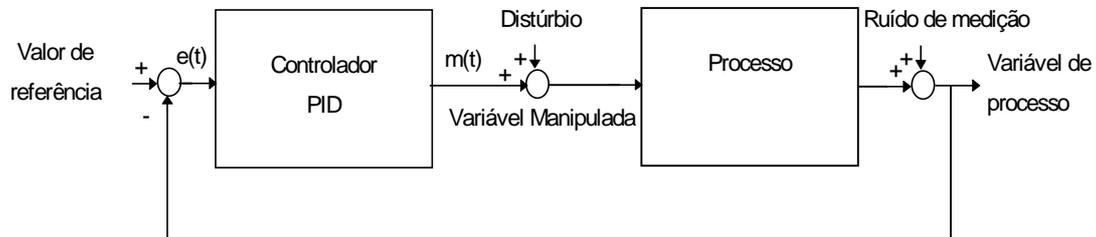


Figura 4.1- Malha típica de controle de processos

A maneira pela qual o controlador produz o sinal de controle é chamada lei de controle. O controlador tipo PID é um controlador que possui três tipos de controle: proporcional, integral e derivativo.

Um dos motivos para a utilização do controlador tipo PID é o fato da sua estrutura propiciar o ajuste de seu comportamento em baixa, média e alta frequência. O ajuste do comportamento do controlador tipo PID é efetuado através dos seus parâmetros: tempo integral (baixa frequência), ganho proporcional (média frequência) e tempo derivativo (alta frequência). A estrutura do controlador tipo PID também é um dos motivos pelo qual o mesmo tem sido o "carro chefe" no que se refere a controle de processos industriais nos últimos cinquenta anos [Zervos, *et alii*, 1988].

A lei de controle do controlador tipo PID depende do tipo de algoritmo de controle PID que se está utilizando. Pode-se mencionar que existe uma vasta gama de algoritmos de controle PID. Porém, os mesmos podem ser classificados em quatro grupos [Gerry, 1987; Jardim, 1993 e Kaya, *et alii*, 1988]:

- Ideal não-interativo;

$$M(s) = K_c \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] E(s), \quad (4.1)$$

onde:

$M(s)$  é a saída do controlador (transformada de Laplace do sinal de controle);

$E(s)$  é a transformada de Laplace do sinal de erro;

$K_c$  é o ganho proporcional;

$T_i$  é o tempo integral, e

$T_d$  é o tempo derivativo.

- Ideal paralelo, também chamado não-interativo;

$$M(s) = \left[ K_p + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] E(s), \quad (4.2)$$

onde  $K_p$  é o ganho proporcional.

- Clássico ou interativo, e

$$M(s) = K_c \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} \right] \left[ \frac{1 + T_d s}{1 + 0,1 T_d s} \right] E(s). \quad (4.3)$$

- Industrial

$$M(s) = K_c \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} \right] \left[ R(s) - \left( \frac{1 + T_d s}{1 + 0,1 s} \right) C(s) \right], \quad (4.4)$$

onde:

$R(s)$  é a transformada de Laplace do sinal de referência, e

$C(s)$  é a transformada de Laplace da variável de processo (PV).

A partir da classificação proposta, várias outras podem ser obtidas. Comumente são encontradas as seguintes alterações: a eliminação do efeito proporcional à variação do valor de referência, a introdução de filtro(s) no termo derivativo e a eliminação do efeito derivativo sobre o valor de referência, dentre outras [Hang, *et alii*, 1991; Aström and Hägglund, 1984a e b; Hägglund and Aström, 1985].

Com a eliminação da ação derivativa sobre o valor de referência é evitado alterações bruscas na ação de controle quando ocorrem alterações no valor de referência. A introdução de filtro na ação derivativa também evita alterações bruscas na ação de controle pois o ruído tem componentes de alta frequência. O algoritmo de controle contemplando a eliminação da ação derivativa sobre o valor de referência e a introdução de filtro é apresentado nas equações (4.5) e (4.6) [Hang, *et alii*, 1991]:

$$M(s) = K_c \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} \right] E(s) - T_d s C_f(s), \quad (4.5)$$

onde:

$$C_f(s) = \frac{1}{1 + \alpha s} C(s), \text{ e} \quad (4.6)$$

$\alpha$  define a frequência de corte do filtro.

Em relação ao termo proporcional, é observado que este pode provocar acentuado sobressinal (*overshoot*). Em função deste fato algumas soluções como a simples diminuição do ganho proporcional podem ser tomadas. Porém, com esta solução tem-se uma diminuição da velocidade de resposta à variações do valor de referência e também à distúrbios de carga. Em função disto, uma alternativa é a filtragem do valor de referência, conforme pode ser visto na equação (4.7).

$$M(s) = K_c \left[ \frac{R(s)}{1 + \alpha T_i s} - C(s) \right] + K_c \left[ \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] E(s), \quad (4.7)$$

Com esta solução somente o valor de referência é influenciado. Assim, alterações bruscas no mesmo serão rejeitadas. Porém, a resposta a possíveis alterações ocorridas na variável de processo  $C(s)$ <sup>1</sup> não serão influenciadas por esta solução. Para termos uma boa relação entre o sobressinal e o tempo de subida (*rise time*), que são influenciados pela ação proporcional e integral (conseqüentemente por  $K_c$  e  $T_i$ ), a constante de tempo do filtro tem de ser uma fração do tempo integral [Hang, *et alii*, 1991].

Uma outra alternativa, que possui o mesmo mérito de não influenciar na resposta a distúrbios de carga, é a de se pesar o valor de referência, conforme pode ser visto na equação (4.8).

$$M(s) = K_c \left[ (\beta R(s) - C(s)) + \left( \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s) \right], \quad (4.8)$$

onde  $\beta$  é o peso do valor de referência.

Para esta alternativa, um valor entre zero e um é multiplicado ao valor de referência. Com a introdução deste peso ao valor de referência estamos ajustando os zeros da função de transferência do sistema em malha fechada. Porque, os zeros afetam o sobressinal do sistema [Hang, *et alii*, 1991]. Esta solução apresenta também melhor resultado quando comparada com a simples remoção do valor de referência do termo proporcional.

Algoritmos de controle PID digitais também são comumente encontrados. Os algoritmos de controle digitais são simplesmente a versão discreta dos algoritmos contínuos. O controlador digital, em verdade, emula o controlador contínuo [McMillan, 1994]. Quando da discretização dos algoritmos de controle deve-se atentar para fatores tais como tempo de amostragem, extrapolador (*holder*), dentre outros. Na

---

<sup>1</sup>  $E(s) = R(s) - C(s)$ .

equação (4.9) apresentamos a versão discreta para o algoritmo de controle PID da equação (4.1) utilizando integração retangular [Clarke, 1983].

$$M(z^{-1}) = K_c \left[ 1 + \frac{T_s}{T_i(1-z^{-1})} + \frac{T_d}{T_s}(1-z^{-1}) \right] E(z^{-1}), \quad (4.9)$$

onde  $T_s$  é o tempo de amostragem.

## 4.2 Problemas de sintonia de controladores tipo PID

Apesar de ser considerada simples pelo fato de possuir apenas três parâmetros a serem ajustados [Zervos, *et alii*, 1988], a sintonia de controladores tipo PID, que correspondem a aproximadamente 90% dos controladores utilizados nas malhas de controle industriais [Seborg, 1994], é freqüentemente efetuada através de procedimentos de tentativa e erro. Muitas vezes os controladores são ajustados com valores típicos e então sintonizados por tentativa e erro com base na observação da resposta de malha fechada. Assim, o desempenho final da malha depende da experiência do operador ou técnico. Geralmente, a resposta é lenta e muito oscilatória [McMillan, 1994]. Apesar de uma das grandes vantagens do controlador tipo PID ser a simplicidade de ajustes dos parâmetros, a maioria dos controladores tipo PID existentes estão mal sintonizados [Seborg, 1994].

Freqüentemente em plantas mal sintonizadas o controle é colocado em manual quando ocorre alteração da referência ou um distúrbio de carga. Após ser contornada a ocorrência, o controle é retornado para automático. Nestes casos, o efetivo controle é efetuado pelo operador.

Também, freqüentemente, são encontradas plantas com o termo derivativo desabilitado indiscriminadamente. Isto ocorre normalmente porque o termo derivativo torna o controle mais sensível a variações do erro ou da variável de processo tornando

a ação de controle mais agressiva. Porém, caso esta desabilitação do termo derivativo seja indevida, o controle será menos efetivo.

Além da utilização de procedimentos de tentativa e erro ou da utilização de valores típicos para sintonia dos controladores tipo PID, um outro fator que contribui para a má sintonia dos controladores tipo PID é a não existência de uma única nomenclatura acerca dos parâmetros dos mesmos [Gerry, 1987]. Pode ser observado na seção 4.1 que independentemente do tipo de algoritmo os mesmos termos  $K_c$ ,  $T_i$  e  $T_d$  são utilizados. Porém, para um mesmo processo os valores de  $K_c$ ,  $T_i$  e  $T_d$  devem ser diferentes em função do algoritmo ao qual estão associados e da interação entre eles.

Conforme citado por Gerry (1987), para o caso da ação de controle proporcional são encontradas duas definições: ganho proporcional e banda proporcional. Uma definição é inversamente proporcional à outra, conforme pode ser visto na equação (4.10). Quando um algoritmo utiliza ganho proporcional, o aumento deste propicia um sistema mais sensível e menos estável. Por outro lado, para se obter o mesmo resultado é necessário diminuir a banda proporcional [Gerry, 1987].

$$K_c = \frac{100}{PB}, \quad (4.10)$$

onde PB é a banda proporcional.

Para a ação integral dois termos são comumente encontrados e, da mesma forma, um é inversamente proporcional ao outro, conforme pode ser visto na equação (4.11). Analogamente à ação proporcional, o aumento de I torna a ação integral mais ativa enquanto o aumento de  $T_i$  torna a ação integral menos ativa.

$$I = \frac{1}{T_i}, \quad (4.11)$$

onde I é o ganho integral.

No que se refere à ação derivativa, problemas com a nomenclatura não são encontrados. Porém, é a ação onde os problemas são maiores. Pois, devido à variedade dos métodos de filtragem do erro, a atuação ou não no valor de referência e em função do algoritmo utilizado ser interativo ou não, dificilmente serão encontrados dois ajustes iguais [Gerry, 1987].

Então, afim de se evitar a utilização de controladores do tipo PID mal sintonizados em função de problemas de nomenclatura, atenção deve ser dada quando da instalação e troca dos mesmos. Quando da instalação de um controlador tipo PID novo, deve-se observar o algoritmo de controle PID afim de se optar por um método de sintonia. Quando da troca do controlador tipo PID da planta por outro, deve-se observar se o algoritmo de controle PID é diferente e, caso o mesmo seja, efetuar um novo ajuste dos parâmetros [Gerry, 1987].

### 4.3 Métodos para a sintonia de controladores tipo PID

A sintonia dos controladores do tipo PID vem sendo estudada ao longo dos últimos cinquenta anos, neste período vários estudos foram executados e muitas técnicas sugeridas. Porém, apesar de todos os estudos e técnicas propostas, até hoje nenhuma destas técnicas é utilizada amplamente e efetivamente ao ponto de solucionar o problema de sintonia dos controladores tipo PID [Zervos, *et alii*, 1988; Seborg, 1994].

Estes inúmeros métodos de sintonia dos controladores tipo PID podem ser classificados de várias maneiras. Por exemplo, os mesmos podem ser classificados como *on-line* [Aström and Wittenmark, 1973; Clarke and Gawthrop, 1975] ou *off-line* [Ziegler and Nichols, 1942; Cohen and Coon, 1953], para malha fechada [Yuwana and Seborg, 1982] ou para malha aberta [Cohen and Coon, 1953], sintonia utilizando método não paramétrico [Ziegler and Nichols, 1942; Coon, 1956; Miller *et alii*, 1967] ou estimação paramétrica [Aström and Wittenmark, 1973; Clarke and Gawthrop, 1975], etc.

Dentre todos os métodos, os mais populares para a sintonia de controladores tipo PID são: o método de Ziegler e Nichols e o método de Cohen e Coon [Lee, 1989]. No método de Ziegler e Nichols [Ziegler and Nichols, 1942], os parâmetros da sintonia são obtidos através do ganho do controlador e do período de oscilações quando o sistema em malha fechada é levado a condição de oscilação sustentada (sistema marginalmente estável). No caso do método de Cohen e Coon [Cohen and Coon, 1953] a resposta do sistema em malha aberta é medida e esta resposta é comparada a um sistema de primeira ordem mais tempo morto. Os parâmetros do PID para este último método são obtidos em função da constante de tempo e do tempo morto (este método também é conhecido como método da curva de reação do processo). O método de Ziegler e Nichols [Ziegler and Nichols, 1942] será descrito com maior detalhes na seção 4.3.1 a seguir [Ogata, K., 1993; McMillan, G. K., 1994; Coughanowr, D. R. e Koppel, L. B., 1978].

Estes dois métodos [Ziegler and Nichols, 1942; Cohen and Coon, 1953], apesar de populares, apresentam grandes desvantagens que são [Lee, 1989]: o tempo necessário para levar o sistema a oscilações contínuas [Ziegler and Nichols, 1942] e a necessidade de se abrir a malha de controle, para o caso do método da curva de reação do processo [Cohen and Coon, 1953].

Em função das facilidades apresentadas pelos dois métodos e também em função de suas deficiências, aprimoramentos em relação a estes métodos surgiram. Como citado por [Zervos, *et alii*, 1988], no mesmo espírito que Ziegler e Nichols [Ziegler and Nichols, 1942], Aströn e Hägglund [Aströn and Hägglund, 1983] propuseram um método onde o controlador é trocado por um relé que leva a malha para uma oscilação limite com frequência igual à frequência na qual o atraso de fase da planta é igual a  $180^\circ$ . O ganho da planta é estimado em função da amplitude da oscilação limite. Através da introdução de histerese e de ajuste do limite do relé é possível se alterar a frequência e a amplitude das oscilações limites respectivamente. O fato de se ter controle sobre a amplitude das oscilações limites é a grande vantagem em relação ao método das oscilações contínuas [Ziegler and Nichols, 1942]. Em uma outra linha, [Yuwana and Seborg, 1982] apresentaram um novo plano de sintonia baseado no

método da curva de reação do processo [Cohen and Coon, 1953] porém, para sistemas em malha fechada. Outros autores apresentaram trabalhos baseados em identificação com estrutura arbitrária seguido de otimização numérica dos parâmetros de controle [MacGregor, *et alii*, 1975; Isermann, 1991].

Independentemente do método a ser utilizado na sintonia de controladores tipo PID, os seguintes requisitos são desejados para um bom método de sintonia [Zervos, *et alii*, 1988]:

- Sintonizar controladores tipo PID para a maioria dos processos industriais (malha de controle);
- Caso necessário, provocar somente pequenos distúrbios na planta não sendo preciso assim, interromper a produção;
- Apresentar baixo risco de instabilidade;
- Requerer o mínimo possível de informações prévias sobre a planta, e
- Ser implementável em pouco tempo.

