

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL  
DA TESE DEFENDIDA POR JOÃO ORESTES  
PELLISSARI E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 07/02/94

Douglas F. Zanetti  
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS  
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL

Projeto de um Manipulador com Três Juntas Revolutas :  
Concepção, Construção e Testes Preliminares

Publicação  
FEM 04/94

João Orestes Pellissari

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia  
de Campinas - UNICAMP, como parte dos requisitos  
exigidos para obtenção do título de  
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA COMPUTACIONAL

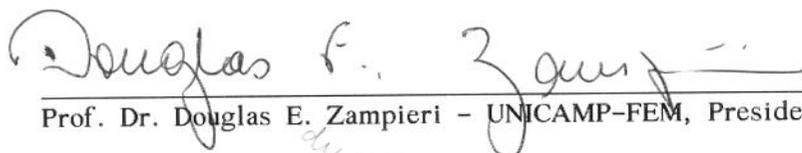
**Tese de Mestrado**

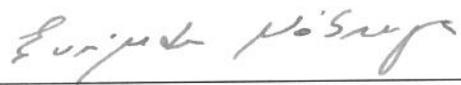
**Projeto de Um Manipulador com Três Juntas Revolutas :**  
**Concepção, Construção e Testes Preliminares**

autor **João Orestes Pellissari**

orientador **Prof. Dr. Douglas Eduardo Zampieri**

Aprovado por :

  
Prof. Dr. Douglas E. Zampieri - UNICAMP-FEM, Presidente

  
Prof. Dr. Euripedes G. de O. Nóbrega - UNICAMP - FEM

  
Prof. Dr. Araújo Lima da Silva - UNESP - FEG

Campinas, 07 de Fevereiro de 1994.

## RESUMO

Neste trabalho o protótipo de um manipulador com três graus de liberdade é apresentado e, as fases de projeto, execução e desenvolvimento básico do controle são detalhadas. Os conceitos fundamentais de robótica são revistos, visando a obtenção dos modelos geométricos ( direto e inverso ) e dinâmico (recursivo). Finalmente, propõe-se, também um método simples para a verificação de repetibilidade dos movimentos da base, braço e ante-braço.

Em outras palavras, o trabalho aborda a metodologia de projeto em engenharia, comentando em seu final os problemas surgidos e propondo algumas correções no protótipo, adaptando as especificações de projeto as limitações de manufatura.

## ABSTRACT

In this work, a prototype of a three-degrees-of-freedom manipulator is presented. The manipulator design stages, its construction, and the basic control development are detailed. The fundamental concepts of robotics are reviewed, aiming the establishment of the geometric models (direct and inverse) and the dynamic model (recursive). Finally, a simple method for the verification of the repetibility of the movements of the base, the arm, and the forearm is proposed.

In other words, the work is concerned with the methodology of projects in engineering. It covers some problems and proposes some corrections in the prototype, adapting the specifications of the project to the limitations of manufacture.

## Agradecimentos

Ao amigo Prof. Dr. Douglas Eduardo Zampieri pelo companheirismo amizade e honestidade, que sempre marcaram nosso relacionamento, bem como ao seu incentivo e dinamismo para novas perspectivas.

Aos amigos, André Mendeleck pelo apoio no desenvolvimento da modelagem matemática, Edson Godoy pelos inúmeros dias de trabalho conjunto, pelas "aulas" de controle e pelo uso do controlador, Marcos Saramago pelo ajuda quanto a fabricação e montagem do manipulador, Sidnei A. Vicentin por seu empenho no processo de doação dos motores de acionamento.

Ao CNPq pelo apoio financeiro parcial.

A todas as pessoas, em especial as integrantes da FEM-DMC, que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Este trabalho é dedicado a todos que me apoiaram e incentivaram, em especial aos meus familiares e a minha família, Ocimara (esposa) e Maria Cecilia (filha).

Índice :

01	Introdução .....	1
02	Generalidades sobre Robótica .....	
2.1	Características Principais do Robô .....	
03	Forma Construtiva do Robô Manipulador .....	1
3.1	Base Giratória .....	1
3.2	Conjunto do Braço do Manipulador .....	1
3.3	Controlador ( Controle Hierárquico ) .....	1
3.4	Encoder .....	1
3.5	Moto-Redutor de Corrente Contínua .....	1
04	Modelagem Matemática .....	1
4.1	Introdução .....	1
4.2	Volume de Trabalho e Principais Parâmetros do Manipulador ....	2
4.3	Modelo Geométrico Direto .....	2
4.4	Modelo Geométrico Inverso .....	3
4.5	Modelo Dinâmico .....	3
05	Experimentos .....	4
5.1	Preparativos da Fase Experimental .....	4
5.2	Realização dos Experimentos .....	4
5.3	Comentários sobre as Influências de Alguns Aspectos de Concepção e/ou Fabricação nos Resultados Obtidos .....	4
06	Conclusões e Perspectivas Futuras .....	4
	Bibliografia .....	5
Apêndice I	.....	I-
	Forma Construtiva do Robô Manipulador - JOPOC 8808 .....	I-
01	Base Giratória .....	I-
02	Conjunto do Braço .....	I-1
03	Controlador .....	I-1
04	Encoder Ótico .....	I-2
05	Motor de Corrente Contínua .....	I-2
Apêndice II	.....	II-
	Desenhos - Montagem e Sub-Montagem .....	II-
	Lista de Materiais .....	II-1

# CAPÍTULO 01

## INTRODUÇÃO

De modo bastante genérico, pode-se dizer que a palavra engenharia, define o profissional que projeta, constrói, mantém e modifica as ferramentas de nossa sociedade tecnológica.

Particularmente o campo de atuação do engenheiro mecânico é o do movimento, bem como é sua função determinar as forças e energia para provocá-lo. Em outras palavras, baseando-se na definição dada por Desseur em 1959 (mecânica é a arte de levar uma idéia ao mundo visível), pode-se dizer que a mecânica é a ciência que se coloca entre a teoria e a técnica, unindo-as como uma ponte e não separando-as como uma parede.

Além dos fatos acima abordados que demonstram ser o conceito de concepção em engenharia mecânica, uma atividade envolvendo aspectos teóricos e empíricos, deve-se levar em conta que nas últimas décadas há uma significativa evolução e disseminação nas áreas de eletrônica e informática, fazendo com que surgissem áreas de conhecimento humano com uma forte conotação interdisciplinar. Uma dessas novas áreas é a chamada **mecatrônica**, cuja definição pode ser :

**" Mecatrônica é um campo interdisciplinar da área de engenharia formado por disciplinas clássicas de engenharia mecânica, eletrônica e informática "**.

Um sistema mecatrônico típico possui capacidade de aquisição e processamento de sinais, além de transformá-los, através de atuadores, em forças e movimentos pré-determinados. Na realidade ela permite uma ampliação dos problemas da mecânica clássica que na sua grande maioria eram problemas de análise, permitindo resolver também problemas de síntese.

Assim uma variada gama de sistemas mecânicos tradicionais, tais como veículos, incorporaram sensores e microprocessadores que detetam as variações em sua vizinhança e por um processamento adequado da informação, reagem de forma controlada. Essa capacidade os diferencia das máquinas convencionais.

Uma das áreas da mecatrônica que por sua complexibilidade e aplicação tornou-se independente é a robótica, que pode ser definida como :

**" A área na qual os conhecimentos e métodos das engenharias mecânica, eletrônica e da computação foram integrados no intuito de se desenvolver um novo tipo de máquina "**.

Deste modo a robótica pode ser representada pelo fluxograma da figura abaixo:

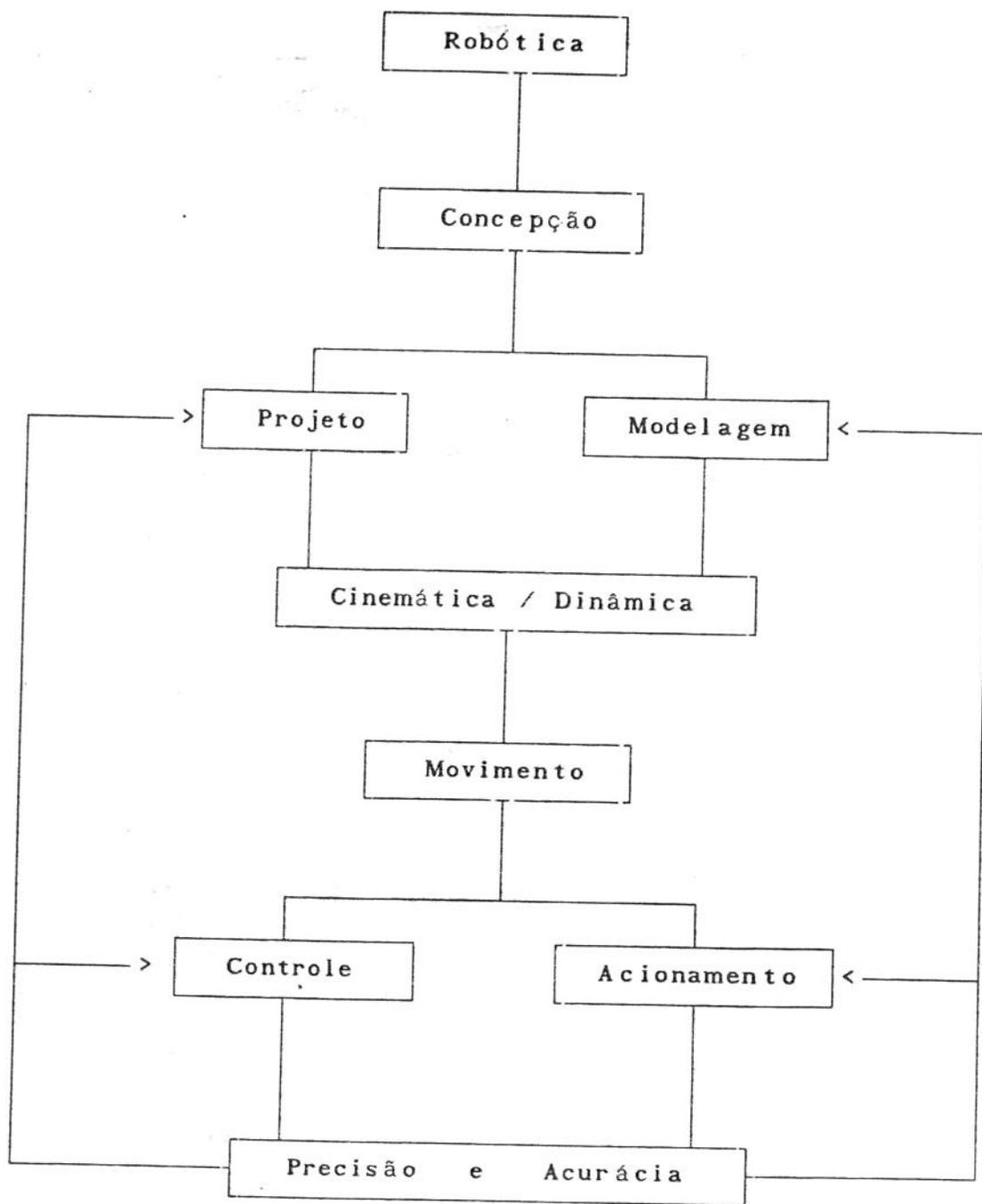


FIG. (01) Fluxograma de representação da Robótica.

Partindo-se da premissa de que um manipulador deva ser concebido para uma atividade específica, junto ao seu projeto, faz-se necessária uma modelagem adequada, pois a partir dos modelos cinemático e dinâmico, estabelecem-se seus movimentos com suas respectivas velocidades e acelerações. De posse desses dados, são determinados os acionamentos e a estratégia de controle. A partir de características, tais como, precisão e acurácia, faz-se uma reavaliação dos modelos teóricos e/ou experimentais [Maidan-84], [Maidan-85], [Santo-87].

O presente trabalho pretende focar o estudo da robótica dentro do contexto global representado pelo fluxograma apresentado, isto é, propõe-se uma metodologia de projeto voltada a confecção de um manipulador com juntas revolutas.

No " Capítulo 02 ", ao lado de uma breve revisão histórica, serão apresentados alguns tipos mais significativos de manipuladores, bem como sua estrutura e características gerais.

O " Capítulo 03 " é dedicado à concepção e projeto do manipulador desenvolvido no " Departamento de Mecânica Computacional ". Lembrando que um manipulador é a junção do projeto mecânico com sensores e atuadores, atuando de forma controlada, os mesmos também serão abordados.

Embora existam um significativo número de trabalhos dedicados aos modelos geométrico, cinemático e dinâmico de manipuladores, no " Capítulo 04 " um modelo matemático é desenvolvido.

No " Capítulo 05 " , são apresentados os resultados dos testes de repetibilidade efetuados, embora não se tenha a pretensão de se fazer uma calibração.

Finalmente as principais conclusões e perspectivas futuras são apresentadas no " Capítulo 06 ".

Visando uma melhor compreensão, bem como, possibilitar a utilização do presente trabalho, como base de futuros estudos, os Apêndices I e II apresentam, respectivamente, o detalhamento construtivo e as características técnicas.

## CAPÍTULO 02

### GENERALIDADES SOBRE ROBÓTICA

A primeira vez que a palavra " robô " surge, é como uma tradução da palavra eslava " robota ", que significa trabalhador. Este termo foi utilizado pelo escritor tcheco Karel Capek em 1920, na peça de teatro apresentada a seguir em New York intitulada R.U.R. (Rossum's Universal Robots), cujo conteúdo dizia respeito à revolta de servos mecânicos [Gevear-85].

Outro clássico do mesmo tema foi produzido em 1950 por Issac Asimov em seu livro " I Robot ", que tratava da capacidade de máquinas em interpretar e obedecerem comandos contraditórios.

Ambos são exemplos da visão popular na qual um robô é um artefato de aspecto próximo ao humano, que efetua trabalhos físicos e mentais. Pode-se citar que o objetivo de se produzir um homem mecânico, remonta à idade média e ao renascimento, quando relojoeiros construíam tais artefatos que eram exibidos em feiras e nas côrtes.

Do ponto de vista técnico os manipuladores nasceram, não da fantasia e sim de necessidades técnicas tais como :

**Trabalhar em ambientes perigosos ou insalubres,  
Efetuar tarefas repetitivas e monótonas,  
Efetuar tarefas de grande dificuldade .**

Deste ponto de vista, tais máquinas estão associadas à capacidade de desenvolver ações inerentes somente aos humanos. A diferença em relação ao caso anterior é que a função e não a aparência define o manipulador [Kafri-84]. Os objetivos principais de sua utilização são :

- Produção (para atender uma maior produtividade e uma melhor qualidade);
- Exploração e exploração em ambientes hostis;
- Plantas nucleares;
- Prospecção submarina;
- Atividades espaciais, etc ...

Como referência histórica, pode-se afirmar que o primeiro robô industrial que incorporava controle de movimento e programação, foi desenvolvido por George Devol em 1959 e comercializado pela " Unimation Inc" [N-Nagy-86].

Atualmente com a diversidade de máquinas controladas por computadores, o conceito " robô " apresenta várias definições. Uma das definições mais aceitas é a da R.I.A. (Robot Institute of American) [Fu-87]:

**" Robô industrial, é um manipulador multi funções reprogramável projetado para o manejo de peças, ferramentas e equipamentos através de movimentos programados no intuito de desempenhar várias tarefas ".**

Em outras palavras, um robô industrial desempenha uma tarefa prescrita com uma dada precisão, sujeito a condições variáveis . Assim, para a mesma concepção mecânica dependendo da estratégia de controle, do número de sensores e da tarefa a ser executada, tem-se robôs mais ou menos complexos.

Um robô industrial é constituído basicamente de:

- um braço equipado com efetuator,
- uma fonte de potência,
- um sistema de controle.

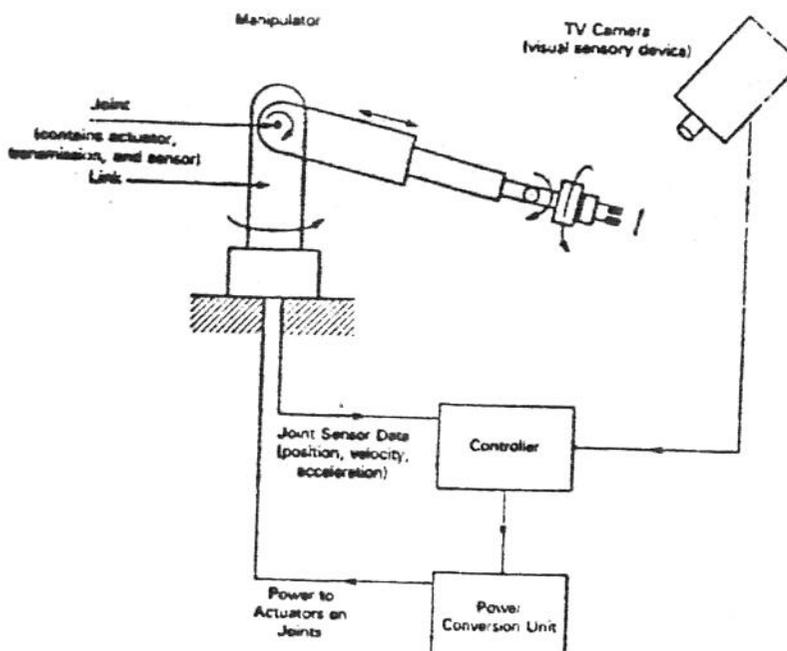


FIG. (02) Principais partes de um manipulador [Fu-87].

