

2171924

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO MECÂNICO

DOSADOR DE MISTURA

AUTOR: DAVI NOBORU NAKANO

ORIENTADOR: PROF. DR. OCTÁVIO MAIZZA NETO

Co-ORIENTADOR: PROF. EDUARDO AKIRA MISAWA

1982

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Octávio Maizza Neto, orientador deste trabalho.

Ao Prof. Eduardo Akira Misawa, pela orientação específica para este trabalho.

Ao Eng. Milton Oshiro, pelo auxílio e orientação nos conhecimentos de eletrônica necessários a este trabalho.

Aos amigos da Divisão de Bioengenharia do Instituto do Coração, pelo companheirismo, cooperação e incentivo.

RESUMO

Este trabalho trata do projeto e construção de um dosador de concentrado em um fluxo de água, utilizando a teoria de controle, que faz parte, como um sub-conjunto, do projeto de uma máquina de diálise peritoneal automatizada.

A primeira parte do trabalho levanta as exigências e características que o sistema deve possuir, e verifica sua viabilidade. É feita a escolha de uma bomba para baixas vazões.

Na segunda parte foram estudados os elementos do sistema e definidas suas características. Com isso foi projetado o sistema de controle. Foi construído um protótipo do sistema, e realizou-se uma série de testes. Os resultados desses testes, assim como esquemas de circuitos e desenhos de peças estão publicados neste trabalho.

ÍNDICE

III

PARTE I

INTRODUÇÃO	01
OBJETIVO	02
EXIGÊNCIAS A SEREM ATENDIDAS	04
CONCEPÇÃO ADOTADA	06
PLANEJAMENTO DA EXECUÇÃO	07

PARTE II

MÓDULO DOSADOR	08
Agulha de dosagem	09
Bomba de pistões	11
Bomba de palhetas	12
Bomba de roletes	13
Comentários sobre as propostas	14
Critérios para escolha	16
Matriz de decisão	18
Conclusão	19

PARTE III

MÓDULO CONTROLADOR	20
Levantamento da característica dos elementos	21
Definição do controle	25

PARTE IV

RESULTADOS	26
Equipamento utilizado	26
Arranjo experimental	27
Procedimento de calibração	28

Avaliação do set-point	28
ENSAIOS	29
1º Ensaio	30
2º Ensaio	32
3º Ensaio	32
4º Ensaio	34
5º Ensaio	34
6º Ensaio	35
7º Ensaio	36
8º Ensaio	37
9º Ensaio	38
10º Ensaio	39
CONCLUSÃO	40
BIBLIOGRAFIA	41
ANEXOS	

PARTE I

INTRODUÇÃO - A DIÁLISE PERITONEAL

A função dos dois rins é limpar o sangue de todos os seus detritos. Normalmente eles ocupam posições opostas na cavidade abdominal, em cada um dos lados do corpo.

As funções principais do rim são: filtração, reabsorção e eliminação. No rim moléculas pequenas, como: água, proteínas de baixo peso molecular, glicose, uréia, sal, etc., são filtradas do sangue. Depois parte dessas substâncias é reabsorvida, enquanto substâncias como uréia, ácido úrico, amônia, sulfatos, fenóis e o excesso de água são eliminados. As funções de um rim normal incluem: remoção dos produtos finais do metabolismo do corpo, regulação dos processos químicos do corpo, regulação da quantidade de água do corpo, remoção de substâncias que não são utilizadas ou metabolizadas no organismo, para evitar envenenamento.

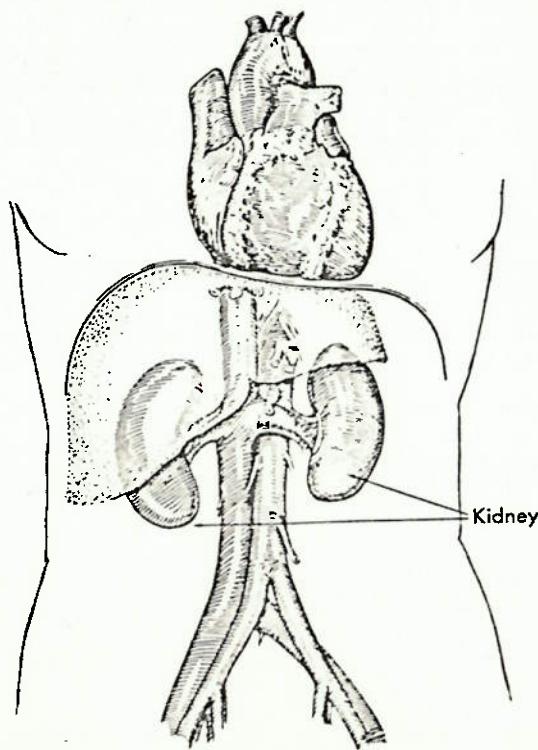
Quando o funcionamento normal do rim é prejudicado ou interrompido por algum tipo de problema, o paciente se torna progressivamente doente, excreções e água vão se acumulando em seu organismo, e seu equilíbrio químico é desfeito. Neste caso, um tratamento como a hemodiálise ou a diálise peritoneal podem remover as substâncias em excesso no organismo, tornando suas quantidades no corpo normais.

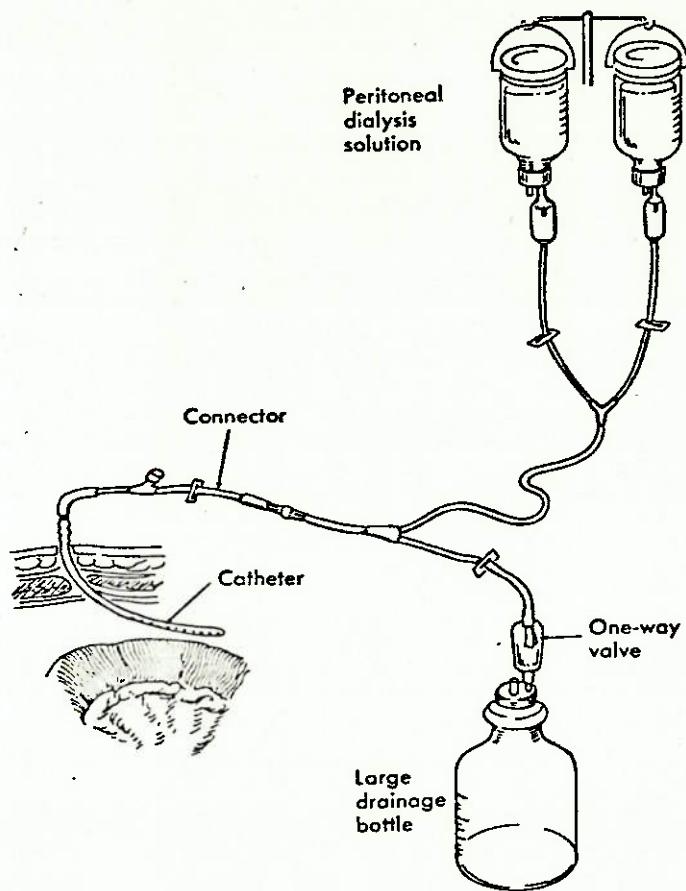
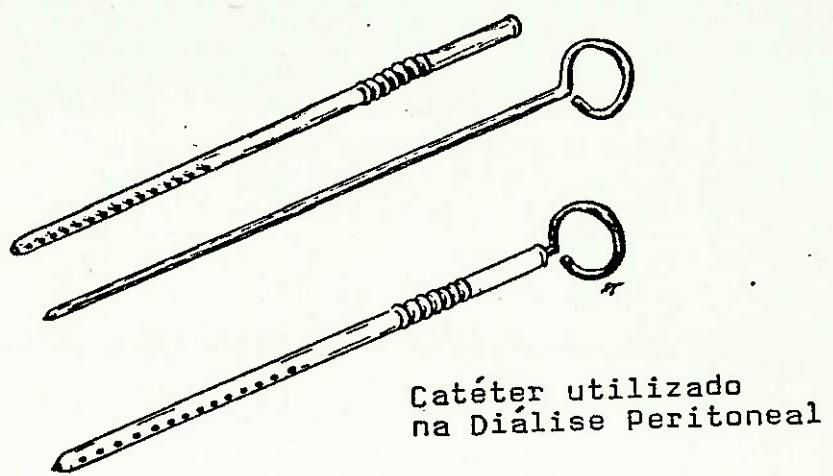
A diálise peritoneal é um tratamento que injeta uma solução de concentração controlada na cavidade abdominal do paciente, para que, por osmose, as substâncias em excesso no sangue passem para esta solução. No caso a diálise

ocorre na cavidade abdominal e a membrana de diálise é o próprio peritôneo, membrana que recobre a cavidade abdominal. Uma vez em equilíbrio, a solução de diálise é retirada.

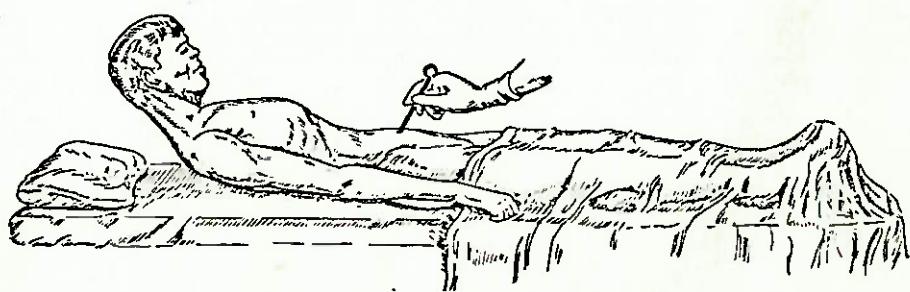
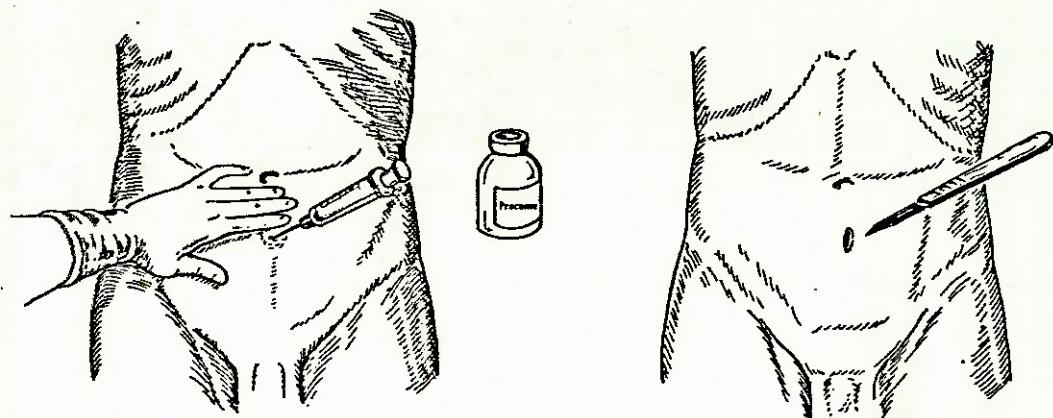
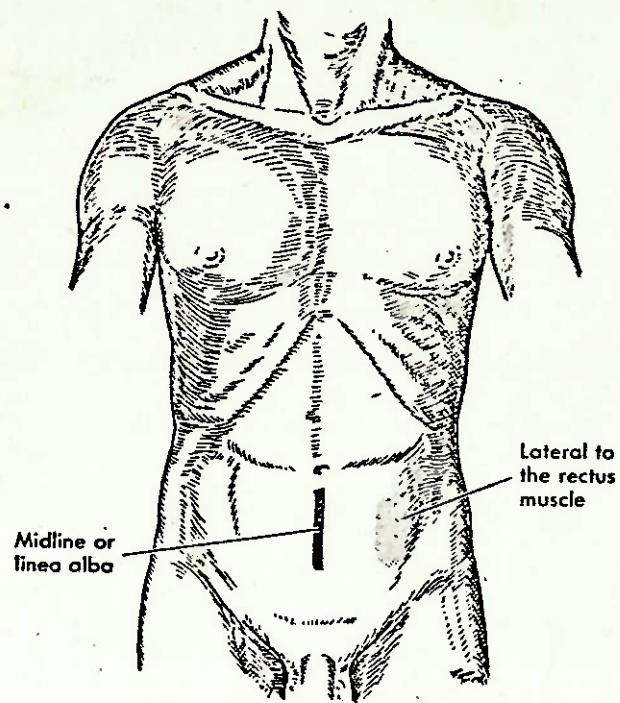
Para a injeção da solução no abdômen, é feita uma pequena incisão por onde é introduzido um cateter especial, por onde serão injetadas as soluções e mais tarde retiradas. Tanto a injeção quanto a retirada da solução são feitas por gravidade.

Algumas das indicações de diálise peritoneal são: complemento à hemodiálise ou a um transplante de rim, como um tratamento preliminar em alguns casos antes da hemodiálise, no caso de sensibilidade à heparina, etc.

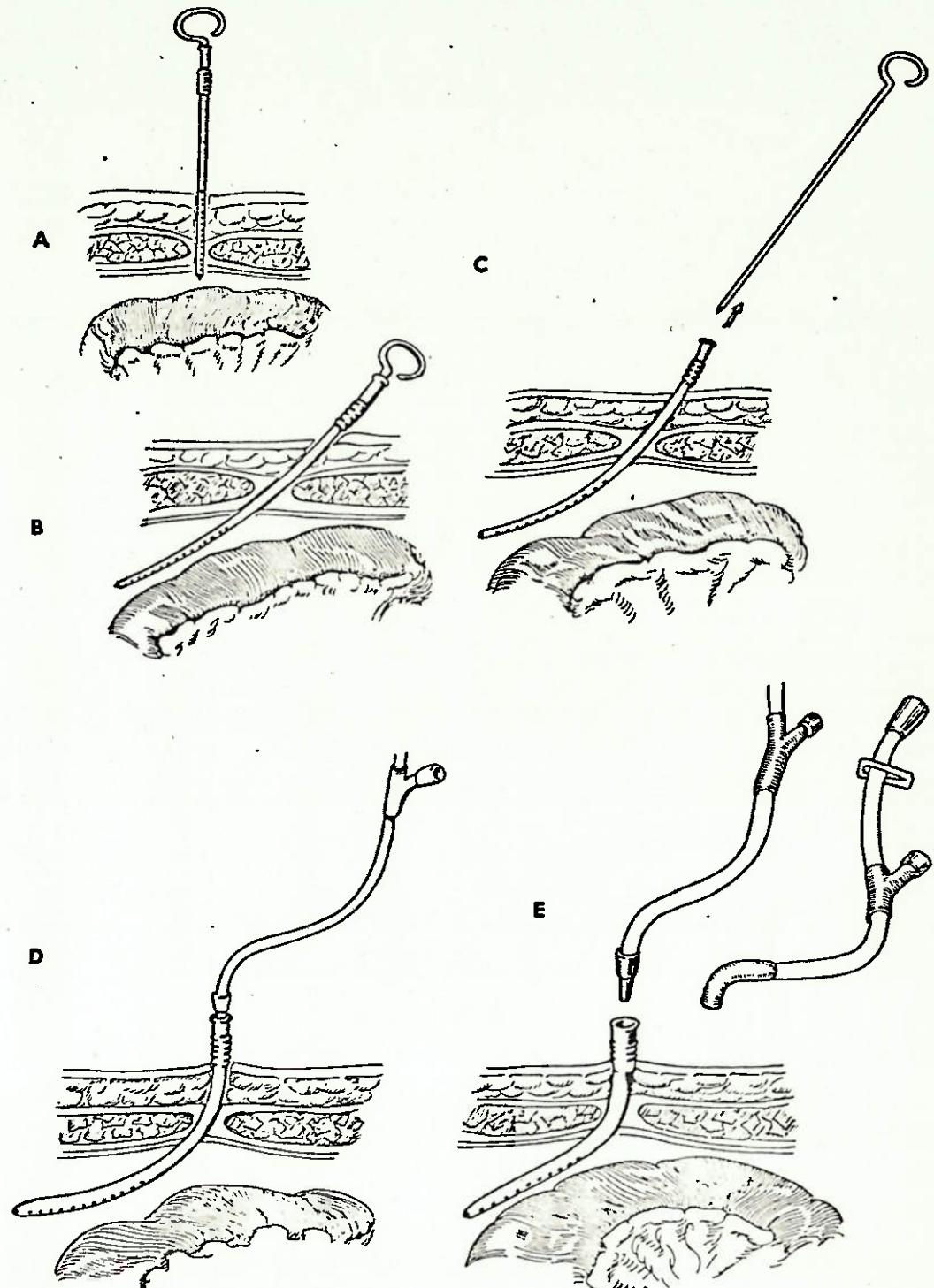




Esquema do tratamento



Técnica de incisão para a colocação do catéter



Colocação do catéter

OBJETIVO

O dosador de mistura em questão é um sub-conjunto de um sistema que faz parte do desenvolvimento de uma máquina automatizada para Diálise Peritoneal. A finalidade desse projeto é produzir uma máquina que, necessitando como entradas unicamente energia (elétrica), água comum, e concentrados (líquidos), produza soluções para diálise, de concentração controlada e estéreis.

O projeto global da Diálise Peritoneal (DP) compreende 2 fases:

- DP semi-automática
- DP automática.

O Dosador de Mistura é sub-conjunto da 2a. fase do projeto, que é composto de: Unidade de Osmose Reversa e a Unidade de Mistura em questão.

EXIGÊNCIAS A SEREM ATENDIDAS

Por se tratar de um equipamento de uso especial, temos exigências de caráter construtivo e médico.

I. Exigências de caráter médico.

O sistema deverá promover a mistura de concentrados para a diálise com água pura, atendendo as seguintes características:

1. Volume a ser dosado: 36 ml de concentrado para cada litro de água pura. A vazão de água é variável (função do tipo de tratamento a que o paciente é submetido) podendo ser:

máxima 0,0033 l/s (12 l/h)

mínima 0,00067 l/s (2,4 l/h)

O que corresponde a uma vazão de concentrado de:

máximo: 0,1188 ml/s = 7.13 ml/min.

mínimo: 0,02412 ml/s = 1,45 ml/min.

2. Controle. A unidade deve controlar automaticamente a concentração, introduzindo mudanças na vazão de concentrado se necessário. O erro máximo permitido na concentração é 0,2% em massa.

3. Mistura. A solução resultante deve ser homogênea e portanto a unidade deve dispor de um sub-

sistema que promova mistura eficiente.

4. Esterilidade. A água de alimentação (vinda da unidade de Osmose Reversa) e o concentrado são perfeitamente estéreis, e a unidade de dosagem não deve contaminar a solução resultante. A contaminação inclui tanto elementos biológicos ou químicos, e a segurança do ponto de vista elétrico deve ser considerada.

II. Exigências de caráter mecânico:

Além das exigências de caráter médico, existem aquelas de caráter construtivo:

1. Facilidade de Execução e Construção.

2. Durabilidade

3. Ausência de partes que necessitem manutenção - constante.

4. Pequena emissão de poluentes (atmosféricos)

5. Utilização de materiais facilmente encontráveis.

6. Tamanho compatível com os locais de utilização.

7. Mobilidade (deve ser portátil ou semi-portátil)

8. Fácil manejo e utilização (não deve exigir conhecimentos técnicos profundos).

CONCEPÇÃO ADOTADA

Para atender as exigências descritas de funcionamento da máquina, vamos sub-dividir a unidade em módulos, cada um deles atendendo a uma ou mais exigências:

Os módulos são:

1. Módulo Dosador (MD)
2. Módulo Controlador (MC)

constituída de: sistema de medida (SM)

sistema de realimentação (SR)

3. Módulo de Mistura

O projeto prevê que o fluxo de água pura não necessita ser gerado pela unidade Dosadora de Mistura. Ela será gerada pela unidade anterior (unidade de Osmose Reversa).

PLANEJAMENTO DA EXECUÇÃO

O projeto será desenvolvido nas seguintes etapas:

- | | |
|-----------|--------------------------------|
| 1a. Etapa | Projeto do Módulo Dosador |
| 2a. Etapa | Projeto do Módulo Controlador |
| 3a. Etapa | Definição do Módulo de Mistura |
| 4a. Etapa | Construção de Protótipo |
| 5a. Etapa | Testes de Desempenho |

O módulo dosador é o mais complexo do ponto mecanico, e por isso vamos começar o projeto por ele. O módulo Controlador é principalmente eletrônico, e para seu projeto é necessário o modelo matemático de módulo dosador. (Por isso também é necessário se definir em primeiro lugar o módulo dosador). Parte do módulo Controlador, o sistema de medida, já se encontra pronto, restando fazer o sistema de realimentação.

Na primeira parte do trabalho (correspondente à disciplina PMC-), vamos concluir o projeto básico do módulo dosador, definindo a melhor solução e suas características básicas. Na segunda parte, vamos modelar o MD e projetar o módulo Controlador e o módulo de mistura, passando à construção do protótipo.

PARTE II

MODULO DOSADOR

Levantamos 4 propostas para o módulo dosador :

1. Sistema com agulha de dosagem (passivo)

2. Sistema com bomba de pistões

3. Sistema com bomba de palhetas

4. Sistema com bomba de roletes

Para se poder estudar melhor as alternativas, foram feitos testes para avaliar o desempenho dos sistemas dos quais não dispúnhamos de literatura para consulta ou dados que pudéssemos utilizar para avaliações. Dessa forma, foram realizados testes de desempenho da agulha de dosagem e da bomba de roletes.

A seguir vamos dar um breve resumo de cada proposta e um esquema.