Neste trabalho efetuou-se experimentos utilizando métodos de sintonia de controladores tipo PID afim de verificar a aplicabilidade de três métodos existentes. O controlador que foi utilizado neste trabalho (UT 37 da Yokogawa) possui um algoritmo tipo PID ideal não-iterativo, conforme visto na equação (4.12). Este mesmo algoritmo também foi implementado na simulação.

$$M(s) = \frac{100}{PB} \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] E(s) \quad (4.12)$$

Este algoritmo é o mesmo apresentado em (4.1). Esta igualdade pode ser facilmente observada substituindo-se (4.10) em (4.12).

A seguir serão descritos os métodos que foram utilizados para sintonizar a planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica da UFMG. Os três métodos

escolhidos foram os propostos por: Ziegler e Nichols (1942); Chen (1989), e Aström e Hägglund (1983).

A escolha do método proposto por Ziegler e Nichols se deve à sua facilidade de implementação (com a aplicação do método são obtidos duas medidas através das quais é inferido o valor dos parâmetros do controlador) e também ao fato deste método servir de base de comparação para grande quantidade de métodos propostos. O método proposto por Chen é um método também de fácil implementação e através do mesmo pode-se obter diretamente a sintonia do controlador e/ou um modelo de primeira ordem com atraso de tempo que representa o processo. No método proposto por Chen é necessário um número maior de medidas e cálculos porém, o mesmo requer menos tempo para sua implementação além de evitar a instabilidade marginal. O método proposto por Aström e Hägglund possui parte das vantagens do método de Ziegler e Nichols e parte das vantagens do método proposto por Chen. Na implementação do mesmo são necessárias apenas três medidas e três operações para determinar o valor dos parâmetros do controlador. Além disso, sua implementação pode ser efetuada em pouco tempo.

#### **4.3.1 Descrição do método de sintonia de Ziegler e Nichols**

A proposta de Ziegler e Nichols consiste em determinar os valores do ganho proporcional  $K_c$ , do tempo integral  $T_i$  e do tempo derivativo  $T_d$ , do controlador tipo PID, a partir das características da resposta transitória de uma dada planta. O ajuste resultante normalmente resulta em uma resposta, ao degrau, em malha fechada de 25% (vinte e cinco por cento) de sobressinal máximo, ver figura 4.2 a seguir. O método de Ziegler e Nichols não pode ser aplicado a processos que possuam integração [Ogata, K., 1993].

Ajustes para os controladores P e PI também são propostos nesta seção .

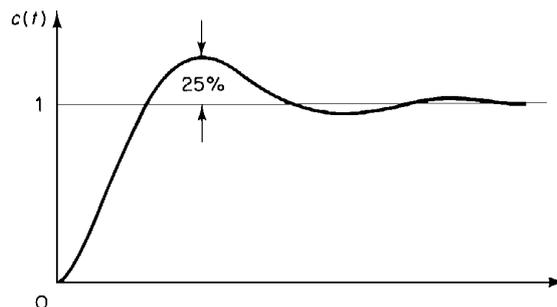


Figura 4.2 - Resposta, esperada, ao degrau de um sistema em malha fechada com controlador tipo PID ajustado pelo método de Ziegler e Nichols.

Afim de se efetuar a sintonia do controlador, utilizando-se este método, os seguintes passos devem ser seguidos:

- Ajustar  $T_i = \infty$  e  $T_d = 0$ , assim teremos um controlador com, apenas, ação proporcional, conforme visto na figura 4.3;
- Começando em zero, aumentar o valor de  $K_c$  desde zero até um valor crítico  $K_{cr}$  (ganho crítico) onde a saída exibirá oscilações mantidas, conforme visto na figura 4.4;
- Aplicar um degrau unitário na entrada de referência do sistema a cada novo valor de  $K_c$ ;
- Após conseguir uma resposta com oscilações mantidas, medir o período das mesmas. Esse período é definido como sendo o período crítico,  $P_{cr}$ , e
- De posse dos valores de ganho e período crítico e das fórmulas sugeridas por Ziegler e Nichols (conforme visto na tabela 4.1) ajustar os parâmetros do controlador.

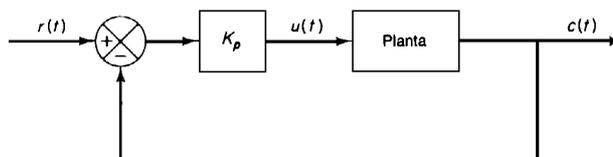


Figura 4.3 - Sistema em malha fechada com controlador proporcional.

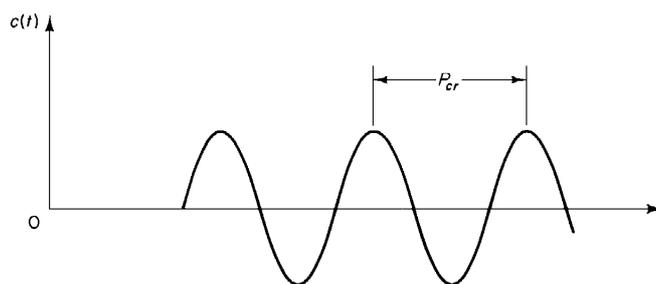


Figura 4.4 - Resposta, ao degrau, do sistema em malha fechada com controlador proporcional. Ajustado com ganho crítico.

Tabela 4.1 - Regras de determinação dos parâmetros de Ziegler e Nichols baseada no ganho e período crítico.

Tipo de controlador	$K_c$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0,45K_{cr}$	$0,83P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Apesar do método de Ziegler e Nichols ser simples e muito prático, pode-se enumerar aqui algumas de suas desvantagens:

- É necessário muito tempo para se efetuar a sintonia, e
- Devido a influências externas, a operação em malha fechada, numa condição de limite de estabilidade, pode-se transformar repentinamente em numa operação instável.

### 4.3.2 Descrição do método de sintonia de Chen

Da mesma forma que foi proposto por Ziegler e Nichols, Chen propõe a determinação dos valores do ganho proporcional  $K_c$ , do tempo integral  $T_i$  e do tempo derivativo  $T_d$ , do controlador tipo PID, a partir das características da resposta transitória de uma dada planta [Chen, 1989; Taiwo, 1993]. Neste método Chen propõe encontrar  $K_{cr}$  e  $P_{cr}$  de maneira diferente da proposta por Ziegler e Nichols porém, a relação entre  $K_{cr}$ ,  $P_{cr}$ ,  $K_c$ ,  $T_i$  e  $T_d$  são as mesmas propostas por Ziegler e Nichols. Utilizando-se o método de

Chen também pode-se encontrar um modelo que represente o processo através das características da resposta transitória da planta.

Com os parâmetros encontrados através do método de Chen é esperado uma resposta ao degrau em malha fechada de 25% (vinte e cinco por cento) de sobressinal máximo, conforme ilustrado na figura 4.2.

Afim de se efetuar a sintonia do controlador, utilizando-se este método, os seguintes passos devem ser seguidos:

- Ajustar  $T_i = \infty$  e  $T_d = 0$ , assim teremos um controlador com, apenas, ação proporcional, conforme visto na figura 4.3;
- Começando em zero, aumentar o valor de  $K_c$  até um valor onde a saída exibirá uma resposta típica de segunda ordem subamortecida, conforme visto na figura 4.5;
- Aplicar um degrau unitário na entrada de referência do sistema a cada novo valor de  $K_c$ ;
- Após ser obtido uma resposta conforme visto na figura 4.5, medir os seguintes parâmetros:  $C_{m1}$ ,  $C_{p1}$ ,  $C_{p2}$ ,  $C_\infty$ ,  $T_{m1}$  e  $T_{p1}$ ;

onde:

$C_{m1}$  é o primeiro valor de vale da variável de processo (PV);

$C_{p1}$  é o primeiro valor de pico da variável de processo (PV);

$C_{p2}$  é o segundo valor de pico da variável de processo (PV);

$C_\infty$  é o valor de estado estacionário da variável de processo (PV);

$T_{m1}$  é o tempo correspondente ao primeiro vale da variável de processo, e

$T_{p1}$  é o tempo correspondente ao primeiro pico da variável de processo.

- Com os valores obtidos acima efetuar as operações descritas nas equações de (4.13) a (4.20) [Chen, 1989; Taiwo, 1993], e
- De posse dos valores de ganho e período crítico e das formulas sugeridas por Ziegler e Nichols (conforme visto na tabela 4.1) ajustar os parâmetros do controlador.

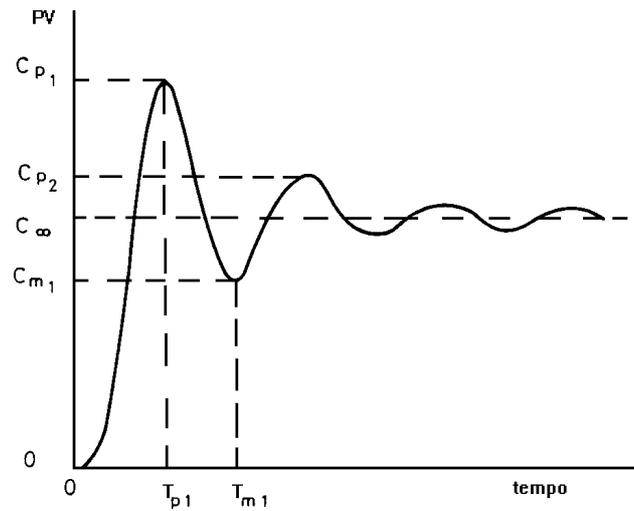


Figura 4.5 - Resposta típica de um sistema subamortecido de segunda ordem ao degrau

$$H = \frac{1}{3} \left[ \frac{C_{p1} - C_{\infty}}{C_{\infty}} + \frac{C_{\infty} - C_{m1}}{C_{p1} - C_{\infty}} + \frac{C_{p2} - C_{\infty}}{C_{\infty} - C_{m1}} \right], \quad (4.13)$$

onde  $H$  é definido [Chen, 1989] como sendo o sobressinal da variável de processo (PV).

$$K = \frac{C_{\infty}}{\Delta SP}, \quad (4.14)$$

onde:

$K$  é o ganho do sistema em malha fechada, e

$\Delta SP$  é a amplitude do valor de referência aplicado ao sistema durante os testes de sintonia propostos pelo método de Chen (1989).

$$\zeta = \frac{-\ln H}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 H}}, \quad (4.15)$$

onde  $\zeta$  é o quociente de amortecimento.

$$\tau = \frac{(Tm_1 - Tp_1)\sqrt{1-\zeta^2}}{\pi}, \quad (4.16)$$

onde  $\tau$  é a constante de tempo do processo.

$$d = 2Tp_1 - Tm_1, \quad (4.17)$$

onde  $d$  é o tempo morto da resposta em malha fechada.

$$-d\omega_u - \tan^{-1} \frac{2\zeta\tau\omega_u}{1 - \tau^2\omega_u^2} = -\pi, \quad (4.18)$$

onde  $\omega_u$  é a frequência crítica, em rad/s.

$$|G_{cl}(j\omega_u)| = \frac{K}{\sqrt{(1 - \tau^2\omega_u^2)^2 + (2\zeta\omega_u)^2}}, \quad (4.19)$$

onde  $G_{cl}$  é a função de transferência de malha fechada.

$$K_{cr} = K_c \frac{|G_{cl}(j\omega_u)|}{1 + |G_{cl}(j\omega_u)|}, \quad (4.20)$$

onde  $K_c$ , neste caso, é o ganho do controlador quando foi efetuado o teste.

### 4.3.3 Descrição do método de sintonia de Aström e Hägglund

Conforme proposto nos métodos descritos anteriormente, Aström e Hägglund propõem a determinação dos valores do ganho proporcional  $K_c$ , do tempo integral  $T_i$  e do tempo derivativo  $T_d$ , do controlador tipo PID, baseado nas características da resposta transitória de uma dada planta. Do mesmo modo que proposto por Ziegler e Nichols, neste método o sistema é forçado a exibir oscilações mantidas porém, com

amplitude menor e dentro do limite de estabilidade, conforme pode ser visto na figura 4.6. A partir da oscilação mantida é possível determinar o período crítico ( $P_{cr}$ ) e através de uma formulação matemática encontrar o valor do ganho crítico ( $K_{cr}$ ).

De posse dos valores de  $P_{cr}$  e  $K_{cr}$  e das relação entre  $K_{cr}$ ,  $P_{cr}$ ,  $K_c$ ,  $T_i$  e  $T_d$  propostas por Ziegler e Nichols é obtida a sintonia do controlador. Este procedimento também resulta em uma resposta ao degrau em malha fechada com 25% (vinte e cinco por cento) de sobressinal máximo, conforme visto na figura 4.2.

Afim de se efetuar a sintonia do controlador, utilizando-se este método, os seguintes passos devem ser seguidos [Riggs, 1997; Aström and Hägglund, 1983; Aström and Hägglund, 1988]:

- Verificar se o sistema está em estado estacionário ou próximo deste. Caso não esteja, aguardar até que o mesmo atinja o estado estacionário ou a vizinhança deste;
- Aplicar a variável manipulada em estado estacionário ( $MV_{ss}$ ) um degrau de  $\Delta MV$ . Assim,  $MV = MV_{ss} + \Delta MV$  ou  $MV = MV_{ss} - \Delta MV$ ;
- Aguardar que a variável de processo (PV) se afaste significativamente de  $PV_{ss}$ , então alterar o valor de MV. Assim, o valor da variável manipulada será  $MV = MV_{ss} - \Delta MV$  ou  $MV = MV_{ss} + \Delta MV$  caso o degrau inicial de MV tenha sido positivo ou negativo respectivamente, conforme visto na figura 4.6;
- Quando PV cruzar  $PV_{ss}$  alterar novamente o valor de MV,  $MV = MV_{ss} + \Delta MV$  ou  $MV = MV_{ss} - \Delta MV$ , conforme visto na figura 4.6;
- Repetir o item anterior por mais 4 (quatro) ciclos. Assim, serão obtidas oscilações mantidas em PV, conforme visto na figura 4.6;
- Medir o valor do período crítico ( $P_{cr}$ ) e a amplitude das oscilações, conforme visto na figura 4.4;
- Calcular o valor do ganho crítico ( $K_{cr}$ ) de acordo com a equação (4.21), e
- De posse dos valores de ganho e período crítico e das fórmulas sugeridas por Ziegler e Nichols (conforme visto na tabela 4.1) ajustar os parâmetros do controlador.

$$K_{cr} = \frac{4\Delta MV}{\pi a}, \quad (4.21)$$

onde  $a$  é a amplitude das oscilações mantidas.

