

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL  
DA TESE ENTREGADA POR JOCARLY PATROCÍNIO  
DE SOUZA E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 14 12 92.

João Maurício Rosário  
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

## Tese de Mestrado

### Procedimento Automático para Aquisição e Tratamento do Movimento de um Robô

Autor: Jocarly Patrocínio de Souza

Orientador: Prof. Dr. João Maurício Rosário *ok*

Trabalho apresentado à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

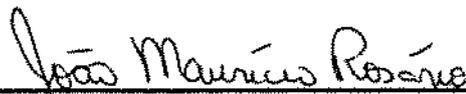
Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Mecânica

**Procedimento Automático para Aquisição e Tratamento do Movimento  
de um Robô**

**Autor: Jocarly Patrocínio de Souza**

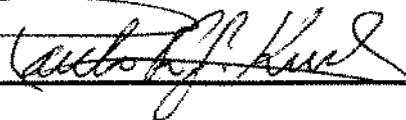
**Orientador: Prof. Dr. João Maurício Rosário**

Aprovada por:



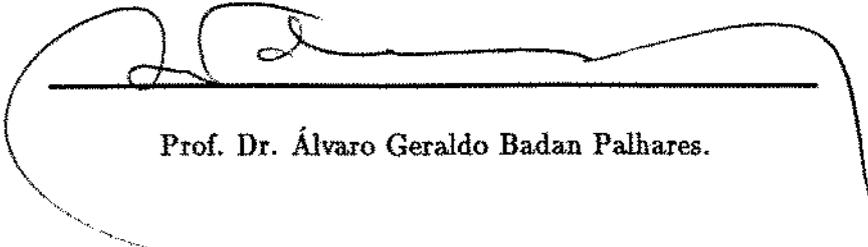
---

Prof. Dr. João Maurício Rosário, Presidente.



---

Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka.



---

Prof. Dr. Álvaro Geraldo Badan Palhares.

Campinas, 14 de dezembro de 1992.

Pelo meus pais Lúcia  
e José Coimbra

Ao meu amor  
Maria Aparecida.

# Agradecimentos

Ao Prof. Dr. João Maurício Rosário pela orientação , estímulo e por todo seu empenho em proporcionar toda infraestrutura necessária a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Álvaro Geraldo Badan Palhares e o Prof. Dr. Paulo Roberto Gardel Kurka por aceitarem participar da bancada examinadora, e pelas diversas sugestões apresentadas que permitiram um enriquecimento deste trabalho.

A toda minha família pelo apoio e carinho.

Aos colegas: José Teodoro Jr., Rita de Cássia Marconcini, Renato de Campos, Joselito Menezes, Luis Antonio Coutinho e, de forma especial ao amigo Márcio Fantini Miranda pela valorosa colaboração na realização experimental.

Aos amigos do *flat*, Edson Santos Acco, Joaquim Gonçalves Costa Neto, Márcio Coelho de Mattos , Gilberto Carvalho Coelho e Marcelo Segatto pelo espírito comunitário e convivência harmoniosa .

Merecem também minha gratidão os técnicos Ferreira, Thiago , Armando e Luiz Morelli pela dedicação e qualidade de seus serviços.

A todos do Departamento de Projeto Mecânico que de uma forma ou de outra contribuíram para realização deste trabalho.

# Conteúdo

<b>CONTEÚDO</b>	<b>5</b>
<b>1 Posicionamento do Problema</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução . . . . .	1
1.2 Descrição de um Robô Industrial . . . . .	1
1.3 Descrição do Controlador . . . . .	4
1.4 Modelo Geométrico de um Robô . . . . .	6
1.4.1 Modelo Geométrico do Robô Manutec r3 . . . . .	7
1.5 Proposição do Trabalho . . . . .	9
<b>2 Procedimento Experimental para Aquisição e Tratamento das Infor- mações</b>	<b>11</b>
2.1 Introdução . . . . .	11
2.2 Gerador de Impulsões Angulares . . . . .	11
2.3 Ferramenta Utilizada na Solução do Problema . . . . .	12
2.3.1 O Grafcet . . . . .	12
2.4 Obtenção do Sentido/Frequência através do Equacionamento Lógico . . . .	14
2.4.1 Obtenção da Frequência de Saída . . . . .	21
2.4.2 Obtenção do Sentido de Rotação . . . . .	23
2.4.3 Esquema Lógico Final . . . . .	24

2.4.4	Comentários . . . . .	24
2.5	Procedimento para Aquisição e Tratamento dos Sinais . . . . .	26
2.5.1	Procedimento Adotado . . . . .	26
2.5.2	Sistema de Aquisição das Informações . . . . .	27
2.5.3	Processo de Tratamento de Dados . . . . .	30
2.6	Comentários . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Validação Experimental da Metodologia</b>	<b>34</b>
3.1	Introdução . . . . .	34
3.2	Ensaio e Resultados das Aquisições do Robô Manutec . . . . .	35
3.2.1	Ponto a Ponto . . . . .	35
3.2.2	Linear . . . . .	37
3.2.3	Ferramenta (WKS) . . . . .	37
3.2.4	Ensaio Realizado . . . . .	38
3.2.5	Resultados dos Ensaio . . . . .	38
3.3	Resultado Experimental - Estudo para Caracterização de um Controlador .	53
3.3.1	Realização Experimental . . . . .	53
3.3.2	Análise da Zona Morta . . . . .	59
3.4	Comentários . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Conclusões e Perspectivas</b>	<b>65</b>
<b>a</b>	<b>Robô Manutec R3 - Especificações Técnicas</b>	<b>67</b>
a.1	Características . . . . .	67
a.2	Especificações . . . . .	68

<b>b</b>	<b>Uma Introdução ao Sistema de Controle Não Lineares</b>	<b>70</b>
b.1	Introdução . . . . .	70
b.2	Generalidades Sobre os Sistemas não Lineares . . . . .	70
b.3	Não linearidade Usuais em Sistema de Controle . . . . .	72
b.4	Estudo do Regime Transitório . . . . .	74
b.4.1	Resposta Temporal do Sistema com Elemento Relé . . . . .	75
b.4.2	Resposta Temporal do Sistema com elemento Relé mais Histerese . .	77
b.4.3	Resposta Temporal do sistema com Elemento Relé mais Zona Morta	78
b.4.4	Outras características . . . . .	79
<b>c</b>	<b>Metodologia para Caracterização de um Controlador do tipo Relé</b>	<b>81</b>
c.1	Metodologia Proposta . . . . .	81
c.2	Simulações . . . . .	84
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>89</b>

## Resumo

Dentro do estudo da Robótica torna-se necessário para a implementação de controladores de posição, o conhecimento do comportamento dinâmico e cinemático de um manipulador. Sendo assim, este trabalho apresenta uma sistemática experimental para aquisição e tratamento do movimento de um robô, a partir das informações dos seus transdutores incrementais de posição de cada junta. A validação experimental é feita utilizando-se o robô industrial MANUTEC r3 para o qual obtemos o deslocamento e velocidade dos seus três primeiros graus de liberdade quando o mesmo executa uma determinada trajetória programada. Aproveitando a metodologia de aquisição e tratamento dos dados apresentamos os resultados experimentais de um estudo proposto para caracterização de um controlador do tipo relé.

# Abstract

In the context of the robotic's study, the knowledge of the dynamic and kinematic behaviour of a manipulator is extremally important. Thus, this work present a experimental devices to make a data aquisition and treatment of the robot's movements from position's transducers of the each joint. The validation experimental is realized with a industrial robot - MANUTEC r3, which we obtain the displace-ment and velocity from the first three degree of fredon when the robot execute a programmed trajectory. In addition, is also presented a methodology for the study and characterization of non-linear controller of the type Rele.

## Prefácio

Aristóteles, na Grécia Antiga (400 A.C.) escreveu “ Se cada instrumento pudesse realizar seu próprio trabalho, obedecendo ou antecipando-se à vontade dos outros ... se a lançadeira pudesse tecer, e a palheta tocar a lira, sem a mão para as guiar, então os chefes não necessitariam de servos nem os donos de escravos” [23]. Provavelmente este pensamento tenha sido a base para a origem de uma série de termos tão comuns em nossos dias, tais como computadores, microprocessadores, automação, informática, robótica entre outros.

Não se pode negar a preciosa contribuição dada pelos escritores de ficção científica em seus vários trabalhos semeando idéias que com o avançar dos anos vão se tornando realidade. Cabe aqui citar o trabalho de ficção de Mary Shelly, publicado em 1817 sob o título *Frankenstein* e o trabalho de Karel Capek chamado *Rossum's Universal Robots*, usando pela primeira vez a palavra robô (do Checo Robot) significando escravo. Issac Asimov chega em um dos seus livros lançar os princípios que são conhecidos como as Três Leis da Robótica [19]

1. Um robô não pode ferir um ser humano, ou por omissão permitir que ele se fira.
2. Um robô deve obedecer as ordens dadas pelo ser humano, exceto quando estas conflitam com a primeira lei.
3. Um robô deve proteger sua existência, exceto quando tal atitude conflitar com a primeira e segunda lei.

Certamente estes princípios não possuem grande validade em nossos dias, uma vez que seria necessário que os robôs possuíssem alta capacidade de processar informações

dos mais diversos sensores a ele adaptados , ou seja, ter uma performance muito próxima do ser humano.

Hoje, algumas décadas da revolução industrial, parece iniciar uma nova revolução, tal como previa James S. Albus: “ *O ser humano está agora às vésperas de uma nova revolução industrial que provavelmente superará a primeira revolução em seus impactos na sociedade. A primeira revolução foi baseada na substituição da força humana pela energia mecânica, a próxima será baseada na substituição de cérebro humano pelos computadores no controle de máquinas em processos industriais.*” [19]

De carácter multidisciplinar, fazendo o uso das engenharias mecânica, elétrica, eletrônica, computação e outras, a robótica tem mostrado a sua importância em mais diversas áreas , tais como na exploração espacial, submarina e automação industrial [1]. Assim sendo, a robótica começa a se firmar como um dos parâmetros para simbolizar o alto nível de industrialização de uma sociedade. Isso pode ser verificado em nações do primeiro mundo, tais como Japão e EUA, onde o crescente emprego de robôs nas atividades industriais as tem levado a uma melhoria substancial no que tange a produtividade, redução de custos e qualidade, colocando-os a frente do mercado internacional em termos de competitividade [23].

Dentro deste contexto é que se procura justificar a importância de investimentos em pesquisas na área tecnológica, capacitando as instituições com uma infra-estrutura necessária e a formação de recursos humanos altamente especializados. Este é o único caminho para os países que queiram, no futuro, disputar com competência o mercado internacional.

## Introdução

A exigência industrial na utilização de robôs flexíveis, mais rápidos e com possibilidades de intervenções num grande volume de trabalho [23], direciona os estudos para o uso de microprocessadores [6] [8] [17] [28], [29] rápidos e refinados algoritmos de controle. Tais estudos muitas vezes conduzem a soluções nem sempre possíveis de serem implementadas industrialmente, pois além do alto custo financeiro envolvido, podem apresentar dificuldades de serem implementadas em tempo real.

A maioria dos robôs industriais existentes no mercado mundial, utilizam transdutores de posição cujas informações são sinais lógicos. Além disso, geralmente estes robôs encontram-se integrados em células automatizadas e controlados por controladores lógicos programáveis (CLP).

Dentro deste contexto, a procura de soluções de baixo custo e realizáveis industrialmente, conduzem esta aplicação ao desenvolvimento de controladores lógicos para robôs. Em contraste aos controladores clássicos, que utilizam componentes analógicos; os motores de corrente contínua são controlados por impulsões lógicas [3] [7]. Isto possibilita a realização em tempo real de controladores lógicos digitais, a partir da utilização de todas as informações provenientes dos geradores de impulsões angulares de cada junta, realização esta de baixo custo e insensível a ruídos e perturbações, e de mesma natureza, pois existe apenas a necessidade de um tratamento lógico das informações, tornando-se desnecessário a utilização de conversores AD/DA, permitindo-se a aplicação de um sinal de comando direto a nível de acionamento.

O objetivo principal desse trabalho é propor uma metodologia para aquisição e tratamento dos sinais gerados pelos transdutores de posição de um robô industrial, para o estudo do comportamento cinemático e dinâmico de uma dada junta. A validação des-

ta metodologia será realizada utilizando o robô industrial MANUTEC R3 dentro de um programa de Cooperação Científica Internacional entre Brasil-Alemanha que tem como objetivo principal o estudo e a adaptação de robôs industriais para intervenções submarinas em águas profundas. Dentro desse projeto pretende-se comparar as trajetórias realizadas pelo robô em ambiente seco e em ambiente submarino, tornando-se possível um estudo do comportamento dinâmico de cada junta, o que justifica a realização deste trabalho.

O presente trabalho encontra-se dividido em quatro capítulos, conforme o breve resumo descrito a seguir:

O primeiro capítulo faz uma rápida abordagem a respeito de um robô industrial e seu controle, tecendo comentários da problemática envolvida quando na aproximação de uma junta de um robô por um servomecanismo. É apresentado de forma compacta o modelo geométrico de um robô assim como os parâmetros do robô Manutec o qual usaremos na realização experimental deste trabalho.

No segundo capítulo é apresentado uma metodologia que permitirá traduzir os sinais provenientes dos geradores de impulsões (transdutores de posição) em deslocamento e velocidade a partir de um equacionamento lógico usando uma ferramenta utilizada em problemas de automatismo denominada de GRAFCET. Com esta metodologia descrevemos o procedimento de aquisição e tratamento destas informações .

No capítulo três é apresentados os resultados dos ensaios realizados no robô Manutec, assim como um outro resultado experimental de uma proposta para caracterização de um controlador do tipo Relé, cujo estudo e simulação são descritos em anexo.

Finalmente, no quarto capítulo encontra-se as conclusões e perspectivas deste trabalho.

# Capítulo 1

## Posicionamento do Problema

### 1.1 Introdução

O objetivo principal deste capítulo é mostrar a direção deste trabalho. Inicialmente fazemos uma descrição de um robô industrial abordando de maneira sucinta as formulações matemáticas necessárias para sua modelagem geométrica e dinâmica. Na discussão do controlador, apresentamos o princípio de controle para uma junta, tecendo comentários a respeito da problemática envolvida quando na aproximação de uma junta por um servomecanismo. Na sequência, apresentamos qual é a proposição geral deste trabalho .

### 1.2 Descrição de um Robô Industrial

Podemos fazer o uso da terminologia de controle automático para definirmos um robô industrial como sendo um sistema de múltiplas entradas/múltiplas saídas, acoplado e não linear [27].

Um robô industrial é um sistema mecânico complexo com acoplamentos dinâmicos entre as articulações dos seus elos, formando uma cadeia cinemática. Este acoplamento é altamente não linear, podendo resultar um movimento não desejado de uma junta quando

outra é acionada. Outros fatores que contribuem a estas não linearidades são oriundos dos efeitos gravitacionais, coriolis, força e torques centrífugos, atritos , etc.

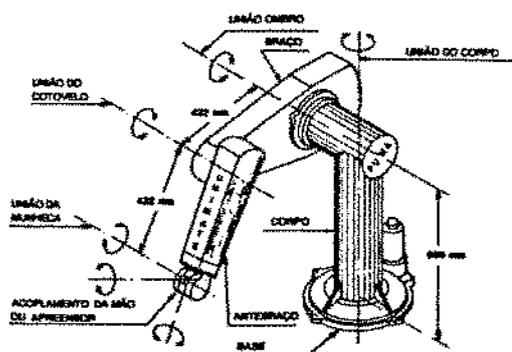


Figura 1.1: Robô Industrial PUMA 600

A maioria dos robôs industriais produzidos em escala, possuem seis graus de liberdade [19] [24], os quais são necessários para posicionar e orientar a garranum determinado corpo no espaço (os três primeiros graus de liberdade correspondente ao posicionamento de um robô num determinado volume de trabalho e os três últimos referem-se a orientação).

Geralmente, cada junta do robô é constituída de um motor de corrente contínua, associado a redutores de velocidades, que transmitem o movimento entre o motor e o elo de liberdade correspondente. Para medida e controle da posição, são utilizados geradores de impulsões angulares em cada junta.

A posição e orientação da garra com relação a um sistema de referência de coordenada fixo, geralmente encontrada na base do robô, é expresso por meio de matriz de transformação  $T_0^6$  [25]

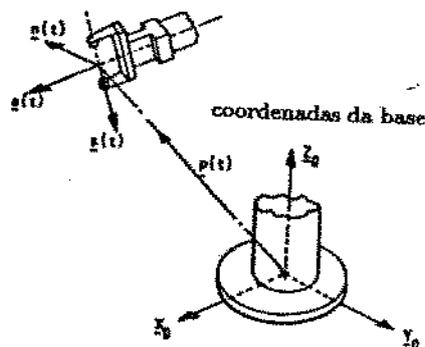


Figura 1.2: Sistema de Referência

$$T_0^n = \begin{bmatrix} \hat{n} & \hat{o} & \hat{a} & \hat{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0 A_1 \cdot {}^1 A_2 \dots {}^5 A_6 \quad (1.1)$$

onde a submatriz  $[\hat{n} \ \hat{o} \ \hat{a}]$  e o vetor  $p$  indicam a orientação e a posição respectivamente da garra com referência a base do robô.

$A_i^{i-1}$  descreve o  $elo_i$  em relação ao  $elo_{i-1}$  conforme notação de Denavit-Hartenberg [2] [11] [12]. A solução desta equação, permite obter a posição angular de cada junta, no caso de juntas rotacionais, ou o deslocamento no caso de junta prismática, como função da orientação e posição a garra.

O modelo dinâmico de um robô é aqui representado através da formulação Euler-Lagrange.

$$\tau_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad i = 1, \dots, n \quad (1.2)$$

onde:

- $\tau_i$  - torque aplicado a junta  $i$
- $L$  - Lagrangeano =  $K - P$
- $P$  - energia potencial
- $K$  - energia cinética
- $q$  - vetor de coordenadas generalizadas

A matriz de torques generalizada pode ser expressa por:

$$\tau(t) = D(q(t))\ddot{q}(t) + h(q(t), \dot{q}(t)) + C(q(t)) \quad (1.3)$$

sendo:

- $\tau(t)$  -  $n \times 1$  vetor de torque generalizado aplicado a junta
- $q(t)$  -  $n \times 1$  vetor de coordenadas generalizadas das variáveis de junta
- $D(q)$  -  $n \times n$  matriz inercial
- $h(q, \dot{q})$  -  $n \times 1$  vetor de força não linear de Coriolis e Centrífuga
- $C(q)$  -  $n \times 1$  vetor de força gravitacional.

A partir do desenvolvimento da equação de Euler-Lagrange é possível o estabelecimento completo do modelo dinâmico de um manipulador. Observamos que a equação ?? é não linear e na maioria das vezes, o uso dessa equação é feita de forma linearizada para efeitos de simplificações matemática.

### 1.3 Descrição do Controlador

O controle dinâmico de um robô envolve a determinação das entradas (torques ou tensões) para que os acionadores de cada junta movam seus respectivos *elos* para os valores de posição com velocidade desejada [2] [3].

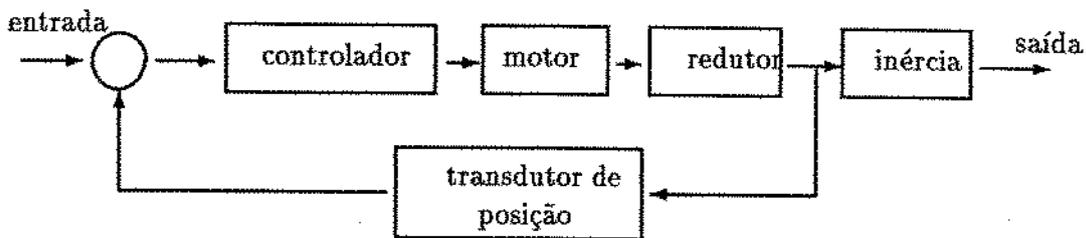


Figura 1.3: Princípio de Controle de Posição de um Robô Industrial (uma junta)

Um dos problemas no controle de um robô é que as condições de operações mudam. Por exemplo, a inércia efetiva de um objeto sendo movido ao longo de uma trajetória realizada pelo robô, varia em função da posição e configuração do robô [18].

O princípio do controlador de uma junta, consiste em fazer que a mesma articulação realize uma trajetória imposta, ou seja, o controlador compara a saída atual com a entrada de referência e então envia um sinal de controle ao atuador que reduzirá o erro [21]. A figura ?? ilustra os principais elementos da cadeia de controle de um robô.

Em geral a maioria dos robôs industriais usam um controlador numérico do tipo PID a parâmetros constantes que atuam sobre o erro de posicionamento do robô (função da trajetória imposta e leitura dos transdutores) [16]. Um dos principais inconvenientes deste tipo de controlador [27] é a sua não adaptabilidade com relação as mudanças na posição, velocidade e carga do robô.

Nos projetos atuais de sistema de controle de robôs, cada junta é analisada como sendo uma junta de um servomecanismo. O servo aproxima o modelo da variação dinâmica do robô de forma inadequada, porque ele omite o movimento e a configuração de todo o mecanismo do robô. Estas variações nos parâmetros de um sistema são suficientes para tornar a estratégia de controle convencional ineficaz. Para diferentes configurações de um robô, esta variação de parâmetros [20] necessita de uma correção nos ganhos do controlador, e isto não ocorrendo acarretará uma precisão limitada, sendo então necessário trabalhar em baixas velocidades, onde os componentes dinâmicos são menos preponderan-

tes.

Dentro deste contexto abre-se um grande espaço para o estudo e emprego de novas técnicas de controle em robótica industrial , tais como, a do controle adaptativo, entre outras, com o objetivo de realizar um controle efetivo.

## 1.4 Modelo Geométrico de um Robô

A automação de tarefas utilizando sistemas robotizados, exigem a elaboração de um modelo geométrico que permitirá a evolução desse sistema dentro do seu volume de trabalho com a precisão exigida. Sendo assim, na maioria das aplicações, uma determinada tarefa é realizada em relação a ferramenta utilizada, ou seja , utilizando um sistema de coordenadas cartesianas fixa a base do robô, uma vez que é possível adicionar mais um grau de liberdade no elemento terminal, onde poderá ser posicionado um dispositivo porta-ferramentas.

Para isso torna-se necessário a medida dessas grandezas em diferentes sistemas de coordenadas e através de transformações geométricas elementares efetuar o controle de posição e orientação do elemento terminal a partir do envio de informações às suas juntas (modelo geométrico e análise cinemática).

Dois sistemas de coordenadas podem ser utilizados para a descrição da posição/orientação de um robô no interior de seu volume de trabalho: coordenadas angulares e coordenadas cartesianas de cada *elo*.

O elemento terminal é a parte do robô que interfaceia fisicamente com o ambiente de operação. Para executar uma dada tarefa, o robô deve saber onde o objeto a ser manipulado está localizado e qual a posição que o elemento terminal deve ter em relação a este objeto. Dentro deste contexto torna-se necessário o completo estabelecimento do

modelo geométrico para um robô .

O modelo geométrico direto consiste no cálculo da posição de cada elo como função das variáveis articulares.

$$X = f(q) \quad (1.4)$$

onde:

$q = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$   $n \times 1$ : vetor posição angular,

$X = (x, y, z, \psi, \theta, \phi)$  : vetor posição/orientação (ferramenta)

Trajelórias podem ser planejadas no sistema de coordenadas articulares ou em termos da posição/orientação (coordenadas cartesianas) da ferramenta. Como os acionadores requerem como sinal de referência uma coordenada generalizadas, quando uma trajetória é planejada em termos de posição e orientação da ferramenta, a mesma deverá ser transformada em coordenadas articulares. Para isso torna se necessário uma transformação cinemática inversa do tipo:

$$q = f^{-1}(X) \quad (1.5)$$

Esta solução, quando encontrada, pode não ser única, tornando-se necessário a utilização de algoritmos que obtem uma solução da equação 1.5, em função dos limites físicos do robô (ranges de  $\theta_i$ ) e configurações ótimas (mais estáveis).

#### 1.4.1 Modelo Geométrico do Robô Manutec r3

Os parâmetros de Denavit-Hartenberg para este robô que possui juntas rotacionais estão apresentados na tabela 1.1. Logo a seguir nas tabelas 1.2 e 1.3 estão as matrizes de passagens e o equacionamento para o modelo respectivamente.

Na tabela 1.2 e 1.3 os termos  $C_i$  e  $S_i$  representam respectivamente  $\cos(\theta_i)$  e  $\sen(\theta_i)$ .

Tabela 1.1: Robô Manutec r3 - Parâmetros de Denavit-Hartenberg

Junta	$\theta$ (gr)	d (mm)	$\alpha$ (gr)	a(mm)	range (gr)	Representação do robô
1	$\theta_1$	665.0	-90.0	0.0	165	
2	$\theta_2$	0.0	0.0	500.0	-20 /+220	
3	$\theta_3$	0.0	90.0	0.0	-225 /+45	
4	$\theta_4$	730.0	-90.0	0.0	190	
5	$\theta_5$	0.0	90.0	0.0	120	
6	$\theta_6$	100.0	0.0	0.0	265	

Tabela 1.2: Matrizes de Passagens

$A_{0,1} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A_{1,2} = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
$A_{2,3} = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & S_3 & 0 \\ S_3 & 0 & -C_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A_{3,4} = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
$A_{4,5} = \begin{bmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & -C_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A_{5,6} = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & d_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Tabela 1.3: Equacionamento

Orientação
$n_x = ((C_1C_{23}C_4 - S_1S_4).C_5 - C_1S_{23}S_5).C_6 + (-C_1C_{23}S_4 - S_1C_4).S_6$
$n_y = ((S_1C_{23}C_4 - C_1C_4).C_5 - S_1S_{23}S_5).C_6 + (-S_1C_{23}S_4 + C_1C_4).S_6$
$n_z = (-S_{23}C_4C_5 - C_{23}S_5).S_6 + S_{23}S_4S_6$
$s_x = ((C_1C_{23}C_4 - S_1S_4).C_5 - C_1S_{23}S_5).S_6 + (-C_1C_{23}S_4 - S_1C_4).C_6$
$s_y = -((S_1C_{23}C_4 + C_1S_4).C_5 - S_1S_{23}S_5).S_6 + (-S_1C_{23}S_4 + C_1C_4).C_6$
$s_z = (S_{23}C_4C_5 + C_{23}S_5).S_6 + S_{23}S_4C_6$
$a_x = ((C_1C_{23}C_4 - S_1S_4).S_5 + C_1S_{23}C_5$
$a_y = (S_1C_{23}C_4 + C_1S_4).S_5 + S_1S_{23}C_5$
$a_z = -S_{23}C_4S_5 + C_{23}C_5$
Posição
$p_x = ((C_4S_5d_6).C_{23} + (C_5d_6 + d_4).S_{23} + a_2C_2).C_1 - (S_4S_5d_6).S_1$
$p_y = ((C_4S_5d_6).C_{23} + (C_5d_6 + d_4).S_{23} + a_2C_2).S_1 + (S_4S_5d_6).C_1$
$p_z = -((C_4S_5d_6 + (C_5d_6 + d_4).C_{23} - a_2S_2 + d_1$
ou
$T_8(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6) = (x, y, z, \psi, \theta, \phi)$

## 1.5 Proposição do Trabalho

Tendo sido descrito um robô industrial e seu controlador, este trabalho apresenta um procedimento para visualização do movimento de um robô, através da aquisição e tratamento dos sinais oriundos dos transdutores de posição de cada junta. Este procedimento apresenta-se como uma importante ferramenta para o estudo e implementação de controladores de posição, uma vez que será possível o completo conhecimento da trajetória realizada por cada junta do robô.

