

TESE
1031

EFEI

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

**Desenvolvimento de um Equipamento de Controle de
Nível de Líquido para Treinamento em
Controle Automático**

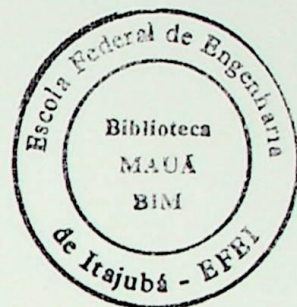
Dissertação de Mestrado

PAULO CEZAR OLIVEIRA

Itajubá - MG - Brasil

Dezembro — 1999

Desenvolvimento de um Equipamento de Controle de Nível de Líquido para Treinamento em Controle Automático



Dissertação submetida à
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica

por

PAULO CEZAR OLIVEIRA

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Dias Coelho (EFEI)
Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Borges da Silva (EFEI)

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
ITAJUBÁ - MG - BRASIL
Dezembro de 1999

Oliveira, Paulo Cezar

Desenvolvimento de um Equipamento de Controle de Nível de Líquido
para Treinamento em Controle Automático

Dissertação de Mestrado - Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI

1. Par de Tanques Acoplados

2. Função de Transferência

3. Controle Analógico

I. EFEI

II. Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica



Ministério de Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
 Rua Santa Rita, 250 - Itajubá - Minas Gerais

ANEXO 1

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título de Dissertação: "Desenvolvimento de um Equipamento de Controle de Nível de Líquido para Tratamento em Controla Automático"

Autor: Paulo César Oliveira

JULGAMENTO

Examinador	Conceito	Assinatura
1	A+	[Assinatura]
2	A+	[Assinatura]
3	A+	[Assinatura]
4	A+	[Assinatura]

Resultado Médio: Conceito A+ Nota optativa
 com distinção

Observações: _____

Itajubá, 22 de dezembro de 1993.

[Assinatura]
 Prof. João Távila de Sá
 1º Examinador - 1993

[Assinatura]
 Prof. Antônio Carlos Zamboni de Souza
 2º Examinador - 1993

[Assinatura]
 Prof. Luiz Roberto Borges de Souza
 3º Examinador - 1993

[Assinatura]
 Prof. Carlos Alberto Dias Castro
 4º Examinador - 1º Examinador - 1993

À minha esposa, aos meus filhos e aos meus pais.



Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
 Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: **“Desenvolvimento de um Equipamento de Controle de Nível de Líquido para Treinamento em Controle Automático”**

Autor: **Paulo Cezar Oliveira**

JULGAMENTO

Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A+	<i>[Handwritten signature]</i>
2º	A+	<i>[Handwritten signature]</i>
3º	A+	<i>[Handwritten signature]</i>
4º	A+	<i>[Handwritten signature]</i>

Resultado Médio: Conceito: A+, ou seja, aprovado com distinção.

Observações: _____

Itajubá, 22 de dezembro de 1999.

[Handwritten signature]
 Prof. Jocélio Souza de Sá
 1º Examinador - INATEL

[Handwritten signature]
 Prof. Antônio Carlos Zambroni de Souza
 2º Examinador - EFEI

[Handwritten signature]
 Prof. Luiz Eduardo Borges da Silva
 3º Examinador - EFEI

[Handwritten signature]
 Prof. Carlos Alberto Dias Coelho
 4º Examinador - (Orientador) - EFEI

Agradecimentos

A FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., em especial ao Departamento de Produção Minas e à Assessoria de Treinamento e Coordenação pela oportunidade de realização do CESE - Curso de Engenharia de Sistemas Elétricos e pelo apoio proporcionado para o desenvolvimento deste trabalho de Dissertação de Mestrado.

Aos amigos do Centro de Treinamento de Furnas, do Laboratório de Medidas Eletroeletrônicas e da Oficina Central Dr. Pedro pelo carinho, apoio e conhecimentos transmitidos ao longo deste trabalho.

Ao Professor Carlos Alberto Dias Coelho pela atenciosa, atuante e competente orientação.

Ao Professor Luiz Eduardo Borges da Silva pela prontidão, apoio e amizade.

Aos colegas Francisco Ferreira de Toledo, Ivan Júlio Barbosa, Marcos Antônio Alves e João José de Freitas pela amizade, apoio, incentivo, paciência e atenção.

E, principalmente, a Deus que permitiu a execução deste trabalho.

Resumo

A comprovação dos fenômenos físicos através de experiências práticas é de vital importância na consolidação da aprendizagem.

As técnicas de controle automático são fundamentadas em um rigoroso tratamento matemático, o que, às vezes, dificulta para alunos de controle a compreensão do processo físico como um todo. Logo, é muito importante que se possa realizar demonstrações práticas dos fenômenos envolvidos.

Neste trabalho descreve-se o projeto e a construção de um protótipo de um equipamento didático-pedagógico completo de controle de nível de líquidos, para ser utilizado em aulas práticas e em trabalhos de pesquisa sobre controle de sistemas dinâmicos. O sistema dinâmico escolhido é não linear e lento, de modo que todos os fenômenos físicos podem ser observados visualmente.

O principal elemento do sistema dinâmico é um par de tanques de acrílico, transparentes e justapostos. O objetivo será o de controlar o nível da água em um dos tanques pela variação da vazão de entrada no outro. O equipamento possibilita ao usuário passar por todas as etapas de desenvolvimento de um sistema de controle completo: calibrar e ajustar o transdutor de nível, levantar a característica estática do grupo motor-bomba, e determinar as equações de estado e funções de transferência de cada componente e do sistema em malha aberta e fechada, em torno de pontos de operação. Existe também a possibilidade de alimentação dos dois

tanques, e controle simultâneo dos dois níveis, o que caracterizaria um sistema multivariável.

São apresentados os detalhes de construção e os procedimentos de modelagem matemática, calibração, ajuste e identificação dos componentes do sistema físico.

A utilização do equipamento em atividades de treinamento é ilustrada através do projeto e implementação de controladores analógicos dos tipos proporcional e proporcional-integral, enfatizando sempre a comparação das especificações de desempenho e o desempenho obtido através de simulação e de ensaios do sistema real.

Automatic control techniques are based on rigorous mathematical treatment, and this sometimes makes difficult for control students to understand the physical process as a whole. Therefore, it is very important that experimental demonstrations of the concerned phenomena are performed.

In this work, the design and construction of a prototype of a complete teaching/training liquid level control equipment, to be used in laboratory sessions and research works on control of dynamic systems, is described. The chosen dynamic system is non-linear and slow, so that the physical phenomena can be visually observed.

The dynamic system main element is a coupled pair of transparent acrylic tanks. The objective will be to control the liquid level in one tank by varying the input flow into the other one. The equipment enables the user to go through all the steps to develop a complete control system; calibrating and testing the level transducers, obtaining the static characteristic of the motor-pump set, and developing the state equations and transfer functions for each component and for the open-loop and closed-loop system, about different operating points. It is also possible to pump liquid in both tanks so as to control simultaneously both liquid levels, in which case the system would be multivariable.

Abstract

Verification of physical phenomena through practical experiments is of vital importance to consolidate learning.

Automatic control techniques are based on rigorous mathematical treatment, and this sometimes makes difficult for control students to understand the physical process as a whole. Therefore, it is very important that experimental demonstrations of the concerned phenomena are performed.

In this work, the design and construction of a prototype of a complete teaching/training liquid level control equipment, to be used in laboratory sessions and research works on control of dynamic systems, is described. The chosen dynamic system is non-linear and slow, so that the physical phenomena can be visually observed.

The dynamic system main element is a coupled pair of transparent acrylic tanks. The objective will be to control the liquid level in one tank by varying the input flow into the other one. The equipment enables the user to go through all the steps to develop a complete control system: calibrating and tuning the level transducer, obtaining the static characteristic of the motor-pump set, and developing the state equations and transfer functions for each component and for the open-loop and closed-loop system, about different operating points. It is also possible to pump liquid in both tanks so as to control simultaneously both liquid levels, in which case the system would be multivariable.

The building details and the processes of mathematical modelling, calibration, tuning and identification of the physical system components are described. The equipment use in training activities is illustrated through design and implementation of analog controllers with proportional action, proportional integral action and phase-lead characteristics, with emphasis on comparing performance specifications with actual performance observed in simulations and in experiments with the real system.

V_{ref} ⇒ Tensão de Referência;

V_e ⇒ Tensão de Erro;

V_c ⇒ Tensão de Saída dos Controladores;

V_m ⇒ Tensão Aplicada ao Motor;

V_r ⇒ Tensão de Realimentação;

$G_p(s)$ ⇒ Função de Transferência do Amplificador de Potência;

$G_m(s)$ ⇒ Função de Transferência do Grupo Motor-Bomba;

$G_t(s)$ ⇒ Função de Transferência do Par de Tanques;

$G_s(s)$ ⇒ Função de Transferência do Sensor de Nível;

Q_i ⇒ Vazão de Entrada do Tanque;

Q_o ⇒ Vazão de Saída do Tanque;

Glossário de Símbolos

Ao longo deste trabalho, os principais parâmetros ou variáveis do sistema de controle manipulados serão referenciados por símbolos, os quais estão definidos neste glossário. São eles:

V_{aj} \Rightarrow Tensão de Referência;

V_e \Rightarrow Tensão de Erro;

V_c \Rightarrow Tensão de Saída dos Controladores;

V_m \Rightarrow Tensão Aplicada ao Motor ;

V_r \Rightarrow Tensão de Realimentação;

$G_a(s)$ \Rightarrow Função de Transferência do Amplificador de Potência;

$G_m(s)$ \Rightarrow Função de Transferência do Grupo Motor-Bomba;

$G_s(s)$ \Rightarrow Função de Transferência do Par de Tanques;

$G_r(s)$ \Rightarrow Função de Transferência do Sensor de Nível;

Q_i \Rightarrow Vazão de Entrada do Tanque;

Q_o \Rightarrow Vazão de Saída do Tanque;

K \Rightarrow Coeficiente do Orifício;

A \Rightarrow Secção Transversal dos Tanques

Os símbolos quando precedidos da letra grega " Δ " significa variação em torno de um ponto estável e quando acompanhados dos índices "1" ou "2" significa que essa grandeza está referenciada ao tanque 1 ou 2.

Sumário



Agradecimentos	.....	.....
Resumo	.....	.....
Abstract	.....	.....
Glossário de Símbolos	.....	.....
Sumário	.....	.....
Capítulo 1	.....	.....
Introdução	.....	.....
1.1 - Descrição do Sistema	.....	.....
1.2 - Descrição do Texto	.....	.....
Capítulo 2 - Descrição dos Componentes	.....	.....
2.1 - Introdução	.....	.....
2.2 - Par de Tanques Acoplados	.....	.....
2.3 - Grupo Motor - Bomba	.....	.....
2.4 - Transdutor de Nível	.....	.....
2.4.1 - Sensor de Nível	.....	.....
2.4.2 - Amplificador de nível	.....	.....
2.4.3 - Unidade Prática UP -02	.....	.....

Desenvolvimento de um Equipamento de Controle de Nível de Líquido para Treinamento em Controle Automático

Por: Paulo Cezar Oliveira

Sumário

Agradecimentos.....	v
Resumo	vi
Abstract.....	viii
Glossário de Símbolos	x
Sumário.....	xii
Capítulo 1 -	
Introdução.....	1
1.1 - Descrição do Sistema.....	1
1.2 - Descrição do Texto.....	3
Capítulo 2 - Descrição dos Componentes.....	5
2.1 - Introdução.....	5
2.2 - Par de Tanques Acoplados.....	5
2.3 - Grupo Motor - Bomba.....	7
2.4 - Transdutor de Nível.....	7
2.4-1 - Sensor de Nível.....	8
2.4.2 - Amplificador de nível.....	9
2.4.3 - Unidade Prática UP -02.....	10

2.5 - Unidade Analógica	16
2.6 - Amplificador de Potência	19
2.7 - Fontes de Tensão Contínua	23
2.8 - Instrumentação.....	23
2.9 - Acessórios	23
Capítulo 3 - Modelo Matemático.....	24
3.1 - Sistema Dinâmico.....	24
3.1.1 - Equações Dinâmicas.....	24
3.1.2 - Equações de Estado Linearizada.....	27
3.1.3 - Função de Transferência do Par de Tanques Acoplados.....	29
3.1.4 - Determinação dos Coeficientes das Equações de Estado.....	31
3.2 - Função de Transferência do Amplificador de Potência.....	32
3.3 - Função de Transferência do Conjunto Motor - Bomba.....	33
3.4 - Função de Transferência do Transdutor de Nível	35
3.5 - Função de Transferência de Malha Aberta.....	36
3.6 - Função de Transferência de Malha Fechada.....	37
Capítulo 4 - Experiências de Identificação, Implementação de Controladores e	
Verificação Prática de Desempenho	39
4.1 - Introdução	39
4.2 - Unidade Analógica.....	40
4.2.1 - Amplificador Inversor.....	40
4.2.2 - Amplificador não Inversor.....	42
4.2.3 - Amplificador Somador Inversor.....	43
4.2.4 - Amplificador Integrador.....	44
4.2.5 - Amplificador Diferenciador.....	45
4.3 - Calibração do Transdutor de Nível	47
4.4 - Característica do Grupo Motor - Bomba.....	50

4.5 - Ajuste do Controlador P-I.....	53
4.5.1 - Cálculo da Função de Transferência do Par de Tanques	53
4.5.2 - Ajuste do Controlador Proporcional.....	57
4.5.3 - Ajuste do Canal Integrador.....	65
Capítulo 5 - Conclusões e Melhorias.....	72
Bibliografia.....	78
Apêndice A - Resumo de Valores e Expressões de Parâmetros do Modelo	80
Apêndice B - Comandos Relevantes da "Toolbox" CACCON	82
Apêndice C - Relação e Quantidade de Componentes	86

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O controle de nível de líquido em um tanque é uma aplicação básica e importante das técnicas de Controle Automático. Neste tipo de processo, as características dinâmicas são relativamente fáceis de se entender e as constantes de tempo envolvidas são relativamente longas, o que permite a observação visual dos fenômenos envolvidos.

O sistema dinâmico escolhido é o par de tanques acoplados. É um sistema bastante adequado para treinamento e ensino prático em Controle Automático, pois, trata-se de um sistema de segunda ordem não linear e que, além de possuir constantes de tempo e período de oscilações naturais na faixa de 10 a 120 segundos, permite a realização de experiências envolvendo procedimentos de linearização e ensaios de transitórios, onde as respostas causadas por perturbações podem ser observadas visualmente, sendo assim possível observar a existência de erro, overshoot, tempo de acomodação, etc..

Na fig. 1.1 é mostrada uma vista frontal do sistema dinâmico proposto neste trabalho. É constituído, basicamente, por dois tanques que estão acoplados por um orifício (orif. 1).

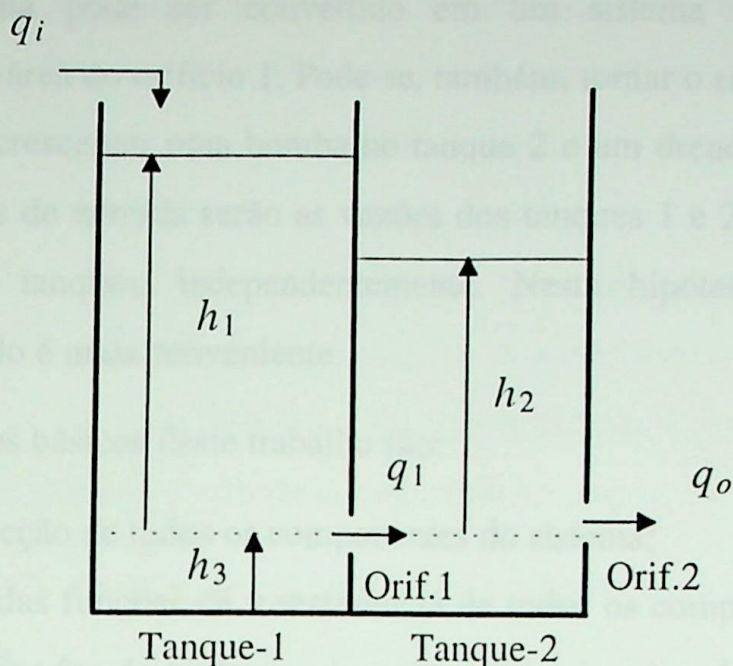


Fig. 1.1 Sistema dinâmico: vista frontal

A vazão de entrada q_i é fornecida por uma bomba acionada por um motor de corrente contínua. Através do orifício 1, que determina o grau de acoplamento entre os tanques, a água flui com vazão q_1 para o tanque 2. Pelo orifício 2, a água escoou com vazão q_o para o próprio reservatório da bomba.

A questão de controle automático a ser resolvida é a seguinte: manter o nível da água em um dos tanques em um valor pré-estabelecido (referência), através do controle da vazão de entrada (controlando-se a velocidade da bomba).

A eq. (1.1) é a função de transferência do sistema dinâmico proposto:

$$G_s(s) = \frac{H_2(s)}{Q_i(s)} = \frac{K}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)} \quad (1.1)$$

Onde:

$G_s(s)$: Função de Transferência do Sistema Dinâmico

$H_2(s)$: Transformada de Laplace do nível de água no tanque 2

$Q_i(s)$: Transformada de Laplace da vazão de entrada no tanque 1

O sistema pode ser convertido em um sistema de primeira ordem aumentando-se a área do orifício 1. Pode-se, também, tornar o sistema multivariável. Para isto basta acrescentar uma bomba no tanque 2 e um dreno no tanque 1. Neste caso, as variáveis de entrada serão as vazões dos tanques 1 e 2 e as controladas os níveis nos dois tanques, independentemente. Nesta hipótese, a utilização de equações de estado é mais conveniente.

Os objetivos básicos deste trabalho são:

- projeto e confecção de todos os componentes do sistema;
- determinação das funções de transferência de todos os componentes do sistema, ou seja do amplificador de potência, do grupo motor-bomba, do sistema dinâmico, do transdutor de nível e dos controladores analógicos. Por se tratar de um sistema não linear, os parâmetros da função de transferência variam com o ponto de operação;
- levantamento, através de experiências práticas, das características do transdutor de nível ($V_r = f(h)$) e do grupo motor-bomba ($q = f(V_m)$);
- aplicação do critério de ajuste de controladores PI, descrito em [8];
- análise do regime transitório e permanente do sistema, com uma única entrada e uma única saída, através de resultados de ensaios práticos e de simulação com o programa MATLAB [12] e/ou o módulo Simulink [13].

1.2 - DESCRIÇÃO DO TEXTO

No capítulo 2 são descritos, fisicamente, todos os componentes do sistema. Serão detalhados os pontos de conexão dos vários circuitos, omitindo-se, no entanto, o detalhamento do circuito interno.

Para facilitar a montagem e a visão pelos usuários, os circuitos foram acondicionados em caixas de alumínio anodizado, com o diagrama sinótico impresso na tampa superior.

No capítulo 3 é feita a modelagem matemática de todos os componentes do processo. O sistema dinâmico terá seu modelo linearizado e apresentado como uma função de transferência, quando for utilizado com uma entrada e uma saída. No sistema com duas entradas e duas saídas, o mesmo será modelado através de equações de estado. Os outros componentes, tais como a unidade analógica, o transdutor de nível, o grupo motor-bomba e o amplificador de potência, foram modelados através de suas funções de transferência, e o modelo do sistema completo é apresentado na forma de diagrama de blocos.

No capítulo 4, são descritas algumas experiências com o objetivo de ilustrar o manuseio do equipamento, como a determinação das funções de transferência de todos os circuitos das unidades. Serão também realizadas experiências com controladores ajustados através da teoria de controle, para fins de validação dos métodos de projeto utilizados. A variedade das experiências que podem ser realizadas neste equipamento é enorme, e depende apenas da criatividade e interesse dos instrutores e usuários.

As conclusões e sugestões para futuros trabalhos com a utilização do equipamento desenvolvido são apresentadas no Capítulo 5, onde são analisados aspectos tais como as possibilidades de treinamento oferecidas pelo equipamento, nas áreas de modelagem e identificação, projeto e implementação de controladores, e comparação de resultados previstos em projeto com resultados de ensaios, como forma de validação dos métodos de projeto de sistemas de controle. Também são feitas sugestões para melhorias no protótipo e exploradas outras possibilidades de utilização, tais como a introdução de controle digital.

CAPÍTULO 2

DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES

2.1 - INTRODUÇÃO

Todos os componentes do sistema serão descritos neste capítulo. Basicamente é feita uma descrição física de cada componente. O sistema completo é constituído pelos seguintes componentes:

- par de tanques acoplados (sistema dinâmico controlado);
- dois grupos motor-bomba;
- dois transdutores de nível;
- duas unidades analógicas;
- dois amplificadores de potência;
- duas fontes de tensão contínua;
- instrumentação;
- acessórios.

2.2 - PAR DE TANQUES ACOPLADOS

O sistema dinâmico a ser controlado é composto por um reservatório, confeccionado em acrílico transparente com 5 mm de espessura, 20 cm de largura, 10 cm de profundidade e 30 cm de altura. O reservatório foi subdividido ao meio com uma placa de acrílico, formando desta maneira dois tanques (tanque 1 e tanque 2). O conjunto total será denominado, no restante do texto, par de tanques acoplados.

Para que a água possa fluir entre os tanques, a placa central contém vários orifícios situados a 2,5 cm do fundo, de diâmetros 1,27 cm, 0,94 cm, 0,62 cm e 0,32 cm. Estes orifícios constituem o "orifício 1" da fig. 2.1. O grau de acoplamento entre os tanques pode ser alterado, variando a quantidade de orifícios tampados (plugados). Considerando todos abertos, o sistema se comportará como um único tanque.

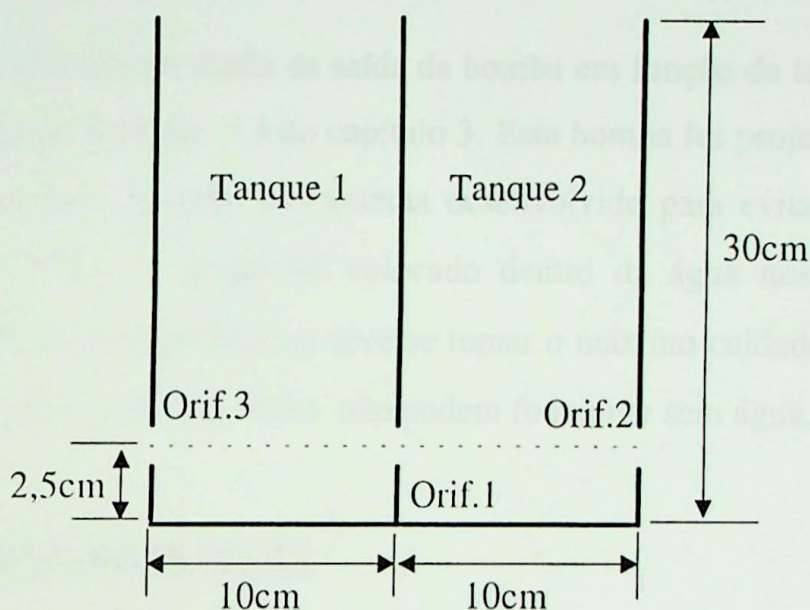


Fig. 2.1 Par de tanques acoplados: vista frontal

Em cada lateral foi aberto um orifício de diâmetro 0,62 cm, identificados como "orifício 2" e "orifício 3" na fig. 2.1. Estes permitem que a água seja drenada para os depósitos, para depois ser bombeada para os tanques, formando, desta maneira, um processo contínuo.