Pode-se, ainda, incluir uma percepção do ambiente de trabalho via sensores, como por exemplo, uma câmara de T.V. [Beni-85].

Do ponto de vista mecânico ele é composto de juntas principais que determinam a localização espacial de um determinado ponto e de juntas secundárias que define a orientação do efetuador.

Deve-se salientar que devido a todas as limitações existentes, uma trajetória desejada (nominal) não é possível ser exatamente programada.

Adicionando-se a este fato, a acurácia, a precisão, os erros de programação e de digitalização, a trajetória real diverge das anteriores em maior ou em menor grau, conforme FIG.(03), em função dos métodos de controle [Brady-84].

Assim dependendo da aplicação, existem duas grandes classes de robô:

- os de sequência limitadas, que funcionam por parada mecânica;
- os servo controlados, que podem atuar ponto a ponto ou por trajetória contínua.

No primeiro caso, seu controle é por malha aberta e a sequência de movimentos é dada por um controlador sequenciador. São robôs pequenos, simples e de baixo custo, deslocam-se com velocidade relativamente altas e possuem boa repetibilidade. São quase exclusivamente utilizados em linha de montagem, em operações do tipo " pegar e colocar " (pick-and-place) [El Man-88].

No segundo caso, as aplicações são muito mais complexas que as anteriormente citadas, e associadas a trajetórias contínuas. Podem efetuar operações tais como pintura e polimento. Tais robôs, possuem grande capacidade de memória e uma variada gama de movimentos, acurácia posicional ajustável e modo de aprendizado. Sua relação custo flexibilidade é atrativa [Luh-81], [Raiber-81].

Como pode-se notar, o desempenho e a complexibilidade do controle, são dependentes do tipo de aplicação que se deseja. Uma vez que os acionamentos dependem da estratégia de controle a ser adotada, uma solução bastante disseminada é a utilização de uma hierarquia entre o acionamento propriamente dito e a geração. A FIG. (04) abaixo detalha a estratégia utilizada por um robô industrial convencional. Cada motor possui sensores digitais e analógicos e atuam independentemente de cada um dos outros motores. Em um nível superior um supervisor de tarefa define a trajetória e envia os sinais a cada motor de modo independente. Esta solução permite respostas mais rápidas e maior confiabilidade [Amaral-86], [Gorla-87], [Read-87], [Rosari-87].

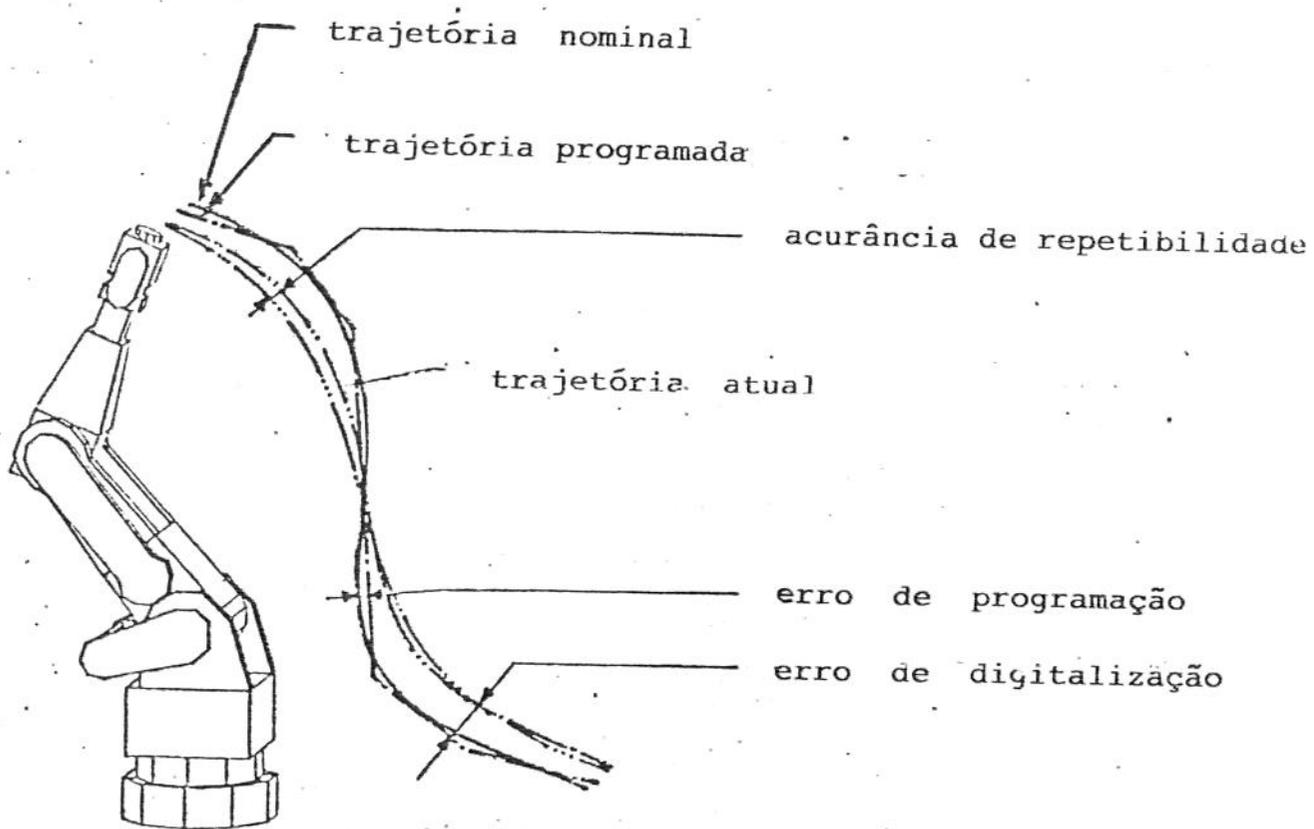


FIG. (03) Erros de Trajetória de um Manipulador [Kreuze-86]

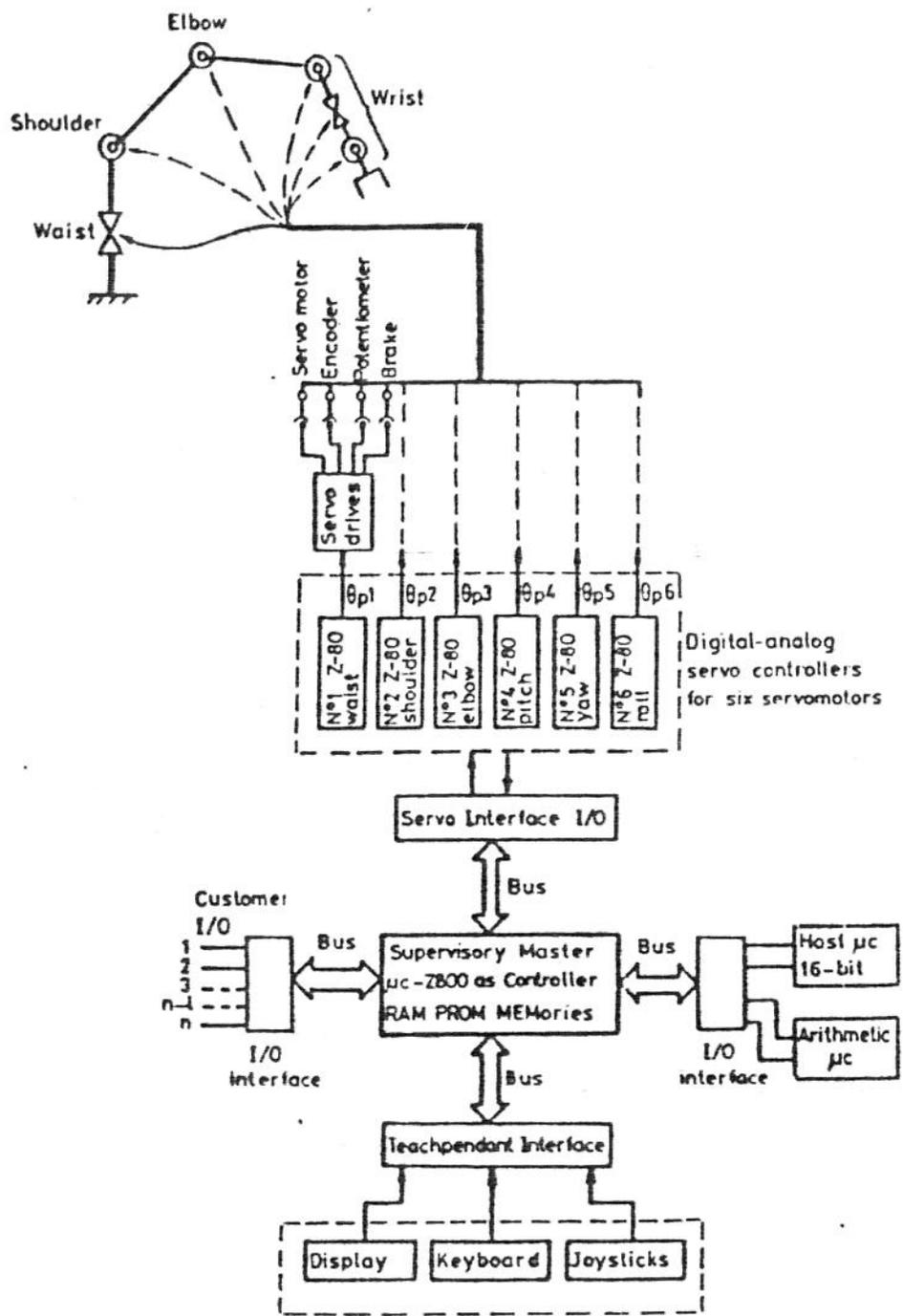


FIG. (04) Controle Típico de um Manipulador Industrial [N-Nagy-86].

### 3.1 BASE GIRATÓRIA :

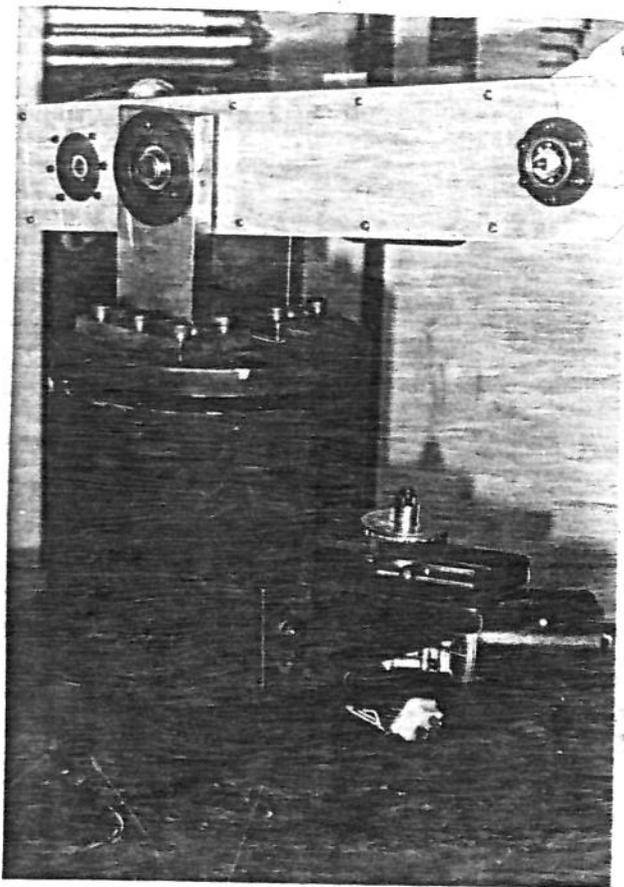
O manipulador é essencialmente composto de uma base giratória e sobre a mesma o conjunto do braço (braço e ante-braço). Embora, o manipulador completo possua, via de regra, punho e efetuador, ambos não serão abordados neste trabalho. Maiores detalhes vide [Garras-83], [Totani-81].

Cada conjunto anteriormente citado, bem como o controlador, serão abordados em suas características essenciais de forma sucinta. No Apêndice I encontra-se a descrição construtiva de forma detalhada.

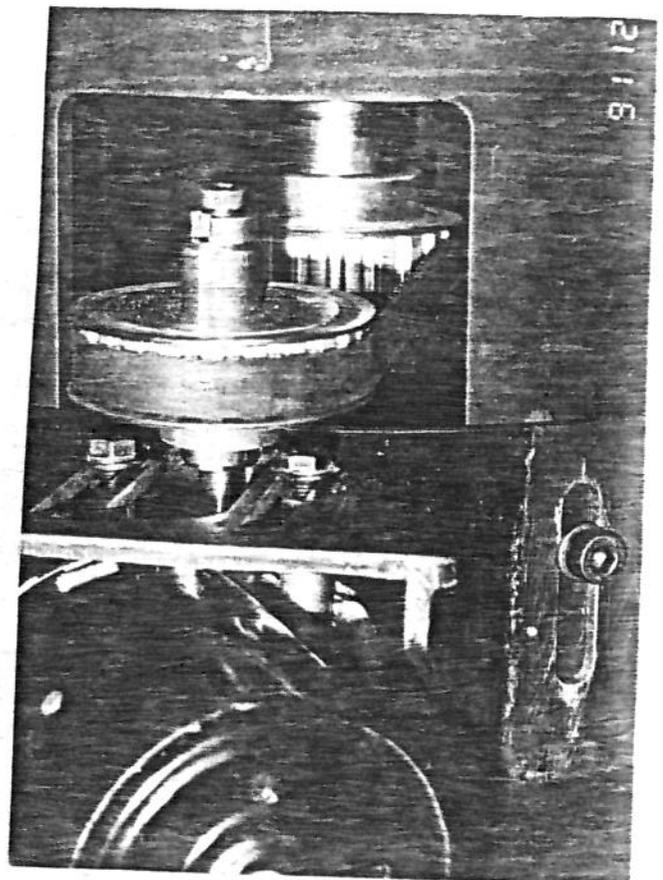
O conjunto da base do robô é composto por uma mesa plana feita de aço que pode ser fixada sobre uma bancada de trabalho. Sobre a mesa o corpo principal, formado por um cilindro de aço. A base giratória é apoiada sobre ele através de rolamentos angulares de rolos cônicos de alta precisão.

Como a linha de ação da resultante da carga forma um ângulo com o eixo do rolamento, são geradas cargas combinadas (radial e axial). Assim a escolha recaiu sobre rolamentos de rolo cônicos adequados para esse tipo de solicitação [Fag-85], [SKF-92].

A transmissão do movimento dar-se-á por meio de polias sincronizadoras e correias trapezoidais, que transmitem o movimento originário do moto-reductor de corrente contínua, como mostrado nas FOTOS !01! e !02!.



FOTO!01! Detalhe do conjunto da Base do Robô.



FOTO!02! Detalhe da transmissão do movimento de rotação da base.

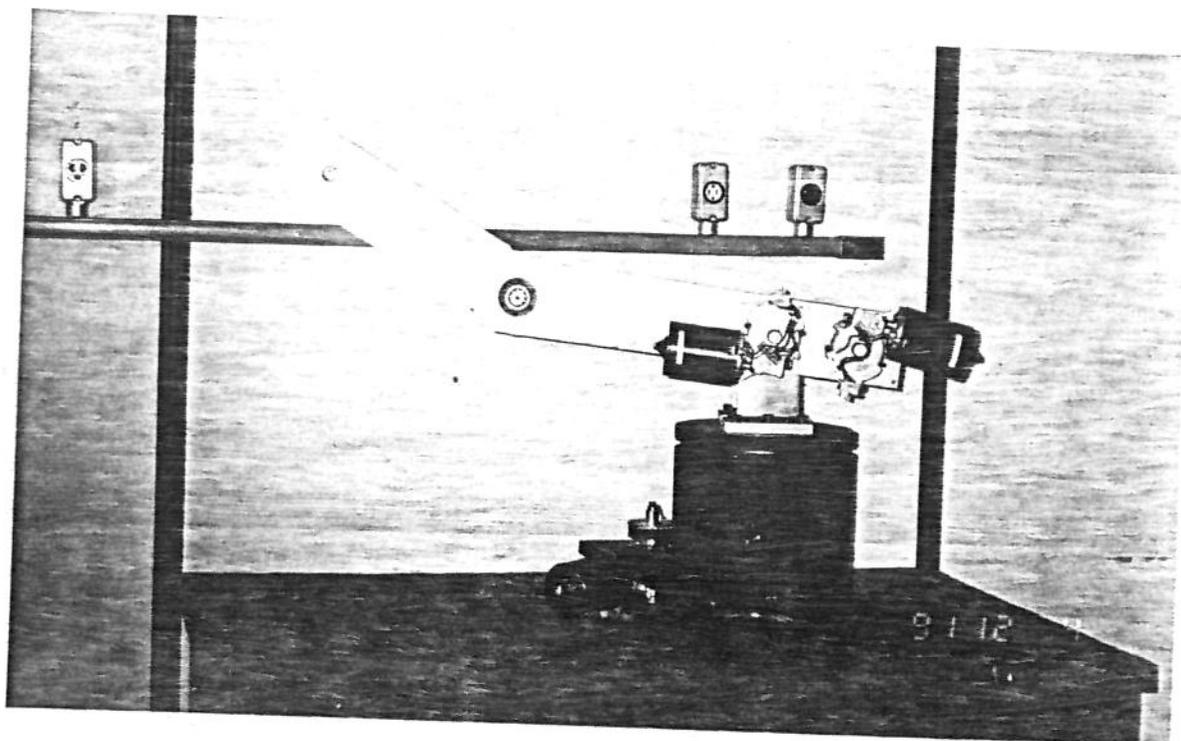
### 3.2 CONJUNTO DO BRAÇO DO MANIPULADOR :

A estrutura do braço e ante-braço do robô manipulador é constituída por perfis tipo " U " em liga de alumínio estrutural. Paralelas entre si e espaçadas por espaçadores do mesmo material, constituindo-se um perfil tubular de forma geométrica retangular. O fator peso da estrutura foi levado em conta. Desta forma optou-se pelos perfis e peças em liga de alumínio, tendo em vista seu baixo peso específico e sua alta resistência a esforços estruturais mecânicos.