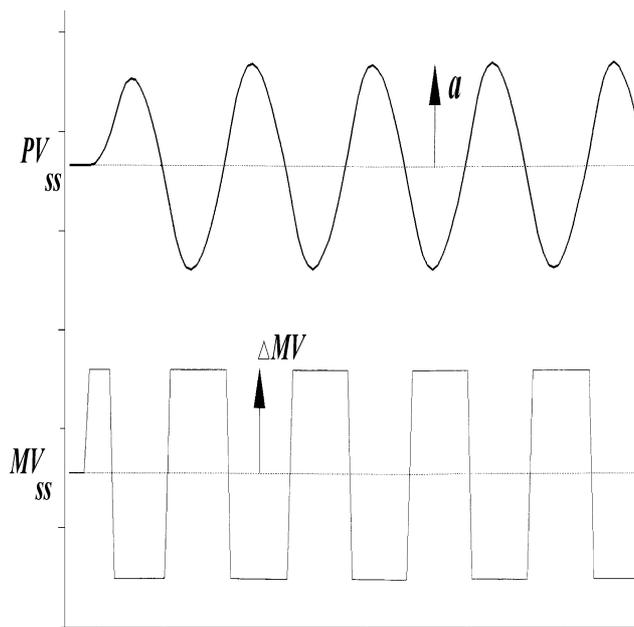


Figura 4.6 - Oscilações produzidas durante o procedimento para sintonia de controladores tipo PID utilizando-se o método de Aström e Hugglund. O eixo das abscissas representa o tempo e o eixo das ordenadas a variável de processo.

#### 4.4 Sintonia automática para controladores tipo PID, *auto-tuning*

Os controladores com sintonia automática são obtidos a partir da estimação automática da dinâmica do processo e do cálculo ou inferência dos parâmetros do controlador. Para o caso do controlador com sintonia automática os parâmetros do controlador são obtidos automaticamente a partir da resposta do processo a um sinal externo ou a um comando do operador [Aström and Wittenmark, 1990; Jardim, 1993].

A utilização de controladores com sintonia automática ou métodos de sintonia eficientes são ferramentas importantes no desempenho global de um sistema de controle. Controladores mal sintonizados podem inviabilizar a aplicação de técnicas de controle avançado pois, é fundamental a otimização do nível inferior para obter-se um melhor resultado em um nível superior [Jardim, 1993].

Pode-se concluir, com a leitura deste capítulo, que existem vários algoritmos de controle do tipo PID, várias maneiras de se efetuar a sintonia dos controladores do tipo PID e também vários detalhes ligados a sintonia dos mesmos. A existência de controladores com sintonia automática também é citada. A seguir, no próximo capítulo, os métodos de sintonia aqui descritos (Ziegler e Nichols, Aström e Hägglund e Chen) serão utilizados para efetuar a sintonia do sistema de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica e, com o sistema sintonizado, serão geradas hidrógrafas em simulação e utilizando a planta de bombeamento de água.

---

## Referências bibliográficas do capítulo

Aström, K. J. and Hägglund, T. (1983). Automatic Tuning of Simple regulators for Phase and amplitude margins specifications. *IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and signal Processing*, San Francisco.

Aström, K.J. and Hägglund, T. (1984a). A Frequency Domain Method for Automatic Tuning of Simple Feedback Loops. *Proceedings of 23rd Conference on Decision and Control*, Las Vegas, NV.

Aström, K.J. and Hägglund, T. (1984b). Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins. *Automatica*, 20:645-651.

Aström, K. J., Hägglund, T. (1988). *Automatic Tuning of PID Controllers*. Research triangle Park, NC, Instrument Society of America.

Aström, K.J., Wittenmark, B. (1973). On Self-tuning Regulators. *Automatica*, 9:185-199.

Aström, K.J., Wittenmark, B. (1990). *Computer-Controlled Systems*. Prentice Hall, Inc. 2<sup>o</sup> ed.

Chen, C.L. (1989). A simple Method for On-Line Identification and Controller Tuning. *AIChE Journal*. 35(12):2037-2039.

Clarke, D. W. (1983). PID Algorithms and their Computer Implementation. *O.U.E.L Report n° 1482/83*.

Clarke, D. W. and Gawthrop, P. J. (1975). Self-tuning Controller. *IEE Proceedings-D*, 122(9):929-934.

Cohen, G. H. and Coon, G. A. (1953). Theoretical Investigations of Retarded Control. *Transactions of the ASME*, 75:827.

Coon, G. A. (1956). How to find Control Setting from Process Characteristics. *Control Engineering*, March: 66-76.

Coughanowr, D. R. e Koppel, L. B. (1978). *Análise e Controle de Processos*. Guanabara dois S.A.

Gerry, J. P. (1987). A Comparison of PID Control Algorithms, *Control Engineering*, March: 102-105.

Hägglund, T. and Aström, K.J. (1985). Automatic Tuning of PID Controllers Based on Dominant Pole Design. *IFAC Workshop on Adaptive Control of Chemical Processes*, Frankfurt.

Hang, C. C., Aström, K. J. and Ho, W. K. (1991). Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula. *IEE Proceedings-D*, 138(2):111-118.

Isermann, R. (1991). *Digital Control Systems*. Springer, Berlin.

Jardim, E.M. (1993). Utilização de Controladores tipo PID com Sintonia Automática e Auto-Sintonizáveis em Processos Industriais, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

Kaya, A., Akron, O. and Scheib, T. J. (1988). Tuning of PID Controller for Different Structures. *Control Engineering*, July: 62-65.

Lee, J. (1989). On-Line PID Controller Tuning from a Single, Closed-loop test. *AIChE Journal*, 35(2):329-331.

MacGregor, J. F., Wright, J. D. and Hong, H. N. (1975). Optimal Tuning of Digital PID Controller Using Dynamic Stochastic Model. *IEC Process Des. Dev.*, 14:398-402.

McMillan, G. K., (1994). *Tuning and Control Performance: A Practitioner's Guide*. Research triangle Park, NC 27709, Instrument Society of America. 3<sup>o</sup> ed.

Miller, J. A., Lopez, A. M., Smith, C. L., and Murrilll, P. W. (1967). A Comparison of Controller Tuning Techniques. *Control Engineering*, December: 72-75.

Ogata, K., (1993). *Engenharia de Controle Moderno*. Prentice Hall do Brasil Ltda. 2<sup>a</sup> ed.

Riggs, J. B. (1997). Tuning Sluggish Loops using the ATV Procedure. *Automatic Control Systems. Division Newsletter*. ISA. Spring.

Seborg, D. E. (1994). A perspective on advanced strategies for process control. *Modeling, Identification and Control*, 15(3):179-189.

Taiwo, O. (1993). Comparison of four methods of on-line identification and controller tuning. *IEE Proceedings-D*, 140(5):323-327.

Yuwana, M. and Seborg, D. (1982). A New Method for On-Line Controller Tuning. *AIChE Journal*, 28:434-440.

Zervos, C., Bélanger, P. R. and Dumond, G. A. (1988). On PID Controller Tuning using Orthonormal Series Identification. *Automatica*, 24(2):165-175.

Ziegler, J. G. and Nichols, N.B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*, 65(11):759-768.

# 5

## *Geração de perfis de vazão utilizando-se a planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica*

Conforme proposto, este trabalho visa a geração de perfis de vazão utilizando-se a planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica da UFMG. Então, a fim de viabilizar este objetivo foi implantada uma malha de controle, ver figura 5-1. Assim, atuando-se no conversor de frequência em função do valor de referência<sup>1</sup> e da medição efetuada, produz uma curva de vazão de saída com um perfil próximo ao perfil de vazão desejado.

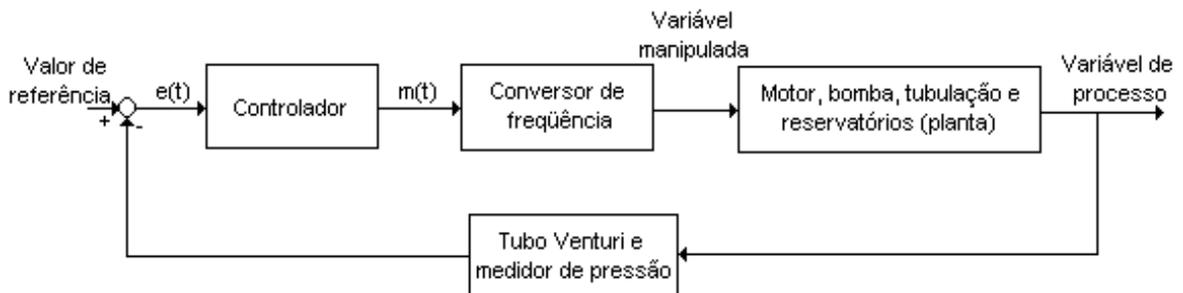


Figura 5-1 – Diagrama em blocos da malha de controle da planta de bombeamento de água.

Concorrente à implantação do sistema de controle foi efetuada a modelagem da planta e através do modelo obtido pôde-se gerar perfis de vazão em simulações utilizando-se

---

<sup>1</sup> O valor de referência é um sinal elétrico que representa o perfil de vazão desejado.

computadores. As simulações efetuadas permitem melhorar o entendimento do processo, auxiliar na sintonia do controlador, simular alterações no processo e prover entrada para simulações de outros modelos, *e.g.*, estudo do comportamento de um modelo reduzido perante a chegada de uma onda de cheia e ou a simulação de estuário perante as marés.

Em função deste capítulo descrever a geração de perfis de vazão utilizando-se a planta e em simulações, o mesmo é dividido nas seguintes seções: sintonia do controlador (seção 5.1), geração de perfis de vazão em simulações (seção 5.2) e geração de perfis de vazão utilizando-se a planta de bombeamento de água (seção 5.3).

## 5.1 Sintonia do controlador

A fim de se efetuar a sintonia do controlador tipo PID, foram utilizados os métodos de sintonia descritos no capítulo 4 - controladores PID. Após efetuada a sintonia através destes métodos, as mesmas foram comparadas<sup>2</sup> e a que obteve a melhor resposta ao degrau foi adotada. A sintonia automática disponível no controlador tipo PID utilizado também foi implementada e comparada.

Com o intuito de se obter um bom desempenho no controle da planta, a variável de processo (PV) foi dividida em três faixas e cada uma das faixas sintonizada separadamente.

---

<sup>2</sup> A comparação é efetuada em função do erro à resposta ao degrau do sistema em malha fechada e do esforço de controle. A integral, em relação ao tempo, da soma do erro e do esforço de controle normalizados e elevados ao quadrado é calculada e a que apresentar o menor valor é escolhida. Os parâmetros do controlador do tipo PID associados a integral escolhida é adotado.

Nesse trabalho os parâmetros do controlador foram adquiridos através de testes efetuado na planta piloto.

### 5.1.1 Sintonia através do método proposto por Ziegler e Nichols

Conforme abordado no capítulo 4, com o controlador operando somente no modo proporcional é aplicado um degrau ao valor de referência. Quando o sistema, em malha fechada, atinge o estágio de oscilações mantidas, o período destas oscilações é medido ( $P_{cr}$ ). O valor do termo proporcional, que causou as oscilações mantidas, é o ganho crítico ( $K_{cr}$ ).

Para o processo de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica não foi possível obter oscilações mantidas, mesmo aplicando-se o maior ganho (menor banda proporcional) possível para o controlador do tipo PID utilizado. A razão para isto é o fato do processo não ter atraso puro de tempo significativo e ser de baixa ordem.

### 5.1.2 Sintonia através do método proposto por Chen

Da mesma forma que foi proposto por Ziegler e Nichols [Ziegler and Nichols, 1942] ao sistema em malha fechada e com controle somente proporcional é aplicado um degrau. Porém, aqui não é esperada uma resposta com oscilações mantidas e sim uma resposta típica de um sistema de segunda ordem subamortecido. Conforme abordado no capítulo 4, alguns valores são extraídos desta resposta e através dos mesmos são obtidos o ganho e período crítico e inferido o valor dos termos PB, I e D do controlador. Na tabela 4.1 é apresentada a relação proposta por [Ziegler and Nichols, 1942] entre o ganho e período críticos e os parâmetros do controlador PID.

A seguir são apresentados nas figuras de 5-2 a 5-4 a resposta ao degrau do sistema com o controlador somente com ganho proporcional. Em todas as figuras o eixo da abcissas representa o tempo em segundos enquanto o das ordenadas representa a variável de

processo em percentual do seu valor máximo. Os dados foram filtrados (Butterworth de 8ª ordem) antes de serem exibidos.

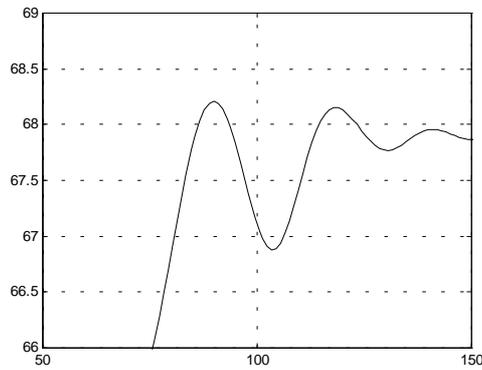


Figura 5-2 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na primeira faixa. Controlador somente em modo proporcional e com  $PB = 0,5$ .

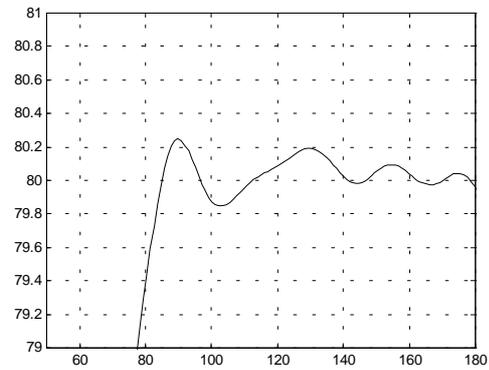


Figura 5-3 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na segunda faixa. Controlador somente em modo proporcional e com  $PB = 0,5$ .

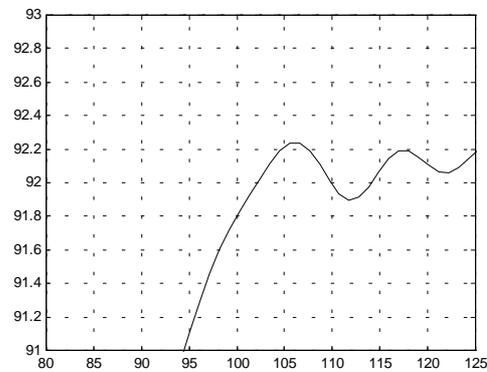


Figura 5-4 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na terceira faixa. Controlador somente em modo proporcional e com  $PB = 1$ .

Os valores obtidos para a sintonia do controlador podem ser verificadas na tabela 5.1 a seguir. É interessante ressaltar que para se atingir as respostas apresentadas nas figuras 5-2 a 5-4 foram necessários valores baixos de  $PB$  (o menor valor de  $PB$  possível é de 0,1). Apesar de valores baixos de  $PB$  (altos de ganho proporcional) as respostas ao degrau são pouco oscilatórias.