Nos esquemas serão utilizadas as seguintes abrevia-

ções:

M motor

CV controlador de velocidade

SR sistema de realimentação

SM sistema de medida

CM câmara de mistura

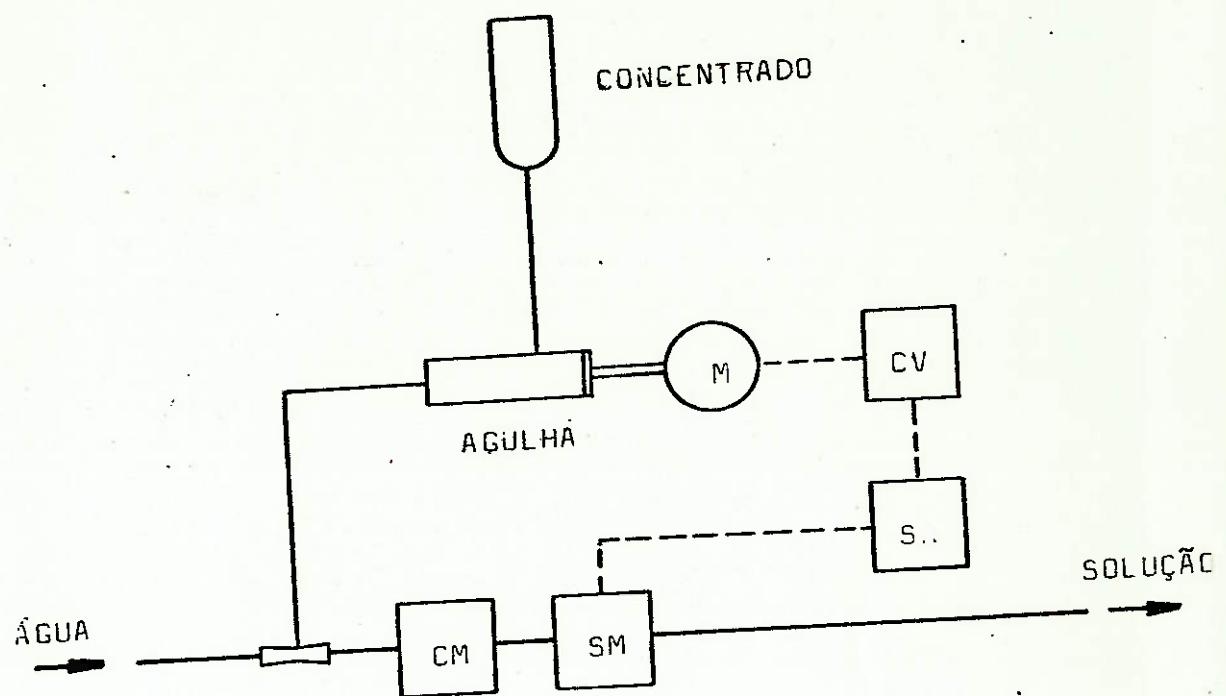
1. AGULHA DE DOSAGEM

Este é um sistema passivo de dosagem. Uma de suas vantagens é que não necessita de energia para realizar a dosagem.

A idéia inicial era colocar a fonte de concentrado a uma altura maior do que o ponto de dosagem e realizar no ponto de dosagem um aumento de velocidade. Com a diferença de pressão assim obtida, produzir-se-ia uma vazão de concentrado, que seria controlada com a introdução de uma restrição variável, a agulha.

Foi construído um protótipo simples, de acionamento manual, unicamente para se levantar características com relação ao comportamento da vazão. Os testes mostraram que, para diferentes agulhas e pressões, que o sistema apresentava grandes oscilações na vazão para altas restrições (agulha quase fechada), o que levaria à instabilidade do sistema de controle.

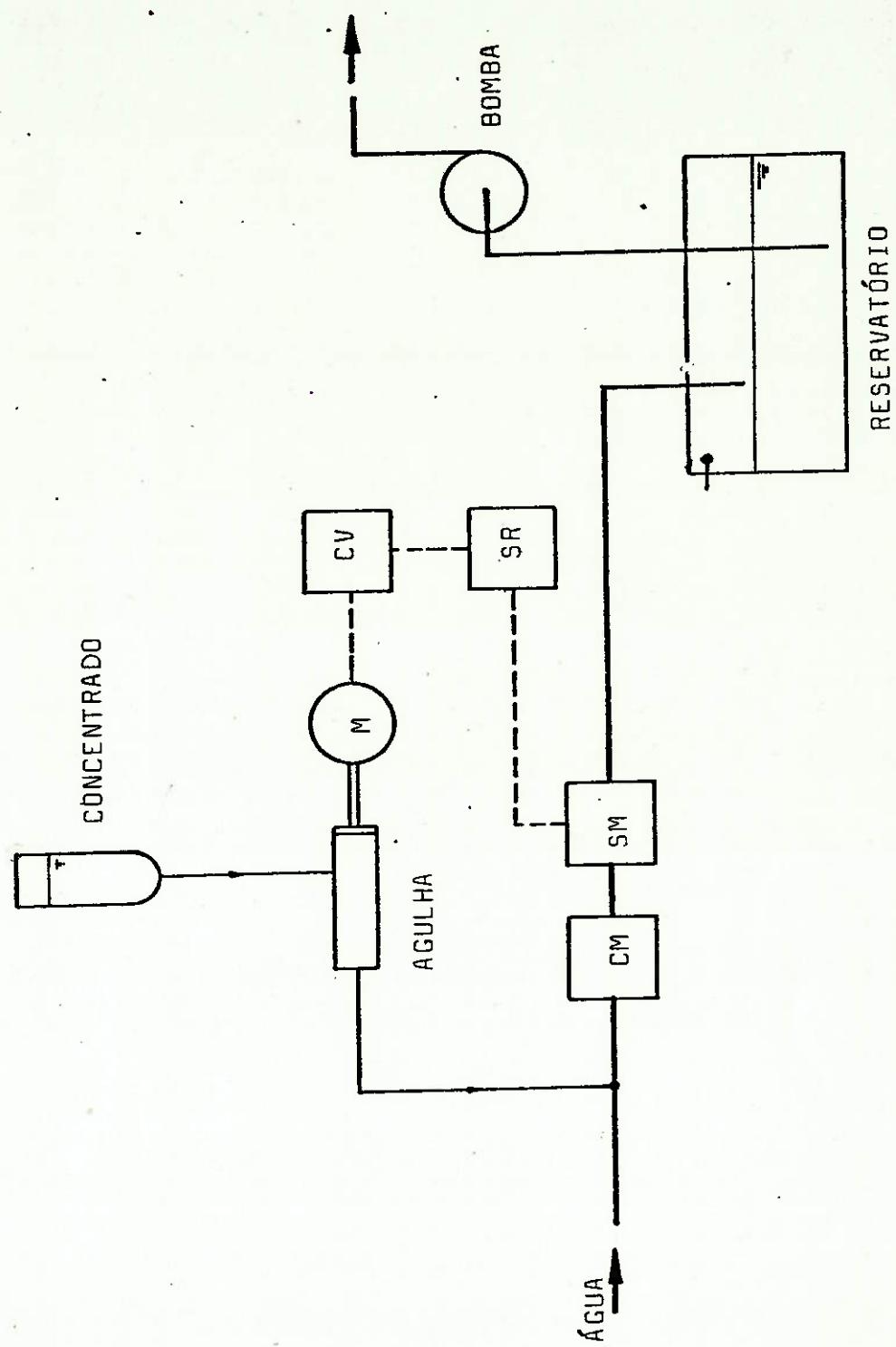
Por outro lado, para vazões maiores (restrições menores), a repetibilidade do teste se mostrou bem maior, o que levou à mudança na proposta inicial, para a proposta esquematizada. Nela foi introduzido um reservatório que armazena a solução preparada, e uma bomba se encarrega do fluxo de solução ao paciente. Dessa forma é possível se trabalhar com vazões menores do que as utilizadas no tratamento, pois o sistema disporia de uma chave fim-de-curso (no caso uma bóia), que interromperia automaticamente o



PROPOSTA INICIAL DA AGULHA DE DOSAGEM

processo de mistura quando o reservatório se mostrasse cheio, e tornaria a ligá-lo apenas após o mesmo ultrapassar um nível mínimo. Dessa maneira pode-se trabalhar com a agulha nas faixas de vazão onde ela se mostrou confiável.

Os resultados do teste, bem como os desenhos do protótipo se encontram anexados a este trabalho.



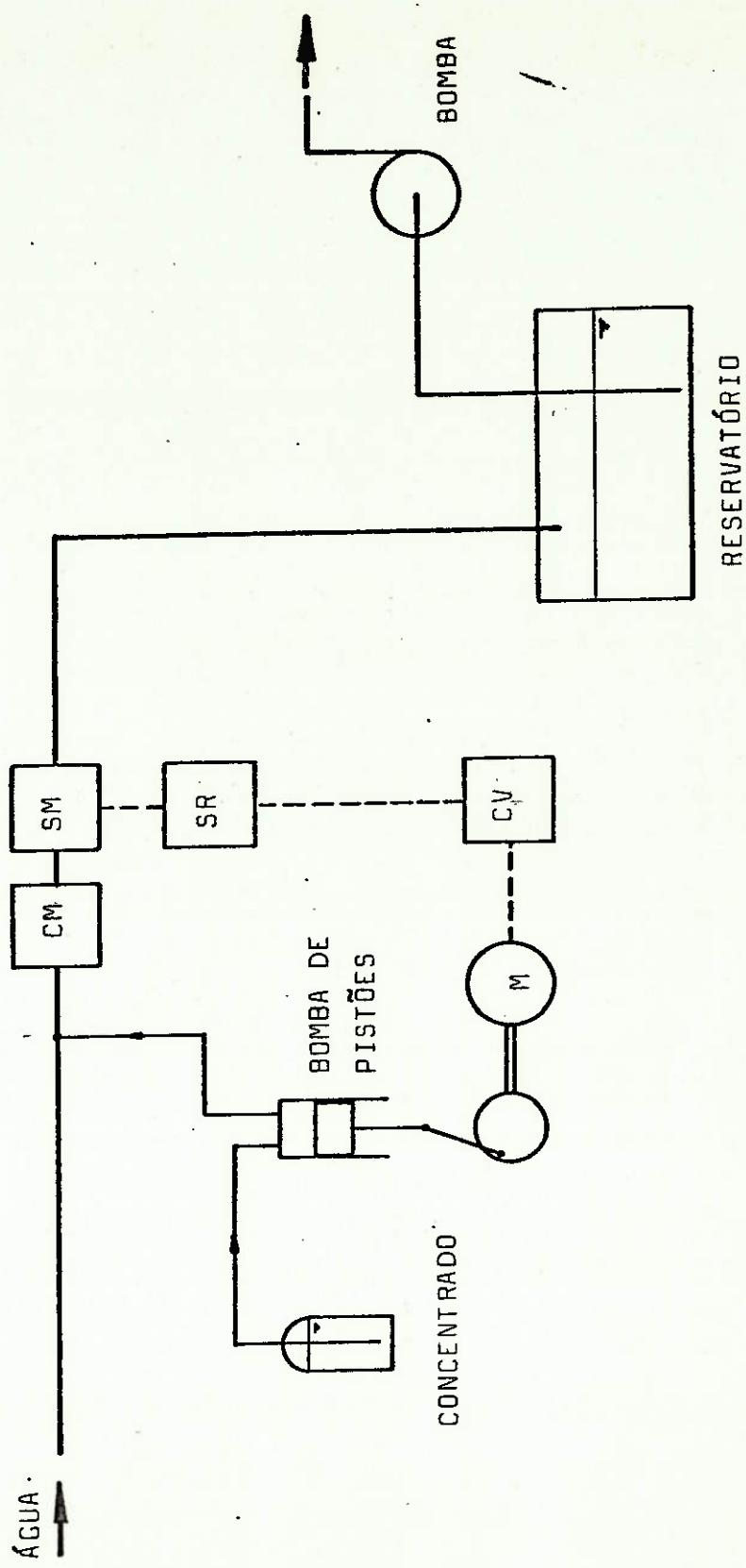
PROPOSTA 1 : AGULHA DE DOSAGEM

2. BOMBA DE PISTÕES

O sistema total é semelhante ao sistema com agulha de dosagem. Foram feitos alguns cálculos e se constatou que a bomba, para se apresentar com dimensões razoáveis e exequíveis tecnicamente, precisaria trabalhar com vazões maiores do que as mínimas necessárias.

Portanto, foi preciso colocar novamente um reservatório com a função de controlar a vazão na saída da solução, com as mesmas características já descritas anteriormente.

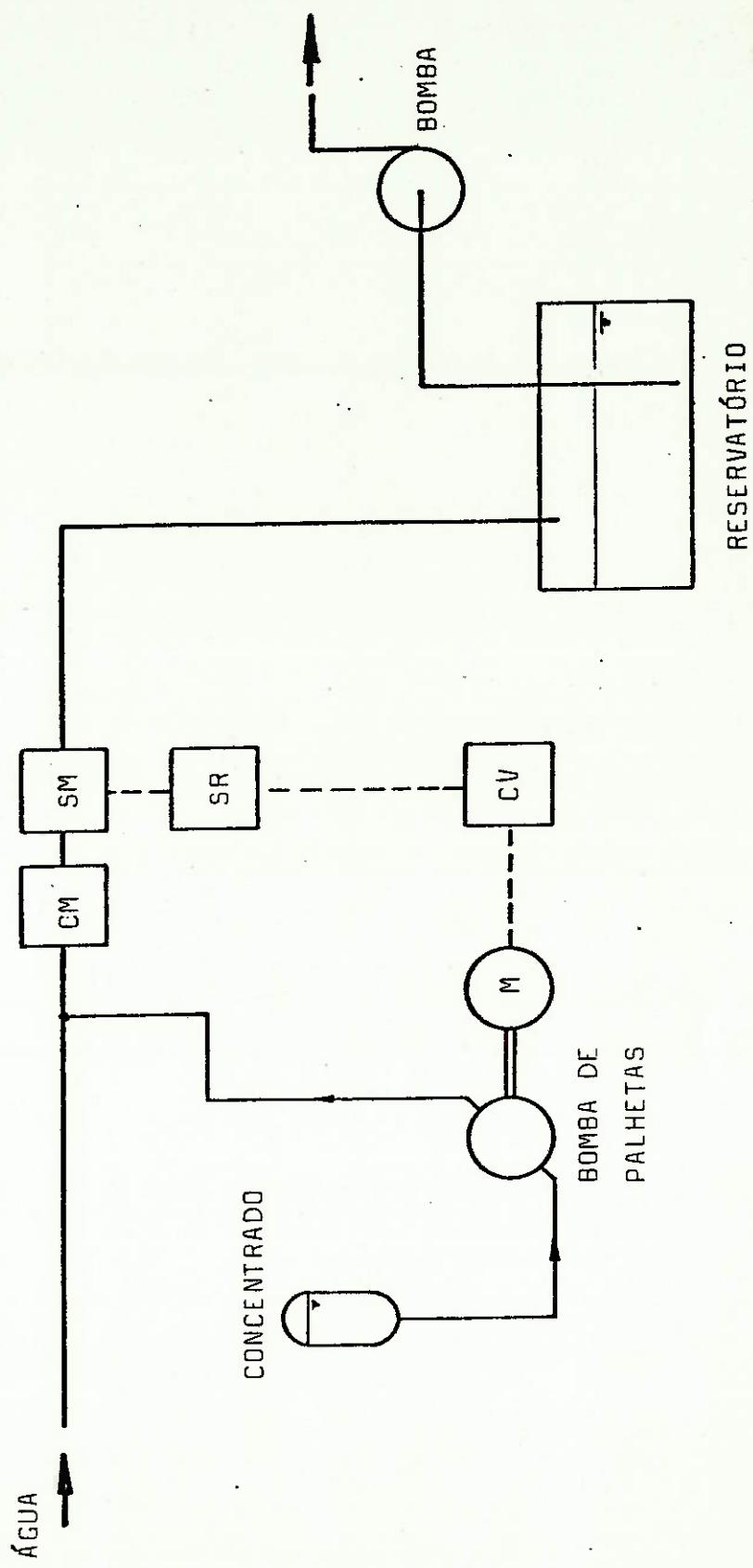
A proposta apresenta duas bombas de pistão de diafragma, trabalhando alternadamente para minimizar a característica pulsante da vazão. A necessidade de lubrificação do pistão e a exigência de não contaminação levaram à escolha da bomba com diafragma. Dessa forma não há problemas quanto à lubrificação e contaminação do concentrado. As válvulas de admissão e escape devem ser comandadas, pois as exigências de precisão não permitem a utilização de válvulas passivas.



PROPOSTA 2 : BOMBA DE PISTÕES

3. BOMBA DE PALHETAS

O sistema é idêntico ao da bomba de pistões, apenas com a mudança da bomba. Novamente a dificuldade de se obter baixas vazões levou à necessidade da introdução do reservatório suplementar. A bomba é de concepção comum e similar às utilizadas em instalações de ar comprimido. O controle da vazão não seria feito por variação da excentricidade do rotor, mas através da variação da rotação do mesmo.



PROPOSTA 3 : BOMBA DE PALHETAS

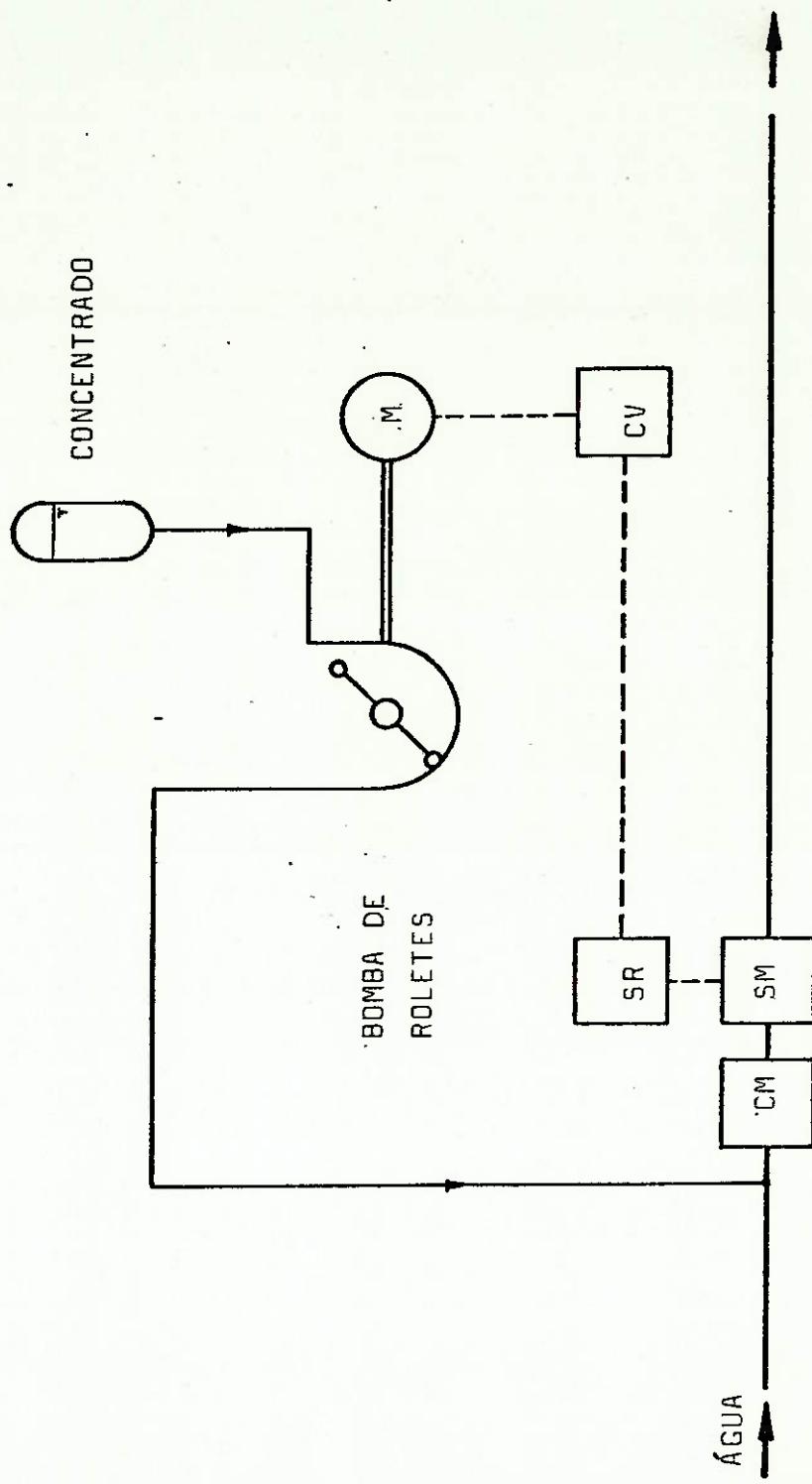
4. BOMBA DE ROLETES

A bomba de roletes é um elemento largamente utilizado em equipamentos médicos, devido às suas características de não causar dano excessivo ao sangue, quando é usada para bombeá-lo, e de não contaminar o fluido bombeado.

Em virtude das baixas vazões necessárias foram feitos testes para se verificar se a bomba teria condições de fornecer estas vazões. Para tanto foram introduzidas algumas modificações na bomba comumente utilizada. Foi colocado um redutor, para diminuir a velocidade do rotor (redução total 1:4) e trocado o tubo utilizado para bombear o líquido, por um tubo de menor diâmetro, para diminuir o volume deslocado por volta.

Os testes conduzidos mostraram que a bomba assim modificada é capaz de fornecer mesmo a vazão mais baixa com boa precisão, e uma variação contínua da vazão no intervalo de interesse.

Isso fez com que essa solução fosse a única que dispensa o reservatório intermediário, trabalhando diretamente com a vazão necessária. Com isso o sistema se tornou mais simples, pois a ausência do reservatório dispensa também a necessidade das chaves fim-de-curso e da bomba auxiliar.