Tanto o braço como o ante-braço encontram-se montados sobre mancais contendo rolamentos esféricos de contato angular (de precisão). O primeiro é acionado por moto-redutor de corrente contínua acoplado diretamente ao eixo da junta, enquanto que o segundo é acionado por meio de transmissão de correia trapezoidal dentada e polias sincronizadoras. Este movimento é produzido pelo moto-redutor fixado no braço. A localização deste moto-redutor possui duas funções básicas [Zampier-89]:

- Transmitir movimento para o braço.
- Contra-peso para balanceamento do conjunto do braço, (vide FOTO !03!).

O conjunto do braço em movimento permite verificar todos os movimentos da juntas tanto interno como externo, por meio das aberturas localizadas junto às faces superior e inferior, conforme mostrado nas FOTOS !04! e !05! .



FOTO!03! Estrutura do robô, base giratória e conjunto do braço.

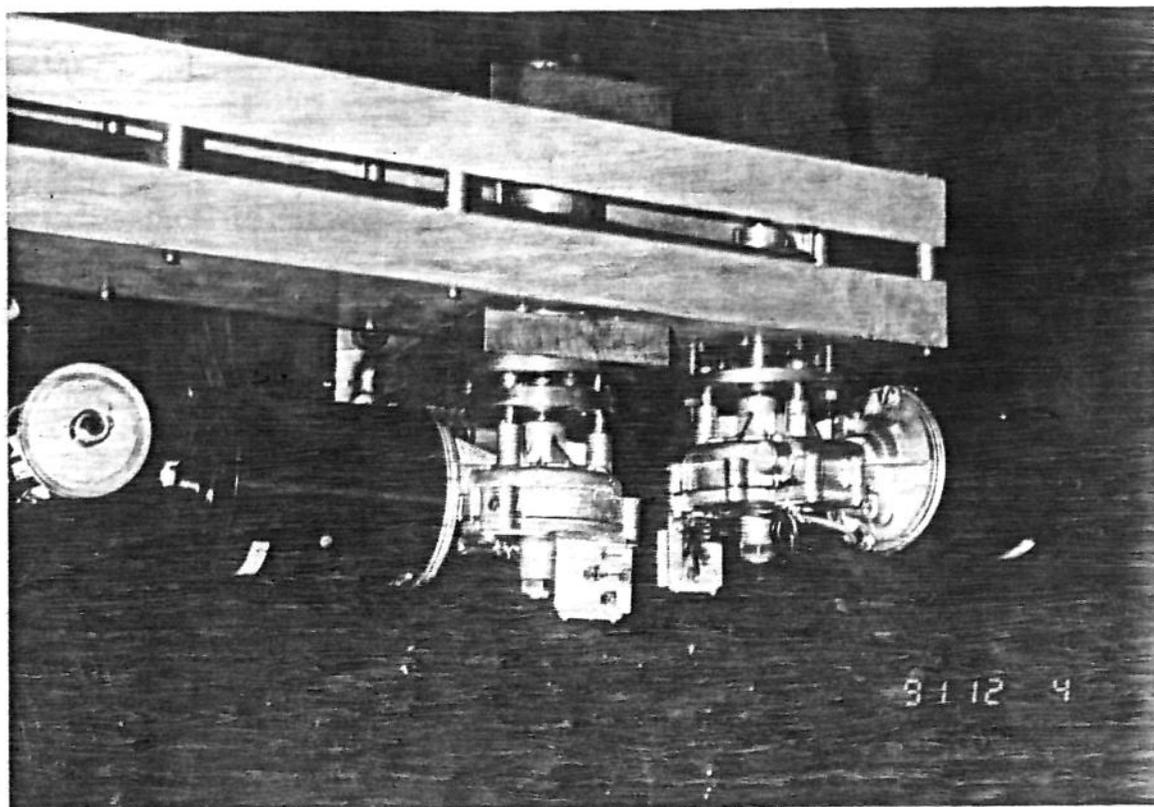


FOTO !04! Braço do robô, detalhe da parte superior.

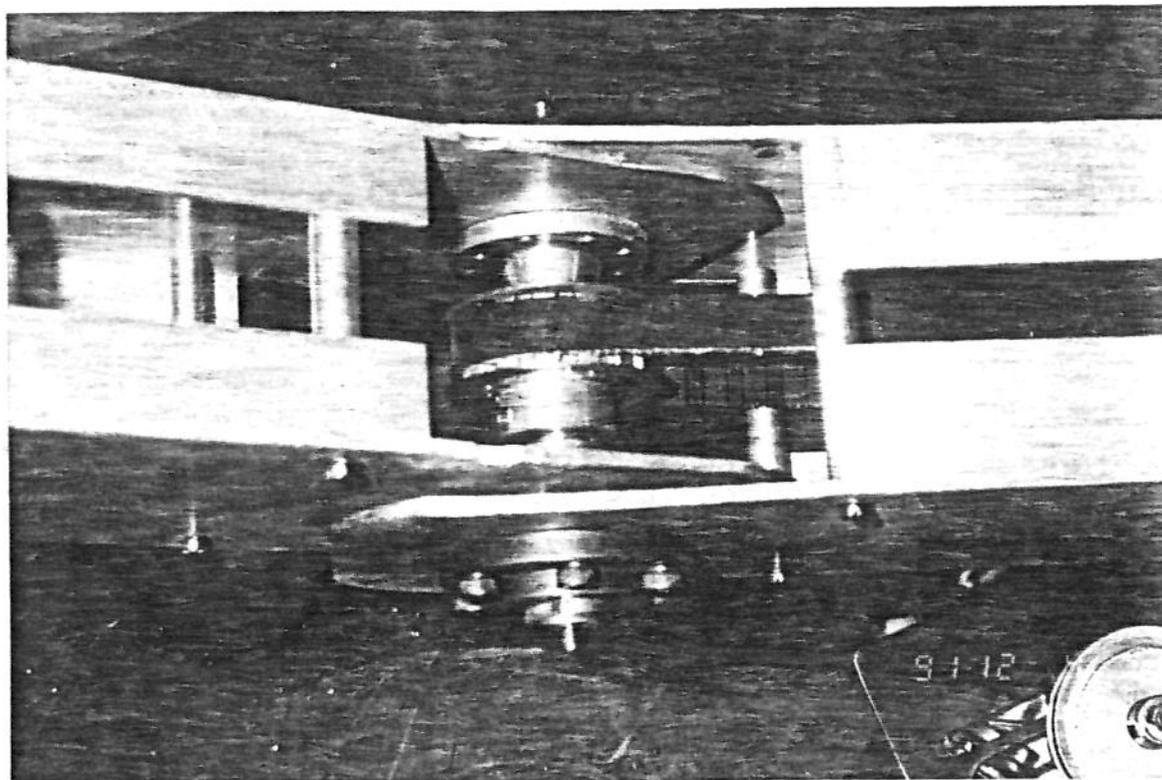


FOTO !05! Detalhe da junta de articulação do braço com ante-braço.

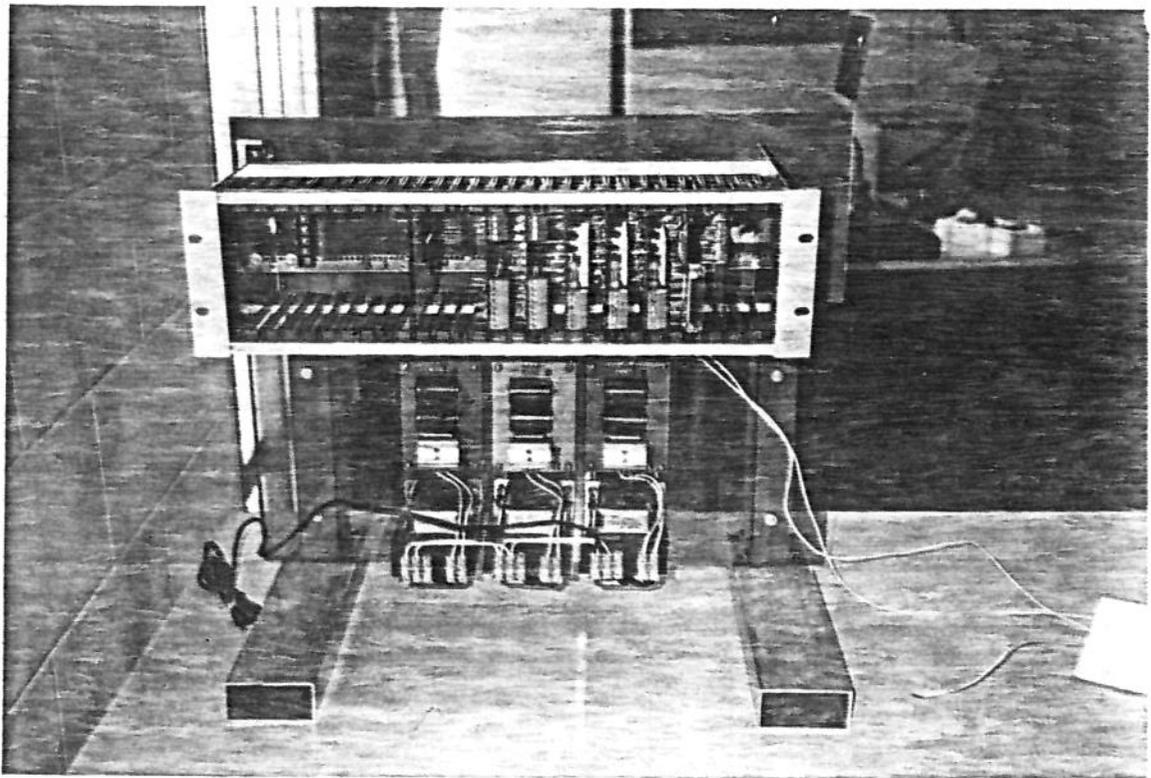
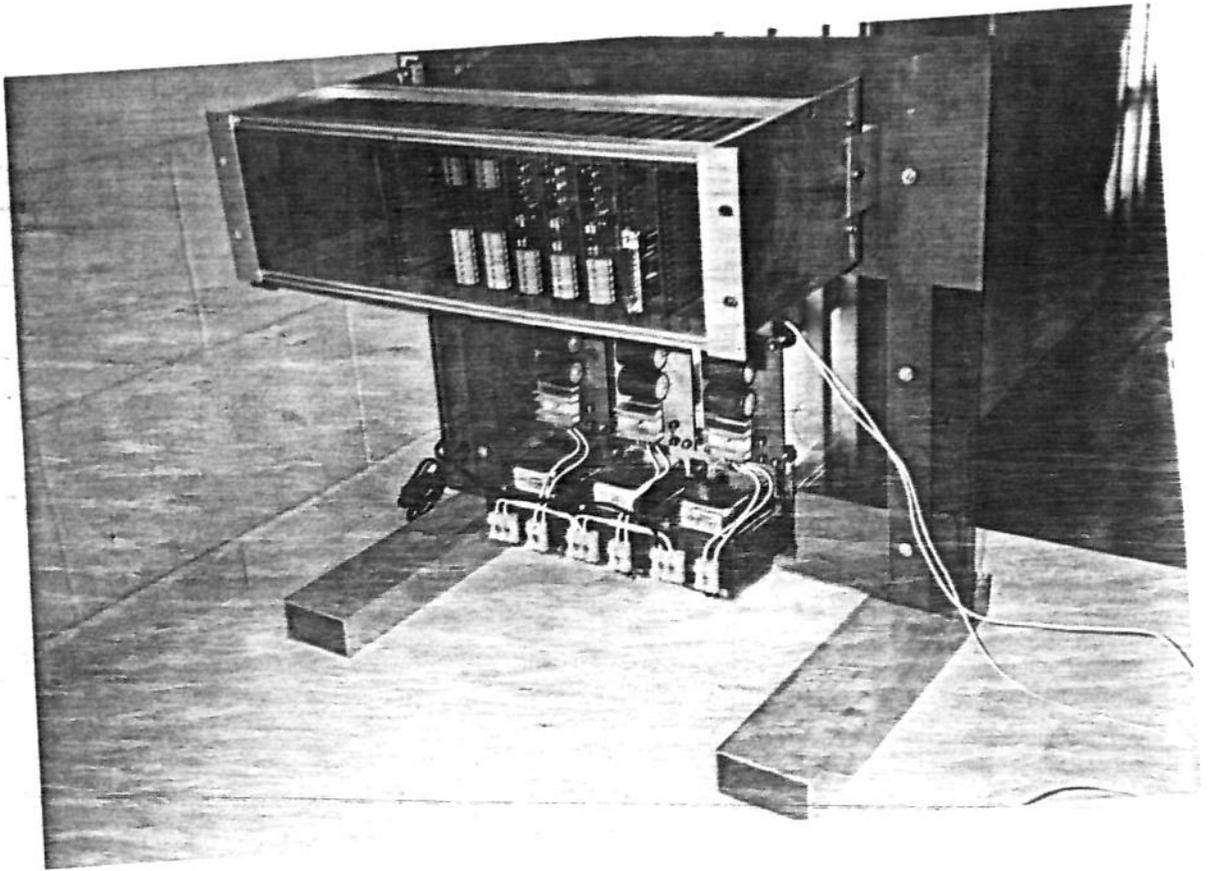
### 3.3 CONTROLADOR (Controle Hierárquico) :

Controles distribuídos de servo-motores têm sido largamente utilizados na indústria, nas áreas de controles industriais, automação de fábricas e robótica. Dentre as tarefas de controle de servo-motores estão a medição de velocidade e deslocamento, algoritmo de controle, detecção de sobre-cargas, de esforços e comunicação com o controle central [Golden-89], [Kao-87], [Watana-86].

Este controlador foi desenvolvido voltado a uma ferramenta de "hardware" e "software" para a implementação de algoritmos de controle complexo para robôs. Os micro-controladores de 8 bits normalmente não possuem o desempenho adequado para este tipo de aplicação, portanto optou-se pela construção de vários micro-controladores trabalhando em uma hierarquia. O micro-controlador utilizado (8031) possui dispositivos internos que simplificam a implementação do "hardware" e tornam os custos mais baixos.

Os diferentes níveis hierárquicos de um manipulador completo é objeto de um estudo paralelo ao presente trabalho e não será tratado aqui. O detalhamento funcional do controlador utilizado neste trabalho é apresentado no Apêndice I.

No presente estudo foram utilizados, tão somente, os "drivers" de potência, da base, ombro e cotovelo, bem como, o controle de cada uma das juntas. A FOTO!06!, mostra o controlador desenvolvido. Na sua parte inferior, notam-se as três fontes de potência e as três placas controladoras de cada motor (são as únicas que possuem "leds" visíveis na foto citada).



FOTO!06! Controlador.

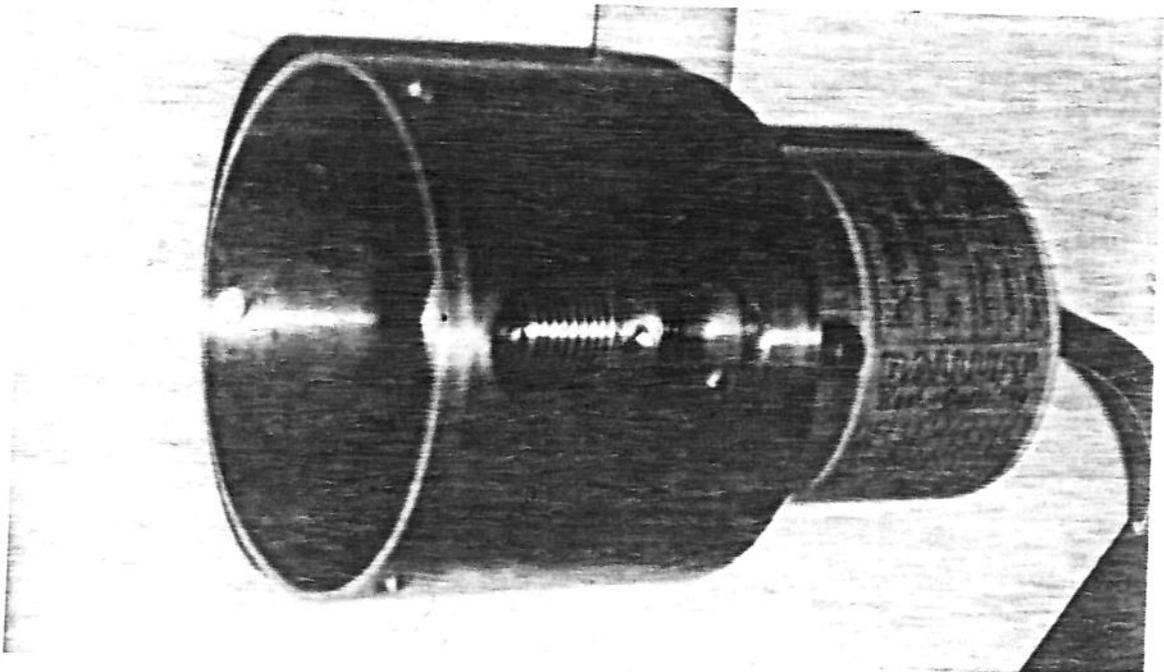
### 3.4 ENCODER :

Os encoders óticos são utilizados para medição de posição em equipamentos rotativos. É uma solução efetiva para uma realimentação digital de posição e velocidade para micro-computadores. Os encoders geram dois sinais de pulsos que informam a posição incremental. A velocidade e aceleração podem ser calculadas realizando a contagem dos pulsos em um intervalo de tempo, ou em sistemas de baixa velocidade, medindo-se o tempo entre as bordas dos pulsos [Gonzal-85].