Tabela 5.1 - Valores dos parâmetros do controlador tipo PID obtidos através do método de [Chen, 1989].

Tipo de controlador	Parâmetros do controlador	1ª faixa	2ª faixa	3ª faixa
PI	PB	1,1	1,1	2,3
	I	24	22	17
PID	PB	0,9	0,8	1,7
	I	15	13	10
	D	4	3	3

Após adquiridos estes valores de sintonia, o controlador foi inicializado com os mesmos e a resposta ao degrau do sistema em malha fechada com controle do tipo PI e PID foi obtida e é apresentada a seguir, conforme visto nas figuras 5-5, 5-7, 5-9, 5-10, 5-13 e 5-15. O sinal proveniente da saída do controlador também foi coletado e é apresentado nas figuras 5-6, 5-8, 5-10, 5-12, 5-14 e 5-16. Para o sinal proveniente da saída do controlador o eixo da abcissas representa o tempo em segundos e o das ordenadas o percentual em relação ao máximo valor de saída.

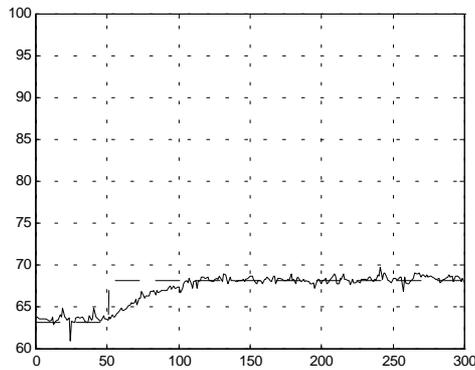


Figura 5-5 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na primeira faixa com controle do tipo PI. PB = 1,1 e I = 24 obtidos através de [Chen, 1989].

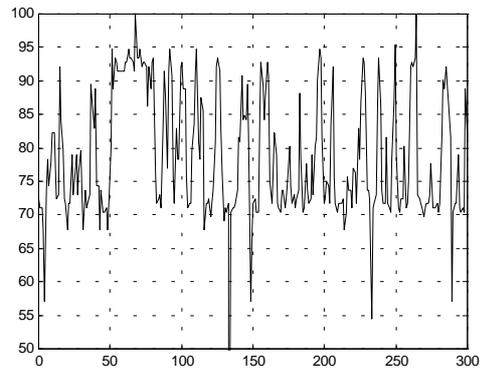


Figura 5-6 - Sinal de saída do controlador para a primeira faixa com controle do tipo PI. PB = 1,1 e I = 24 obtidos através de [Chen, 1989].

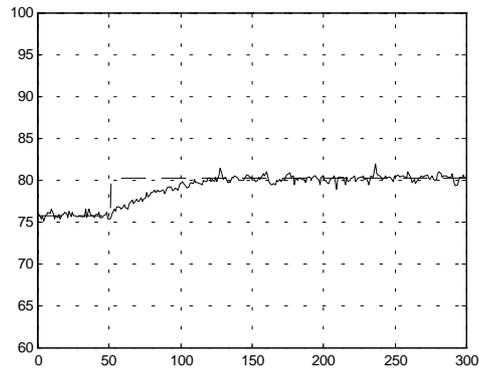


Figura 5-7 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na segunda faixa com controle do tipo PI.  $PB = 1,1$  e  $I = 22$  obtidos através de [Chen, 1989].

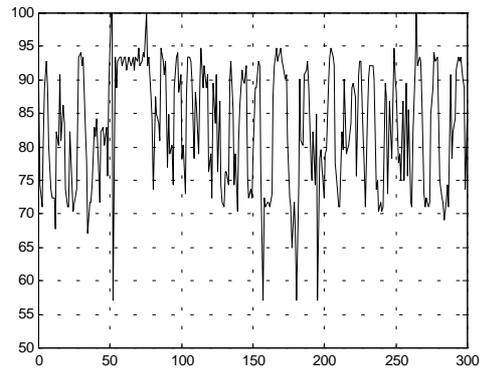


Figura 5-8 - Sinal de saída do controlador para a segunda faixa com controle do tipo PI.  $PB = 1,1$  e  $I = 22$  obtidos através de [Chen, 1989].

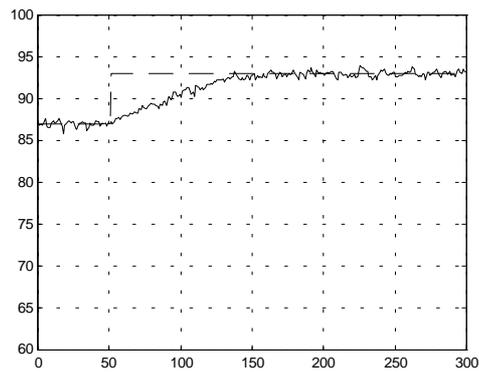


Figura 5-9 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na terceira faixa com controle do tipo PI.  $PB = 2,3$  e  $I = 17$  obtidos através de [Chen, 1989].

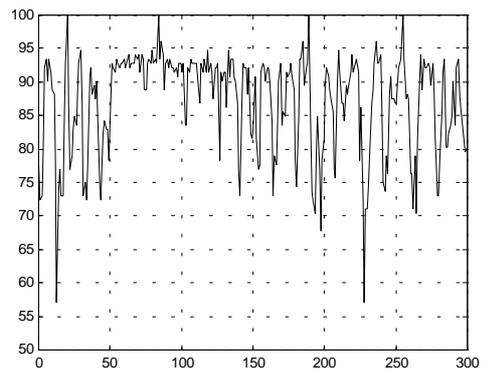


Figura 5-10 - Sinal de saída do controlador para a terceira faixa com controle do tipo PI.  $PB = 2,3$  e  $I = 17$  obtidos através de [Chen, 1989].

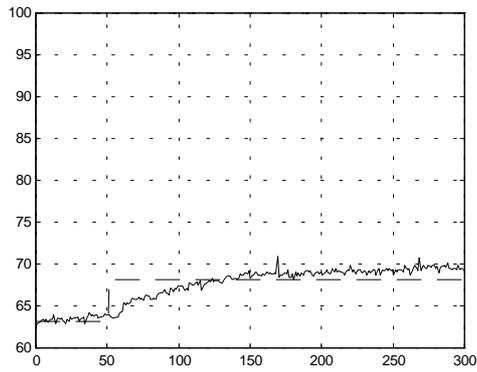


Figura 5-11 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na primeira faixa com controle do tipo PID.  $PB = 0,9$   $I = 15$  e  $D = 4$  obtidos através de [Chen, 1989].

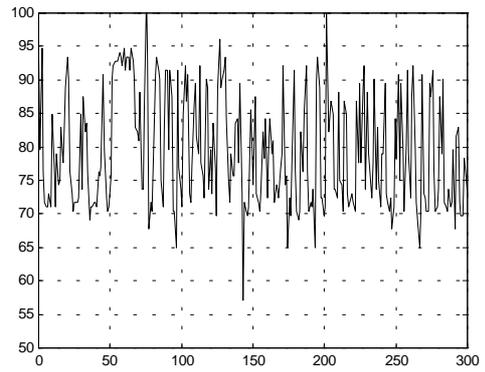


Figura 5-12 - Sinal de saída do controlador para a primeira faixa com controle do tipo PID.  $P = 0,9$   $I = 15$  e  $D = 4$  obtidos através de [Chen, 1989].

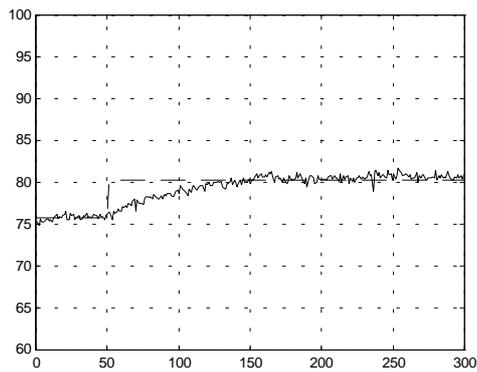


Figura 5-13 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na segunda faixa com controle do tipo PID.  $PB = 0,8$   $I = 13$  e  $D = 3$  obtidos através de [Chen, 1989].

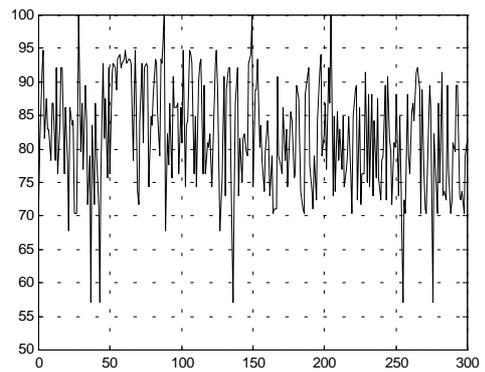


Figura 5-14 - Sinal de saída do controlador para a segunda faixa com controle do tipo PID.  $PB = 0,8$   $I = 13$  e  $D = 3$  obtidos através de [Chen, 1989].

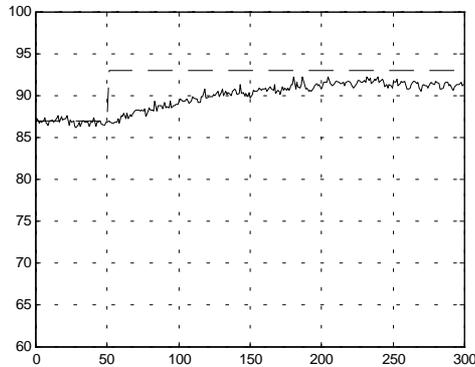


Figura 5-15 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na terceira faixa com controle do tipo PID.  $PB = 1,7$   $I = 10$  e  $D = 3$  obtidos através de [Chen, 1989].

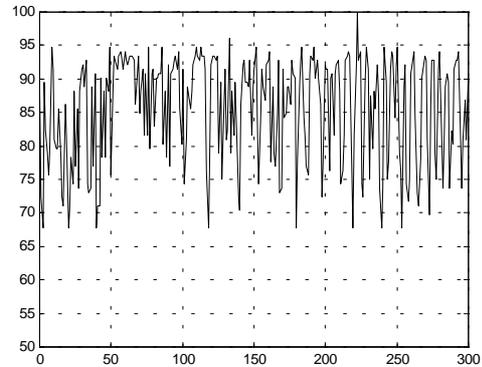


Figura 5-16 - Sinal de saída do controlador para a terceira faixa com controle do tipo PID.  $PB = 1,7$   $I = 10$  e  $D = 3$  obtidos através de [Chen, 1989].

É observado nesta seção que as respostas ao degrau são muito próximas. Pode-se comparar a resposta ao degrau com controlador PI ou PID ou ainda entre as faixas que será verificado que a dinâmica apresentada é praticamente a mesma. Devido ao ruído esta análise, apesar de qualitativa, é prejudicada. A diferença substancial é observada na ação de controle. Facilmente nota-se que as saídas provenientes do controle PID variam mais do que as provenientes do controle PI, o que de certa forma já era esperado.

Nas figuras 5-11 e 5-15 o valor medido apresenta um desvio ao valor de referência. Estes desvios poderiam ter sido provocados por erro de *offset* no instrumento de medida ou pela utilização de um controle sem o termo integral. Porém, podemos afirmar que estes dois fatos não ocorreram. O erro de *offset* não poderia ter ocorrido pois as demais medidas, que originaram as outras figuras, foram efetuadas em uma mesma série seguida de teste. Então, caso este tipo de erro ocorresse todas as demais medidas seriam afetadas. A utilização de controle sem a ação integral somente ocorreria caso o mesmo fosse esquecido. Fato também pouco provável em função da metodologia de alteração de parâmetros do controlador utilizada. Então, acredita-se que o fenômeno foi esporádico.

### 5.1.3 Sintonia através do método proposto por Aström e Hägglund

Conforme proposto por [Aström and Hägglund, 1988] e descrito no capítulo 4, com o processo em estado estacionário ( $MV_{ss}$  e  $PV_{ss}$ ) é aplicado à variável manipulada ( $MV_{ss}$ ) um acréscimo ( $\Delta MV$ ) em seu valor. Quando a variável de processo desviar sensivelmente de  $PV_{ss}$ , a variável manipulada ( $MV$ ) deve ser diminuída de um valor de  $2\Delta MV$ . Quando  $PV$  for menor que  $PV_{ss}$ ,  $MV$  deve ser acrescida de  $2\Delta MV$ . Quando  $PV$  for maior que  $PV_{ss}$ ,  $MV$  deve ser diminuída de  $2\Delta MV$ . Este processo de alteração do valor de  $MV$  deve ser repetido por mais de 4 vezes.

Em função do procedimento de troca do valor de  $MV$ ,  $PV$  deverá apresentar um comportamento oscilatório com uma certa amplitude e frequência. O valor do período e da amplitude destas oscilações deve ser medido. De posse dos mesmos e de  $\Delta MV$  pode-se determinar os valores dos termos do controlador, conforme descrito na seção 4.3.3.

A aplicação deste método também não obteve sucesso. Aqui, similarmente ao método proposto por [Ziegler and Nichols, 1942], não foi possível forçar o processo a exibir oscilações mantidas que caracterizem sua dinâmica.

### 5.1.4 Sintonia automática

A sintonia automática implementada pelo controlador utilizado na planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica segue possivelmente uma variação do método proposto por Aström e Hägglund.

A resposta ao degrau do sistema em malha fechada com controle do tipo PID, sintonizado a partir da sintonia automática do controlador, ver parâmetros na tabela 5.2, é apresentada a seguir nas figuras 5-17, 5-19 e 5-21 e o sinal proveniente da saída do controlador é apresentada nas figuras 5-18, 5-20 e 5-22.

Tabela 5.2 - Valores dos parâmetros do controlador tipo PID obtidos através da sintonia automática do controlador utilizado.

Parâmetros do controlador	1ª faixa	2ª faixa	3ª faixa
PB	8,0	6,1	6,3
I	14	10	7
D	3	2	2

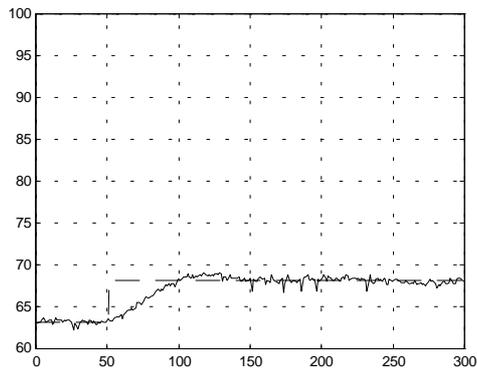


Figura 5-17 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na primeira faixa. Sintonia efetuada através da sintonia automática do controlador. PB = 8,0 I = 14 e D = 3.