No fundo de cada tanque foram abertos dois furos de diâmetro 3,0 cm. Nestes foram instalados dois diafragmas que fazem parte do sensor de nível. A base de sustentação do par de tanques acoplados foi confeccionada em acrílico e totalmente fechada, para proteção física dos componentes do sensor de nível.

Para permitir a conexão elétrica do sensor de nível, foi colocado na lateral posterior da base um plug fêmea.

2.3 - GRUPO MOTOR-BOMBA

O grupo motor-bomba para este sistema deve ter as seguintes características: o motor deve ser de corrente contínua, com tensão de alimentação variável entre 0 e 12 V; a vazão máxima da bomba deve ser de 70 cm³/s. No protótipo desenvolvido para este trabalho foi utilizado o grupo usado em veículos FORD do tipo utilitários(F1000) para jogar água no pára-brisa (código do fabricante: 83NU-9W346-B; vazão à tensão nominal de 67 cm³/s).

A característica da vazão de saída da bomba em função da tensão aplicada ao motor está mostrada na fig. 3.3 do capítulo 3. Esta bomba foi projetada para operar em regime de curta duração. No sistema desenvolvido para evitar o aquecimento exagerado do motor, o grupo foi colocado dentro da água nos recipientes dos depósitos. Durante as experiências deve-se tomar o máximo cuidado com o nível da água nos depósitos, pois as bombas não podem funcionar sem água.

2.4 - TRANSDUTOR DE NÍVEL

O transdutor de nível fornece uma tensão elétrica em função do nível de água no tanque. O transdutor utilizado no sistema possui os seguintes componentes: o sensor, propriamente dito, que utiliza um diafragma e uma ponte constituída por *strain gages* e um circuito amplificador, para filtragem e adaptação do nível do sinal de realimentação. As principais características do transdutor são: sensibilidade (sensível a variação de milímetros de água), repetibilidade (foram executados repetidos testes de levantamento da característica e os resultados encontrados foram ótimos), precisão (fornece valores com precisão de centésimos) e linearidade (como mostra a fig. 3.5 do capítulo 3). No capítulo 4, é explicado todo o processo de ajuste e de determinação da característica do transdutor.

2.4.1 - Sensor de Nível

O princípio básico de funcionamento de um *strain gage* é que, quando submetido a um alongamento ou um encolhimento sua resistência elétrica varia na mesma proporção, ou seja, quando alongado sua resistência elétrica aumenta proporcionalmente e quando encolhido a mesma diminui. No sistema foi utilizada uma ponte constituída por quatro *strain gages* (SG), alimentada com $\pm 2,5$ V como mostra a fig. 2.2.

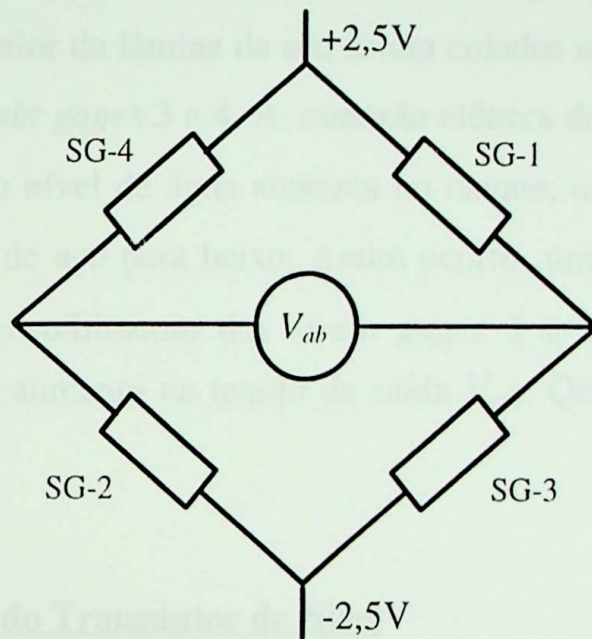


Fig. 2.2 Ponte com *strain gages*.

A fig 2.3 mostra a colocação física dos *strain gages* e dos diafragmas, confeccionados com borracha de látex, para o sensor de nível dos tanques 1 e 2.

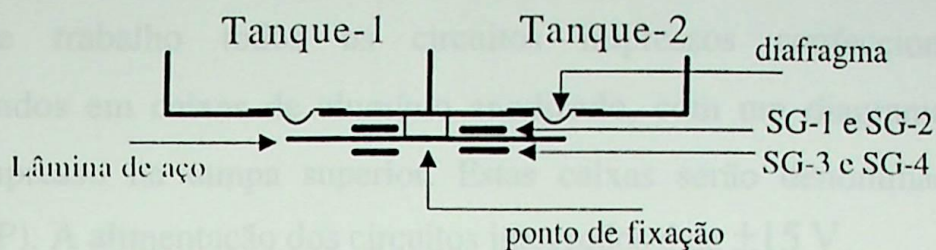


Fig. 2.3 Sensor de nível: montagem física

Na região superior da lâmina de aço foram colados os *strain gages* 1 e 2 e na região inferior os *strain gages* 3 e 4. A conexão elétrica dos mesmos está mostrada na fig. 2.2. Quando o nível de água aumenta no tanque, o diafragma se expande e movimenta a lâmina de aço para baixo. Assim ocorre um alongamento dos *strain gages* 1 e 2 e um encolhimento dos *strain gages* 3 e 4. Com isto, a ponte se desequilibra e há um aumento na tensão de saída V_{ab} . Quando o nível diminui o processo se inverte.

2.4.2 - Amplificador do Transdutor de Nível

O circuito amplificador do transdutor de nível consiste de dois estágios, construídos com amplificadores operacionais, conectados em série. O primeiro estágio é um circuito amplificador diferencial, cujo amplificador operacional é alimentado com $\pm 5V$ estabilizados, que amplifica a tensão recebida da ponte. O circuito possui os seguintes ajustes: de zero (potenciômetro P_1), de offset (potenciômetro P_2) e de ganho (potenciômetro P_3). O segundo estágio é um amplificador conectado na configuração não inversora, cujo operacional é alimentado com $\pm 15V$ estabilizados, com a função de filtro e de ajuste de nível (potenciômetro P_4). As polaridades da tensão de entrada do amplificador diferencial (V_{ab}) foram conectadas de modo que a tensão de saída do transdutor seja negativa, para um nível positivo de água no tanque. O circuito completo está mostrado na fig. 2.4.

2.4.3 - Unidade Prática UP - 02

Neste trabalho todos os circuitos impressos confeccionados foram acondicionados em caixas de alumínio anodizado, com um diagrama sinótico do circuito impresso na tampa superior. Estas caixas serão denominadas unidades práticas (UP). A alimentação dos circuitos integrados é de $\pm 15\text{ V}$.

O transdutor de nível constitui a unidade UP-02, que contém os seguintes circuitos impressos: uma fonte de $\pm 5\text{ V}$ estabilizada para o amplificador de nível, cujo circuito interno está mostrado na fig. 2.5; uma fonte de $\pm 2,5\text{ V}$ estabilizada para a ponte com *strain gages*, mostrado na fig. 2.6; dois amplificadores de nível, um para cada tanque. A fig. 2.7 mostra a vista superior, da unidade UP-02, com o diagrama sinótico.

Na lateral direita, como mostra a fig. 2.8, existem dois furos, que permitem acesso aos potenciômetros P_1 e P_4 e, na lateral esquerda, um plug fêmea para permitir a conexão elétrica com os sensores de nível.

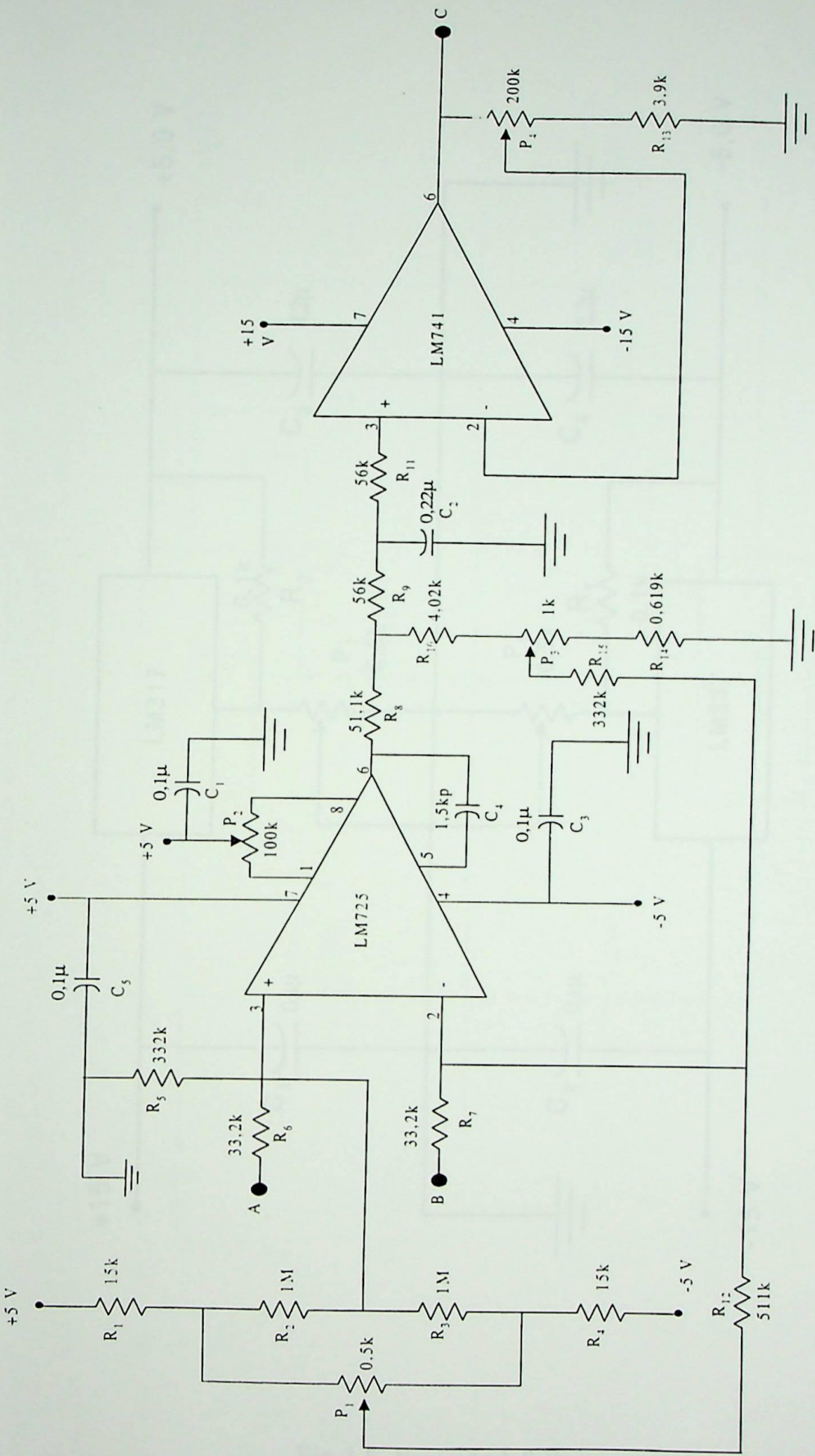


Fig. 2.4 Transdutor de Nível: circuito amplificador

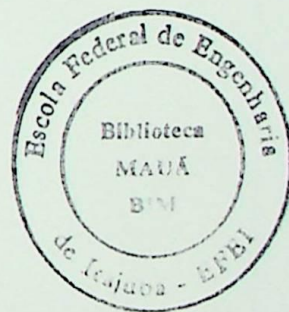
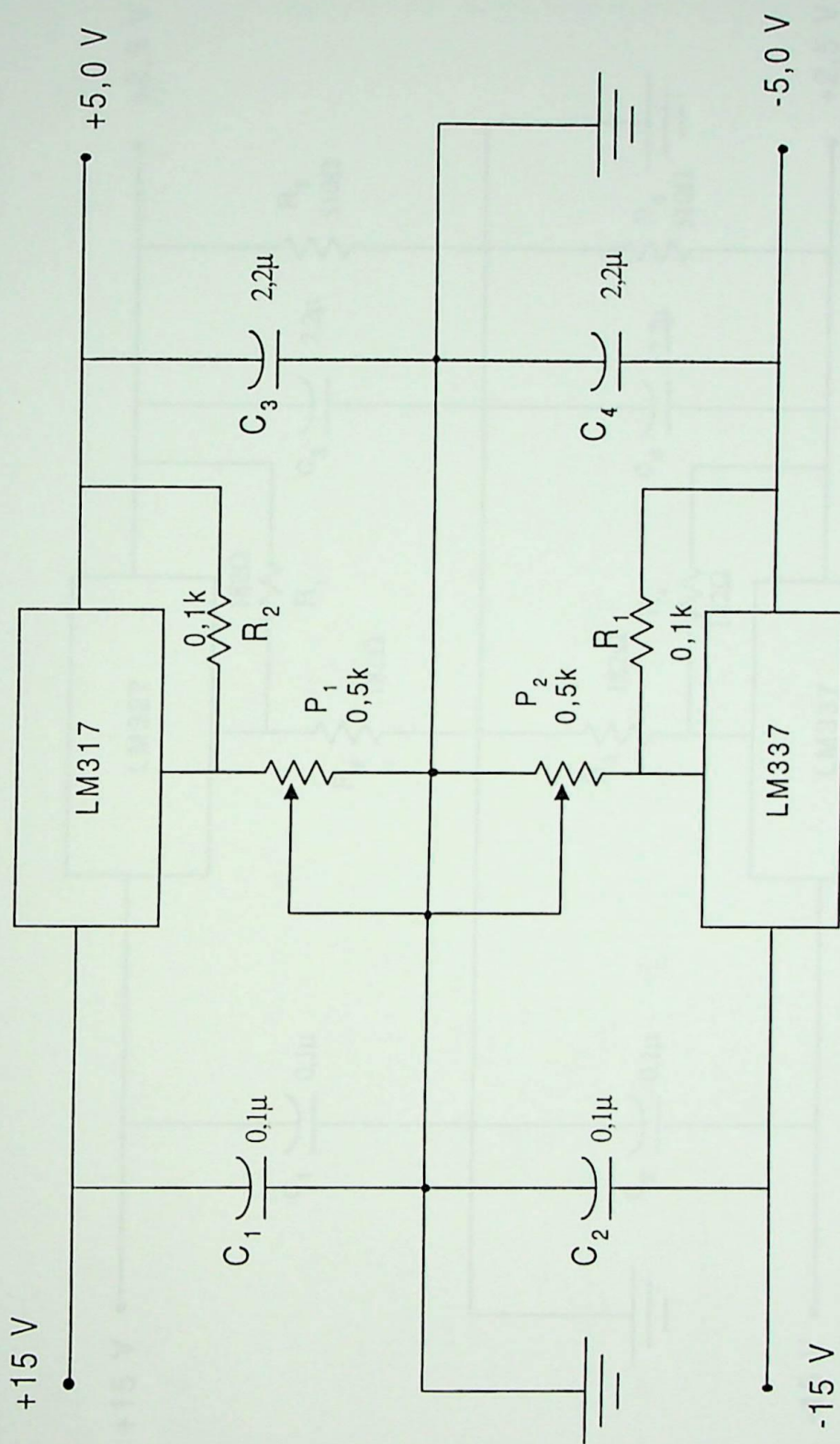


Fig.2.5 Fonte de 5,0 V

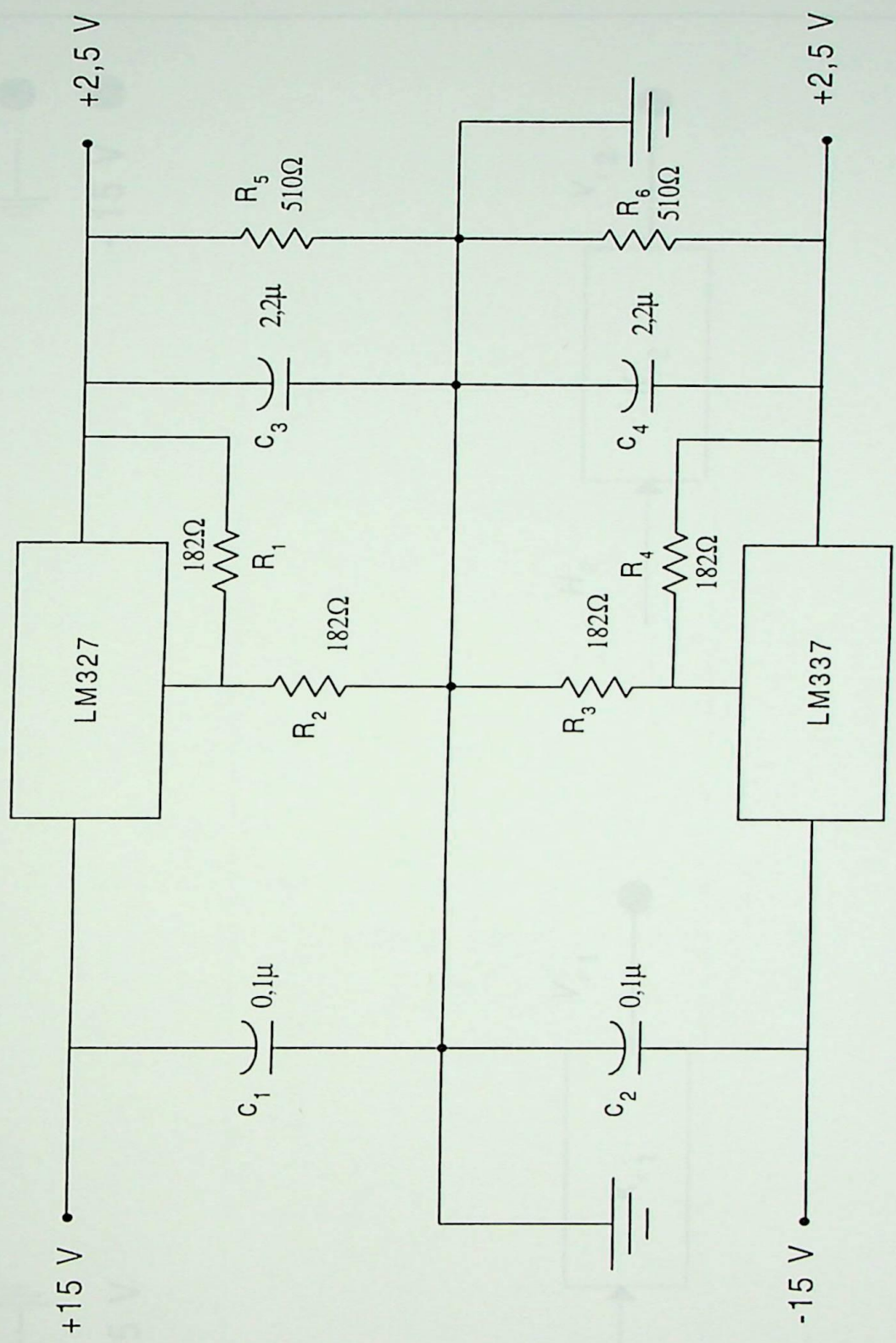
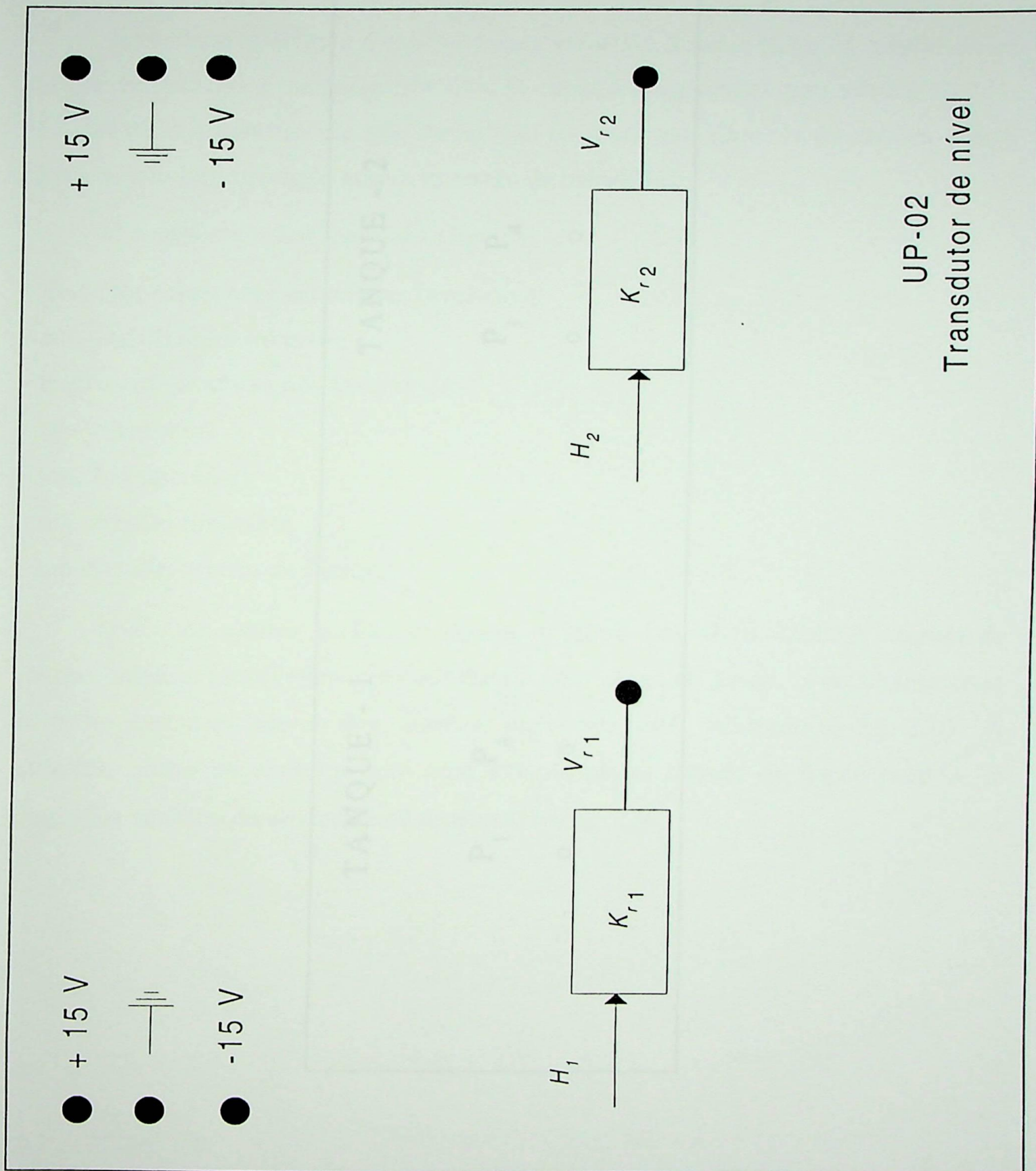


Fig.2.6 Fonte de 2,5 V



UP-02
Transdutor de nível

Fig. 2.7 Transdutor de nível: diagrama sinótico

2.5 - UNIDADE ANALÓGICA

A unidade analógica é extremamente versátil e fornece todos os controladores que serão utilizados no processo de trabalho. O circuito integrado empregado é o CI 747. É necessário a máxima atenção na ligação da fonte que alimenta os cartões, pois a unidade não tem proteção contra inversão de polaridade.