O seu desenvolvimento em software e hardware tem como base a metodologia denominada de GRAFCET, procedimento este muito usado na solução de problemas em sistemas automatizados.

Para validar este procedimento utilizamos o robô Manutec r3, no qual realiza-

mos uma análise do seu movimento monitorando os três primeiros graus de liberdade. Os resultados dos ensaios serão apresentados em forma gráfica e então comparados com o modelo teórico da trajetória em velocidade programado para que o robô realize o movimento desejado.

Finalmente, aproveitando esta ferramenta de visualização do movimento do robô será aplicado em um sistema para obter os resultados experimentais de um estudo proposto para caracterização de um controlador do tipo mais-ou-menos cujo o desenvolvimento teórico é apresentado em anexo.

## Capítulo 2

# Procedimento Experimental para Aquisição e Tratamento das Informações

### 2.1 Introdução

Neste capítulo, apresentamos o procedimento adotado para realizar a aquisição e tratamento dos sinais dos transdutores de posição (gerador de impulsões) de um robô. Com este intuito, realiza-se primeiramente um tratamento dos sinais provenientes destes transdutores de posição com o objetivo de discriminarmos o sentido de rotação e obtermos a frequência de saída. A partir da utilização da mesma sistemática de resolução de problemas ligados a automação industrial, denominada de GRAFCET, chega-se às equações lógicas que podem ser implementadas em hardware dedicado ou em software, conforme será mostrado a seguir.

### 2.2 Gerador de Impulsões Angulares

Este tipo de transdutor de posição é utilizado para medida de posição angular em máquinas rotativas. Geralmente, sua saída apresenta dois trens de pulsos lógicos defasados de  $90^\circ$ , cuja frequência [10] é proporcional a velocidade angular do eixo do motor, sendo assim, apresenta-se como uma solução efetiva para uma realimentação digital de

posição e velocidade para microcontroladores.

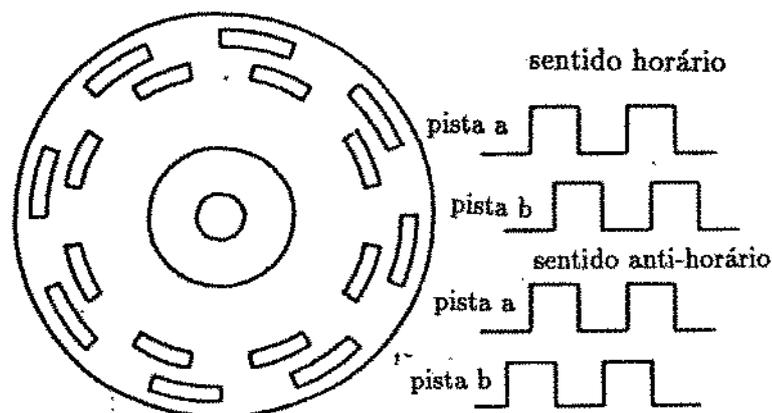


Figura 2.1: Exemplo de um Encoder

## 2.3 Ferramenta Utilizada na Solução do Problema

Como ilustrado na figura 3.1, o gerador angular de impulsões (encoder), gera dois sinais lógicos defasados de  $90^\circ$ . Para implementação de hardware dedicado a controle, necessita-se traduzir essas informações num sentido de rotação e numa frequência resultante da combinação lógica desses sinais. Para isso será utilizado um sistema de resolução empregado em sistemas de automação, o GRAFCET [15]. Para utilização efetiva desta metodologia torna-se interessante definirmos alguns conceitos fundamentais para descrição de um sistema lógico a partir da técnica do GRAFCET.

### 2.3.1 O Grafcet

O Grafcet<sup>1</sup> é uma ferramenta utilizada para descrição de cadernos de tarefas concernentes a uma dada linha automatizada constituída de etapas sequencias.

<sup>1</sup>Norma criada pela AFCET: Association Française de Cybernetics

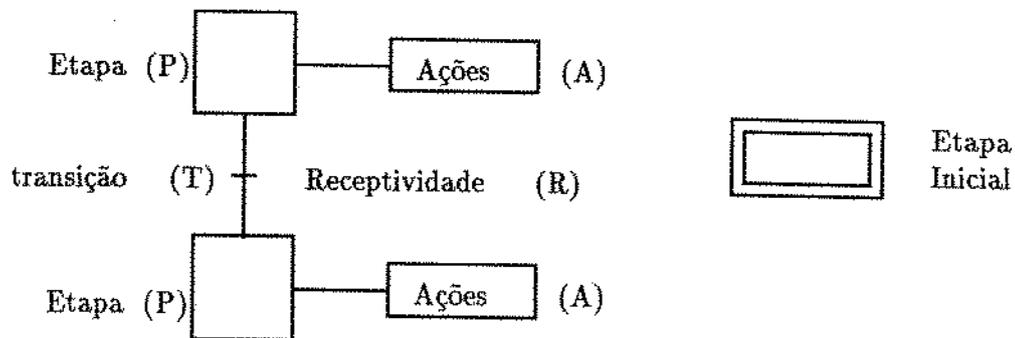


Figura 2.2: Definições básicas

Para esta descrição, introduzimos os conceitos de transição e etapa. Em efeito, todo o processo sequencial pode ser decomposto em etapas durante as quais se executam as ações desejadas. A evolução de um sistema dependerá dos estados anteriores e dos valores das variáveis lógicas associadas as entradas, ao estado do sistema, ou de *predicados* (comparação do valor de um contador com uma referência, valor de uma temporização, etc...)

Num processo de automação industrial, as máquinas devem realizar operações sucessivas organizadas de forma a realizarem as mesmas simultaneamente. Em cada operação o sistema aplicará comandos pré-definidos. Para um dado instante, uma ou mais etapas são ativadas e os comandos associados a estas são executados. Na inicialização do processo, algumas etapas serão ativadas; sendo as mesmas denominadas etapas iniciais.

A passagem de uma etapa a uma outra é realizada através de uma transição que esta associada a uma receptividade, função lógica das entradas, da atividade das etapas. As ações relacionadas a cada etapa podem corresponder a comandos associados ao processo, a ordens de temporização, incrementos de contadores, etc. Elas poderão ter diferentes graus de complexidade, dependendo tanto das atividades das etapas, como também do estado das entradas.

As regras de evolução de um Grafcet podem ser definidas como segue abaixo:

- uma transição é validada quando todas as etapas imediatamente precedentes estão ativas;
- ela é *saltada* quando ela é validada e a receptividade verdadeira;
- o *salto* de uma transição implica na ativação de todas as etapas que seguem imediatamente a transição e a desativação de todas as etapas precedentes;
- várias transições simultaneamente *saltadas* são constituídas de saltos simultâneos;

Com estas regras, juntamente com os elementos de representação, é possível a descrição de todos os casos encontrados nos automatismos industriais a evolução sequencial:

Esta ferramenta de descrição poderá ser utilizada em diferentes situações para implementação experimental através de hardware e em programas dedicados em computador.

## **2.4 Obtenção do Sentido/Frequência através do Equacionamento Lógico**

Uma vez introduzido o conceito da metodologia do Grafcet, fazemos então o seu uso efetivo para discriminar o sentido de rotação e da frequência de saída dos sinais do transdutor de posição. A figura 2.3 mostra os sinais oriundos do gerador de impulsões, trata-se de dois sinais com a forma de onda quadrada defasados de  $90^{\circ}$ .

A pista A é tomada como referência e em função de um atraso ou adiantamento da pista B, definimos um sentido positivo (+) e um sentido negativo (-). Para cada estado lógico assumido pela pista A e a pista B no instante da transição positiva de um clock externo, associamos números que denominamos de etapas, ou seja, para o sentido que

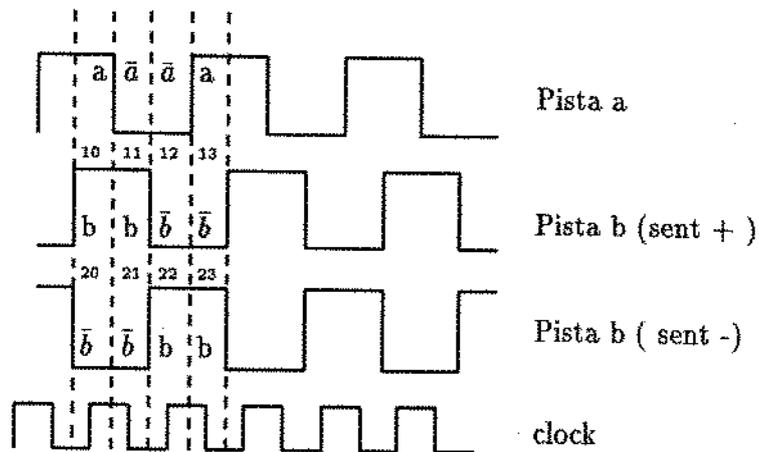
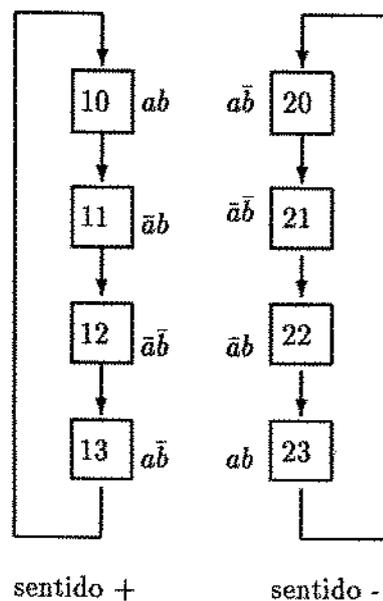


Figura 2.3: Representação do sentido de rotação

denominamos positivo os estados lógicos analisados são  $ab$ ,  $\bar{a}b$ ,  $a\bar{b}$  e  $\bar{a}\bar{b}$  os quais associamos os respectivos números 10, 11, 12 e 13 (estados). De forma análoga para o sentido negativo os estados lógicos  $\bar{a}\bar{b}$ ,  $\bar{a}b$ ,  $a\bar{b}$ , e  $ab$  são associados ao números respectivos 20, 21, 22 e 23 (estados).

Para cada sentido analisado, percebe-se que estas etapas se repetem, formando-se um ciclo.



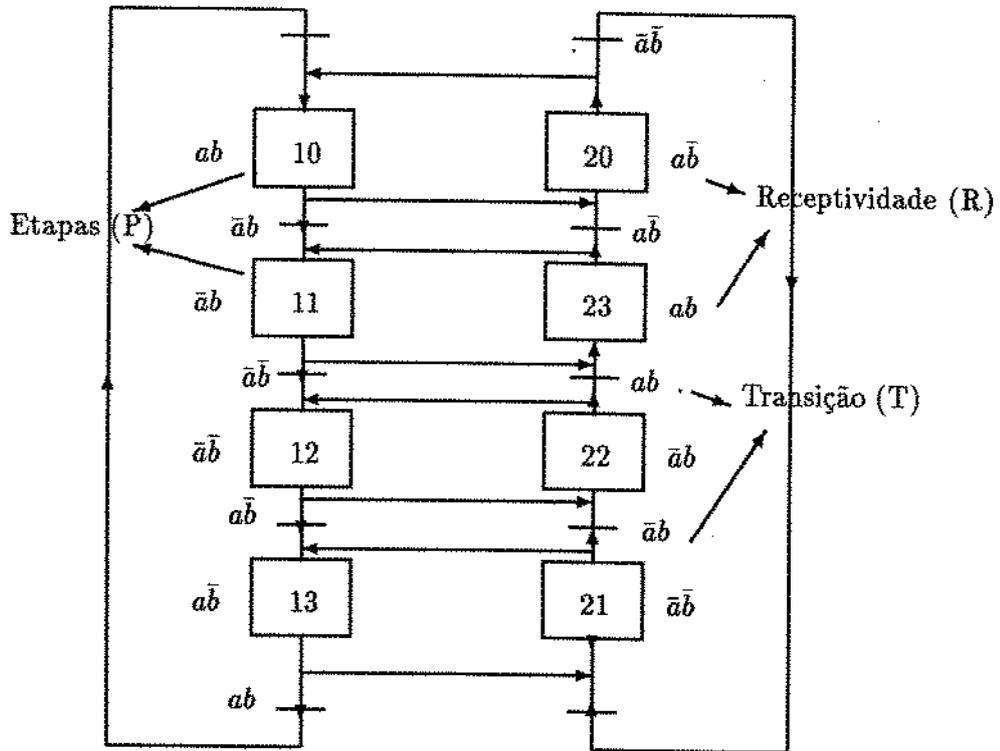


Figura 2.4: Representação através do GRAFCET

A representação acima mostra a evolução das etapas dentro de um ciclo, mas notamos que é possível uma mudança de sentido em qualquer fase atingida. A figura 2.4 ilustra toda essas possibilidades já utilizando a técnica do GRAFCET.

A descrição mostrada através do Grafcet pode ser representada por meio de funções lógicas no espaço  $\pi_n$  cujos valores de  $\pi = (0,1)$ . Uma maneira usual de representarmos estas funções lógicas é através do mapa de Karnaugh. Esta representação é de grande utilidade uma vez que é possível obter as expressões simplificadas por simples inspeção visual.

Sabendo-se que no espaço  $\pi_n$  podemos definir  $2^n$  funções lógicas ( número total de etapas), o número de variáveis necessárias para posicionamento do problema em estudo será [9]:

$$2^n = n^0 \text{ de etapas} \quad (2.1)$$

$$n \geq \log(n^0 \text{ de etapas}) \quad (2.2)$$

$$n^0 \text{ etapas} = 8$$

$$n \geq 3$$

Desta forma, tomamos as variáveis secundárias x e y para representar as variações da frequência de saída, e z para representar o sentido de rotação. Isto pode ser verificado através da representação do GRAFCET na figura 2.5 a qual associamos uma mapa de Karnaugh (figura 2.6) para obtermos uma expressão lógica reduzida.

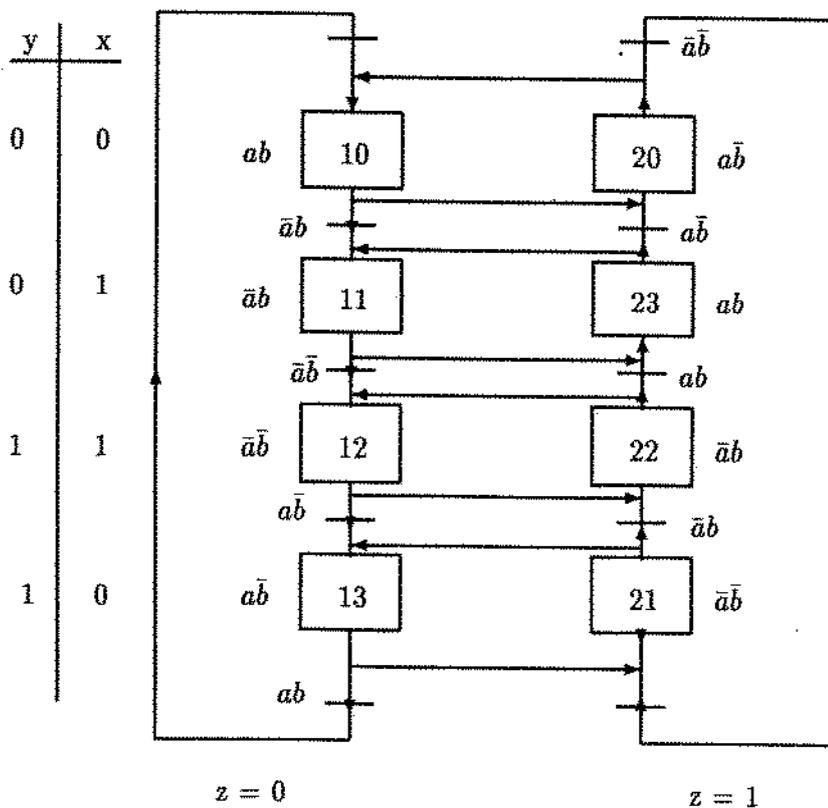


Figura 2.5: GRAFCET e variáveis secundárias

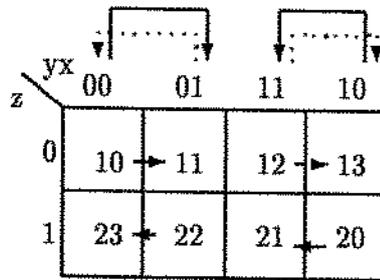


Figura 2.6: Mapa de Karnaugh

Observação:

Neste exemplo,  $x = 0$  está associado ao estado  $a$  e  $x = 1$  está associado ao estado  $\bar{a}$ .  
 $y = 0$  está associado ao estado  $b$  enquanto  $y = 1$  está associado ao estado  $\bar{b}$ .

O mapa de Karnaugh representado na figura 2.6 apresenta apenas as transições do estado  $x$ . O mesmo desenvolvimento poderá ser realizado para o estado  $y$ .

Na análise dos estados lógicos das variáveis  $x$  e  $y$ , observamos que elas podem evoluir dos estados 0 (zero) para 1, que será designado por  $x_1$  e de 1 para 0 (zero), designado por  $x_0$ . Desta análise, através do mapa de Karnaugh mostrado acima podemos chegar às expressões que regem tal comportamento.

Para a variável  $x$ , temos:

$$x_{0 \rightarrow 1} = x_1 = R_{10,11} + R_{20,21} = \bar{a}\bar{b}\bar{y}\bar{z} + \bar{a}\bar{b}yz \tag{2.3}$$

$$x_{1 \rightarrow 0} = x_0 = R_{12,13} + R_{22,23} = \bar{a}b\bar{y}\bar{z} + ab\bar{y}z \tag{2.4}$$

Para a variável  $y$ , temos:

$$y_{0 \rightarrow 1} = y_1 = R_{11,12} + R_{23,20} = \bar{a}\bar{b}x\bar{z} + a\bar{b}\bar{x}z \quad (2.5)$$

$$y_{1 \rightarrow 0} = y_0 = R_{21,22} + R_{13,10} = a\bar{b}\bar{x}\bar{z} + \bar{a}bxz \quad (2.6)$$

Certamente as equações 2.3 a 2.6 não são ainda as equações mínimas para representar todo o problema exposto visto que estas equações poderão sere implementadas em software ou hardware. Portanto, com o auxílio do Grafcet é possível uma redução, a partir do momento em que certas condições são verificadas.

A figura 2.7 traz um exemplo de redução onde primeiramente são ilustradas grafos adjacentes com etapas  $P_i$  e  $P_j$  e suas respectivas ações  $A_i$  e  $A_j$ , a seguir são representados em um único grafo cujas as ações são funções das etapas. Mesmo tendo ações diferentes e pelo fato de serem adjacentes a redução do grafo, como será visto, levará a equações lógicas simplificadas. A condição para tal redução são regidas pelas equações a seguir.

Condição:

$$\Sigma\Sigma(P_i.P_j) = 0 \quad (2.7)$$

$$\Sigma\Sigma(R_i.R_j) = 0 \quad (2.8)$$

$$\Sigma\Sigma(P_i.R_j) = 0 \quad (2.9)$$

Usando então a teoria do GRAFCET, as técnicas de redução podem ser resumidas do seguinte modo:

- As etapas agrupadas são substituídas por uma única etapa;

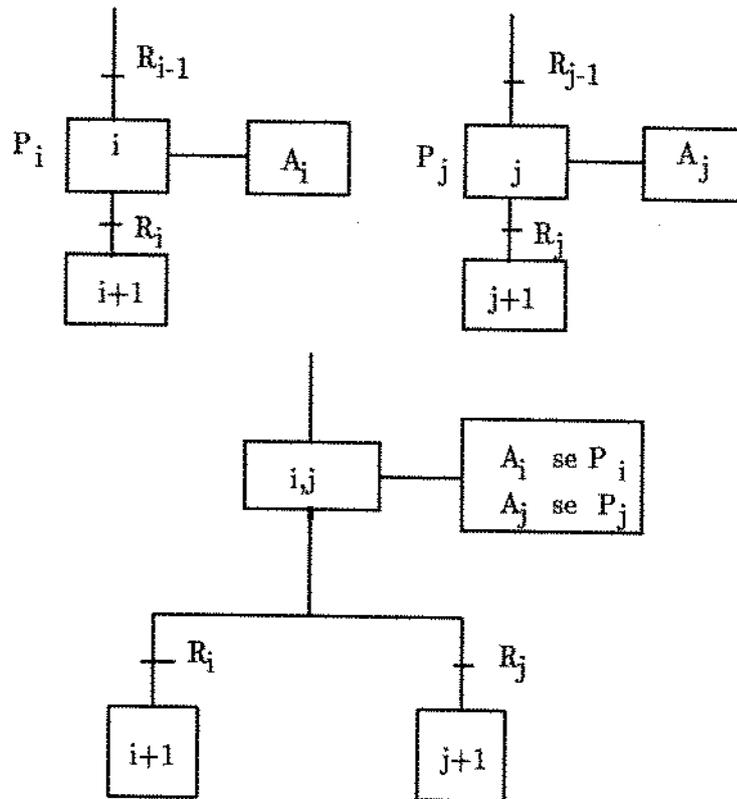


Figura 2.7: Condições para Redução de etapas adjacentes

- As ligações e transições originadas diretamente de duas etapas fundidas podem ser suprimidas;
- Todas as outras transições de entrada e saída das etapas fusionadas desviam suas transições de entrada e saída para a etapa de fusão;
- As receptividades que estão associadas às transições de entrada das etapas agrupadas não são modificadas dentro do GRAFCET reduzido.
- As receptividades  $R_i$  que estão associadas às transições de saída de uma etapa fusionada  $i$  desviam dentro do GRAFCET reduzido  $R_i \cdot P_i$ ;
- As ações  $A_i$  associadas às etapas fusionadas  $i$  são, dentro do GRAFCET reduzido, associadas a etapas de fusão e desviam caso  $P_i = A_i$ .

Observamos que para este problema as condições estabelecidas através das equações 2.7, 2.8 e 2.9 são atendidas. Assim o novo GRAFCET é mostrado na figura 2.8.

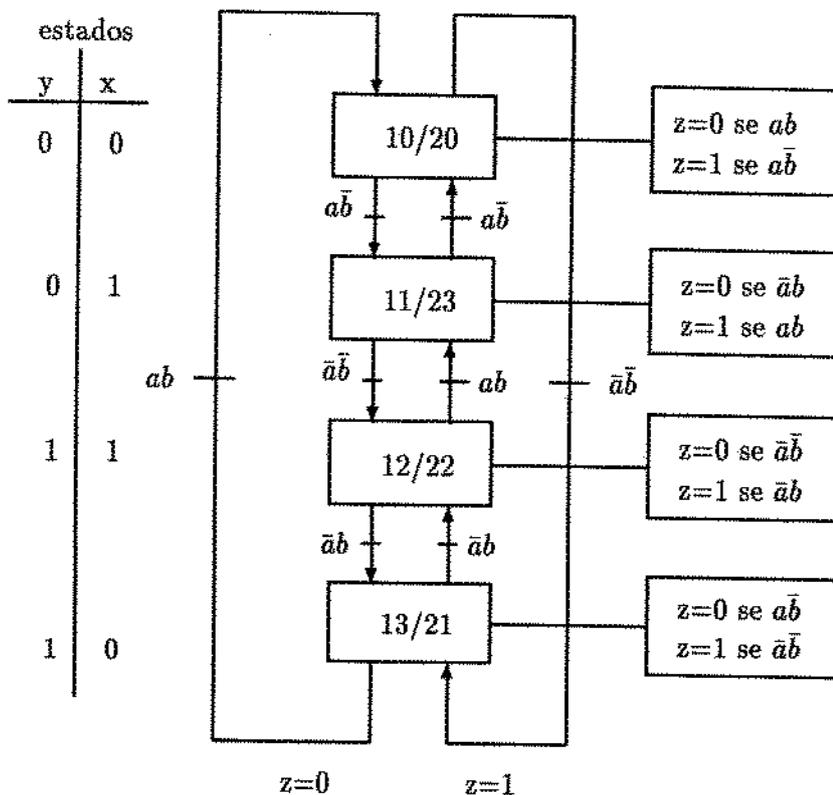


Figura 2.8: GRAFCET reduzido

Do GRAFCET reduzido é então possível obter as expressões lógicas relacionando o sentido de rotação e a variação.

### 2.4.1 Obtenção da Frequência de Saída

As equações lógicas são obtidas analisando as evoluções das variáveis secundárias x e y.

Do Grafcet da figura 2.8, obtemos para as variáveis secundárias x e y as seguintes equações lógicas através da representação do mapa de Karnaugh (figura 2.9):

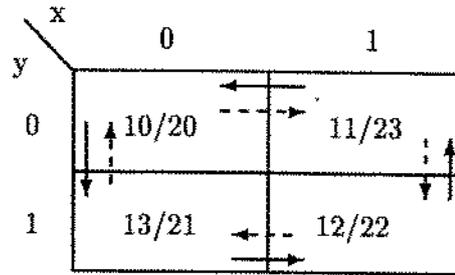


Figura 2.9: Mapa de Karnaugh para as variáveis secundárias

$$x_{0 \rightarrow 1} = x_1 = R_{10/20,11/23} + R_{13/21,12/22} = \bar{y}\bar{a}b + y\bar{a}b = \bar{a}b \quad (2.10)$$

$$x_{1 \rightarrow 0} = x_0 = R_{11/23,10/20} + R_{12/22,13/21} = \bar{y}a\bar{b} + ya\bar{b} = a\bar{b} \quad (2.11)$$

$$y_{0 \rightarrow 1} = y_1 = R_{10/20,13/21} + R_{11/23,12/22} = \bar{x}\bar{a}\bar{b} + x\bar{a}\bar{b} = \bar{a}\bar{b} \quad (2.12)$$

$$y_{1 \rightarrow 0} = y_0 = R_{13/21,10/20} + R_{12/22,11/23} = \bar{x}ab + xab = ab \quad (2.13)$$

As equações 2.10 a 2.13 poderão ser implementadas a partir de componentes lógicos apresentado na figura 2.10.

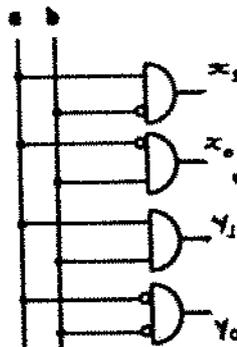


Figura 2.10: Circuito discriminador da frequência de saída

### 2.4.2 Obtenção do Sentido de Rotação

As equações lógicas para um circuito que discrimina o sentido de rotação, são também obtidas do Grafcet da figura 2.8 associando as variáveis secundárias com as etapas do grafcet.

$$z = 0 \mapsto ab\bar{x}\bar{y} + \bar{a}bx\bar{y} + \bar{a}\bar{b}xy + a\bar{b}\bar{x}y \quad (2.14)$$

$$z = 1 \mapsto \bar{a}\bar{b}\bar{x}\bar{y} + abx\bar{y} + \bar{a}bx\bar{y} + \bar{a}\bar{b}\bar{x}y \quad (2.15)$$

Podemos observar através das equações 2.14 e 2.15 que a passagem de uma etapa a outra é realizada por intermédio da mudança de duas variáveis. Então para evitar falhas na comutação é necessário que na transição ocorra apenas com a mudança de uma única variável. Para isso torna-se necessário representar num mapa de Karnaugh de 4 variáveis os estados assumidos pelas variáveis da figura 2.8. Nesta figura esta representado a forma para obter a equação lógica para  $z = 0$ . Para  $z = 1$ , a análise é similar.