PROPOSTA 4 : BOMBA DE ROLETES

COMENTÁRIOS SOBRE AS PROPOSTAS

O reservatório intermediário, necessário nas propostas 1, 2 e 3, além de tornar os sistemas mais complexos, - tem ainda o inconveniente de trazer problemas quanto à esterilidade do sistema, por isso foi adotado apenas quando sua presença era totalmente necessária. De fato, no caso de um reservatório rígido, de dimensões definidas, é necessário um respiro para manter a pressão interna constante, tanto no enchimento quanto no esvaziamento. Para não contaminar a solução esse respiro deveria ser dotado de um sistema de purificação do ar, tanto químico quanto biológico. Este problema pode ser contornado utilizando-se um reservatório flexível, que tem as suas dimensões alteradas se cheio ou vazio.

A capacidade de se tornar, e se manter estéril, deve ser uma das preocupações fundamentais nesta fase do projeto. Para melhorar essa característica, uma das sugestões é utilizar o máximo de partes descartáveis no sistema, eliminando com isso o perigo de uma má esterilização para reutilização.

Neste aspecto, a bomba de roletes leva uma grande vantagem sobre as demais propostas, pois a parte em contato com o fluido é um tubo flexível de látex, que pode ser simplesmente trocado após cada utilização, não sendo necessária a lavagem da bomba, como no caso da agulha de dosagem, bomba de pistões e bomba de palhetas.

Quanto ao aspecto construtivo, a bomba de pistões é a que apresenta maiores dificuldades, devido à necessidade de tolerâncias dimensionais estreitas e acabamentos de qualidade no pistão e no cilindro. As demais soluções são aproximadamente equivalentes.

Para acionar as diferentes bombas ou movimentar a agulha de dosagem, pretende-se utilizar um motor de corrente contínua. Esse motor permite um controle bem preciso da velocidade, através de controladores eletrônicos.

O sistema de controle é comum a todas as soluções. Consiste em uma unidade de medida, um condutivímetro, que mede a concentração de soluções através da sua condutibilidade elétrica. O condutivímetro é ligado a uma unidade de controle, que comanda o variador de velocidades do motor C.C.

CRITÉRIOS PARA ESCOLHA

Para escolhermos a melhor alternativa entre as propostas, vamos recorrer a uma matriz de decisão. Nela os 4 projetos serão avaliados com relação a diversos critérios e comparadas. Para cada critério vamos atribuir um peso, e cada proposta receberá uma nota referente a cada critério. Depois faremos a soma das notas multiplicadas pelos respectivos pesos, e a proposta que obtiver maior soma será escolhida.

Não serão levados em conta nesta decisão fatores - econômicos e financeiros. Um comentário é que, exceto a bomba de pistões, as soluções tem custo equivalente. Um estudo mais detalhado do ponto de vista econômico será feito após a definição de todo o projeto.

CRITÉRIOS E PESOS

1. Continuidade da vazão de concentrado

capacidade da bomba de fornecer um fluxo contínuo de concentrado para mistura com a água

Peso: 8

2. Precisão da vazão

afastamento da medida real relativamente à medida teórica de vazão de concentrado fornecida pelo dosador

Peso: 7

3. Controlabilidade da Vazão

facilidade de se conseguir mudanças definidas na vazão de concentrado.

Peso: 10

4. Vazão Determinada

para uma posição ou rotação determinada o sistema deve fornecer uma única vazão.

Peso: 9

5. Facilidade de Esterilização

relativa às partes não descartáveis.

Peso: 9

6. Possibilidade de Contaminação

possibilidades que o sistema ofereça de contaminação por elementos químicos (lubrificantes, gases, etc.) e biológicos.

Peso: 10

7. Simplicidade do Sistema

simplicidade construtiva

Peso: 6

8. Facilidade de construção

Peso: 6

9. Compacticidade

Peso: 5

MATRIZ DE DECISÃO

CRITÉRIO	PESO	PROPOSTA			
		AGD	BPI	BPA	BRO
Continuidade da vazão	8	10	7	9	8
Precisão da vazão	7	6	9	8	9
Controlabilidade da vazão	10	6	7	7	8
Vazão Determinada	9	7	9	8	8
Facilidade de Esterilização	9	6	6	6	9
Possibilidade de Contaminação	10	6	8	6	9
Simplicidade do Sistema	6	8	6	8	7
Facilidade de Construção	6	7	5	7	8
Compacticidade	5	8	7	7	6
TOTAL		489	515	509	570

CONCLUSÃO

A solução escolhida para o módulo dosador, conforme a matriz de decisão, é a bomba de roletes. Um desenho da caçapa da bomba, com suas dimensões principais, encontra-se anexado a este trabalho.

Esta bomba é constituída de uma caçapa menor do que as comumente utilizadas nas bombas arteriais, e o tubo utilizado nos testes foi um tudo de látex grau médico (grau de impurezas) do tipo utilizado em garrotes (diâmetro interno aproximadamente 3 mm).

A bomba é acionada por um motor de corrente contínua, $\frac{1}{6}$ HP e rotação máxima 160 rpm. Este motor já vem montado a um redutor tipo rosca-sem-fim, em um único bloco. Para se conseguir rotações mais baixas foi acoplado na saída do motor mais um redutor (redução total 1:4), de eixos paralelos e engrenagens cilíndricas de dentes retos. Dessa forma redução total permitiu uma rotação máxima do eixo da bomba da ordem de 40 rpm.

PARTE III

MÓDULO CONTROLADOR

Como já havíamos comentado, o módulo controlador (MC) é constituído basicamente de um sensor de concentração e de um sistema de realimentação, que contém a informação da concentração desejada e controla o motor da bomba de roletes para que a quantidade de concentrado seja maior ou menor.

Para medir a concentração da solução, vamos utilizar o fato da solução preparada ser salina, e portanto conduzir eletricidade. Por isso, o sensor de concentração será um condutivímetro, que medirá as variações de condutibilidade da solução, função da quantidade de íons dissolvidos e portanto da sua concentração.

Para a escolha do tipo de controle a ser utilizado no sistema de realimentação, e para obtenção das suas características de funcionamento, os seguintes elementos foram estudados: conjunto Motor-Bomba e Condutivímetro.

1. LEVANTAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DOS ELEMENTOS

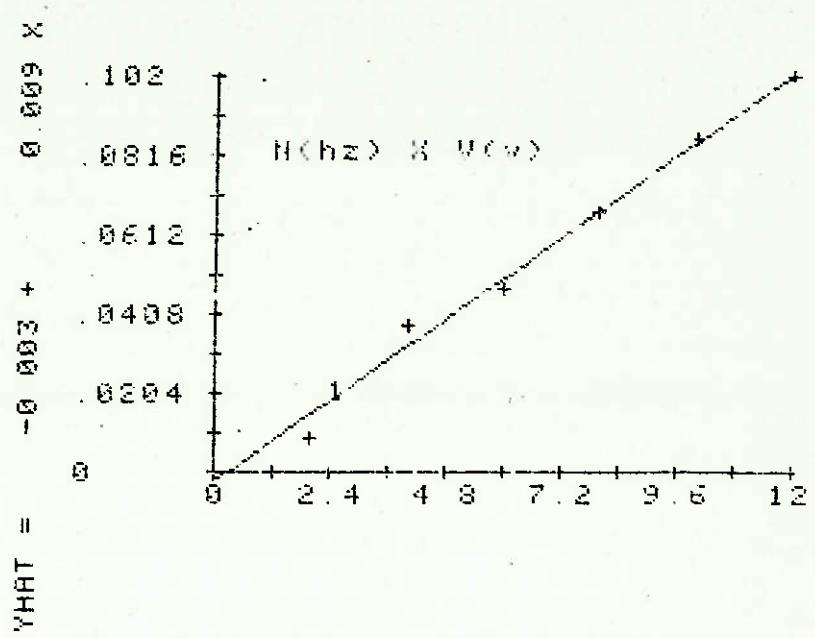
A. CONJUNTO MOTO-BOMBA

Foram analisados dois aspectos: o qualitativo, procurando determinar as relações entre tensão, rotação e vazão, e o aspecto dinâmico do sistema.

Quanto ao aspecto quantitativo, testes levaram à conclusão que dentro dos intervalos de utilização, a rotação varia linearmente com a tensão de alimentação, e a vazão linearmente com a rotação. As equações obtidas pela aproximação através do método dos mínimos quadrados, e os dados colhidos estão relacionados a seguir.

Concluímos também que a bomba apresenta característica estática, isto é, responde instantaneamente à variação da tensão de alimentação, e não apresenta oscilações. Isto se deve possivelmente porque o motor está bastante superdimensionado para o sistema, e porque as velocidades e acelerações envolvidas são baixas. Para chegar a estes resultados foi realizado um teste simples, injetando um degrau de tensão de alimentação na bomba, e verificando a variação da rotação. O degrau de tensão foi obtido sincronizando-se uma fonte de potência a um gerador de ondas quadradas, e a rotação foi medida através de um estroboscópio adaptado ao eixo da bomba.

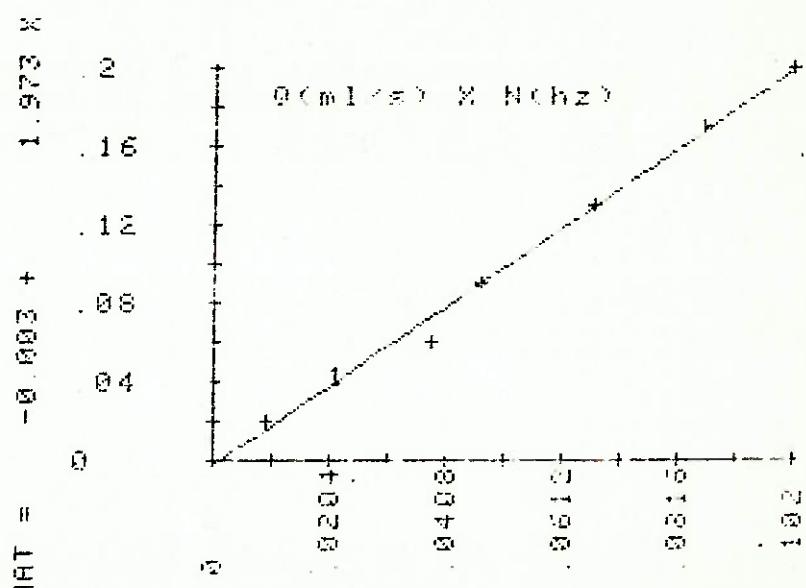
110: REG LINEAL: CODIGO 1
 ORIGEN/OF S S MS F
 TOTAL 6 0 0 0 0 515.6
 REG 1 0 0 0 0 0
 RESID 5 0 0 0 0 0
 A GUARDAR A = 0.998



Curva Rotação x Tensão (motor)

$$\text{Equação: } N(\text{Hz}) = 0.009 V(\text{volts})$$

TLW: REG LINEHL:000100 1 F
 ORIGIN/DF 35 MS 0 0 0 0 0
 TOTAL 6 0 0 0 0 0 0 0
 REG 1 0 0 0 0 0 0 0
 RESID 5 0 0 0 0 0 0 0
 P CUDRAGH = 0 0 0 0 0 0 0 0



Curva Vazão x Rotação (bomba)

$$\text{Equação: } Q(\text{ml/s}) = 1.973 \text{ } n(\text{Hz})$$

B. CONDUTIVÍMETRO

O valor da condutibilidade de uma solução depende de sua concentração, da tensão aplicada para sua medida e da geometria dos eletrodos, que injetam essa tensão na solução. Como para uma dada solução e concentração, o valor da condutibilidade da solução ainda depende da distância entre eletrodos e de sua área de contato com a solução, para a análise quantitativa do condutivímetro foi necessário construir o protótipo, já com a geometria de eletrodos definida.

Portanto, o planejamento de execução do projeto apresentado na primeira parte não pôde ser obedecido, e a partir desta fase todas as etapas do projeto passaram a caminhar praticamente juntas.

Construída a primeira célula de condutibilidade, surgiram problemas quanto à disposição e dimensões dos eletrodos, para que o condutivímetro apresentasse leituras confiáveis. Paralelamente, pelo fato da solução de diálise possuir outras substâncias além de sais dissolvidos (no caso glicose) fez com que a solução apresentasse uma leitura não estável sob certas circunstâncias. Após vários testes esses problemas foram controlados, e foi definida uma célula de condutibilidade (com eletrodos de grafite).

A concepção eletrônica do condutivímetro é bastante simples. Basicamente ele é constituído de 3 blocos: bloco gerador, bloco amplificador e bloco retificador. O gerador produz um sinal alternado de frequência 830 Hz, que é inje-

tado na solução. A corrente produzida é então amplificada e retificada, e o condutivímetro fornece como saída uma tensão pulsante.

O bloco gerador teve de ser substituído porque a forma de onda que gerava não era perfeitamente senoidal, o que poderia estar causando alguns dos problemas de leitura. Em seu lugar foi utilizado um gerador de função, com amplitude de saída regulável.

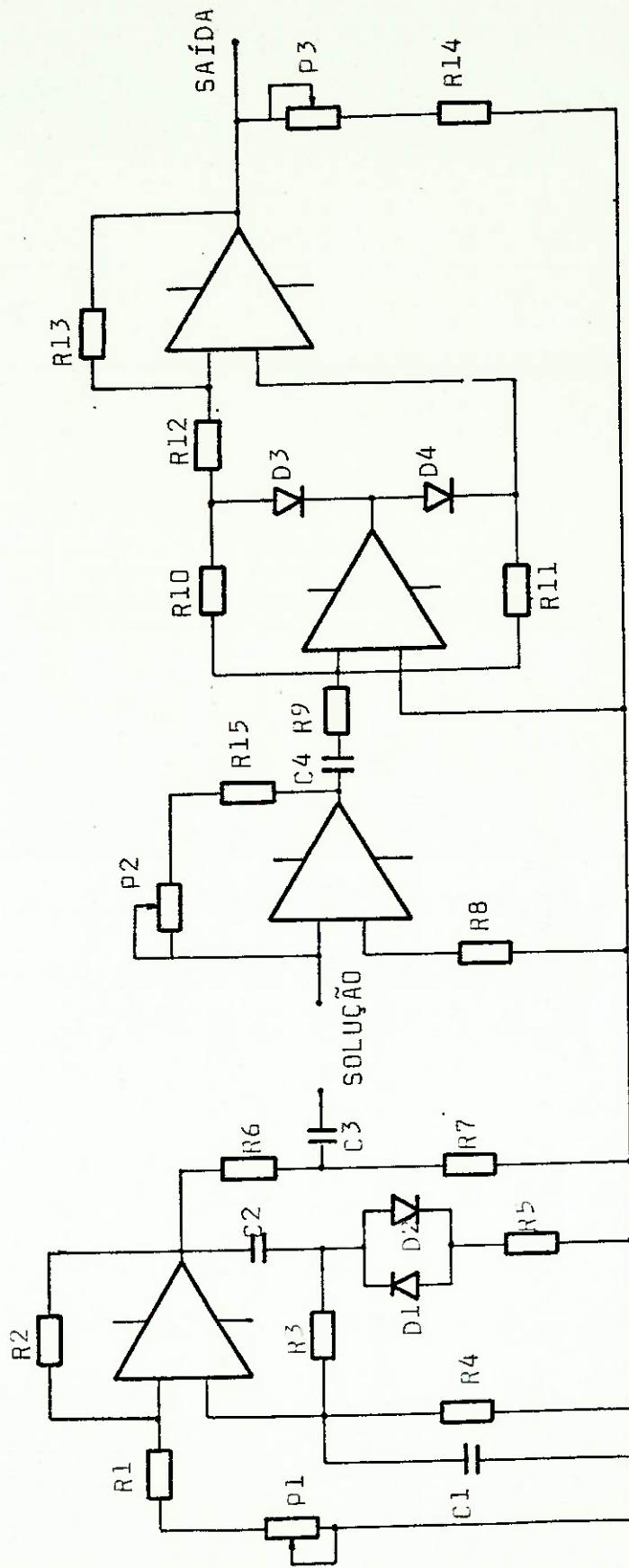
O protótipo para a realização do teste já incorporava o módulo de mistura, no caso resumido a um duto longo, - para aproveitar a própria turbulência do escoamento. Após a montagem dos eletrodos e da substituição do gerador de sinal no condutivímetro, os testes foram realizados.

No aspecto dinâmico, o condutivímetro mostrou ser bastante rápido na resposta à variação da concentração, como era de se esperar, devido à própria característica do circuito eletrônico. Por isso vamos considerar sua resposta como imediata.

Para a avaliação no aspecto quantitativo, em primeiro lugar o condutivímetro foi calibrado, conforme procedimento descrito posteriormente, e uma série de soluções com diversas concentrações (1:100, 1:50, 1:32, 1:31, 1:30, 1:29, 1:28) foram preparadas. Utilizando essas soluções como padrões, a tensão de saída foi levantada. A conclusão é que, dentro da faixa de utilização, a tensão de saída varia linearmente com a concentração, dada pela relação entre volu-

mes de concentrado e água.

Os testes mostram também a necessidade de se definir uma nova célula de condutibilidade, pois apesar dos bons resultados, a configuração utilizada apresenta problemas de durabilidade e possível concentração da solução por partículas de grafite. A idéia de provocar a mistura de concentrado com água através da própria turbulência do escoamento também não se mostrou muito eficiente, devido à baixa vazão de água e à viscosidade do concentrado. Apesar disso, esta célula foi utilizada nos testes, conforme será explicado.



ESQUEMA DO CONDUTIVÍMETRO

RELAÇÃO DE COMPONENTES

Medidor de Condutividade

Resistores

R₁,R₆,R₉,R₁₀,R₁₁,R₁₂,R₁₃,R₁₄ = 10K ohms

R₂,R₅ = 100K ohms

R₃,R₄ = 100 ohms

R₈ = 47K ohms

Todos os resistores de 1/4 watt

Potênciometros

P₁ = 10K ohms

P₂ = 25K ohms

P₃ = 100K ohms

Capacitores

C₁,C₂ = 330 pF

C₃,C₄ = 1 uF

C₅ 100 uF

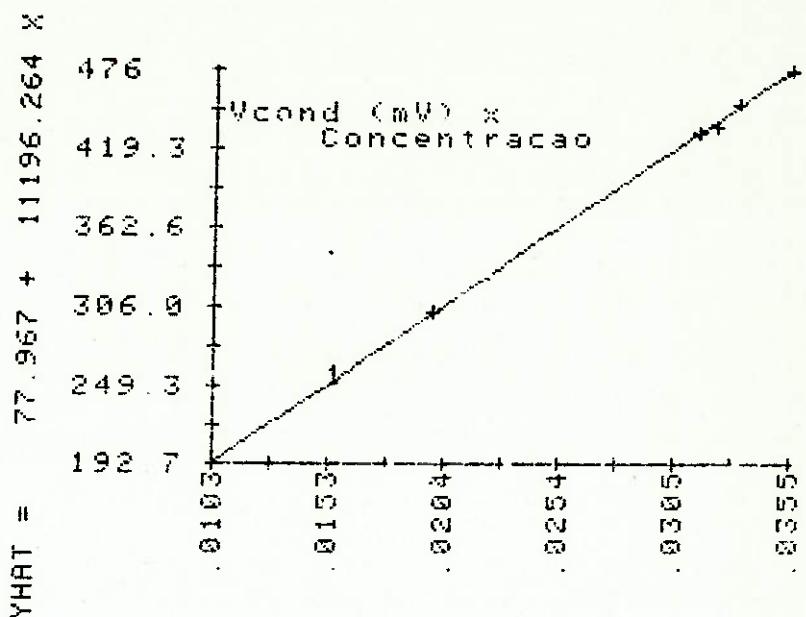
Diodes

D₁,D₂,D₃,D₄ = 1N914

Circuitos Integrados

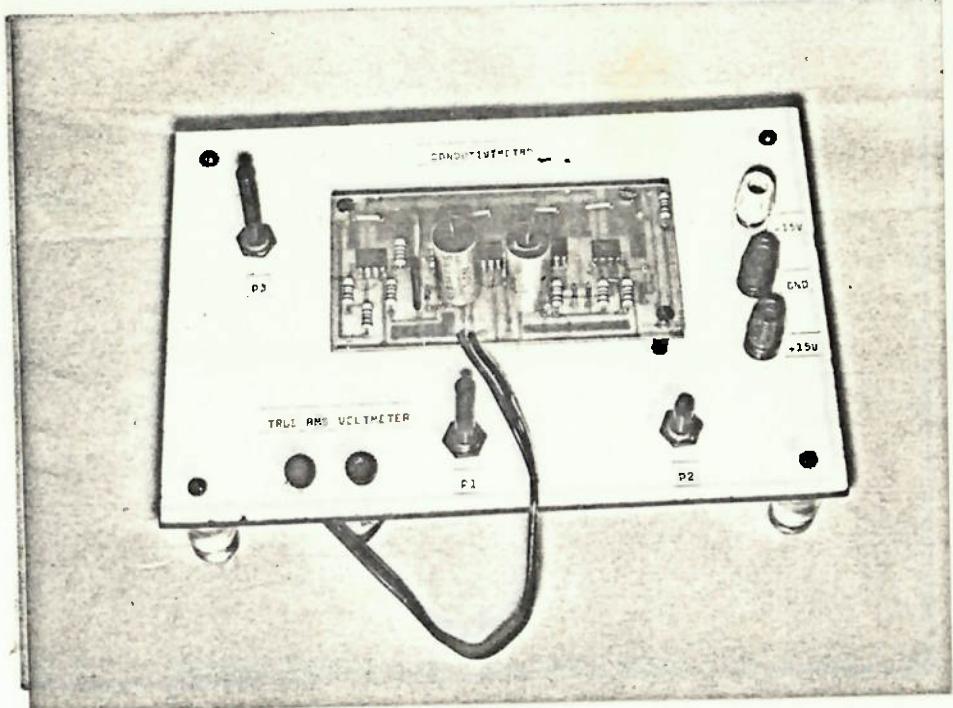
LM 741

TLW: REG LINEAL:0001 GO 1 F
 ORIGEN/DF SS MS F
 TOTAL 5 61428.4
 REG 1 61407.3 61407.3 999.9
 RESID 4 21.1 5.3
 R CUADRADA = 1.000



Curva Tensão de saída do Condutivímetro x
 Concentração

$$\begin{aligned}
 \text{Equação: } V_{\text{cond}} (\text{mV}) = & 77.967 + \\
 & 11196.264 C
 \end{aligned}$$



CIRCUITO DO CONDUTIVÍMETRO MONTADO



CÉLULA DE CONDUTIVIDADE

DEFINIÇÃO DO CONTROLE

O sistema de controle ficou bastante simples devido às características estáticas dos elementos. Foi escolhido o sistema de controle integral (simples) apenas para filtrar as flutuações naturais de medida e ruídos de interferências. Na realidade, o circuito não é propriamente integral, mas é um filtro de frequências altas.