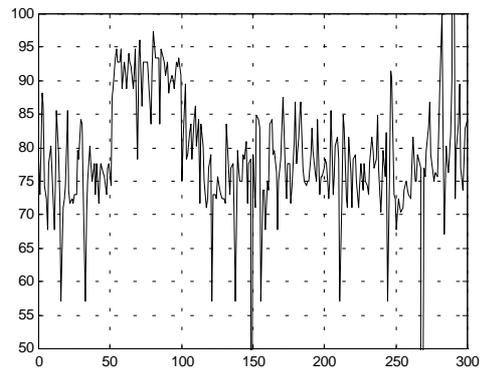


Figura 5-18 - Sinal de saída do controlador para a primeira faixa. Sintonia efetuada através da sintonia automática do controlador. PB = 8,0 I = 14 e D = 3.

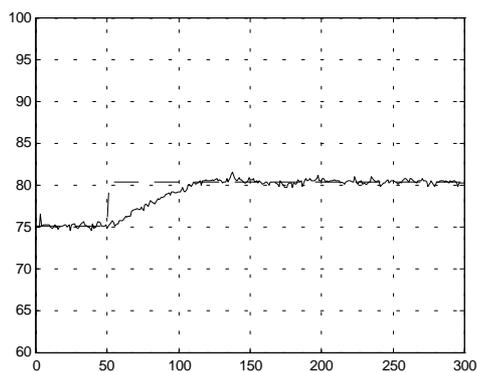


Figura 5-19 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na segunda faixa. Sintonia efetuada através da sintonia automática do controlador. PB = 6,1 I = 10 e D = 2.

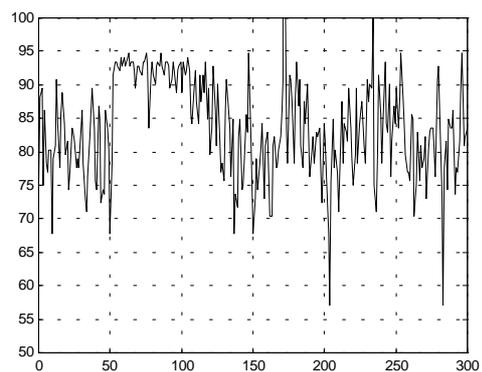


Figura 5-20 - Sinal de saída do controlador para a segunda faixa. Sintonia efetuada através da sintonia automática do controlador. PB = 6,1 I = 10 e D = 2.

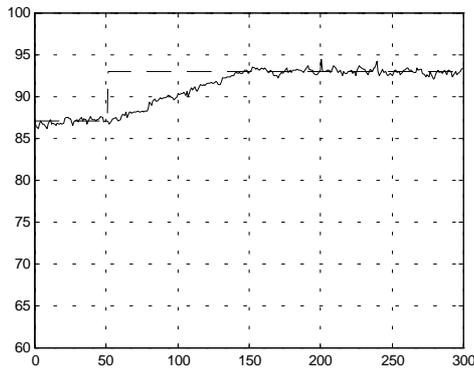


Figura 5-21 - Resposta ao degrau do sistema em malha fechada na terceira faixa. Sintonia efetuada através da sintonia automática do controlador.  $PB = 6,3$   $I = 7$  e  $D = 2$ .

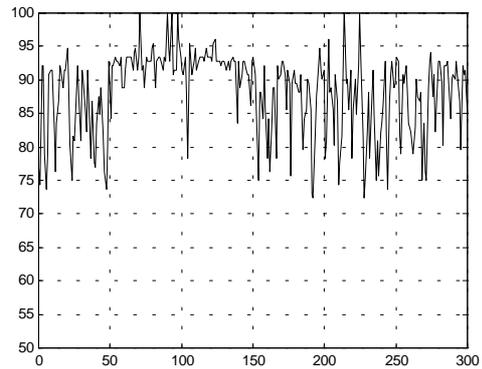


Figura 5-22 - Sinal de saída do controlador para a terceira faixa. Sintonia efetuada através da sintonia automática do controlador.  $PB = 6,3$   $I = 7$  e  $D = 2$ .

As respostas ao degrau para o sistema utilizando sintonia automática é muito próxima às respostas ao degrau para sistemas sintonizado através do método proposto por Chen. Diferenças foram observadas na ação de controle. A ação de controle produzida pelo controlador com sintonia automática é bem menos agressiva.

### 5.1.5 Comparação entre as sintonias obtidas

Após serem geradas todas as respostas do processo ao degrau para os métodos de sintonia utilizados e para as faixas de operação definidas, a integral, em relação ao tempo, da soma do quadrado do erro e do sinal de saída do controlador normalizados, conforme proposto em ( 5.1 ), foi calculada. Os valores obtidos no cálculo das integrais da soma do quadrado do erro e da ação de controle normalizados (*ISEU*) foram utilizados como fator de escolha entre os diversos conjuntos de parâmetros do controlador do tipo PID.

$$ISEU = \frac{1}{T} \int (Qe^2 + Ru^2) dt, \quad (5.1)$$

onde:

$e(t)$  (erro) é a diferença entre o valor de referência (SP) e a variável de processo (PV);

$u(t)$  é o sinal de saída do controlador;

$T$  é o período de ocorrência do teste;

$Q$  é o peso para o erro, e

$R$  é o peso para o sinal de saída do controlador.

Os valores de  $ISEU$  encontrados em função da faixa e do método utilizado para a sintonia são apresentados a seguir na tabela 5.3. Os valores de  $Q$  e  $R$  foram escolhidos a fim propiciar que o sinal de saída do controlador e o erro contribuíssem igualmente para o cálculo da  $ISEU$ . Os valores adotados são:  $Q = 16,67$  e de  $R = 270,27$ .

Tabela 5.3 - Valores encontrados para a  $ISEU$ .

	1º faixa ( $\times 10^3$ )	2º faixa ( $\times 10^3$ )	3º faixa ( $\times 10^3$ )
Método proposto por Chen - PI	<b>5,399</b>	5,939	<b>7,072</b>
Método proposto por Chen - PID	5,618	<b>5,807</b>	7,942
Sintonia automática -PID	5,536	6,197	7,351

Como pode ser observado na tabela 5.3 o método proposto por [Chen, 1989] apresentou melhores resultados e portanto foi o implementado no controlador. Pode-se observar também que em todas as faixas os valores são muito próximos o que sugere que não há um método muito superior ao outro. Neste caso, até a própria escolha dos valores dos pesos podem influenciar nos resultados dos valores calculados, indicando que um método é melhor que o outro.

## 5.2 Geração de perfis de vazão em simulações

Após termos efetuado a modelagem do sistema e de posse do provável algoritmo do tipo PID do controlador é possível efetuar simulações para geração de perfis de vazão. Um fato importante que deve ser observado é que o controlador utilizado (UT\_37 da Yokogawa) possui funções que tendem a minimizar o sobressinal devido ao termo proporcional e ao termo integral. Estas funções operam de acordo com seus próprios parâmetros e em conjunto com o algoritmo descrito em (4.12).

Na simulação foi usada, conjuntamente com o algoritmo do tipo PID, uma função que tende a minimizar o sobressinal causado pela ação integral. Esta função implementada na simulação não é a mesma implementada pelo controlador. Em função disto, as simulações podem diferir dos resultados práticos.

As simulações efetuadas neste trabalho não tem implementadas as funções existentes no controlador UT\_37. Isto se deve a falta ou inexistência de informação a respeito das funções do controlador. Informações imprecisas na documentação do fabricante e desinformação, a respeito do produto, por parte do representante também foram encontradas. Uma listagem do programa que simula a geração de perfis de vazão é apresentada no apêndice.

Os perfis de vazão gerados através de simulação reproduzem um dos registro da vazão em função do tempo (hidrogramas) referenciado em [Linsley and Franzini, 1978]. Os perfis podem ser vistos nas figuras 5-23 a 5-25. O valor de referência para cada perfil de vazão também é apresentado na mesma figura. Para o valor de referência (SP) a ordenada representa o seu valor em percentual do valor máximo de PV.

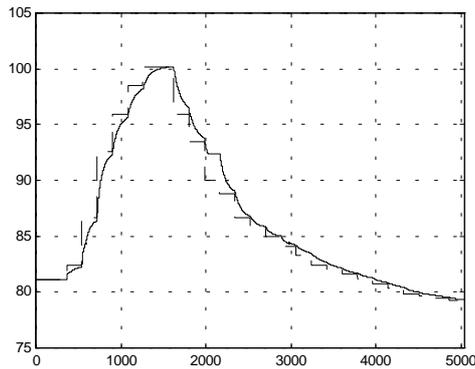


Figura 5-23 - Hidrograma gerado através de simulação (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada).  
Tempo total do hidrograma de 5040s.

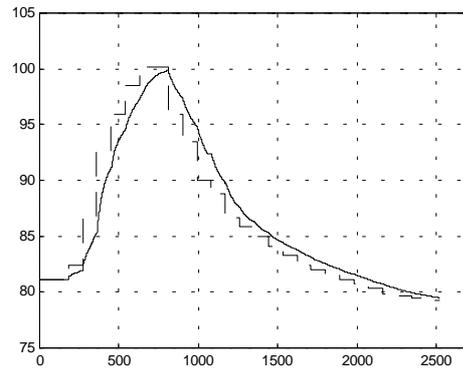


Figura 5-24 - Hidrograma gerado através de simulação (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada).  
Tempo total do hidrograma de 2520s.

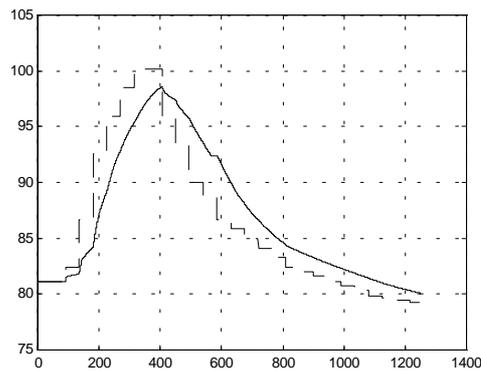


Figura 5-25 - Hidrograma gerado através de simulação (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada).  
Tempo total do hidrograma de 1260s.

Pode-se observar que para um dos casos o perfil de vazão seguiu muito proximamente o valor de referência (maior base de tempo). Em outro caso o perfil está um pouco defasado em relação à referência (base de tempo intermediária) e no outro caso o perfil de vazão não acompanhou a referência (menor base de tempo). Isto se deve ao fato da dinâmica do processo não ser rápida o suficiente para acompanhar as referências mais rápidas.

### 5.3 Geração de perfis de vazão utilizando-se a planta de bombeamento de água

Após definido qual o perfil de vazão a ser gerado, o usuário deve transformá-lo em um perfil de diferença de pressão e criar um arquivo deste perfil, conforme descrito na seção 2.3.8. Então, utilizando o procedimento de operação descrito na seção 2.4 o usuário pode gerar o perfil de vazão utilizando-se a planta de bombeamento de água. É importante ter em mente que o perfil de vazão não é a variável de processo neste trabalho. Portanto, de posse do perfil de vazão é necessário transformar os valores do mesmo em  $\Delta P$  (que é a nossa variável de processo) e depois aplicar ao sistema como sinal de referência. Da mesma forma, de posse da variável de processo é necessário inferir o valor de vazão utilizando-se a equação (3.10), equação do tubo Venturi, que relaciona as duas grandezas.

A seguir apresenta-se os perfis de diferença de pressão, o sinal de saída do controlador e os perfis de vazão gerados utilizando-se a planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica, conforme visto nas figuras 5-26 a 5-34. O valor de referência para os perfis de diferença de pressão e para os perfis de vazão também é apresentado na mesma figura. Os perfis de vazão reproduzem um dos hidrogramas referenciado em [Linsley and Franzini, 1978].

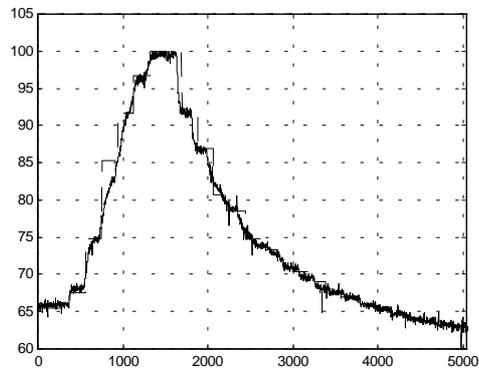


Figura 5-26 - Perfil de diferença de pressão gerado na planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 5040s.

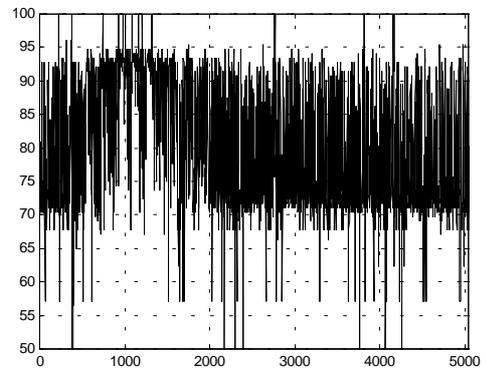


Figura 5-27 - Sinal de saída do controlador em % quando da geração de perfil de vazão. Tempo total do hidrograma de 5040s.

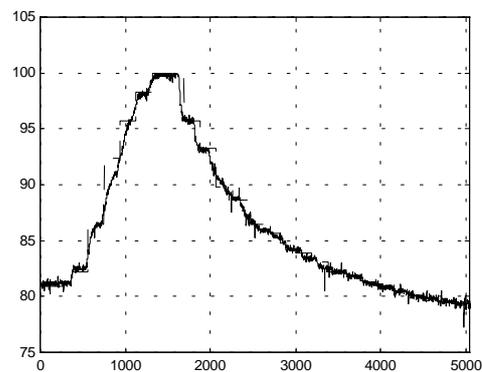


Figura 5-28- Perfil de vazão gerado na planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 5040s.

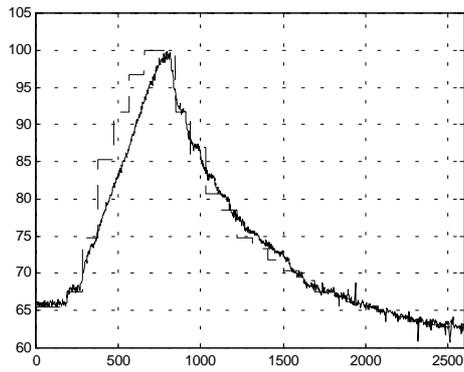


Figura 5-29- Perfil de diferença de pressão gerado na planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 2520s.

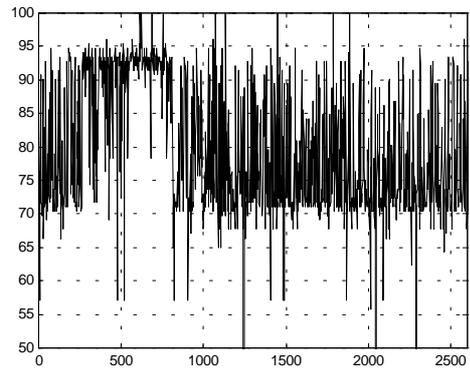


Figura 5-30- Sinal de saída do controlador em% quando da geração de perfil de vazão. Tempo total do hidrograma de 2520s.