- dois amplificadores não inversores;
- um amplificador inversor;
- dois amplificadores não inversores;
- um integrador;
- um diferenciador;
- um circuito limitador;
- um circuito divisor de tensão.

Todos os ajustes serão executados na parte frontal da unidade, através de potenciômetros multivoltímetros, com auxílio de uma chave de fenda. O detalhamento, a nível de circuito interno, dos cartões impressos, está mostrado na fig. 2.10. A conexão entre os circuitos é feita externamente, através de fiação própria. O diagrama sinótico da unidade está mostrado na fig. 2.9.

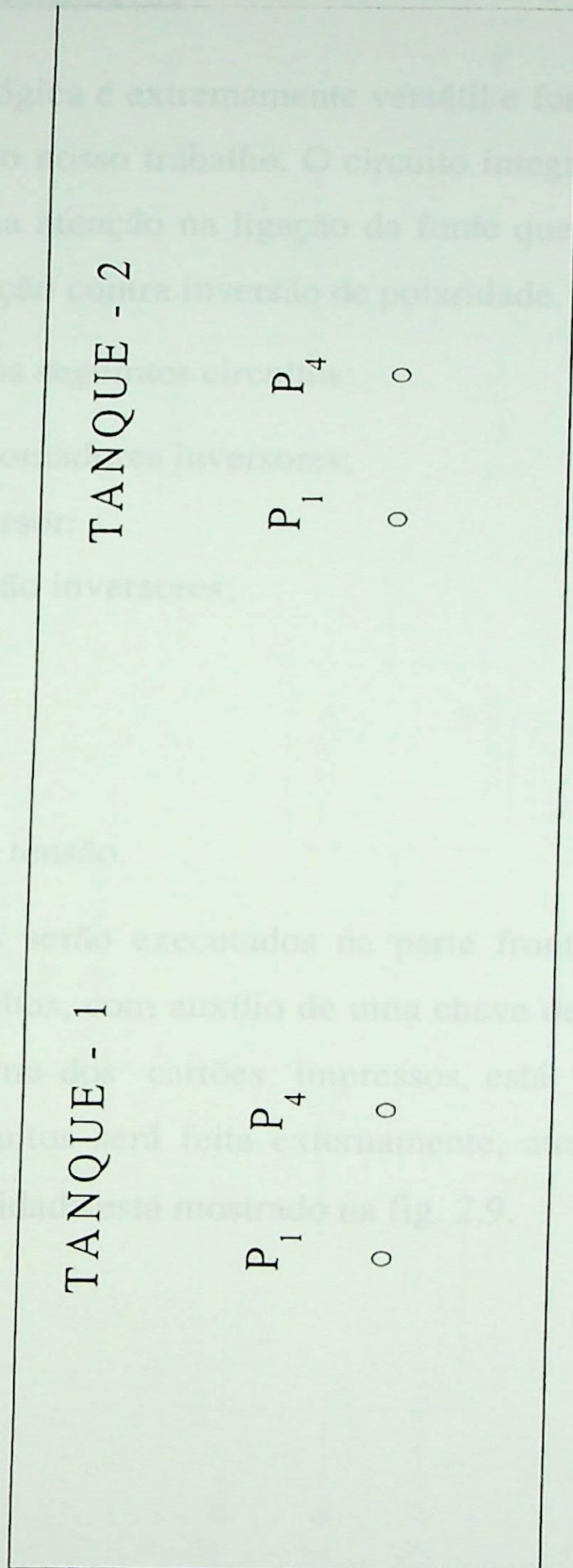


Fig. 2.8 Detalhes do posicionamento dos potenciômetros P₁ e P₄

2.5 - UNIDADE ANALÓGICA

A unidade analógica é extremamente versátil e fornece todos os controladores que serão utilizados no nosso trabalho. O circuito integrado empregado é o CI 747. É necessário a máxima atenção na ligação da fonte que alimenta os cartões, pois a unidade não tem proteção contra inversão de polaridade.

É composta pelos seguintes circuitos:

- dois amplificadores somadores inversores;
- um amplificador inversor;
- dois amplificadores não inversores;
- um integrador;
- um diferenciador;
- um circuito limitador;
- um circuito divisor de tensão.

Todos os ajustes serão executados na parte frontal da unidade, através de potenciômetros multivoltas, com auxílio de uma chave de fenda. O detalhamento, a nível de circuito interno dos cartões impressos, está mostrado na fig. 2.10. A conexão entre os circuitos será feita externamente, através de fiação própria. O diagrama sinótico da unidade está mostrado na fig. 2.9.

Fig. 2.9 Unidade analógica: vista frontal

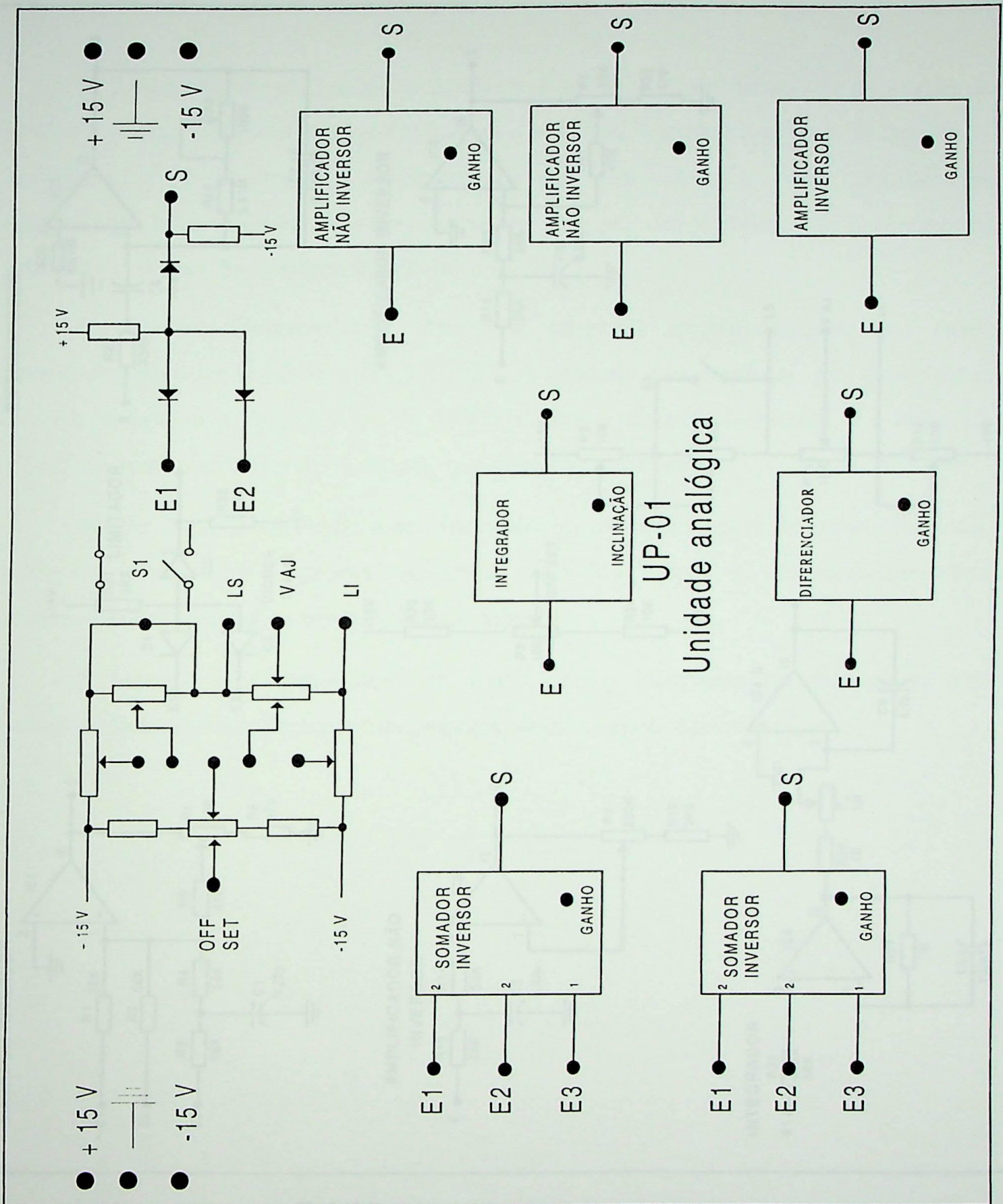


Fig. 2.9 Unidade analógica: vista frontal

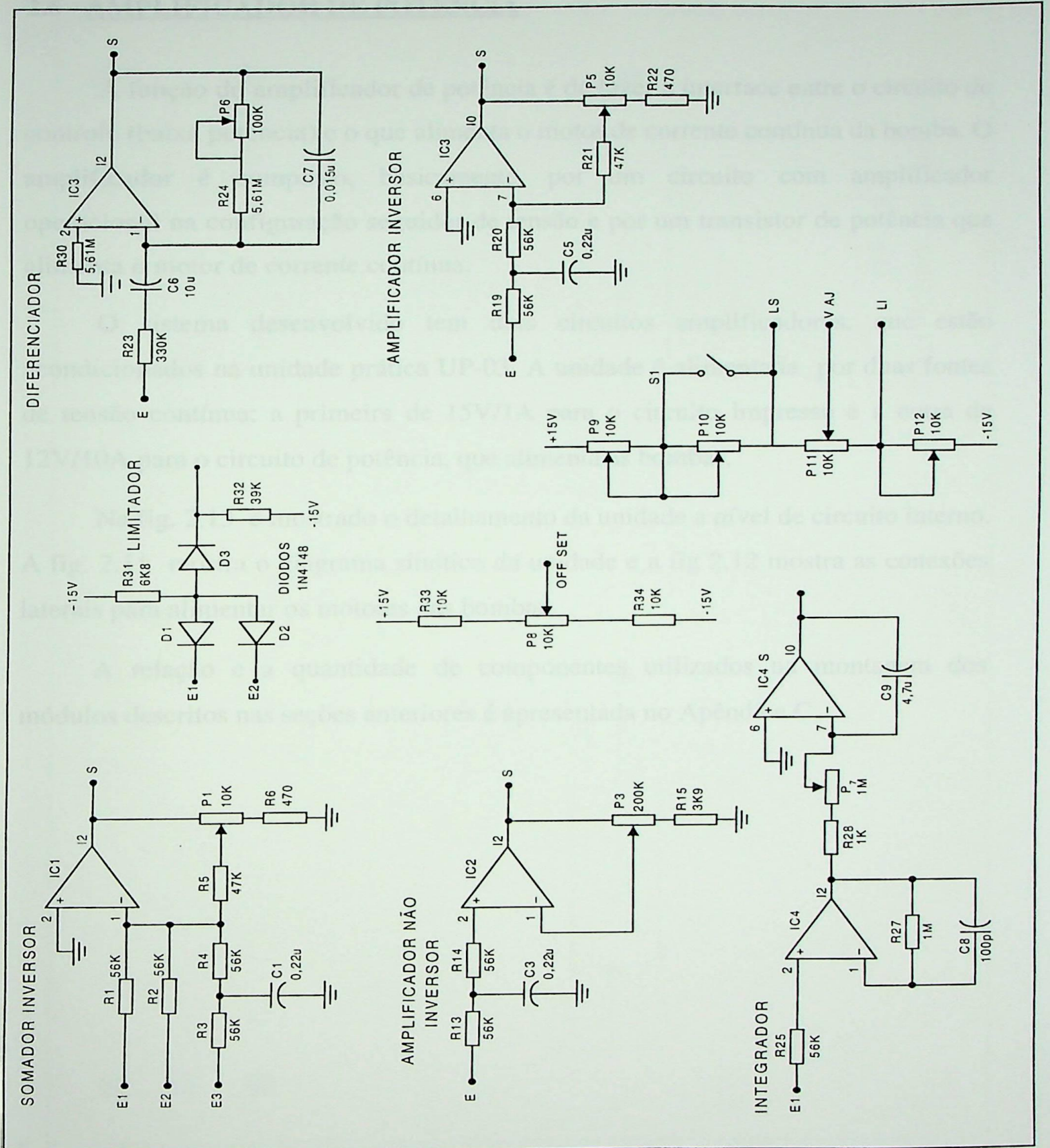


Fig 2.10 Unidade analógica: circuito interno

2.6 - AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA

A função do amplificador de potência é de fazer a interface entre o circuito de controle (baixa potência) e o que alimenta o motor de corrente contínua da bomba. O amplificador é composto, basicamente, por um circuito com amplificador operacional na configuração seguidor de tensão e por um transistor de potência que alimenta o motor de corrente contínua.

O sistema desenvolvido tem dois circuitos amplificadores, que estão acondicionados na unidade prática UP-03. A unidade é alimentada por duas fontes de tensão contínua: a primeira de 15V/1A para o circuito impresso e a outra de 12V/10A para o circuito de potência, que alimenta as bombas.

Na fig. 2.13 é mostrado o detalhamento da unidade a nível de circuito interno. A fig. 2.11 mostra o diagrama sinótico da unidade e a fig 2.12 mostra as conexões laterais para alimentar os motores das bombas.

A relação e a quantidade de componentes utilizados na montagem dos módulos descritos nas seções anteriores é apresentada no Apêndice C.



Fig.2.11 Amplificador de potência: vista frontal

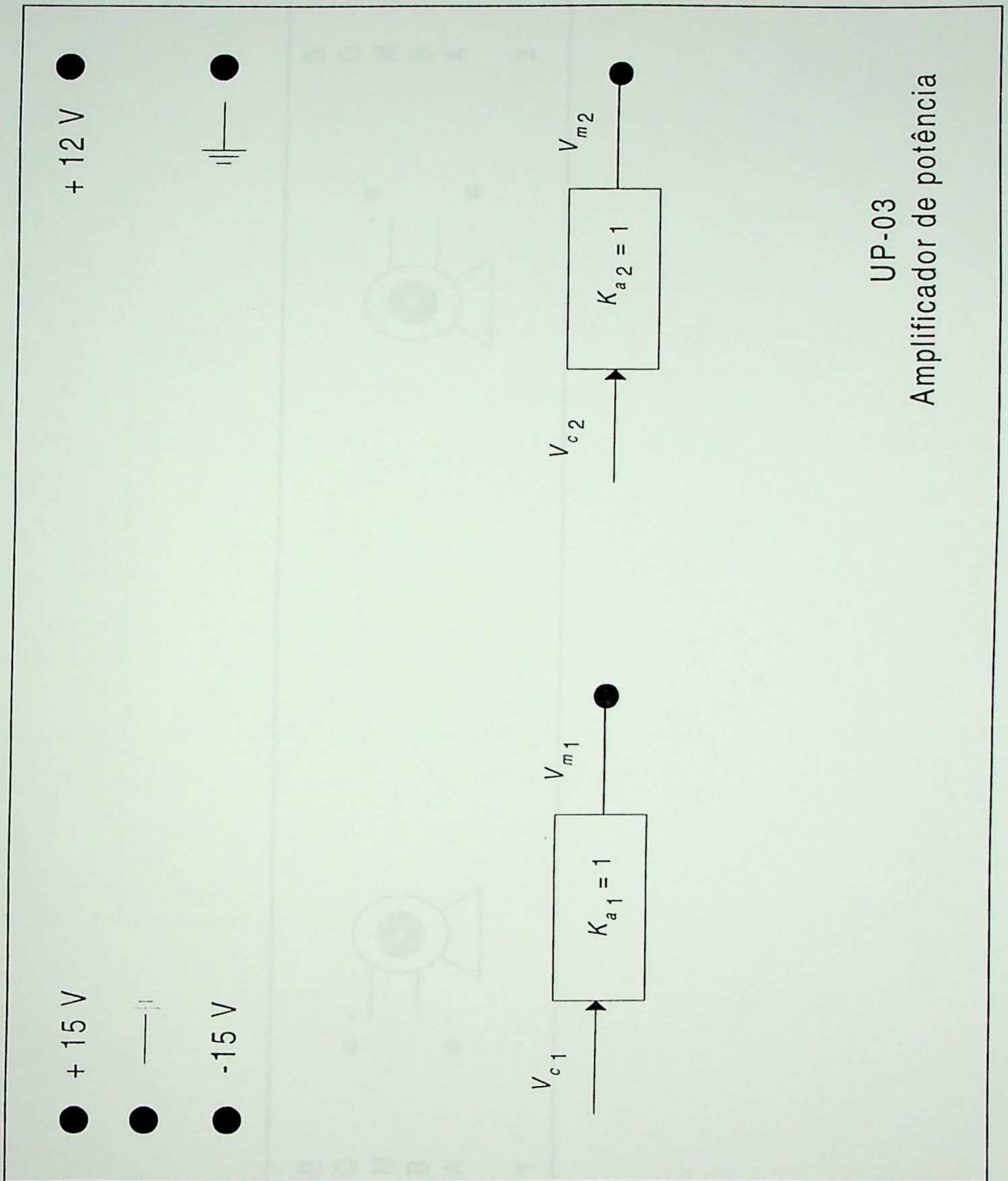


Fig.2.11 Amplificador de potência: vista frontal

Fig.2.12 Amplificador de potência: reatâncias para as bombas

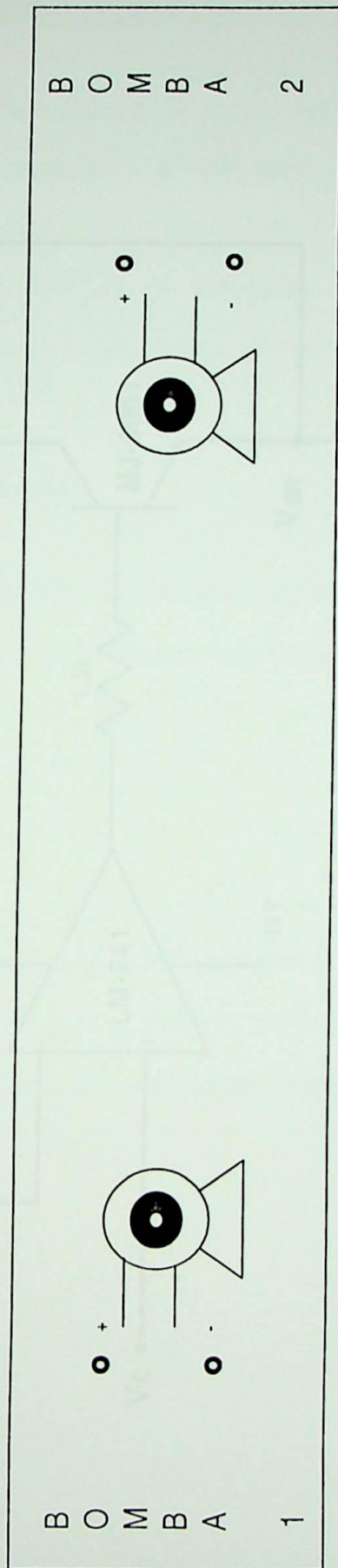


Fig.2.12 Amplificador de potência: conexões para as bombas

2.7 - FONTES DE TENSÃO CONTÍNUA

São utilizadas duas fontes de tensão em corrente contínua. A primeira, que alimenta os circuitos impressos, é regulada, ajustável, simétrica, 20V, 1A, com proteção contra curto-circuito e sobrecarga. A segunda, que alimenta o motor de corrente contínua da bomba, é regulada, 12V, 10A, com proteção contra curto-circuito. Estas fontes foram compradas juntamente com o equipamento.

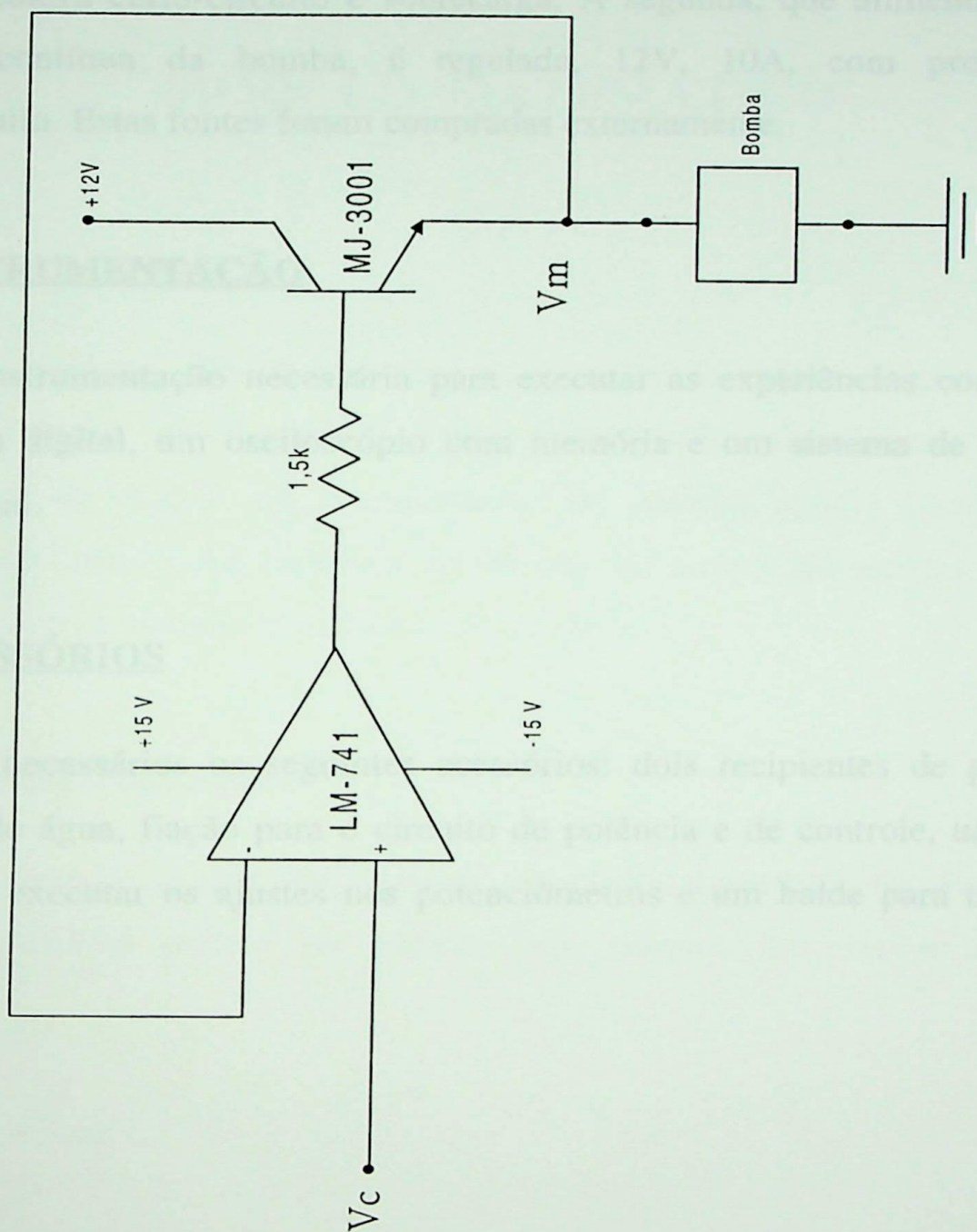


Fig. 2.13 Amplificador de potência: circuito interno

2.7 - FONTES DE TENSÃO CONTÍNUA

São utilizadas duas fontes de tensão em corrente contínua. A primeira, que alimenta os circuitos impressos, é regulada, ajustável, simétrica, 20V, 1A, com proteção contra curto-circuito e sobrecarga. A segunda, que alimenta o motor de corrente contínua da bomba, é regulada, 12V, 10A, com proteção contra curto-circuito. Estas fontes foram compradas externamente.