O circuito é bastante simples, utilizando 3 amplificadores operacionais e dois transistores de potência. É constituído de:

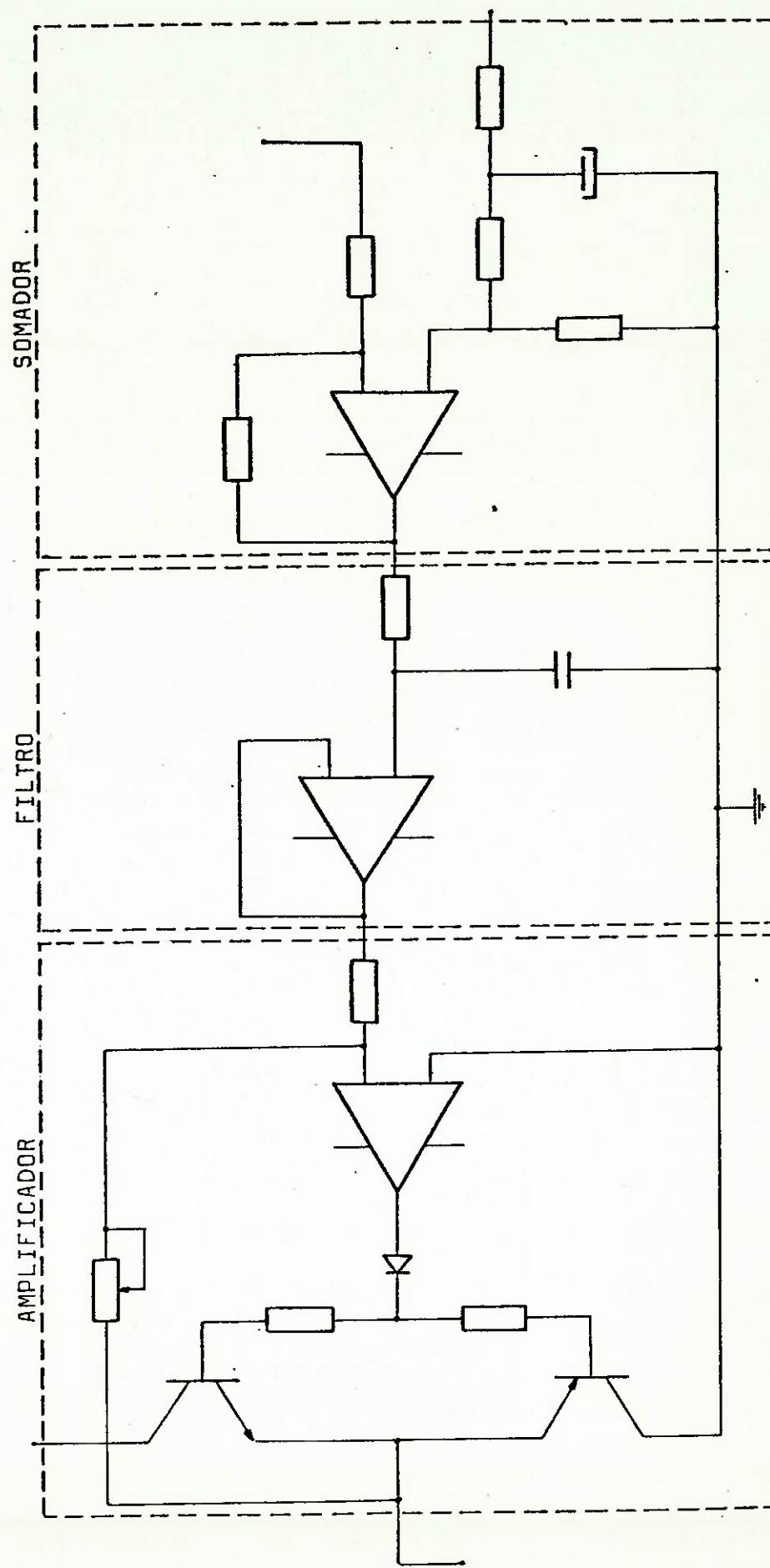
filtro de entrada: para obter o valor médio do sinal do condutivímetro que é pulsante.

bloco somador: que calcula a diferença entre o set-point e o valor do sinal de realimentação.

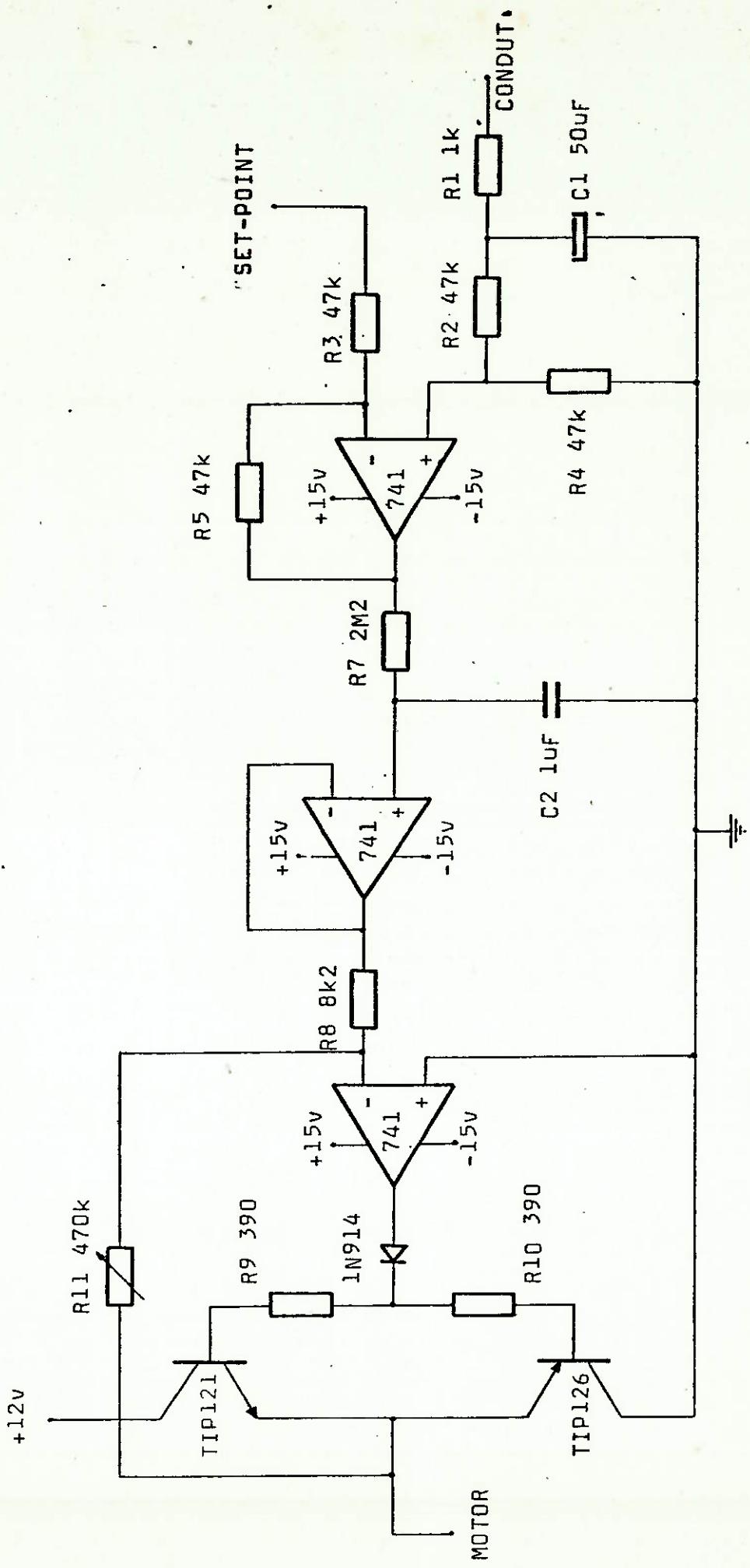
filtro integrador

amplificador de potência - amplifica o sinal do erro em um sinal de potência, para alimentar o motor. O fator de amplificação, ou ganho, é regulável.

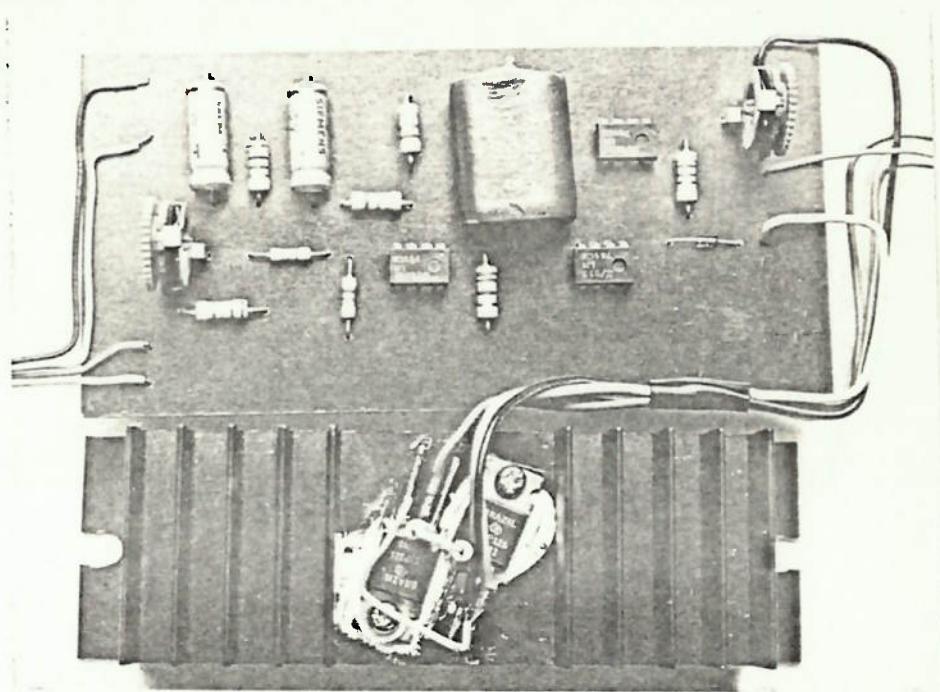
Como já foi comentado, todas as etapas do projeto se desenvolveram paralelamente, e por isso, ao se definir o circuito de alimentação, o protótipo estava pronto para teses de avaliação.



ESQUEMA DO CIRCUITO DIVIDIDO EM BLOCOS FUNCIONAIS



ESQUEMA DO CIRCUITO DE REALIMENTAÇÃO



CIRCUITO DE CONTROLE MONTADO

PARTE IV

RESULTADOS

Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos utilizando como concentrado uma solução a 30% em massa de NaCl (sal comum), que diluída na proporção 1:30 (em volume) produz uma solução de concentração similar ao soro fisiológico (0,9%). O concentrado para diálise não foi utilizado por duas razões:

- A quantidade disponível não é muito grande.
- Por conter glicose, o concentrado é mais viscoso que a solução salina, e sua mistura e diluição é mais difícil. Como já foi assinalado, a câmara de mistura deste protótipo não é muito eficiente, e a utilização do concentrado de diálise apresentaria problemas de não homogeneização. O concentrado salino dilui-se mais facilmente.

EQUIPAMENTO UTILIZADO

Para a obtenção dos resultados foram utilizados os seguintes equipamentos:

Fontes: alimentação do circuito: HP6206B (2)

potência: LABO FR-25/50

set-point: HP6111A

Medidores de tensão:

HP3403C (True RMS Voltmeter)

PHILIPS PM2421 (Digital Multimeter)

Gerador de função:

HP 3310A

Osciloscópio

TEKTRONIX 5111 (com amplificador de 2 canais)

Registrador Gráfico (Térmico)

HP 7754A

Atenuador (faixa 0-12dB)

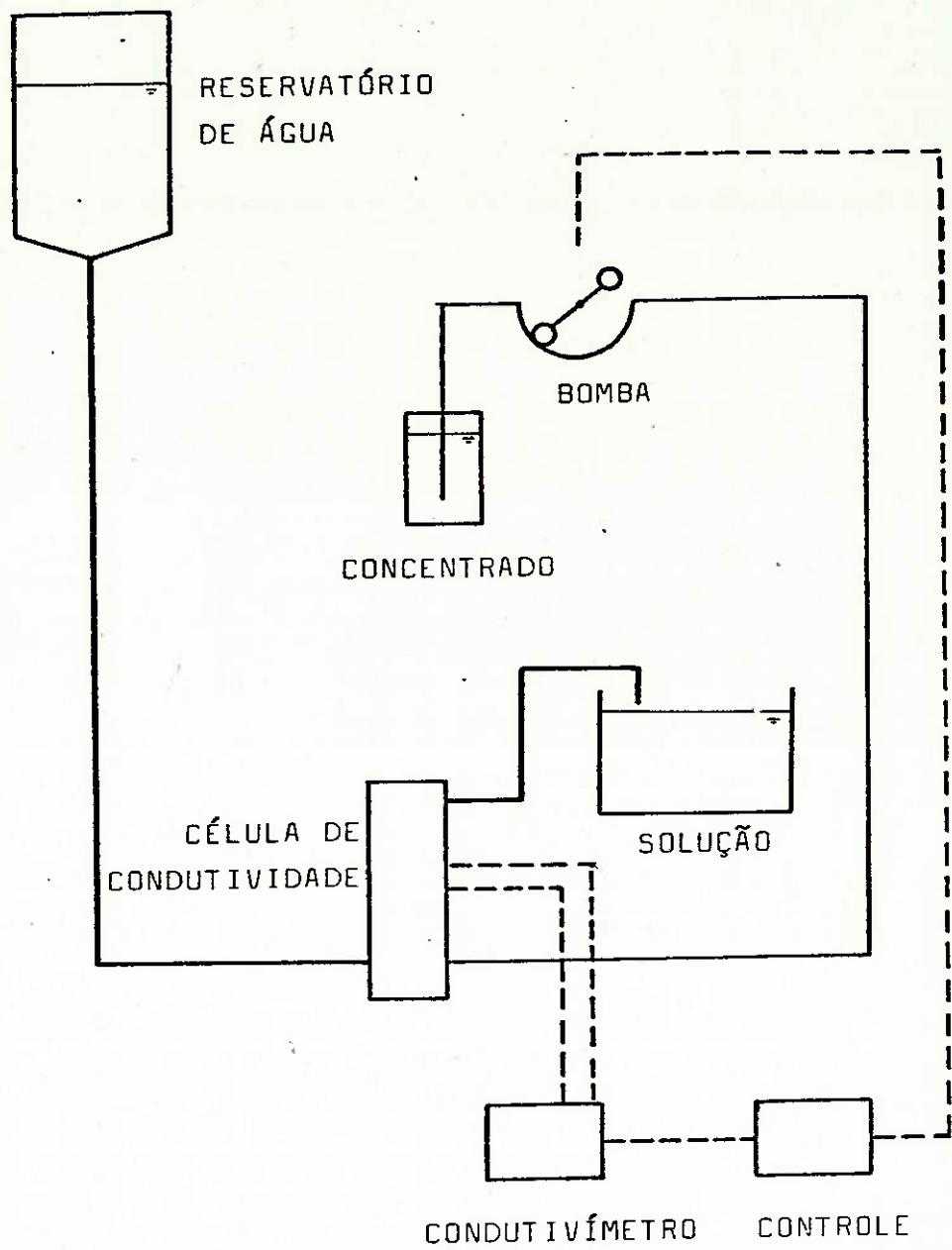
HP 355C

Amplificador (diferencial)

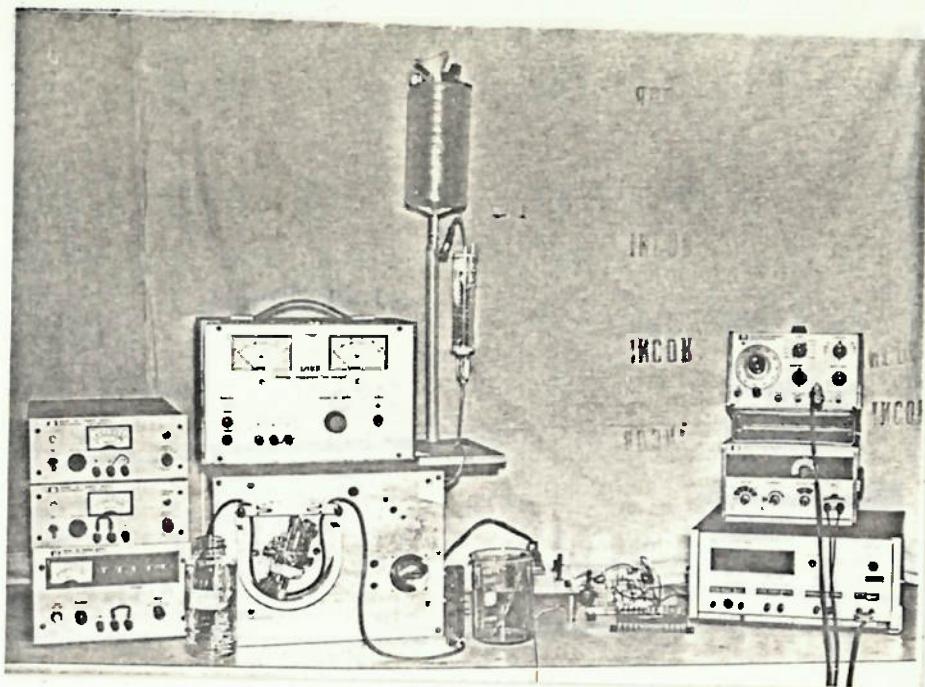
TEKTRONIX AM502

ARRANJO EXPERIMENTAL

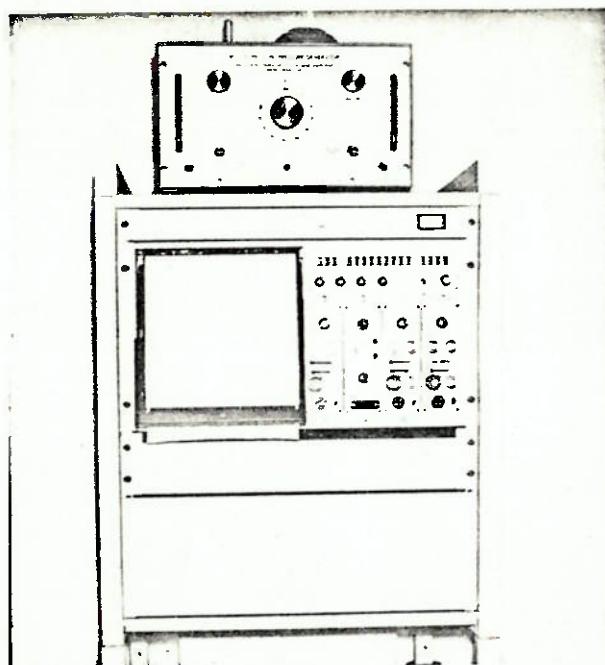
Para gerar a vazão de água na qual o concentrado deve ser dosado foi feito um arranjo simples. Água destilada foi alimentada por gravidade na câmara de mistura, a partir de um reservatório colocado a aproximadamente 70 cm do nível da câmara. Tubos flexíveis de PVC (equipos para soro) foram utilizados, e para regular a vazão foi colocado um dispositivo que permite estrangular o tubo, variando sua área de escoamento. A vazão utilizada nos ensaios foi de aproximadamente 1,2 ml/s.



ESQUEMA DO PROTÓTIPO



VISTA GERAL DO EQUIPAMENTO MONTADO PARA TESTES.



ASPECTO DO REGISTRADOR TÉRMICO UTILIZADO

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

A tensão de saída do condutivímetro depende da amplitude do sinal injetado pelo gerador na solução. Para calibrar o circuito, o seguinte procedimento foi adotado:

- A saída do gerador de sinal foi ajustada para:
 - forma de onda: senoidal
 - frequência: 1 kHz
 - tensão: 15 mV RMS
- Com um resistor-padrão ($10k\ \Omega$), a leitura no condutivímetro foi conferida. Seu valor deve estar em torno de 63 mV (faixa admissível 62.7 - 63.3).

AVALIAÇÃO DO SET-POINT

Após calibração, uma solução 0,9% NaCl (soro fisiológico) foi circulada através da célula de condutibilidade fornecendo uma leitura média de: 559 mV.

ENSAIOS

Foi realizada uma série de ensaios variando-se parâmetros do circuito: ganho do amplificador e constante de tempo do filtro; e a vazão de entrada de água destilada. Cada um dos ensaios foi monitorado, registrando-se o valor do sinal de realimentação (saída do condutivímetro), após passar pelo filtro de entrada, e a tensão de alimentação do motor.