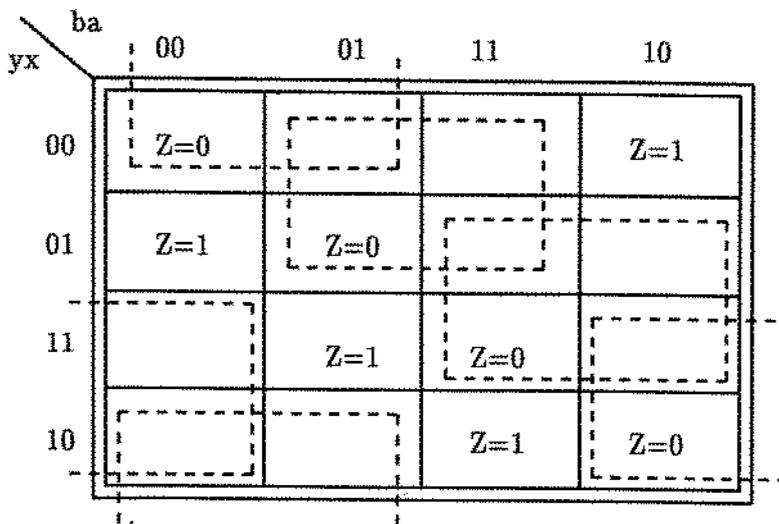


Figura 2.11: Mapa de Karnaugh para 4 variáveis

As equações extraídas do mapa de Karnaugh são escritas a seguir:

Para  $z = 0$

$$z = 0 \mapsto b\bar{x} + ay + \bar{b}x + \bar{a}\bar{y} = (b \oplus x) + (\bar{a} \oplus y) \quad (2.16)$$

Para  $z = 1$

$$z = 1 \mapsto \bar{b}\bar{y} + ax + by + \bar{a}\bar{x} = (\bar{a} \oplus x) + (\bar{b} \oplus y) \quad (2.17)$$

O circuito lógico é mostrado a seguir.

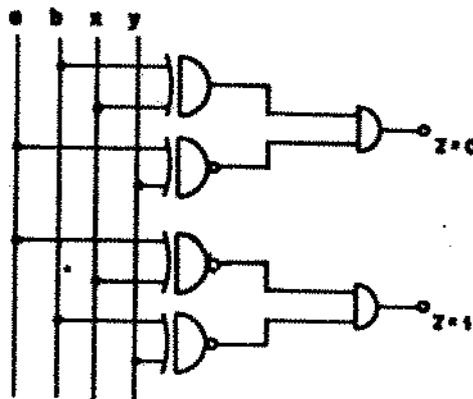


Figura 2.12: Circuito lógico discriminador do sentido

### 2.4.3 Esquema Lógico Final

Das equações lógicas que traduzem o sentido e variação, podemos então agrupá-las em uma única representação lógica, conforme mostrado a seguir.

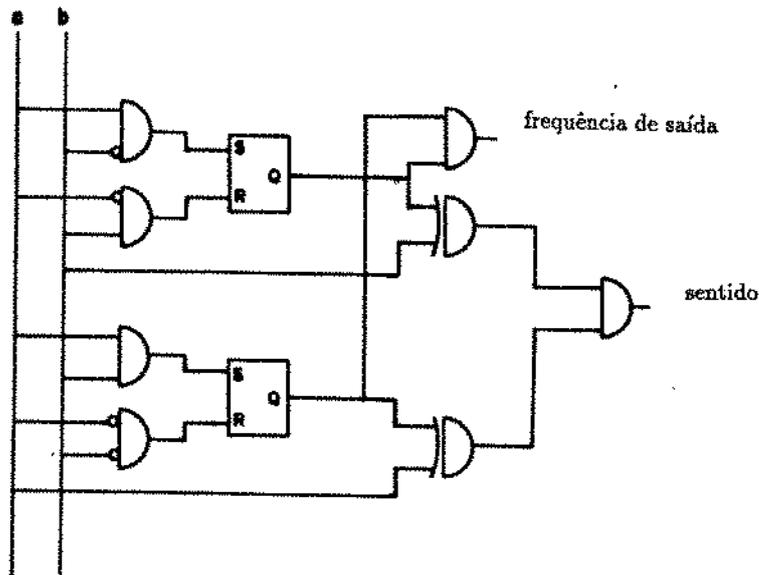


Figura 2.13: Circuito Lógico Final

### 2.4.4 Comentários

Com o desenvolvimento acima realizado, observamos que com o auxílio do GRAFCET é possível chegar às equações lógicas que resolvam o problema. É interessante notar, com o auxílio da figura 2.3, que a frequência de saída fica multiplicada por quatro, uma vez que obtemos quatro informações em um período. Com as equações estabelecidas pode-se então construir um software e hardware dedicados, o que será o assunto da próxima seção.

## 2.5 Procedimento para Aquisição e Tratamento dos Sinais

Nesta seção fazemos o uso da metodologia que acabamos de mostrar que é basicamente a utilização das equações referentes ao sentido de rotação e a frequência do sinal (variação).

### 2.5.1 Procedimento Adotado

O diagrama esquemático para o processo experimental é apresentado na figura 2.14.

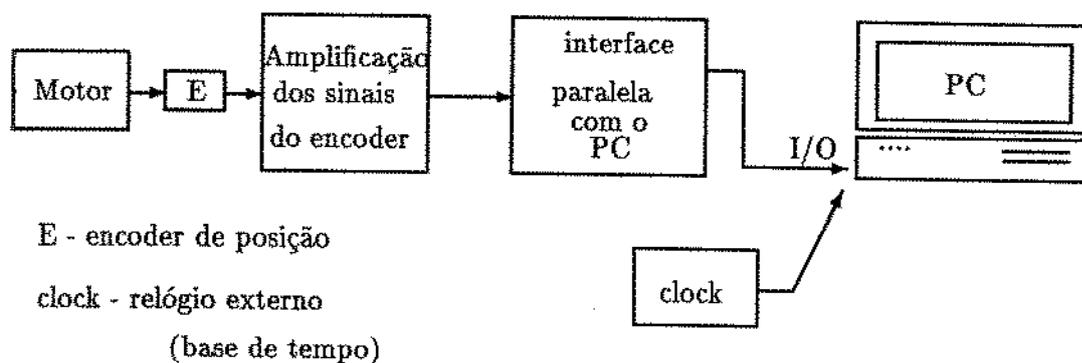


Figura 2.14: Layout do Processo de Aquisição das Informações

Os sinais originados dos geradores de impulsões são inicialmente quadrados e amplificados, tornando-se compatíveis com o procedimento lógico a ser adotado. Na sequência são enviados a um microcomputador via interface paralela por meio de uma placa I/O (entrada/saída), onde utilizamos um relógio externo para servir como base de tempo, conforme ilustra a figura 2.14.

A aquisição de dados é realizada a partir da utilização de uma interface de entrada/saída ligada diretamente ao barramento de dados de um computador compatível com a linha IBM PC-AT (figura 2.15). Inicialmente utiliza-se 1 byte (8 bits), sendo dois reservados a cada encoder (pistas a e b), um para controle do processo de aquisição (início/fim) e um para base de tempo (relógio externo). Neste trabalho será estudado o comportamento das três primeiras juntas do robô, correspondentes aos três primeiros graus de liberdade,

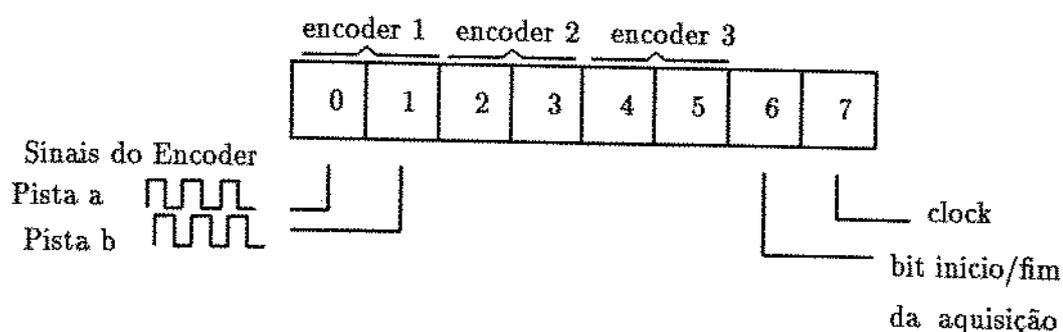


Figura 2.15: Interface e seus bits funcionais

já que os mesmos são os mais importantes sob o ponto de vista estrutural .

- os sinais **a** e **b** dos encoders são enviados ao microcomputador via interface paralela de aquisição.
- o programa em Assembler acionado no PC, lê os estados dos bits no instante da transição positiva do clock (bit 7) e pode-se então armazenar os dados em um arquivo com 64K, 128k, 256k e 512k ( ou mais eventualmente com extensão de memória) utilizando DMA (*Direct Memory Access*).
- após a aquisição, este mesmo arquivo é tratado utilizando a equação lógica apresentada no capítulo anterior, que fornece sentido/frequência, e após confirmação do resultado este arquivo é armazenado sob forma binária.
- um outro software desenvolvido em linguagem C, gera curvas relativas ao movimento realizado.

### 2.5.2 Sistema de Aquisição das Informações

Para melhor entendimento é apresentado o fluxograma do processo de aquisição dos sinais ( figura 2.16 ).

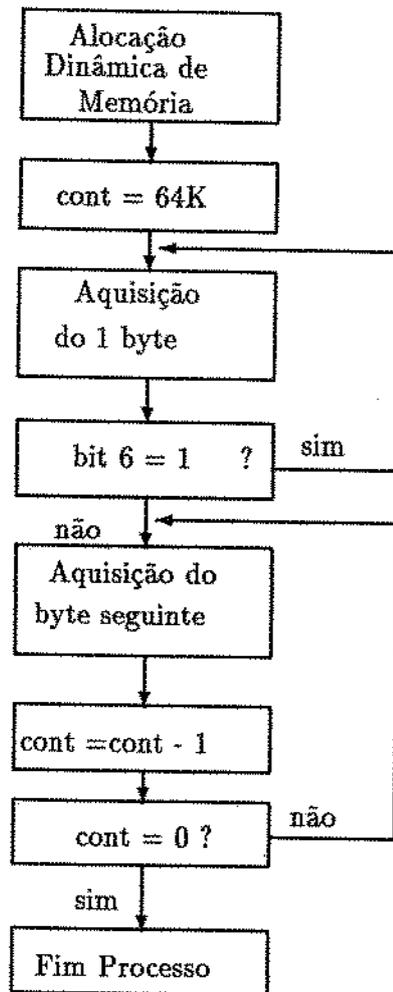


Figura 2.16: Diagrama Funcional do Processo de Aquisição

Inicialmente o *software* faz a alocação de memória no PC. Um contador que será selecionado pelo usuário, fornece o tamanho do arquivo no qual os dados serão armazenados, que pode ser de 64K, 128K, 256K e 512K (ou mais caso haja expansão de memória no computador). A aquisição tem início no instante em que o bit 6 = 0 (isso é feito de forma manual com auxílio de uma chave lógica) armazenando os dados a cada transição positiva do clock. Um contador após cada aquisição é decrementado e no momento em que ele torna igual a zero, chega-se então ao fim do processo de aquisição.

A figura 2.17 mostra os estados de cada um dos bits no instante da aquisição.

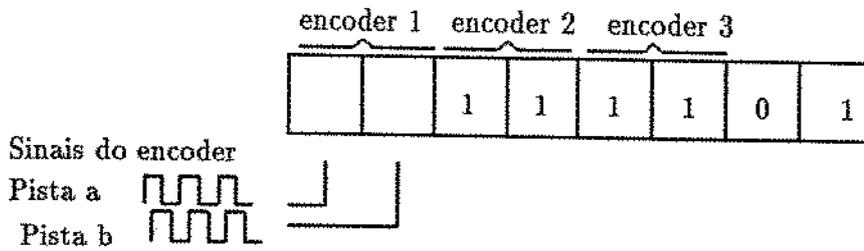


Figura 2.17: Estados de cada bit para uma aquisição

Se não existem sinais nos bits 2,3,4 e 5, os seus estados lógicos são mantidos em alto, ou seja, em 1. O bit 6 inicia o processo de aquisição quando seu estado lógico vai para 0 (zero). Todas as vezes que há uma mudança de 0 para 1 no bit 7 o software lê todos os estados de cada bit e armazena em um arquivo. Os estados lógicos que os bits 0 e 1 podem assumir são 0 (zero) ou 1. Sendo assim chegamos a quatro combinações: **00,01,11,10**.

Para cada uma dessas combinações associadas aos outros seis bits nos fornece um número em binário referente aos estados assumidos pelo byte como um todo **BC,BD,BF,BE**.

Abaixo mostramos um exemplo de uma aquisição realizada com um gerador de impulsões.

Codes hex															
BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC
BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE
BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF
BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD
BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC
BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE
BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF
BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD
BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC
BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE
BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF
BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD
BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC	BC
BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	BE
BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF	BF
BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD	BD

Figura 2.18: Exemplo de uma Aquisição

### 2.5.3 Processo de Tratamento de Dados

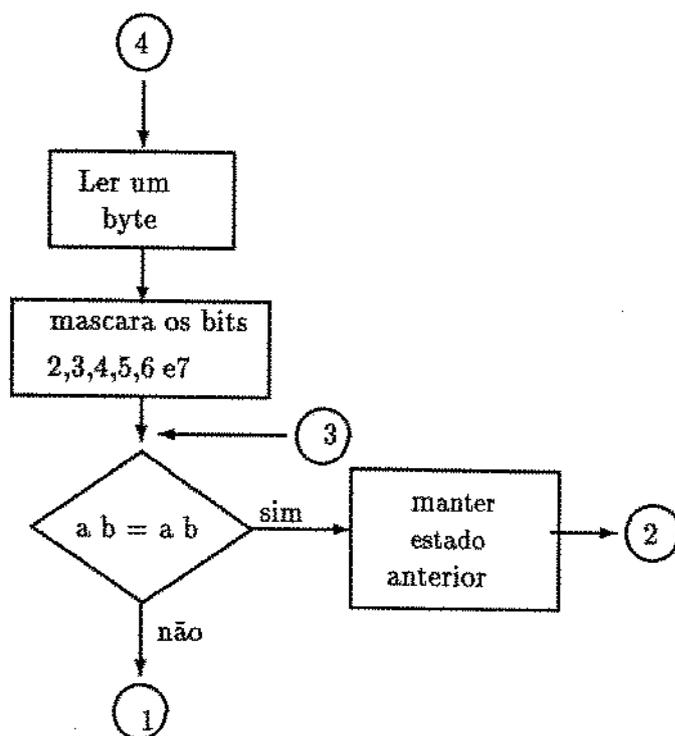
O que denominamos de tratamento dos dados é o procedimento que converte o arquivo de dados obtidos pelo processo de aquisição em um arquivo que relaciona a variação incremental e o sentido de rotação do gerador de impulsões [3].

Sendo assim é adotada a seguinte rotina:

- faz-se uma máscara nos bits 6 e 7 que são necessários para o início do processo de aquisição e relógio externo para fornecer a temporização, porem inúteis para o tratamento;
  
- faz-se uma máscara nos bits 2,3,4 e 5, pois o algoritmo utilizado consiste em tratar separadamente 2 bits de cada vez (correspondente a um gerador de impulsões) e depois, por meio de uma instrução Assembler RCL faz-se uma rotação para tratar os 2 próximos bits
  
- compara-se os bits  $b_i a_i$  e  $b_{i+1} a_{i+1}$ , isto é, compara-se os estados dos bits anteriores e posteriores e, então assume-se um dos valores abaixo, onde o  $1^o$  bit corresponde a posição e o  $2^o$  o sentido. Neste caso temos:
  - 01 - variação de posição e sentido 0
  
  - 11 - variação da posição e sentido 1
  
  - 10 - não variação da posição e sentido 1
  
  - 00 - não variação da posição e sentido 0
  
- faz-se o uso da instrução em Assembler para "girar" dois bits

Codes hex															
3C	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	03	02	02	02
02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02
02	01	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	01	00	00	00
00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00	01	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	01	00
00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00	00	00	01	00	00	00	00	00	00	00	00	01	00	00	00
00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00	00	01	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	01
00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00	00	00	00	01	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	01
00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00	00	00	00	01	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00	01	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00
00	00	00	00	00	00	01	00	00	00	00	00	00	00	00	00
01	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00

Figura 2.19: Arquivo após o Tratamento



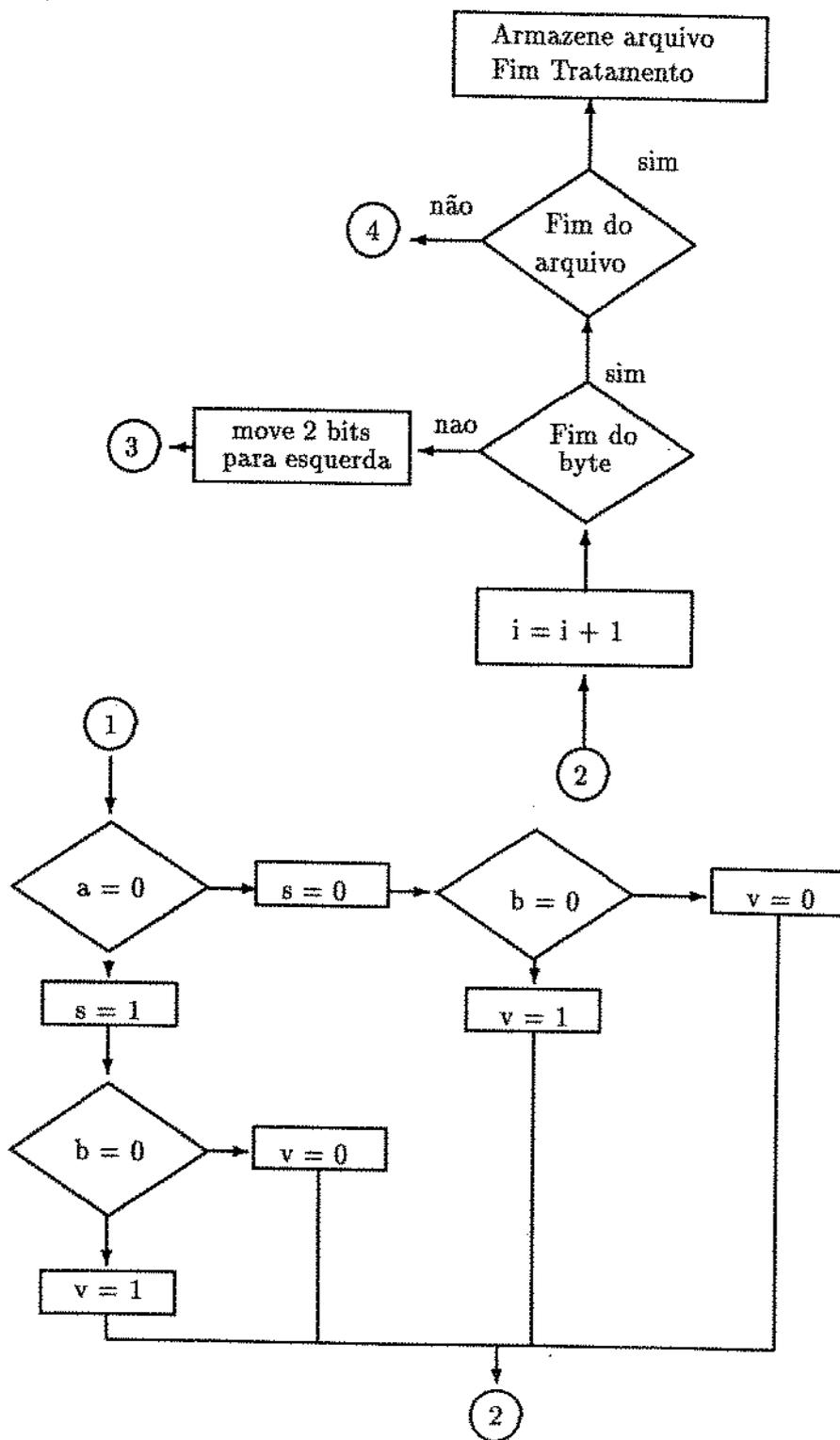


Figura 2.20: Diagrama Funcional do Processo de Tratamento

## 2.6 Comentários

A técnica do GRAFCET utilizada para apuração do sentido de rotação e frequência de saída mostra-se muito interessante, tendo em vista a representação de todos os estados assumidos quando na determinação do que denominamos sentido positivo e sentido negativo e também a possibilidade de redução do Grafcet sem perder o significado físico do problema em questão.

Uma das principais vantagens do GRAFCET, é que um problema de lógica complexa pode ser resolvido a partir dessa sistemática.

O procedimento de aquisição e tratamento apresenta-se como algo simples e com um custo bem reduzido, tornando-se uma importante ferramenta para análise do comportamento das juntas de um robô. A performance deste procedimento poderá ser avaliada a partir dos resultados apresentados no próximo capítulo.

## Capítulo 3

# Validação Experimental da Metodologia

### 3.1 Introdução

O presente capítulo será considerado sob dois aspectos. O primeiro tem como objetivo validar a metodologia apresentada no capítulo anterior; para isso estaremos usando o robô industrial Manutec r3 dentro de um programa de Cooperação Científica envolvendo a UNICAMP - PETROBRÁS - Instituto Tecnológico de Geestacht (GKSS) em intervenções submarinas automatizadas em águas profundas. O estudo consiste na análise dos três primeiros graus de liberdade do robô, uma vez que os mesmos são os mais importantes do ponto de vista estrutural. Para isso foi construído na UNICAMP e no GKSS uma maquete em escala real, onde será avaliado o comportamento de robôs industriais realizando operações automatizadas em água e a seco.

O segundo, apresenta os resultados experimentais de um estudo proposto para caracterização de um controlador do tipo não linear comandado por pulsos lógicos. Essa metodologia experimental será utilizada para analisar o comportamento do sistema excitado por pulsos lógicos com duração determinada. Este procedimento permitirá uma avaliação do comparador realizado por M.F.Miranda [17] durante seu trabalho de mestrado.

## 3.2 Ensaios e Resultados das Aquisições do Robô Manutec

Nesta seção a metodologia descrita no capítulo anterior através de um programa computacional deverá ser utilizado para análise do comportamento dos três primeiros graus de liberdade do robô industrial Manutec r3. Três ensaios serão realizados, sendo que no terceiro ensaio faremos o uso do modelo geométrico apresentado no capítulo 1 na exploração dos resultados. Na realização dos ensaios o robô se encontrava sob uma base móvel conforme ilustra a figura a seguir.

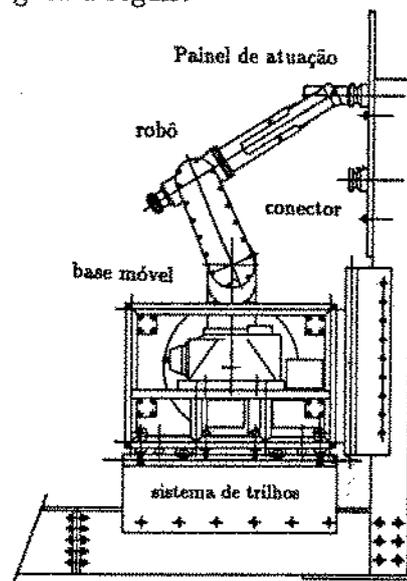


Figura 3.1: Robô sob a base móvel

A programação deste robô pode ser realizado de três maneiras.

### 3.2.1 Ponto a Ponto

Neste modo junta por junta é levada a um ponto desejado do volume de trabalho (aprendizagem), e a partir do conhecimento das posições angulares iniciais e finais de cada grau de liberdade torna-se possível elaborar um sinal de referência que será utilizado nas malhas de controle de cada junta.

Durante este modo de controle (ponto a ponto ou PTP), os sinais de referência utilizados no controlador de posição utilizam a seguinte lei de formação:

- 1 - todas as juntas do robô devem realizar movimentos simultâneos (isto é, chegam ao mesmo tempo a posição final desejada, anteriormente programado por aprendizagem);
- 2 - conhecendo-se o deslocamento angular máximo de cada junta e a velocidade máxima imposta ao robô, torna-se possível obtermos os perfis de velocidade correspondentes ao movimento de cada junta, visto que o tempo de aceleração das mesmas são parametrizados pelo fabricante.

### Lei de Posicionamento das Juntas do robô

Esta lei é baseada no princípio de posicionamento com aceleração, velocidade constante e desaceleração. O controlador gera um sinal de referência teórica que seguirá esta lei.

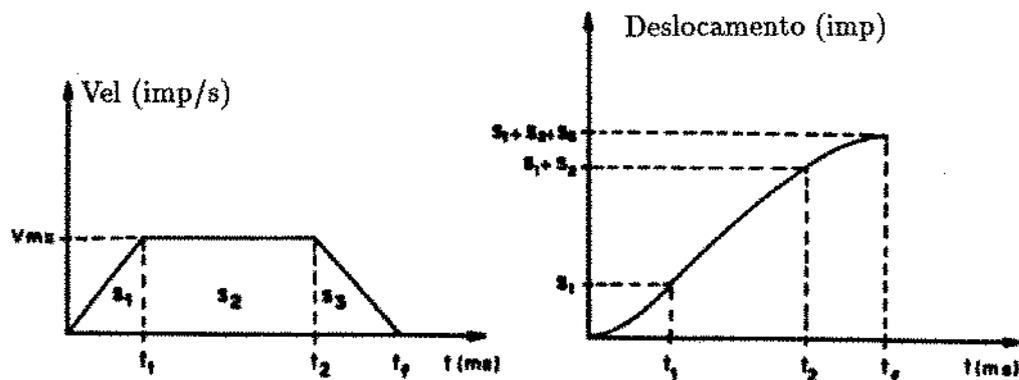


Figura 3.2: Perfil de Velocidade e Deslocamento para as Juntas do Robô

onde:

- $s_1$  - deslocamento angular na fase de aceleração;
- $s_2$  - deslocamento angular na fase de velocidade constante;
- $s_3$  - deslocamento angular na fase de desaceleração.

Na fase de aceleração a posição angular será dada por:

$$S_1(t) = \frac{1}{2}.a.t^2 \quad (3.1)$$

onde:

$$a(t) = \frac{V_{max}}{t_{ac}} \quad (3.2)$$

$t_{ac}$  - tempo de aceleração.

$V_{max}$  - velocidade máxima da junta

$a$  - aceleração

No trecho de velocidade constante a posição angular é regida pela expressão:

$$S_2(t) = S_1(t) + V_{max}.t \quad (3.3)$$

Na fase de desaceleração a expressão que rege a posição angular é:

$$S_3(t) = S_2(t) + V_{max}.t - \frac{1}{2}.a.t^2 \quad (3.4)$$

### 3.2.2 Linear

Neste modo utiliza-se o modelo cinemático inverso numérico, de maneira que, conhecidos a posição/orientação final do elemento terminal do robô, um algoritmo de inversão numérica calcula em tempo real os valores angulares de referência para cada junta do robô, tornando-se possível a execução de um movimento contínuo.

Neste modo não temos informações sobre o tipo de algoritmo utilizado pelo fabricante, mas atualmente encontra-se em desenvolvimento um outro trabalho [28] que estuda estes algoritmos.

### 3.2.3 Ferramenta (WKS)

Neste modo de operação utiliza-se a mesma forma de controle descrito anteriormente. As dimensões da ferramenta são introduzidas no controlador, tornando-se possível

Tabela 3.1: Resolução dos Encoders

Junta 1	700 Imp/Grau
Junta 2	1400 Imp/Grau
Junta 3	400 Imp/Grau

a realização de uma tarefa em relação a um ponto conhecido da ferramenta.