2.8 - INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação necessária para executar as experiências consiste de um multímetro digital, um osciloscópio com memória e um sistema de aquisição de dados digital.

2.9 - ACESSÓRIOS

São necessários os seguintes acessórios: dois recipientes de plástico para depósitos de água, fiação para o circuito de potência e de controle, uma chave de fenda para executar os ajustes nos potenciômetros e um balde para transporte de água.

CAPÍTULO 3

MODELO MATEMÁTICO

3.1 - SISTEMA DINÂMICO

Neste capítulo, são determinadas as equações de estado do par de tanques acoplados, descrito no capítulo 2. Serão, também, determinadas as funções de transferência de todos os componentes do sistema após a linearização dos elementos não lineares. As variáveis em função do tempo são escritas com letras minúsculas e será omitida a notação de tempo.

3.1.1 - Equações Dinâmicas

Considerando o par de tanques acoplados, mostrado na fig. 3.1, as equações dinâmicas podem ser obtidas pelo balanço das vazões em cada tanque.

Para o tanque 1:

$$q_{i1} - q_{o1} - q_1 = A \cdot \frac{dh_1}{dt} \quad (3.1)$$

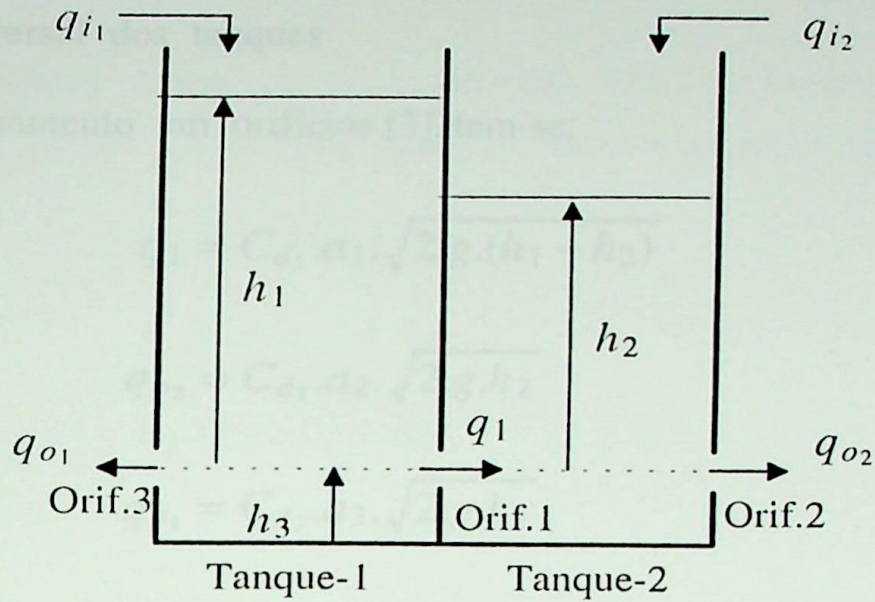


Fig. 3.1 Sistema de tanques acoplados: equações dinâmicas

Para o tanque 2:

$$q_{i2} + q_1 - q_{o2} = A \cdot \frac{dh_2}{dt} \quad (3.2)$$

onde:

h_1 : altura da água no tanque 1;

h_2 : altura da água no tanque 2;

h_3 : altura dos orifícios;

q_{i1} : vazão de entrada no tanque 1;

q_{i2} : vazão de entrada no tanque 2;

q_{o1} : vazão de saída do tanque 1;

q_{o2} : vazão de saída do tanque 2;

q_1 : vazão entre os tanques 1 e 2;

A : secção transversal dos tanques

Da teoria de escoamento em orifícios [3], tem-se:

$$q_1 = C_{d1} \cdot a_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1 - h_2)} \quad (3.3)$$

$$q_{o2} = C_{d2} \cdot a_2 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_2} \quad (3.4)$$

$$q_{o1} = C_{d3} \cdot a_3 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1} \quad (3.5)$$

onde:

C_{d1} : coeficiente de descarga do orifício 1;

C_{d2} : coeficiente de descarga do orifício 2;

C_{d3} : coeficiente de descarga do orifício 3;

a_1 : secção transversal do orifício 1;

a_2 : secção transversal do orifício 2;

a_3 : secção transversal do orifício 3;

g : aceleração da gravidade.

As equações (3.1) a (3.5) descrevem o par de tanques acoplados e são equações **não lineares**. Para aplicação das técnicas convencionais de controle automático é necessário linearizá-las, o que será feito na próxima seção.

3.1.2 - Equações de Estado Linearizadas.

Seja o sistema numa condição inicial estável. Considere-se pequenas variações Δq nas vazões de entrada. Logo, em termos matemáticos, tem-se:

$$q_{i_1} = q_{i_1}(0) + \Delta q_{i_1} \quad (3.6)$$

$$q_{i_2} = q_{i_2}(0) + \Delta q_{i_2} \quad (3.7)$$

$$q_1 = q_1(0) + \Delta q_1 \quad (3.8)$$

$$q_{o_1} = q_{o_1}(0) + \Delta q_{o_1} \quad (3.9)$$

$$q_{o_2} = q_{o_2}(0) + \Delta q_{o_2} \quad (3.10)$$

$$h_1 = h_1(0) + \Delta h_1 \quad (3.11)$$

$$h_2 = h_2(0) + \Delta h_2 \quad (3.12)$$

Substituindo as equações (3.6), (3.9), (3.8) e (3.11) na equação(3.1) e simplificando obtem-se:

$$\Delta q_{i_1} - \Delta q_{o_1} - \Delta q_1 = A \cdot \Delta \dot{h}_1 \quad (3.13)$$

Substituindo as equações (3.8),(3.11) e (3.12) na equação (3.3) e simplificando tem-se:

$$q_1(0) + \Delta q_1 = C_{d_1} \cdot a_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_1(0) + \Delta h_1 - h_2(0) - \Delta h_2)}$$

Elevando ao quadrado membro a membro, considerando-se $\Delta q^2 \cong 0$ e substituindo o valor de $q_1(0)$ pela equação (3.3) e simplificando , obtem-se:

$$\Delta q_1 = \frac{C_{d1} \cdot a_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2\sqrt{h_1(0) - h_2(0)}} \cdot (\Delta h_1 - \Delta h_2)$$

Fazendo:

$$K_1 = \frac{C_{d1} \cdot a_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2\sqrt{h_1(0) - h_2(0)}} \quad (3.14)$$

Logo:

$$\Delta q_1 = K_1 \cdot (\Delta h_1 - \Delta h_2) \quad (3.15)$$

Substituindo-se as equações (3.9) e (3.11) na equação (3.5), de maneira idêntica à anterior, tem-se:

$$\Delta q_{o1} = K_3 \cdot \Delta h_1 \quad (3.16)$$

onde:

$$K_3 = \frac{C_{d3} \cdot a_3 \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2\sqrt{h_1(0)}} \quad (3.17)$$

Substituindo as equações (3.15) e (3.16) na equação (3.13), vem:

$$\Delta q_{i1} - K_3 \Delta h_1 - K_1 (\Delta h_1 - \Delta h_2) = A \cdot \Delta \dot{h}_1$$

ou,

$$\Delta \dot{h}_1 = \frac{-(K_1 + K_3)}{A} \Delta h_1 + \frac{K_1}{A} \Delta h_2 + \frac{1}{A} \Delta q_{i1} \quad (3.18)$$

Utilizando a equação (3.2) e com um desenvolvimento semelhante ao anterior, tem-se:

$$\Delta \dot{h}_2 = \frac{K_1}{A} \Delta h_1 - \frac{(K_1+K_2)}{A} \Delta h_2 + \frac{1}{A} \Delta q_{i2} \quad (3.19)$$

onde,

$$K_2 = \frac{C_{d2} \cdot a_2 \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \sqrt{h_2(0)}} \quad (3.20)$$

As equações (3.18) e (3.19) são as **equações de estado linearizadas** do sistema de par de tanques acoplados. Em forma matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{h}_1 \\ \Delta \dot{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(K_1+K_3)}{A} & \frac{K_1}{A} \\ \frac{K_1}{A} & \frac{-(K_1+K_2)}{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta h_1 \\ \Delta h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{A} & 0 \\ 0 & \frac{1}{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q_{i1} \\ \Delta q_{i2} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

As experiências práticas, descritas neste texto, consideram apenas uma entrada e uma saída (SISO-single input single output). A variável de entrada será a vazão da bomba 1 e a de saída o nível da água no tanque 2. No próximo item, deduziremos a **função de transferência** envolvendo essas grandezas.

3.1.3 - Função de Transferência do Par de Tanques Acoplados

Para determinação da função de transferência entre a vazão de entrada do tanque 1 e o nível da água no tanque 2, tampa-se o orifício 3, o que significa anular a sua área a_3 , o que anula o valor de K_3 (eq. (3.17)); aplica-se então a Transformada de Laplace às equações (3.18) e (3.19), considerando-se nula a vazão de entrada do tanque 2. Como estão sendo consideradas variáveis incrementais (variações), as condições iniciais são nulas.

Tomando-se a Transformada de Laplace das equações (3.18) e (3.19), tem-se:

$$s.\Delta H_1(s) = \frac{-K_1}{A}\Delta H_1(s) + \frac{K_1}{A}\Delta H_2(s) + \frac{1}{A}\Delta Q_{i_1}(s) \quad (3.22)$$

e,

$$s.\Delta H_2(s) = \frac{-(K_1+K_2)}{A}\Delta H_2(s) + \frac{K_1}{A}\Delta H_1(s)$$

ou:

$$\Delta H_1(s) = \left(s + \frac{K_1+K_2}{A} \right) \frac{A}{K_1} \Delta H_2(s) \quad (3.23)$$

Substituindo a equação (3.23) na equação (3.22), obtem-se:

$$\frac{\Delta H_2(s)}{\Delta Q_{i_1}(s)} = \frac{\frac{1}{K_2}}{\frac{A^2}{K_1 K_2} s^2 + A \left(\frac{K_2+2K_1}{K_1 K_2} \right) s + 1} \quad (3.24)$$

Esta função de transferência pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$G_s(s) = \frac{\Delta H_2(s)}{\Delta Q_{i_1}(s)} = \frac{\frac{1}{K_2}}{(1+sT_1)(1+sT_2)} \quad (3.25)$$

onde:

$$T_1 T_2 = \frac{A^2}{K_1 K_2} \quad (3.26)$$

e,

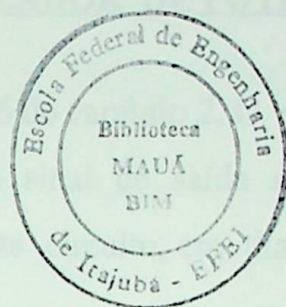
$$T_1 + T_2 = \frac{A.(K_2 + 2K_1)}{K_1 K_2} \quad (3.27)$$

O sistema de tanques acoplados pode ser convertido em um sistema de primeira ordem, aumentando-se a área do orifício entre os tanques. Isto feito, a_1 aumentará, o que implica em K_1 tender para o infinito. Nesta situação tem-se a seguinte função de transferência:

$$\frac{\Delta H_2(s)}{\Delta Q_{i_1}(s)} = \frac{1}{K_2(1+sT)} \quad (3.28)$$

onde :

$$T = \frac{2.A}{K_2} \quad (3.29)$$



3.1.4 - Determinação dos Coeficientes das Equações de Estado

O sistema de tanques acoplados é um sistema onde as características dinâmicas podem ser encontradas através de medições físicas. As constantes de tempo T_1 e T_2 dependem dos coeficientes K_1 e K_2 e da área da secção transversal de cada tanque. Os coeficientes K_1 e K_2 dependem dos coeficientes de descarga, da secção transversal dos orifícios, da aceleração da gravidade e dos níveis do líquido, em cada tanque, na condição inicial.

Conclui-se então que, conhecendo-se as características físicas do sistema e o ponto de operação inicial, é possível determinar os coeficientes das equações de estado e da função de transferência.

A desvantagem deste processo é que os coeficientes de descarga, que dependem dos pontos de operação, são obtidos através de tabelas [3], e nem sempre é possível conseguir o valor exato.

No capítulo 4, é descrito um método para determinação dos coeficientes das equações de estado e da função de transferência através de experiências de laboratório, evitando-se o uso de tabelas. Outras maneiras de se obter estes coeficientes estão descritos em [9]. Será utilizado o modelo de uma única entrada e uma única saída.

3.2 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO AMPLIFICADOR DE POTÊNCIA

O amplificador de potência foi descrito no item 2.6 do capítulo 2. O sinal de entrada será a tensão de saída dos controladores e o sinal de saída a tensão aplicada ao grupo motor-bomba. A representação deste circuito, em diagrama de blocos, está mostrada na fig. 3.2

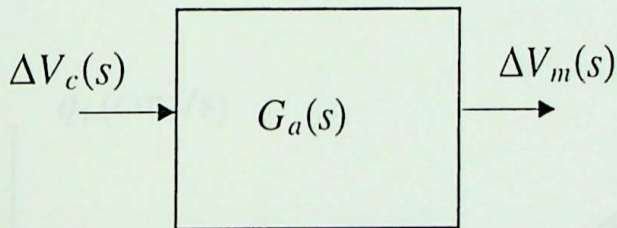


Fig. 3.2 Bloco representativo do amplificador de potência

O amplificador operacional, deste circuito, fig. 2.13, está conectado na configuração seguidor de tensão, logo o ganho total do circuito é unitário.

A função de transferência será:

$$G_a(s) = \frac{\Delta V_m(s)}{\Delta V_c(s)} = K_a = 1 \quad (3.30)$$

onde:

$G_a(s)$: Função de Transferência do amplificador de potência

$\Delta V_m(s)$: Transformada de Laplace da variação da tensão aplicada ao motor.

$\Delta V_c(s)$: Transformada de Laplace da variação da tensão de controle.

K_a : Constante de proporcionalidade

3.3 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO CONJUNTO MOTOR-BOMBA.

A característica vazão de saída da bomba, em centímetros cúbicos por segundo, em função da tensão aplicada ao motor, em volts, do grupo motor-bomba, descrito no item 2.3 do capítulo 2, está mostrada na fig. 3.3. Esta característica foi levantada no laboratório e todo o processo está descrito no item 4.4 do capítulo 4.

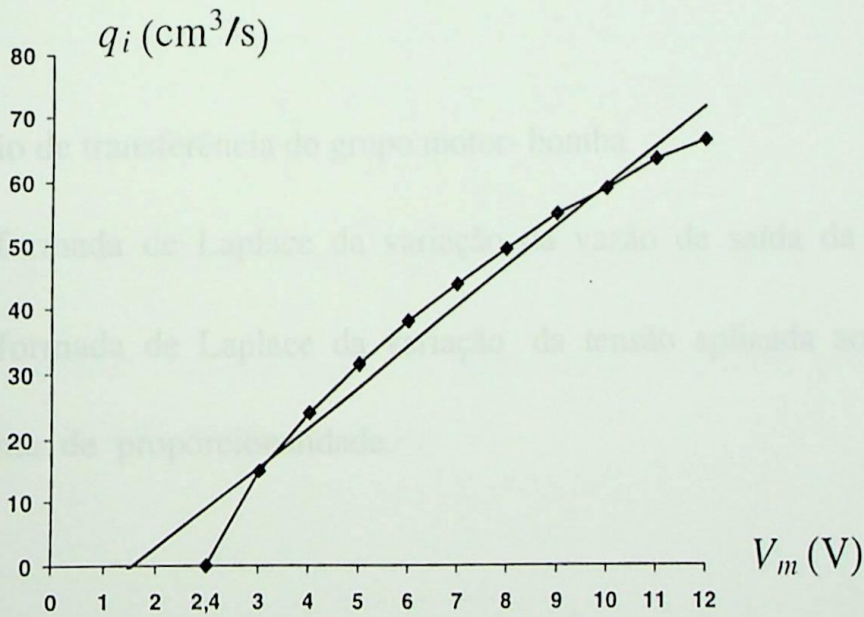


Fig. 3.3 Característica $q = f(V_m)$ do conjunto motor-bomba

Como serão consideradas variações do sinal de entrada em torno de um ponto de equilíbrio, no trecho linear da curva, a função de transferência será considerada puramente proporcional. Na fig. 3.4 é mostrado o bloco representativo do conjunto.

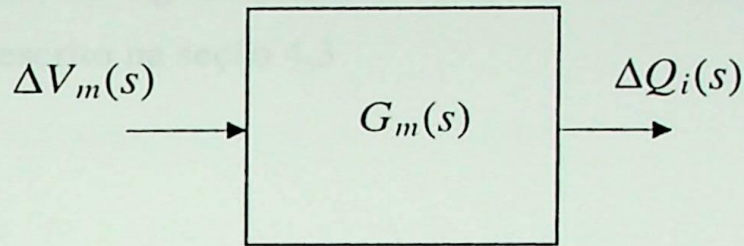


Fig.3.4 Bloco representativo do grupo motor-bomba.

A função de transferência será:

$$G_m(s) = \frac{\Delta Q_i(s)}{\Delta V_m(s)} = K_m \quad (3.31)$$

onde:

$G_m(s)$: Função de transferência do grupo motor- bomba

$\Delta Q_i(s)$: Transformada de Laplace da variação da vazão de saída da bomba.

$\Delta V_m(s)$: Transformada de Laplace da variação da tensão aplicada ao motor.

K_m : constante de proporcionalidade.

3.4 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO TRANSDUTOR DE NÍVEL

O transdutor de nível, descrito no item 2.4 do capítulo 2, tem sua característica tensão de saída, em volts, em função do nível de água no tanque, em centímetros, mostrado na fig. 3.5. Esta característica foi obtida no laboratório e o método utilizado está descrito na seção 4.3

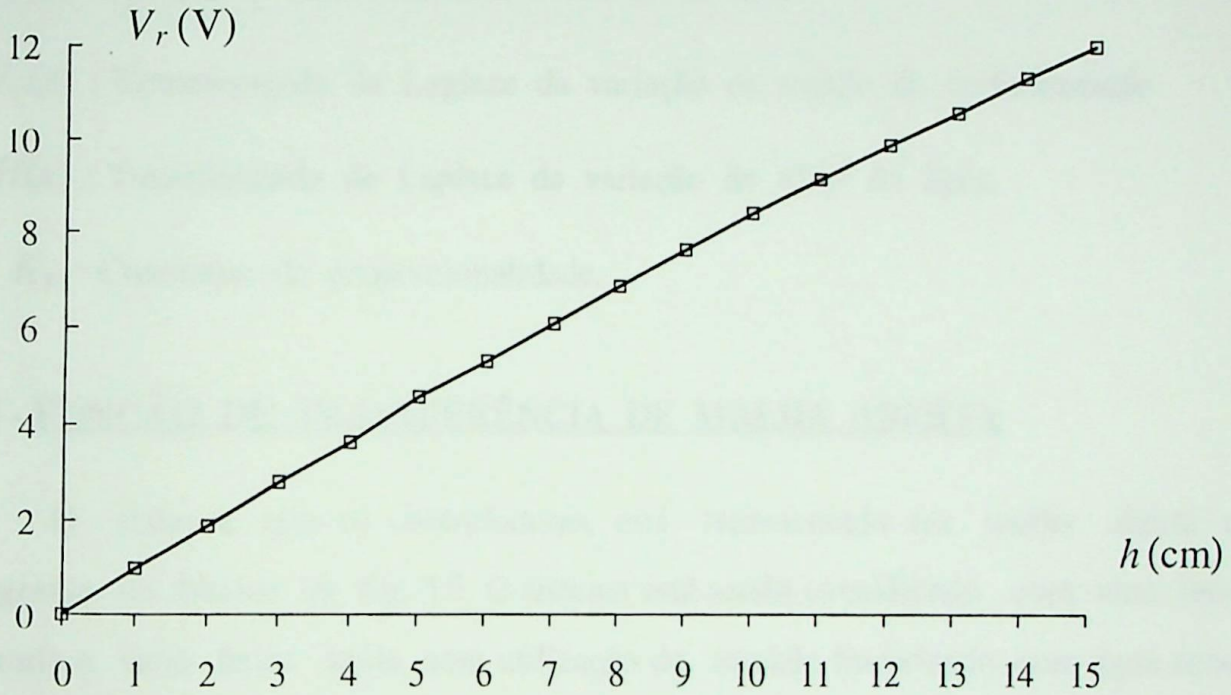


Fig. 3.5 Característica $v_r = f(h)$ do sensor de nível.

A função de transferência será considerada puramente proporcional e o bloco representativo está mostrado na fig. 3.6.

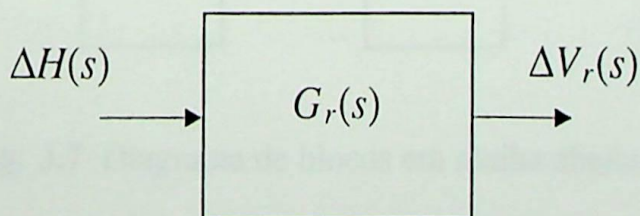


Fig. 3.6 Bloco representativo do sensor de nível .

A função de transferência será:

$$G_r(s) = \frac{\Delta V_r(s)}{\Delta H(s)} = K_r \quad (3.32)$$

onde:

$G_r(s)$: Função de transferência do transdutor de nível.

$\Delta V_r(s)$: Transformada de Laplace da variação da tensão de realimentação.

$\Delta H(s)$: Transformada de Laplace da variação do nível da água.

K_r : Constante de proporcionalidade.

3.5 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MALHA ABERTA

O sistema, sem os controladores, está representado em malha aberta, no diagrama de blocos da fig. 3.7. O sistema está sendo considerado com uma única entrada e uma única saída, com utilização do modelo linearizado, com água sendo bombeada apenas no tanque 1. Assim, a partir deste ponto suprime-se a notação de duplo índice para as vazões, e considera-se como única vazão de entrada $q_i = q_{i1}$. O sinal de entrada será a tensão de saída dos controladores, e o de saída será a tensão de realimentação, pois, este sinal é o que será registrado nas experiências práticas.