1º ENSAIO

Características:

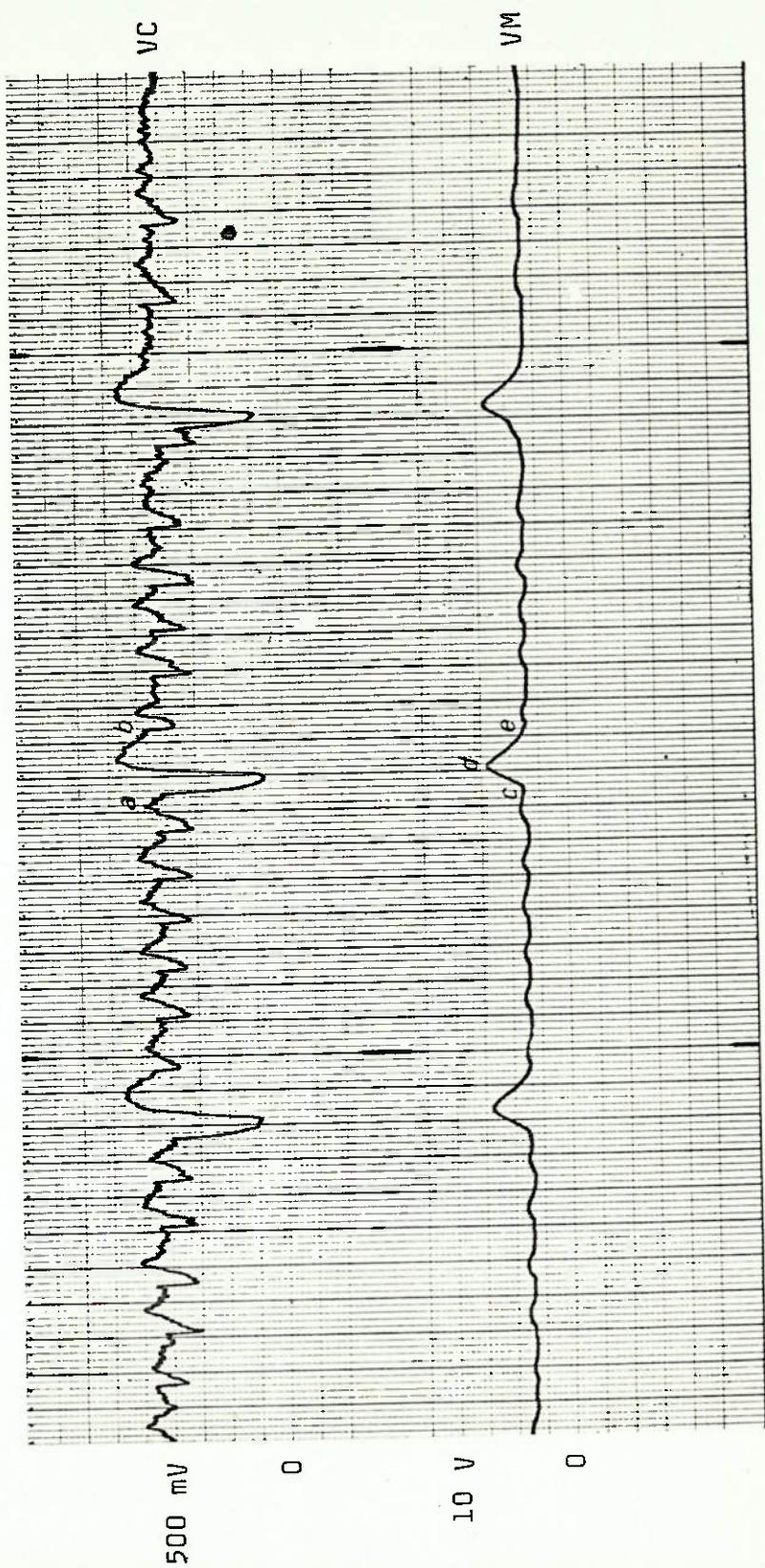
Constante de tempo do filtro	2,2 s.
Set Point	550 mV
Ganho do Amplificador	21,5
Vazão de água: constante	~ 1,2 ml/s.
Velocidade do papel	2,5 mm/s

Apesar de apresentar uma oscilação bastante grande, a tensão de saída do condutivímetro (VC) apresenta valor mé dio bastante próximo de 550 mV. O ganho do amplificador foi determinado ajustando-se o resistor variável de ganho até que a VC se aproximasse do set-point

A oscilação apresentada no trecho *a-b* é uma característica da bomba de roletes. Quando um rolete está bombeando líquido, ele mantém um trecho do tubo flexível de lá tex totalmente colabado. Conforme este rolete chega ao final de seu curso de bombeamento, ele libera esse trecho de tubo, fazendo com que a pressão, e como consequência, a vazão de saída, caia. Por isso, a concentração cai bruscamente, levando o motor a acelerar, conforme mostra o aumento de tensão de alimentação do motor (VM) no trecho *c-d*. Com isto a vazão de concentrado aumenta rapidamente, fazendo com que o motor desacelere (trecho *d-e*) e estabilize a seguir.

Este comportamento será observado em todos os ensaios, e sua frequência é igual ao dobro da frequência de ro-

tação do motor. Como em todos os ensaios a velocidade de registro foi a mesma, pela simples observação do espaçamento desses eventos pode-se avaliar se a velocidade do motor cresceu ou diminuiu. Esta oscilação não apresenta problemas quanto à concentração porque é aproximadamente simétrica em relação ao valor médio da concentração.



1º ENSAIO

2º ENSAIO

Características:

Constante de tempo	2,2 s
Set-Point	550 mV
Ganho do Amplificador	9,0
Vazão de água	1,2 ml/s
Velocidade do papel	2,5 mm/s

A redução de ganho à metade levou à estabilização de VC ao redor de 400 mV, mas com a diminuição das oscilações. A tensão VM também se torna mais estável, com valor de 2,5 V. A correção da queda de concentração (trecho *a-b*) também se torna mais lenta, como era de se esperar.

3º ENSAIO

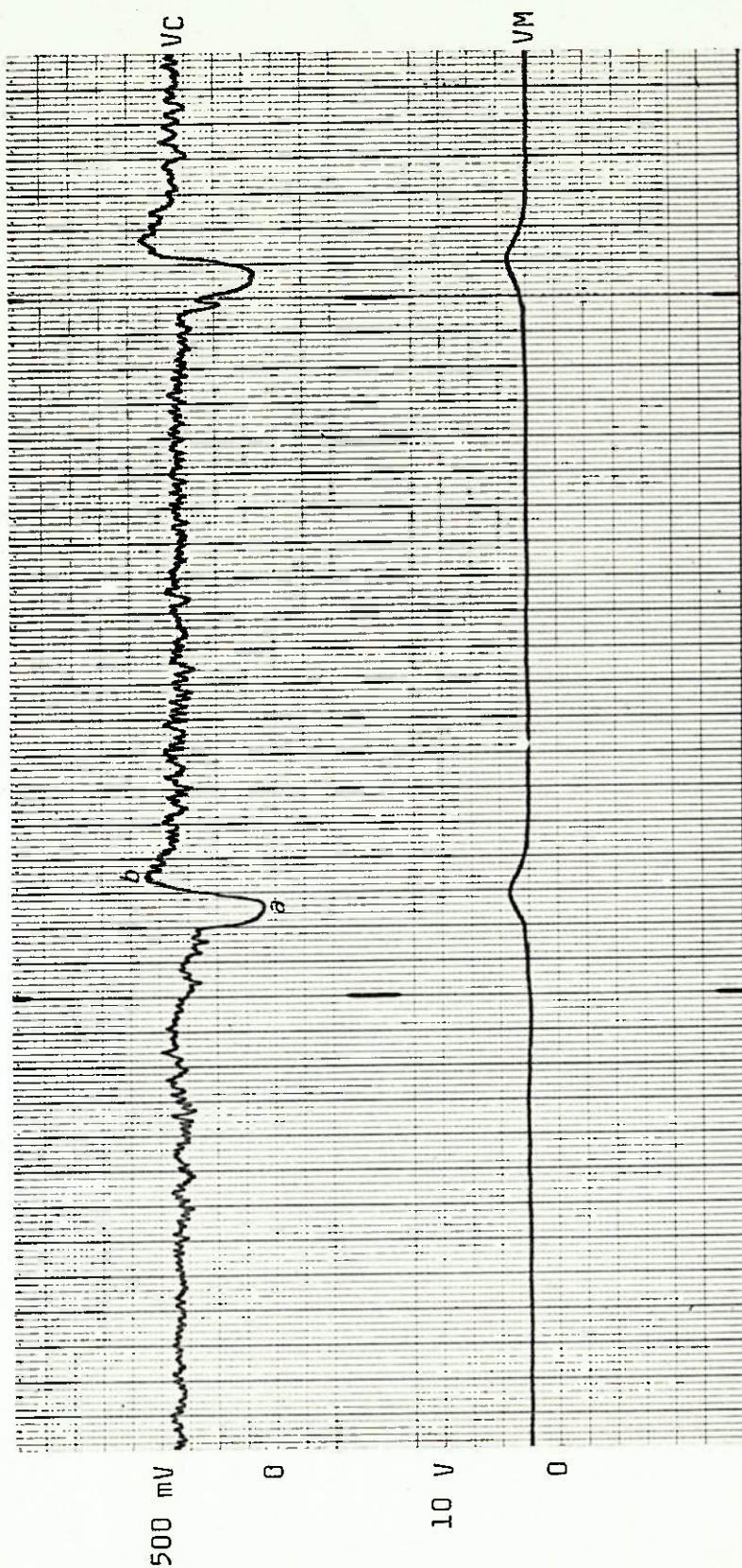
Características:

Constante de tempo	2,2 s
Set-Point	550 mV
Ganho do Amplificador	42,8
Vazão de água	1,2 ml/s
Velocidade do papel	25 mm/s

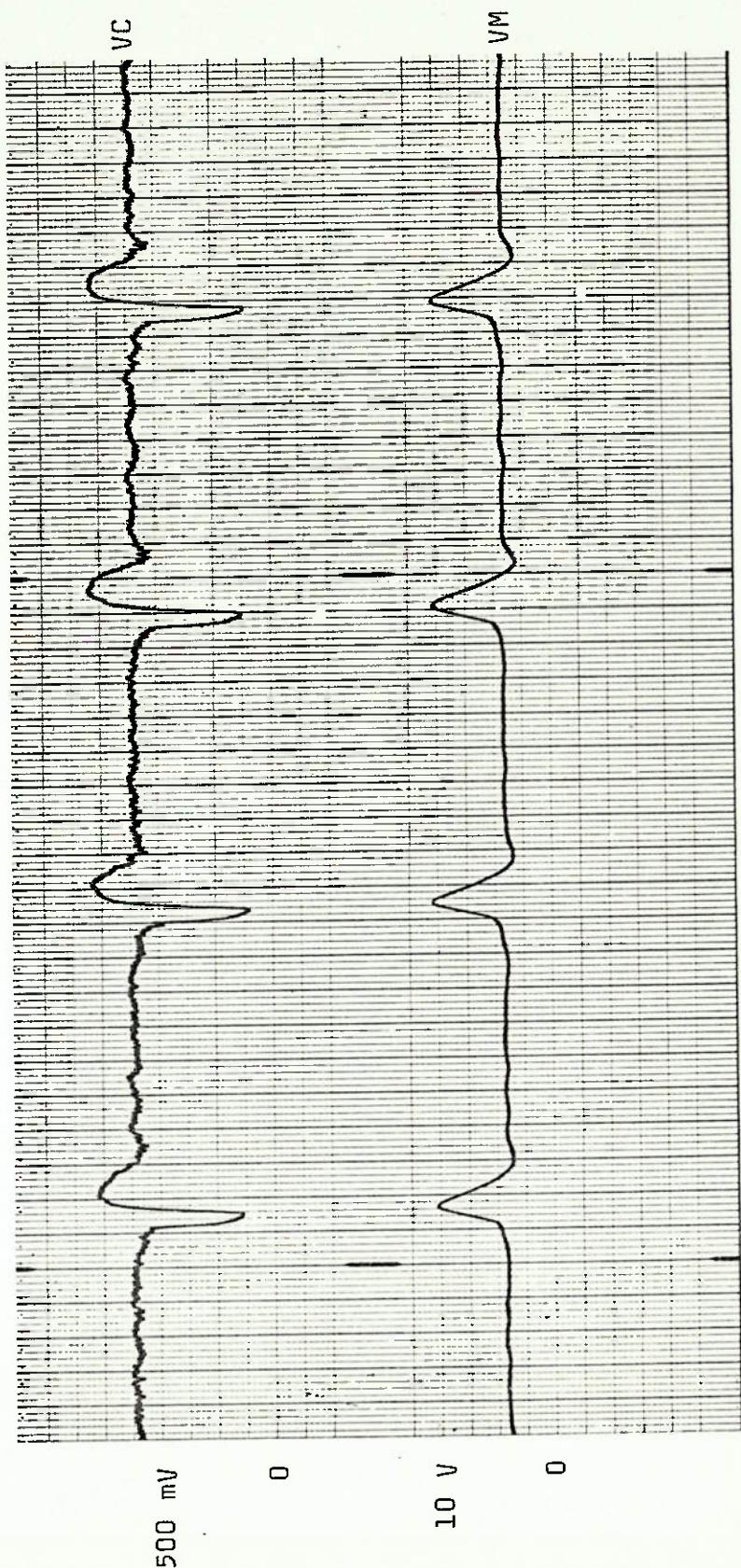
Com o aumento do ganho, duas vezes maior (vamos sempre nos referir ao ganho do 1º Ensaio), o sistema se torna mais rápido na correção de flutuações, mas agora a concentração se estabiliza acima do set-point ($VC \approx 700$ mV). A oscilação devido à bomba torna-se mais aguda, e o pico de tensão

são no motor maior.

Com este resultado podemos começar a concluir que na configuração adotada do sistema de controle, o valor de estabilização da concentração depende do valor do ganho.



2º ENSAIO



3º ENSAIO

4º ENSAIO

Características:

Constante de tempo	1 s.
Set Point	550 mV
Ganho do Amplificador	21,5
Vazão de água	1,2 ml/s
Velocidade do papel	2,5 mm/s

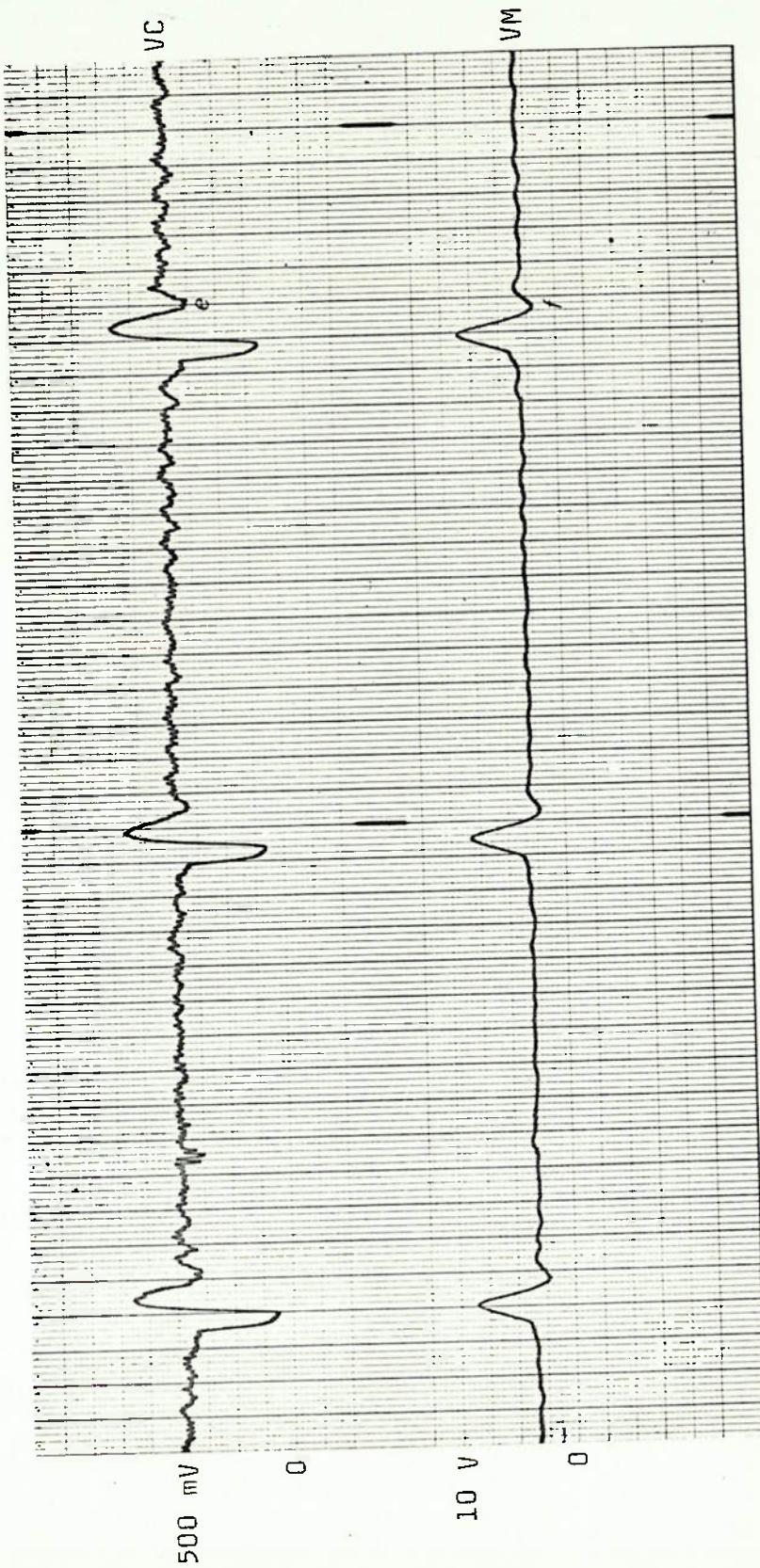
A diminuição da constante de tempo levou o sistema a se tornar mais rápido, em relação ao 1º Ensaio. No entanto, ele apresenta tendência a oscilar, como mostram os pontos e e f. O valor médio de VC está abaixo do set-point e VM se estabilizou em torno de 5,5 volts. $\overline{VC} = 475$ mV.

5º ENSAIO

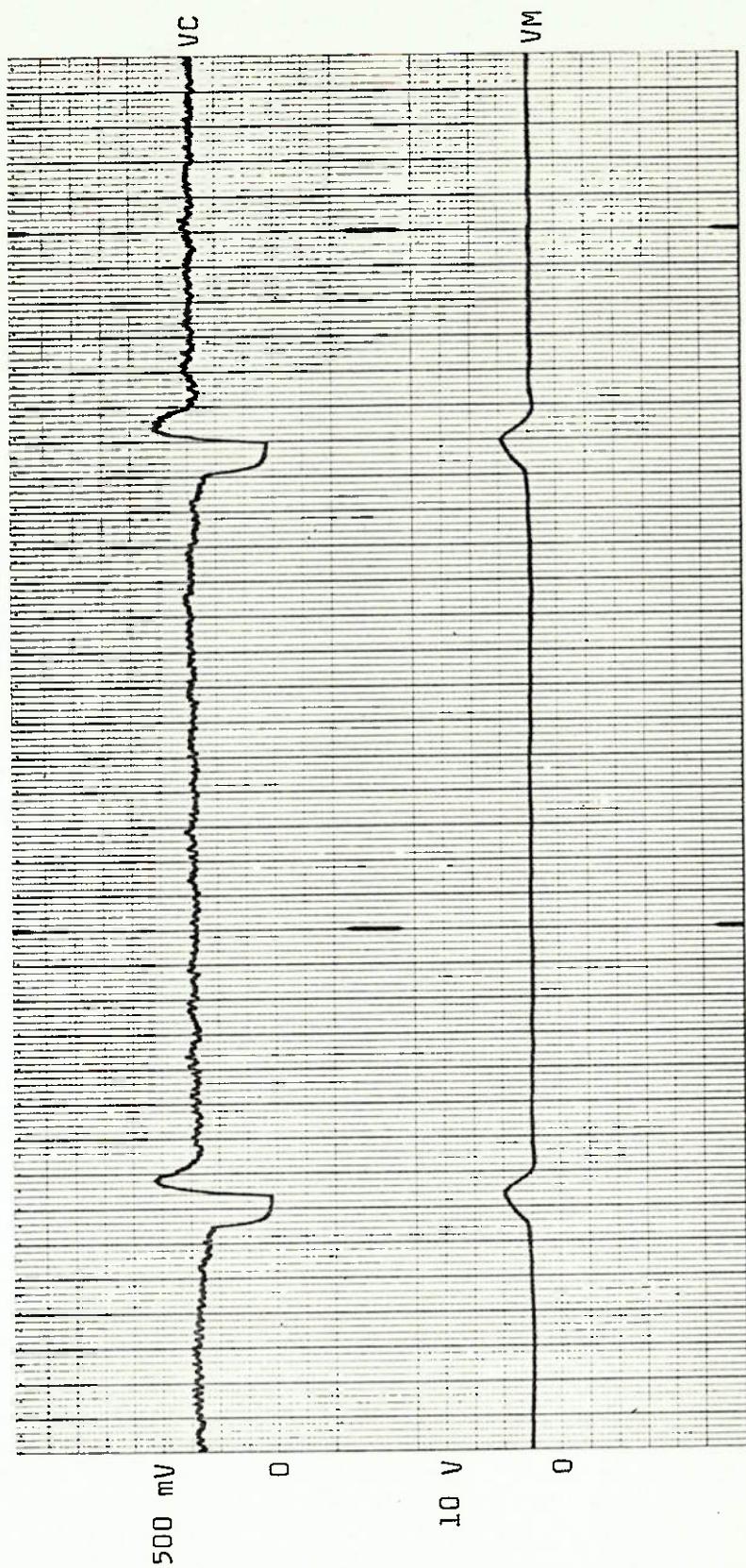
Características:

Constante de tempo:	1 s.
Set Point	550 mV
Ganho do amplificador	9,0
Vazão de água	1,2 ml/s
Velocidade do papel	2,5 mm/s

Repetiu-se o comportamento observado na 1a. série de ensaios. O sistema tornou-se mais lento, com oscilações menores e o valor médio de VC menor que o Set-point. $(\overline{VC} = 350$ mV).