Os pulsos gerados pelos encoders podem variar de dois pulsos por volta, em aplicações de baixo custo, até mais de 5000 pulsos por volta, em aplicações mais complexas.

O circuito utilizado neste projeto possui nas entradas um gatilhamento, que evita oscilações nos sinais devido aos altos tempos de subida e descida dos pulsos, quando o motor está girando em baixa rotação. Na seqüência realiza-se uma decodificação nos sinais, de forma que os pulsos anti-horário sejam contados por outro contador. Estes dois contadores estão encapsulados dentro de um único circuito integrado (8253), que é um temporizador programável, que pode ser lido a qualquer momento pelo micro-computador para a realização da realimentação de posição e velocidade do motor [Padua-86], [Shoham-87].

O encoder utilizado é do tipo BDG-6360 de fabricação da Balluff (vide FOTO !07!), cujos dados técnicos complementares estão no Apêndice I.



FOTO!07! Encoder BDG - 6360 .

### 3.5 MOTO-REDUTOR DE CORRENTE CONTÍNUA :

Os motores de corrente contínua de uma forma geral possuem velocidade diretamente proporcional à tensão aplicada em seus bornes e inversamente proporcional ao fluxo. Quando instalados diretamente a eixos de transmissão sem redutores, são de alta velocidade e baixo torque. Desta forma os motores instalados no robô possuem redutores acoplados.

Os motores instalados, por sua vez, são da mesma classe dos utilizados na linha automotiva. Seu padrão de qualidade e confiabilidade são assegurados conforme norma ISO 9000 [ISO]. Seus dados complementares estão no Apêndice I.

Na configuração original, o próprio sistema se auto-ajusta em decorrência da concepção do sistema mecânico de engrenagem coroa com eixo sem-fim. A engrenagem coroa constituída em composto de celulose (celeron) e o eixo sem-fim em aço-liga com tratamento térmico, em meio à lubrificação permanente (mesmo princípio de rolamento blindado), faz com que haja uma perfeita transmissão de movimentos sem que se causem impactos ou resulte folga nas transmissões. Mediante este sistema de ajuste na transmissão, permite-se que, quando cessado o impulso elétrico sobre o motor, o mesmo permaneça na posição pré-determinada. Entretanto, para o acoplamento do motor com encoder foi necessária uma adaptação, que mostrou-se inadequada, pois permitiu que ocorressem folgas entre o motor e a transmissão.

Entretanto, por especificação de projeto a estrutura básica de tais motores foi adulterada, para possibilitar a instalação de um encoder óptico no mesmo eixo do motor. Conforme se verá no "Capítulo 6", tal alteração comprometeu o sistema de auto ajuste.

## CAPÍTULO 04

### MODELAGEM MATEMÁTICA

#### 4.1 Introdução :

Sendo um manipulador uma cadeia cinemática, que tem por objetivo efetuar uma dada tarefa no espaço cartesiano, faz-se necessário, via de regra, determinar as posições e a orientação do efetuador neste espaço. O modelo matemático que permite obter tais dados denomina-se **Modelo Geométrico Direto**.

No decorrer das últimas décadas vários autores propuseram metodologias semelhantes entre si, sendo que os trabalhos mais significativos são os de [Craig-86], [Fu-87], [Paul-83]. A grande maioria dos modelos geométricos diretos baseiam-se, entretanto, no trabalho pioneiro de Denavit e Hartenberg [Denavi-55], [Spong-89], que desenvolveram uma metodologia para representar as relações geométricas entre elos de uma mesma cadeia cinemática. Assim, ao invés dos seis parâmetros necessários para se localizar um corpo no espaço, bastam quatro, pois representando-se a orientação e a posição de um elo em relação ao outro através das denominadas **Matrizes de Transformação Homogênea**, dois pares são fixos.

Neste trabalho será utilizado a sistemática desenvolvida por Mendeleck [Mendel-89], [Mendel-91], que utiliza os princípios básicos de Denavit-Hartenberg, mas possui uma sistemática mais adequada ao estudo em questão.

Entretanto, o principal problema a ser resolvido é saber qual o valor teórico que cada junta do manipulador deve assumir, sendo conhecidas a posição e a orientação do efetuador, ou dado um ponto no espaço, qual a configuração final do manipulador, que permita ser aquele ponto alcançado. Neste caso, o modelo a ser obtido é o chamado **Modelo Geométrico Inverso**. Na realidade, passa-se do espaço cartesiano ao espaço de juntas, através de relações nem sempre biunívocas e sujeitas a singularidades. Existe na literatura, um grande número de soluções tanto analíticas como numéricas [Craig-86], [Paul-83],[Fu-87].

Neste trabalho, como está-se trabalhando com posições e não com orientação a obtenção do modelo geométrico inverso pode ser algébrica.

Finalmente, embora não se tenha desenvolvido um gerenciador de trajetória é apresentado o **Modelo Dinâmico** que permite calcular o torque necessário nas três juntas do manipulador, considerando-se conhecidos os parâmetros básicos do manipulador tais como, dimensões geométricas, massas e inércias [Ferreira-86], [Vieira-86], [Westphal-84].

O modelo dinâmico baseia-se no formalismo de Newton-Euler que é naturalmente recursivo, utilizando-se da metodologia desenvolvida por Craig e implementada simbolicamente por Mendenhall [Craig-86], [Mendenhall-89].

#### 4.2 Volume de Trabalho e Principais Parâmetros do Manipulador :

Nesta dissertação têm-se uma cadeia cinemática aberta com três graus de liberdade, conforme FIG. (05), onde estão representadas as principais dimensões nominais. A posição (como não há efetuator, não existe o problema da orientação) do conjunto do braço é obtida pela rotação das três juntas, que se movimentam independentemente. Sua posição angular é definida por  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  respectivamente.

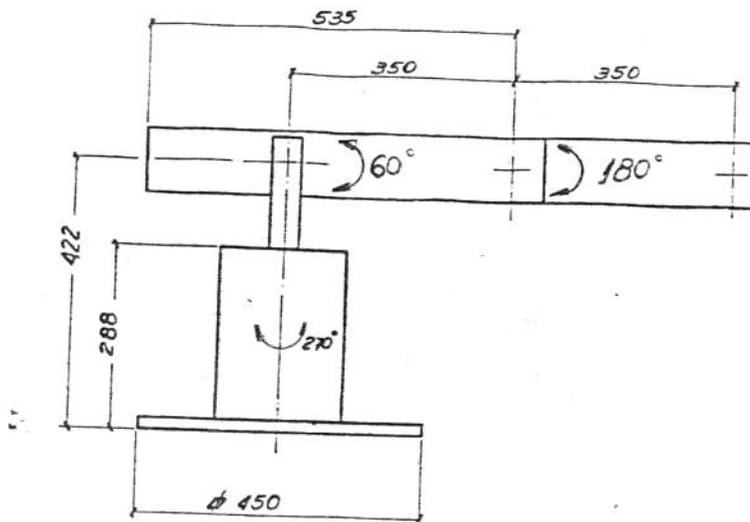


FIG. (01) Desenho esquemático do robô manipulador com as dimensões básicas.

Devido às restrições impostas por limitações mecânicas, comprimento de cabos etc, a variação máxima de cada junta está representada na Tab. [01]. Além disso, arbitrou-se a posição "home", simétrica em relação à variação de cada junta.

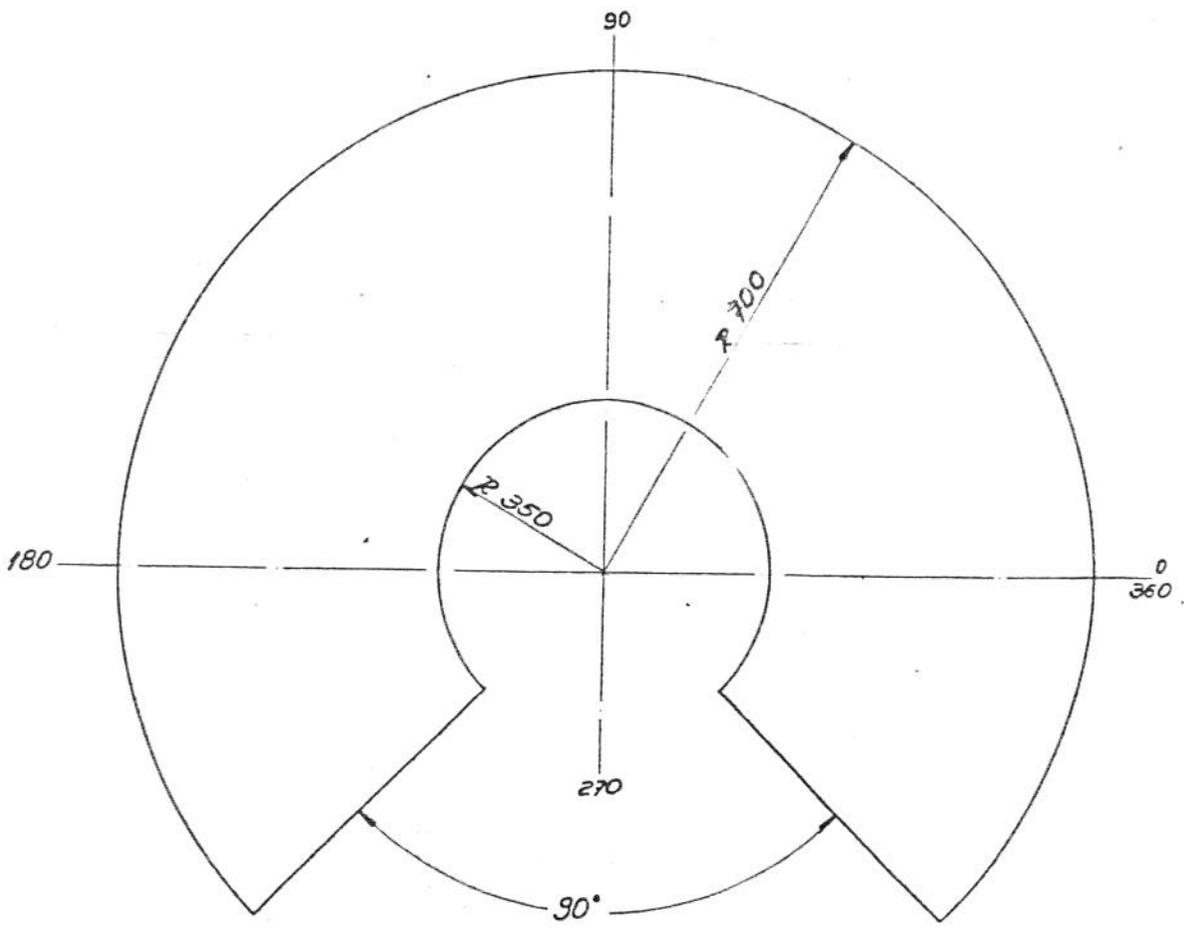
Junta	Variação do Ângulo $\theta$ (graus)	$\theta$ (graus)
1	$- 135 \leq \theta_1 \leq + 135$	270
2	$- 30 \leq \theta_2 \leq + 30$	60
3	$- 90 \leq \theta_3 \leq + 90$	180

Tab. [01] Tabela de parâmetros do robô manipulador.

Na tabela acima a junta "1" diz respeito ao giro da base, cuja a variação máxima é de 270 graus. A junta "2" referente ao ombro. Por limitações mecânica permite uma variação máxima de 60 graus enquanto que o cotovelo ou junta "3" pode variar até 180 graus. A posição "home" a partir da qual são medidas tais variações é apresentada na FIG. (12), Capítulo 5.

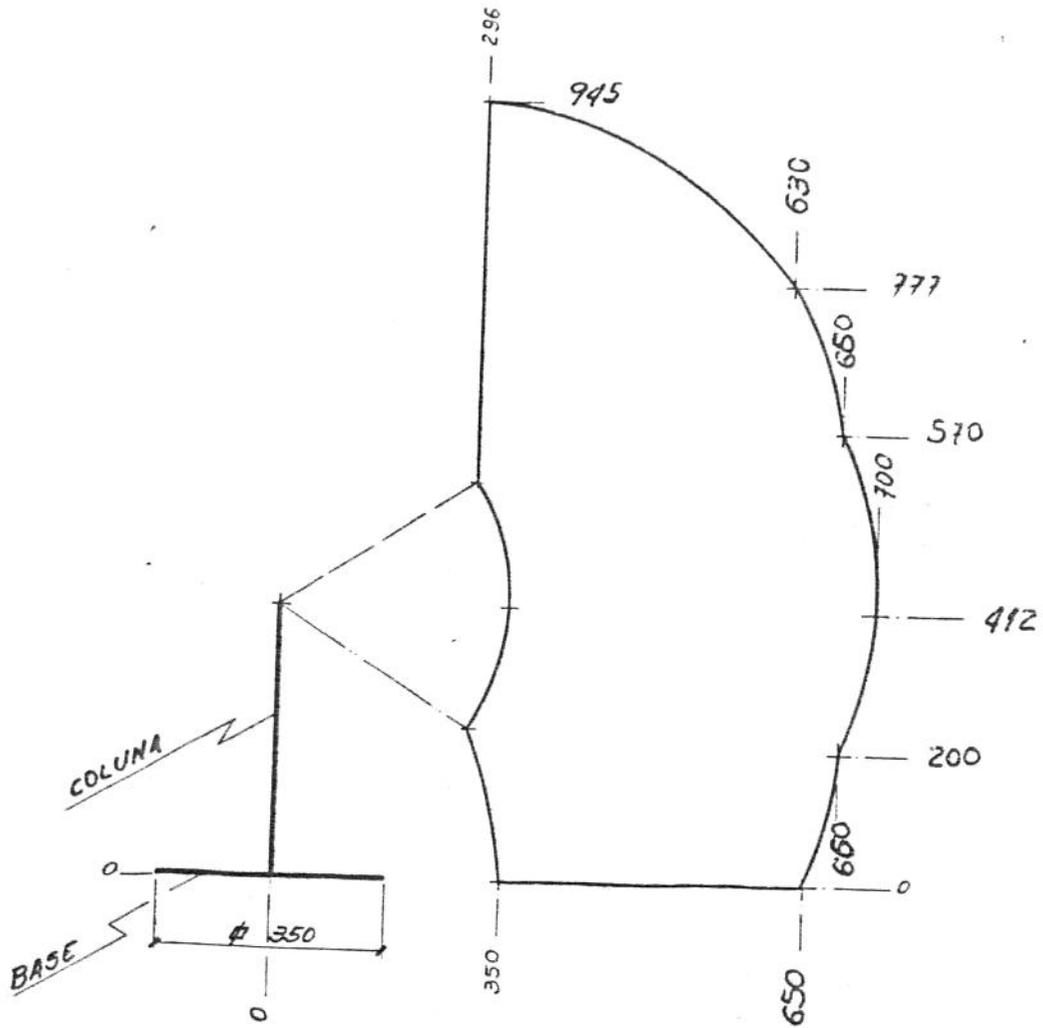
De posse desses dados obtém-se o volume de trabalho apresentado em sua vista de planta FIG. (06), enquanto que a FIG. (07) representa o volume de trabalho da articulação do braço e ante-braço do manipulador.

Esta representação, permite, "intuitivamente", prever o desacoplamento de  $\theta_1$  em relação aos outros dois ângulos.



*DIMENSÕES EM mm.*

FIG. (06) Volume de trabalho, vista de planta, do robô manipulador.



DIMENSÕES EM mm.