### 3.2.4 Ensaios Realizados

O primeiro ensaio consiste em que cada junta desloque um mesmo valor de impulsões, ou seja, o robô foi programado para que cada junta deslocasse 5000 impulsões (figura 3.3). No segundo ensaio o deslocamento de cada junta foi programado para 2000, 4000 e 6000 impulsões para as junta 1, 2 e 3 respectivamente, conforme ilustra a figura 3.8. Neste dois ensaios (realizados no modo PTP) as curvas relativa às velocidades de cada junta foram obtidas e confrontadas com uma curva teórica obtendo-se um erro para o qual utilizamos, no primeiro ensaio, para uma análise em frequência ( cálculo da FFT). No terceiro ensaio (realizado no modo linear) o programa executado pelo robô, consiste em realizar um movimento gerando uma figura geométrica (figura 3.12). Com o resultado deste ensaio utilizamos o modelo geométrico do robô apresentado no capítulo 1 para obtermos o  $P_x$ ,  $P_y$  e  $P_z$  (tabela 1.3) e então apresentamos o gráfico  $P_x \times P_y$ , visto que  $P_z$  é constante (figura 3.14).

### 3.2.5 Resultados dos Ensaios

Na apresentação dos resultados mostrados a seguir , as curvas referentes à velocidade (figuras 3.4 e 3.9) foram obtidas de acordo com a expressão :

$$vel = \frac{desloc.}{tempo} \quad (3.5)$$

para a qual mantivemos o intervalo de tempo constante e medimos a variação da frequência neste intervalo. As curvas teóricas de velocidade (figuras 3.5 e 3.10) são provenientes da

derivada das equações 3.1, 3.3 e 3.4 em relação ao tempo.

O erro de velocidade (figuras 3.6 e 3.11) é referente do confronto da curva teórica e a obtida experimentalmente. A análise em frequência é feita em cima do erro de velocidade com o qual utilizamos 1024 pontos no cálculo da FFT (figuras 3.7 ).

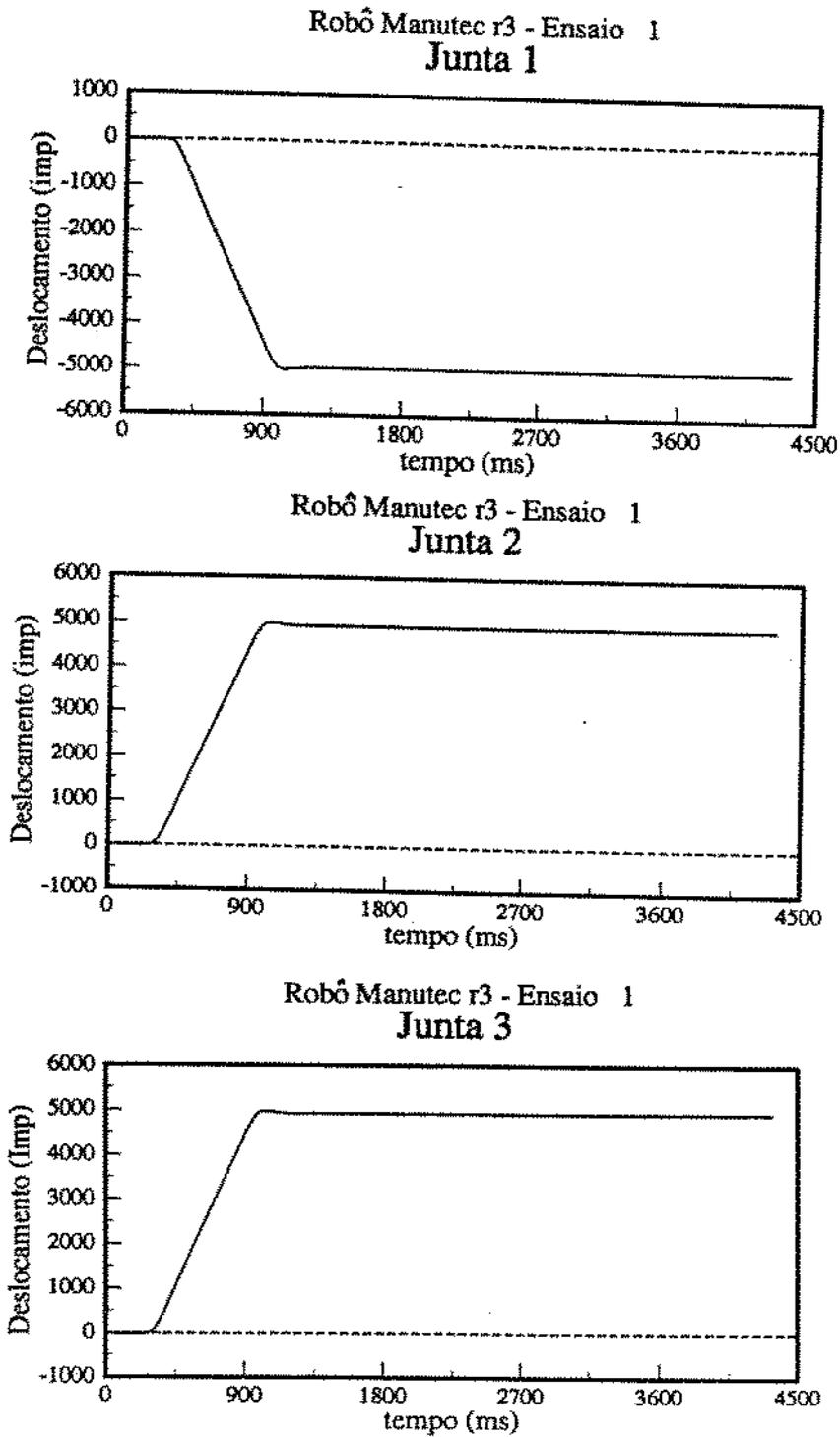


Figura 3.3:Ensaio 1: Deslocamento - Juntas 1, 2 e 3

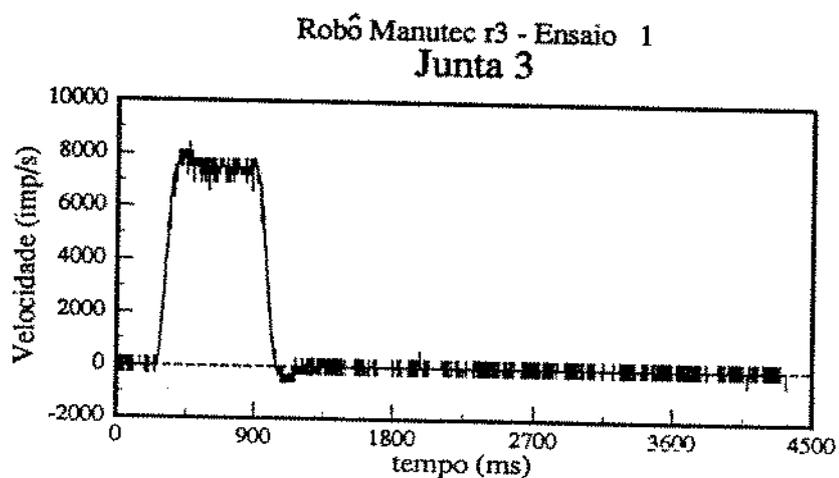
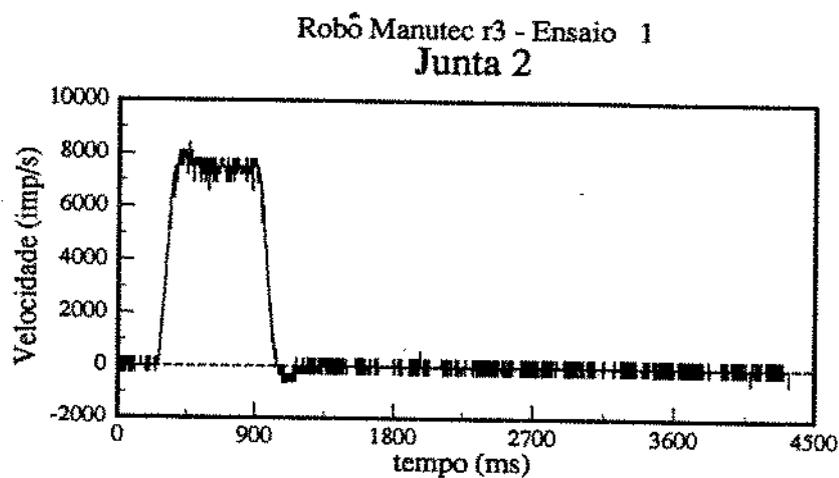
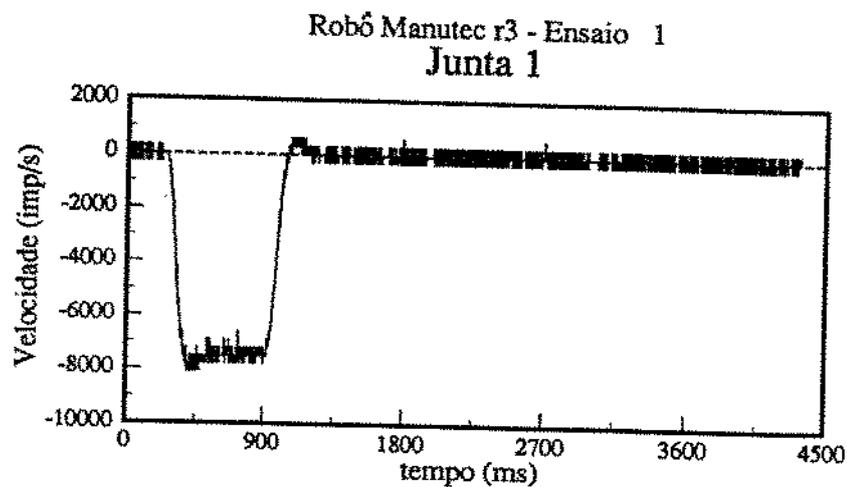


Figura 3.4:Ensaio 1: Velocidade - Juntas 1, 2 e 3

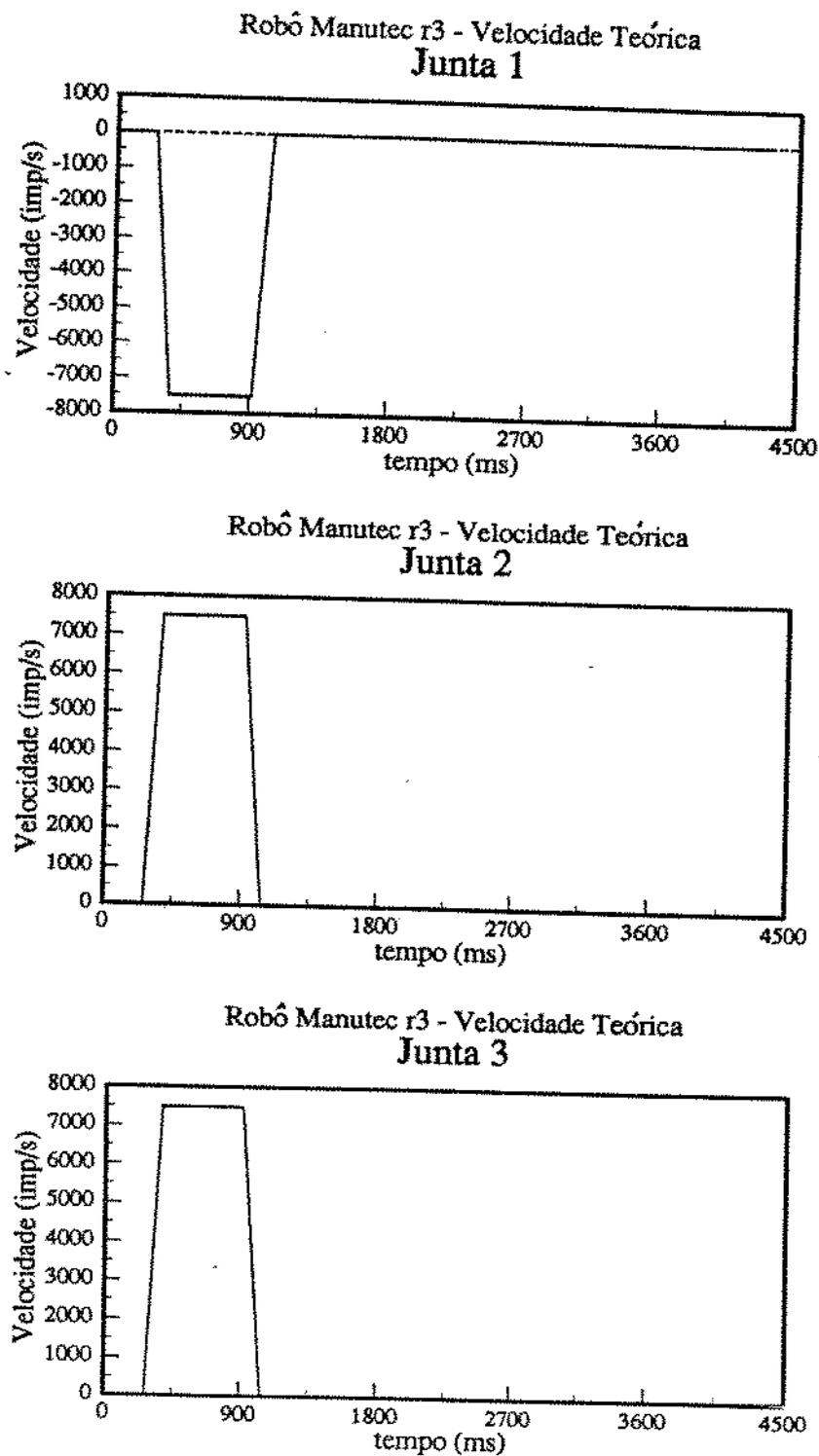


Figura 3.5: Ensaio 1: Velocidade Teórica - Juntas 1, 2 e 3

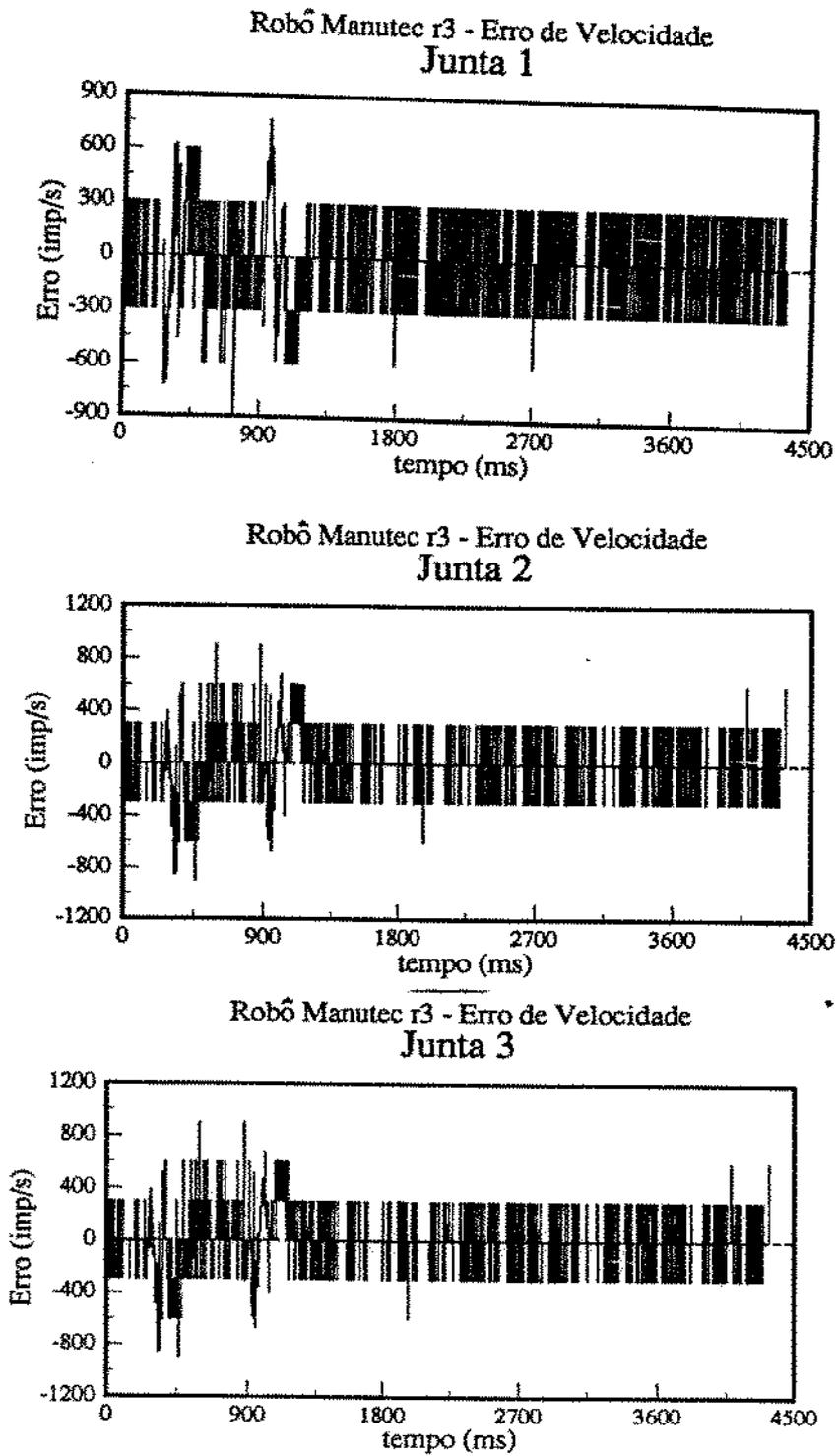


Figura 3.6:Ensaio 1: Erro de Velocidade - Juntas 1, 2 e 3

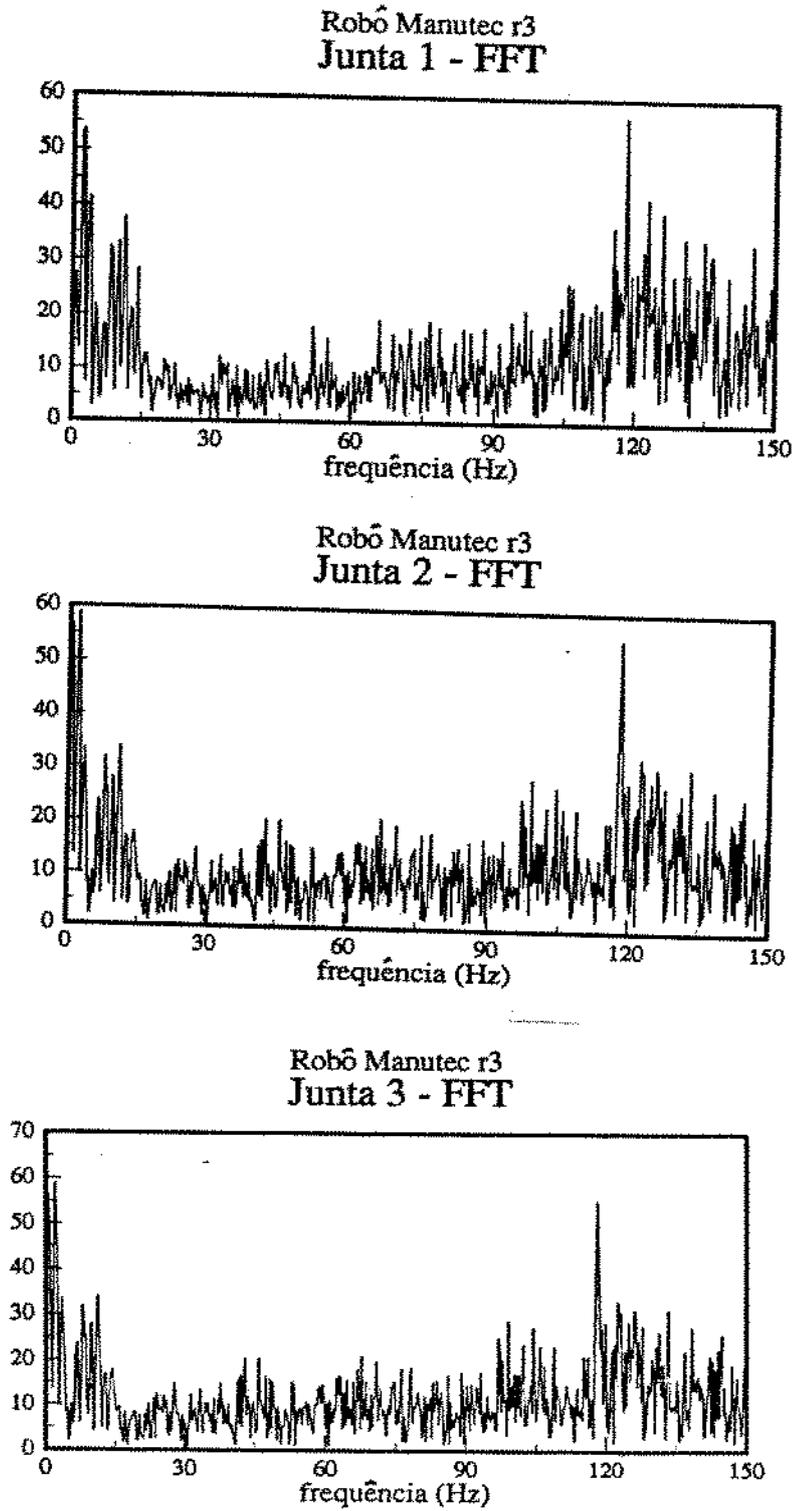
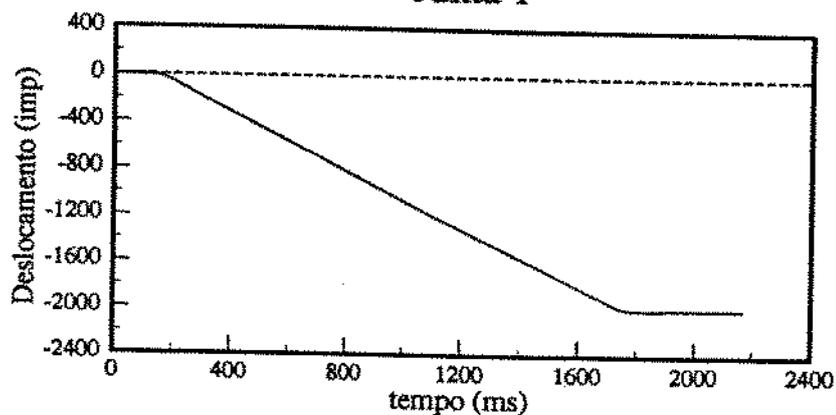
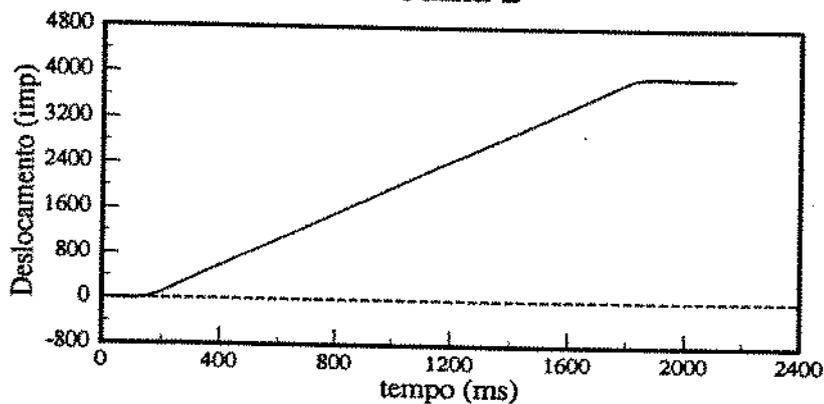