4º ENSATO



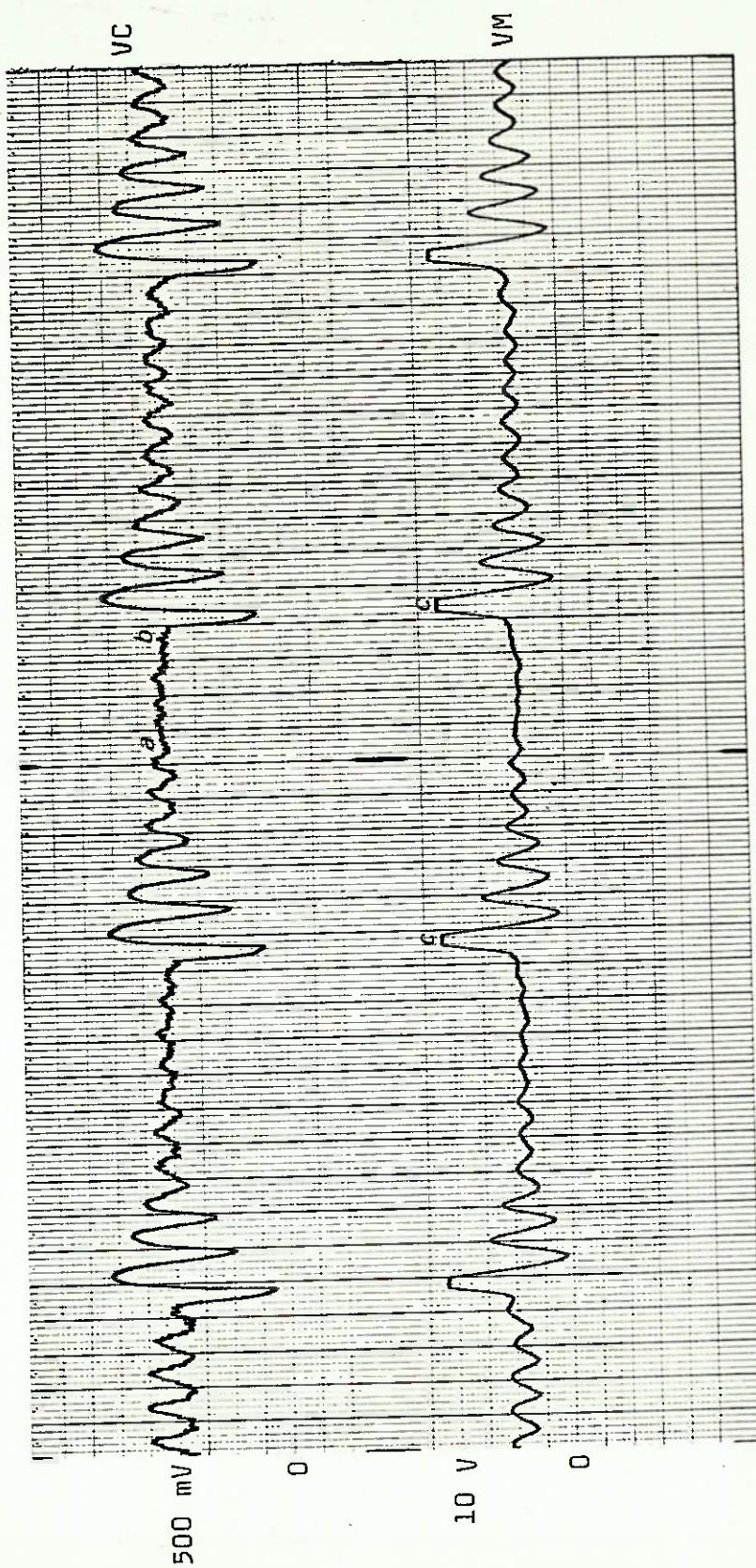
5º ENSAIO

6º ENSAIO

Características:

Constante de tempo:	1,0 s.
Set point	550 mV
Ganho do Amplificador	42,8
Vazão de água	1,2 ml/s.
Velocidade do papel	2,5 mm/s.

A redução da constante de tempo e o aumento do ganho levaram o sistema a oscilar bastante. No entanto ele apresentou tendência a estabilizar em torno do set-point, - como mostra o trecho $a - b$. A tensão de alimentação do motor chegou a saturar, como mostram os pontos c .



69 ENSAIO

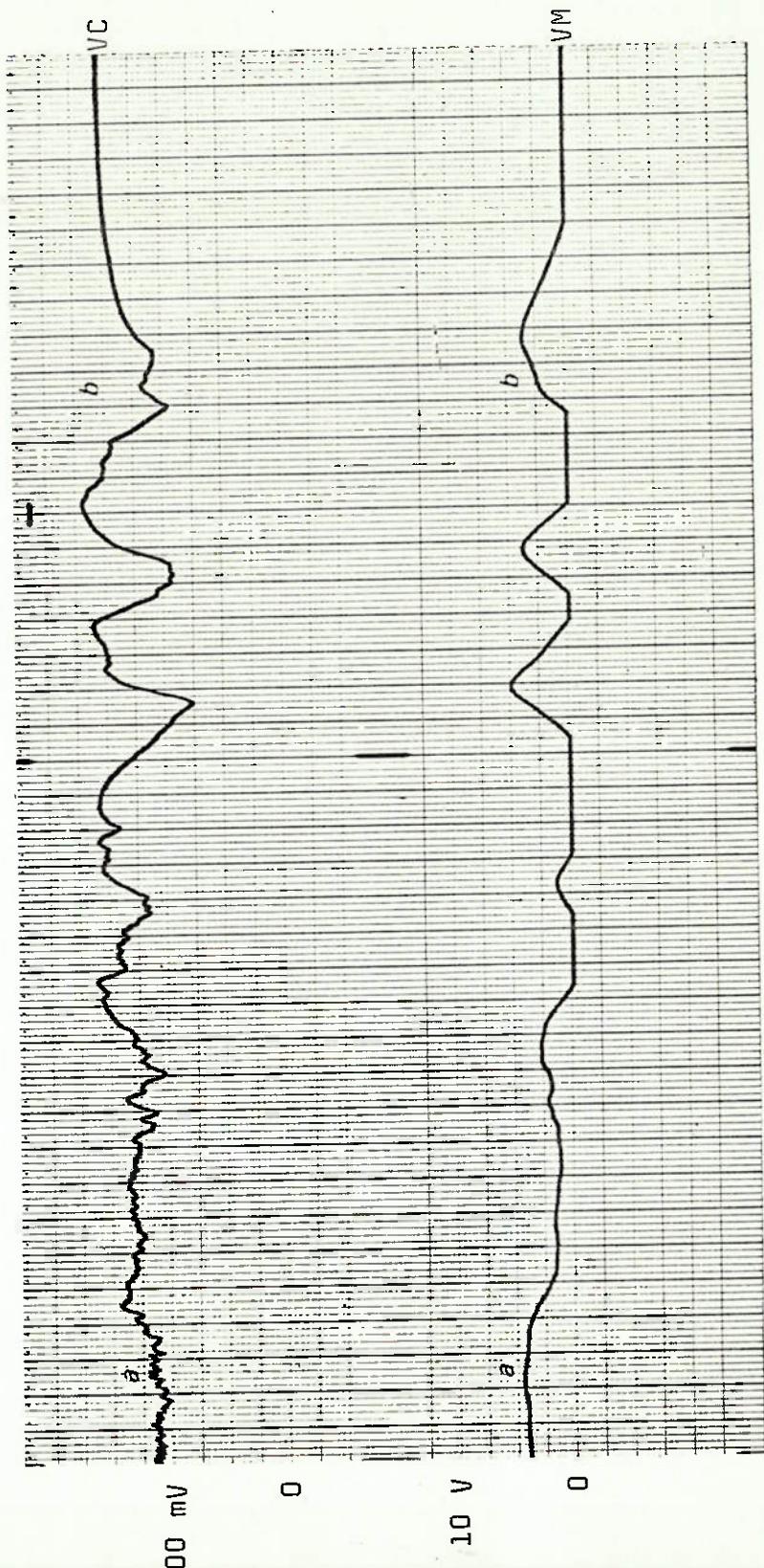
7º ENSAIO

Características:

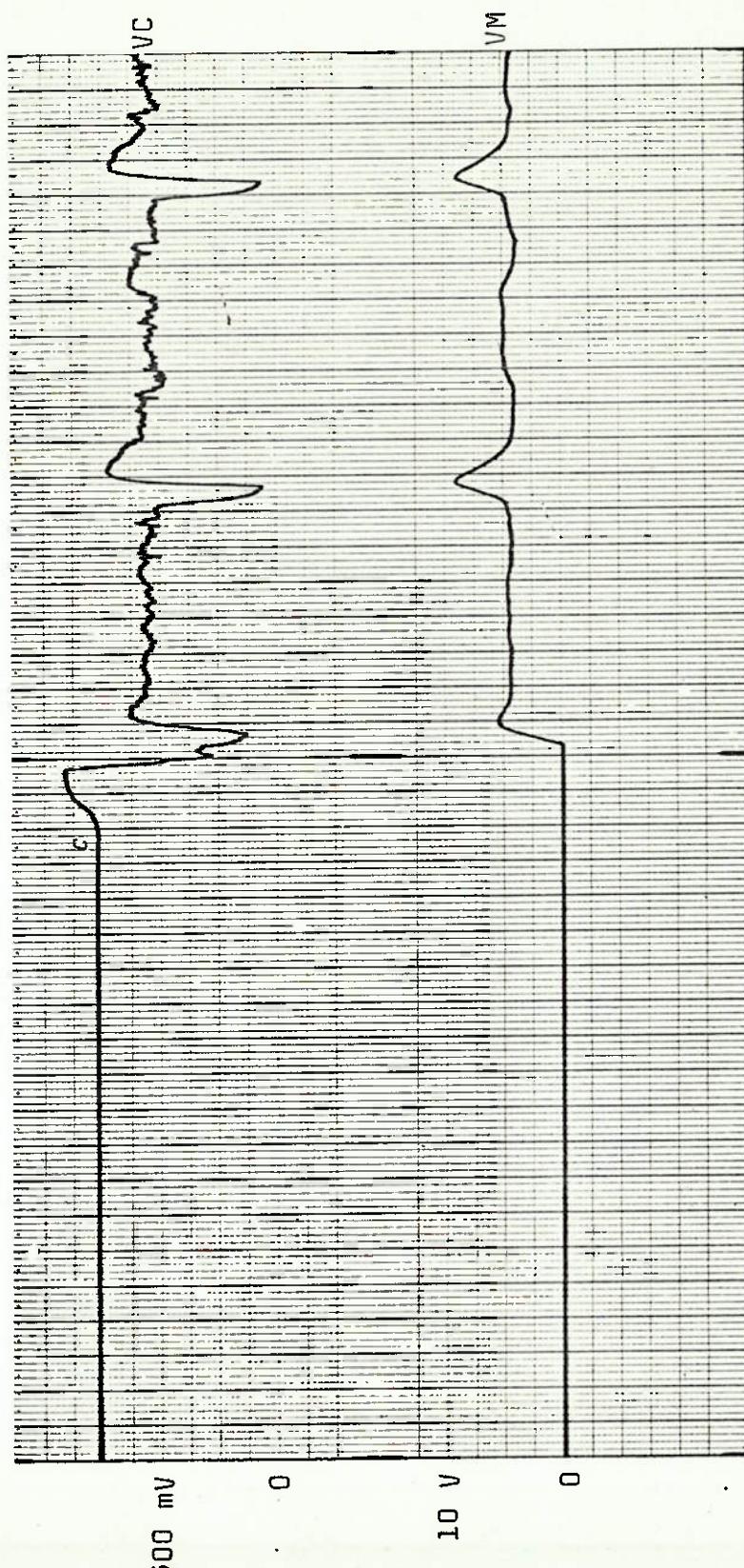
Constante de tempo	2,2 s.
Set-Point	550 mV
Ganho do Amplificador	29
Vazão de água	variável
Velocidade do papel	2,5 mm/s.

Neste ensaio a entrada do condutivímetro foi bloqueada. Assim foi cortada a entrada de água destilada. O estrangulamento foi iniciado no ponto *a*. Mas até o ponto *b* houve ainda uma pequena vazão. Por isso a bomba ainda se movimentou. Depois do ponto *b*, com o bloqueio total da vazão, a bomba parou e a concentração estabilizou-se acima do set-point ($VC = 750$ mV).

A seguir, a vazão foi novamente reestabelecida, no ponto *c*. Devido a uma pequena quantidade de concentrado retido no ponto de dosagem, a concentração sofre um pequeno aumento, para então cair bruscamente. Com o valor de ganho que foi ajustado (29), a concentração estabiliza-se em torno do set-point.



7º ENSAIO : Bloqueio da entrada do Condutivímetro



7º ENSAIO : Abertura da entrada do Conductivímetro

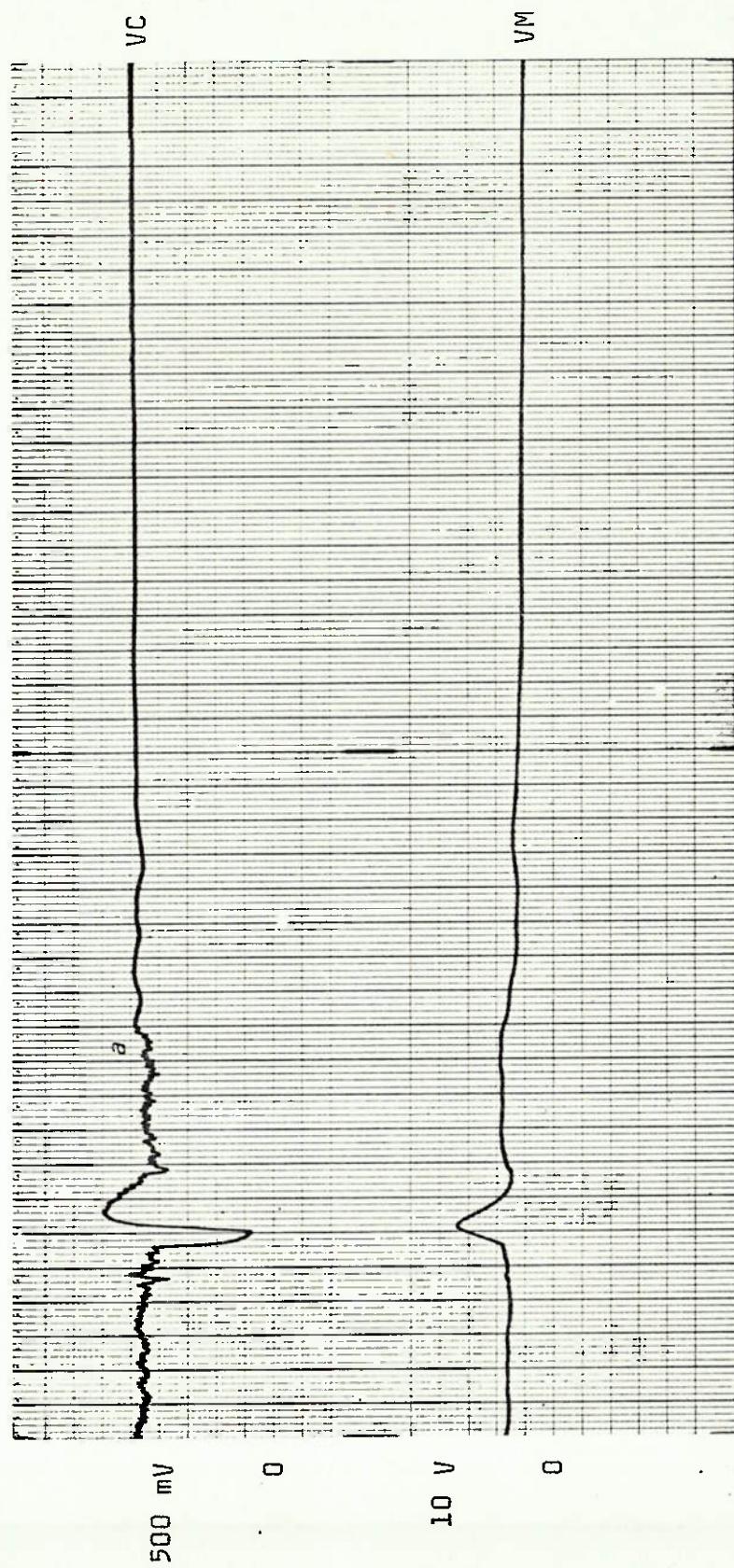
8º ENSAIO

Características:

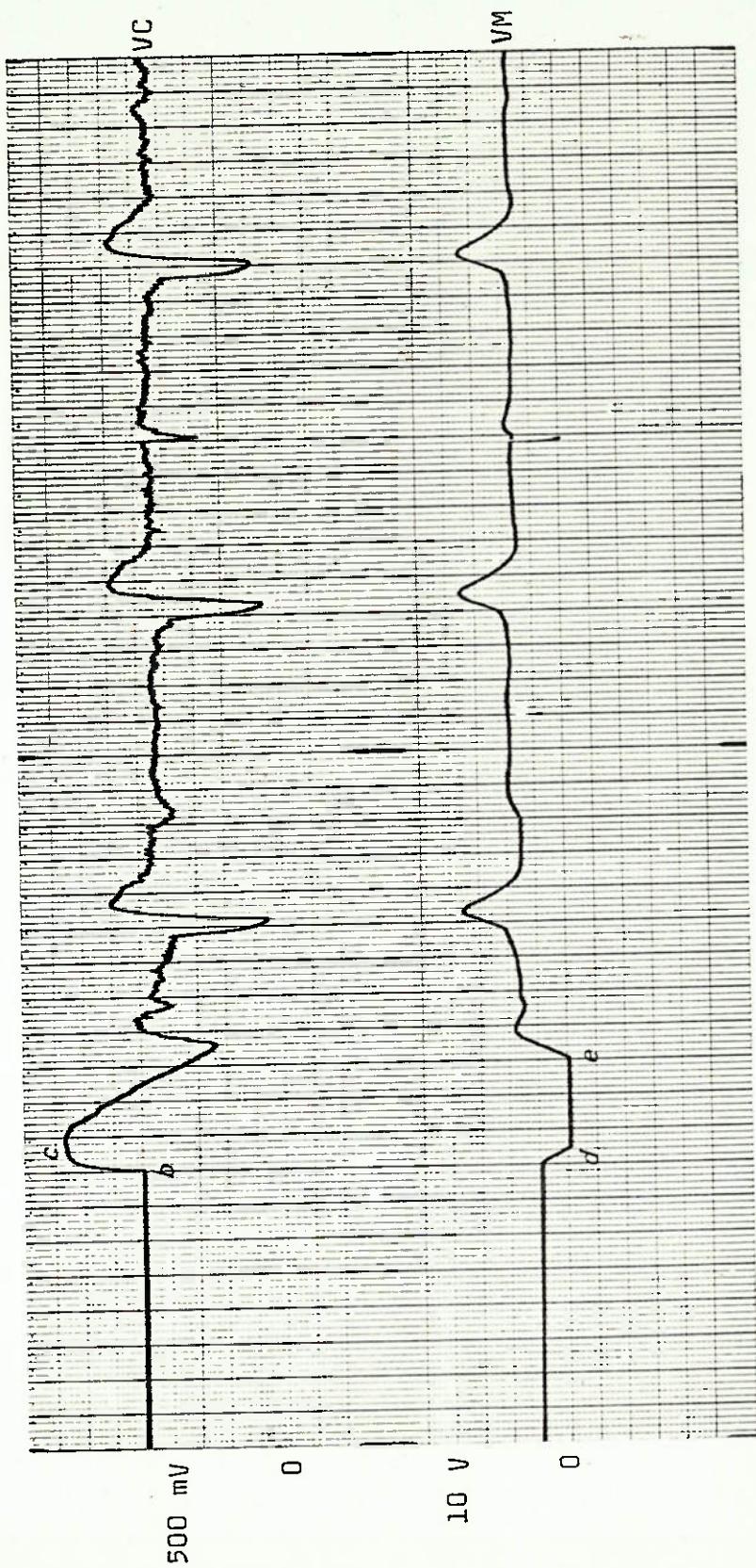
Constante de tempo	2,2 s.
Set Point	550 mV
Ganho do Amplificador	29
Vazão de água	variável
Velocidade do papel	2,5 mm/s.

Neste ensaio a saída do condutivímetro foi bloqueada. No ponto *a* foi iniciado o bloqueio. O estrangulamento - foi total e a concentração estabilizou-se ligeiramente acima do set-point ($VC = 575$ mV). Porém a bomba, conforme mostra VM, não parou. Na realidade, a bomba começou a bombear concentrado em direção contrária, pois por se tratar de uma bomba de deslocamento positivo, conseguiu superar a pressão representada pela coluna de água na entrada do condutivímetro.

Ao ser aberta a saída, a quantidade de solução bastante concentrada que se encontrava nos tubos antes do condutivímetro fez com que a leitura de concentração cresça rapidamente (trecho *b* - *c*), fazendo inclusive com que a bomba parasse (trecho *d* - *e*), Depois a concentração estabiliza-se rapidamente em torno do set-point.