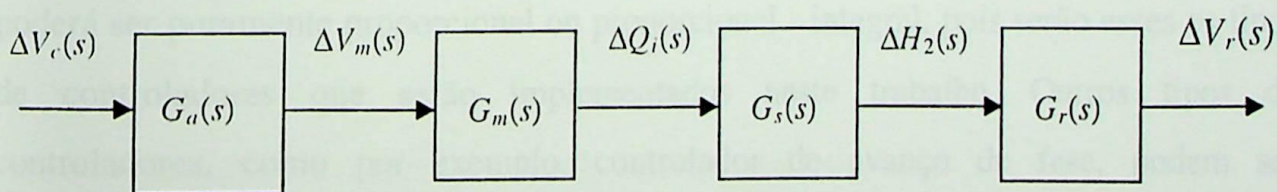


Fig. 3.7 Diagrama de blocos em malha aberta

Na fig. 3.7 tem-se:

$\Delta V_c(s)$: Transformada de Laplace da variação da tensão de controle.

$\Delta V_m(s)$: Transformada de Laplace da variação da tensão aplicada ao motor

$\Delta Q_i(s)$: Transformada de Laplace da variação da vazão de entrada do tanque-1

$\Delta H_2(s)$: Transformada de Laplace da variação do nível no tanque-2

$\Delta V_r(s)$: Transformada de Laplace da variação da tensão de realimentação

A função de transferência do sistema controlado, $G_x(s)$, será:

$$G_x(s) = \frac{\Delta V_r(s)}{\Delta V_c(s)} = \frac{K_x}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)} \quad (3.33)$$

onde:

$$K_x = \frac{K_a \cdot K_m \cdot K_r}{K_2} \quad (3.34)$$

3.6 - FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MALHA FECHADA

O diagrama de blocos da fig. 3.8 representa o sistema em malha fechada. O sinal de entrada será a tensão de referência. A função de transferência do controlador poderá ser puramente proporcional ou proporcional - integral, pois serão esses os tipos de controladores que serão implementados neste trabalho. Outros tipos de controladores, como por exemplo, controlador de avanço de fase, podem ser implementados com facilidade.

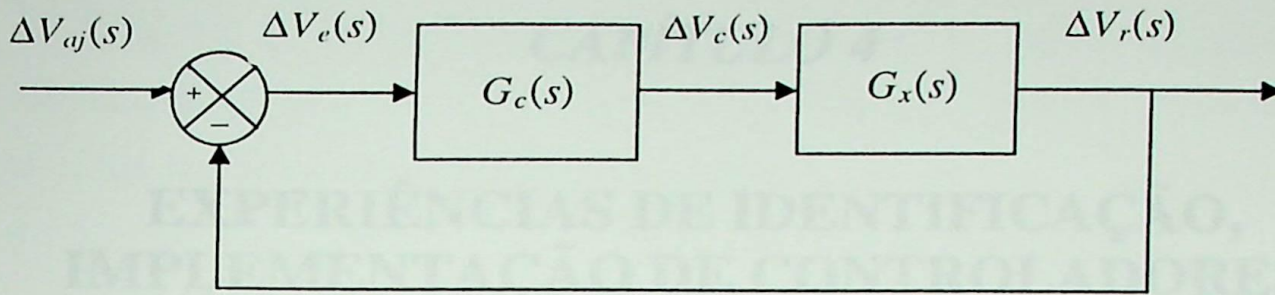


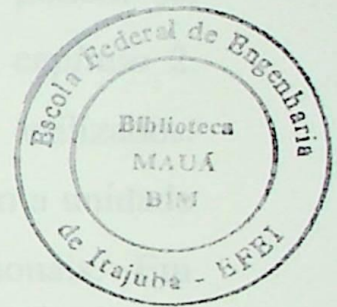
Fig. 3.8 Diagrama de blocos em malha fechada

onde:

$\Delta V_{aj}(s)$: Transformada de Laplace da variação da tensão de referência.

$\Delta V_e(s)$: Transformada de Laplace da variação da tensão de erro.

$G_c(s)$: Transformada de Laplace do controlador em cascata



A função de transferência de malha fechada $G_f(s)$, será

$$G_f(s) = \frac{\Delta V_r(s)}{\Delta V_{aj}(s)} = \frac{G_c(s) \cdot G_x(s)}{1 + G_c(s) \cdot G_x(s)} \quad (3.35)$$

Para controlador do tipo puramente proporcional, tem-se:

$$G_c(s) = K_p \quad (3.36)$$

Para o controlador do tipo proporcional - integral, tem-se:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3.37)$$

CAPÍTULO 4

EXPERIÊNCIAS DE IDENTIFICAÇÃO, IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADORES E VERIFICAÇÃO PRÁTICA DE DESEMPENHO

4.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão descritas as experiências relevantes que podem ser realizadas com o sistema de controle de nível de líquido descrito no capítulo 2. Nessas experiências, todos os componentes do sistema serão utilizados. Inicialmente, são sugeridas algumas experiências para familiarização com a unidade analógica, envolvendo vários circuitos com amplificadores operacionais. Em seguida, são descritas experiências para determinação dos parâmetros necessários para a indentificação da função de transferência da cada componente. É necessário o máximo cuidado no levantamento destes parâmetros, pois as respostas do sistema, obtidas através das experiências práticas, serão comparadas com respostas em simulações feitas com modelos matemáticos, afim de validar os resultados de análise e projeto obtidos com base na Teoria de Controle.

4.2 - UNIDADE ANALÓGICA

A fig.2.6, do capítulo 2, mostra o diagrama sinótico gravado no painel frontal da unidade analógica. O objetivo neste item é ilustrar o manuseio deste módulo e obter a função de transferência de cada circuito.

O usuário deverá ficar atento quanto às tensões de alimentação dos circuitos impressos, que são de +15, 0, -15 volts. Não existe proteção contra inversão de polaridade.

A instrumentação necessária consiste de um multímetro digital, um osciloscópio com memória e uma chave de fenda do tipo relojoeiro. As ligações serão todas feitas externamente através de cabos e a carcaça de alumínio está conectada à referência da fonte de tensão contínua utilizada para alimentar os circuitos impressos.

4-2-1 - Amplificador Inversor

Inicialmente, a fonte simétrica deve ser ajustada em ± 15 V para a alimentação dos circuitos impressos dos cartões. Durante todas as experiências deste trabalho esta fonte deverá estar sempre ajustada nesta tensão.

Considere o amplificador inversor, conforme a fig. 4.1.

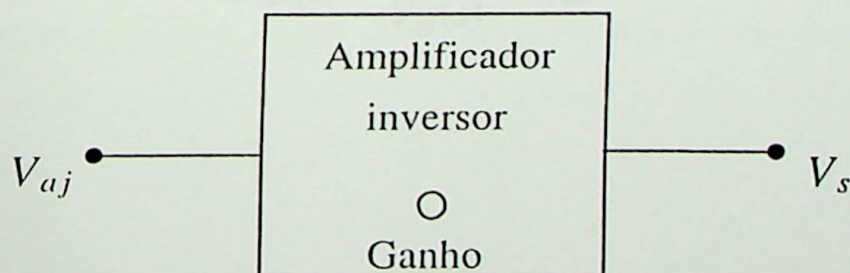


Fig. 4.1 Amplificador inversor

Na fig 4.1, tem-se:

V_{aj} : tensão de entrada (ajustável através de seu potenciômetro)

V_s : tensão de saída (conectada a um voltímetro digital)

Liga-se a fonte de alimentação, ajustando-a em (V_{aj}) para -0,5 volts.

Girando o trimpot de ajuste de ganho no sentido horário, calcula-se o ganho máximo do amplificador inversor. Para calcular o ganho mínimo gira-se o potenciômetro no sentido anti-horário. Verifica-se que:

$$0,5 \leq A_{inv} \leq 10$$

Desliga-se a fonte de alimentação

A função de transferência do amplificador inversor $G_{inv}(s)$ será um ganho, que irá variar dentro dos limites de A_{inv} .

Logo:

$$G_{inv}(s) = \frac{V_s(s)}{V_{aj}(s)} = A_{inv} \quad (4.1)$$

4-2-2 - Amplificador não Inversor

Considere o amplificador não inversor, conforme a fig.4.2.

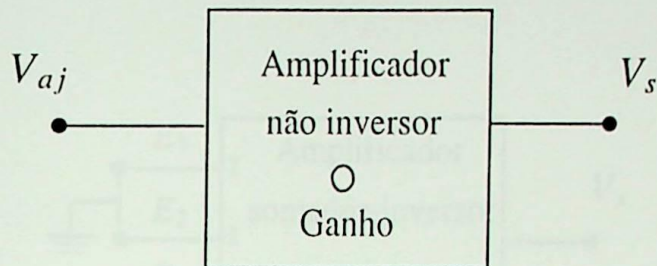


Fig.4.2 Amplificador não inversor

A fonte de alimentação é ligada e é ajustada (V_{aj}) para +0,2 volts.

Girando-se o trimpot de ajuste de ganho, calcula-se os ganhos máximo e mínimo do amplificador não inversor. Neste procedimento verifica-se que:

$$1 \leq A_{n.inv} \leq 50$$

Desliga-se a fonte de alimentação.

A função de transferência do amplificador não inversor $G_{n.inv}(s)$ será simplesmente um ganho, que irá variar dentro dos limites de $A_{n.inv}$.

Logo:

$$G_{n.inv}(s) = \frac{V_s(s)}{V_{aj}(s)} = A_{n.inv} \quad (4.2)$$

4.2.3 - Amplificador Somador Inversor

O amplificador somador, cujo bloco representativo está mostrado na fig.4.3, possui três entradas (E_1 , E_2 e E_3). As entradas E_1 e E_2 , como mostra o circuito da fig. 2.10, possuem um ganho duplicado em relação à entrada E_3 .

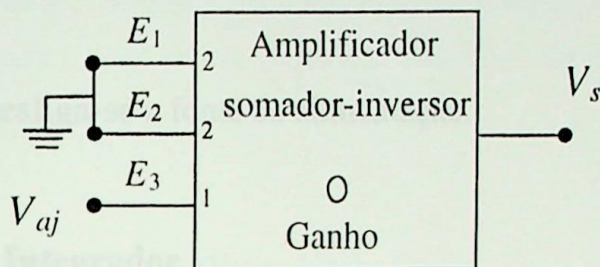


Fig. 4.3 Amplificador somador inversor

Liga-se a fonte de alimentação, ajustando-se V_{aj} para - 0,2 volts e alimenta-se a entrada E_3 com essa tensão.

Girando o trimpot de ajuste de ganho, calcula-se os ganhos máximo e mínimo do amplificador somador inversor.

$$0,5 \leq A_{som} \leq 10$$

Todo o ajuste de ganho do amplificador somador inversor será com relação à entrada E_3 . A equação genérica do amplificador somador inversor da fig.4.3, para o ganho definido com relação à entrada E_3 , será:

$$V_s = A_{som}(E_3 + 2E_2 + 2E_1)$$

A função de transferência do amplificador somador inversor $G_{s.inv}$ consiste apenas do ganho A_{som} .

Logo:

$$G_{s.inv}(s) = \frac{V_s(s)}{V_{aj}(s)} = A_{som} \quad (4.3)$$

Encerrado o ensaio, desliga-se a fonte de alimentação.

4.2.4 - Amplificador Integrador

Considere o amplificador integrador, conforme a fig. 4.4.

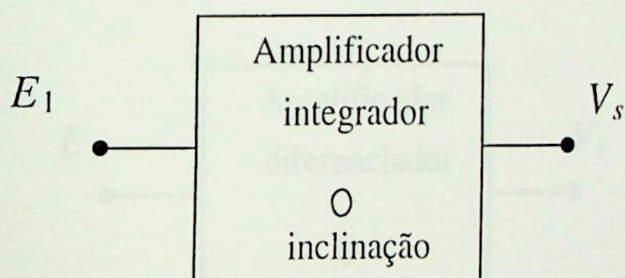


Fig. 4.4 Amplificador integrador

A equação do circuito integrador, no domínio da frequência, será:

$$V_s(s) = K_i \frac{E_1(s)}{s} \quad (4.4)$$

Da fig. 2.10, tem-se:

$$K_1 = \frac{1}{(R_{28} + P_7) \cdot C_9}$$

O ajuste do coeficiente K_i (inclinação) será executado com auxílio de um osciloscópio com memória. Aplica-se um degrau de tensão na entrada de +1.0 volt e registra-se o sinal de saída no osciloscópio. Alterando-se o trimpot de ajuste de inclinação, P_7 , no sentido horário, diminui-se o valor do coeficiente K_i , ou seja a velocidade do integrador está sendo reduzida. No final da experiência a saída do integrador deve ser zerada.

4.2.5 - Amplificador Diferenciador

Considere o amplificador diferenciador, conforme a fig. 4.5.

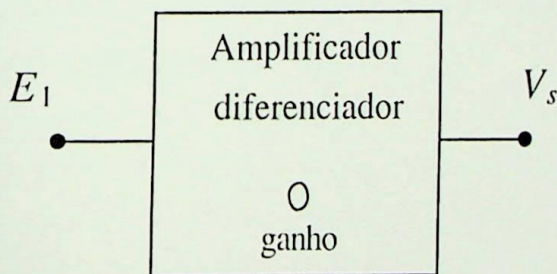


Fig. 4.5 Amplificador diferenciador

Na fig. 2.10, circuito diferenciador, seja: $K_d = (R_{24} + P_6) \cdot C_6$ e $T_F = R_{23} \cdot C_6$

Logo:

$$V_s(s) = \frac{s \cdot K_d}{1 + T_F \cdot s} \cdot E_1(s) \quad (4.5)$$

O ajuste do amplificador será verificado com auxílio de um osciloscópio com memória. Aplica-se um degrau de tensão na entrada de $\pm 0,20$ V e registra-se o sinal de saída no osciloscópio. Alterando-se o trimpot de ajuste de ganho, altera-se a resposta do amplificador. Verifica-se, experimentalmente, o problema da saturação do amplificador diferenciador aplicando-se um degrau na tensão de entrada de ± 1 V.

Este amplificador foi projetado com esta função de transferência com o objetivo de ser utilizado nos ensaios com compensadores de avanço de fase

4.3 - CALIBRAÇÃO DO TRANSDUTOR DE NÍVEL

Nesta experiência, levanta-se a característica estática do transdutor do tanque 02. O usuário deverá ler novamente a descrição do transdutor no item 2.4, com especial atenção a respeito da alimentação de tensão contínua dos circuitos impressos. Os pontos de ajuste serão os potenciômetros P_1 (ajuste de zero) e P_4 (ajuste de nível).

Coloca-se o tanque em uma posição segura, faz-se a ligação da alimentação de $\pm 15\text{ V}$ e a ligação entre os tanques e a UP-02. Os passos descritos a seguir são para levantar a característica do tanque 02. Para o tanque 01, a sequência é a mesma. Conecta-se um voltímetro no borne V_{r2} da UP-02.

1^o Passo:

Fecha-se todos os furos do orifício-1, e coloca-se água no tanque 2 até o nível do dreno 2. Liga-se a fonte de alimentação de tensão contínua e ajusta-se, através do potenciômetro P_1 , zero volts na saída V_{r2} .

2^o Passo:

Fecha-se o dreno 2 e coloca-se água no tanque 2 até a marca de 15 cm. Atuando no potenciômetro P_4 ajusta-se -12 volts na saída V_{r2} . Caso seja necessário, pode-se colocar mais um estágio de amplificação utilizando um amplificador não inversor da unidade analógica.

3^o Passo:

Abre-se o dreno 2 e esgota-se a água até o nível do dreno. Caso a tensão no ponto V_{r2} não seja zero, repete-se os passos anteriores.

4^o Passo:

Fecha-se o dreno 2 e coloca-se água no tanque até o nível de 15 cm. Abre-se o dreno e deixa-se a água abaixar até o nível de 14 cm. Faz-se a leitura do voltímetro para este nível. A seguir repete-se esta ação, montando-se a tabela 4.1

TANQUE 2	
h_2 (cm)	$-V_{r_2}$ (V)
0	0
1	0,82
2	1,74
3	2,55
4	3,44
5	4,31
6	5,16
7	5,98
8	6,75
9	7,55
10	8,35
11	9,13
12	9,87
13	10,6
14	11,31
15	12,01

Tabela 4.1 Levantamento da característica do transdutor 2

5^o Passo:

Na fig.4.5 tem-se a característica $V_{r_2} = f(h_2)$, traçada ponto a ponto e linearizada pelo método dos mínimos quadrados.

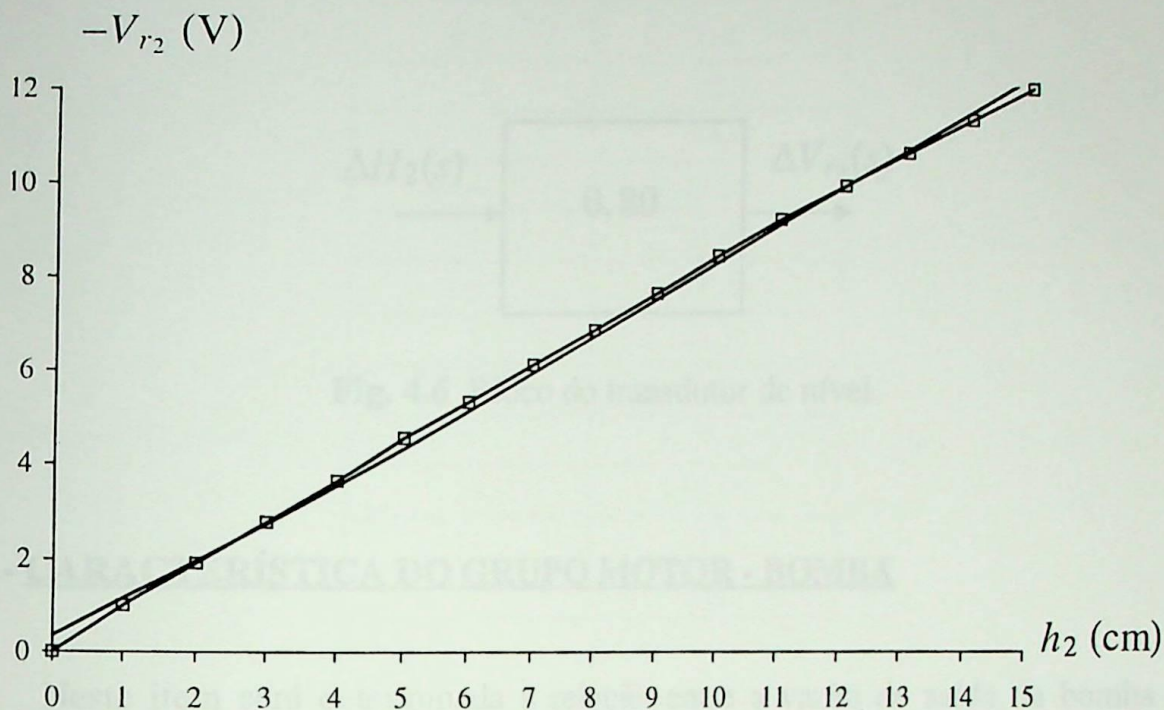


Fig. 4.5 Característica do transdutor: curvas ponto a ponto e linearizada

6º Passo:

Escreve-se a equação $V_{r_2} = f(h_2)$

$$V_{r_2} = 0,80h_2 + 0,18 \quad (4.6)$$

7º Passo:

A função de transferência, para pequenas variações, entre a tensão de realimentação e o nível da água no tanque 02, do par de tanques acoplados, será:

$$\frac{\Delta V_{r_2}(s)}{\Delta H_2(s)} = K_r = 0,80 \left[\frac{\text{V}}{\text{cm}} \right] \quad (4.7)$$

O bloco representativo do transdutor de nível está mostrado na fig.4.6

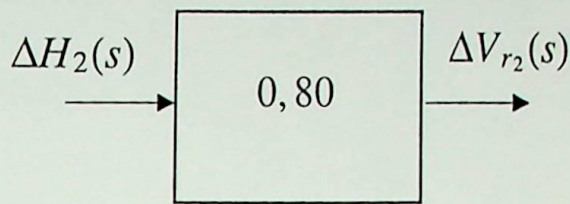


Fig. 4.6 Bloco do transdutor de nível.

4.4 - CARACTERÍSTICA DO GRUPO MOTOR - BOMBA

Neste item será determinada a relação entre a vazão de saída da bomba em função da tensão aplicada ao motor. Como o sistema não possui recursos para medição direta da vazão, a realização desta experiência exige muito tempo e é muito trabalhosa. A técnica utilizada, para medir a vazão, foi a da vazão volumétrica, ou seja, medição da quantidade de água escoada em uma unidade de tempo. Para várias tensões aplicadas ao motor, os dados obtidos estão mostrados na tabela 4.2.

V_m (V)	q_i (cm ³ /s)
2,4	0
3	14,9
4	23,96
5	31,42
6	37,83
7	43,72
8	49,3
9	54,8
10	58,82
11	63,35
12	66,37

Tabela 4.2 Levantamento da característica

A característica ponto a ponto e linearizada está mostrada na Fig. 4.7, onde observa-se que para uma tensão de 2,4 V a vazão é nula devido à altura de carga.

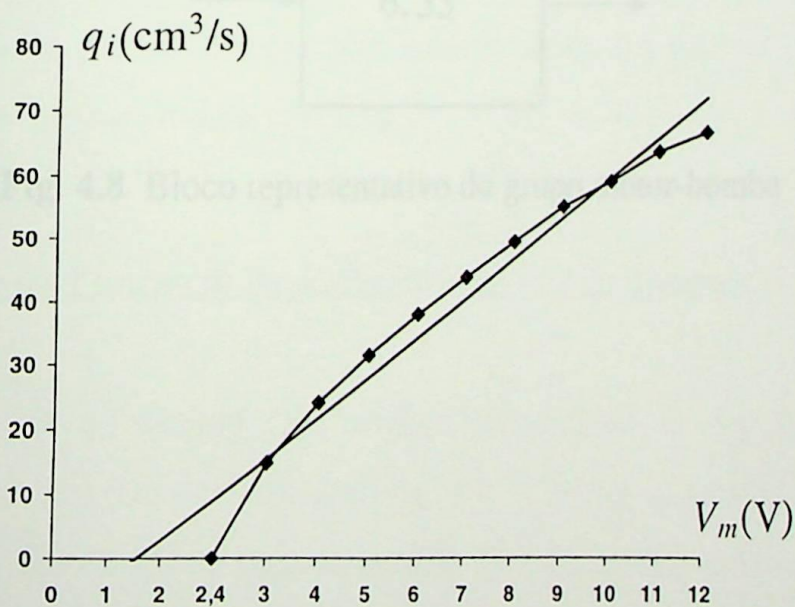


Fig. 4.7 Característica do grupo motor-bomba: ponto a ponto e linearizada

A equação $q_i = f(V_m)$ será:

$$q_i = 6,33V_m - 4,16 \quad (4.7)$$

A constante de tempo do grupo motor-bomba ($\tau = \frac{J}{B}$) é muita pequena em relação às constantes de tempo dos outros componentes do sistema e será desprezada no cálculo da função de transferência do grupo motor-bomba. Como o sistema irá operar com pequenas variações em torno de um ponto estável, a função de transferência do grupo motor-bomba será considerada puramente proporcional.

$$\frac{\Delta Q_i(s)}{\Delta V_m(s)} = K_m = 6,33 \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{s.V}} \right] \quad (4.8)$$

O bloco representativo do grupo motor-bomba é mostrado na fig. 4.8.