Figura 3.7:Ensaio 1: Análise em Frequência - Juntas 1, 2 e 3

Robô Manutec r3 - Ensaio 2  
Junta 1



Robô Manutec r3 - Ensaio 2  
Junta 2



Robô Manutec r3 - Ensaio 2  
Junta 3

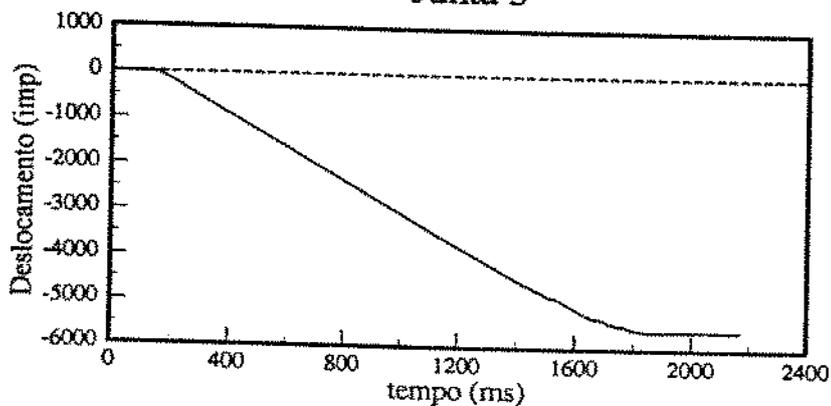


Figura 3.8:Ensaio 2: Deslocamento - Juntas 1, 2 e 3

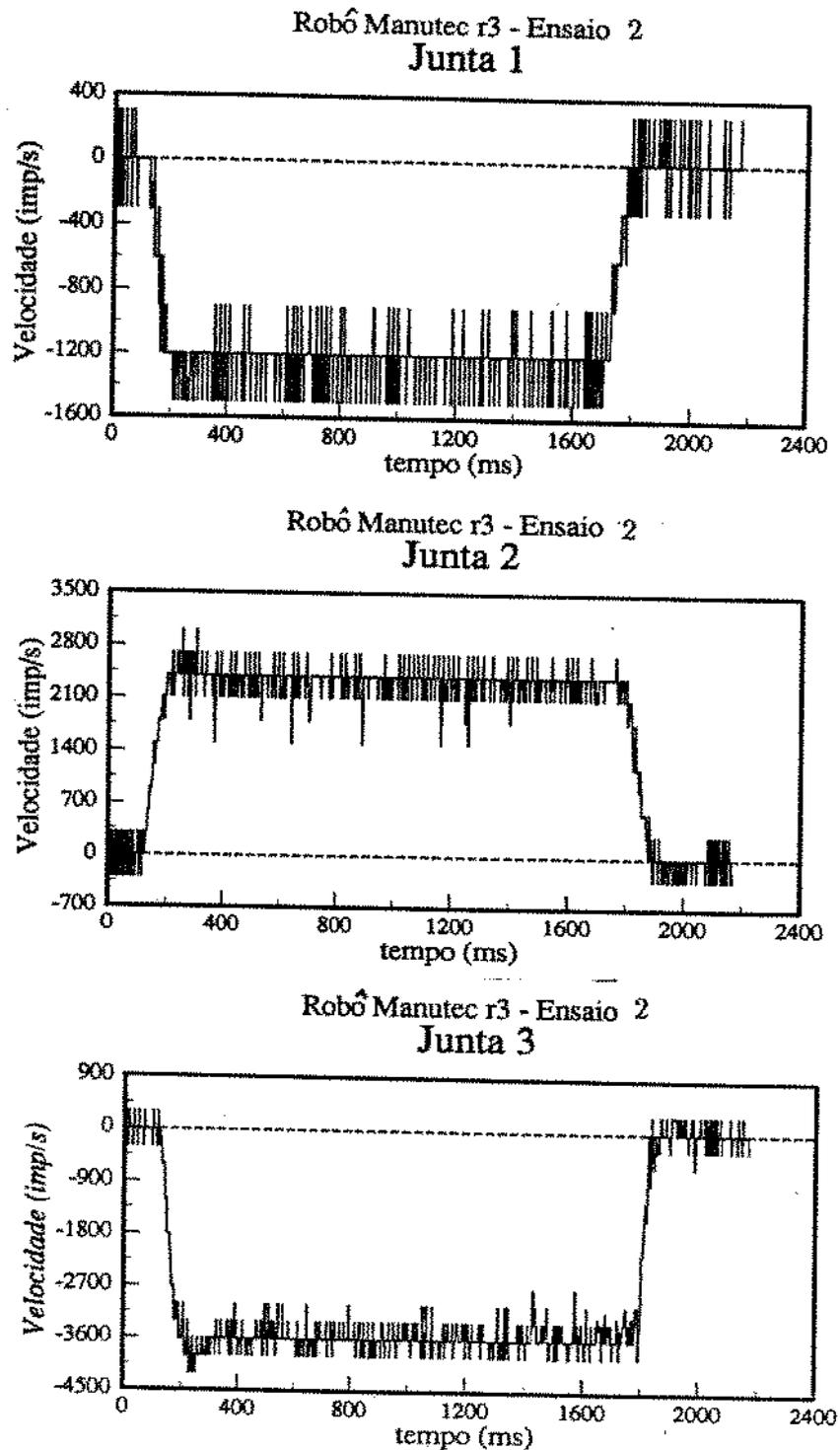


Figura 3.9:Ensaio 2: Velocidade - Juntas 1, 2 e 3

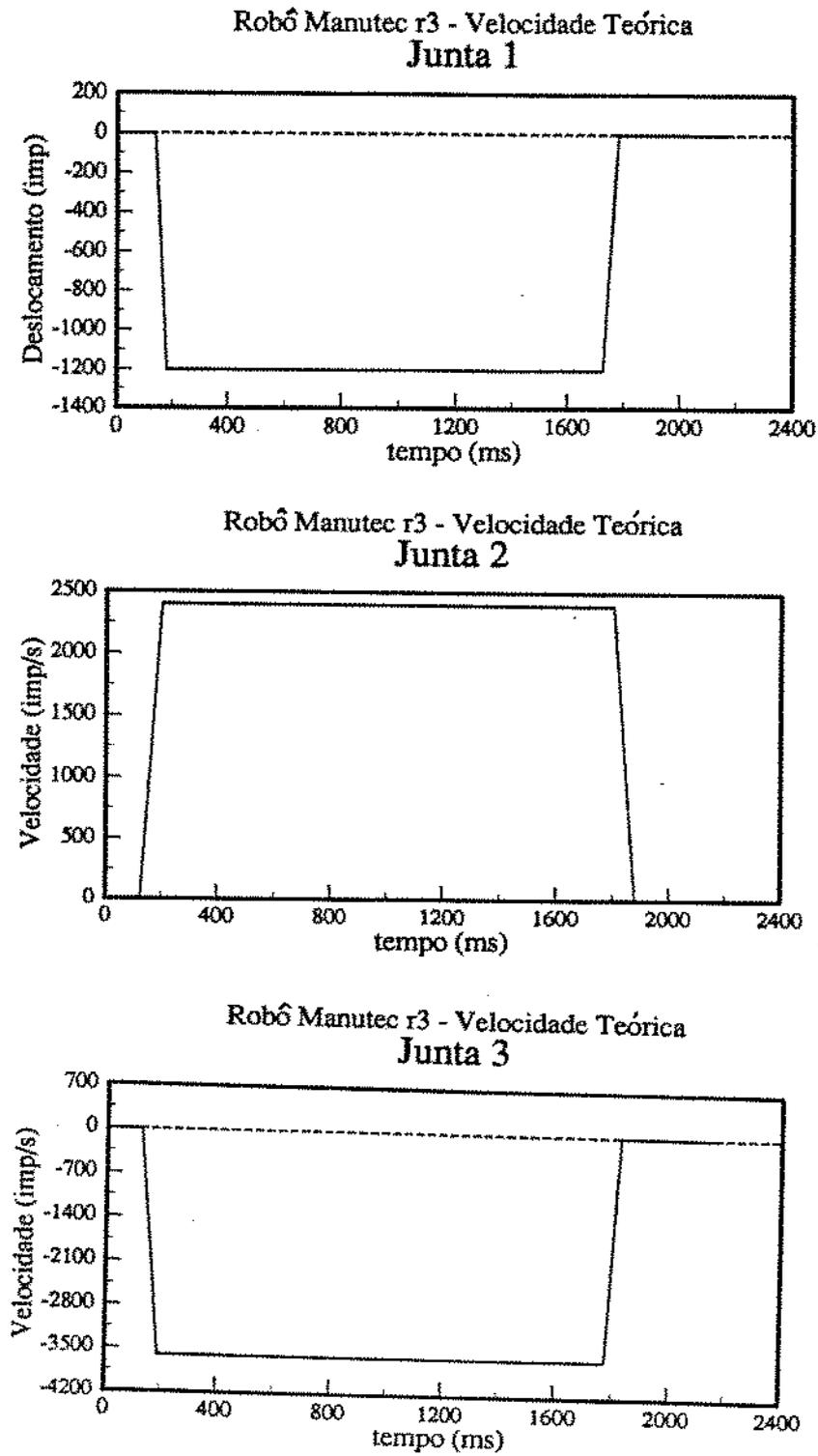


Figura 3.10:Ensaio 2: Velocidade Teórica - Juntas 1, 2 e 3

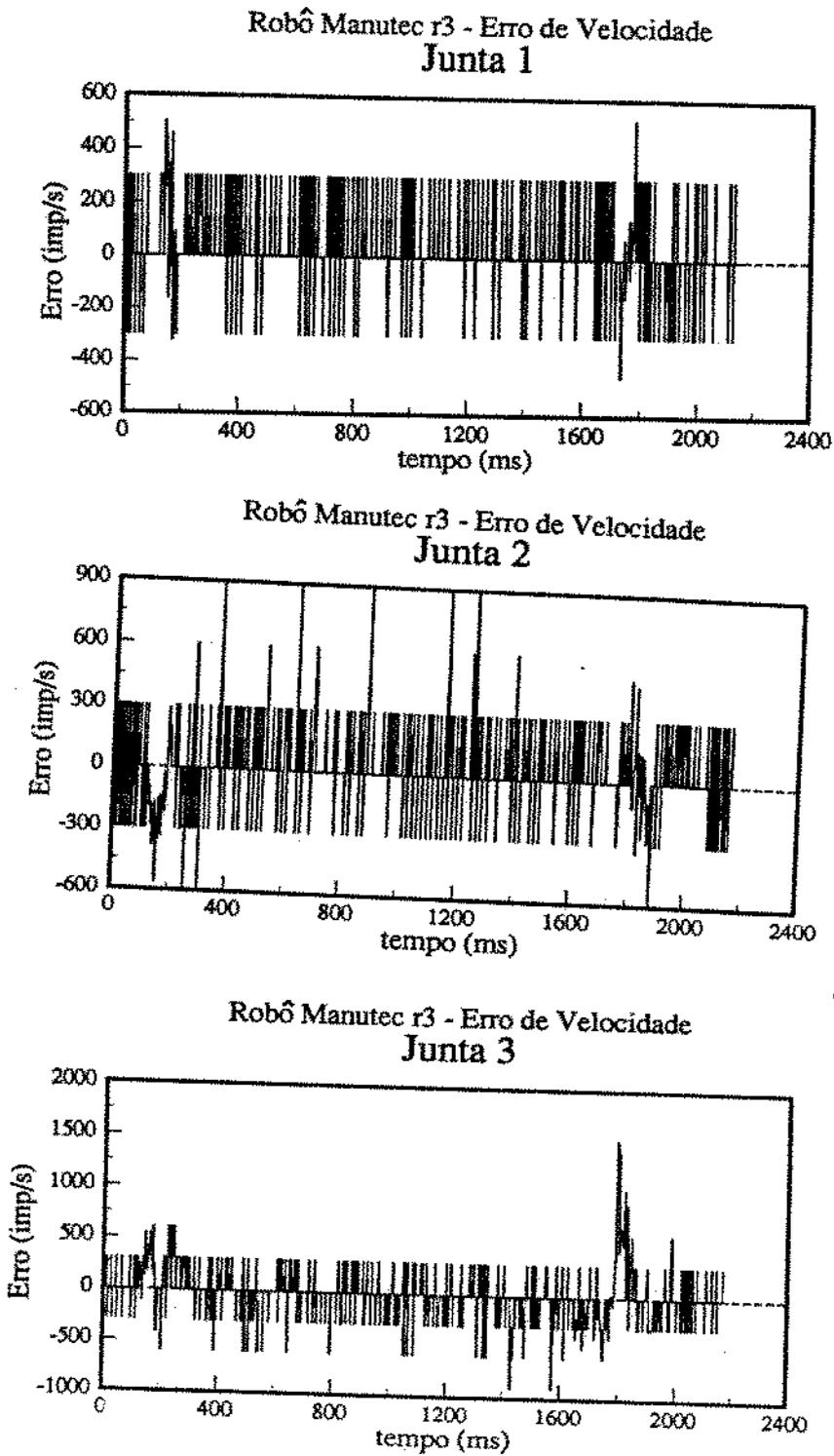


Figura 3.11:Ensaio 2: Erro de Velocidade - Juntas 1, 2 e 3

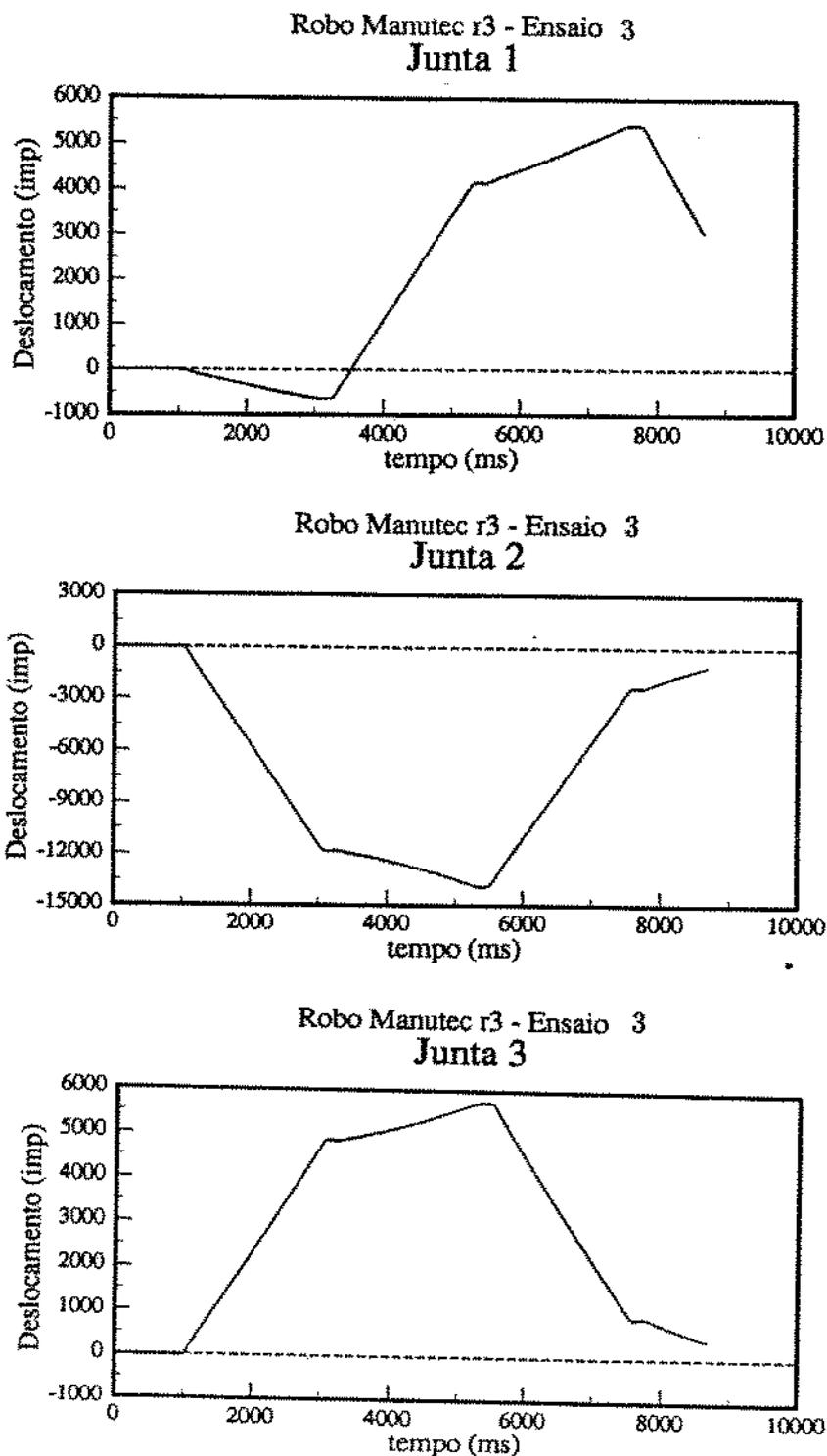


Figura 3.12:Ensaio 3: Deslocamento - Juntas 1, 2 e 3

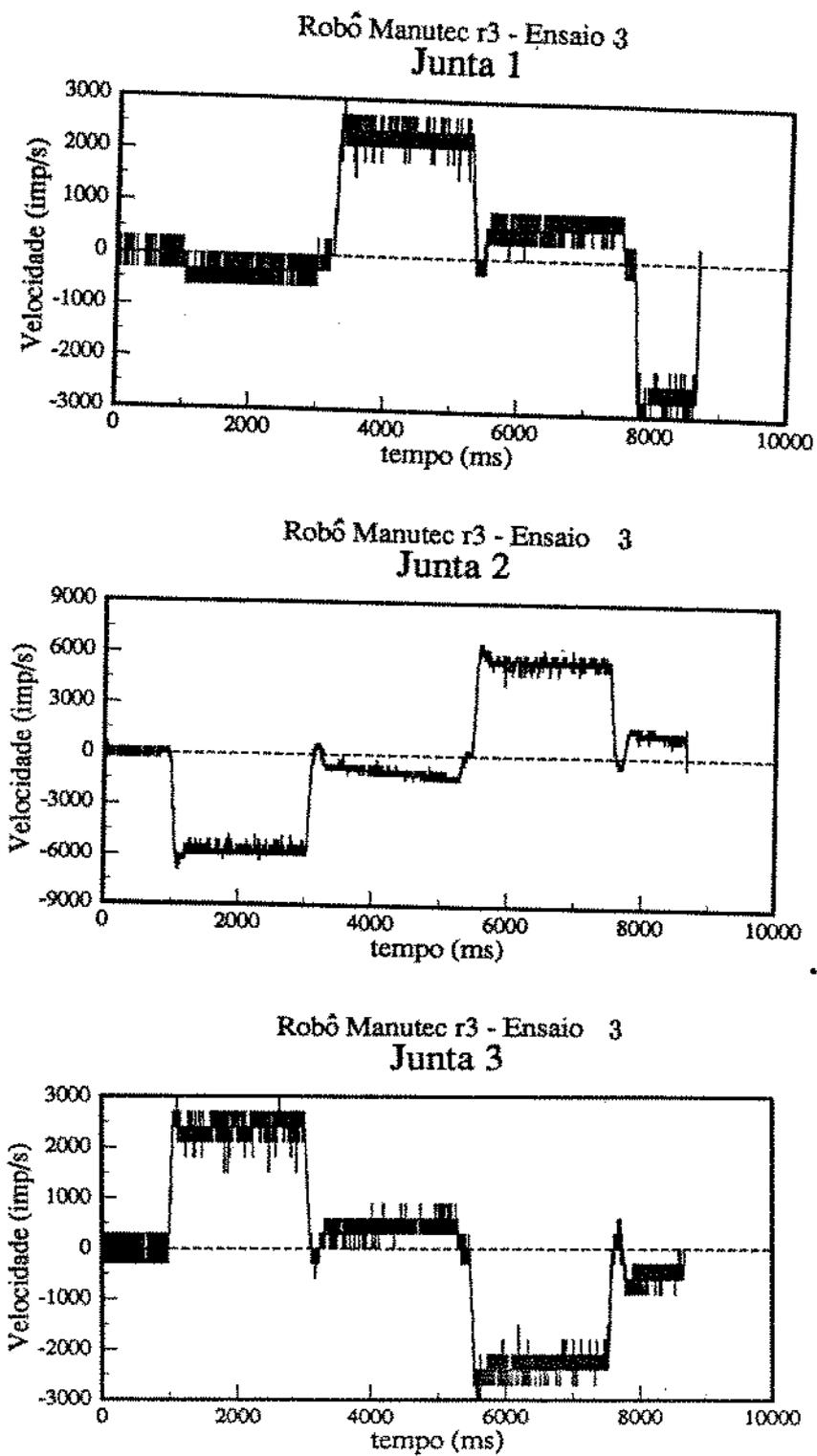


Figura 3.13:Ensaio 3: Velocidade - Juntas 1, 2 e 3

Robô Manutec R3  
Trajetória Obtida via Modelo Geométrico

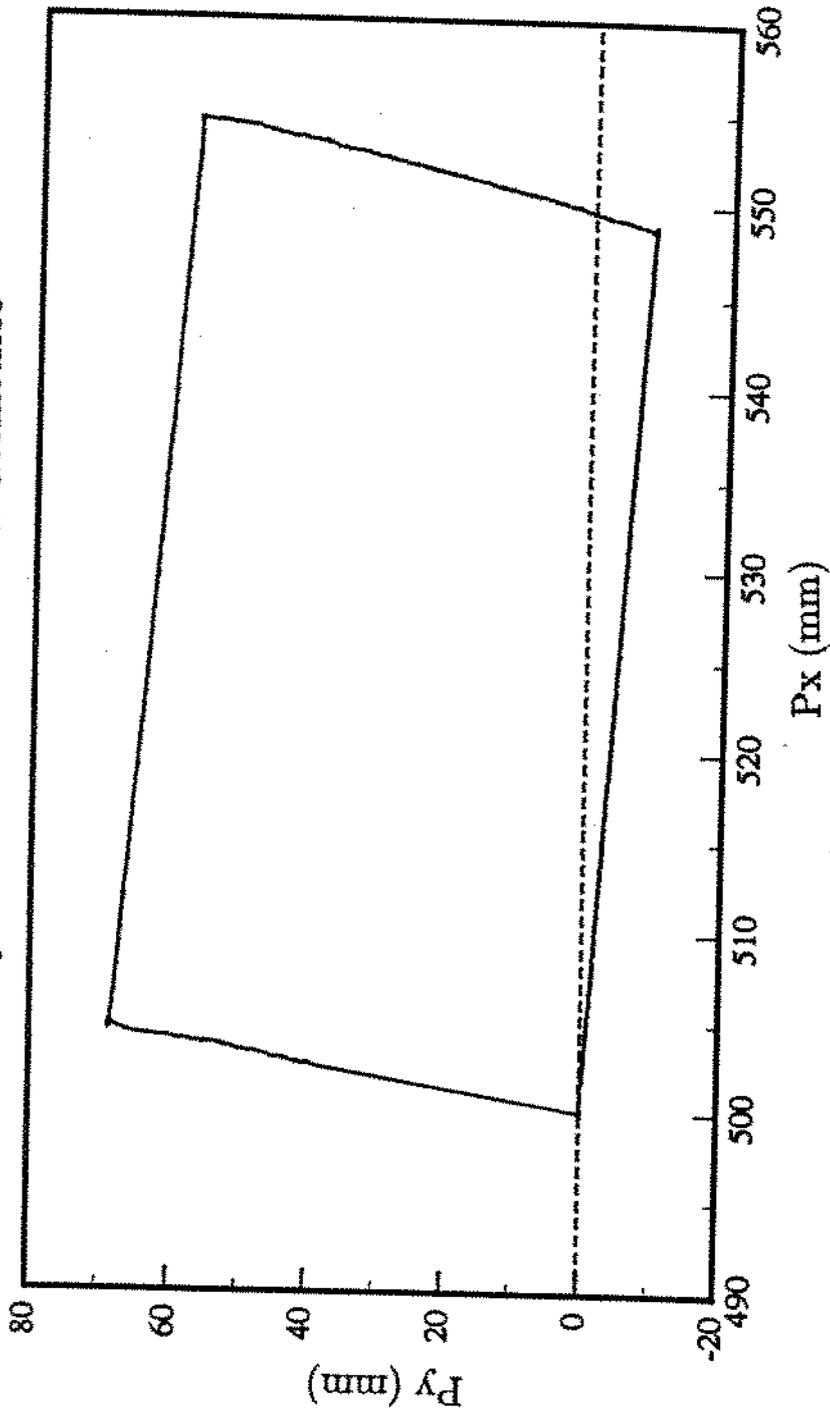


Figura 3.14: Uso do Modelo Geométrico com Dados Experimentais

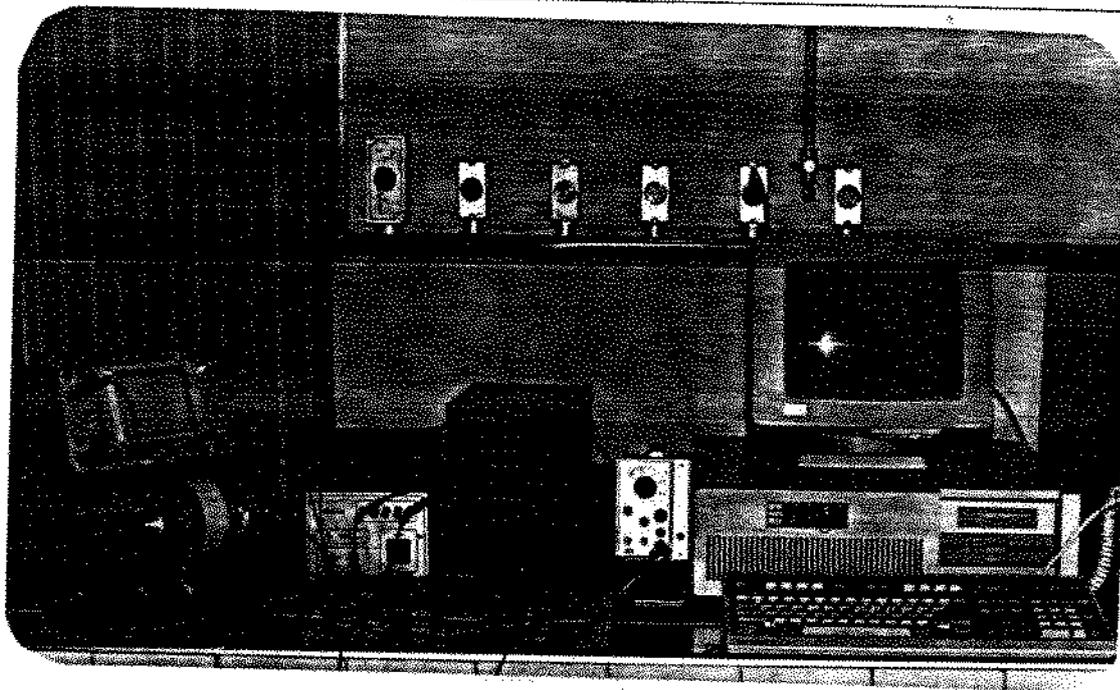


Foto 1

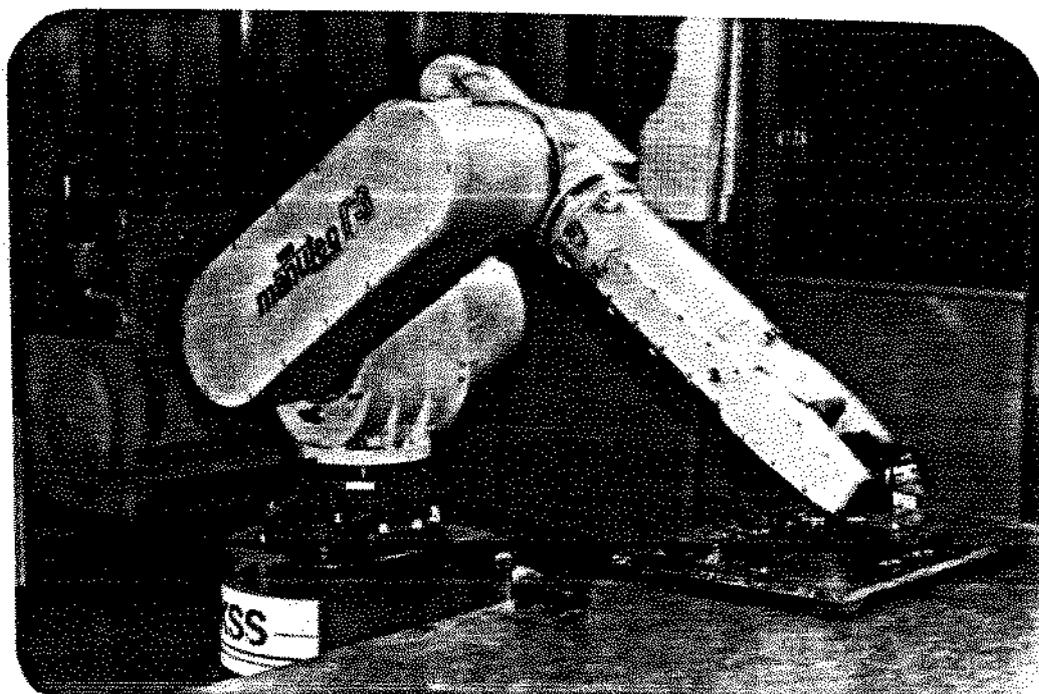


Foto 2

Figura 3.15: Foto 1: Sistema de aquisição, Foto 2: Robô Manutec r3

### 3.3 Resultado Experimental - Estudo para Caracterização de um Controlador

Nesta etapa apresentamos o procedimento experimental utilizado para caracterização de um controlador do tipo Relé, assim como os resultados obtidos. O estudo desta metodologia proposta é apresentada em anexo que também traz os resultados da simulação.

Poderá ser verificado a facilidade de implementação experimental e sobretudo a possibilidade de se trabalhar com apenas circuitos lógicos, dispensando assim os conversores AD/DA. Desta forma abre-se caminhos para estudos teórico/experimental de controladores lógicos [17].

#### 3.3.1 Realização Experimental

Para realização deste experimento, utilizamos um bancada experimental composta por um motor de corrente contínua, disco de inércia e gerador de impulsões para medida da posição incremental. Para análise da resposta do sistema utilizamos a metodologia apresentada no capítulo 3 usando apenas dois bits para entrada dos sinais do transdutor de posição.

A trajetória correspondente à excitação do sistema é enviada por um programa

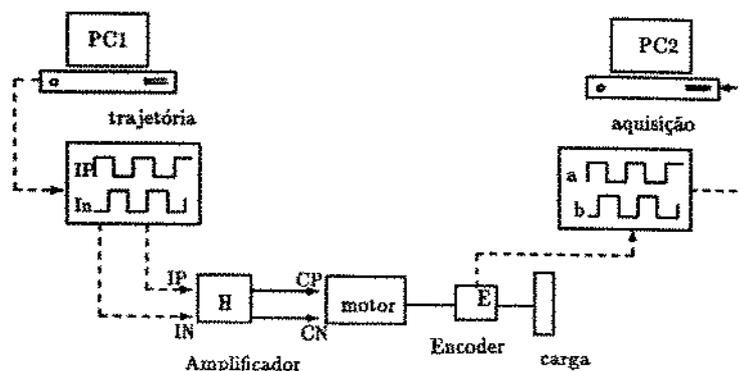


Figura 3.16: Layout da Montagem Experimental

em Assembler através da interface de comunicação paralela de um microcomputador. Os sinais são enviados sob forma de pulsos positivos (IP) ou pulsos negativos (IN) com duração pré-estabelecidos.