8º ENSAIO : Bloqueio da saída do Condutivímetro



8º ENSAIO : Abertura da saída do Condutivímetro

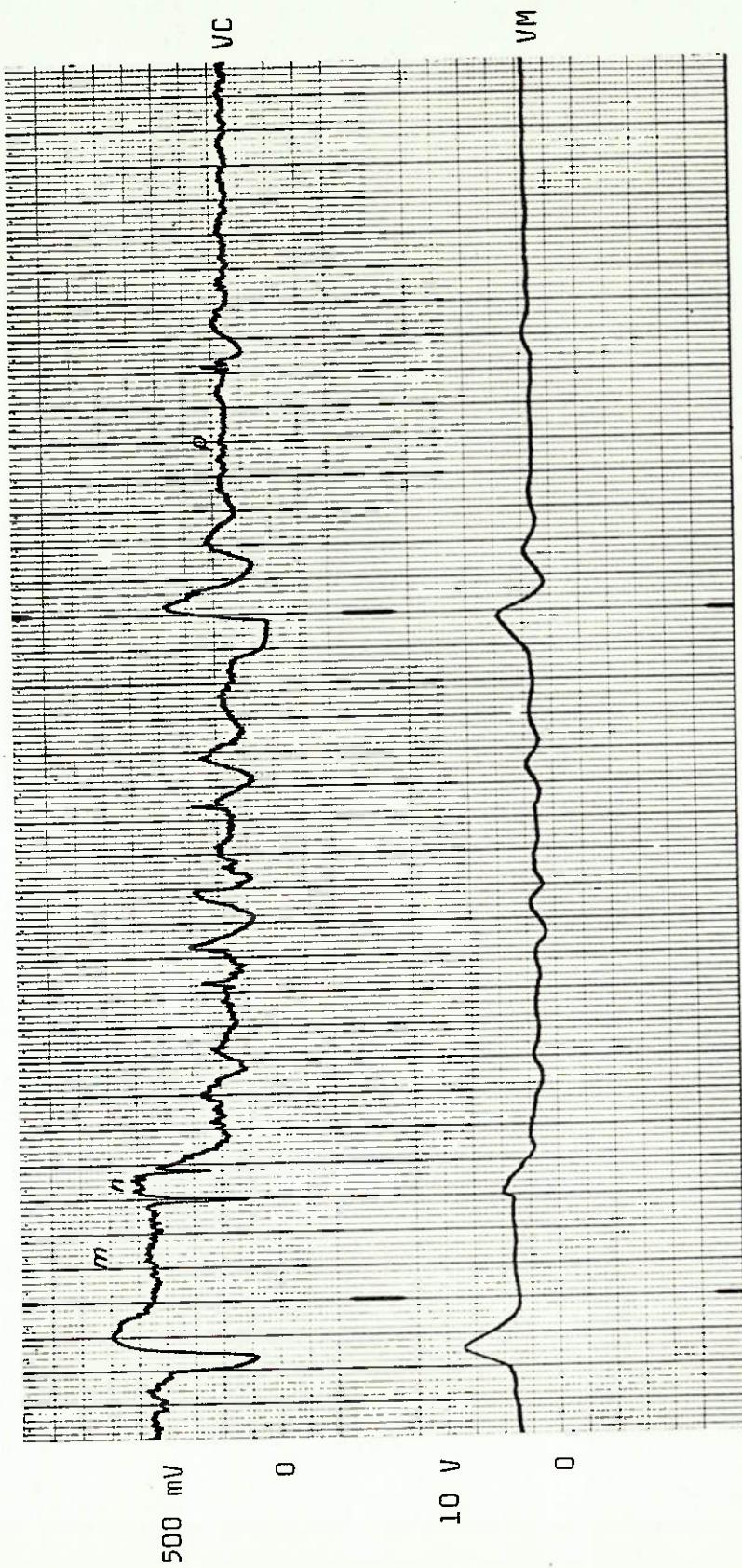
9º ENSAIO

Características:

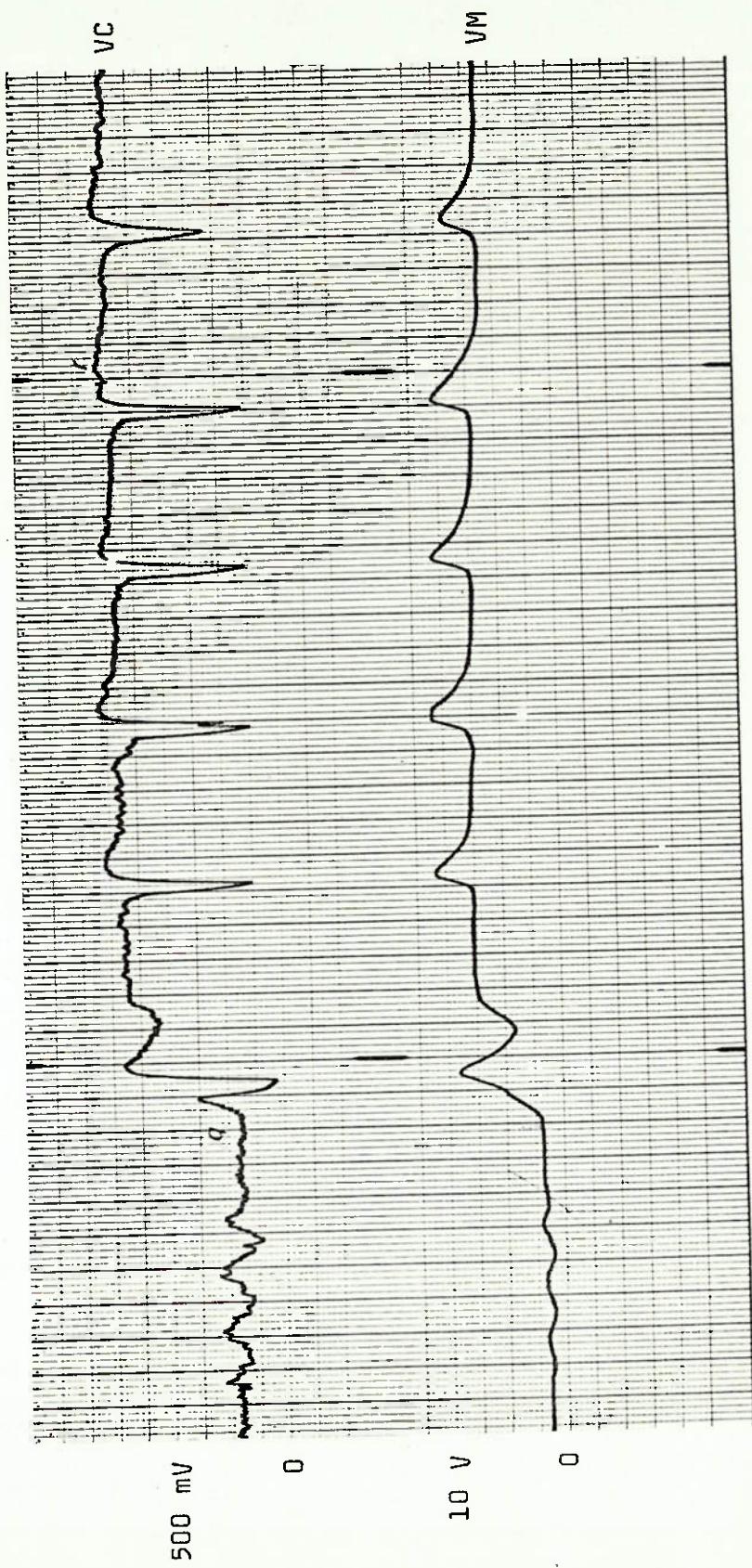
Constante do tempo:	2,2 s.
Set-Point	variável
Ganho do Amplificador	29
Vazão de água	1,2 ml/s.
Velocidade do papel	2,5 ml/s.

Aqui foi observado o comportamento do sistema com a mudança do set-point. No ponto m temos o $SP = 550$ mV, com o VC próximo a este valor ($VC = 575$ mV). A partir do ponto n o SP foi abaixado, até atingir o valor de 100,7 mV. Esta queda não foi muito rápida, devido a limitações do gerador, e por isso a queda de concentração também foi um pouco lenta. O sistema se estabilizou a partir do ponto p , com $VC \sim 100$ mV, portanto bastante próximo do set-point estabelecido.

No ponto q o SP foi aumentado, até atingir o valor de 803 mV. O aumento do SP foi bem mais rápido e por isso a estabilização ocorreu mais rapidamente e no ponto r a concentração se estabilizou, com $VC = 750$ mV, e portanto abaixo do SP .



9º ENSAIO : Diminuição do Set-Point



9º ENSAIO : Aumento do Set-Point

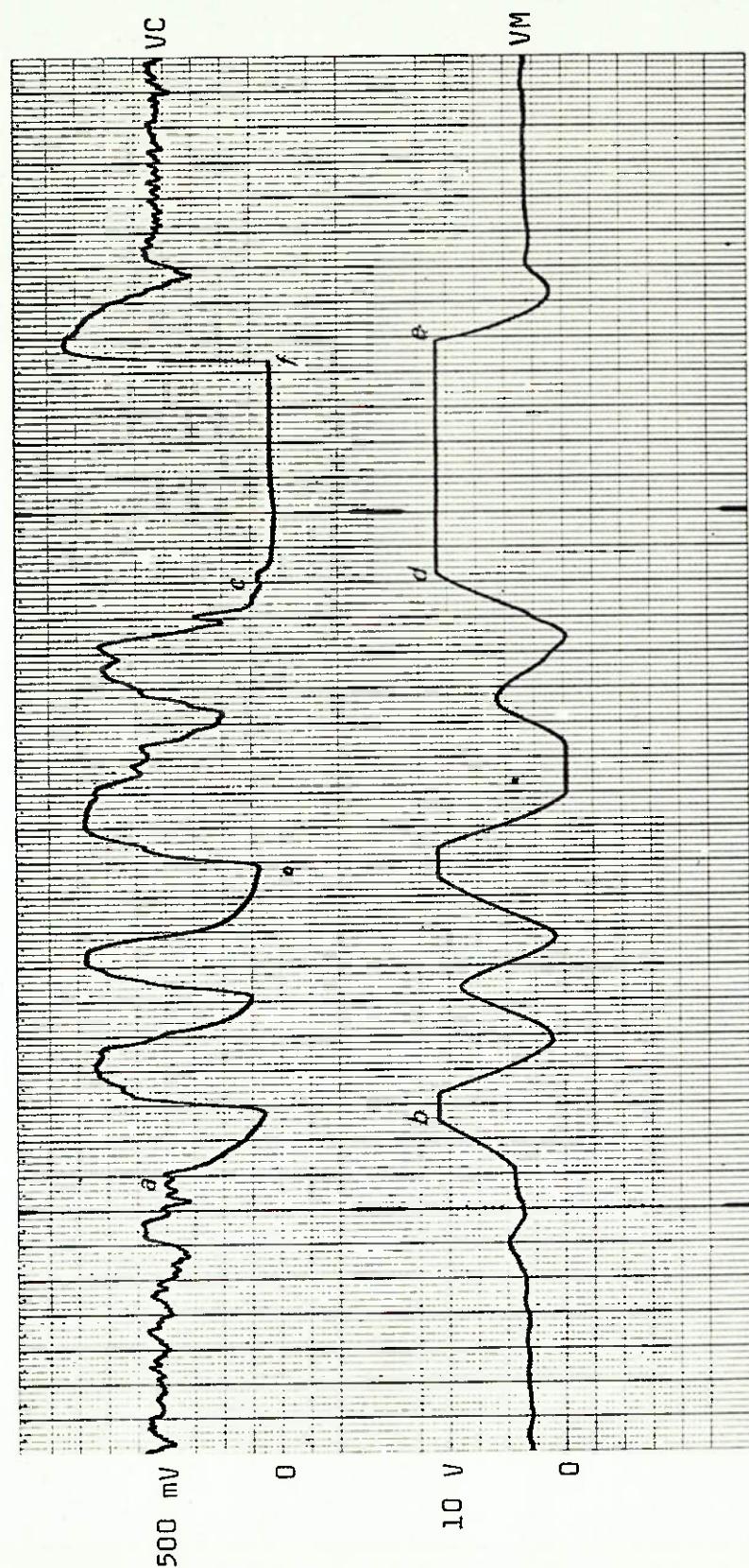
10º ENSAIO

Características:

Constante de tempo	2,2 s.
Set-Point	500 mV
Ganho do amplificador	29
Vazão de água	1,2 ml/s.
Velocidade do papel	2,5 mm/s.

Neste ensaio a saída da bomba foi gradualmente obstruída, até não permitir a passagem do fluido. A partir do ponto *a*, o tubo flexível de látex é gradualmente obstruído. Com isto a concentração começa a cair rapidamente e a bomba atinge a rotação máxima (ponto *b*). Conforme a saída é obstruída, a bomba começa a apresentar um comportamento tipo liga-desliga, porque a baixas rotações, devido à restrição, ela não consegue manter vazão de concentrado. Por isso é obrigada a chegar à rotação máxima, injetando grande quantidade de concentrado, e depois parar, porque a concentração atinge valores muito altos.

Finalmente no ponto *c* a saída é totalmente obstruída, fazendo a concentração cair a zero. A bomba começa então a girar na sua rotação máxima (trecho *d - e*). Isto é possível porque o tubo de látex é flexível, e a pressão do concentrado aumentou no trecho anterior à obstrução. Quando o tubo é totalmente desobstruída (ponto *f*), a concentração cresce rapidamente, devido à grande vazão inicial de concentrado, para depois estabilizar-se com $VC = 550$ mV.



10º ENSAIO

CONCLUSÃO

Os testes realizados mostram que o sistema é viável, respondendo com rapidez às variações de concentração.

É necessário ainda definir uma célula de condutibilidade e uma camara de mistura definitivas, para dar prosseguimento a este trabalho, já que as utilizadas apresentaram alguns problemas.

Conforme ficou demonstrado nos testes, o valor de concentração em que o sistema se estabiliza depende do ganho do amplificador do controle. Esse problema pode ser contornado se alimentarmos o motor não somente com um sinal proporcional à integral do erro, mas adicionado a um valor constante, que deve ser estimado.

BIBLIOGRAFIA

1. AHMON,M. - Condutivímetro para monitorar concentração salina. Artigo publicado na revista Nova Eletrônica.
2. COUGHANOWR,D.R. & KOPPEL,L.B. - Process Systems Analysis and Control. Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha Ltd., s/d
3. COSTA,A.B. et alli - Medidor de Condutividade e Controlador de Nível Sanguíneo para Câmara de Bolhas de um Rim Artificial. Trabalho de Graduação apresentado à FESP.
4. DENARO,A.R. - Fundamentos da Eletroquímica. São Paulo, Editora Edgard Blucher,1974.
5. MILLER,J.H. et alli - Automated Peritoneal Dialysis: Analysis of Several Methods of Peritoneal Dialysis. Transactions of American Society of Artificial Int. Organs, Volume XII,1966.
6. NOSE,Y. - Manual on Artificial Organs, The Artificial Kidney, Volume I. Saint Louis,C.V.MOSBY Co.,1969.
7. OGATA,K. - Modern Control Engineering. Prentice Hall, 1970.

B. SILVA,R.B. - Compressores, Bombas de Vácuo e Ar Comprimido. São Paulo,Editora do Grêmio Politécnico , 1980.

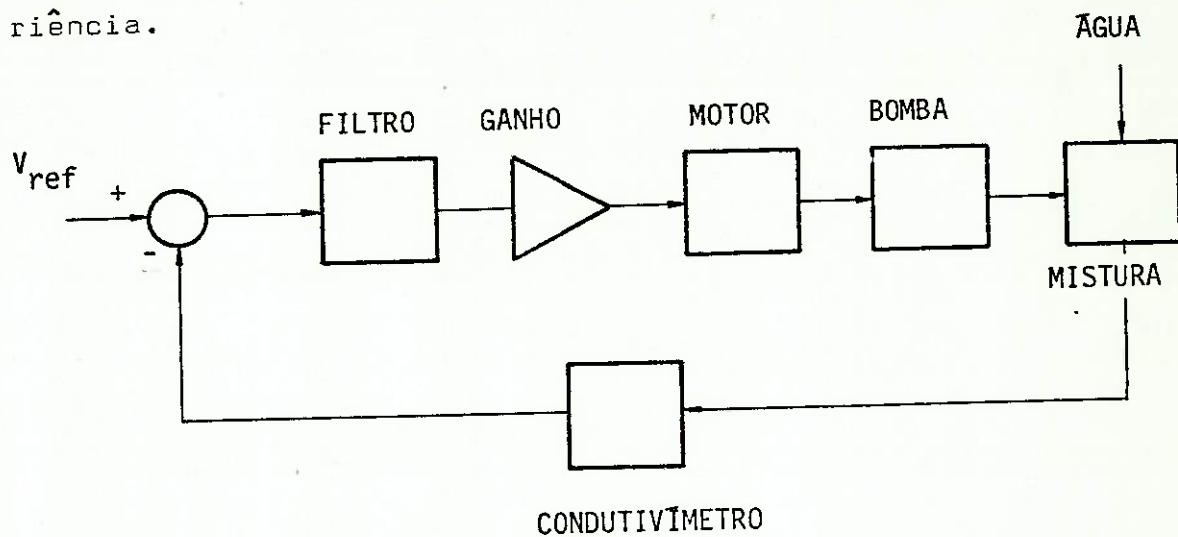
ANEXOS

ANEXO I

MODELO MATEMÁTICO

Durante a fase de definição do protótipo, no auxílio da determinação de alguns parâmetros do circuito elétrico foi simulado um modelo matemático simples. A simulação foi feita no Programa Simulador de Sistemas Dinâmicos (PSSD), adaptado à calculadora HP-85.

O modelo matemático desenvolvido é bastante simples, e não leva em consideração a variação da vazão de concentração no instante da saída do rolete, fato comprovado na experiência.



As equações são:

$$\text{Erro: } E = V_{ref} - V_3$$

$$\text{Filtro: } \frac{dV_1}{dt} + \frac{1}{RC} V_1 = \frac{E}{RC}$$

Amplificador: $V_2 = K \cdot V_1$ onde K é o ganho do amplificador.

Motor: $N = M \cdot V_2$

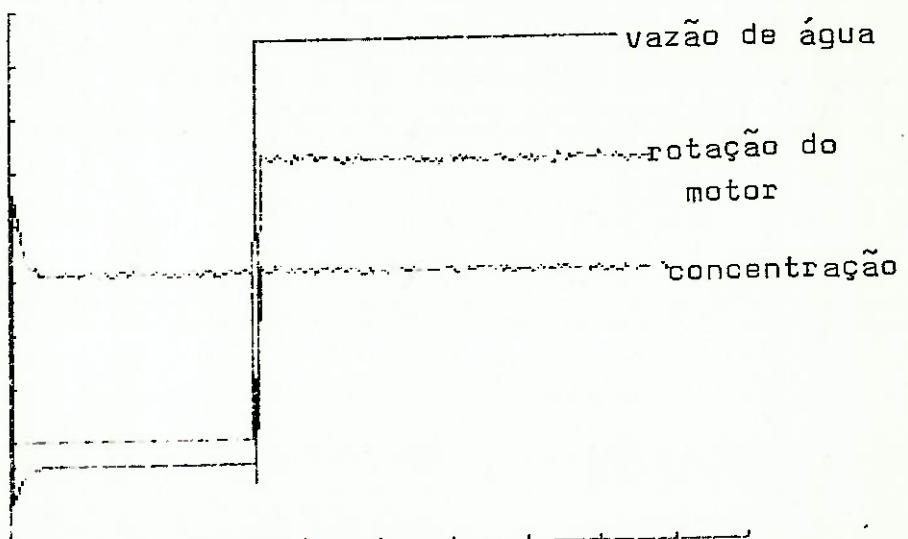
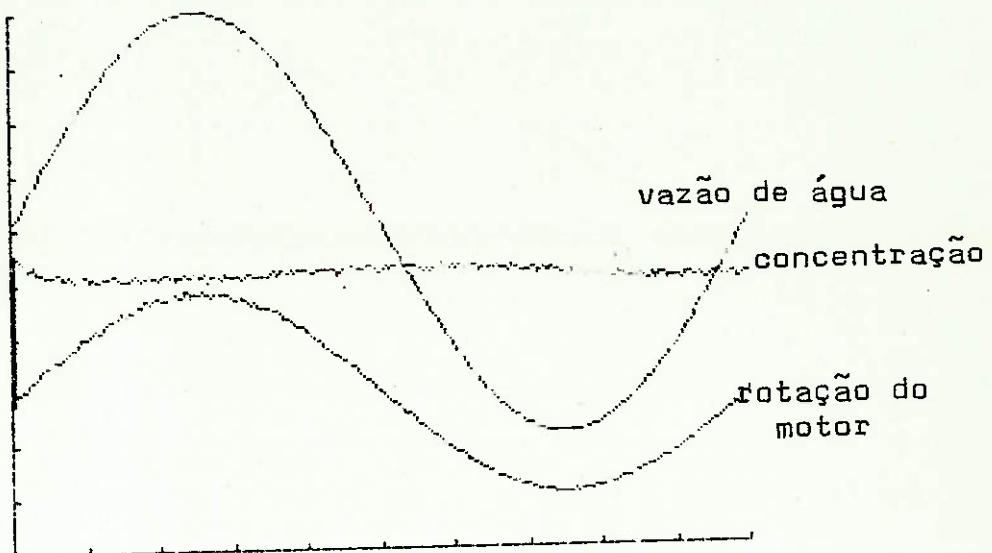
Bomba: $Q_1 = B \cdot N$

Concentração: $C = \frac{Q_1}{Q_2}$ onde Q_2 é a vazão da água.

Condutivímetro: $V_3 = G_1 + G_2 \cdot C$

O modelo foi útil para a determinação da faixa de ganho que torna a concentração de estabilização do sistema igual à da referência. Embora tenha diversas simplificações, foi útil na definição de parâmetros.