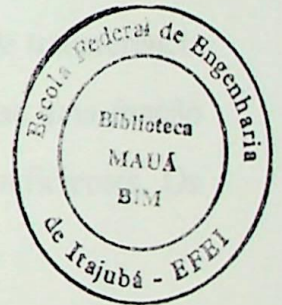
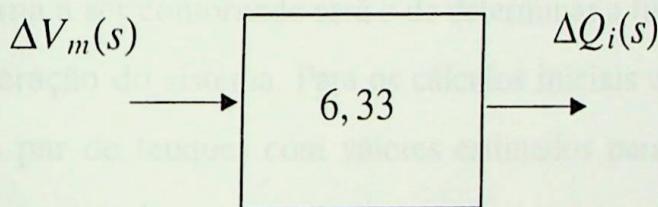


Fig. 4.8 Bloco representativo do grupo motor-bomba

4.5 - AJUSTE DO CONTROLADOR P-I

Como ilustração de utilização mais abrangente do equipamento desenvolvido, descreve-se a seguir o projeto e a implementação de um controlador PI para o sistema de tanques acoplados, segundo a técnica descrita em [8]. Como *especificações* de projeto, estabelece-se que a resposta a uma variação degrau na referência deverá ter um "overshoot" *abaixo* de um máximo especificado, e erro *zero* em regime permanente. Conforme a técnica proposta em [8], o ganho proporcional é ajustado de modo a impor uma relação de amortecimento um pouco maior do que o mínimo necessário para se ter o "overshoot" abaixo do máximo especificado. Em seguida, o canal integrador é ajustado, permitindo-se a redução da relação de amortecimento até o mínimo correspondente ao "overshoot" máximo. Todos estes ajustes serão calculados com comandos especiais [2], desenvolvidos para o ambiente MATLAB a partir de algoritmos baseados na teoria do Lugar das Raízes [10].

Outro problema a ser contornado será o de determinar a função de transferência para o ponto de operação do sistema. Para os cálculos iniciais utiliza-se uma função de transferência do par de tanques com valores estimados para os coeficientes. Os passos seguintes ilustram todo o processo.

4.5.1 - Cálculo da Função de Transferência do Par de Tanques

Considere-se o sistema, em regime permanente e em malha fechada, representado pelo diagrama de blocos da fig. 4.9. O orifício-1 está com os dois furos menores abertos. Foi omitida a dependência de (s) para as Transformadas de Laplace dos sinais. Um resumo com os valores dos parâmetros fixos e com as expressões dos parâmetros dependentes dos pontos de operação, no modelo linearizado, é apresentado no apêndice A, para facilitar o acompanhamento dos cálculos desenvolvidos neste capítulo.

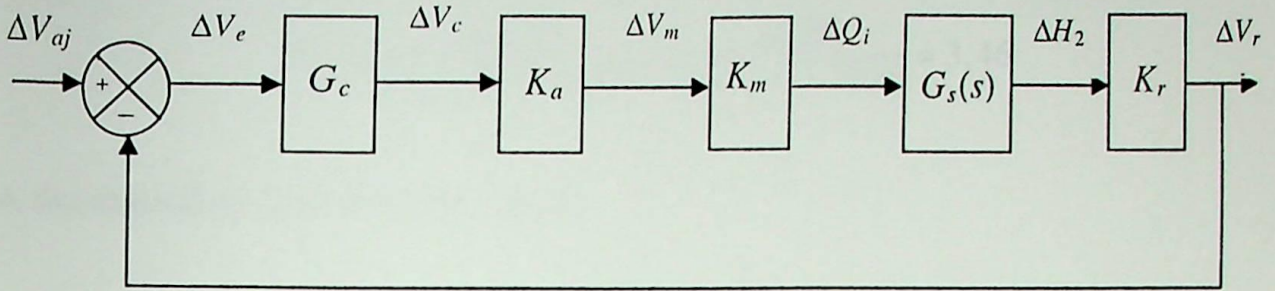


Fig. 4.9 Sistema com controle proporcional e em malha fechada

Para cálculo da função de transferência do par de tanques acoplados é necessário, inicialmente, determinar as constantes K_1 e K_2 , definidas pelas equações (3.14) e (3.20).

Para determinação dessas constantes, opera-se o sistema conforme a estrutura mostrada na fig. 4.9. Alterando-se o valor de V_{aj} são ajustados vários valores do nível da água no tanque 1. Monta-se a tabela 4.3 onde a vazão foi calculada pela expressão da equação (4.6).

$h_1(0)$	$h_2(0)$	V_m	$q_i(0)$	K_1	K_2
15,0	10,4	5,70	31,92	3,46	1,53
14,1	9,6	5,36	29,76	3,30	1,55
13,2	8,9	5,23	28,94	3,36	1,62
11,5	7,7	5,06	27,86	3,66	1,80
10,2	6,7	4,82	26,35	3,76	1,96
8,5	5,5	4,45	24,00	4,00	2,18
7,4	4,8	4,27	22,87	4,39	2,38
6,2	4,0	4,06	21,53	4,87	2,69

Tabela 4.3 Determinação das constantes K_1 e K_2 .

Ilustra-se a seguir o cálculo efetuado para $h_1(0) = 15$ (cm).

Das equações (3.3) e (3.14), tem-se

$$K_1 = \frac{q_i(0)}{2 \cdot [h_1(0) - h_2(0)]} = \frac{31,92}{2 \cdot [15,0 - 10,4]} = 3,46$$

e, das equações (3.4) e (3.20), tem-se:

$$K_2 = \frac{q_i(0)}{2 \cdot h_2(0)} = \frac{31,92}{2 \times 10,4} = 1,53$$

No cálculo da função de transferência do par de tanques acoplados, utilizada para o ajuste inicial dos controladores, verificou-se que, em função dos ensaios realizados, a média aritmética das constantes K_1 e K_2 é a que fornece o melhor resultado na representação da dinâmica do sistema. Assim, $K_1 = 3,85$ e $K_2 = 1,96$.

Logo a função de transferência do par de tanques, eq. (3.24), será:

$$G_s(s) = \frac{\Delta H_2(s)}{\Delta Q_i(s)} = \frac{0,51}{1325,2s^2 + 128,0s + 1} \quad (4.9)$$

O ajuste matemático-computacional do controlador PI e sua implementação e comparação de resultados de simulação com os de ensaios, são feitas na seguinte sequência: inicialmente, simular o sistema com controlador proporcional considerando a função de transferência do par de tanques acoplados dada pela equação (4.9). Calcular o ajuste do controlador proporcional e implantá-lo no sistema. Colocar o sistema em operação e recalculer a função de transferência no ponto exato. Calcular o ajuste do controlador integrador e implementá-lo. Simular novamente o sistema para comparar os resultados da simulação e os obtidos no ensaio prático. Este procedimento ajudará o usuário a consolidar seus conhecimentos e a adquirir uma visão prática do problema de projeto e simulação de sistemas de controle.

A seguir, descreve-se a execução deste procedimento para o projeto e execução do controlador PI em questão.

Na fig. 4.9, considere-se:

$$K_a = 1; K_m = 6,33; K_r = 0,80$$

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

$$K_x = \frac{K_a \times K_m \times K_r}{K_2} = 2,58$$

O diagrama de blocos equivalente está mostrado na fig. 4.10.

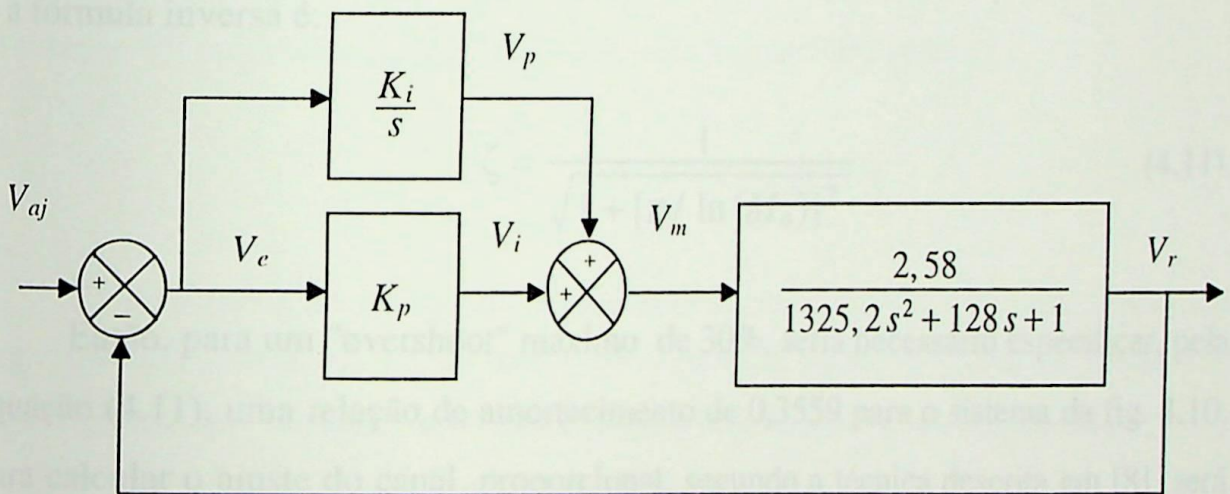


Fig. 4.10 Diagrama de blocos do sistema com controlador P-I

Para o ajuste do controlador PI, descrito a seguir, é desejado para a resposta a degrau um "overshoot" menor que 30% e, no regime permanente, erro zero.

4.5.2 - Ajuste do controlador proporcional

Seja:

$$G_x(s) = \frac{N_x(s)}{D_x(s)} = \frac{K_x}{1325,2s^2 + 128s + 1}$$

$$K_x = 2,58 \quad \text{e} \quad K_i = 0$$

Para sistemas de segunda ordem subamortecidos, a relação entre o "overshoot" (M_o) e a relação de amortecimento (ζ) é dada pela seguinte expressão:

$$M_o = e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (4.10)$$

e a fórmula inversa é:

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + [\pi / \ln(M_o)]^2}} \quad (4.11)$$

Então, para um "overshoot" máximo de 30%, seria necessário especificar, pela equação (4.11), uma relação de amortecimento de 0,3559 para o sistema da fig. 4.10. Para calcular o ajuste do canal proporcional, segundo a técnica descrita em [8] será adotada uma relação de amortecimento de 0,45, que significa um "overshoot" de 20,53%. Na tabela 4.4, é mostrada a sequência de cálculos, utilizando os comandos MATLAB descritos em [2]. Uma descrição resumida das ações executadas pelos comandos relevantes é apresentada no Apêndice B.

```
DX = [1325.2 128 1];
```

```
zeta0 = zetafmo(30) % relação de amortecimento para Mo% =30%
```

```
zeta0 = 0.3559
```

```
zeta1 = 0.45 % isto significa para sistemas de segunda ordem:
```

```
INDEX1 = id2fzeta(zeta1)
```

```
[ Mo% Mr mf ]
```

```
20.5346 1.2442 43.8717
```

```
[KPZ1,WNZ1] = kzeta(DX, 2.58, zeta1)
```

```
KPZ1=5.52 WNZ1=0.1073
```

Tabela 4.4 Cálculo do ajuste do ganho proporcional

O sistema foi colocado em funcionamento com os seguintes ajustes:

$$K_p = 5,60; \quad K_i = 0; \quad V_{aj} = 7,12 \text{ V}$$

Os resultados do ensaio, no regime permanente para $V_{aj} = 7,12 \text{ V}$ e para um degrau de $\Delta V_{aj} = 0,75 \text{ V}$ na tensão de referência, estão mostrados na tabela 4.5. Esta análise é apresentada, simplesmente, para verificação do modelo adotado.

$V_{aj} \text{ (V)}$	$V_e \text{ (V)}$	K_p	$V_m \text{ (V)}$	$q_i \text{ (cm}^3/\text{s)}$	$h_2 \text{ (cm)}$	$h_1 \text{ (cm)}$	$-V_r \text{ (V)}$
7,12	0,81	5,60	4,63	25,15	7,5	11,2	6,29
7,87	0,88	5,60	5,04	27,80	8,3	12,2	6,98

Tabela 4.5 Ajuste de K_p : resultados de ensaio em regime permanente

A seguir, são verificados os resultados relativos ao erro, em regime permanente:

$$V_e = V_{aj} - V_r = 7,12 - 6,29 = 0,83 \text{ V}$$

ou,

$$V_e = \frac{V_m}{K_p} = \frac{4,63}{5,60} = 0,83 \text{ V}$$

O erro estacionário de sistemas tipo zero para referência constante é dado pela seguinte expressão:

$$V_e = \frac{V_{aj}}{1 + K_p \cdot A_x} \quad (4.12)$$

Da fig. 4.9, tem-se:

$$A_x = \frac{V_r}{V_m} = \frac{6,29}{4,63} = 1,36$$

logo:

$$V_e = \frac{7,12}{1 + 5,60 \times 1,36} = 0,83 \text{ V}$$

Verifica-se, na tabela 4.5, que com o aumento da tensão de referência o valor da tensão de erro aumenta. Verifica-se, também, que os valores da tensão de erro obtido durante o ensaio e calculado pelas expressões anteriores estão bastante próximos.

Calcula-se agora os parâmetros da função de transferência do par de tanques acoplados para este ponto de operação, para verificação do regime transitório e do valor final.

Das equações (3.3) e (3.14) tem-se:

$$K_1 = \frac{25,15}{2 \times (11,2 - 7,5)} = 3,40$$

$$K_2 = \frac{25,15}{2 \times 7,50} = 1,68$$

Daí, a função de transferência do par de tanques acoplados, equação (3.24), para este ponto será:

$$G_s(s) = \frac{0,59}{1750,7 s^2 + 148,5 s + 1}$$

e,

$$G_x(s) = K_a \times K_m \times K_r \times G_s(s) = \frac{2,99}{1750,7 s^2 + 148,5 s + 1}$$

Então, a função de transferência de malha fechada, equação (3.35), será:

$$G_f(s) = \frac{\Delta V_r(s)}{\Delta V_{aj}(s)} = \frac{16,74}{1750,7 s^2 + 148,5 s + 17,74}$$

o que representa:

$$zeta = 0,4220 \quad WNO = 0,1005$$

Para calcular o valor final, tem-se:

$$\Delta V_r(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \Delta V_{aj}(s) \cdot G_f(s)$$

$$\Delta V_r(\infty) = \frac{0,75 \cdot 16,68}{17,68} = 0,71$$

$$V_{aj}(\infty) = 6,29 + 0,71 = 7,00 \text{ V}$$

A ultrapassagem é calculada na seguinte sequência:

$$\Delta V_{\max} = V_{\max} - V(0) = 7,17 - 6,29 = 0,88$$

$$\Delta V(\infty) = V(\infty) - V(0) = 7,00 - 6,29 = 0,71$$

$$M_0\% = \frac{0,88 - 0,71}{0,71} \cdot 100 = 23,94\%$$

Para uma relação de amortecimento (ζ) igual a 0,4210 o overshoot máximo, dado pela expressão da equação (4.10), é de 23,16%. *Os valores calculados (23,16%) estão muito próximos dos encontrados na experiência (23,94%)*

As formas de onda da fig. 4.11 mostram as tensões de referência, de realimentação, de erro e à aplicada ao motor durante a execução do ensaio. Ressalta-se que os ruídos encontrados na tensão aplicada ao motor são devidos à qualidade da bomba e da fonte de tensão contínua que alimenta o motor. Na fig. 4.12 é apresentada a forma de onda da tensão de realimentação numa escala ampliada e na fig 4.17 a comparação com a resposta simulada no MATLAB/Simulink.

A análise dos cálculos e das formas de onda das tensões obtidas permitem concluir que o modelo do sistema leva a respostas muito próximas das reais, confirmando assim a sua validade.

Na próxima seção é calculado o ajuste do canal integrador.