FIG. (07) Volume de trabalho do conjunto do braço do robô manipulador.  
(dimensões em x, y, à partir do centro da base em mm)

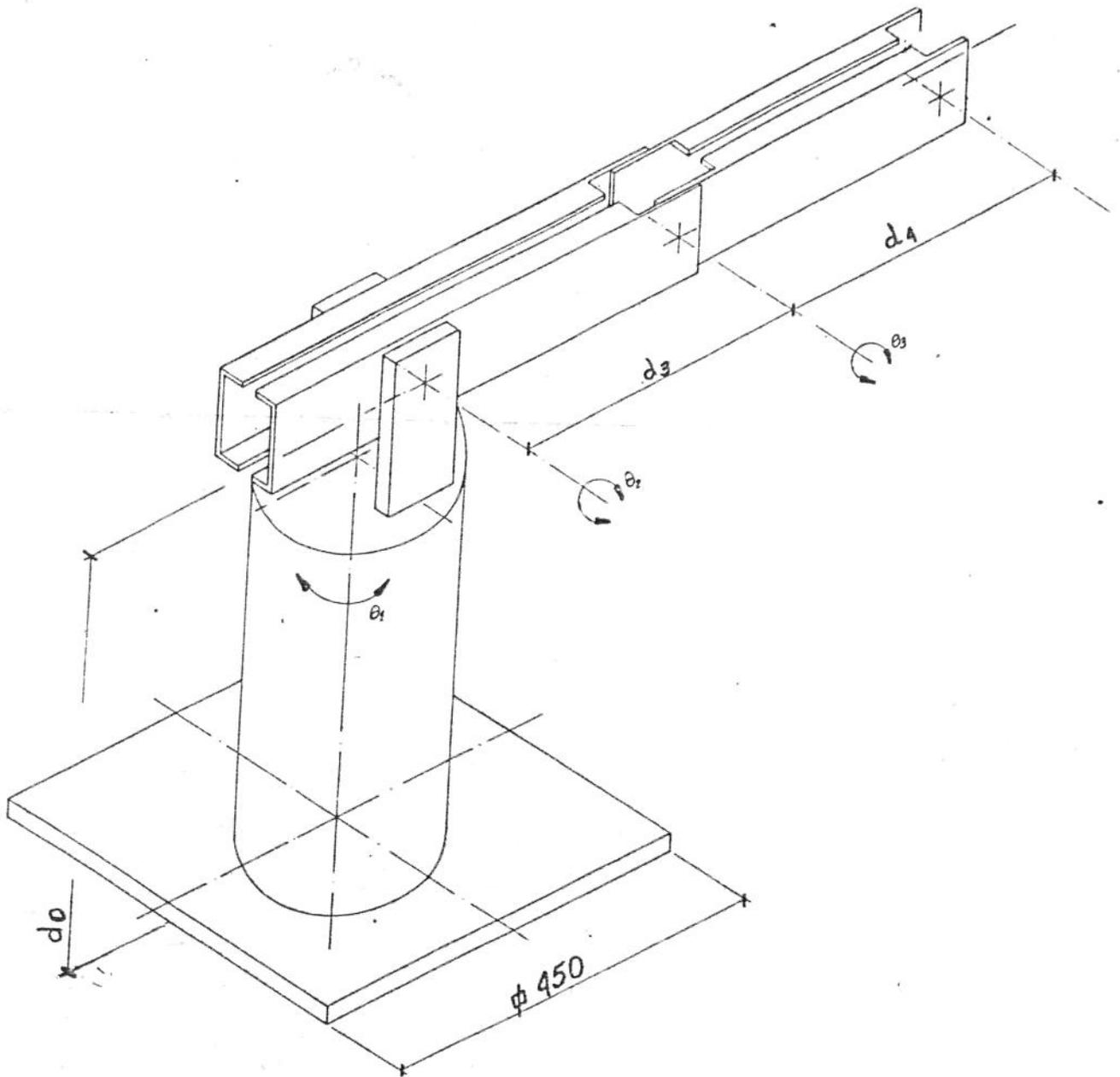


FIG. (08) Robô manipulador JOPOC - 8808 .

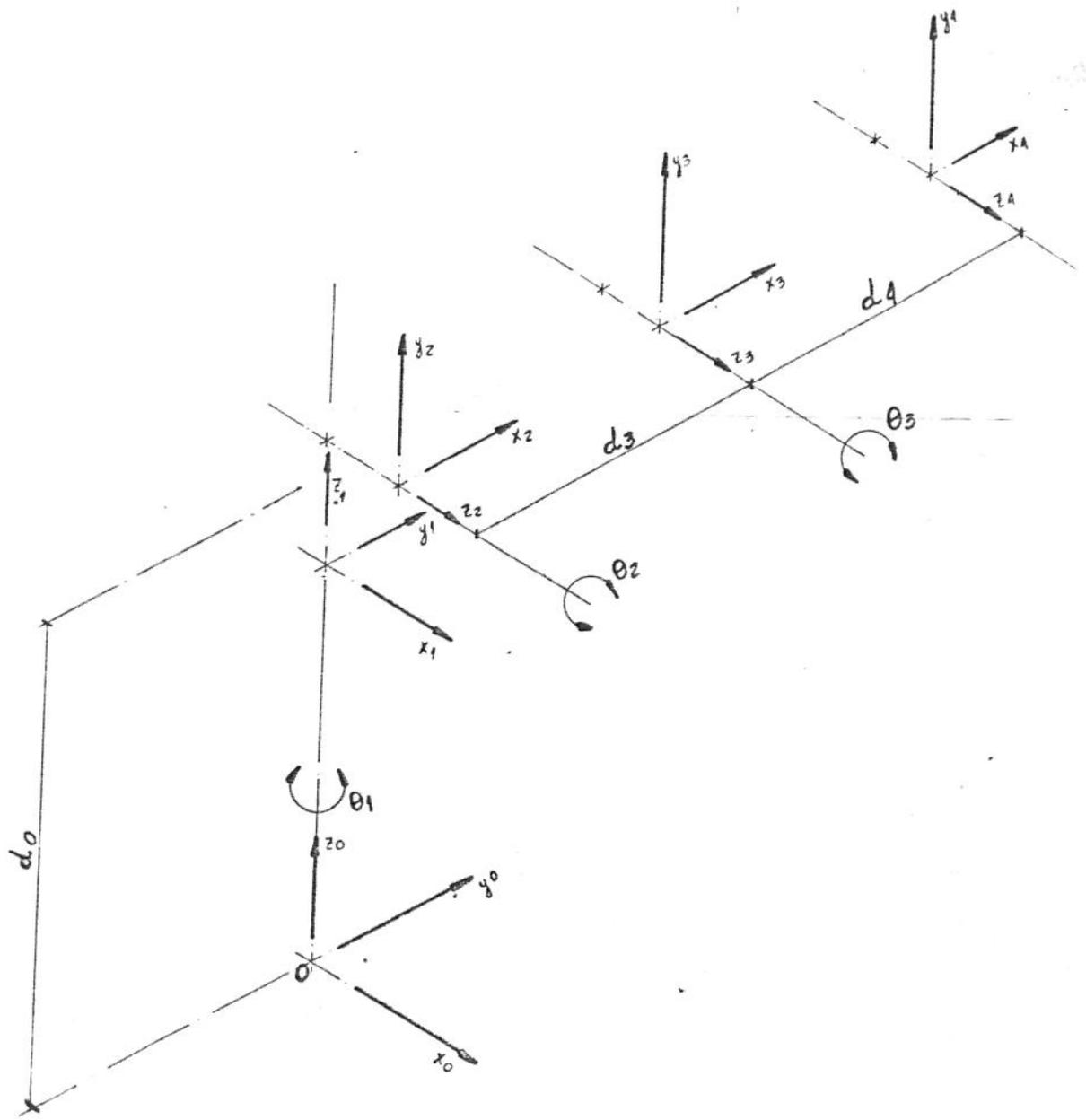


FIG. (09) Sistema de referência do Manipulador.

### 4.3 Modelo Geométrico Direto :

Conforme já expresso anteriormente a solução da cinemática direta consiste em obter a posição e a orientação do elemento final do manipulador, em relação a um sistema inercial de referência fixo, via de regra na base do mesmo.

No presente caso os principais parâmetros geométricos necessários, bem como, o deslocamento angular das três juntas estão representados na FIG. (08).

Utilizando-se da sistemática já anteriormente citada, a obtenção do modelo geométrico direto é baseada na representação das relações cinemáticas por meio da matriz de transformação homogênea abaixo representada, (vide, p. ex., [Craig-86]).

$${}^i A_{i+1} = \begin{vmatrix} {}^i R_{i+1} & {}^i p_{i+1} \\ \dots & \dots \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (01)$$

Os índices  $i$  e  $i+1$  representam a relação tanto em posição como em orientação do  $i+1$  - éximo referencial em relação ao  $i$  - éximo sistema de referência. A matriz  $R$  de ordem três, fornece a orientação enquanto o vetor  $p$  de ordem três representa a posição da origem do referencial  $i+1$ .

A última linha tem origem na computação gráfica, representando fatores de perspectiva e escala. Neste trabalho tais fatores serão constantes com valores nulos para os primeiros, (os de perspectiva) e igual a identidade para o de escala.

Por regra da localização do sistema de referência, adota-se o eixo  $z$  como sendo aquele relativo à variável de junta. O sistema inercial identificado pelo sub-índice, " 0 " possui o plano  $x$  e  $y$  convenientemente escolhido, enquanto que os referenciais fixos nas juntas possuem o eixo  $z_i$  preferencialmente apontado para o  $i+1$  - éximo elo.

Sendo assim, os sistemas de referência do manipulador em questão, possuem a representação mostrada na FIG. (09).

Assim, o modelo geométrico direto é dado por :

$$T = {}^0 A_4 = {}^0 A_1 * {}^1 A_2 * {}^2 A_3 * {}^3 A_4 \quad (02)$$

ou seja ;

$$T = \begin{vmatrix} N_x & O_x & K_x & P_x \\ N_y & O_y & K_y & P_y \\ N_z & O_z & K_z & P_z \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

(03)

As três primeiras colunas da matriz  $T$ , indicam a orientação dos versores  $x$ ,  $y$ ,  $z$  do referencial quatro ao referencial inercial. Quanto à quarta coluna, a mesma indica a posição absoluta da origem deste sistema referencial, em relação ao referencial inercial.

Na seqüência temos as matrizes de transformação homogênea, a saber :

$${}^0A_1 = \text{rot}(\alpha_1, \theta_1) * \text{trans}(0, 0, d_0)$$

$${}^0A_1 = \begin{vmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

(04)

$${}^1A_2 = \text{rot}(x, 90) * \text{rot}(y, 90) * \text{rot}(z, \theta_2)$$

$${}^1A_2 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ C_2 & -S_2 & 0 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

(05)

$${}^2A_3 = \text{rot} ( z_3, \theta_3 ) * \text{trans} ( d_3, 0, 0 )$$

$${}^2A_3 = \begin{vmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & d_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

(06)

$${}^3A_4 = \text{trans} ( d_4, 0, 0 )$$

$${}^3A_4 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & d_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

(07)

onde :

$S_i$  : seno, da  $i$  - ésima junta

$C_i$  : cosseno, da  $i$  - ésima junta

$d_i$  : comprimento do elo em questão .

Deste modo as componentes da matriz  $T$ , são :

$$\begin{aligned}N_x &= -S_1 C_{23} \\N_y &= C_1 C_{23} \\N_z &= S_{23}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}O_x &= -S_1 S_{23} \\O_y &= -C_1 S_{23} \\O_z &= C_{23}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}K_x &= C_1 \\K_y &= S_1 \\K_z &= 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_x &= -S_1 C_{23} d_4 - S_1 C_2 d_3 \\P_y &= C_1 C_{23} d_4 + C_1 C_2 d_3 \\P_z &= S_{23} d_4 + S_2 d_3 + d_0\end{aligned}$$

#### 4.4 Modelo Geométrico Inverso :

O modelo geométrico inverso permite calcular os valores angulares teóricos das juntas, a partir da matriz  $T$ .

A solução matemática proposta por vários autores consiste em pré-multiplicar a matriz  $T$  pela inversa da matriz de transformação homogênea mais a esquerda da equação, ou pós-multiplicar pela matriz de transformação homogênea mais a direita. Vários livros textos abordam esse problema onde maiores detalhes podem ser obtidos em [Fu-87], [Paul-83], [Spong-89].

No presente caso, como só se está trabalhando com três graus de liberdade é suficiente trabalhar-se com o vetor deslocamento  $p$  para obter-se os três ângulos de juntas. Claro está que o método abaixo proposto não exclui outras metodologias, inclusive mais simples. Entretanto qualquer método que seja adotado, necessita que se tome cuidado com singularidades e multiplicidades de soluções.

##### 4.4.1 Determinação de $\theta_1$ :

Considerando-se as expressões de  $p_x$  e  $p_y$ , obtém-se que :

$$\frac{p_x}{p_y} = \frac{-S_1 (C_{23} d_4 + C_2 d_3)}{C_1 (C_{23} d_4 + C_2 d_3)} \quad (08)$$

ou seja :

$$\text{tg } \theta_1 = \frac{-p_x}{p_y} \quad (09)$$

#### 4.4.2 Determinação de $\theta_2$ e $\theta_3$ :

Como o movimento do conjunto do braço e ante-braço possui um movimento em um plano definido pelos ângulos  $\theta_2$  e  $\theta_3$ , perpendicular ao plano da base função de  $\theta_1$ , pode-se obter os ângulos de juntas trigonometricamente conforme FIG. (10), abaixo.

Da FIG. (10) têm-se :

$$d = d_3^2 + d_4^2 - 2 d_3 d_4 \cos ( 180 - \theta_3 ), \quad (10)$$

levando-se em conta o triângulo hachureado. Entretanto a posição do ponto  $p$  sobre o sistema de referência da junta  $\zeta$  nos leva à seguinte relação :

$$d = \sqrt{{}^1p_{\psi}^2 + {}^1p_{\zeta}^2} \quad (11)$$

onde  ${}^1p_{\psi}$  e  ${}^1p_{\zeta}$  são as coordenadas do ponto  $p$  expressas no referencial 1. A relação entre a coordenada  ${}^1p_{\zeta}$  e o referencial inercial, é dada por :

$${}^1p_{\zeta} = p_{\zeta} - d_0, \quad (12)$$

enquanto que  ${}^1p_{\psi}$  é obtido da seguinte relação :

$${}^1p_{\psi} = \sqrt{p_{\alpha}^2 + p_{\psi}^2} \quad (13)$$

conforme mostra a FIG. (11), levando em conta a rotação  $\theta_1$ .

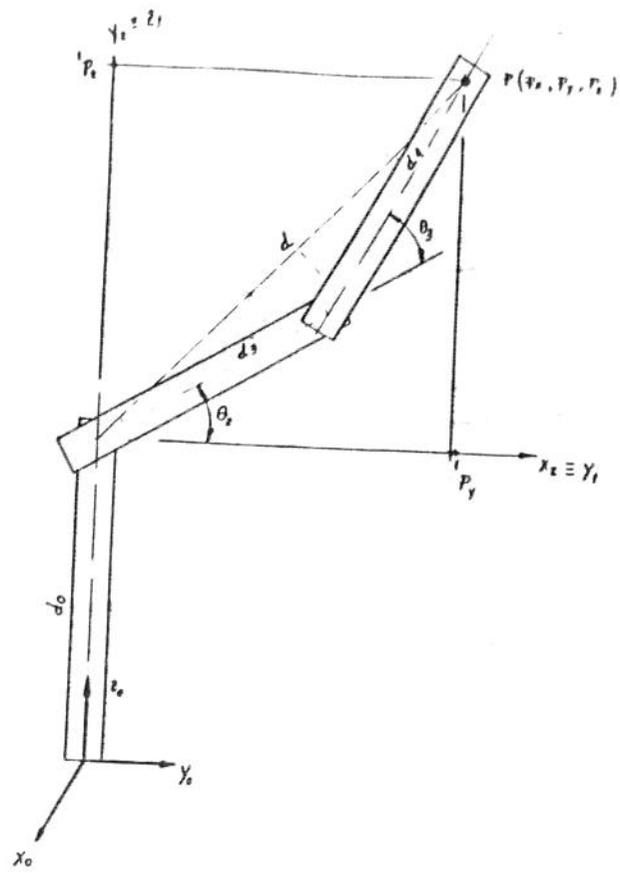


FIG. (10) Posição do ponto  $p = d_0 + d$

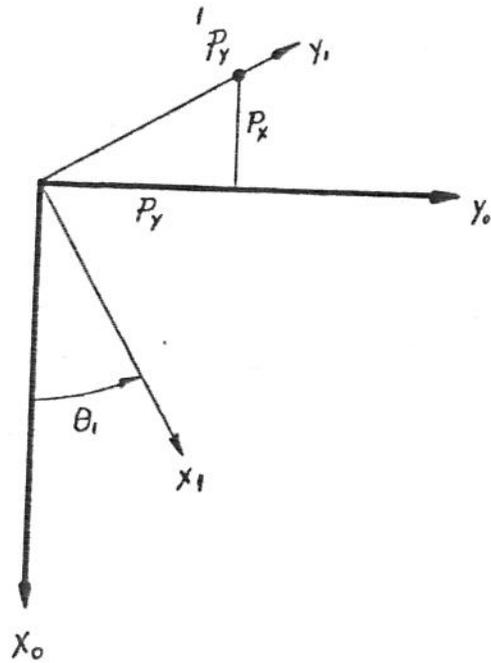


FIG. (11) Projeção do movimento da junta 1

Levando-se em conta as equações (10), (11), (12) e (13):

$$(p_z - d_0)^2 + (p_x^2 + p_y^2) = d_3^2 + d_4^2 - 2 d_3 d_4 \cos (180 - \theta_3) \quad (14)$$

Após o desenvolvimento da expressão obtém-se  $\theta_3$  em função de  $p_x$  e  $p_y$  e dos parâmetros geométricos do manipulador:

$$\theta_3 = \arccos \frac{(p_z - d_0)^2 + p_x^2 + p_y^2 - d_3^2 - d_4^2}{2 d_3 d_4} \quad (15)$$

De posse do valor de  $\theta_3$ , pode-se obter  $\theta_2$  a partir da expressão de  $p_z$  dada por :

$$p_z = S_{23} d_4 + S_2 d_3 + d_0 \quad (16)$$

---

(1) A forma explícita de  $\theta_2$  é obtida substituindo convenientemente a expressão seno de arco duplo e a identidade trigonométrica em função do seno e cosseno do ângulo.