Alguns dos resultados obtidos com a simulação estão em anexo.



Resultados obtidos com a simulação do sistema

ANEXO II

CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO

A. Cálculo do Ganho do Amplificador

De acordo com a configuração adotada, o ganho do amplificador, mencionado nos relatórios de Ensaios, foi calculado a partir do resistor R8 e do Trim-pot R9.

$$\text{O ganho é dado por: } \frac{R9}{R8}$$

Outra forma de calcular o ganho seria injetar um sinal conhecido na entrada do amplificador e ler a tensão de saída resultante.

B. Cálculo da Constante de Tempo do Filtro

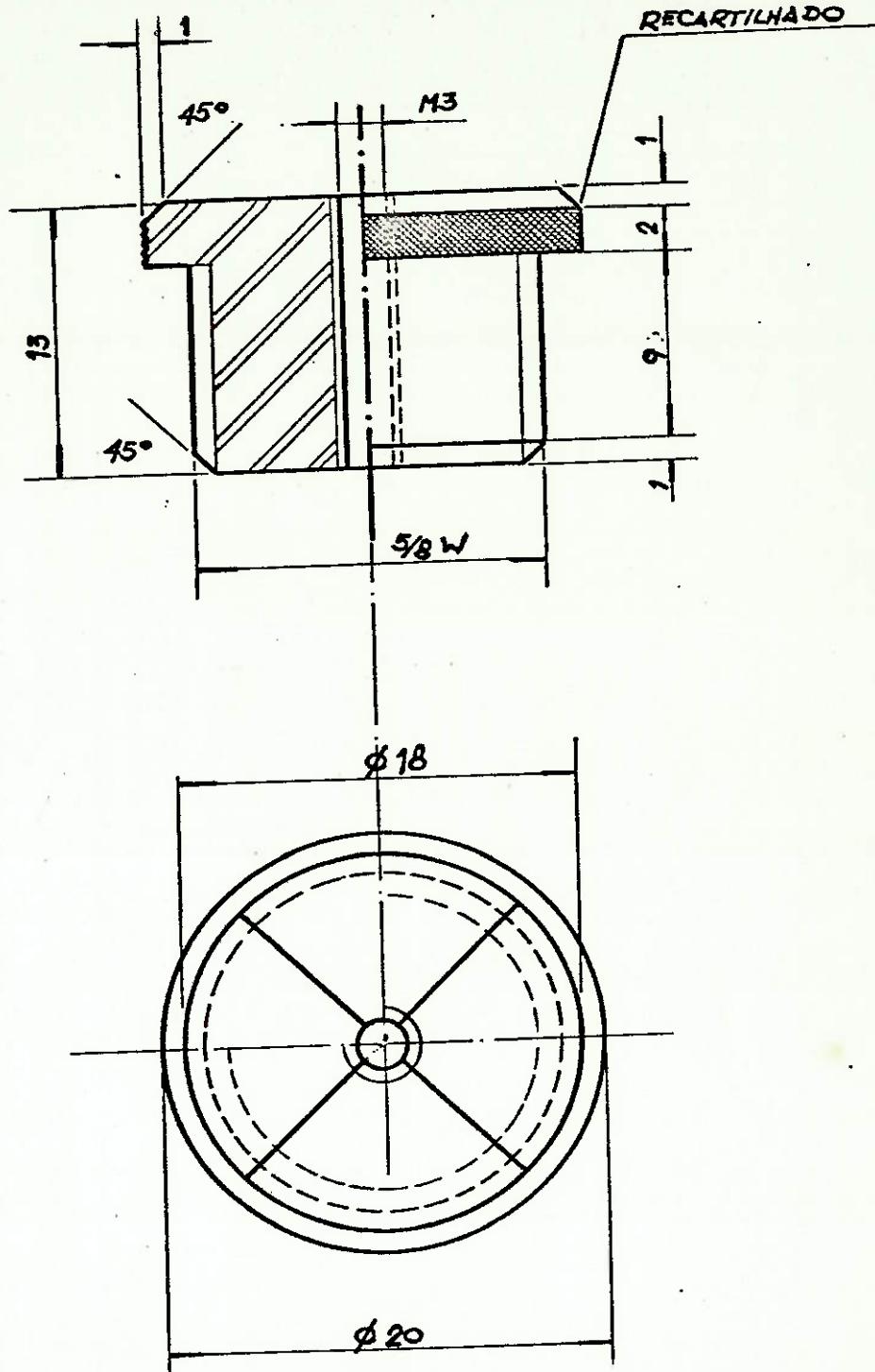
O filtro mencionado é constituído pelos componentes R7 e C2. Como é bastante conhecido, a constante de tempo deste tipo de circuito é dada por:

$$T = R \cdot C$$

Neste caso específico, foi preciso um amplificador operacional, por problemas de impedância.

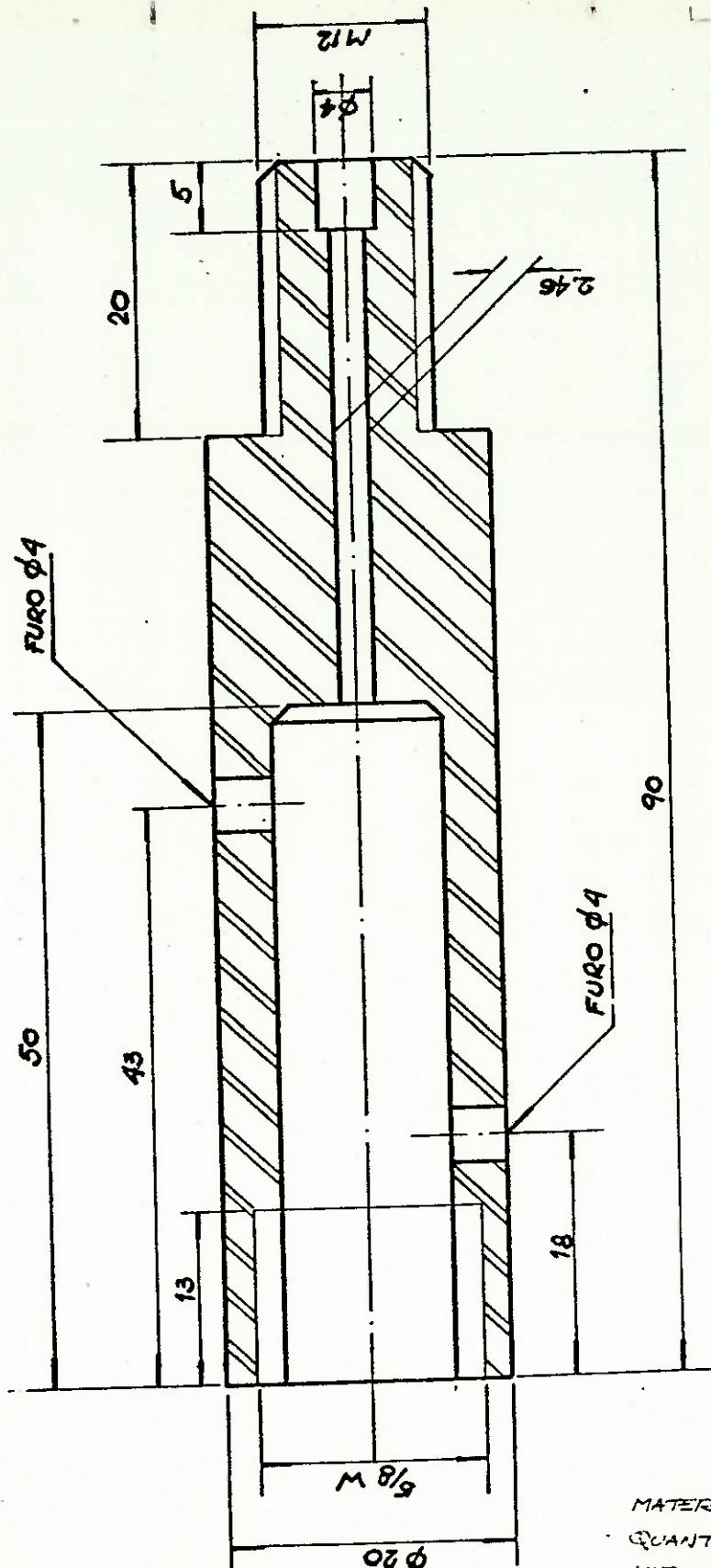
ANEXO 3

DESENHOS



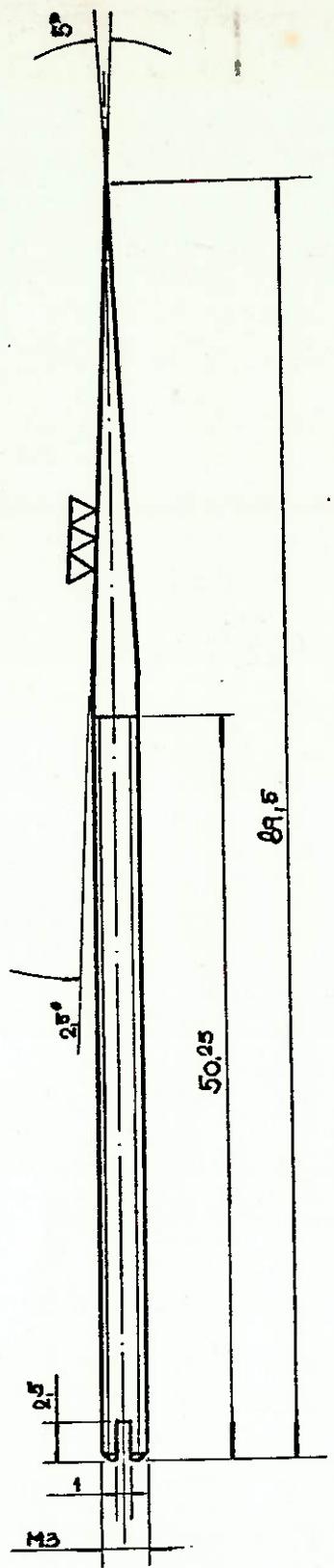
MATERIAL AÇO INOX 3-4
QUANT. 1 PEÇA
MEDIDAS EM MM

DESENHADO:	DATA:	NAME:					
	05/11/81	DAVI					
ESCALA	TÍTULO:						
4:1	TAMPA DO CORPO DE AGULHA DE DOSAGEM						

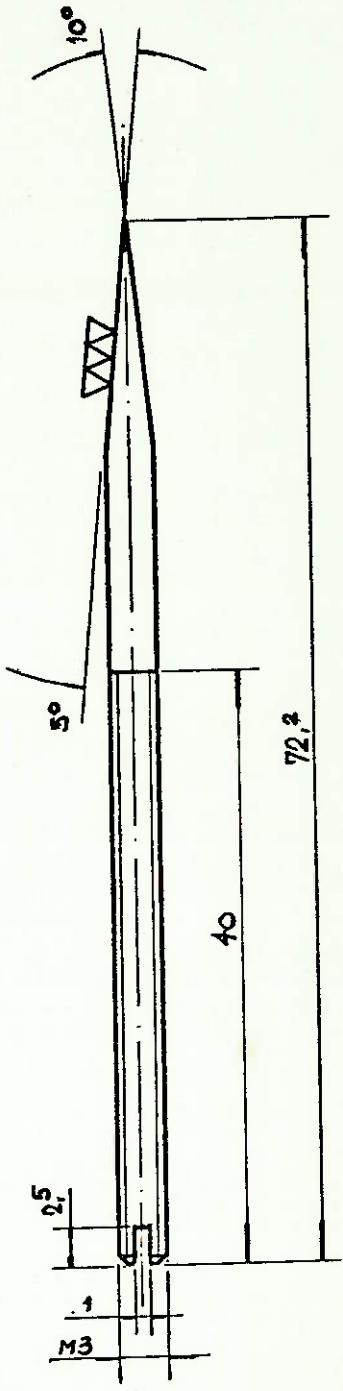


MATERIAL AÇO INOX 304
QUANT. 1 PEÇA
MEDIDAS EM MM

DESENHADO	DATA: 11/11/81	NOME: DAVI				
ESCALA 2:1	TÍTULO: CORPO DE AGULHA DE DOSAGEM					

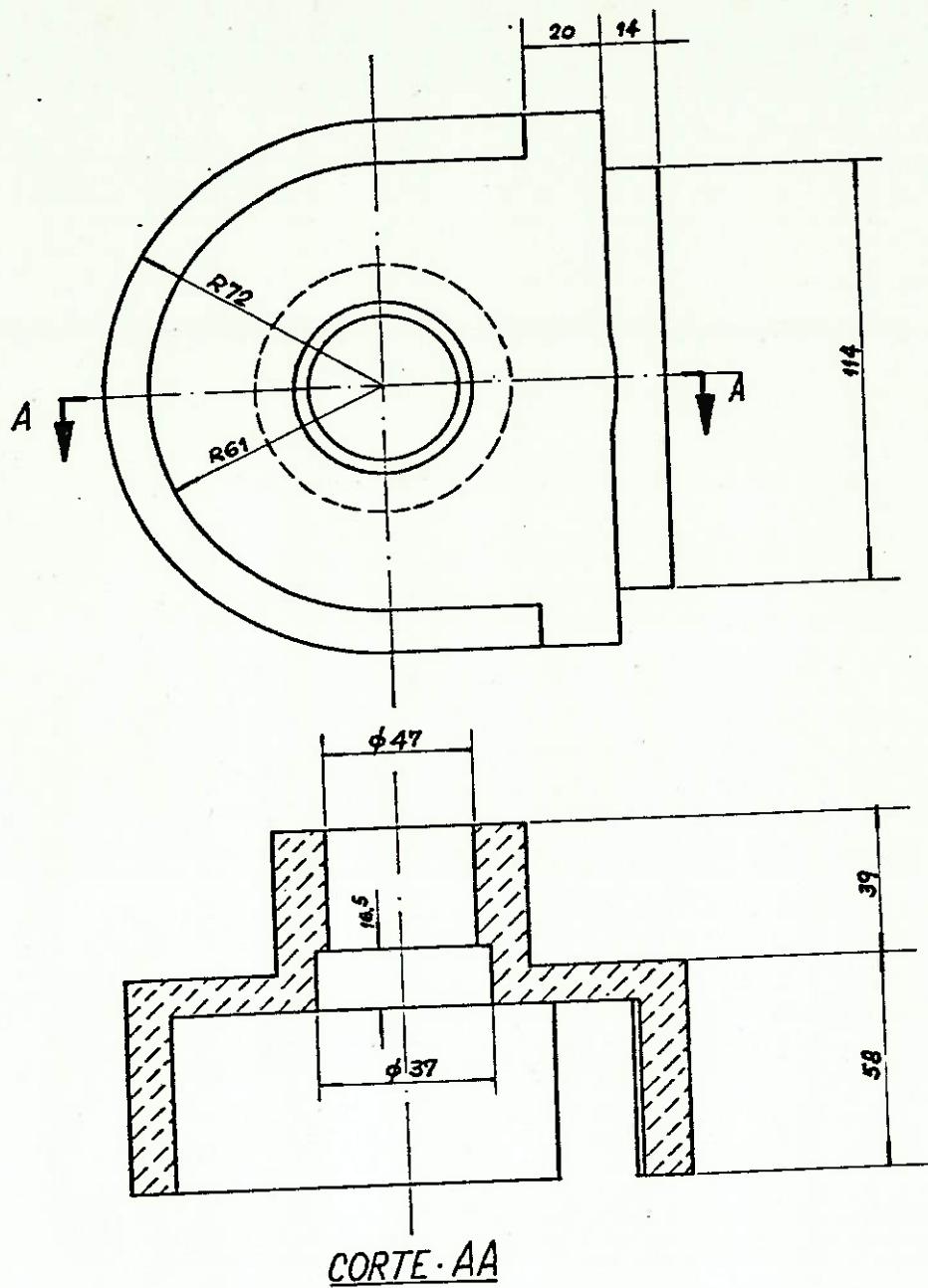


MATERIAL: AÇO INOX 304
 QUANT: 1 PEÇA
 MEDIDAS EM MILIMETROS
 TOLERÂNCIA NAS MEDIDAS LINEARES: ± 0.2 mm.
 TOLERÂNCIA NAS MEDIDAS ANGULARES: $\pm 0.1^\circ$



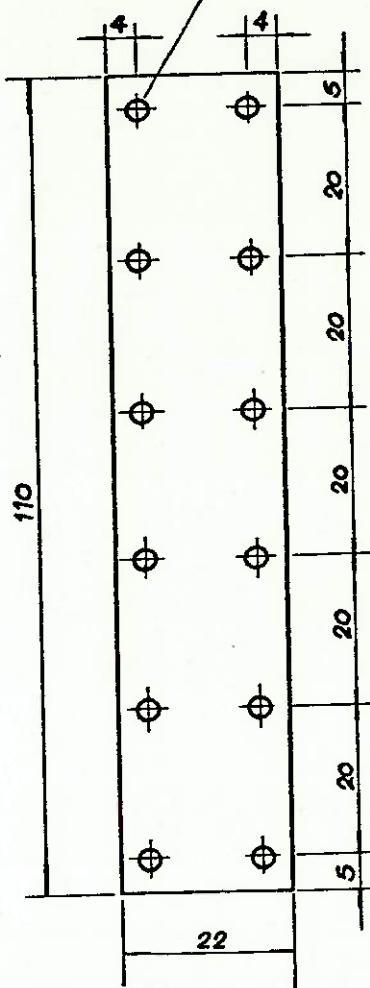
MATERIAL: AÇO INOX 304
 QUANT: 1 PEÇA
 TOLERÂNCIA NAS MEDIDAS LINEARES: ± 0.2 mm.
 TOLERÂNCIA NAS MEDIDAS ANGULARES: $\pm 0.1^\circ$

DESENHADO	DATA:	NOME:					
	12/11/81	DAVI					
ESCALA	TÍTULO:						
2:1	AGULHAS DE DOSAGEM						



Modificações	EPUSP.	Projeto. DIÁLISE PERIT.	Escala 1: 2	Material ALUMINIO
		CAÇAPA (BOMBA DE ROLETES)	Des.	Jay.
				11/06/01

12 FUROS PASSANTES
 $\phi 3.0 \text{ mm}$



Modificações

EPUSP

Projeto
DIALISE PERIT.

Escala
1:1

Material
POLICARB.

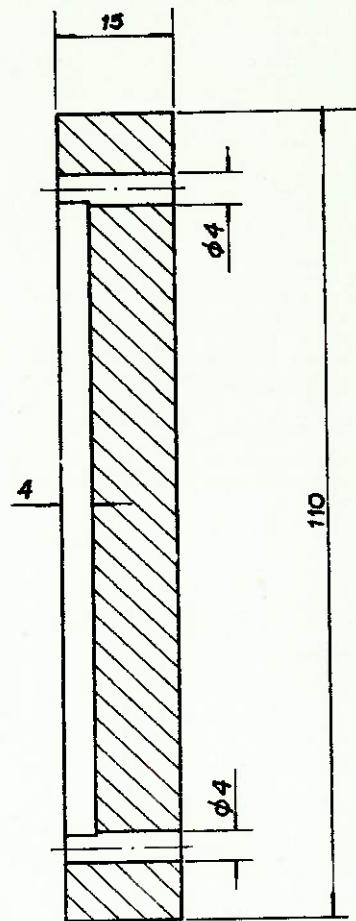
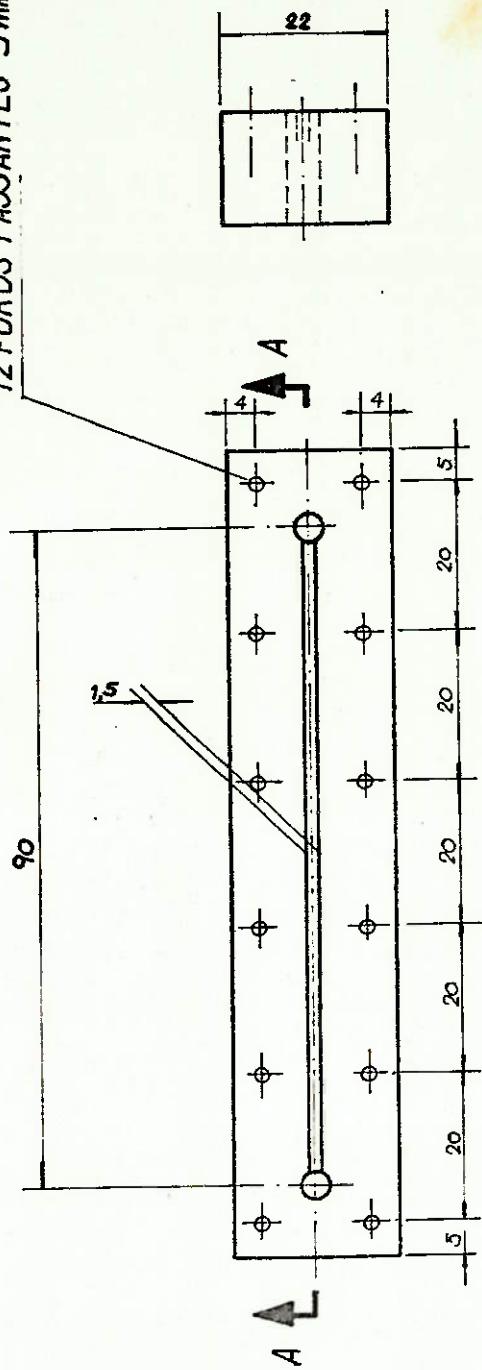
Des.

Jair

15/06/88

TAMPA DE CÉLULA

1/2 FUROS PASSANTES 3 mm



CORTE A.A

Modificações	EPUSP	Projeto DIALISE PERIT.	Escala 1: 1	Material EPOXI
			Des.	Yuri
		CORPO DE CÉLULA		16/06/82