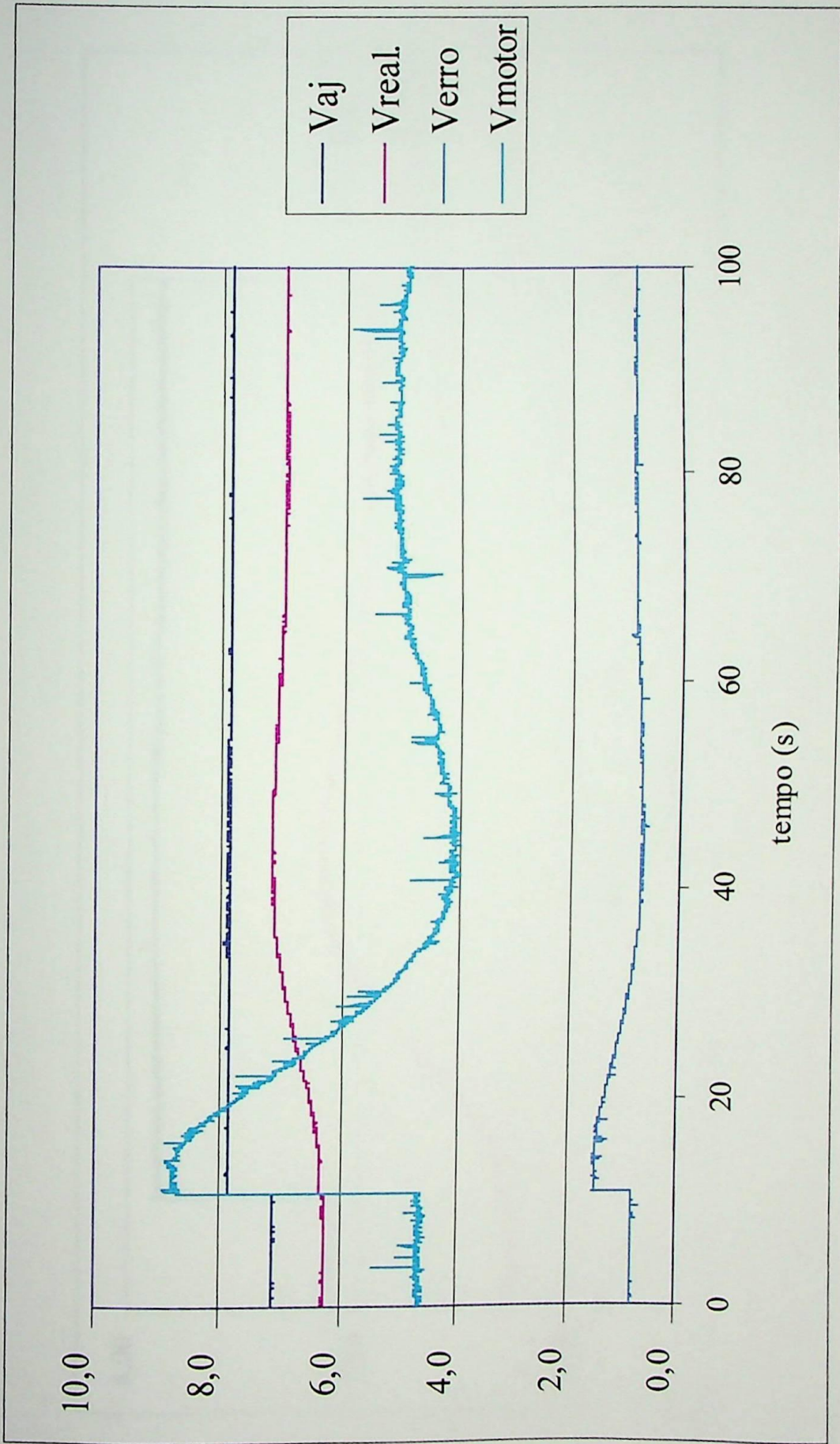


Fig. 4.11 Sistema com controlador proporcional: formas de onda

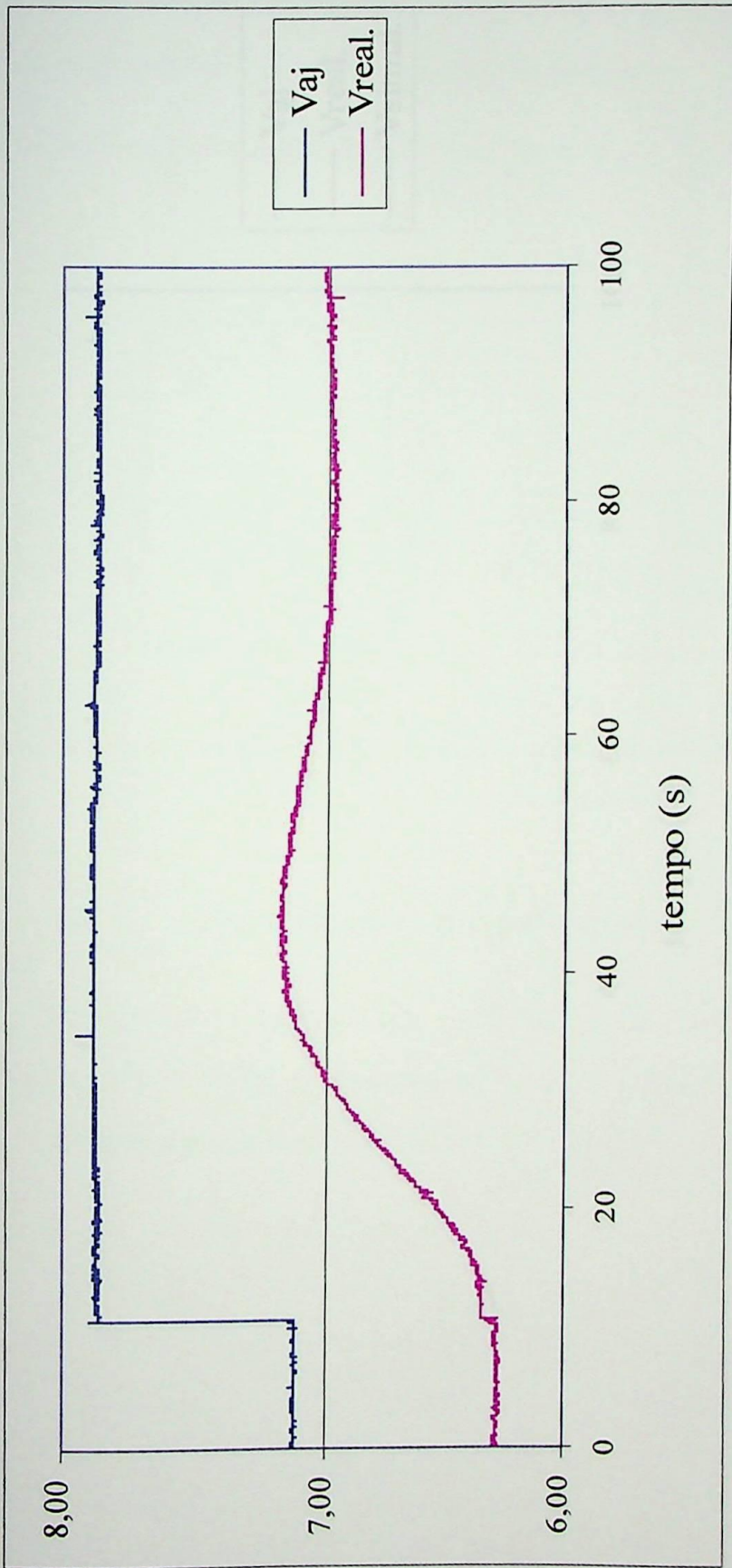


Fig. 4.12 Forma de onda da tensão de realimentação

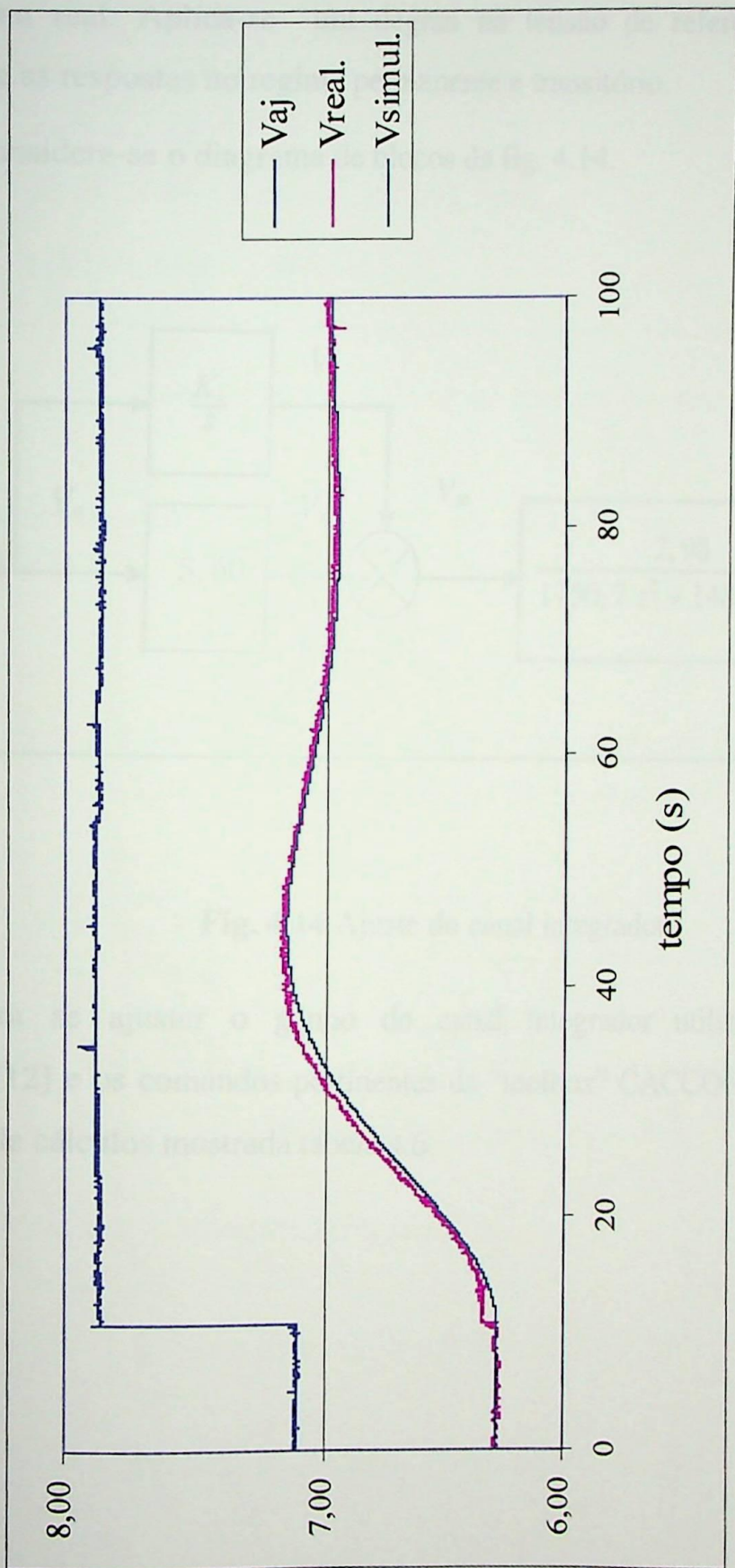


Fig. 4.13 Comparação entre a forma de onda da tensão de realimentação real e simulada

4.5.3 - Ajuste do Canal Integrador

A seguir é calculado o ajuste do canal integrador que é, então, implementado no sistema real. Aplica-se um degrau na tensão de referência, e em seguida analisa-se as respostas no regime permanente e transitório.

Considere-se o diagrama de blocos da fig. 4.14.

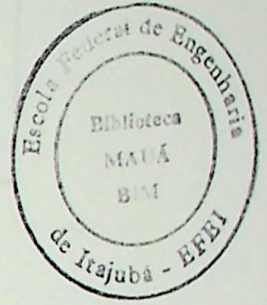
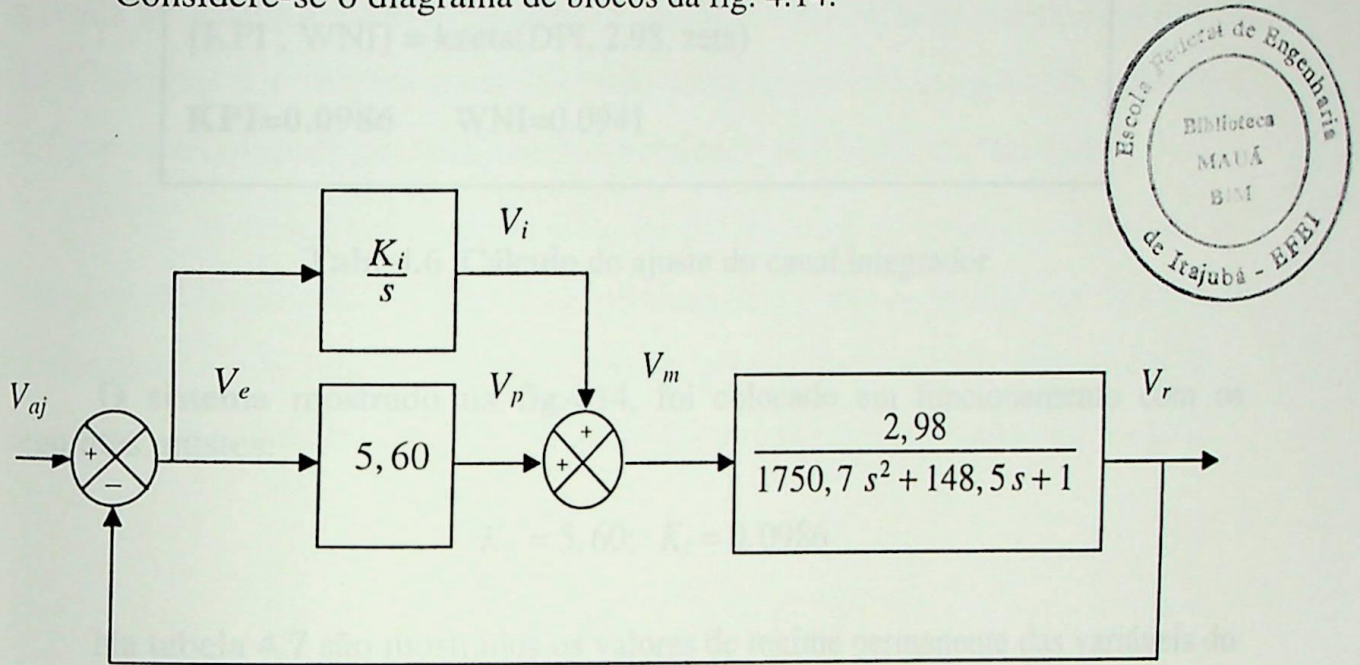


Fig. 4.14 Ajuste do canal integrador

Para se ajustar o ganho do canal integrador utiliza-se o programa MATLAB[12] e os comandos pertinentes da "toolbox" CACCON[2,8], conforme a sequência de cálculos mostrada tabela 4.6.

$$\begin{aligned}
 \text{DGS} &= [1750.7 \ 148.5 \ 1]; \\
 K_x &= 2.98; \\
 \text{DPI} &= \text{somapoli} ([\text{DGS} \ 0], [5.60 \cdot K_x \ 0]) \\
 \text{DPI} &= [1750.7 \ 148.5 \ 1] \\
 \text{zeta} &= 0.35 \\
 [\text{KPI}, \text{WNI}] &= \text{kzeta}(\text{DPI}, 2.98, \text{zeta}) \\
 \mathbf{KPI} &= \mathbf{0.0986} \quad \mathbf{WNI} = \mathbf{0.0941}
 \end{aligned}$$

Tab. 4.6 Cálculo do ajuste do canal integrador

O sistema mostrado na fig.4.14, foi colocado em funcionamento com os seguintes ajustes:

$$K_p = 5,60; \quad K_i = 0,0986$$

Na tabela 4.7 são mostrados os valores de regime permanente das variáveis do sistema para $V_{aj} = 7,08 \text{ V}$, e após a aplicação de um degrau de $\Delta V_{aj} = 0,78 \text{ V}$

V_{aj}	V_e	V_p	V_i	V_m	q_i	h_2	h_1	$-V_r$
7,08	0,02	0,09	4,78	4,92	26,98	8,1	12,2	7,05
7,85	0,00	-0,04	5,08	5,05	27,80	9,2	13,4	7,85

Tabela 4.7 Ajuste de K_i

Para o cálculo da ultrapassagem mede-se:

$$\Delta V_{\max} = V_{\max} - V(0) = 8,08 - 7,05 = 1,03 \text{ V}$$

$$\Delta V(\infty) = V(\infty) - V(0) = 7,85 - 7,05 = 0,80 \text{ V}$$

donde:

$$M_o\% = \frac{1,03 - 0,80}{0,80} \cdot 100 = 28,75\%$$

que é menor que o máximo especificado.

Na fig. 4.15 são mostradas as formas de onda da tensão de ajuste, de erro, aplicada ao motor e a de realimentação, durante a execução do ensaio. Na fig. 4.16 são mostrados a forma de onda da tensão de realimentação numa escala ampliada e na fig 4.17 a comparação com a resposta simulada no MATLAB/Simulink.

A função de transferência do par de tanques acoplados utilizada no diagrama de blocos da fig. 4.14 foi a calculada para o regime permanente do sistema proporcional. A função de transferência para o sistema com controlador P-I, calculada com os dados na primeira linha da tabela 4.7, tem a seguinte expressão:

$$G_s(s) = \frac{0,60}{1831s^2 + 150,9s + 1}$$

A fig. 4.18 mostra a diferença nas formas de onda das tensões de realimentação do sistema devido a diferença da função de transferência.

O equipamento permite a realização de muitas experiências, mas as que foram apresentadas são suficientes para ilustrar a sua utilização em exercícios de modelagem e identificação do sistema e de projeto de implementação de controladores.

As conclusões são apresentadas no capítulo seguinte.

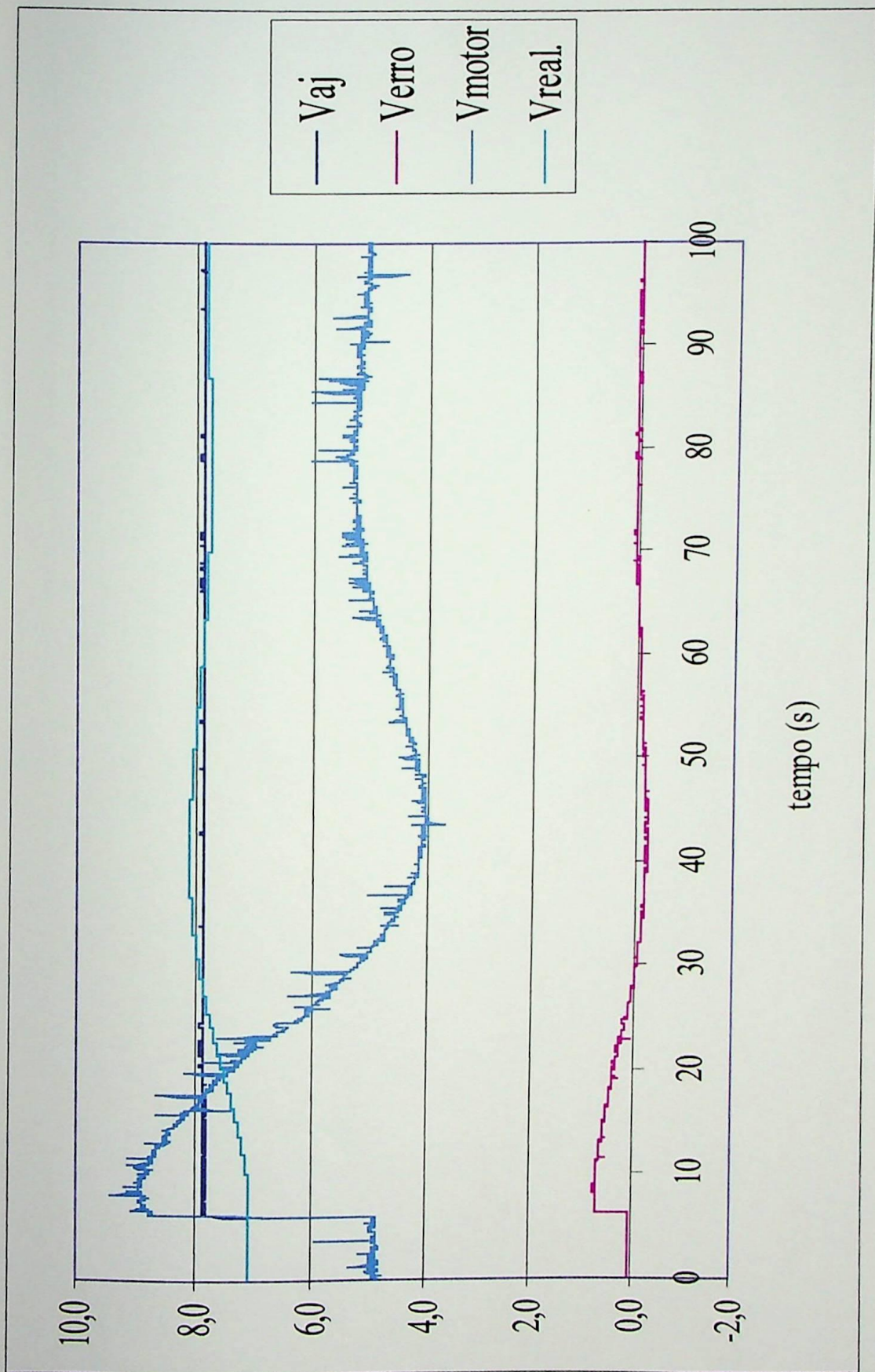


Fig. 4.15 Sistema com controlador PI: formas de onda

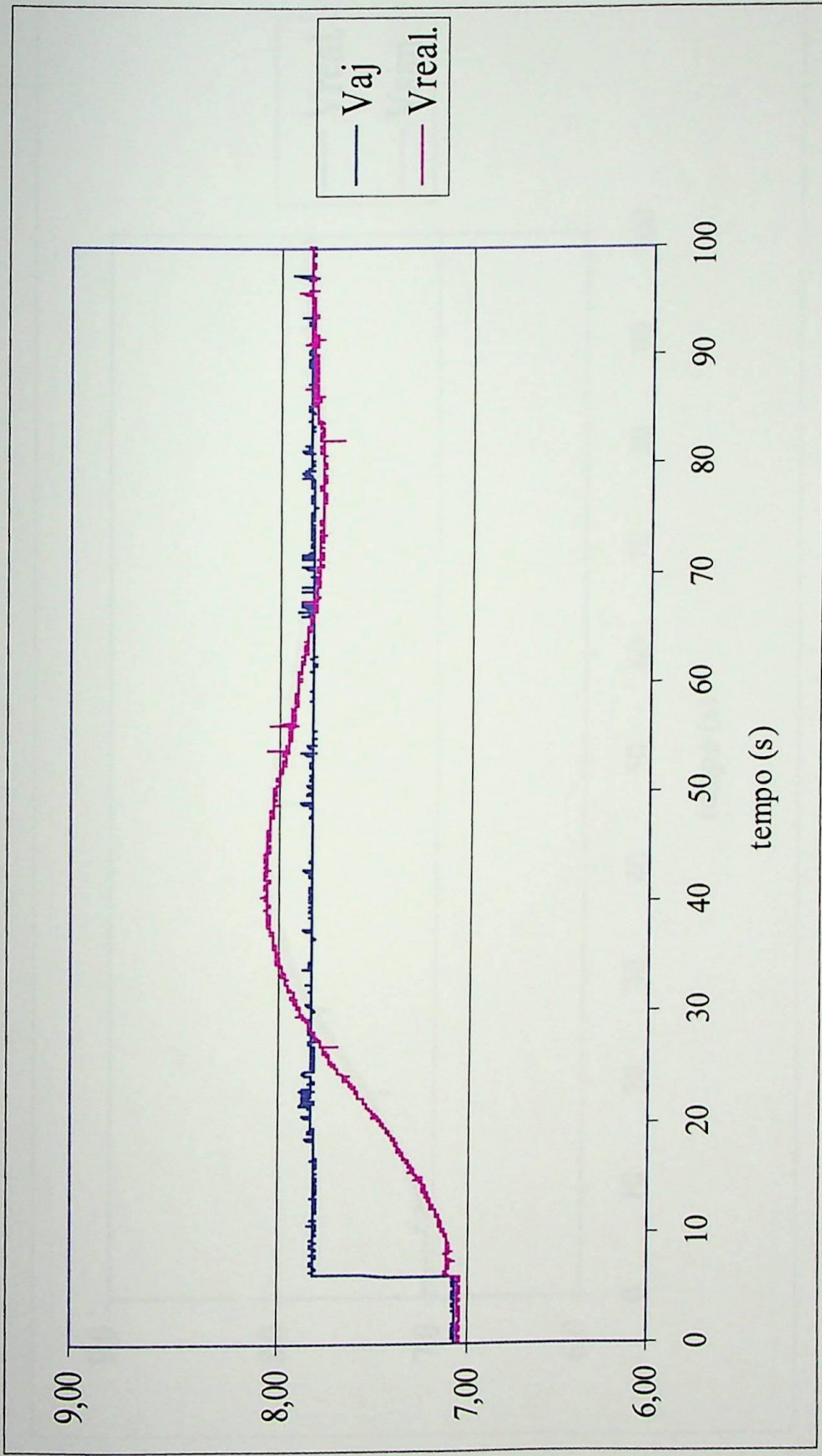


Fig. 4.16 Sistema com controlador PI: forma de onda da tensão de realimentação ampliada

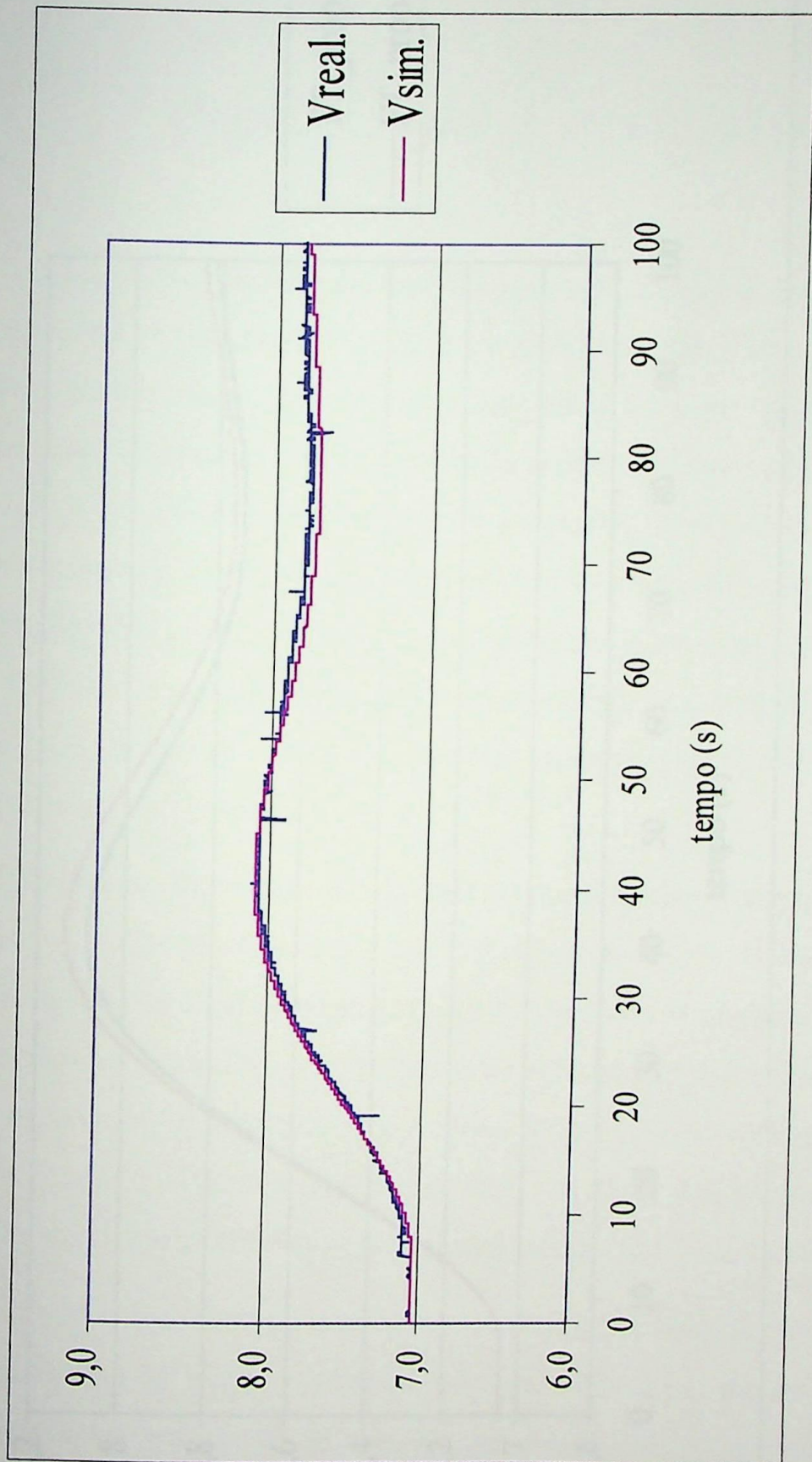


Fig. 4.17 Comparação entre as formas de onda de tensão de realimentação e a simulada