#### 4.5 Modelo Dinâmico :

A obtenção do modelo dinâmico de um manipulador pode ser feita por diferentes formalismos, sendo que o de "Lagrange" e de "Newton-Euler" são os mais utilizados [Nariki-91] e [Takega-81]. No presente caso optou-se pelo último, uma vez que, para o exemplo em questão, ele apresenta um número menor de operações aritméticas além de ser naturalmente recursivo [Fu-87].

A metodologia aqui empregada é a mesma desenvolvida por Craig [Craig-86]. No intuito de não restringir a generalidade do método, será mostrado o algoritmo para uma cadeia cinemática aberta para  $n$  graus de liberdade e  $i$  juntas, lembrando que a fixação e a orientação dos referenciais deve seguir a mesma metodologia proposta neste Capítulo.

Velocidade Angular :

$${}^{i+1}\omega = {}^iR^{i+1} * {}^i\omega + \theta^{i+1} * Z^{i+1} \quad (17)$$

Aceleração Angular :

$${}^{i+1}\dot{\omega} = {}^iR^{i+1} * {}^i\dot{\omega} + {}^iR^{i+1} * {}^i\omega \times \theta^{i+1} * Z^{i+1} + \theta^{i+1} * Z^{i+1} \quad (18)$$

Aceleração Linear :

$${}^{i+1}\dot{V} = {}^iR^{i+1} * [ {}^i\omega \times {}^i p_{i+1} + {}^i\omega \times ( {}^i\omega \times {}^i p_{i+1} ) + {}^iV ] \quad (19)$$

Aceleração Linear do Centro de Gravidade :

$${}^{i+1}\dot{V}_c = {}^{i+1}V + {}^{i+1}\omega \times {}^{i+1}p_c + {}^{i+1}\omega \times ( {}^{i+1}\omega \times {}^{i+1}p_c ) \quad (20)$$

Força Atuando no Centro de Gravidade :

$$F_{i+1}^{i+1} = m_{i+1} * V_{c,i+1}^{i+1} \quad (21)$$

Torque Atuando no Centro de Gravidade :

$$N_{i+1}^{i+1} = I_{i+1} * \omega_{i+1} + \omega_{i+1} \times I_{i+1} * \omega_{i+1} \quad (22)$$

Força Total Atuando no Link :

$$f_i^i = R_{i+1}^i * f_{i+1}^{i+1} + f_i^i \quad (23)$$

Torque Total no Link :

$$n_i^i = N_i^i + R_{i+1}^i * n_{i+1}^{i+1} + p_{c,i}^i \times F_i^i + p_{i+1}^i \times R_{i+1}^i * f_{i+1}^{i+1} \quad (24)$$

Torque Total na Junta :

$$\tau_i^i = n_i^i * \hat{Z}_i \quad (25)$$

onde:

$\hat{Z}_i$  : Direção em  $z$  do  $i$  - ésimo referencial .

Para o exemplo em questão, o torque das três juntas do robô foi calculado simbolicamente, utilizando-se o software "Reduce" [Hearn-85], [Leu-86], [Mendel-89]. Como a versão utilizada é bastante antiga, após a obtenção dos torques faz-se necessário ainda um número considerável de simplificações, não efetuadas no equacionamento abaixo. Assim o torque em cada junta é expresso por:

Cálculo de Torque para a Terceira Junta :

$$\begin{aligned}
 TQ3 = & -c2*c2*c3*s3*IX4*v1*v1 + c2*c2*c3*s3*IY4*v1*v1 + c2*c2*c3*s3 \\
 & *v1*v1*cd4*cd4*m4 + c2*c2*s3*v1*v1*d3*cd4*m4 \\
 & -c2*c3*c3*s2*IX4*v1*v1 + c2 \\
 & *c3*c3*s2*IY4*v1*v1 + c2*c3*c3*s2*v1*v1*cd4*cd4*m4 \\
 & +c2*c3*s2*v1*v1*d3*cd4*m4 + c2*c3*g*cd4*m4 + c2* \\
 & s2*s3*s3*IX4*v1*v1 - c2*s2*s3*s3*IY4*v1*v1 \\
 & -c2*s2*s3*s3*v1*v1*cd4*cd4*m4 \\
 & +c3*s2*s2*s3*IX4*v1*v1 - c3*s2*s2*s3*IY4*v1*v1 \\
 & -c3*s2*s2*s3*v1*v1*cd4*cd4*m4 \\
 & +c3*a2*d3*cd4*m4 - s2*s3*g*cd4*m4 + s3*v2*v2*d3 \\
 & *cd4*m4 + IZ4*a2 + IZ4*a3 + a2*cd4*cd4*m4 + a3*cd4*cd4*m4
 \end{aligned}$$

Cálculo de Torque para a Segunda Junta :

$$\begin{aligned}
 TQ2 = & -c2*c2*c3*s3*IX4*v1*v1 + c2*c2*c3*s3*IY4*v1*v1 + c2*c2*c3*s3 \\
 & *v1*v1*cd4*cd4*m4 + c2*c2*s3*v1*v1*d3*cd4*m4 \\
 & +c2*c3*c3*c3*s2*v1*v1*d3*cd4*m4 - c2*c3*c3*s2*IX4*v1*v1 \\
 & +c2*c3*c3*s2*IY4*v1*v1 + c2*c3*c3*s2 \\
 & *v1*v1*d3*d3*m4 + c2*c3*c3*s2*v1*v1*cd4*cd4*m4 \\
 & +c2*c3*c3*g*d3*m4 + c2*c3*s2*s3*s3*v1*v1*d3*cd4*m4 + c2*c3 \\
 & *s2*v1*v1*d3*cd4*m4 + c2*c3*g*cd4*m4 + c2*s2*s3*s3*IX4*v1*v1 \\
 & -c2*s2*s3*s3*IY4*v1*v1 + c2*s2*s3*s3*v1*v1*d3*d3*m4 \\
 & -c2*s2*s3*s3*v1*v1*cd4*cd4*m4 - c2*s2*IX3*v1*v1 + c2 \\
 & *s2*IY3*v1*v1 + c2*s2*v1*v1*cd3*d3*m3 + c2*s3*s3*g*d3*m4 \\
 & +c2*g*cd3*m3 \\
 & -c3*c3*s2*s2*s3*v1*v1*d3*cd4*m4 \\
 & +c3*c3*a2*d3*d3*m4 + c3*s2*s2*s3*IX4*v1*v1 \\
 & -c3*s2*s2*s3*IY4*v1*v1 - c3*s2*s2*s3*v1*v1*cd4*cd4*m4 \\
 & +2.*c3*a2*d3*cd4*m4 \\
 & +c3*a3*d3*cd4*m4 - s2*s2*s3*s3*s3*v1*v1*d3*cd4*m4 \\
 & -s2*s3*g*cd4*m4 \\
 & +s3*s3*a2*d3*d3*m4 - 2.*s3*v2*v3*d3*cd4*m4 - s3*v3*v3 \\
 & *d3*cd4*m4 + IZ3*a2 + IZ4*a2 + IZ4*a3 + a2*cd3*d3*m3 + a2 \\
 & *cd4*cd4*m4 + a3*cd4*cd4*m4
 \end{aligned}$$

Cálculo de Torque para a Primeira Junta :

$$\begin{aligned}
 TQ1 = & +c2*c2*c3*c3*Y4*al \\
 & +c2*c2*c3*c3*al*cd4*cd4*m4 + 2.*c2*c2 \\
 & *c3*s3*IX4*v1*v2 + 2.*c2*c2*c3*s3*IX4*v1*v3 \\
 & -2.*c2*c2*c3*s3*Y4*v1*v2 - 2.*c2*c2*c3*s3*Y4*v1*v3 \\
 & -2.*c2*c2*c3*s3*v1*v2*cd4*cd4*m4 - 2.*c2*c2 \\
 & *c3*s3*v1*v3*cd4*cd4*m4 + 2.*c2*c2*c3*al*d3*cd4*m4 \\
 & +c2*c2*s3*s3*IX4*al \\
 & -2.*c2*c2*s3*v1*v2*d3*cd4*m4 \\
 & -2.*c2*c2*s3*v1*v3*d3*cd4*m4 + c2*c2*Y3*al \\
 & +c2*c2*al*d3*d3*m4 + c2*c2*al*cd3*d3*m3 \\
 & +2.*c2*c3*c3*s2*IX4*v1*v2 \\
 & +2.*c2*c3*c3*s2*IX4*v1*v3 - 2.*c2*c3*c3*s2*Y4*v1*v2 \\
 & -2.*c2*c3*c3*s2*Y4*v1*v3 - 2.*c2*c3*c3*s2*v1*v2*cd4*cd4*m4 \\
 & -2.*c2*c3*c3*s2*v1*v3*cd4*cd4*m4 \\
 & +2.*c2*c3*s2*s3*IX4*al - 2.*c2*c3*s2*s3*Y4*al \\
 & -2.*c2*c3*s2*s3*al*cd4*cd4*m4 \\
 & -4.*c2*c3*s2*v1*v2*d3*cd4*m4 - 2.*c2*c3*s2*v1*v3*d3*cd4*m4 \\
 & -2.*c2*s2*s3*s3*IX4*v1*v2 - 2.*c2*s2*s3*s3*IX4*v1*v3 + 2.*c2*s2 \\
 & *s3*s3*Y4*v1*v2 + 2.*c2*s2*s3*s3*Y4*v1*v3 + 2.*c2*s2*s3 \\
 & *s3*v1*v2*cd4*cd4*m4 + 2.*c2*s2*s3*s3*v1*v3*cd4*cd4*m4 \\
 & - 2.*c2*s2*s3*al*d3*cd4*m4 + 2.*c2*s2*IX3*v1*v2 \\
 & -2.*c2*s2*Y3*v1*v2 - 2.*c2*s2*v1*v2*d3*d3*m4 \\
 & -2.*c2*s2*v1*v2*cd3*d3*m3 \\
 & +c3*c3*s2*s2*IX4*al \\
 & -2.*c3*s2*s2*s3*IX4*v1*v2 - 2.*c3*s2*s2*s3*IX4*v1*v3 \\
 & +2.*c3*s2*s2*s3*Y4*v1*v2 + 2.*c3*s2*s2*s3*Y4*v1*v3 \\
 & +2.*c3*s2*s2*s3*v1*v2*cd4*cd4*m4 + 2.*c3*s2*s2*s3*v1 \\
 & *v3*cd4*cd4*m4 \\
 & +s2*s2*s3*s3*Y4*al \\
 & +s2*s2*s3*s3*al*cd4*cd4*m4 \\
 & +2.*s2*s2*s3*v1*v2*d3*cd4*m4 + s2*s2*IX3*al \\
 & +IZ1*al
 \end{aligned}$$

onde:

TQ1, TQ2, TQ3 : Torque total nas juntas 1, 2, 3, respectivamente.

d0, d3, d4 : Comprimento da base, braço e ante-braço do robô.

v1, v2, v3 : Velocidade angular das três primeiras juntas.

al, a2, a3 : Aceleração angular das três primeiras juntas.

m3, m4 : Massa do braço e ante-braço do robô.

cd3, cd4 : Posição do centro de massa do braço e ante-braço do robô.

IX3, IX4 : Termos da matriz de pseudo inércia em  $\alpha$ .

IY3, IY4 : Termos da matriz de pseudo inércia em  $\psi$ .

IZ1, IZ3, IZ4 : Termos da matriz de pseudo inércia em  $\alpha$  [Craig-86]  
[Wander-88].

## CAPÍTULO 05

### EXPERIMENTOS

A partir dos dados de projeto e levando-se em conta as tolerâncias e erros de fabricação, o manipulador foi submetido a alguns testes preliminares, visando principalmente a determinação de seu exato volume de trabalho e repetibilidade.

Conforme já dito antes, a inexistência de chaves de final de curso, faz com que os limites sejam estipulados em software.

Sendo assim, os testes foram voltados à determinação do volume real de trabalho e a uma sistemática simplificada de avaliação da faixa de erro relativo a repetibilidade de operação.

## 5.1 PREPARATIVOS DA FASE EXPERIMENTAL :

Na realização dos experimentos procurou-se cercar de todos os cuidados possíveis para que não houvesse interferência externa nos resultados.

Dentre estes procedimentos, apoiou-se rigidamente a mesa da base, garantindo que a mesma estivesse nivelada. Obviamente, para realização dos ensaios, certificou-se da não existência de qualquer objeto ou obstáculo nas vizinhanças do manipulador.

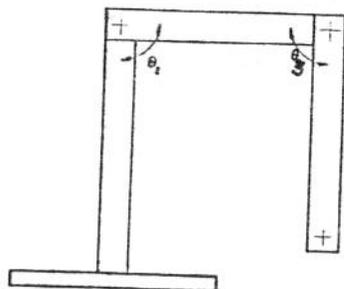
Após o nivelamento da mesa da base, fez-se necessário estabelecer uma posição de repouso, conhecida como "stand by" ou "home". Tal posição é de fundamental importância, pois é a partir dela que todos os sensores são calibrados. Mais ainda esta posição tem a função também de "reset", isto é, após um dado ciclo de operações, ciclo esta função da repetibilidade alcançada, o sistema automaticamente retorna ao "home" zerando todos os erros acumulados durante uma dada tarefa. Para se evitar erros sistemáticos, utilizou-se do sinal de referência do encoder como padrão da posição "home". Ela é estabelecida, via de regra, levando-se em conta evitar singularidades [Nakamu-86].

No presente caso entretanto, levou-se em conta, prioritariamente, a utilização de um instrumental mais simples. Por essa razão optou-se por se colocar o braço na posição horizontal, enquanto que o ante-braço ficou na posição vertical orientado para baixo.

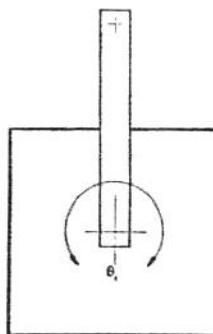
As vantagens dessas posições, é que a constatação delas é feita por nivelamento e esquadrejamento. Assim a posição inicial no espaço de juntas é dado por :

$\theta_1$	(rotação da base)	=	0 grau.
$\theta_2$	(ombro ou rotação do ante-braço)	=	0 grau.
$\theta_3$	(cotovelo ou rotação do braço)	=	+ 90 graus.

Posição inicial do manipulador, " home " :



Vista de elevação  
FIG. (12)



Vista de Planta  
Posição "home" do manipulador.

Convém salientar, que, arbitrou-se o sentido positivo como sendo o da rotação das juntas no sentido horário, enquanto que, o sentido anti-horário recebeu o sinal negativo.

Além dos fatos acima citados, a posição " home " , foi escolhida também para ser a parada do robô em qualquer situação. Assim no caso de ocorrer qualquer anormalidade no desempenho de uma dada tarefa, ao acionar-se a emergência, o manipulador retorna a posição de origem, lembrando que, o movimento de cada junta é independente, não tendo sido implementado um gerenciador de trajetória.

## 5.2 Realização dos Experimentos :

Uma vez que tanto a repetibilidade, como o volume de trabalho são determinados, respectivamente, pelo movimento e posições limites das três juntas, utilizou-se de um método que testasse individualmente cada junta. Assim o volume de trabalho foi dividido em uma planta e uma elevação (vide FIG. (12)).

A variação na planta é função da primeira junta ( $\theta_1$ ). Entretanto as posições intermediárias são função da segunda junta ( $\theta_2$ ), sendo o caso mais crítico, quando o braço e ante-braço estão alinhados, movimentando-se na fronteira externa do volume de trabalho. Por essa razão efetuou-se dois experimentos com relação à planta do volume de trabalho.

Na elevação, que é função das segunda ( $\theta_2$ ) e terceira ( $\theta_3$ ) juntas, foram efetuados dois experimentos, variando-se em cada um deles uma das juntas.

Para todos os experimentos realizados utilizou-se de uma mesa dividida em coordenadas, formando quadrados de 10 mm, permitindo obter-se as coordenadas  $x$  e  $y$  a partir da referência inicial. A coordenada  $z$  foi sempre obtida por medida direta.

Na realização dos experimentos o manipulador e seu controlador, foram acoplados a um micro-computador. A partir da posição desejada, transforma-se a mesma no correspondente espaço de juntas, fornecendo via teclado os valores angulares de cada uma delas [Hemami-91].

Com as informações das coordenadas de posição, o controlador, que é do tipo "PID de posição", acelera até a obtenção do torque necessário para movimentar a junta. Vencida a resistência inicial, o motor acelera até atingir o torque limite (imposto arbitrariamente a partir dos parâmetros do controlador), para posteriormente desacelerar ao se aproximar da coordenada de posição final.

O controlador está ajustado para uma tolerância de  $+ / - 0,5$  graus.

Cada experimento foi feito a partir da posição inicial, efetuando-se quatro leituras. Repetidas cada uma cinco vezes, elas possibilitam uma análise preliminar do erro de acurácia existente. Este erro foi expresso em termos do raio de um círculo com origem na posição teórica.