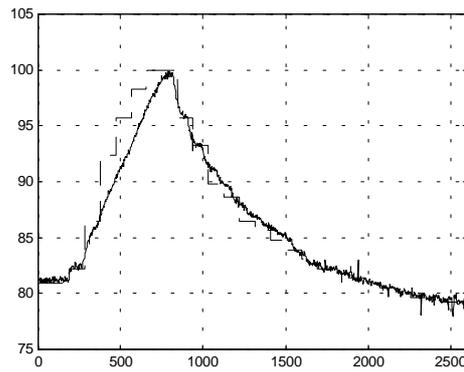


Figura 5-31- Perfil de vazão gerado na planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 2520s.

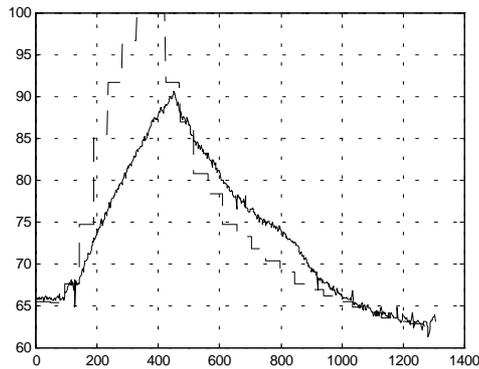


Figura 5-32- Perfil de diferença de pressão gerado na planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 1260s.

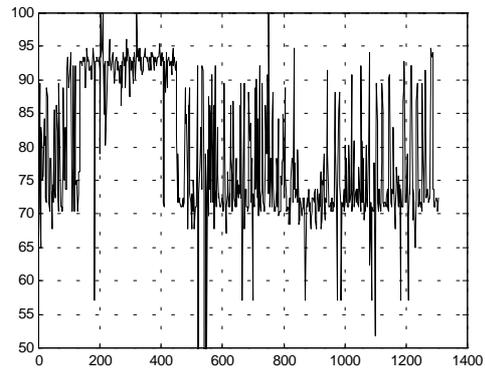


Figura 5-33- Sinal de saída do controlador em % quando da geração de perfil de vazão. Tempo total do hidrograma de 1260s.

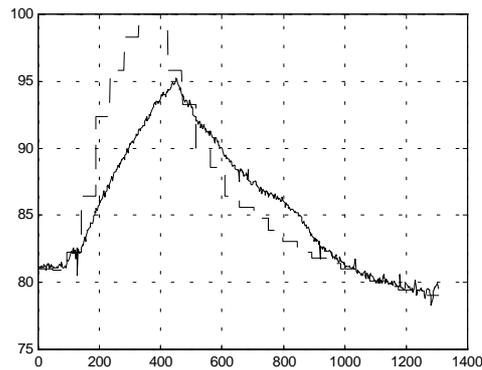


Figura 5-34- Perfil de vazão gerado na planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada). Tempo total do hidrograma de 1260s.

Ao final deste capítulo algumas observações podem ser feitas. No que se refere à sintonia do controlador verificou-se que os métodos estudados, excetuando-se o método proposto por Chen, não foram apropriados para a sintonia do controlador em questão. Pois apesar do processo apresentar uma resposta ao degrau em malha aberta com uma suave forma em S (esse), resposta típica que pode ser modelada como um processo de primeira ordem com tempo morto, o processo não oscilou em malha fechada. Provavelmente, em função da água ser incompressível, o processo não possui tempo ou possui um tempo morto muito pequeno.

Como era esperado as melhores sintonias observadas são para o controlador do tipo PI, principalmente pelo fato do sinal do medidor ser muito ruidoso.

Observou-se que o método de sintonia proposto por Chen é de fácil aplicação e através do mesmo pode-se obter os parâmetros do controlador com relativa facilidade. Também verificou-se que a sintonia automática é bem robusta pois, apesar de aplicar um método de sintonia similar ao proposto por Aström e Hägglund, que não foi possível de ser implementado, apresentou valores bem próximos ao demais valores obtidos.

Por último, pode-se afirmar que a geração de perfis de vazão tanto em simulação como utilizando-se a planta de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica é viável. Observa-se ainda que a simulação executada em ambiente Matlab apresenta resultados bem próximos ao real porém, é muito lenta. Portanto, uma reestruturação ou possível escolha de um outro ambiente para a simulação pode trazer grandes benefícios.

Finalizando-se a abordagem, especial atenção deve ser dada para os três perfis de vazão gerados, tanto na simulação como nos resultados práticos, pois os mesmos mostram claramente que a dinâmica do processo somente permitiu a geração de perfis de vazão para determinados casos (aqui para tempo total de 5040 e 2520 s). Perfis muito curtos, no tempo, não serão passíveis de serem executados em função da dinâmica da planta. Caso se deseje gerar perfis de vazão com período de tempo mais curtos, alterações na planta deverão ser efetuadas.

---

### Referência bibliográfica do capítulo

Aström, K. J., Hägglund, T. (1988). Automatic Tuning of PID Controllers. *Research triangle Park*, NC, Instrument Society of America.

Chen, C. L. (1989). A Simple Method for On-Line Identification and Controller Tuning. *AIChE Journal*, 35(12):2037-2039.

Linsley, R. K. And Franzini, J. B. (1978). Engenharia de recursos Hídricos, *McGraw-Hill do Brasil Ltda.*

Ziegler, J. G. and Nichols, N.B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*, 65(11):759-768.

# 6 *Conclusões*

Descreve-se neste capítulo as conclusões referentes ao trabalho e sugerem-se melhorias e novas etapas que podem ser consideradas em trabalho futuros. Este capítulo foi dividido em duas seções: conclusões gerais (seção 6.1) e sugestões para trabalhos futuros (seção 6.2).

## **6.1 Conclusões gerais**

Este trabalho descreveu a implantação de uma malha de controle numa planta piloto de bombeamento de água. A principal motivação para o trabalho foi a de adequar a planta piloto existente de forma a permitir a geração de perfis de vazão preestabelecidos.

A fim de atingir a meta estabelecida dois caminhos paralelos foram seguidos. Por um lado foi necessário especificar, adquirir, e instalar o equipamento necessário para, fisicamente, fechar a malha de controle. Por outro lado, um modelo matemático foi desenvolvido e técnicas de sintonia de controladores do tipo PID foram estudadas de forma a auxiliar na implementação e ajustes do sistema final.

Verificou-se que o procedimento de modelagem usado apresentou boa aproximação. Porém, os testes em regime permanente poderiam ter sido efetuados nas mesmas faixas em que o modelo foi dividido pois, cada faixa apresenta irregularidades distintas.

Pode-se verificar também que para a primeira faixa do modelo, que representa a parte inferior do reservatório TQ\_01, ajustes significativos nos parâmetros do modelo foram necessários. Este fato, possivelmente, deve-se à brusca alteração de área existente no reservatório nesta região. A proximidade à tomada da saída principal do reservatório também prejudica a resposta nesta faixa pois, quando não ocorre o preenchimento total do diâmetro da tubulação de saída ocorre a formação de pequenas ondas na superfície d'água. Estas ondas prejudicam a medição do nível e provocam uma vazão de saída descontínua. O aparato da tubulação de entrada do reservatório também é responsável pelas ondas sobre a superfície e também pelas irregularidades que provocam na área do reservatório.

No que se refere à sintonia observou-se que ambos os métodos, efetivamente aplicados, apresentaram boa resposta ao degrau. A máxima diferença encontrada entre os parâmetros do controlador sintonizado por cada um momento dos métodos, de acordo com o critério de escolha adotado, foi em torno de 10%. Caso se opte por outros valores para os pesos este panorama poderá alterar-se.

A geração de perfis de vazão a partir de simulação também foi efetuada e bons resultados foram encontrados. Os inconvenientes ligados à simulação se deram principalmente ao desconhecimento dos detalhes do algoritmo de controle do tipo PID implementado no controlador.

A geração de perfis de vazão utilizando-se a planta de bombeamento foi efetuada com sucesso. Como o perfil de vazão a ser gerado é intrinsecamente ligado à dinâmica do processo, perfis que exigiam dinâmica mais rápida à do processo não puderam ser geradas. Em consequência do sucesso alcançado na geração de perfis de vazão, espera-se que diversos estudos usando modelos reduzidos sejam efetuados no futuro próximo.

## 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

No que se refere ao modelo obtido, alguns parâmetros do mesmo poderiam ser adquiridos em um número maior de faixas. Com um número maior de faixas e com testes aplicados por faixas uma melhor aproximação poderia ser obtida. A utilização de outras técnicas para efetuar a modelagem do processo seria de grande valia. A representação do processo através de função de transferência facilitaria a execução de simulações enormemente (utilizando-se o Matlab).

O estudo das irregularidades do reservatório TQ\_01 como não linearidades do processo é um bom campo para se efetuar modelagens ou utilizar técnicas de controle mais sofisticadas. Também, o fato deste tipo de processo sofrer ações como o encrustamento das tubulações o torna um processo com parâmetros variantes no tempo. Assim, um bom campo de estudo seria a análise do processo considerando todas estas variáveis.

Outro trabalho interessante seria efetuar a modelagem e controle do processo a partir de perdas de carga no processo. Ou seja, a partir de duas tomadas de pressão na tubulação de saída principal e do conhecimento desta vazão modelar-se-ia o processo e também se efetuariam o controle através destes pontos. Este estudo poderia ser tratado a nível industrial a fim de se eliminar medidores de vazão ou diferença de pressão. Seria necessário somente um medidor de vazão portátil.

A utilização do nível como sendo a variável manipulada seria um interessante trabalho pois possibilitaria a geração de perfis de vazão utilizando-se plantas que não possuam tubo Venturi.

A troca do controlador do tipo PID por controle digital também poderia ser estudada. Com esta alteração outras técnicas de controle poderiam ser estudadas e implementadas como por exemplo a utilização de “lógica difusa”.

Poderiam ser aplicados outros perfis de vazão à planta e desta forma verificar os limites de aplicabilidade da planta.

Um estudo com o intuito de localizar e eliminar as fontes de ruídos na planta poderia ser efetuado.

Por último, o estudo de métodos de sintonia a serem aplicados a processos sem integrador e que não oscilam também pode ser efetuado e aplicado à planta.

## ***Referência bibliográfica***

Advantech Co., Ltda. (1992). PCL-711 B - Pc-Multilab CARD - User's Manual. Part nº 2003711010 rev. A1.

Araújo, j. c. (1993). Velocimetria a Laser-Doppler e Sua Aplicação à Hidráulica. *Rev. Engenharia*, ASTEF e CT-UFC, Fortaleza, n. 10, p.61-69.

Aström, K. J. and Hägglund, T. (1983). Automatic Tuning of Simple regulators for Phase and amplitude margins specifications. *IFAC Workshop on Adaptive Systems in Control and signal Processing*, San Francisco.

Aström, K.J. and Hägglund, T. (1984a). A Frequency Domain Method for Automatic Tuning of Simple Feedback Loops. *Proceedings of 23rd Conference on Decision and Control*, Las Vegas, NV.

Aström, K.J. and Hägglund, T. (1984b). Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins. *Automatica*, 20:645-651.

Aström, K. J., Hägglund, T. (1988). *Automatic Tuning of PID Controllers*. Research triangle Park, NC, Instrument Society of America.

Aström, K.J., Wittenmark, B. (1973). On Self-tuning Regulators. *Automatica*, 9:185-199.

Aström, K.J., Wittenmark, B. (1990). *Computer-Controlled Systems*. Prentice Hall, Inc. 2º ed.

Camargo, H. A. (1997). Detecção e Isolamento de Falhas Utilizando Estimativa de Parâmetros de Modelos Contínuos e Limites de Confiança Adaptativos - Aplicação a

## Referência bibliográfica

---

uma Planta Piloto, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

Chen, C.L. (1989). A simple Method for On-Line Identification and Controller Tuning. *AIChE Journal*. 35(12):2037-2039.

Clarke, D. W. (1983). PID Algorithms and their Computer Implementation. *O.U.E.L Report n° 1482/83*.

Clarke, D. W. and Gawthrop, P. J. (1975). Self-tuning Controller. *IEE Proceedings-D*, 122(9):929-934.

Cohen, G. H. and Coon, G. A. (1953). Theoretical Investigations of Retarded Control. *Transactions of the ASME*, 75:827.

Coon, G. A. (1956). How to find Control Setting from Process Characteristics. *Control Engeneering*, March: 66-76.

Coughanowr, D. R. e Koppel, L. B. (1978). *Análise e Controle de Processos*. Guanabara dois S.A.

Delmée, G. J. (1983). Manual de Medição de vazão. *Editora Edgard Blücher Ltda*, São Paulo, 2º edição.

Durst, Melling E Whitelaw (1976). *Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry*. Academic Press. London. 405p.

Fiedler, O. (1992) *Strömungs- und Durchflußmeßtechnik*. Oldenburg Verlag. München. Kap..7.

Gerry, J. P. (1987). A Comparison of PID Control Algorithms, *Control Engineering*, March: 102-105.

Hägglund, T. and Aström, K.J. (1985). Automatic Tuning of PID Controllers Based on Dominant Pole Design. *IFAC Workshop on Adaptive Control of Chemical Processes*, Frankfurt.

Hang, C. C., Aström, K. J. and Ho, W. K. (1991). Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula. *IEE Proceedings-D*, 138(2):111-118.

ISA Instrument Society of America. (1994). Norma ANSI/ISA - S5.1-1994 (R1992) Instrumentation Symbols and Identification. Reaffirmed on July 13, 1992. *Research Triangle Park*, North Carolina 27709.

Isermann, R. (1991). *Digital Control Systems*. Springer, Berlin.

Jardim, E.M. (1993). Utilização de Controladores tipo PID com Sintonia Automática e Auto-Sintonizáveis em Processos Industriais, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

Kaya, A., Akron, O. and Scheib, T. J. (1988). Tuning of PID Controller for Different Structures. *Control Engineering*, July: 62-65.

Lee, J. (1989). On-Line PID Controller Tuning from a Single, Closed-loop test. *AIChE Journal*, 35(2):329-331.

Linsley, R. K. and Franzini, J. B. (1978). Engenharia de recursos Hídricos, *McGraw-Hill do Brasil Ltda.*

Lopardo, R.A., Vernet, G.F. and Chicidini, M.F. (1985), Modelling the behaviour of high head hydraulic jump energy dissipators under flood conditions, Proc. 2nd International Conference on the Hydraulic of Floods & Flood Control, Cambridge, England, BHRA, The Fluid Engineering Center. Paper G1.p.313-323.

MacGregor, J. F., Wright, J. D. and Hong, H. N. (1975). Optimal Tuning of Digital PID Controller Using Dynamic Stochastic Model. *IEC Process Des. Dev.*, 14:398-402.

Magalhães, F., Parma, G. e Filho, R. M. S. (1996). Medidor de Nível - Relatório de Instrumentação Industrial. *Laboratório de Ensino de Controle e Instrumentação UFMG*.