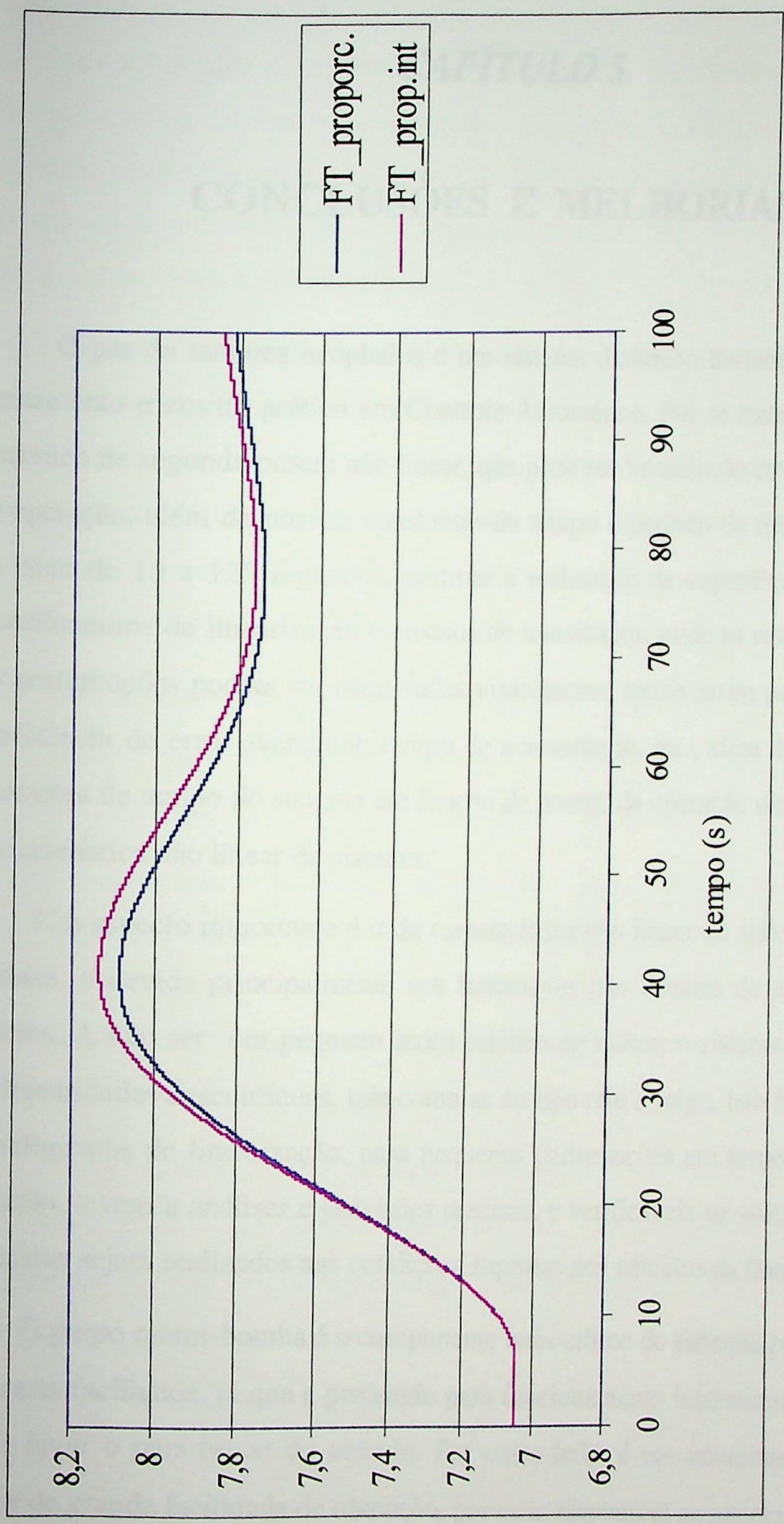


Fig. 4.18 Diferença na resposta do sistema devido a correção da função de transferência

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E MELHORIAS

O par de tanques acoplados é um sistema dinâmico bastante adequado para treinamento e ensino prático em Controle Automático. Por se tratar de um sistema dinâmico de segunda ordem não linear, que pode ser linearizado em torno de pontos de operação, além de possuir constantes de tempo e período de oscilações naturais na faixa de 10 a 120 segundos, permite a realização de experiências envolvendo procedimentos de linearização e ensaios de transitórios, onde as respostas causadas por perturbações podem ser observadas visualmente, sendo assim possível observar a existência de erro, overshoot, tempo de acomodação, etc., além de variações das constantes de tempo do sistema em função de pontos de operação diferentes, devido à característica não linear do sistema.

Um aspecto importante é o da característica não linear do sistema ser do tipo contínua, e devida principalmente aos fenômenos não lineares de escoamento em orifícios. A não ser um pequeno atrito estático no motor, o sistema não apresenta não linearidades descontínuas, tais como as do tipo relé e folga. Isto faz com que os procedimentos de linearização, para pequenas perturbações em torno de pontos de operação, levem a análises e previsões precisas, e verificáveis na prática, desde que os ensaios sejam realizados nas condições supostas nos cálculos da linearização.

O grupo motor-bomba é o componente mais crítico do sistema, por queimar-se com certa facilidade, já que é projetado para funcionamento intermitente, quando se deseja lavar o pára-brisas do veículo. Por outro lado, é um componente de baixo custo e de grande facilidade de obtenção, por estar disponível na maioria das lojas de

autopeças. Uma outra causa freqüente dessa queima é a atrito estático que ocorre na colocação do sistema em operação, após um período prolongado sem uso. Uma forma de minimizar este problema é girar a bomba mecanicamente, antes do início da operação do sistema, soprando-se a entrada de água. Como alternativa, pode ser especificada uma bomba de roletes. Vale ressaltar que as tensões aplicadas ao motor durante as experiências, de 5 a 7 volts, são inferiores à tensão nominal (12 volts), o que contribui para aumentar a vida útil do mesmo.

O transdutor de nível é um dos pontos de destaque do trabalho, devida à alta qualidade obtida. É sensível a variações de nível de água da ordem de milímetros, é preciso, é linear e possui repetibilidade. O processo de ajuste é simples e é o utilizado para ensaiar os transdutores das usinas de Furnas. Sua principal desvantagem reside no fato de que os potenciômetros de ajuste não permitem facilidades para o acesso externo, pois estão localizados internamente na unidade.

Os circuitos da unidade analógica são os utilizados nos reguladores da Usina de Itumbiara com algumas simplificações. São versáteis, simples e o circuito integrado utilizado é o CI 747, muito fácil de ser encontrado e de custo baixo.

É necessária a instalação de proteção contra inversão de polaridade na alimentação de tensão $\pm 15\text{ V}$ para as unidades práticas. Os diagramas sinóticos impressos nas tampas das unidades, permitem aos usuários ter uma noção clara da interconexão dos diversos circuitos. Fornece, ainda, uma visão da técnica de diagrama de blocos.

A única montagem que necessita dos serviços de um técnico especializado é a dos "strain gages" nos transdutores de nível. A colagem e ligações destes componente deve ser feita por pessoa que tenha experiência no seu manuseio. É uma operação delicada e demorada.

Em experiências longas é necessário reajustar a escala do transdutor de nível durante o ensaio. O ganho do transdutor, assim considerada a relação entre a tensão de realimentação e a tensão de saída da ponte com "strain gages" deste circuito, é muito alto e pode sofrer variações durante um ensaio mais longo.

Não estão incorporados ao equipamento desenvolvido alguns instrumentos necessários para a realização das experiências, tais como osciloscópio de memória e o multímetro digital. Por se tratar de equipamentos normalmente existentes em laboratórios de controle e instrumentação, serão considerados disponíveis. Para uma eventual (e desejável) aplicação do sistema em experiências de controle digital, será necessário adquirir também um sistema de aquisição de dados, além do computador a ser utilizado como controlador.

Os orifícios 2 e 3 podem ter seu diâmetros aumentados. Isto permitiria vazões maiores e causaria alterações no valor da constante de tempo, aumentando assim o número de experiências que podem ser realizadas.

Os resultados do ensaio do sistema com controlador proporcional são excelentes. No sinal da tensão de realimentação (fig. 4.12) apareceram alguns ruídos decorrentes do processo de aquisição de dados, que foram eliminados na própria tabela. Os ruídos na tensão do motor (fig. 4.11) são devidos à baixa qualidade do motor da bomba e da fonte de tensão contínua utilizada. É evidente que componentes de melhor qualidade poderiam ter sido utilizados, mas o custo final do equipamento seria aumentado.

Na tabela 5.1 é mostrado um resumo dos resultados do ensaio do sistema com controlador proporcional e com *zeta* (ζ) igual a 0,4220. Nesta tabela a linha "simulado" contém os valores das características da resposta a degrau obtida por simulação [2]. Na linha "ensaio" tem-se as características medidas nos gráficos construídos a partir da aquisição de dados implementada no ensaio do sistema real.

	t_r	t_p	$M_0\%$	t_s	h_2	V_{erro}	$V(\infty)$
simulado	19,67	34,5	23,16	83,44	7,58	0,82	7
ensaio	19,1	34,51	23,94	83,05	7,5	0,81	6,98

Tab. 5.1 Resultados do ensaio com compensador proporcional

Nesta tabela tem-se:

t_r : tempo de subida (tempo requerido para a resposta atingir 90% do valor final pela primeira vez);

t_p : tempo para ocorrência da ultrapassagem máxima;

t_s : tempo de acomodação (tempo requerido para a resposta alcançar e permanecer dentro de uma faixa de 2% do valor final);

$M_0\%$: overshoot, em porcentagem;

h_2 : nível da água no tanque 2;

V_{erro} : valor da tensão do sinal de erro no regime permanente;

$V(\infty)$: valor final da tensão de medição do nível da água no tanque-2.

O resultado final do ensaio com controlador proporcional pode ser observado na fig. 4.13. A simulação foi executada com a função de transferência do sistema calculada no ponto inicial de operação. O resultado pode ser considerado excelente.

A metodologia de ajuste do controlador P-I é simples e o resultado bastante satisfatório como mostram os gráficos apresentados nas figuras 4.15, 4.16 e 4.17. Na tabela 5.2 tem-se um resumo dos resultados do ensaio do sistema com controlador proporcional - integral (PI). Na tabela as linhas "simulado" e "ensaio" referem-se aos valores das grandezas obtidos através de [2] e do ensaio prático do sistema.

	t_r	t_p	$M_0\%$	t_s	h_2	V_{erro}	$V(\infty)$
simulado	18,73	35	30,91	121,76	8,5	0	7,83
ensaio	18,8	35,65	28,75	122,4	8,1	0	7,85

Tab. 5.2 Resultados do ensaio com compensador proporcional-integral

Os resultados dos ensaios com controladores proporcional e proporcional integral permitem concluir que a *modelagem executada é válida*. A função de transferência calculada no ponto fornece uma resposta do sistema muito próxima da realidade. A comprovação desta afirmação está mostrada nos gráficos das figuras 4.13 e 4.17.

As unidades analógicas também possuem um diferenciador, que combinado com os circuitos proporcionais e integradores, também permite a implementação de controladores dos tipos avanço de fase (proporcional derivador amortecido) e PID.

A implementação do controle digital é uma possibilidade real e interessante. O sistema é lento e a forma de onda da tensão de erro (figuras. 4.11 e 4.15), que deverá ser digitalizada, possui poucos ruídos e necessita apenas de uma filtragem simples.

Para experiências com controle digital, o potencial de utilização do sistema de tanques acoplados cresce muito. O controle eletrônico analógico fica limitado à existência de componentes eletrônicos, resistores e capacitores, para implementação prática dos controladores e filtros. Em controladores digitais existe a grande vantagem das alterações serem feitas no programa de controle, enquanto alterações em controladores analógicos envolvem a substituição física de componentes, ou a introdução de novos componentes nos circuitos de controle.

Se o controle digital for implementado com um computador completo, dotado de monitor e outros periféricos, o osciloscópio, normalmente necessário com controle analógico, pode ser substituído pelo monitor de vídeo, para visualização dos gráficos das respostas do sistema. Esta é uma outra facilidade decorrente do par de tanques ser utilizado em conjunto com um computador digital. O programa de monitoramento das variáveis poderia incluir o adequado escalonamento das variáveis, de modo que, no vídeo, as respostas do sistema já poderiam ser dadas em unidades físicas reais de nível (centímetros ou milímetros) em cada tanque, e não na forma de tensão de realimentação (volts).

Finalmente, destaca-se que o equipamento desenvolvido oferece a possibilidade de inúmeros trabalhos práticos e ensaios envolvendo modelagem, identificação e linearização de um sistema dinâmico de características muito interessantes. Os ensaios, quando realizados em condições compatíveis com as consideradas no procedimento de linearização, permitem concluir que os modelos desenvolvidos representam o sistema com grande precisão. O projeto e a implementação de reguladores P e PI analógicos, usados como ilustração de utilização do equipamento, mostram a sua flexibilidade, e permitem afirmar que outros trabalhos de projeto e implementação de controladores deverão levar a resultados igualmente satisfatórios. Portanto, chegou-se a um equipamento que permite que seus usuários explorem todas as etapas típicas dos trabalhos completos de análise e projeto de sistemas de controle. Esta é a principal contribuição oferecida por este trabalho.

Bibliografia

- [1] D' AZZO, J.J. & HOUPIS, C.H.: *Análise e Projeto de Sistemas de Controle Lineares* (tradução do inglês), 2ª edição, Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro, RJ, 1984.
- [2] COELHO, C.A.D.: *CACCON Control Toolbox for the MATLAB program* (Version 3.2) - *User's Manual*. Itajubá, M.G., Brasil: EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá, outubro de 1997.
- [3] AZEVEDO NETO, J. M. & ALVAREZ, G. A.: *Manual de Hidráulica*, 6ª edição, Edgard Blucher, São Paulo, SP, 1973.
- [4] NASCIMENTO, N., PRIORI, G.L. & OLIVEIRA, P.C.: *Curso de Eletrônica Aplicada - Unidades Práticas*, Usina de Furnas, M.G., Brasil: CTFU.O - Centro de Treinamento de Furnas - Furnas Centrais Elétricas S.A., 1986.
- [5] KYOWA ELECTRONIC INSTRUMENTS CO.: *STRAIN GAGES*, catálogo nº 3003A, LTD, Tokyo, 105, Japan., 1992
- [6] KRATOS DINAMÔMETROS LTDA: *EXTENSÔMETROS E ACESSÓRIOS*, São Paulo, S.P., Brasil, 1992
- [7] SODMEX IND. E COMÉRCIO DE MATERIAL DE EXTENSOMETRIA LTDA: *MÓDULO DE AMPLIFICAÇÃO - CAE - 201*. São Paulo, S.P., Brasil. 1991
- [8] COELHO, CAD.: "Root-Locus Based MATLAB Commands for Control System Design.", *1997 MATLAB Conference*, San Jose, CA, EUA, publicado por The MathWorks, Inc. na World Wide Web, no endereço http://www.mathworks.com/conf/user_contrib/coelho/, Natick, MA, EUA, 1997

[9] BENNETT, B.S. *The Coupled Hydraulic Tanks Apparatus*. Manchester, England. University of Manchester, september 1979.

[10] COELHO, C.A.D.: "Computer-Aided Control System Analysis and Parameter Setting Based on Root-Locus Properties", *Anais do XII Congresso Brasileiro de Automática - XII CBA*, 14 a 18/09/1998, Uberlândia, MG, Vol. VI, pp. 1923 - 1928.

[11] COELHO, C.A.D.: "Dominant Pole Placement with Maximum Zero/Pole Ratio Phase-Lead Controllers", *Proceedings of the 1998 American Control Conference*, Philadelphia, PA, EUA, 24 a 26/06/1998, Vol. 2, pp. 1159 - 1164.

[12] THE MATHWORKS, INC.: *The Student Edition of MATLAB: Version 4 User's Guide*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.

[13] THE MATHWORKS, INC.: *Simulink User's Guide, The Student Edition of MATLAB: Version 4 User's Guide*, The MathWorks, Inc., Natick, MA, EUA, Abril /1993.

APÊNDICE A

Resumo de Valores e Expressões de Parâmetros do Modelo

Este apêndice consiste de um resumo, baseado na fig. 4.9, com os valores dos parâmetros fixos, e as fórmulas dos parâmetros do modelo linearizado que dependem dos pontos de operação.

Amplificador de Potência:

$$K_a = 1$$

Conjunto Motor - Bomba:

$$K_m = 6,33$$

Transdutor de Nível:

$$K_r = 0,80$$

Par de Tanques Acoplados:

$$\frac{\Delta H_2(s)}{\Delta Q_i(s)} = \frac{\frac{1}{K_2}}{\frac{A^2}{K_1 \cdot K_2} s^2 + A \cdot \left(\frac{K_2 + 2 \cdot K_1}{K_1 \cdot K_2} \right) s + 1}$$

$$K_1 = \frac{C_{d1} \cdot a_1 \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \sqrt{h_1(0) - h_2(0)}}$$

$$K_2 = \frac{C_{d2} \cdot a_2 \cdot \sqrt{2 \cdot g}}{2 \cdot \sqrt{h_2(0)}}$$

APÊNDICE B

Comandos Relevantes da "Toolbox" CACCON

Este apêndice inclui a descrição resumida dos principais comandos MATLAB da toolbox CACCON [2], usados nos ajustes dos parâmetros dos controladores.

1 - Comando "KZETA"

Sintaxe : $[k, wn] = kzeta (d, n, z)$

Ação : Determinação dos valores de k e $wn > 0$ de modo que a equação

$$d(s) + k \cdot n(s) = 0$$

tenha um par de raízes do tipo

$$s = -z \cdot wn \pm j \cdot \sqrt{(1 - z^2) \cdot wn}$$

e todas as demais raízes com parte real negativa (polinômio estável).

2 - Comando "LIMESTAB"

Sintaxe : $[k, wc, krange] = limestab (d, n)$

Ação : Determinação dos valores de k e $wc > 0$ de modo que a equação

$$d(s) + k \cdot n(s) = 0$$

tenha raízes do tipo

$$s = 0 \quad \text{ou} \quad s = \pm j \cdot wc$$

e todas as demais com parte real negativa (limite de estabilidade).

d e n são vetores com os coeficientes de $d(s)$ e $n(s)$.

"krange" é uma matriz de duas colunas. Cada linha fornece o limite superior e inferior de cada variação de k para o qual o sistema é estável.

3 - Comando "SOMAPOLI"

Sintaxe : $c = \text{somapoli}(a, b, \text{epse})$

Ação : Soma de polinômios: $c(s) = a(s) + b(s)$

$a, b =$ vetores com os coeficientes de cada parcela

$c =$ vetor com os coeficientes do polinômio soma.

4 - Comando "CARACRD"

Sintaxe : $\text{desemp} = \text{caracd}(t, y, \text{yrp}, \text{epse}, \text{indt})$

Ação : Determina os índices de desempenho da resposta a degrau $y(t)$

$t =$ vetor de tempos; supoe-se que $t(1)=0, y(1)=0$

$\text{yrp} = y(\infty)$ não pode ser nulo

$\text{desemp} = [\text{tr} \text{tp} \text{Mo}\% \text{ts} \text{Td} \text{Lp}\%]$

$\text{tr} =$ Tempo de subida (tempo necessário para a resposta atingir 90% do valor final pela primeira vez)

$\text{tp} =$ Tempo de pico

$\text{Mo}\% =$ Ultrapassagem máxima (percentual)

$\text{ts} =$ Tempo de acomodação (tempo requerido para a resposta alcançar e permanecer dentro de uma faixa de 2% ou 5% do valor final)

$\text{epse} =$ tolerância (2% ou 5%)

$\text{Td} =$ Período de oscilação

$\text{Lp}\% =$ Ultrapassagem mínima (percentual)

5 - Comando "ID2FZETA"

Sintaxe : $id = id2fzeta (zeta)$

Ação : Calcula os principais índices de desempenho para sistemas de segunda ordem em função da relação de amortecimento

$id = [Mo\%, Mr, mf]$

$Mo\%$ = Utrapassagem máxima (percentual)

Mr = Pico de ressonância

mf = margem de fase

APENDICE C

6 - Comando "ZETA FMO"

Sintaxe : $zeta = zetafmo (mopc)$

Ação : Calcula a relação de amortecimento que dá o overshoot percentual $mopc$, para sistemas de segunda ordem com dois pólos complexos e sem zeros.

Unidade Analógica	
Resistor 36k; 0,25W; 5%	01
Resistor 47k; 0,25W; 5%	02
Resistor 470 ohms; 0,25W; 5%	03
Resistor 3,9k; 0,25W; 5%	04
Resistor 1,0M; 0,25W; 5%	05
Resistor 1,1k; 0,25W; 5%	06
Resistor 205 ohms; 0,25W; 5%	07
Resistor 10k; 0,25W; 5%	08
Resistor 5,61k; 0,25W; 5%	09
Resistor 330k; 0,25W; 5%	10
Resistor 70k; 0,25W; 5%	11
Protômetro multivoltas, 1k	12
Protômetro multivoltas, 20k	13

APÊNDICE C

Relação e Quantidade de Componentes

Este apêndice inclui a relação e a quantidade dos diversos componentes eletrônicos utilizados na montagem dos circuitos impressos das unidades analógica, transdutor de nível e amplificador de potência.

Bateria Zener 10V	01
Chave liga-desliga	02
CI 747	10
Saída CI-14 pines	10
Bateria Zener 27V	04
Resistor 100 ohms; 0,25W; 1%	05
Capacitor 0,22micro; 250V	10
Capacitor 100 pino; 100V	02

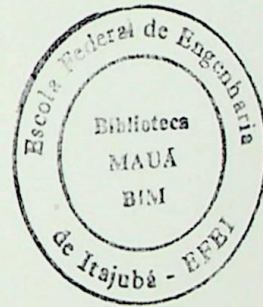
- Unidade Analógica

<i>componente</i>	<i>quantidade</i>
Resistor 56k; 0,25W; 1%	30
Resistor 47k; 0,25W; 5%	06
Resistor 470 ohms; 0,25W; 5%	04
Resistor 3,9k; 0,25W; 5%	04
Resistor 1,0M; 0,25W; 5%	04
Resistor 1,0k; 0,25W; 5%	04
Resistor 205 ohms; 0,25W; 5%	02
Resistor 10k; 0,25W; 5%	06
Resistor 5,61M; 0,25W; 5%	04
Resistor 330k; 0,25W; 5%	02
Resistor 6,8k; 0,25W; 5%	02
Resistor 39k; 0,25W; 5%	02
Potenciômetro multivoltas; 10k	18
Potenciômetro multivoltas; 200k	04
Potenciômetro multivoltas; 100k	02
Diodo 1N4148	06
Diodo Zener 10V	04
Chave liga-desliga	02
CI 747	10
Soquete CI - 14 pinos	10
Diodo Zener; 27V	04
Resistor 100 ohms; 0,25W; 1%	05
Capacitor 0,22micro; 250V	10
Capacitor 100 pico; 100V	02

Capacitor 4,7 micro; 25V	02
Capacitor 0,015micro; 30V	02
Capacitor 10 micro; 30V	02
Borne Joto	40

- Transdutor de Nível

<i>componente</i>	<i>quantidade</i>
CI - LM725CH	02
CI - LM 741	02
Resistor 14,7k; 0,25W; 1%	04
Resistor 910k; 0,25W; 5%	04
Resistor 34,8k; 0,25W; 1%	04
Resistor 330k; 0,25W; 1%	04
Resistor 510k; 0,25W; 1%	02
Resistor 51,1 ohms; 0,25W; 5%	02
Resistor 4,02k; 0,25W; 5%	04
Resistor 56k; 0,25W; 5%	04
Resistor 3,9k; 0,25W; 5%	02
Potenciômetro multivoltas; 500ohms	02
Potenciômetro multivoltas; 100K	02



- Amplificador de Potência

componente	quantidade
CI - LM 741 - militar	02
Resistor 1,5k; 0,25W; 5%	02
CI - MJ 3001	02
Dissipador	01
Soquete CI 8 pinos	01