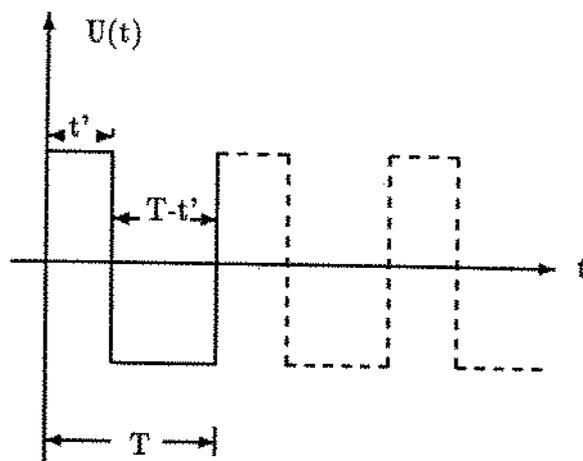


Figura 3.17: Função de Excitação

Antes de ser enviados para acionar o motor é feito uma amplificação em potência através de uma placa que é basicamente constituída por quatro transistores (Hex-Fet) montados em H, o que permite o funcionamento do motor nos dois sentidos utilizando uma única alimentação assimétrica ( 0 a 30 volts).

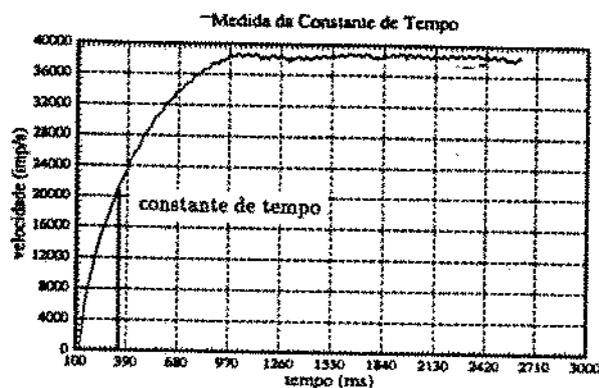


Figura 3.18: Medida da Constante de Tempo

$T$ (em ms)	$t'$ (em ms)
255 (3.92 Hz)	25
	128
	170
510 (1.96 Hz)	51
	255
	340
765 (1.31 Hz)	76
	382
	510

Figura 3.19: Valores de  $T$  e  $t'$ 

A constante de tempo foi medida da resposta de velocidade do sistema quando submetido a uma excitação degrau e tomando 63.2% da resposta em regime (figura 3.18). Com este valor, os valores de  $T$  e  $t'$  são resumidos na figura 3.19 e então inserido no programa computacional desenvolvido para excitar o sistema em questão.

## Importante:

Na verificação os resultados experimentais mostrados a seguir é importante observar as escalas em que se encontra cada um dos gráficos para um melhor entendimento.

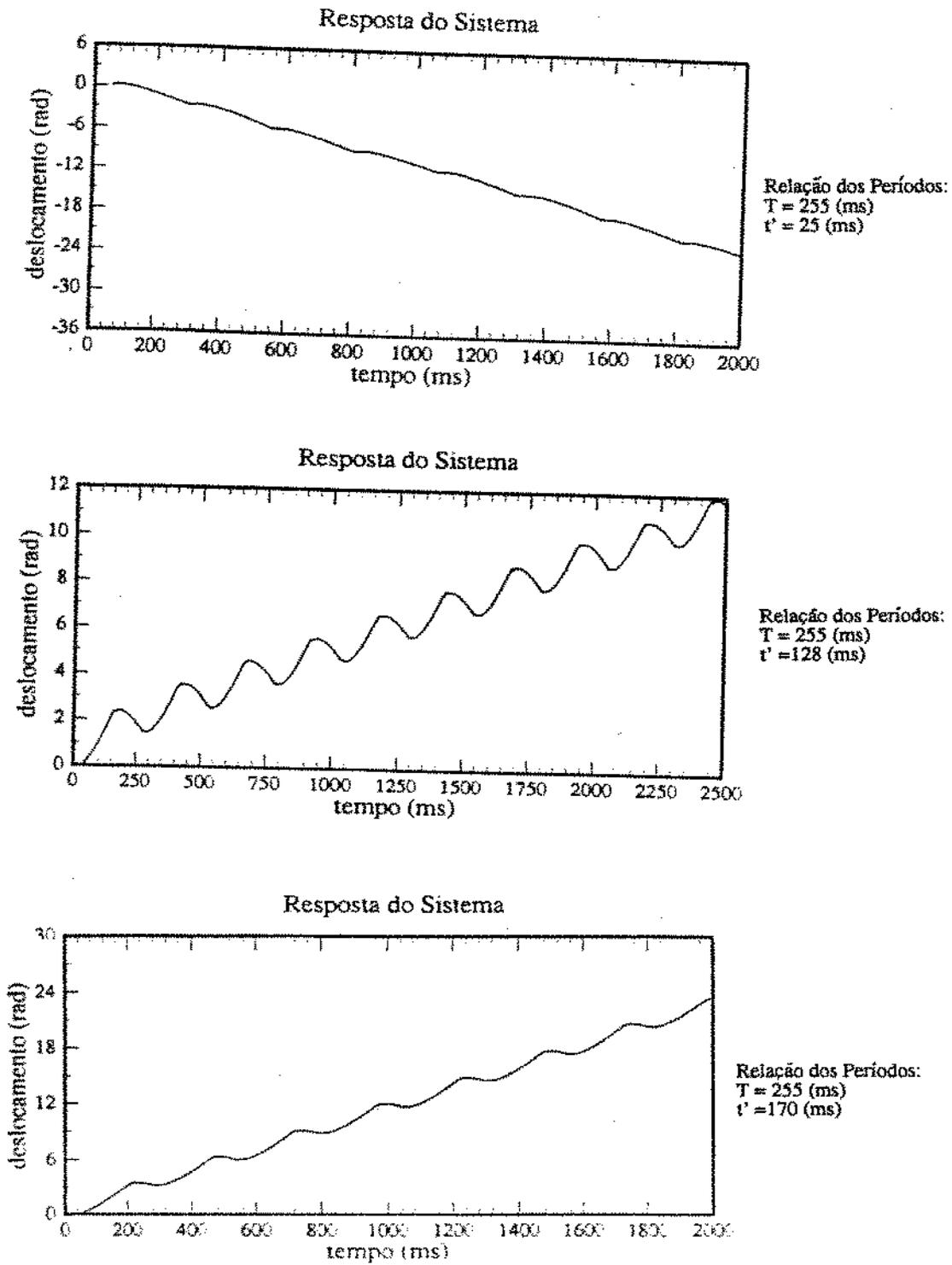


Figura 3.20: Resposta Experimental do Sistema

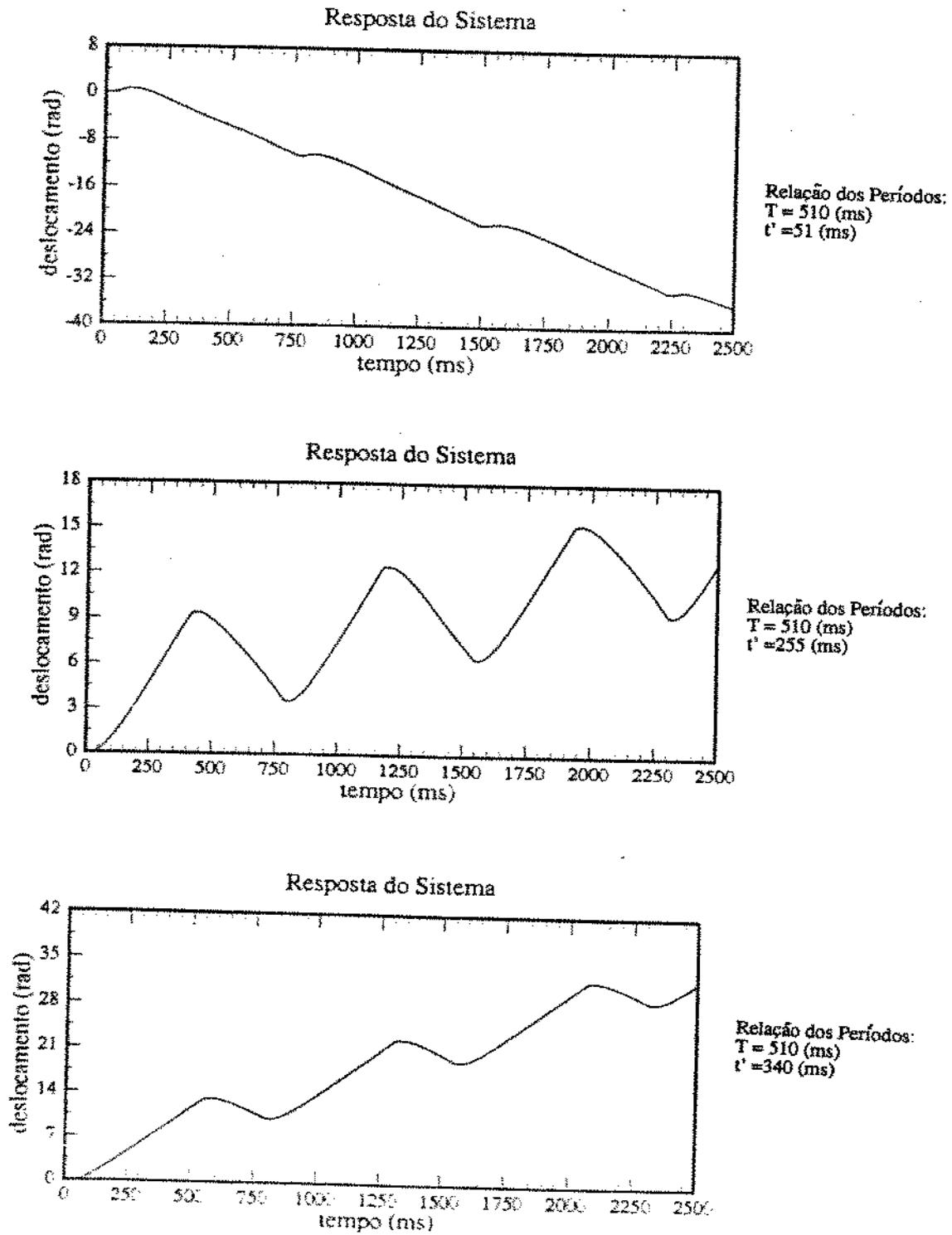


Figura 3.21: Resposta Experimental do Sistema

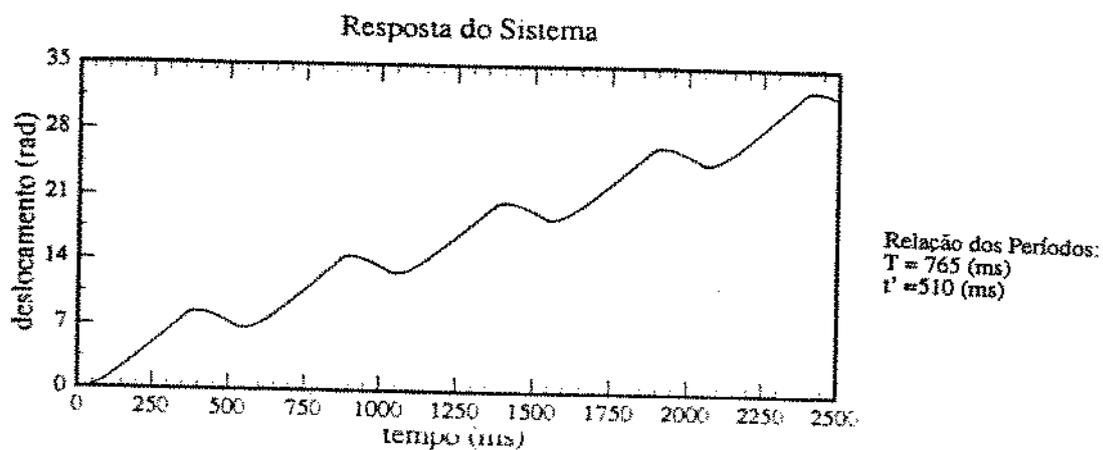
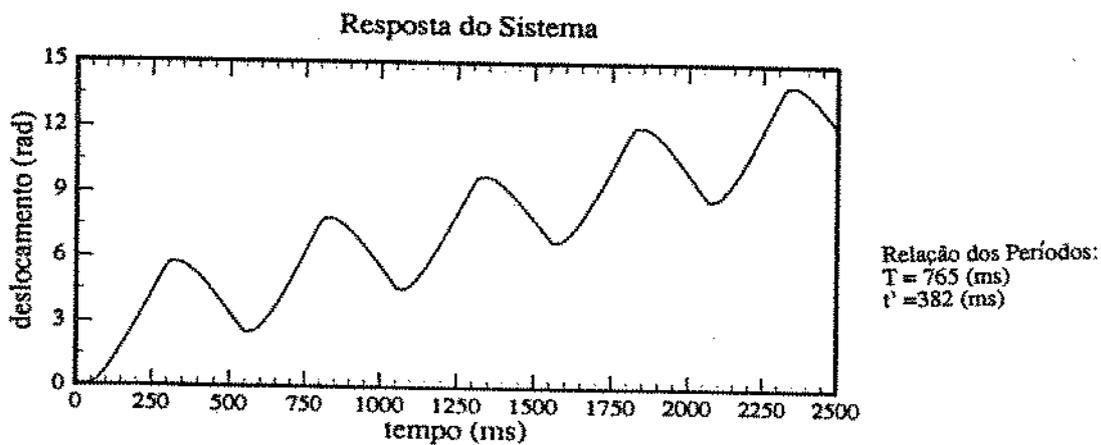
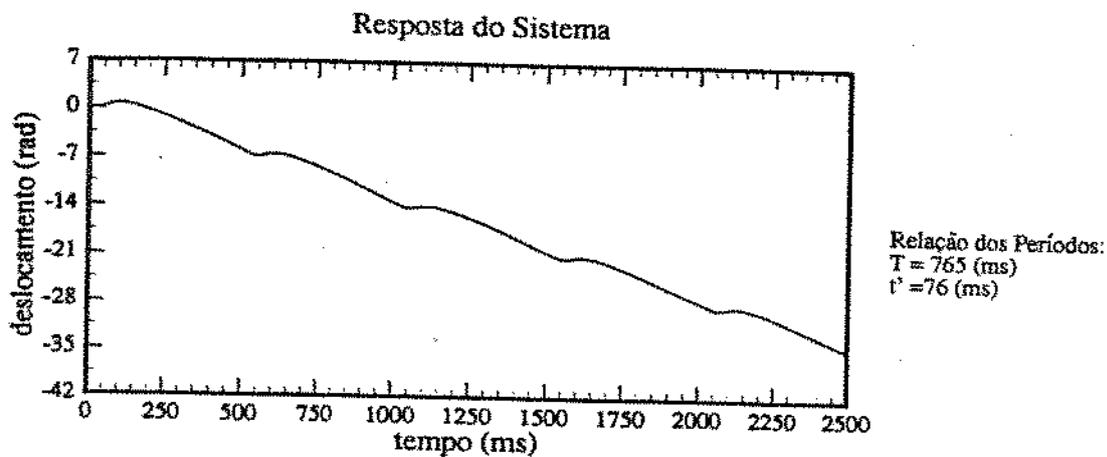


Figura 3.22: Resposta Experimental do Sistema

### 3.3.2 Análise da Zona Morta

Para uma avaliação do comportamento do sistema na presença de uma zona morta, submetemos o sistema experimental estudado a uma excitação conforme ilustrada na figura abaixo, para os valores de  $T$  e  $t'$  resumidos na figura 3.19.

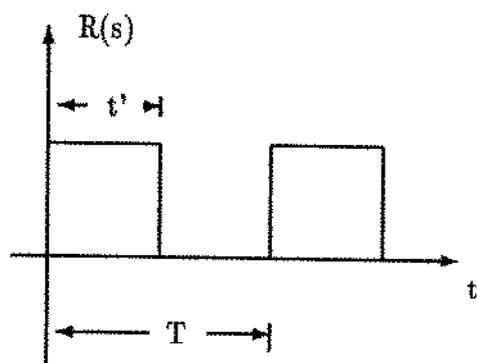


Figura 3.23: Excitação com Zona Morta

Os resultados são mostrados a seguir.

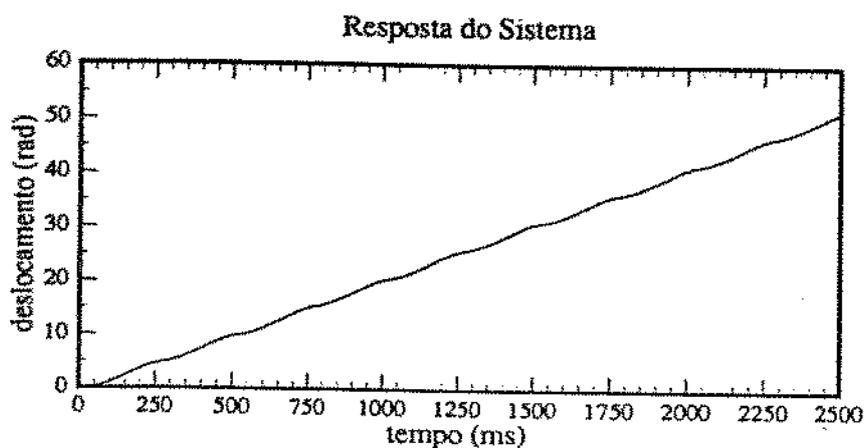
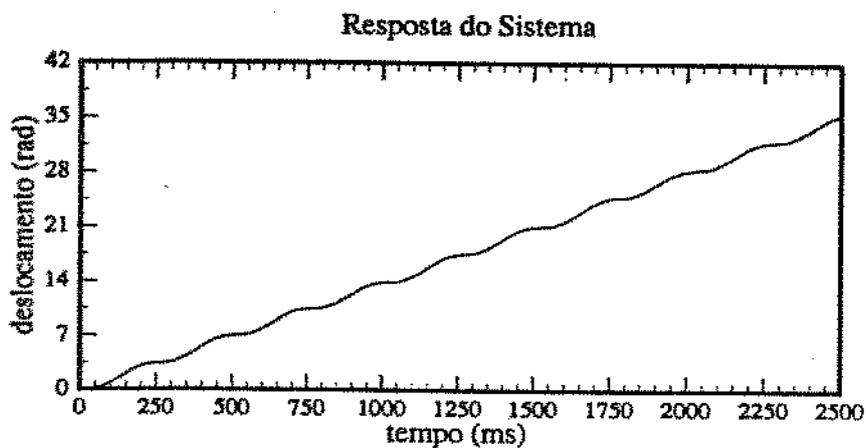
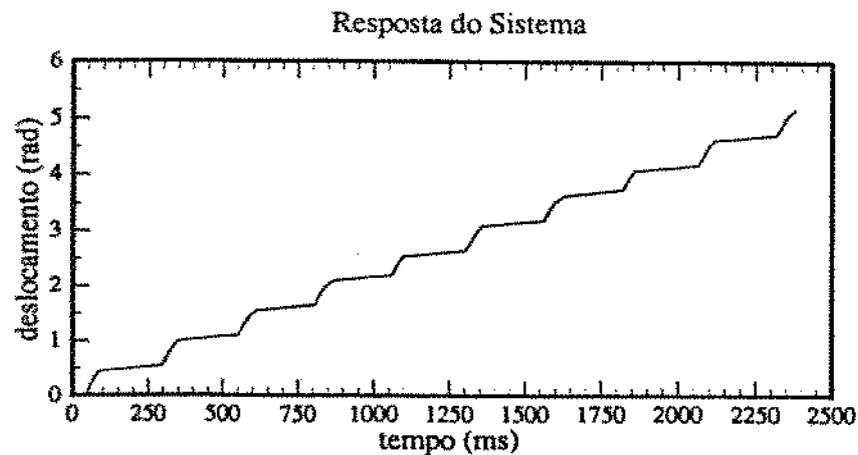


Figura 3.23: Resposta Experimental do Sistema

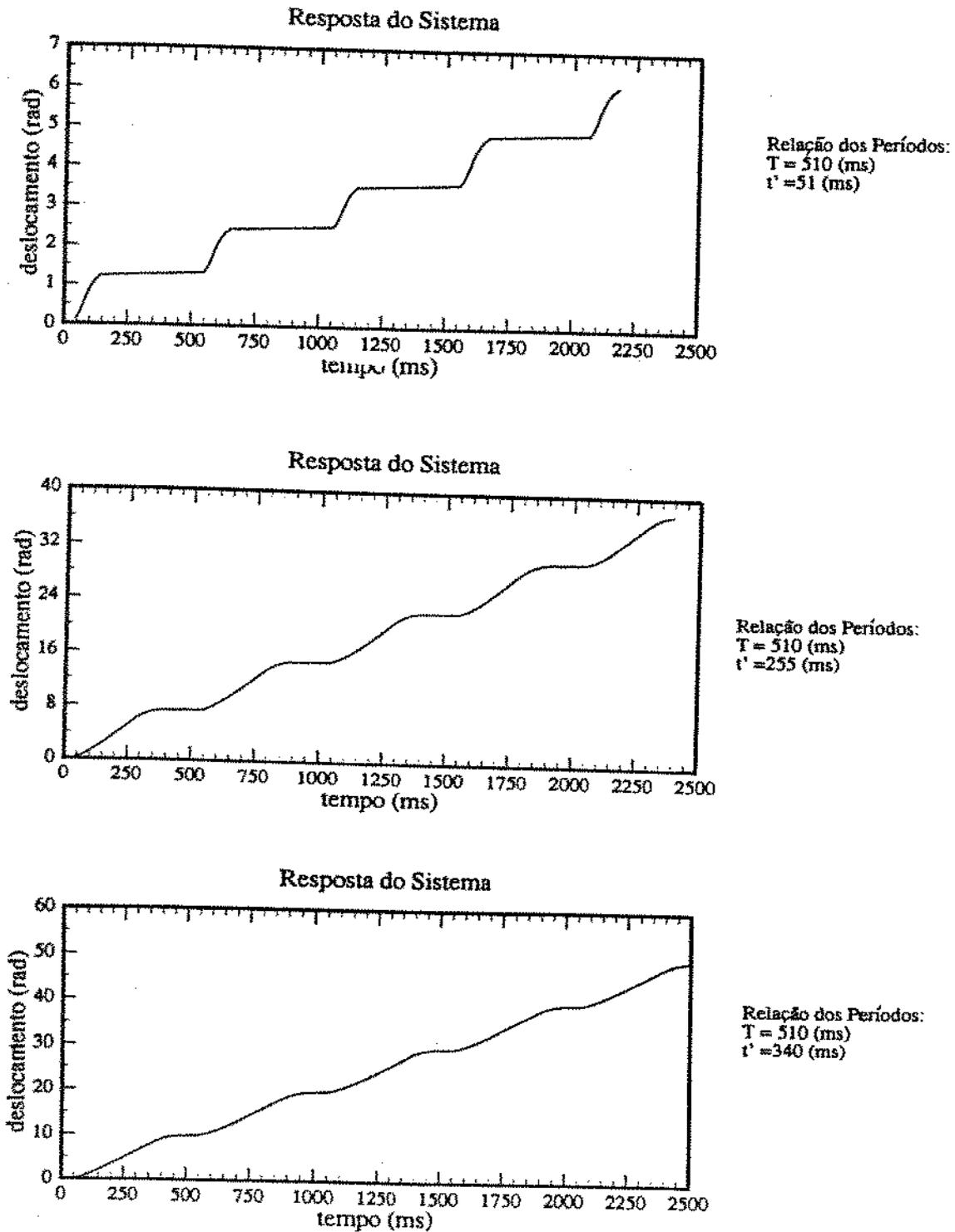


Figura 3.24: Resposta Experimental do Sistema

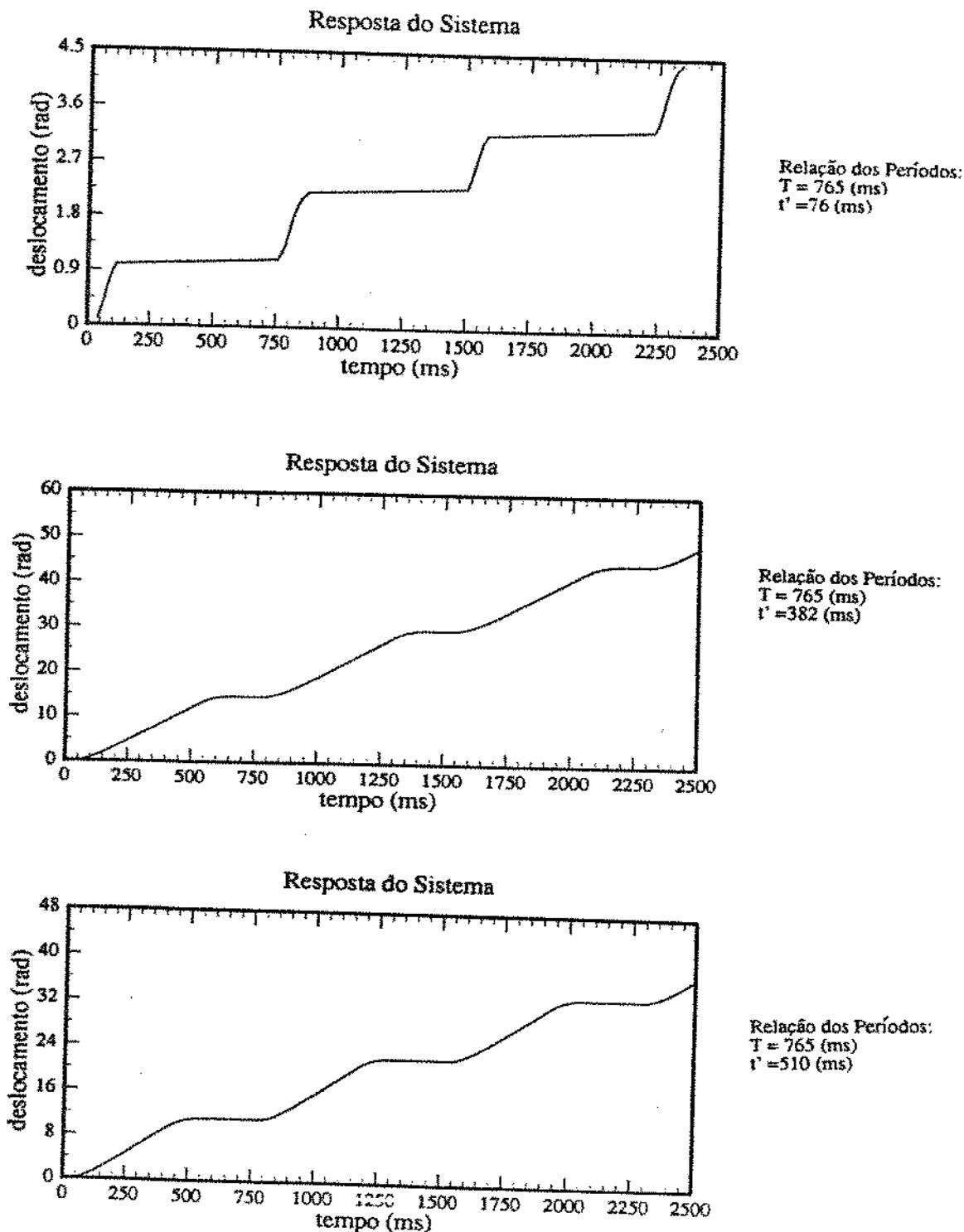


Figura 3.25: Resposta Experimental do Sistema

### 3.4 Comentários

A primeira parte deste capítulo tratou da validação experimental da metodologia descrita no capítulo anterior, podemos verificar que a metodologia apresenta um bom desempenho, uma vez que conseguiu registrar completamente o movimento do robô, conforme as figuras 3.3 e 3.8 que mostra a evolução dos deslocamentos nos dois ensaios realizados. Observa-se também a presença de overshoot e undershoot na passagem da fase de aceleração para velocidade constante e na fase de velocidade constante para a fase de desaceleração respectivamente.