Marques, M. G. (1995). Nouvelle approche pour le dimensionnement des dissipateurs à auge. These de doctorat a presentada a Faculté de 'tudes supérieures da Université Laval - 328p.

McMillan, G. K., (1994). Tuning and Control Performance: A Practitioner's Guide. *Research triangle Park, NC 27709, Instrument Society of America*. 3º ed.

Miller, J. A., Lopez, A. M., Smith, C. L., and Murrilll, P. W. (1967). A Comparison of Controller Tuning Techniques. *Control Engineering*, December: 72-75.

Morais, F. (1998). Medidor de diferença de Pressão/Vazão - Relatório de Iniciação Científica. *Laboratório de Ensino de Controle e Instrumentação UFMG*.

Nogami, P. S., Drausio, L.L., Cypriano, J.M., Sartori, J.R. e Merino, R.W.B. (1974). Bombas e Sistemas de Recalque. *Secretaria dos Serviços e Obras Públicas, São Paulo*.

Ogata, K., (1993). *Engenharia de Controle Moderno*. Prentice Hall do Brasil Ltda. 2ª ed.

## Referência bibliográfica

---

Riggs, J. B. (1997). Tuning Sluggish Loops using the ATV Procedure. *Automatic Control Systems. Division Newsletter*. ISA. Spring.

Rios, J.L.P. (1988). Construção e Utilização do Anemômetro a Laser no Estudo de Escoamentos Turbulentos. *RBE - Caderno de Rec. Hídricos*. V.6, n.2

Seborg, D. E. (1994). A perspective on advanced strategies for process control. *Modeling, Identification and Control*, 15(3):179-189.

Shinskey, F.G. (1988). *Process Control Systems*, 3rd ed., McGraw-Hill.

Taiwo, O. (1993). Comparison of four methods of on-line identification and controller tuning. *IEE Proceedings-D*, 140(5):323-327.

Weg Automação Ltda. (1993). Manual do Conversor de Frequência série CFW-02. MAN AO. 4150.1707 novembro de 1993.

Yuwana, M. and Seborg, D. (1982). A New Method for On-Line Controller Tuning. *AICHE Journal*, 28:434-440.

Yokogawa Electric Corporation. (1995). UT37, UT38 Digital Indicating Controller Initial Setting Manual. IM 5B4B7-02E 1995, October 2º Edition.

Yokogawa Electric Corporation. (1995). UT37, UT38 Digital Indicating Controller Operation Manual. IM 5B4B7-21E 1995, June 2º Edition.

Zervos, C., Bélanger, P. R. and Dumond, G. A. (1988). On PID Controller Tuning using Orthonormal Series Identification. *Automatica*, 24(2):165-175.

Ziegler, J. G. and Nichols, N.B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*, 65(11):759-768.

# A

## Listagem do programa para simulação do processo em malha aberta

A seguir é apresentada a listagem do programa para ambiente Matlab que simula o processo de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica da UFMG.

```
clear;clear global;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%      tff = 3600; % dados em segundos
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%      tol = 1e-1; % Accuracy
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%      trace = 0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%      delta_t = 1; % dado em segundo
%      declaracao de parametros e      TD = 100; % instante da aplicacao
entrada de dados      do degrau
                        SP1 = 16.34;
                        SP2 = 17.05;
xo = 0.0589; % condicao inicial do
nivel em metros
to = 0;
% 50 Hz --> 15,61 mA % <-- menor
valor a ser aplicado
% xo = 0.004  1a fixa subindo      % 51 Hz --> 15,90 mA %
% xo = 0.0589 2a fixa subindo      % 52 Hz --> 16,10 mA %
% xo = 0.21   3a fixa subindo      % 53 Hz --> 16,34 mA % <-- valor
% xo = 0.0466 1a fixa descendo      limite entre faixas 1 e 2
% xo = 0.26   2a fixa descendo      % 54 Hz --> 16,58 mA %
% xo = 0.534  3a fixa descendo      % 55 Hz --> 16,79 mA %
```

---

```

% 56 Hz --> 17,05 mA % <-- valor limite entre faixas 2 e 3
% 57 Hz --> 17,23 mA %
% 58 Hz --> 17,46 mA %
% 59 Hz --> 17,75 mA %
% 60 Hz --> 17,90 mA %

load ens_25; % arquivo de dados coletados

% ens_32 1a fixa subindo
% ens_25 2a fixa subindo
% ens_34 3a fixa subindo
% ens_33 1a fixa descendo
% ens_26 2a fixa descendo
% ens_35 3a fixa descendo

% h_ens = (h_m_ens - 4.2)*100/(4.94-4.2); % ens_32 a 35
h_ens = (h_m_ens - 1)*100/(1.827-1); % para ens_25 e 26

k = 0;
h_sd = 0;
TDD = TD/delta_t;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% definicao de constantes
% teste estatico com saida principal aberta
% resultados

f = [50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60]; % em hz
i = [15.61 15.90 16.10 16.34 16.58 16.79 17.05 17.23 17.46 17.75 17.90]; % i e dado em mA
pb = [.40 .41 .42 .44 .45 .47 .49 .51 .53 .55 .56]; % em kgf/cm2
px = [.13 .13 .13 .13 .13 .13 .13 .13 .13 .13 .13]; % em kgf/cm2
delta_po = [59 63 66 70 73 77 82 87 91 95 96]; % em mm Hg
delta_h = [58.3 53.2 49.0 42.2 36.5 29.7 22.2 15.3 8.1 1.6 0.0]; % em cm
h = (58.3 - delta_h); % 50 hz nivel zero

% adequacao de unidades obs.: as pressoes sao manometricas

pe = 1e3; % kgf/m3 - peso especifico (pe=ro*g(massa esp.*gravidade))
k_vent = 63.7; % constante de proporcionalidade do venturo
h = h/100; % metros

```

```

pb = pb*1e4; % kgf/m2
px = px*1e4; % kgf/m2
delta_po = delta_po*13.5951; %
kgf/m2

%calculo da vazao de saida em
m3/s

qo =
63.7*sqrt(1/pe)*sqrt(delta_po)/3600;

% A vazao de entrada e igual a de
saida para o estado estacionario

system_dependent(14,'on');
n = 1; % n = grau do polinomio que
aproxima a funcao

% definicao de ko

ro_g_h = pe*h;
r_ro_g_h = sqrt(ro_g_h);
%ko = qo/r_ro_g_h;

figure(1);
x1 = [0:25];
[p1,s1] = polyfit(r_ro_g_h,qo,n);
y1 = polyval(p1,x1);

plot(r_ro_g_h,qo,'w--
',r_ro_g_h,qo,'w+',x1,y1,'w');grid;
% xlabel('raiz de ro_g_h em kgf/m2
');ylabel('qo em m3/s');
% title('definicao de ko - raiz de
ro_g_h X qo');
ko = p1;

% definicao de ki

qi = qo;
hi = h;
ro_g_hi = pe*hi;
aux2 = sqrt(pb - ro_g_hi);
%ki = qi/aux2;

figure(2);
x2 = [63:71];
[p2,s2] = polyfit(aux2,qi,n);
y2 = polyval(p2,x2);
plot(aux2,qi,'w--
',aux2,qi,'w+',x2,y2,'w');grid;
ki = p2;

% definicao da funcao pb = f(u)
% teste para a frequencia

% figure(3);
%x3 = [49:.1:60];
%[p3,s3] = polyfit(f,pb,n);
% y3 = polyval(p3,x3);

```

---

```

% plot(f,pb,'w+',f,pb,'w--',x3,y3,'y');
% grid;Xlabel('frequencia de
entrada em Hz');
% Ylabel('pressao na saida da
bomba em kgf/m2');
% title('Grafico pb X f');
% kuf = p3;

% teste para entrada em corrente

figure(3);
x4 = [15.5:0.01:18];
[p4,s4] = polyfit(i,pb,n);
y4 = polyval(p4,x4);
plot(i,pb,'w+',i,pb,'w--
',x4,y4,'w');grid;
% Xlabel('corrente de entrada em
mA');
% Ylabel('pressao na saida da
bomba em kgf/m2');
% title('Grafico pb X i');
kui = p4;

A = 2.5;
off_set = -14.1288e-3; % em m/s

% sintonia do modelo em faixas

ki1 = ki*1;
ko1 = ko*1;
kui1(1) = kui(1)*.9;
kui1(2) = kui(2)*.85;

A1 = A*2.5;
off_set1 = off_set*.405;

ki2 = ki*1;
ko2 = ko*1;
kui2(1) = kui(1)*1.22;
kui2(2) = kui(2)*.972;
A2 = A*1.32;
off_set2 = off_set*1.00;

ki3 = ki*1;
ko3 = ko*1;
kui3(1) = kui(1)*1.22;
kui3(2) = kui(2)*.972;
A3 = A*1.3;
off_set3 = off_set*1.02;

ki4 = ki*1;
ko4 = ko*1;
kui4(1) = kui(1)*.7;
kui4(2) = kui(2)*.7;
A4 = A*3;
off_set4 = off_set*.275;

ki5 = ki*1;
ko5 = ko*1;
kui5(1) = kui(1)*1.22;
kui5(2) = kui(2)*.972;
A5 = A*1.33;
off_set5 = off_set*0.985;

ki6 = ki*1;

```

```

ko6 = ko*1;
kui6(1) = kui(1)*1.22;
kui6(2) = kui(2)*.972;
A6 = A*1.3;
off_set6 = off_set*1.017;

% criacao de constantes para
utilizar no modelo em faixas

kikui1 = ki1(1)^2*kui1(1)/(A1^2);
kikui2_1 = ki1(1)^2*kui1(2)/(A1^2);
kipe1 = ki1(1)^2*pe/(A1^2);
kope1 = ko1(1)^2*pe/(A1^2);

kikui2 = ki2(1)^2*kui2(1)/(A2^2);
kikui2_2 = ki2(1)^2*kui2(2)/(A2^2);
kipe2 = ki2(1)^2*pe/(A2^2);
kope2 = ko2(1)^2*pe/(A2^2);

kikui3 = ki3(1)^2*kui3(1)/(A3^2);
kikui2_3 = ki3(1)^2*kui3(2)/(A3^2);
kipe3 = ki3(1)^2*pe/(A3^2);
kope3 = ko3(1)^2*pe/(A3^2);

kikui4 = ki4(1)^2*kui4(1)/(A4^2);
kikui2_4 = ki4(1)^2*kui4(2)/(A4^2);
kipe4 = ki4(1)^2*pe/(A4^2);
kope4 = ko4(1)^2*pe/(A4^2);

kikui5 = ki5(1)^2*kui5(1)/(A5^2);
kikui2_5 = ki5(1)^2*kui5(2)/(A5^2);
kipe5 = ki5(1)^2*pe/(A5^2);

kope5 = ko5(1)^2*pe/(A5^2);
kikui6 = ki6(1)^2*kui6(1)/(A6^2);
kikui2_6 = ki6(1)^2*kui6(2)/(A6^2);
kipe6 = ki6(1)^2*pe/(A6^2);
kope6 = ko6(1)^2*pe/(A6^2);

% declaracao de variaveis globais

global Us
global k

global kikui1
global kikui2_1
global kipe1
global off_set1
global kope1

global kikui2
global kikui2_2
global kipe2
global off_set2
global kope2

global kikui3
global kikui2_3
global kipe3
global off_set3
global kope3

global kikui4

```

---

```

global kikui2_4
global kipe4           %-----   execucao da funcao
global off_set4       -----
global kope4

                                k = 0;
                                h_ultimo(1) = xo;

global kikui5
global kikui2_5
global kipe5           for j = to:delta_t:tff
global off_set5        tf = to + delta_t;
global kope5           k = k + 1;

                                % calculo do valor do nivel de 0 a
                                % 10% nivel

global kikui6
global kikui2_6
global kipe6
global off_set6       %   if (Us(k) < 16.34 & h_sd >= 0)
global kope6           if (h_ultimo(k) <= 0.0583 &
                                h_sd >= 0)

% criacao do vetor de entrada Us

                                [t,x]           =
                                ode23('planta1',to,tf,xo,tol,trace);

for i = to:delta_t:tff
    k = k + 1;
    if k < TDD
        Us(k) = SP1;
    elseif (Us(k) < 16.34 & h_sd
    < 0)
        Us(k) = SP2;
    elseif (h_ultimo(k) <= 0.0583
    & h_sd < 0)
        [t,x]           =
        ode23('planta4',to,tf,xo,tol,trace);
    end;
    if Us(k) <= 15.61
        Us(k) = 15.61;
    end;
    if Us(k) >= 20
        Us(k) = 20;
    end;
    % calculo do valor do nivel de > 10
    % a 44% nivel
end;

```

```

% if (Us(k) >= 16.34 & Us(k) <=
17.05 & h_sd >= 0)
    if (h_ultimo(k) > 0.0583 &
h_ultimo(k) <= 0.2565 & h_sd >= 0)
        [t,x] =
ode23('planta2',to,tf,xo,tol,trace);

% elseif (Us(k) >= 16.34 &
Us(k) <= 17.05 & h_sd < 0)
    elseif (h_ultimo(k) > 0.0583
& h_ultimo(k) <= 0.2565 & h_sd < 0)
        [t,x] =
ode23('planta5',to,tf,xo,tol,trace);
        end;

% calculo do valor do nivel de >
44% nivel

% if (Us(k) > 17.05 & h_sd >=
0)
    if (h_ultimo(k) > 0.2565 &
h_sd >= 0)

        [t,x] =
ode23('planta3',to,tf,xo,tol,trace);

% elseif (Us(k) > 17.05 & h_sd
< 0)
        elseif (h_ultimo(k) > 0.2565
& h_sd < 0)
            [t,x] =
ode23('planta6',to,tf,xo,tol,trace);
            end;

% incremento nos valores de xo e to
xo = x(length(x));
to = tf;
% h_ultimo(k) = xo;
% if h_ultimo(k) >= .583
%     h_ultimo(k) = .583;
% end;

h_ultimo(k+1) = xo;
if h_ultimo(k+1) >= .583
    h_ultimo(k+1) = .583;
end;

% if h_ultimo(k) <= 0
%     h_ultimo(k) = 0;
% end;

clear t;clear x;

% verificacao se o nivel esta
subindo ou descendo

% if k == 1
%     if k <= 2

```

---

```

                h_sd = 0;
            else
                h_sd = h_ultimo(k) -
h_ultimo(k-1);
                h_sd = h_ultimo(k+1) -
h_ultimo(k);
            end;
        end;
    end;

    qod_pu =
(ko(1)*sqrt(pe*h_ultimo)+ko(2)+3.61
6e-4)/0.0202;
    dp_pc = qod_pu.^2*100;
    qod_pc = qod_pu*100;
    h_ultimo_pc = h_ultimo*100/.583;

figure(4);

% Teste da dinamica da planta

% N =4;
% Wn = .006;
% [B,A] = BUTTER(N,Wn);
% Y = FILTfilt(B, A, h_ens);
% plot(t_ens,Y,'w--');grid;
plot(t_ens,h_ens,'w. ');
hold on;

t = 0:delta_t:tff+1;
plot(t,h_ultimo_pc,'w');grid;
grid;
figure(5)
plot(t,dp_pc,'w');grid;
title('dp X entrada');
xlabel('tempo em s');
ylabel('dp');