## Experimento I

Rotação da Base do Robô; ( $\theta_1$ ):

(posição inicial do robô - "home")

Neste primeiro experimento, verificou-se o comportamento da rotação da base do robô manipulador ( $\theta_1$ ), permanecendo fixas as demais juntas ( $\theta_2 = 0$  ;  $\theta_3 = + 90$  graus ), conforme Tab. {02} .

Posição	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	Variação - (r [mm])
01	+ 30	0	+ 90	2,0
02	+ 60	0	+ 90	2,0
03	+ 90	0	+ 90	1,5
04	+ 135	0	+ 90	1,5
05	- 30	0	+ 90	1,5
06	- 60	0	+ 90	2,0
07	- 90	0	+ 90	2,0
08	- 135	0	+ 90	1,5

Tab. {02} Rotação da base do robô manipulador ( $\theta_1$ ).

O experimento foi feito seguindo a seguinte metodologia:

- Mantendo-se a configuração "home" para o ombro e o cotovelo, girou-se a base a partir dessa posição para quatro posições distintas no sentido horário e no sentido anti-horário. Escolheu-se um passo de 30 graus entre cada experimento realizado, exceto no último por se estar no limite do volume de trabalho, sendo assim a tabela mostra a configuração obtida para as oito posições analisadas.

Na última coluna está representada a dispersão máxima dos pontos obtidos tomando-se por centro o ponto de referência teórico, a partir do qual traçou-se um círculo. Pode-se notar que a variação obtida praticamente independe da distância da posição final em relação ao ombro, embora o acoplamento entre o motor e o eixo fosse através de uma correia dentada flexível e a inércia a ser movimentada em relação as outras ser grande.

Experimento II :

Rotação da Base do Robô ( $\theta_1$ ) :

Neste segundo experimento, foi verificado o comportamento da rotação da base do robô manipulador ( $\theta_1$ ), permanecendo fixas as demais juntas ( $\theta_2 = 0$  ;  $\theta_3 = 0$  graus), conforme Tab. {03} .

Posição	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	Variação (r [mm])
09	+ 30	0	0	2,0
10	+ 60	0	0	1,5
11	+ 90	0	0	4,5
12	+ 135	0	0	8,0
13	- 30	0	0	2,0
14	- 60	0	0	9,0
15	- 90	0	0	5,0
16	- 135	0	0	1,5

Tab. {03} Rotação da base do robô manipulador ( $\theta_1$ ), sendo  $\theta_2$  e  $\theta_3$  iguais a zero.

O procedimento adotado foi semelhante ao anterior entretanto o ante-braço e o braço ficaram alinhados. Assim a ponta do manipulador ficou distante da base uma dimensão o dobro daquela do Experimento I anteriormente detalhado. Neste caso nota-se pela tabela acima considerável dispersão dos valores obtidos, o que comprova ser esta posição a mais crítica, uma vez que o conjunto do braço esticado exerce um torque muito maior que no caso anterior, aliado ao fato que as folgas mecânicas e as flexibilidades se somam neste caso.

**Experimento III :**

**Rotação do Ombro do Robô Manipulador ( $\theta_2$ ) :**

Neste terceiro experimento verificou-se o comportamento da rotação do ombro do robô manipulador ( $\theta_2$ ), variando a junta  $\theta_1$  ( $\theta_1 = + 45 / -45$  graus) e permanecendo fixa a junta  $\theta_3$  ( $\theta_3 = 0$  graus), conforme Tab. (04).

Posição	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	Variação (r [mm])	
				Plano	Elevação
17	+ 45	+ 5	0	1,0	1,5
18	+ 45	+ 10	0	1,0	1,0
19	+ 45	+ 20	0	1,5	4,0
20	- 45	- 5	0	1,5	1,0
21	- 45	- 10	0	1,5	1,0
22	- 45	- 20	0	2,0	4,0

**Tab. (04)** Rotação do ombro do robô manipulador ( $\theta_2$ ), sendo  $\theta_1$  variável e  $\theta_3$  fixa.

Neste experimento manteve-se a configuração anterior do conjunto do braço esticado e para duas posições fixa de giro da base (+/- 45 graus) movimentou-se o ombro em passos compatíveis com a amplitude total do movimento.

Como o movimento resultante é um arco de círculo na vertical duas medidas são necessárias: no plano "  $\alpha, \psi$  " da base e no eixo "  $\gamma$  ". Os resultados confirmam ser a elevação mais susceptível a erros devido principalmente a flexibilidades.

Experimento IV :

Rotação do Cotovelo do Robô Manipulador ( $\theta_3$ ) :

Neste quarto experimento, foi verificado o comportamento da rotação do cotovelo do robô manipulador ( $\theta_3$ ), variando a junta  $\theta_1$  ( $\theta_1 = + 75 / - 75$  graus ) e permanecendo fixa a junta  $\theta_2$  ( $\theta_2 = 0$  grau ), conforme, Tab. (05).

Posição	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	Variação (r [mm])	
				Plano	Elevação
23	+ 75	0	+ 30	3,0	4,5
24	+ 75	0	+ 45	2,0	1,5
25	+ 75	0	+ 60	1,5	0,5
26	+ 75	0	+ 90	0	0
27	- 75	0	- 15	1,5	2,5
28	- 75	0	- 30	1,0	2,0
29	- 75	0	- 45	1,0	1,0
30	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)

Tab. (05) Rotação do cotovelo do robô manipulador ( $\theta_3$ ), sendo  $\theta_1$  variável e  $\theta_2$  fixa.

Neste experimento partiu-se da configuração "home". Estabeleceu-se, arbitrariamente, duas posições diferentes para a base e variou-se o ângulo do cotovelo a partir daquela posição. A primeira dificuldade encontrada foi relativa as limitações de acesso a todas as medidas, pois a própria estrutura do robô interferia no sistema de medição fazendo com que as posições no sentido horário não ficassem simétricas aquelas no outro sentido. A exemplo do experimento anterior efetuou-se medidas no plano e no eixo vertical. Como neste caso o acionamento se deu por uma correia dentada com distância entre centros relativamente grande ocorreram algumas variações maiores.

(2) O sistema de medição não permitiu efetuar esta medida, por limitação mecânica.

### **5.3 Comentários sobre as Influências de Alguns Aspectos de Concepção e/ou Fabricação nos Resultados Obtidos :**

Neste tópico abordam-se os fatores decorrentes da concepção do projeto, que influenciaram na montagem final e/ou nos testes preliminares aos experimentos.

#### **A.1 Motor c.c. :**

Estes motores e/ou moto-redutores de corrente contínua, possuem dois parafusos de ajustes no eixo (coroa dentada/rosca sem-fim), que não permitem o deslocamento do mesmo no sentido axial. Uma vez que o parafuso de regulagem da parte de trás do motor foi retirado, alguns destes motores permitiram regulagem somente pelo parafuso dianteiro, que não fora projetado para estas condições de trabalho. Esta modificação se fez necessária para a adaptação do encoder.

Seu uso é possível e aconselhável, desde que não se altere sua forma construtiva, pois são fabricados dentro de tolerâncias e concepções, bem como sua durabilidade e confiabilidade seguem padrões internacionais da indústria automobilística.

#### **A.2 Posicionamento do Encoder :**

Uma vez que todos os encoders estão posicionados diretamente acoplados aos motores, a leitura dos pulsos é decorrente da posição do eixo do motor e não da posição da junta. Assim a posição final de cada junta diverge daquela teórica, pois as flexibilidades e folgas da transmissão não são detetadas pelo encoder.

#### **A.3 Construção e Montagem Mecânica :**

Embora, quando da concepção do projeto, tenham sido tomados todos os cuidados técnicos necessários, isso não ocorreu quando da fabricação dos componentes, sub-montagens e montagens, por não se dispor de uma oficina mecânica aparelhada em mecânica fina.

### A.3.1 Acionamento de Giro da Base do Robô ( $\theta_1$ ):

O sistema de acionamento da base do robô, descrito nos Capítulos 02 (item - 3.1) e Apêndice I (item - 01), é por meio de motor de corrente contínua, que transmite movimento através de uma correia dentada ao eixo de giro da base. Este sistema de transmissão, por correia sincronizadora, apresenta flexibilidade quando do torque de partida do motor e da frenagem da base giratória, fazendo com que o ajuste final de posição pelo controlador tenha um erro relativo. Além disso, embora no projeto fosse previsto um esticador, o mesmo não chegou a ser implementado, fazendo com que o problema da flexibilidade se agravasse neste caso.

### A.4 Controlador :

O controlador utilizado é objeto de estudo paralelo ao atual desenvolvimento, e foi utilizado em situação real pela primeira vez nos experimentos aqui relatados. Como se trata de um "PID de posição" sem controle de velocidade, a influência das flexibilidades e inércias principalmente aquelas relativas ao acionamento da base, se fazem sentir nos resultados obtidos.

### A.5 Considerações Finais :

De modo geral, os resultados obtidos podem ser considerados satisfatórios, pois excetuando as situações mais críticas tais como o giro da base com o manipulador totalmente estendido, a variação média foi aceitável para esta classe de construção mecânica, (vide [Fu-87]).

Uma comparação dos resultados da Tab. {02} e {03}, demonstram ser muito grande a influência da posição do braço sobre a acurácia do giro da base.

Quanto à Tab. {04}, os resultados demonstram não haver uma influência da ação da gravidade sobre o sentido de giro do ombro do manipulador, o mesmo não ocorrendo no caso do movimento do cotovelo (vide Tab. {05}).

Aparentemente todos os resultados mostram uma dispersão maior nas fronteiras do volume de trabalho. Uma hipótese a ser analisada é a influência do "software" de final de curso sobre tais pontos.

## CAPÍTULO 06

### CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O trabalho apresentado abordou desde a concepção até a realização de testes preliminares de um manipulador com três juntas revolutas, com um controle " PID de posição ", cujos sinais são obtidos através de um encoder óptico acoplado diretamente ao motor.

O trabalho foi estruturado a partir de uma visão sistêmica de robótica, que é apresentada no Capítulo 01 . Dentro deste contexto, foi feita uma análise das características principais de um manipulador no Capítulo 02 , para então, no Capítulo 03 , propor-se um modelo de manipulador que foi desenvolvido no presente trabalho, chegando-se a uma estrutura básica composta de uma base giratória e um conjunto de braço manipulador, composto de braço e ante-braço. A partir daí, no Capítulo 04 em paralelo a essa concepção os modelos cinemático e dinâmico do mesmo são apresentados.

A modelagem matemática básica permitiu a criação de um algoritmo para controlar o movimento do robô, representando a posição do conjunto do braço por pontos no espaço real. Ela permite passar da representação do espaço cartesiano para o espaço de juntas revolutas ( $\theta_i$ ).

A solução da cinemática direta permitiu obter a posição e orientação do conjunto do braço do robô, tendo como ponto de partida um sistema global de referência. A constituição de seu mecanismo é de pares cinemáticos, formados por cadeia cinemática aberta com três graus de liberdade,  $\theta_1$  ,  $\theta_2$  ,  $\theta_3$  , por movimento rotacional entre os elos adjacentes.

O controle foi desenvolvido de maneira a permitir o acionamento descentralizado de cada um dos motores, possibilitando desta forma uma futura implementação do gerenciador de tarefas, atuando assim o controle de modo hierárquico e descentralizado.

Finalizando esta visão sistêmica, alguns testes preliminares, bem como seus resultados mais relevantes são apresentados no Capítulo 05. A fase experimental permitiu que, com a implementação das posições, por meio de juntas revolutas no espaço, fossem realizados testes de repetibilidade, verificados por meio de coordenadas cartesianas.

Assim, os principais aspectos abordados nesta dissertação, foram:

- Projeto e construção de um robô manipulador tipo industrial, para fins didáticos de implementações diversas, dentro dos princípios da mecânica fina, que nortearam as especificações de projeto.
- Desenvolvimento de um modelo cinemático voltado à modelagem matemática para controle de trajetória, que permitisse passar de coordenadas revolutas ( $\theta_i$ ), para coordenadas cartesianas ( $x, y, z$ ).
- Verificação do volume de trabalho projetado com o volume de trabalho real do robô manipulador, por meio de teste de repetibilidade do sistema.

Quando das especificações de um projeto são levados em conta vários fatores no que tange ao funcionamento do protótipo idealizado, partindo-se da premissa que as condições de confecção e montagem são ideais. Neste estudo entretanto construiu-se o protótipo e não se fez a habitual interação entre as fases de concepção, desenvolvimento e construção.

Por esta razão algumas deficiências influenciaram os resultados que poderiam ter sido corrigidas. Entre elas cite-se:

- \* Falta de esticadores nas correias;
- \* Modificação estrutural nos moto-redutores;
- \* Instalação do encoder no eixo do motor;
- \* Montagem e construção em oficina não voltada à mecânica fina.

Como perspectivas para trabalhos futuros, tem-se os seguintes tópicos à serem abordados:

- Desenvolvimento de garra, para implementação dos seis graus de liberdade.
- Desenvolvimento da modelagem dinâmica completa para integração do controlador com um gerenciador de tarefas.
- Otimização do projeto, visando um novo manipulador, no qual as flexibilidades e a influência das inércias possam ser melhor compreendidas.

Embora tais deficiências são, aparentemente, de solução relativamente simples, as mesmas não foram sanadas por envolverem tempo e repetição de ensaios que não contribuiriam de modo significativo ao escopo do trabalho desenvolvido.

## BIBLIOGRAFIA

**[Amaral-83]**

P. F. S. Amaral; B. G. M. Pinto; G. Lino de Campos.  
Conceitos e Aplicações de Robôs Industriais.  
Revista Mundo Mecânico, Agosto 1983, pp 33-36, Setembro 1983, pp 15-20.

**[Amaral-86]**

P. F. S. Amaral; B. G. M. Pinto.  
Sistema de Realimentação de Posição para um Robô Industrial do Tipo Braço Articulado Acionado por Motores de Passo.  
6<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Automatica - Belo Horizonte, 1986.

**[Andeen-88]**

G. B. Andeen.  
Robot Design Handbook.  
Mc Graw-Hill Book Company - 1988.

**[Beni-85]**

G. Beni; S. Hackwood.  
Recent Advances in Robotics.  
Ed. John Willey & Sons - 1985.

**[Brady-84]**

M. Brady et alii  
Robot Motion, Planning and Control  
MIT Press, 1984

**[Camanh-86]**

R. Camanho.  
Características Gerais de Robôs Industriais.  
Revista Mundo Mecânico, Junho, Julho, Agosto, 1986.

**[Carval-86]**

J. C. M. Carvalho.  
Contribuição ao Estudo de Robôs Manipuladores.  
UFU - Univers. Federal de Uberlândia - 1986.

**[Craig-86]**

J. J. Craig.  
Introduction to Robotics Mechanics & Control.  
Ed. Addison - Wesley Publishing Company - 1986.

**[Day]**

Catálogo, Correias e Polias Sincronizadas.  
Day-Brasil

**[Denavi-55]**

J. Denavit; R. S. Hartenberg.  
A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices.  
Journal of Applied Mechanics  
June, 1955, pp. 215-221.

**[Eletro]**

Catálogo, Composição Química e Diretrizes de Tratamento Térmico.  
Eletrometal S/A - Aços Especiais

**[El Man-88]**

H. A. El Managhy; B. Johns.  
An Investigation Into the Compliance of Scara Robots.  
Part I : Analytical Model.  
Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control.  
March, 1988 - Vol 110 - pp. 18-22.  
Part II : Experimental and Numerical Validation.  
Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control  
March, 1988 - Vol 110 - pp. 23-30.

**[Fag-85]**

Catálogo, 41510-SA - Programa Standard FAG - 1985.

**[Ferreir-86]**

E. P. Ferreira.  
Um Novo Método para a Identificação de Parâmetros dos Tensores de Inércia de Robôs Manipuladores.  
6<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Automatica - Belo Horizonte, 1986.

**[Fu-87]**

K.S. Fu; R.C. Gonzalez; C.S.G. Lee.  
Robotics-Control, Sensing, Vision and Intelligence.  
Mc Graw-Hill Book Company - 1987.

**[Garras]**

Garras e Ferramentas para a Versatilização dos Robôs Industriais.  
Revista Mundo Mecânico - Dezembro, 1982/Janeiro, 1983.

**[Gevart-85]**

W. B. Gervarter.  
Intelligent Machines  
Ed. Prentice-Hall, Inc. - 1985.

**[Golden-89]**

A.A. Goldenberg; J.A. Apkarian; H. W. Smith.  
An Approach to Adaptative Control of Robot Manipulators Using the Computed Torque Technique.  
Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control  
March, 1989 - Vol. 111 - pp. 01-08.

**[Gonzal-85]**

R. A. Gonzalez; J. M. A. Usategui.  
Curso de Robótica  
Ed. Paraninfo - 1985.

**[Gorla-87]**

B. Gorla; M. Renaud.  
Modèles des Robots Manipulateurs Application à Leur Commande.  
Ed. Cepadues-Éditions - 1987.

**[Hearn-85]**

A. C. Hearn.  
Software Reduce - User's Manual  
Abril, 1985 - Res. 4/85.

**[Hemami-91]**

H. Hemami.

A Measurement Oriented Formulation of the Dynamics of Natural and Robotic Systems.

Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control.

September, 1991 - Vol. 113 - pp. 401-408.

**[ISO]**

Normas ISO 9000 / NBR 19000

ABNT - Junho/1990.