Na análise dos gráficos relativos à velocidade (figuras 3.4 e 3.9), nota-se que os mesmo são compatíveis quando comparados com os gráficos dos respectivos deslocamentos (figuras 3.3 e 3.8). O erro de velocidade (figura 3.6) foi utilizado para uma análise em frequência, através do cálculo da transformada rápida de Fourier (FFT) [30]. No resultado apresentado (figuras 3.7), observa-se a existência de frequências características de sistemas mecânicos (que podem ser da estrutura do próprio robô e da estrutura de fixação). Como não temos o conhecimento prévio dessas frequências, é interessante sua identificação através de outras técnicas, como por exemplo a do martelo de impacto, sendo então possível determinar as frequências do robô.

Um outro fato importante a se considerar nesta análise em frequência é que quando na realização dos ensaios o robô se encontrava sob uma base móvel, podendo assim contribuir com mais uma frequência quando na análise de Fourier.

A figura geométrica apresentada como resultado do terceiro ensaio (figura 3.14) através da utilização do modelo geométrico do robô Manutec apresentado no capítulo 1, foi obtida utilizando somente os sinais relativos aos três primeiros graus de liberdade do robô, ou seja não considerando os três últimos relativos a orientação.

Na segunda abordagem deste capítulo que trata de um estudo teórico/experimental para caracterização de um controlador não linear, os resultados experimentais

(figuras 3.20 a 3.22) quando comparados com os resultados obtidos na simulação apresentados no anexo c , nota-se um comportamento idêntico da resposta . É interessante lembrar que os valores de  $T$  e  $t'$  apresentados na tabela dois, quando na realização experimental, utilizamos valores aproximados. Um outro fato importante é que na elaboração do programa, os pulsos são enviados através de uma malha do tipo *for - next*, que pode provocar alguns atrasos de tempos que repercutirão na resposta do sistema. Verifica-se também o bom comportamento da resposta do sistema quando na presença de zona morta (figuras 3.24 a 3.26).

## Capítulo 4

### Conclusões e Perspectivas

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo e o desenvolvimento de uma metodologia para estudo do comportamento cinemático de um robô a partir dos sinais provenientes dos transdutores de posição. Com a realização dos ensaios pode-se confirmar o bom desempenho da metodologia através dos resultados apresentados, uma vez que todas as juntas atingiram o mesmo número de impulsões programados, o que denota ser um processo preciso com um custo relativamente baixo.

Os gráficos relativos a velocidade refletem precisamente o movimento executado pela junta e ampliando ainda mais os overshoot e undershoot que aparecem nos gráficos relativos ao deslocamentos realizados. A análise em frequência não nos fornece muita informações, sendo necessário a realização de outros estudos e a utilização de outras técnicas para uma análise mais apurada.

Uma perspectiva própria para este trabalho, consiste em um estudo completo dos seis graus de liberdade do robô Manutec r3, o que pode ser realizado através de um outro sistema idêntico ao aqui apresentado, ou seja, seria necessário a utilização de dois microcomputadores onde estariam *rodando* o software desenvolvido para aquisição e tratamento tendo em comum a mesma base de tempo. A figura 4.1 traz o layout desta proposta.

Na utilização da metodologia no estudo proposto de caracterização de um con-

trolador do tipo On-Off, verifica-se a possibilidade da realização de um controle lógico efetivo em função das informações oriundas dos transdutores, ou seja, um controle com um único nível de informações (lógicas). É importante lembrar que os resultados obtidos experimentalmente devem ser encarados sob o ponto de vista qualitativo, pois o modelo assumido para o estudo teórico (anexo b) não correspondem aos elementos utilizados em bancada experimental.

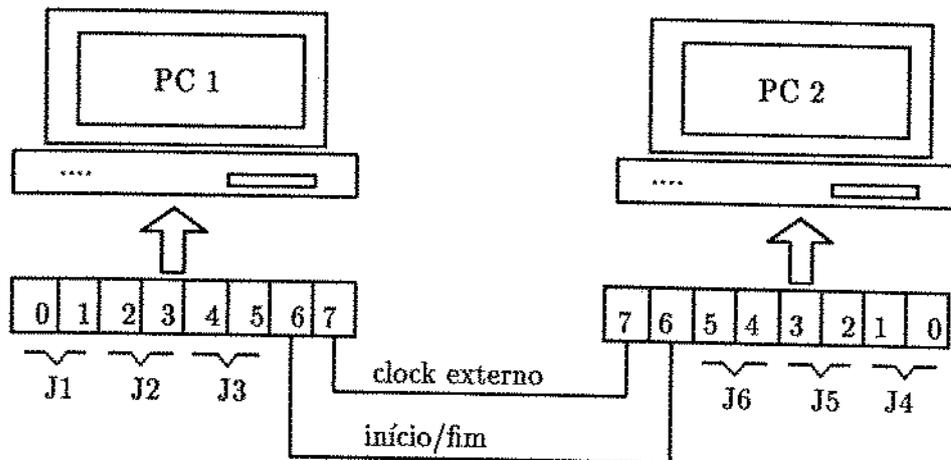


Figura 4.1: Layout para análise dos seis graus de liberdade de um robô

Desta feita, o trabalho abre perspectivas para o estudo e desenvolvimento de duas linhas de trabalho, que podem ser futuramente implementadas:

- Desenvolvimento de controladores lógicos performantes, utilizando basicamente sinais lógicos;
- Desenvolvimento de um procedimento de testes para estudos do comportamento dinâmico de um robô no fundo do mar ( dentro do projeto de cooperação científica entre as instituições UNICAMP/PETROBÁS/GKSS), uma vez que nessas condições a trajetória realizada pelo robô estará sujeita a perturbações dos mais variados tipos, possibilitando assim a utilização dos resultados para correção do controlador.

## Apêndice a

# Robô Manutec R3 - Especificações Técnicas

### a.1 Características

A automação industrial exige dos robôs industriais uma grande mobilidade alinhada a uma rigidez mecânica e características dinâmicas elevadas. O robô MANUTEC R3 apresenta as seguintes características particulares:

- Fácil implantação e montagem dentro de uma fábrica, uma vez que é possível fixá-lo em qualquer posição.
- Grande mobilidade devido aos seus 6 graus de liberdade
- Facilidade de utilização graças as possibilidade de deslocamento em coordenadas cartesianas
- Grande precisão de repetição - 0.1mm
- Baixo consumo de energia (potência inferior a 1KVA)

- Fraco atravancamento graças a cinemática articulada
- Comportamento harmonioso e poderosas funções para o funcionamento ponto a ponto e contínuo (interpolação linear e circular)

É possível acoplar um grande número de periféricos em seu sistema. A sua programação é efetuada em modo de aprendizagem.

A parte mecânica do robô é composta de um sistema articulado muito robusto. O sistema de alimentação utiliza motores de corrente contínua sem coletor que foram desenvolvido especialmente para esta aplicação (brushless) . Os conduites de ar comprimido estão integrados dentro do robô possibilitando um comando da garra a partir de funções lógicas do controlador . As junções dos acoplamentos permite o carregamento automático da garra, tendo um limite máximo de 15Kg.

## a.2 Especificações

Características Técnicas do Robô Manutec R3	
Função	Características
Sistema de Coordenadas	Sistema articulado, 6 juntas
Curso	junta 1 $\pm 162^{\circ}$ (100 <sup>o</sup> /s) junta 2 $\pm 162^{\circ}$ (850 <sup>o</sup> /s) junta 3 $\pm 110^{\circ}$ (300 <sup>o</sup> /s) junta 4 $\pm 145^{\circ}$ (180 <sup>o</sup> /s) junta 5 $\pm 187.5^{\circ}$ (230 <sup>o</sup> /s) junta 6 $\pm 270^{\circ}$ (190 <sup>o</sup> /s)

Características Técnicas do Robô Manutec R3 (continuação)	
Comprimento do braço	aumento de 100,200 ou 300 mm entre as juntas 4 e 5
Carga máxima da garra	15 Kg com aumento de 100mm: 13 Kg com aumento de 200mm: 10 Kg com aumento de 300mm: 6.5 Kg
Precisão de repetição	$\pm 0.1$ mm
Modo de Comando	ponto a ponto (6 juntas simultaneas) comando contínuo, interpolação linear com orientação de outil interpolação circular
Modo de Programação	aprendizagem código minemónico, guia de operação, sistema de coordenadas cartezianas, coordenadas da ferramenta e do robô, programação off-line
Memória de Programa	64K Byte 128K Byte 192K Byte
Memória de prog. ext.	cassete magnético
Entrada e saída	28 entradas/32 saídas Extensão de 32 entradas/32 saídas ou 16 saídas 2A
Interface CNC	entrada analógica a 3 canais analógica RS 232 S
Sensores	interface para transdutores de posição interface para transdutores visuais a RS 232 C
Alimentação	trifásica 50 Hz, 500/440/380 V $\pm 10\%$ 1KVA
Peso Condições ambientes	parte mecânica 260 Kg, Proteção IP 54 temperatura ambiente em regime: 0 a 45° humidade relativa do ar 20 a 90%

## Apêndice b

# Uma Introdução ao Sistema de Controle Não Lineares

### b.1 Introdução

Uma vez em que todos os pontos relativos ao movimento realizado por uma junta de um robô podem ser adquiridos pelo processo de aquisição e tratamento descrito no capítulo 2, a intenção deste é servir de base para o próximo apêndice, o qual propomos uma metodologia para caracterizar um controlador não linear. A abordagem utilizada é baseada na referência [5]. O estudo se concentra na análise do comportamento dinâmico de um sistema submetido a um controle do tipo on-off, devido ser esta a base da proposição a ser apresentada no apêndice c

### b.2 Generalidades Sobre os Sistemas não Lineares

A maioria das relações matemáticas entre quantidades físicas não é linear, sendo frequentemente aproximados por equações lineares, principalmente pela simplicidade matemática.

Propriedades essenciais tais como proporcionalidade de causa-efeito e superpo-

sição são amplamente conhecidas quando se trata de sistema linear, sendo possível a existência de função de transferência e frequências características do sistema. Em se tratando de sistemas não lineares, estas propriedades não se aplicam.

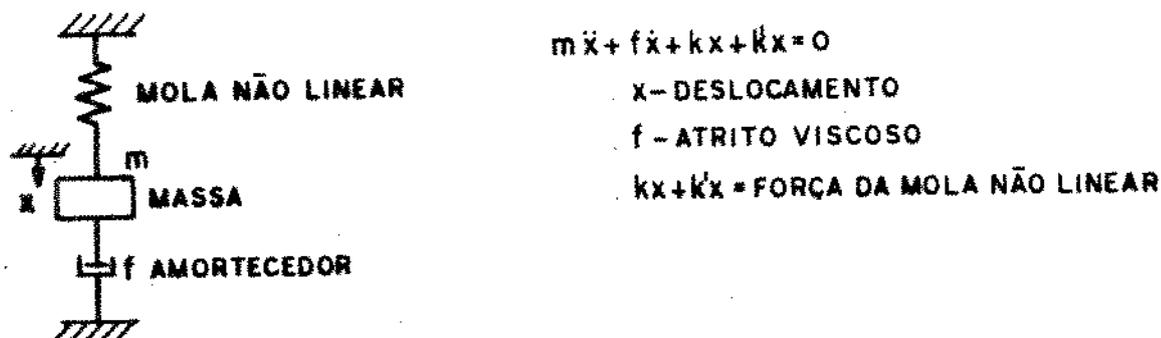


Figura b.1: Exemplo de um sistema não linear

Na figura b.1 é apresentado um exemplo de um sistema não linear cuja a componente da força elástica da mola não linear  $k'x$  varia com o deslocamento  $x$ .

Uma das características importantes dos sistemas não lineares é a dependência do comportamento da resposta do sistema em relação à amplitude e ao tipo de entrada. Isso significa que um sistema não linear pode apresentar um comportamento completamente diferente para um mesmo tipo de excitação porém com amplitudes diferentes.

Com o uso de computadores, novas técnicas foram desenvolvidas para o estudo de problemas não lineares, cujas simulações tornaram fundamental quando na análise e projeto de sistemas desta categoria. Não há um método geral para tratar todos os sistemas não lineares devido as equações diferenciais envolvidas praticamente não permitirem isso [4]. Para um grande número destas equações de relativa importância prática, são possíveis apenas obter soluções aproximadas que só se aplicam sob condições limitadas em que foram obtidas.

Uma forma de se estudar esse tipo de sistema em regiões onde o grau de não linearidade é pequeno, é utilizar técnicas de linearização e resolver o problema linearizado. O método da função descritiva é uma dessas ferramentas que nos permite estudar a estabilidade de muitos sistemas não lineares simples do ponto de vista do domínio da frequência. Este método fornece informações sobre a estabilidade de sistema de qualquer ordem, mas não fornece informações exatas sobre as características da resposta temporal.

Um outro método utilizado, onde o grau de não linearidades pode ser alto, inclui a solução das equações diferenciais não lineares ou simplificações desta por meio da técnica do Plano de Fase ou aplicando a técnica baseada no segundo método de Liapunov

O método do plano de fase fornece informações sobre a estabilidade e sobre o comportamento da resposta temporal, mas é limitado a sistemas de 1a. e 2a. ordem.

O método de Liapunov pode ser aplicado para estudo de estabilidade de sistema de qualquer ordem, mas sua aplicação pode ser prejudicada às dificuldades de se encontrar funções de Liapunov para sistemas não lineares complexos.

### **b.3 Não linearidade Usuais em Sistema de Controle**

Dentro de um sistema de controle é possível identificar a presença de não linearidades, principalmente as do tipo inerentes, tais como zona morta em válvulas, saturação em motores e amplificadores e folgas em engrenagens.

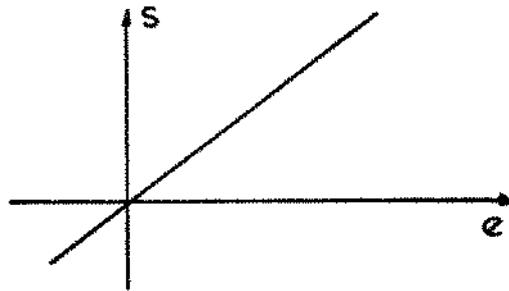


Figura b.2: Relação entrada-saída de um sistema linear

A relação entrada-saída de um sistema dito perfeitamente linear é uma reta. De fato, esta relação real apresenta uma curva claramente acentuada. A maioria das não linearidades em sistema de controle podem ser representadas por uma combinação de quatro situações básicas: zona morta, saturação, efeito curvatura e histerese.

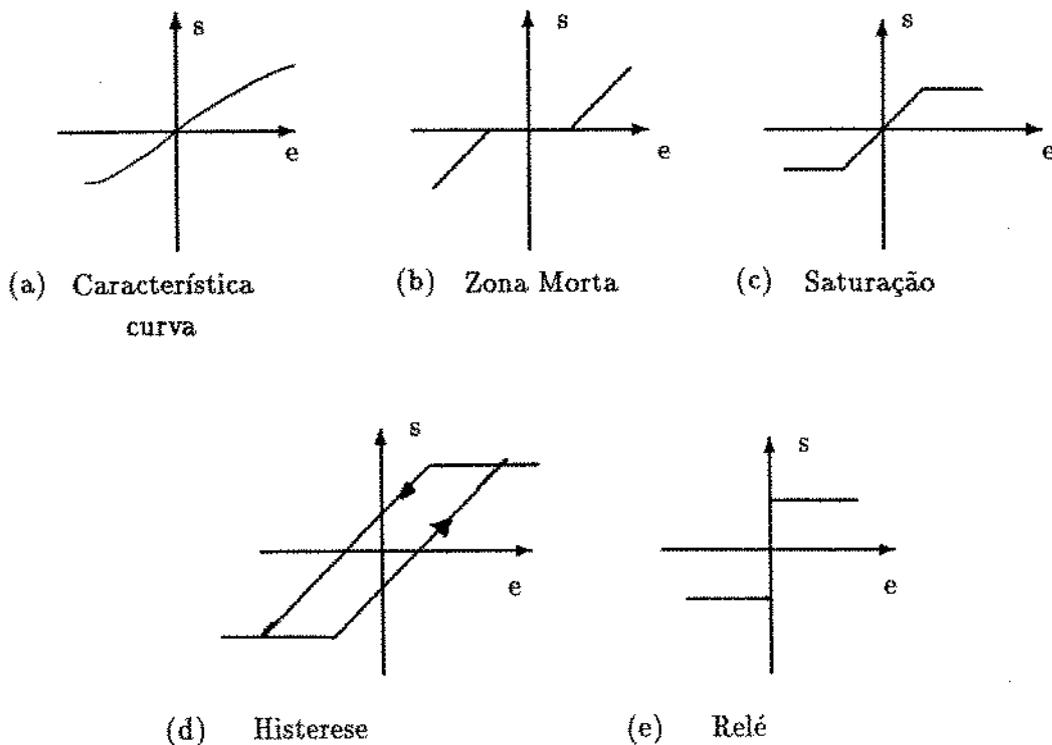


Figura b.3: Não linearidades básicas

Novas situações podem ser produzidas associando os conceitos acima citados.

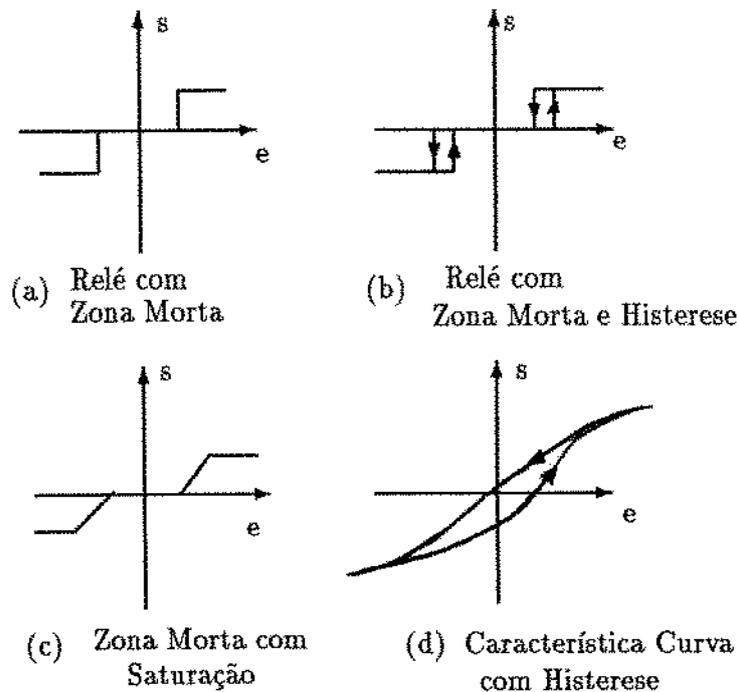


Figura b.4: Não linearidades combinandas

Permitindo assim, representar basicamente todas as não linearidades presentes dentro de um sistema de controle. Algumas dessas situações são mostradas na figura b.4 .

- Relé com Zona Morta
- Relé com Zona Morta e Histerese
- Zona Morta com Saturação
- Característica curva com Histerese entre outros.

## b.4 Estudo do Regime Transitório

Geralmente, para facilidade de estudo do comportamento da resposta temporal de um sistema não linear , todas as não linearidades são agrupadas em um único bloco, conforme representado em diagrama de blocos abaixo [5].

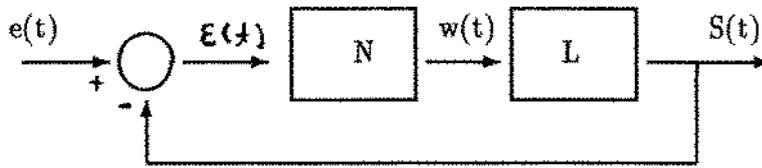


Figura b.5: Diagrama de Blocos agrupando parte linear e não linear

Seja o elemento não linear (N) constituído por um controlador do tipo Relé. A saída do elemento não linear é uma onda quadrada, sendo positiva nos instantes em que  $e(t)$  é maior que  $s(t)$ , onde  $s(t)$  é a resposta do elemento linear excitado por  $w(t)$  (onda quadrada com amplitude  $M$ ). A comutação acontece quando  $e(t)$  é menor que  $r(t)$ .

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) = e(t) - s(t) > 0 &\longrightarrow +M \\ \varepsilon(t) = e(t) - s(t) < 0 &\longrightarrow -M \end{aligned} \quad (\text{b.1})$$

#### b.4.1 Resposta Temporal do Sistema com Elemento Relé

Considere o sistema apresentado no diagrama de blocos da figura b.5 inicialmente em repouso, é então aplicado  $e(t)$  positivo no instante  $t = 0$ , neste instante  $\varepsilon(t)$  é positivo, e  $w = +M$ . A resposta do elemento linear é a resposta a função degrau, ou seja,  $q(t) = Mu(t)$ . Com o tempo,  $q(t)$  cresce até ter o mesmo valor de  $e(t)$  num tempo  $t_1$ , assim, neste instante acontece a comutação, passando  $w$  para um novo valor ( $w = -M$ ).

O componente não linear é então excitado por  $-2Mu(t - t_1)$ , originando uma resposta  $r(t)$  do sistema dado pela expressão abaixo.

$$s(t) = M[q(t)u(t) - 2q(t - t_1)u(t - t_1)] \quad (\text{b.2})$$

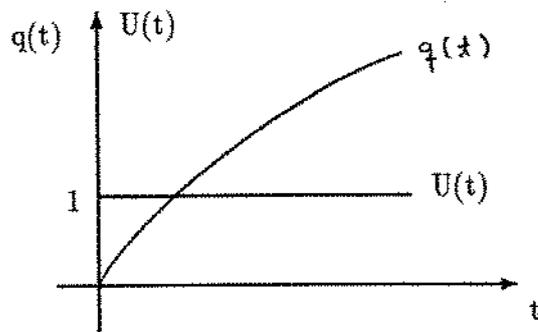


Figura b.6: Resposta da Parte Linear a Excitação Degrau

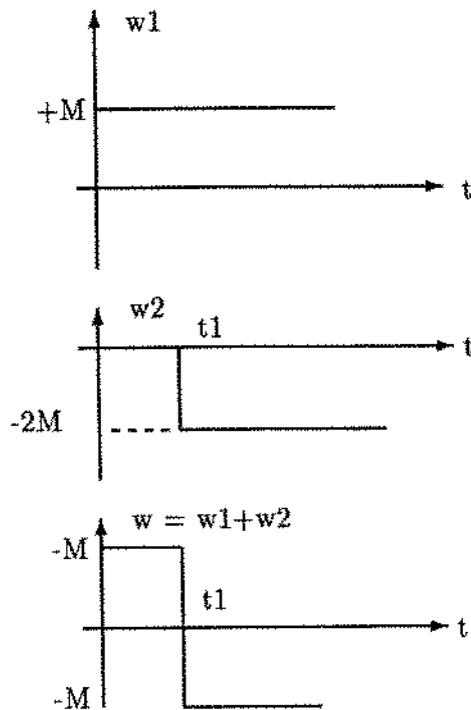


Figura b.7: Representação da Função  $w$  com Superposição de duas funções degrau

até a próxima comutação.

Assim podemos generalizar a resposta do sistema, já que a excitação é uma onda quadrada.

$$w(t) = M[u(t) - 2u(t - t_1) + 2u(t - t_2) - \dots] \quad (\text{b.3})$$

$$w(t) = M[u(t) + 2 \sum_1^n (-1)^k u(t - t_k)] \quad (\text{b.4})$$

$$s(t) = M[q(t)u(t) - 2q(t - t_1)u(t - t_1) + 2q(t - t_2)u(t - t_2) - \dots] \quad (\text{b.5})$$

$$s(t) = M[q(t)u(t) + 2 \sum_1^n (-1)^k q(t - t_k)u(t - t_k)] \quad (\text{b.6})$$

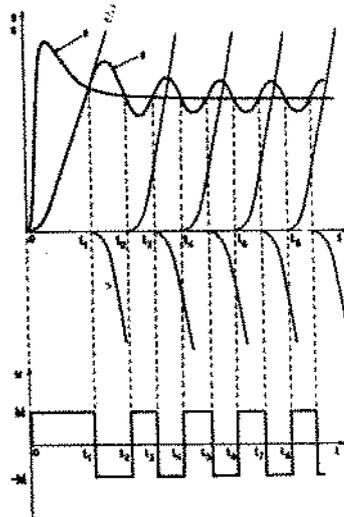


Figura b.8: Resposta Temporal do Sistema sendo N um elemento do tipo Relé

#### b.4.2 Resposta Temporal do Sistema com elemento Relé mais Histerese

Quando o elemento Relé apresenta histerese, a análise segue da forma mostrada acima com uma pequena diferença no momento da comutação, pois só é realizada após

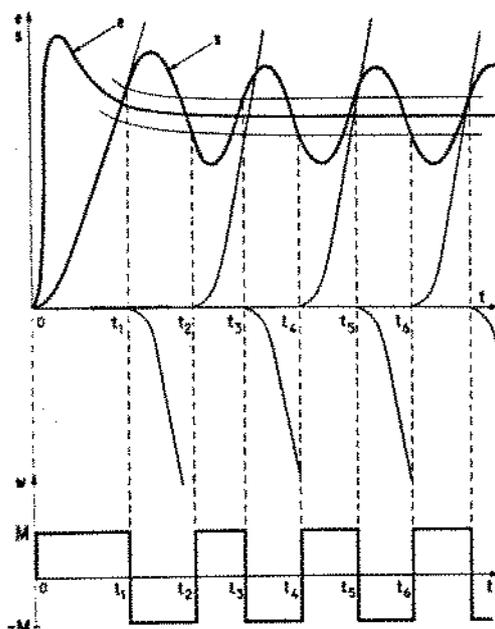


Figura b.9: Resposta Temporal do Sistema sendo N um elemento do tipo Relé + Histerese

$h/2$ . A figura b.9 ilustra muito bem este caso.

#### b.4.3 Resposta Temporal do sistema com Elemento Relé mais Zona Morta

Analisando agora a presença da zona morta de comprimento  $\Delta$  no elemento Relé, observamos que a comutação ocorre em função de um erro  $-\Delta/2$  ou  $+\Delta/2$ . Assim sendo quatro situações devem ser analisadas.

$$0 \text{ para } + \longrightarrow \varepsilon = \frac{\Delta}{2} \longrightarrow \frac{d\Delta}{dt} > 0$$

$$+ \text{ para } 0 \longrightarrow \varepsilon = \frac{\Delta}{2} \longrightarrow \frac{d\Delta}{dt} < 0$$

$$0 \text{ para } - \longrightarrow \varepsilon = -\frac{\Delta}{2} \longrightarrow \frac{d\Delta}{dt} < 0$$

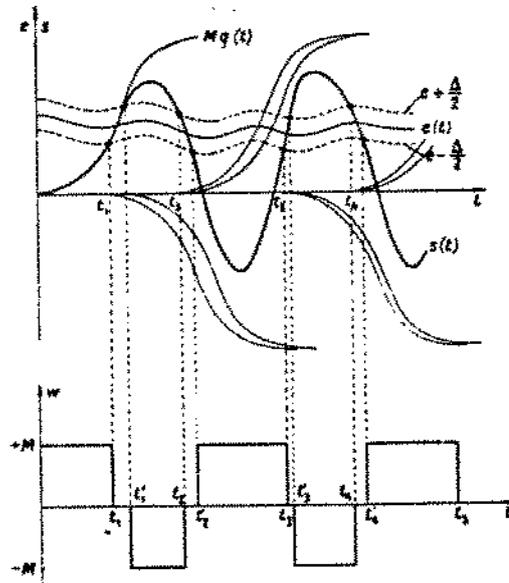


Figura b.10: Resposta Temporal do Sistema sendo N um elemento do tipo Relé + Zona Morta

- para  $\theta \rightarrow \varepsilon = -\frac{\Delta}{2} \rightarrow \frac{d\Delta}{dt} > 0$

A excitação é representada pela equação

$$w(t) = M[u(t) - u(t - t_1) - u(t - t_2) + u(t - t_3) + \dots] \tag{b.7}$$

produzindo uma resposta

$$s(t) = M[q(t)u(t) - q(t - t_1)u(t - t_1) - q(t - t_2)u(t - t_2) + q(t - t_3)u(t - t_3) + \dots] \tag{b.8}$$

#### b.4.4 Outras características

Pode-se combinar as três características mostradas acima para se produzir outros tipos e a análise é feita de forma similar.