```

# **B** *Listagem do programa para simulação do processo em malha fechada*

A seguir é apresentada a listagem do programa para ambiente Matlab que simula o processo de bombeamento de água do Laboratório de Hidráulica da UFMG.

```

clear;clear global;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                                delta_t = .2; % tempo de
                                amostragem em segundo

                                xo = 65.55; % entrada de
                                percentual de delta p

%   declaracao de parametros e
entrada de dados                                load sp_02 % arquivo de dados do
                                                sp

t_final = 5040; % tempo final em
segundos                                Umax = 19.10;
t_passo = 180; % tempo de passo
do sp em segundos                                Umin = 15.61;

N_passos = 28; % numero de
patamares do sp                                to = 0;
                                                tff = t_final/delta_t;
                                                cont = delta_t/delta_tm;
                                                tpasso = t_passo/delta_t;
                                                tol = 1e-1; % Accuracy
                                                trace = 0;

delta_tm = .1; % tempo de
integracao modelo em segundo

```

---

```

k = 0;
h_prop = 1;
h_sd = 0;

U(1) = Umin;
Us(1) = Umin;

%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%

%   sintonia do controlador em
faixas

Tt = 50;

P1 = 1.1;
Ti1 = 24;
Td1 = 0;
P11 = 100/P1;
I1 = P11*delta_t/Ti1;
Tt1 = I1/Tt;

P2 = .8;
Ti2 = 13;
Td3 = 3;
P22 = 100/P2;
I2 = P22*delta_t/Ti2;
Tt2 = I2/Tt;

P3 = 2.3;
Ti3 = 17;
Td2 = 0;
P33 = 100/P3;
I3 = P33*delta_t/Ti3;
Tt3 = I3/Tt;

clear P1;
clear Ti1;
clear P2;
clear Ti2;
clear P3;
clear Ti3;

%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%

%   definicao de constantes

% teste estatico com saida principal
aberta

%   resultados

f = [50 51 52 53 54 55 56 57 58 59
60]; % em hz
i = [15.61 15.90 16.10 16.34 16.58
16.79 17.05 17.23 17.46 17.75
17.90]; % i e dado em mA

```

```

pb = [.40 .41 .42 .44 .45 .47 .49 .51
.53 .55 .56]; % em kgf/cm2
px = [.13 .13 .13 .13 .13 .13 .13 .13
.13 .13 .13]; % em kgf/cm2
delta_po = [59 63 66 70 73 77 82
87 91 95 96]; % em mm Hg
delta_h = [58.3 53.2 49.0 42.2 36.5
29.7 22.2 15.3 8.1 1.6 0.0]; % em
cm
h = (58.3 - delta_h); % 50 hz nivel
zero

% adequacao de unidades obs.: as
pressoes sao manometricas

pe = 1e3; % kgf/m3 - peso
especifico pe=ro*g(massa
esp.*gravidade)
k_vent = 63.7; % constante de
proporcionalidade do venturo
h = h/100; % metros
pb = pb*1e4; % kgf/m2
px = px*1e4; % kgf/m2
delta_po = delta_po*13.5951; %
kgf/m2

% calculo da vazao de saida em
m3/s

qo =
63.7*sqrt(1/pe)*sqrt(delta_po)/3600;

% A vazao de entrada e igual a de
saida para o estado estacionario

system_dependent(14,'on');
n = 1; % n = grau do polinomio que
aproxima a funcao

% definicao de ko

ro_g_h = pe*h;
r_ro_g_h = sqrt(ro_g_h);

[p1,s1] = polyfit(r_ro_g_h,qo,n);
ko = p1;

% definicao de ki

qi = qo;
hi = h;
ro_g_hi = pe*hi;
aux2 = sqrt(pb - ro_g_hi);

[p2,s2] = polyfit(aux2,qi,n);
ki = p2;

% definicao da funcao pb = f(u)
% teste para entrada em corrente

[p4,s4] = polyfit(i,pb,n);
kui = p4;

```

---

```

off_set3 = off_set*1.02;

%      area do reservatorio
A = 2.5;
off_set = -14.1288e-3; % em m/s

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%      sintonia do modelo em faixas

ki1 = ki*1;
ko1 = ko*1;
kui1(1) = kui(1)*.9;
kui1(2) = kui(2)*.85;
A1 = A*2.5;
off_set1 = off_set*.405;

ki2 = ki*1;
ko2 = ko*1;
kui2(1) = kui(1)*1.22;
kui2(2) = kui(2)*.972;
A2 = A*1.32;
off_set2 = off_set*1.00;

ki3 = ki*1;
ko3 = ko*1;
kui3(1) = kui(1)*1.22;
kui3(2) = kui(2)*.972;
A3 = A*1.3;

ki4 = ki*1;
ko4 = ko*1;
kui4(1) = kui(1)*.7;
kui4(2) = kui(2)*.7;
A4 = A*3;
off_set4 = off_set*.275;

ki5 = ki*1;
ko5 = ko*1;
kui5(1) = kui(1)*1.22;
kui5(2) = kui(2)*.972;
A5 = A*1.33;
off_set5 = off_set*0.985;

ki6 = ki*1;
ko6 = ko*1;
kui6(1) = kui(1)*1.22;
kui6(2) = kui(2)*.972;
A6 = A*1.3;
off_set6 = off_set*1.017;

% criacao de constantes para
% utilizar no modelo em faixas

kikui1 = ki1(1)^2*kui1(1)/(A1^2);
kikui2_1 = ki1(1)^2*kui1(2)/(A1^2);
kipe1 = ki1(1)^2*pe/(A1^2);
kope1 = ko1(1)^2*pe/(A1^2);

kikui2 = ki2(1)^2*kui2(1)/(A2^2);

```

---

```

kikui2_2 = ki2(1)^2*kui2(2)/(A2^2);      global kipe1
kipe2 = ki2(1)^2*pe/(A2^2);             global off_set1
kope2 = ko2(1)^2*pe/(A2^2);             global kope1

kikui3 = ki3(1)^2*kui3(1)/(A3^2);      global kikui2
kikui2_3 = ki3(1)^2*kui3(2)/(A3^2);    global kikui2_2
kipe3 = ki3(1)^2*pe/(A3^2);           global kipe2
kope3 = ko3(1)^2*pe/(A3^2);           global off_set2
                                           global kope2

kikui4 = ki4(1)^2*kui4(1)/(A4^2);
kikui2_4 = ki4(1)^2*kui4(2)/(A4^2);    global kikui3
kipe4 = ki4(1)^2*pe/(A4^2);           global kikui2_3
kope4 = ko4(1)^2*pe/(A4^2);           global kipe3
                                           global off_set3
                                           global kope3

kikui5 = ki5(1)^2*kui5(1)/(A5^2);
kikui2_5 = ki5(1)^2*kui5(2)/(A5^2);
kipe5 = ki5(1)^2*pe/(A5^2);           global kikui4
kope5 = ko5(1)^2*pe/(A5^2);           global kikui2_4
                                           global kipe4
                                           global off_set4
                                           global kope4

kikui6 = ki6(1)^2*kui6(1)/(A6^2);
kikui2_6 = ki6(1)^2*kui6(2)/(A6^2);
kipe6 = ki6(1)^2*pe/(A6^2);           global kikui5
kope6 = ko6(1)^2*pe/(A6^2);           global kikui2_5
                                           global kipe5
                                           global off_set5
                                           global kope5

% declaracao de variaveis globais

global Us
global k                                global kikui6
                                           global kikui2_6
global kikui1                            global kipe6
global kikui2_1                          global off_set6

```

---

```
global kope6
% limpeza de variaveis

clear f;
clear pb;
clear px;
clear delta_po;
clear delta_h;
clear h;
clear hi;
clear i;
clear k_vent;
clear patm;
clear qi;
clear qo;
clear n;
clear ro_g_h;
clear r_ro_g_h;
clear p1;
clear s1;
clear q1;
clear h1;
clear ro_g_hi;
clear p2;
clear s2;
clear ki;
clear p4;
clear s4;
clear kui;
clear A;
clear ki1;

clear ko1;
clear kui1;
clear A1;
clear ki2;
clear ko2;
clear kui2;
clear A2;
clear ki3;
clear ko3;
clear kui3;
clear A3;
clear ki4;
clear ko4;
clear kui4;
clear A4;
clear ki5;
clear ko5;
clear kui5;
clear A5;
clear ki6;
clear ko6;
clear kui6;
clear A6;
clear aux2;

%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%

% determinacao do valor inicial do
nivel em metros a partir de delta p
```

```

clear out_pc;
clear t;
clear ts;

xo = sqrt(xo/100)*100; % de delta p
para qo, ambos em (%)
xo = ((xo*.0202/100-ko(2)-3.615e-4)/ko(1)).^2/pe; %de qo(%) para
nivel(m)
h_ultimo(1) = xo;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% definicao do setpoint em
percentual de delta p

for i = 1:N_passos

    for j = 1:tpasso
        spp(j+k*tpasso) =
sp(i);
    end;

    k = k+1;
end;

sp = spp;
k = 0;
clear spp;
clear dp;
clear dp_pc;
clear out;

clear out_pc;
clear t;
clear ts;

%
% adequacao do sp, delta p
(%) , para nivel em metros

sp = sqrt(sp/100)*100; % de delta p
para qo, ambos em (%)
sp = (((sp*.0202/100)-ko(2)-3.615e-4)/ko(1)).^2/pe;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%----- execucao da funcao
-----

k = 1;

for j = to:(tff-1)

    if h_ultimo(k) >= .583
        h_ultimo(k) = .583;

    elseif h_ultimo(k) <= 0
        h_ultimo(k) = 0;
    end;
end;

```

---

```

for i = 0:cont
    tf = to + delta_tm;

    if xo >= .583
        xo = .583;
    elseif xo <= 0
        xo = 0;
    end;

    % calculo do valor do nivel
    de 0 a 10% nivel

    if (h_ultimo(k) <=
0.0583 & h_sd >= 0)
        [t,x] =
ode23('planta1',to,tf,xo,tol,trace);
    elseif (h_ultimo(k) <=
0.0583 & h_sd < 0)
        [t,x] =
ode23('planta4',to,tf,xo,tol,trace);
    end;

    % calculo do valor do nivel
    de > 10 a 44% nivel

    if (h_ultimo(k) >
0.0583 & h_ultimo(k) <= 0.2565 &
h_sd >= 0)
        [t,x] =
ode23('planta2',to,tf,xo,tol,trace);
    elseif (h_ultimo(k) >
0.0583 & h_ultimo(k) <= 0.2565 &
h_sd < 0)
        [t,x] =
ode23('planta5',to,tf,xo,tol,trace);
    end;

    % calculo do valor do nivel
    de > 44% nivel

    if (h_ultimo(k) >
0.2565 & h_sd >= 0)
        [t,x] =
ode23('planta3',to,tf,xo,tol,trace);
    elseif (h_ultimo(k) >
0.2565 & h_sd < 0)
        [t,x] =
ode23('planta6',to,tf,xo,tol,trace);
    end;

    % incremento nos valores de
    xo e to

    xo = x(length(x));
    to = tf;

end;

h_ultimo(k+1) = xo;

```

```

% verificacao se o nivel esta subindo ou descendo
    h_sd = h_ultimo(k+1) - h_ultimo(k);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Calculo do erro do sistema
    errok = (sp(k) - h_ultimo(k))/.583;

% composicao do algoritmo PID

% termo proporcional
    if ((Us(k) == Umin & errok > 0) | (Us(k) == Umax & errok < 0))
        h_prop = 0;
    elseif ((Us(k) == Umin & errok < 0) | (Us(k) == Umax & errok > 0))
        h_prop = 1;
    end;

% if h_prop == 0
    prop1 = 0;

%
    prop2 = 0;
    prop3 = 0;

% elseif h_prop == 1
    prop1 = P11*errok;
    prop2 = P22*errok;
    prop3 = P33*errok;
% end;

% termo integral
    anti_r1 = Tt1*(Us(k) - U(k));
    anti_r2 = Tt2*(Us(k) - U(k));
    anti_r3 = Tt3*(Us(k) - U(k));

    if k == 1
        int1k = I1*errok*delta_t
        + anti_r1;
        int2k = I2*errok*delta_t
        + anti_r2;
        int3k = I3*errok*delta_t
        + anti_r3;
    else
        int1k = int1k_1 +
        I1*errok*delta_t + anti_r1;
        int2k = int2k_1 +
        I2*errok*delta_t + anti_r2;
    end;

```

---

```

        int3k = int3k_1 +
13*errok*delta_t + anti_r3;
        end;

        int1k_1 = int1k;
        int2k_1 = int2k;
        int3k_1 = int3k;

% termo derivativo

        if k == 1
            der = 0;
        else
            der = (errok-
errok_1)/delta_t;
        end;

        errok_1 = errok;

% calculo da saida do PID

        if h_ultimo(k) <= .0583 %
10% nivel
            U(k+1) = 4 +(prop1 +
int1k + Td1*der)*16;

            elseif (h_ultimo(k) > 0.0583 &
h_ultimo(k) <= .2565) % entre 10 e
44 %

                U(k+1) = 4 + (prop2 +
int2k + Td2*der)*16;

                else
                    U(k+1) = 4 + (prop3 +
int3k + Td3*der)*16;

                end; % acima de 44%

        if U(k+1) >= Umax
            Us(k+1) = Umax;
        elseif U(k+1) <= Umin
            Us(k+1) = Umin;
        else
            Us(k+1) = U(k+1);
        end;

        if U(k+1) >= Umax*2
            U(k+1) = Umax*2;
        elseif U(k+1) <= -Umax*2
            U(k+1) = -Umax*2;
        end;

        k = k + 1;

    end;

% calculo do valor da vazao e nivel
em percentual

```

```
qod =
ko(1)*sqrt(pe*h_ultimo)+ko(2)+4e-4;
% qo dinamico
qod = qod*100/0.0202;
%normalizacao da vazao
h_ultimo = h_ultimo*100/.583;
%normalizacao do nivel
sp_q =
(ko(1)*sqrt(pe*sp)+ko(2)+4e-
4)*100/0.0202;
sp = sp*100/.583; %normalizacao
do sp

% figuras

figure(1);
t = 0:delta_t:(t_final);
plot(t,h_ultimo,'m--')%t,sp);grid;
title('nivel X tempo');
Xlabel('tempo em s');
Ylabel('nivel em %');

figure(2)

plot(t,qod,'w',t(1:length(sp_q)),sp_q,'
w--');grid;
% title('vazao saida X entrada');
% Xlabel('tempo em s');
% Ylabel('vazao saida em %');
```