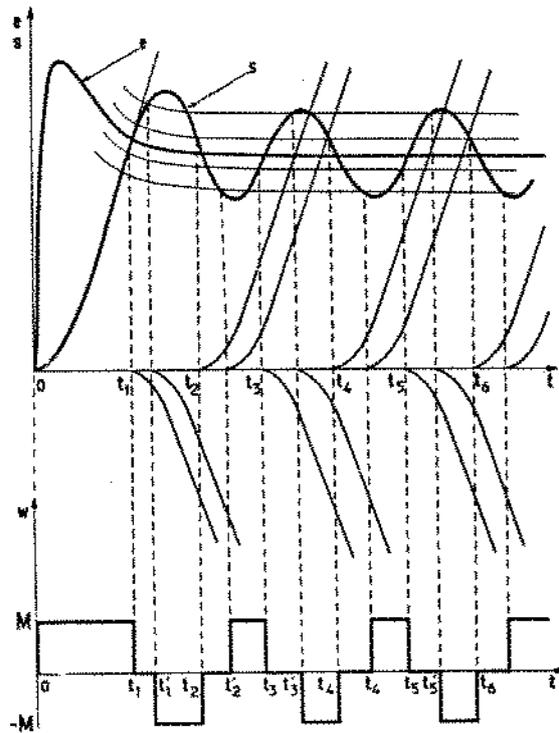


Figura b.11: Resposta Temporal do Sistema sendo N um elemento do tipo Relé + Zona Morta + Histerese

## Apêndice c

# Metodologia para Caracterização de um Controlador do tipo Relé

Neste capítulo é feito um estudo em um sistema de 2ª ordem representando um sistema composto por motor de corrente contínua e uma carga, cuja excitação é do tipo degrau com largura variável, função da constante de tempo do sistema.

### c.1 Metodologia Proposta

Mencionamos no capítulo 1 que cada junta de um robô pode ser representada por um motor de corrente contínua, transdutor de velocidade e posição, constituindo assim um servomecanismo. Portanto, para o estudo do comportamento dinâmico o seu modelo é aqui expresso através de uma equação no tempo de 2ª ordem [22] [14].

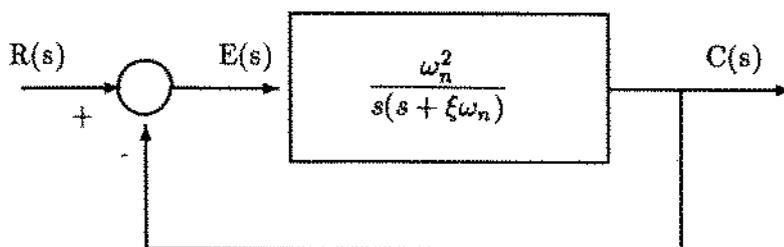


Figura c.1: Servomecanismo - Diagrama de Blocos

Considere o diagrama de blocos mostrado na figura c.1 que representa um servomecanismo de posição.

onde:

$\xi$  = coeficiente de amortecimento

$W_n$  = frequência angular em radianos

$R(s)$  = excitação do sistema

A metodologia proposta é baseada na forma de excitação do sistema, que é uma espécie de degrau com um tempo de duração definido em função da constante de tempo.

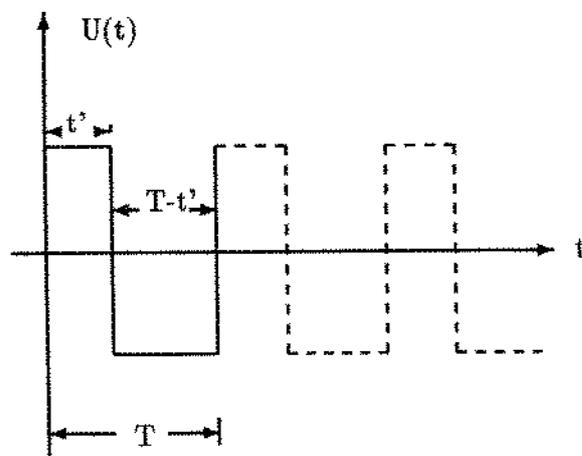


Figura c.2: Função de Excitação

Tendo a constante de tempo do sistema como um parâmetro, propõe-se analisar o comportamento do sistema em três pontos diferentes antes dele atingir o regime estacionário. Conseqüentemente os parâmetros propostos são:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= 3\tau \quad (\text{T grande}) \\
 T_2 &= 2\tau \quad (\text{T médio}) \\
 T_3 &= \tau \quad (\text{T pequeno})
 \end{aligned}
 \tag{c.1}$$

O tempo  $t'$  é um degrau permanece ativo para cada um dos T acima, também é função da constante de tempo do sistema.

$$\begin{aligned}
 t' &= \frac{T}{10} \quad (t' \text{ pequeno}) \\
 t' &= \frac{T}{2} \quad (t' \text{ médio}) \\
 t' &= \frac{2T}{3} \quad (t' \text{ grande})
 \end{aligned}
 \tag{c.2}$$

A resposta ao sistema será então uma composição de um degrau positivo aplicado ao sistema durante um tempo  $t'$  definido para uma dada base de tempo T, mais a resposta de um degrau negativo durante um intervalo  $(T - t')$ , completando assim o período. Isso é extendido para o período seguinte. Desta forma, é realizado uma simulação para o caso ideal, conforme apresentado nas figuras c.6, c.7 e c.8

Neste caso, supomos que o sistema responde precisamente a excitação, isto é, o motor mudar o sentido de rotação no mesmo instante em que ocorre a inversão dos pulsos que excitam o motor (figura c.3).

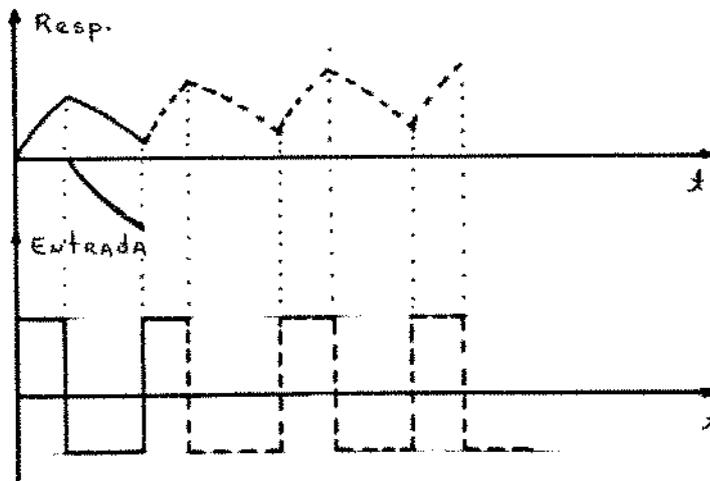


Figura c.3: Resposta do Sistema

Certamente este é um caso ideal, uma vez que todas as perdas do sistema estão sendo desconsideradas. Do exposto acima, a metodologia apresentada pode então servir

como um parâmetro para qualificar a performance da unidade de potência.

Neste apêndice apresentamos as simulações realizadas em um sistema de 2a. ordem sob o aspecto acima abordado.

## c.2 Simulações

A equação no tempo do servomecanismo representado no diagrama de blocos da figura c.1 supondo  $\xi$  maior que a unidade é obtida calculando a transformada de Laplace inversa.

$$c(t) = 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\xi^2 - 1}} \left( \frac{e^{-S_1 t}}{S_1} - \frac{e^{-S_2 t}}{S_2} \right) \quad (c.3)$$

onde:

$$S_1 = (\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n \quad (c.4)$$

$$S_2 = (\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n \quad (c.5)$$

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos através das equações c.3, c.4 e c.5 . Os valores de  $\omega = 3rad/s$  e  $\xi = 1.1$ , a constante de tempo considerada  $\tau = 0.4s$ . Os valores de  $T$  e  $t'$  estão resumidos na tabela abaixo.

T (em s)	$t'$ (em s)
0.4 ( 2.5 Hz)	0.04
	0.20
	0.26
0.8 (1.25 Hz)	0.08
	0.40
	0.53
1.2 (0.83 Hz)	0.12
	0.60
	0.80

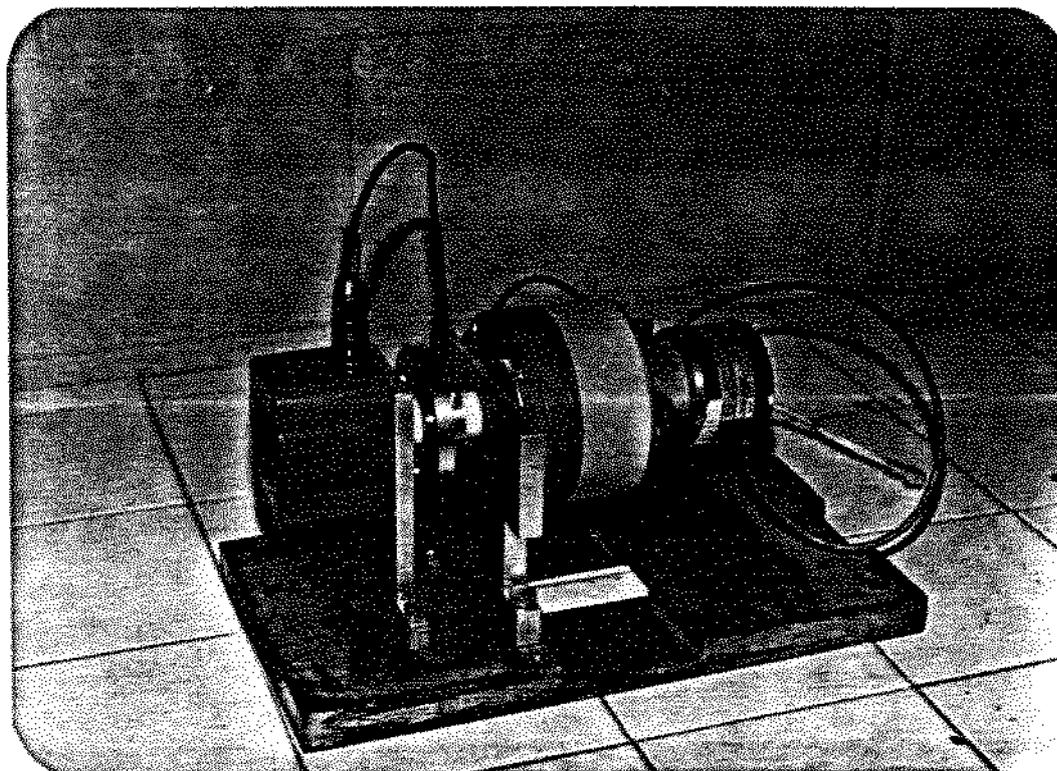
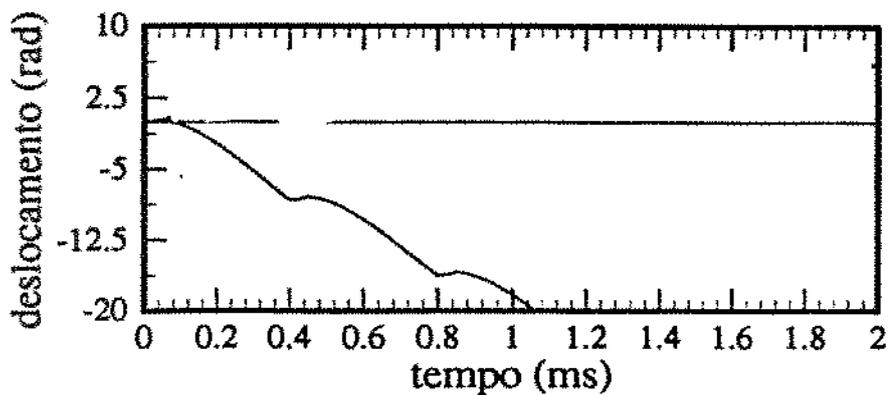
Figura c.4: Valores de  $T$  e  $t'$ 

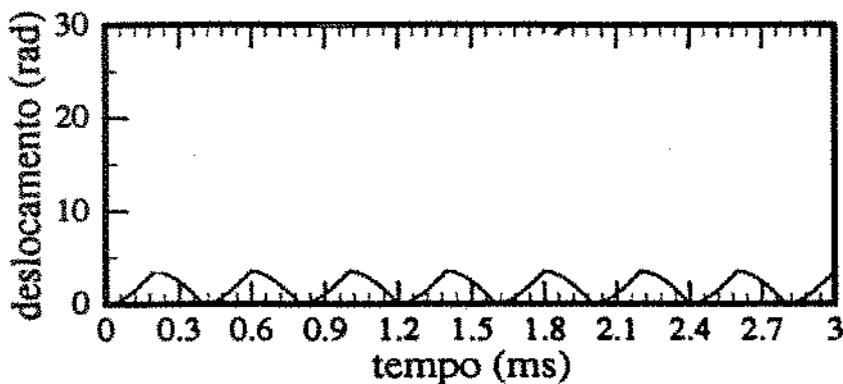
Figura c.5: Foto: Bancada Utilizada na Realização Experimental

Simulação - Resposta do Sistema



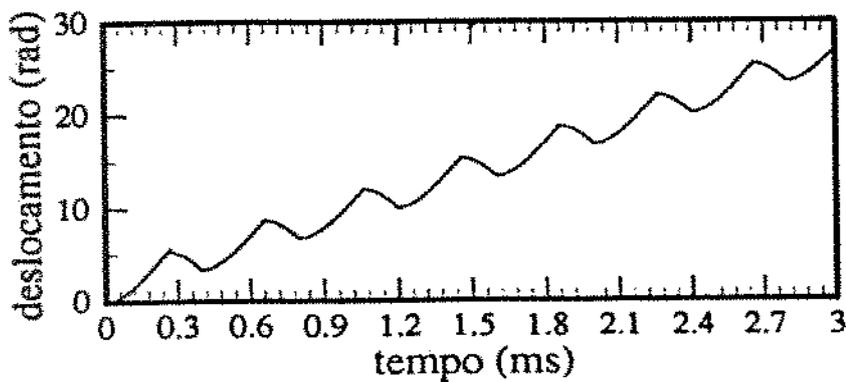
Relação dos Períodos:  
 $T = 0.4$  (s)  
 $t' = 0.04$  (s)

Simulação - Resposta do Sistema



Relação dos Períodos:  
 $T = 0.4$  (s)  
 $t' = 0.2$  (s)

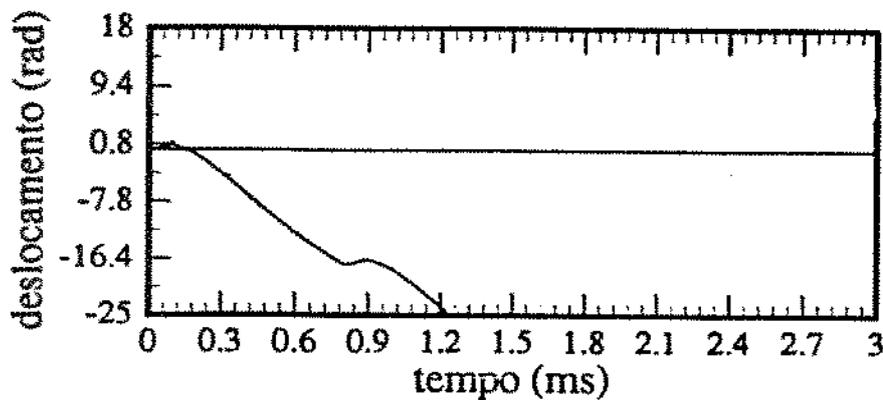
Simulação - Resposta do Sistema



Relação dos Períodos:  
 $T = 0.4$  (s)  
 $t' = 0.26$  (s)

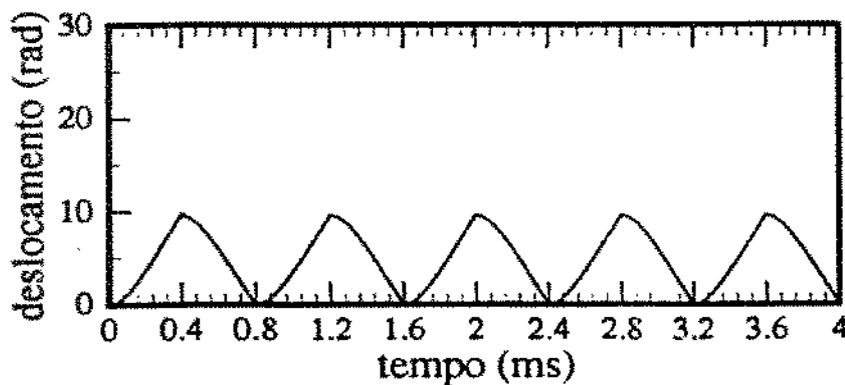
Figura c.6: Resposta do Sistema

Simulação - Resposta do Sistema



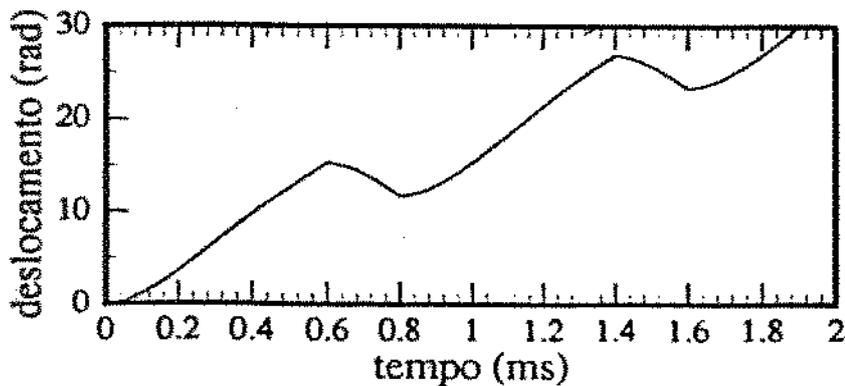
Relação dos Períodos:  
 $T = 0.8$  (s)  
 $t' = 0.08$  (s)

Simulação - Resposta do Sistema



Relação dos Períodos:  
 $T = 0.8$  (s)  
 $t' = 0.4$  (s)

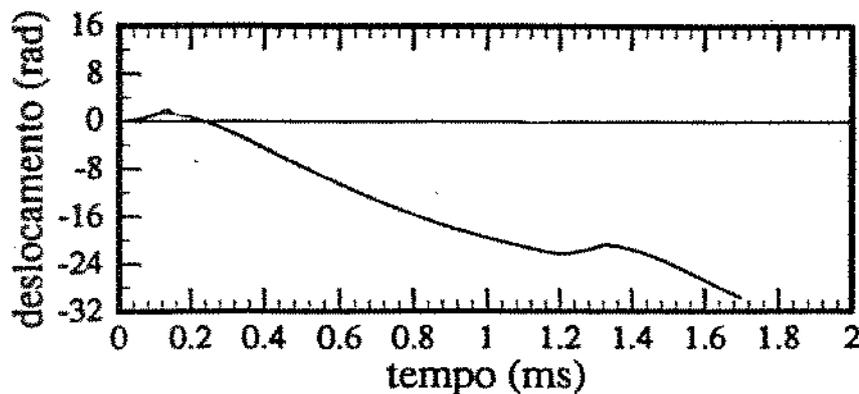
Simulação - Resposta do Sistema



Relação dos Períodos:  
 $T = 0.8$  (s)  
 $t' = 0.6$  (s)

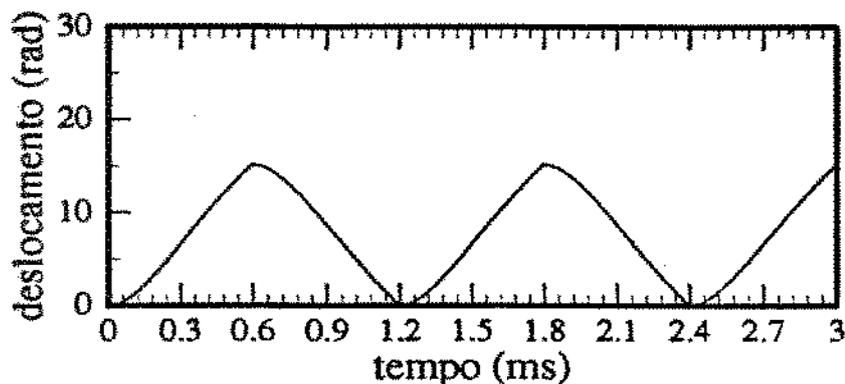
Figura c.7: Resposta do Sistema

Simulação - Resposta do Sistema



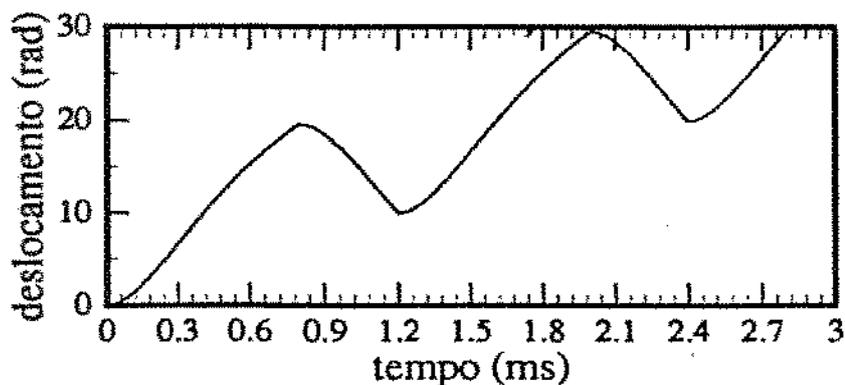
Relação dos Períodos:  
 $T = 1.2$  (s)  
 $t' = 0.12$  (s)

Simulação - Resposta do Sistema



Relação dos Períodos:  
 $T = 1.2$  (s)  
 $t' = 0.6$  (s)

Simulação - Resposta do Sistema



Relação dos Períodos:  
 $T = 1.2$  (s)  
 $t' = 0.8$  (s)

Figura c.8: Resposta do Sistema

## BIBLIOGRAFIA

- [1] MACHADO, J.A.T. *Gestão de Recursos Estruturais no Controlo de Robots Manipuladores*, Tese de Doutoramento, Porto, Portugal 1988.
- [2] CRAIG, J. J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, Addison-Wesley Publishing Company, Eua, 1989.
- [3] ROSÁRIO, J.M. *Etude de Faisabilité d'une Commande de Type Non-Lineaire pour un Robot Manipulateurs*, PHD Thesis, Ecole Centrale des Arts et Manufactures, Paris, France, 1990.
- [4] GIBSON, J.E. *1963 Nonlinear Automatic Control*, International Student Edition, MacGraw Hill Book Company, 1963.
- [5] GILLE, J-C.;Decaulne, P.; Pélegrin, M.; *Systems Asservis Non Lineaires*, Dunod, 5a. édition, France, 1988
- [6] DIAS, M.A. ; *Controlador Programável a Multimicroprocessador para Controle Hierárquico de Robôs* Tese de Mestrado, FEE/Unicamp, 1991.
- [7] ROSÁRIO,J.M. *Estudo e Concepção de um Controlador não Linear para Aplicação em Robôs Industriais*, XI COBEM, São Paulo, 1991

- 
- [8] MADRID, M.K.; *Robô Manipulador Mecânico para Posicionamento Digital Hierárquico a Microprocessadores* Tese de Mestrado, FEE/Unicamp, 1988.
- [9] VIDAL P. *Aide-mémoire d'automatique* Dunod 2<sup>e</sup> édition, Paris, France, 1985.
- [10] RUUCCO, S.R. *Robot Sensors and Transducers*, Halsted Press, New York, 1987
- [11] PAUL, R.P. *Robot Manipulator: Mathematics, Programming and Control*, MIT Press., Cambridge, Mass, 1989.
- [12] FU, K.S., GONZALEZ, R.C., LEE, C.S.G. *Robotics: Control, Sensing Vision and Intelligence*, MacGraw Hill Book Company
- [13] WEISS, H.K. *Analysis of Relay Servomechanisms*, Journal Aer, Sc. NY vol 13 July 1946, pg. 361.
- [14] OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*, Prentice Hall do Brasil, 1980
- [15] BLANCHARD, M. *Le Grafset - Comprendre Maîtriser et Appliquer*, Automatisation AP Production, Cepadues - Édition.
- [16] CLARKE, D.W. *PID Algorithms and Their Implementation* O.U.E.L. Report No 1482/83 Oxford, Eng.
- [17] MIRANDA, M.F. *Controle de um Servomecanismo por um Microcomputador Dedicado: Uma Contribuição ao Estudo de Controladores para Robôs Industriais*, Tese de Mestrado, Unicamp, 1992.
- [18] GOOD, M.C.; Sweet, L.M.; Strobel, K.L.; *Dynamic Models for Control System . Design of Intergrated Robot and Drive Systems*, Journal of Dynamics Systems, Measurement,

and Control, v.107, march, pp 53-59, 1985.

- [19] BENI, G.; Hackwood,S.,*Recent Advances in Robotics*, John Wiley e Sons, New York, EUA, 1985
- [20] SOUZA,J.P.;Treiguer,L.M.;Rosário,J.M.; *Identificação dos Parâmetros de um Robô a partir das Informações dos seus Transdutores de Posição*, XI COBEM, São Paulo, 1991.
- [21] KUO,B.C, *Automatic Control Systems*, Prentice-Hall, New Jersey,EUA,1987
- [22] LAUER,H;Lesnich,R;Matson,L.E. *Servomecanism Fundamentals*, McGraw-Hill Book Company, New York,EUA,1947
- [23] GROOVER,M.P.;Weiss,M.;Nagel,R.N.;Odrey,N.G. *Industrial Robotics: Tecnology, Programming, and Applications*, McGraw-Hill Book Company, New york,EUA,1986
- [24] HOLZBOCK,W.G. *Robotic Technology: Principles and Praticce*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, EUA,1986
- [25] LUH,J.Y.S. *An Anatomy of Industrial Robotics and their Controls*, IEEE Trans on Automatic Control,v28,n2,feb,1983,pp135-152
- [26] GRAG,D.P. *Developments in Nonlinear Controller Sinthesis: An Overview*, Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control,v100,1978,pp59-69
- [27] INÍGO,R.M.;Morton,J.S. *Simulation of the Dynamics of an Industrial Robot*, IEEE Trans. Education, v34,n1,feb 1991,pp89-99

- 
- [28] FAYAN, B. *Projeto e Concepção de um Supervisor de Controle para um Robô Industrial*, Tese de Mestrado, Unicamp, 1992
- [29] DIAS, C.H. *Realização Experimental de Um Supervisor de Controle em um Robô Industrial*, Tese de Mestrado a ser apresentado na FEM, Unicamp, 1993
- [30] BENDAT, J.S.; PIERSOL, A.G. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures* Wiley-Interscience, 1971.