**[Kafris-84]**

E. Kafrissen.

Industrial Robots and Robotics.

Reston Publishing Company, Inc. - 1984.

**[Kao-87]**

C.K.Kao; A. Sinha; A. K. Mahalanabis.

A Digital Algorithm for Near-Minimum - Time Control of Robot Manipulators.

Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control

December, 1987 - Vol. 109 - pp. 320-327.

**[Kreuze-86]**

E. Kreuzer; A. Truckenbrodt.

Dynamics and Control of Industrial Robots

Apostila - FDTE-EPUSP, 1986.

**[Leu-86]**

M. C. Leu; N.Hemati.

Automated Symbolic Derivation of Dynamic Equations of Motion for Robot Manipulators.

Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control

September, 1986 - Vol. 108 - pp. 172-179.

**[Luh-81]**

J.Y.S. Luh; C. S. Lin.

Optimum Path Planning for Mechanical Manipulators.

Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control

June, 1981 - Vol. 102 - pp. 142-151.

**[Maidan-84]**

J. Maidantchik Jr.; A. Adade Fo.

Simulação e Controle de Manipuladores I .

ITA - CTA - Div. Eng/ria. Mecânica-Aeronáutica - 1984.

**[Maidan-85]**

J. Maidantchik Jr.; A. Adade Fo.

Simulação e Controle de Manipuladores II .

ITA - CTA - Div. Eng/ria. Mecânica-Aeronáutica - 1984.

**[Mendel-89]**

A. Mendeleck, D. E. Zampieri.

Software para Equacionamento Cinemático e Dinâmico Símbolico de Robôs Manipuladores.

Anais - Cobem - Dezembro - 1989 .

**[Mendel-90]**

A. Mendeleck, D. E. Zampieri.  
Desenvolvimento de um Controle Supervisor para um Manipulador Antropomórfico com 6 Graus de Liberdade.  
Anais - 1<sup>o</sup> SAI - 1990.

**[Mendel-91]**

A Mendeleck.  
Uma Linguagem para Programação OFF-LINE de Robôs.  
Unicamp - F.E.M. - 1991 .

**[Molina-91]**

L. F. R. Molinaro.  
Sistema de Auxílio ao Ensino de Técnicas de Modelagem e Planejamento Fora-de-Linha de Robôs.  
E.P.U.S.P. - 1991 .

**[Nakamu-86]**

Y. Nakamura; H. Hanafusa.  
Inverse Kinematic Solutions With Singularity Robustness for Robot Manipulation Control.  
Journal Of Dynamic Systems, Measurement, and Control  
September, 1986 - Vol. 108 - pp. 163-171.

**[Narikiyo-91]**

T. Narikiyo; R. Izumi.  
On Model Feedback Control for Robot Manipulators.  
Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control  
September, 1991 - Vol. 113 - pp. 371-378.

**[N-Nagy-86]**

F. N-Nagy; A. Siegler.  
Engineering Foundations of Robotics.  
Ed. Prentice-Hall International.

**[Padua-86]**

R. C. T. Padua; R. Allen.  
Sensors in Robotics: Review and Applications.  
6<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Automática - Belo Horizonte, 1986.

**[Paul-83]**

R. P. Paul .  
Robot Manipulators, Mathematics, Programming and Control of Robot Manipulators.  
Ed. Mit Press - 1983 .

**[Puma]**

Unimate "Puma Mark II - 500" .  
(Catálogo de Características Técnica).

**[Raibert-81]**

M. H. Raibert; J. J. Craig .  
Hybrid Position/Force Control of Manipulators.  
Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control.  
June, 1981 - Vol. 102 - pp. 126-133.

**[Read-87]**

W.E.Read; H.V. Truong-Cao; K. H. Kim .  
Robot Path Planning in Tree-Dimensions Using the Direct Subspace.  
Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control  
September, 1987 - Vol. 109 - pp. 238-244.

**[Rhino]**

Rhino Robots, Inc.  
(Catálogos Técnicos de Robô).

**[Rosári-87]**

J. M. Rosário .  
Programation D'un Robot Manipulateur " AID - V5 - EN " .  
Apostila.

**[Santo-87]**

J. L. C. F. Santo; S. H.S.Carneiro; L. A.M. Filho  
Análise Cinemática e Dinâmica de um Manipulador de Seis Graus de Liberdade.  
ITA - CTA - Div. Eng/ria Mecânica - Aeronautica, 1987 .

**[Sarama-92]**

M. A. P. Saramago  
Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de Calibração e Medida de Precisão  
para Robôs Industriais.  
Unicamp/FEM - 1992.

**[Shoham-87]**

M. Shoham ; Y. Koren .  
Motion Control Algorithms for Sensor-Equipped Robots .  
Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control  
December, 1987 - Vol. 109 - pp. 335-344.

**[S.K.F.-92]**

Catálogo Geral - 3000 PB -  
Fevereiro, 1992 .

**[Spong-89]**

M.W. Spong ; M. Vidysagar .  
Robot Dynamics and Control .  
Ed. John Wiley & Sons - 1989 .

**[Takega-81]**

M.Takegaki ; S. Arimoto .  
A New Feedback Method for Dynamic Control of Manipulator .  
Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control .  
June, 1981 - Vol. 102 - pp. 119-125.

**[Totani-81]**

T. Totani ; S. Miyakawa .  
A Mathematical Model of Hand Transfer Motion for Application to Manipulator  
Control .  
Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control  
June, 1981 - Vol. 102 - pp. 151-157.

**[Vieira-86]**

A.L.Vieira; J.B.M.Alves; K.Takita; A.G.B. Palhares .  
O Efeito do Controle de Velocidade das Juntas no Desempenho da Geração da Trajetória em um Braço Mecânico.  
6<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Automática - Belo Horizonte, 1986 .

**[Wampler-88]**

C.W.Wampler,II ; L.J. Leifer .  
Applications of Damped Least-Squares Methods to Resolved-Rate and Resolved-Acceleration Control of Manipulators.  
Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control  
March, 1988 - Vol. 110 - pp. 31-38.

**[Wander-88]**

G. Wander.  
Determinação dos Parâmetros Físicos e Geométricos de um Manipulador Visando a Implementação Numérica de seu Modelo Dinâmico.  
TG-FEM, 1988.

**[Wang-88]**

L.T.Wang ; B. Ravani .  
Dynamic Load Carrying Capacity of Mechanical Manipulators.  
Part I : Problem Formulation .  
Part II : Computational Procedure and Applications.  
Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control  
March, 1988 - Vol. 110 - pp. 46-61.

**[Watana-86]**

T.Watanabe; M.Kometani; K.Kawata; K.Tetsuya .  
Improvement in the Computing Time of Robot Manipulators Using a Multimicroprocessor.  
Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control  
September, 1986 - Vol. 108 - pp. 190-197.

**[Westph-84]**

Marcos A.L.Westphalen; Francisco a.Abranches Pinheiro.  
Anteprojeto de um Manipulador de Cinco Graus de Liberdade .  
ITA - CTA - Div. Eng/ria. Mecânica-Aeronáutica, 1984 .

**[Zampie-89]**

D.E.Zampieri; M.A.P.Saramago .  
Acionamento Elétrico para Robôs.  
Unicamp/FEM - Junho, 1989 - Apostila .

APÊNDICE I

FORMA CONSTRUTIVA DO ROBÔ MANIPULADOR - JOPOC 8808

## APÊNDICE I

### FORMA CONSTRUTIVA DO ROBÔ MANIPULADOR - JOPOC 8808

#### Apresentação :

Este apêndice complementa o " Capítulo 03 " com maior definição dos detalhes técnicos utilizados na concepção e fabricação do manipulador.

Conforme já mencionado anteriormente, as características principais do mesmo são de possuir uma estrutura robusta e precisão mecânica no que refere-se aos ajustes de suas juntas.

Outra característica, é de que sua estrutura permite visualizar os mecanismos de movimentos utilizados, bem como, as soluções construtivas de suas juntas. Faz-se notar ainda, que a precisão dos ajustes obedecem o padrão ISO .

## 01 BASE GIRATÓRIA , forma construtiva :

Esta é de configuração bastante simples, possui um grau de liberdade rotacional de 270 graus.

A precisão dos ajustes mecânicos entre os componentes fixos e móveis foram calibrados. Toda união é fixa por meio de parafusos, e alinhada por pino de guia de aço-liga, tratado e retificado, com tolerância ISO H<sub>7</sub> e m<sup>6</sup> para travamento do conjunto quanto a possíveis rotações originárias da folga proveniente da montagem efetuada por meio de parafusos e outros. Isto permite que a referência de montagem seja obedecida , mantendo-se o ponto referencial da coordenada quando de sua fabricação [Eletro].

A base giratória do robô, pode ser observada nas FOTOS 108! e 109! , enquanto que nas FOTOS 110! , 111! à 114! ,115! e 116! estão os principais itens que a compõem. No Apêndice II , encontra-se o desenho 88061600, conjunto da base do robô e a lista de material .

A coluna da base, item (15), FOTO 116!, encontra-se montada sobre a base, item (02), por meio de parafusos de cabeça cilíndrica e pinos de guia.

Sobre a coluna da base encontra-se montada a mesa fixa inferior, item (05) FOTOS 111! e 112! , por meio de ajustes de precisão, parafusos e pinos de guia, FOTO 117! . Sobre a mesa fixa inferior encontra-se montado o sistema rotacional da base do robô , por meio de rolamentos de rolos cônicos e auto-compensadores de rolos. Estes rolamentos são de classe P4 quanto à precisão mecânica. O princípio de construção da base giratória do robô está fundamentada na forma construtiva de mesa rotativa de retificação plana do tipo "Blanchar".

Sobre o rolamento de rolos cônicos está a mesa giratória superior, item (07) FOTOS 113! e 114! , sobre a qual será montado o conjunto do braço do robô. A montagem da base giratória sobre o rolamento cônico, permite o movimento de rotação com a maior suavidade, visto que a pista do rolamento é em ângulo, permitindo desta forma que haja movimento de translação quando a mesma estiver em rotação. O sistema de rotação da base giratória se completa com o eixo principal, item (11) FOTO 110! , acoplado ao rolamento auto-compensador de rolos com bucha cônica de ajuste, (trava limitadora de curso longitudinal do eixo do motor ou movido), não permitindo outro grau de liberdade ao sistema que não seja o de rotação; moldando-se desta forma perfeitamente ao eixo principal.

O movimento rotacional da base giratória do robô, é proveniente do movimento transmitido do moto-redutor de corrente contínua, por meio de correia trapezoidal e polias sincronizadoras, ao eixo principal da mesma.

Rolamentos de rolos cônicos possuem a linha de ação da resultante da carga formando um ângulo com o eixo do rolamento, razão pela qual estes rolamentos são adequados, particularmente, para suportar cargas combinadas (radiais e axiais).

Este tipo de rolamento, é separável, ou seja, o anel externo (capa) e o anel interno com gaiola e rolos (cone) podem ser montados isoladamente.

Os rolamentos de rolos cônicos são, projetados com o contato linear corrigido entre os rolos e as pistas, evitando-se assim os efeitos prejudiciais das cargas de contato nas extremidades. Esta característica, aliada ao grande número de rolos, faz com que estes rolamentos possuam uma alta capacidade de carga.

O rolamento da série " 320 X ", possui altura de seção reduzida e alta capacidade de carga, que permite conseguir arranjos bastante compactos. São fabricados com tolerâncias especialmente reduzidas na largura total " T " (largura esta entre faces).

Os rolamentos auto-compensadores de rolos possuem duas carreiras de rolos as quais operam sobre uma pista esférica comum no anel externo; cada uma das duas pistas do anel interno possuindo uma inclinação, formando um ângulo com o eixo do rolamento. Estes são auto-alinhantes e permitem pequenos deslocamentos angulares do eixo em relação à caixa, como os que podem ocorrer na montagem de caixas independentes ou pela flexão do eixo sob carga.

Os rolos simétricos, relativamente longos e de grande diâmetro, fazem com que os rolamentos tenham alta capacidade de carga, razão pela qual são especialmente adequados para aplicações em que atuam as cargas mais intensas. Os rolos são guiados pela própria gaiola e por um anel, solto entre as duas carreiras, centrado no anel interno e que pode auto-alinhar-se quando em funcionamento. A disposição angular dos rolos em relação ao eixo do rolamento permite aplicar também cargas em ambos os sentidos, além das cargas radiais.

O rolamento auto-compensador utilizado neste eixo, tem furo cônico com bucha de fixação. Estas buchas proporcionam uma forma simples de montagem sobre eixos cilíndricos.

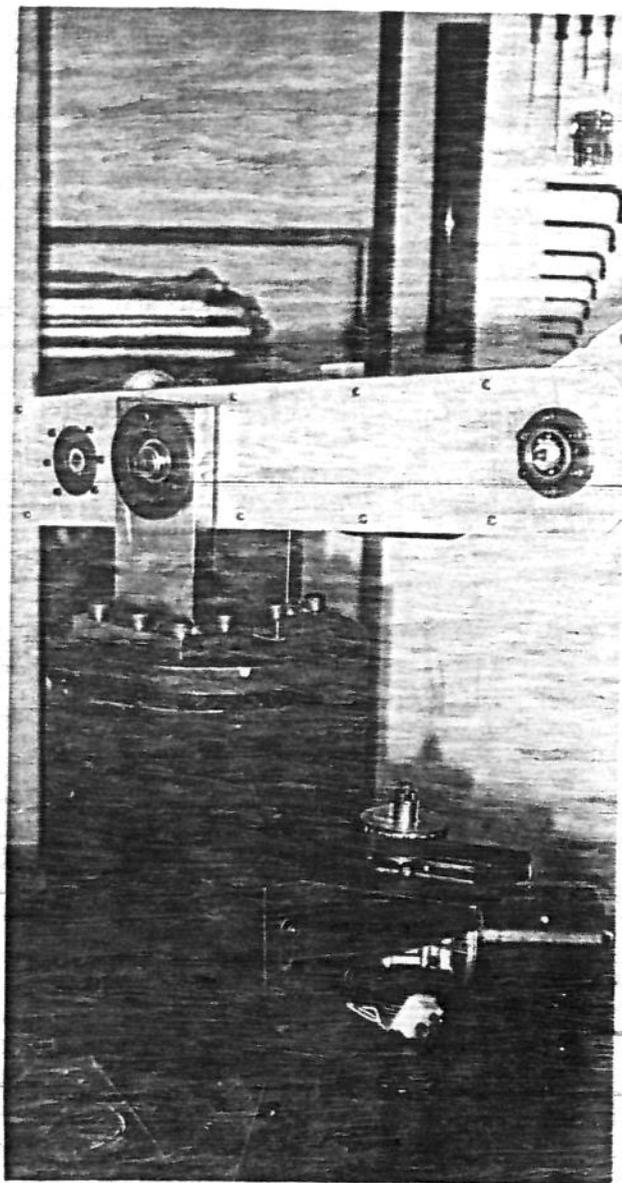


FOTO 108! Base giratória com motor.

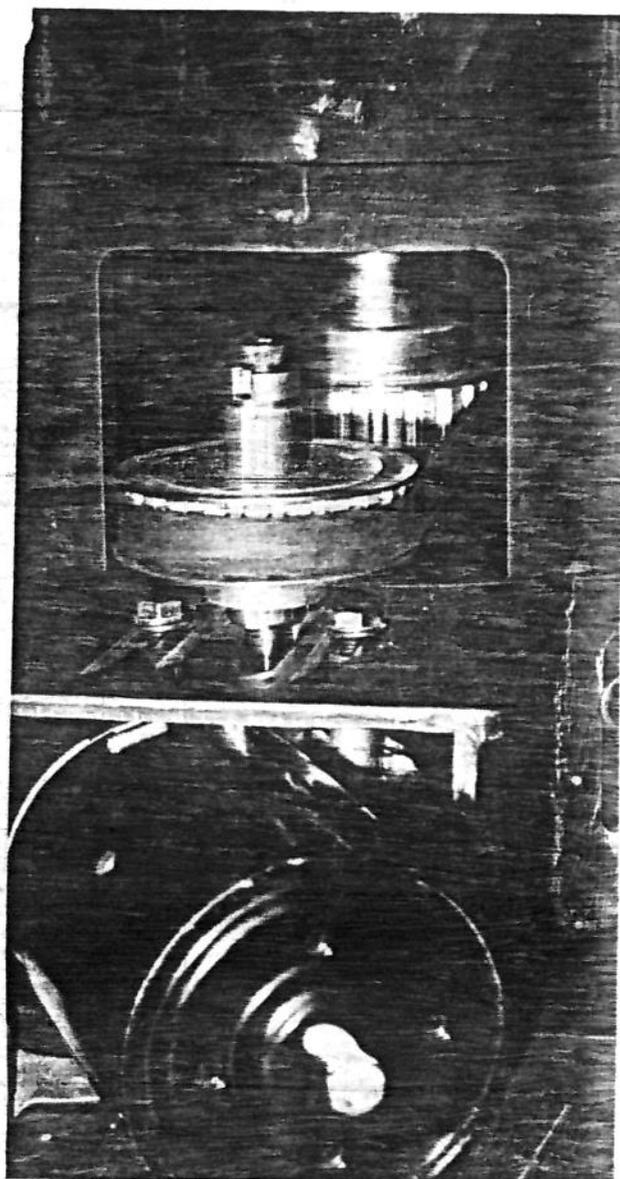


FOTO 109! Transmissão de movimento de rotação.

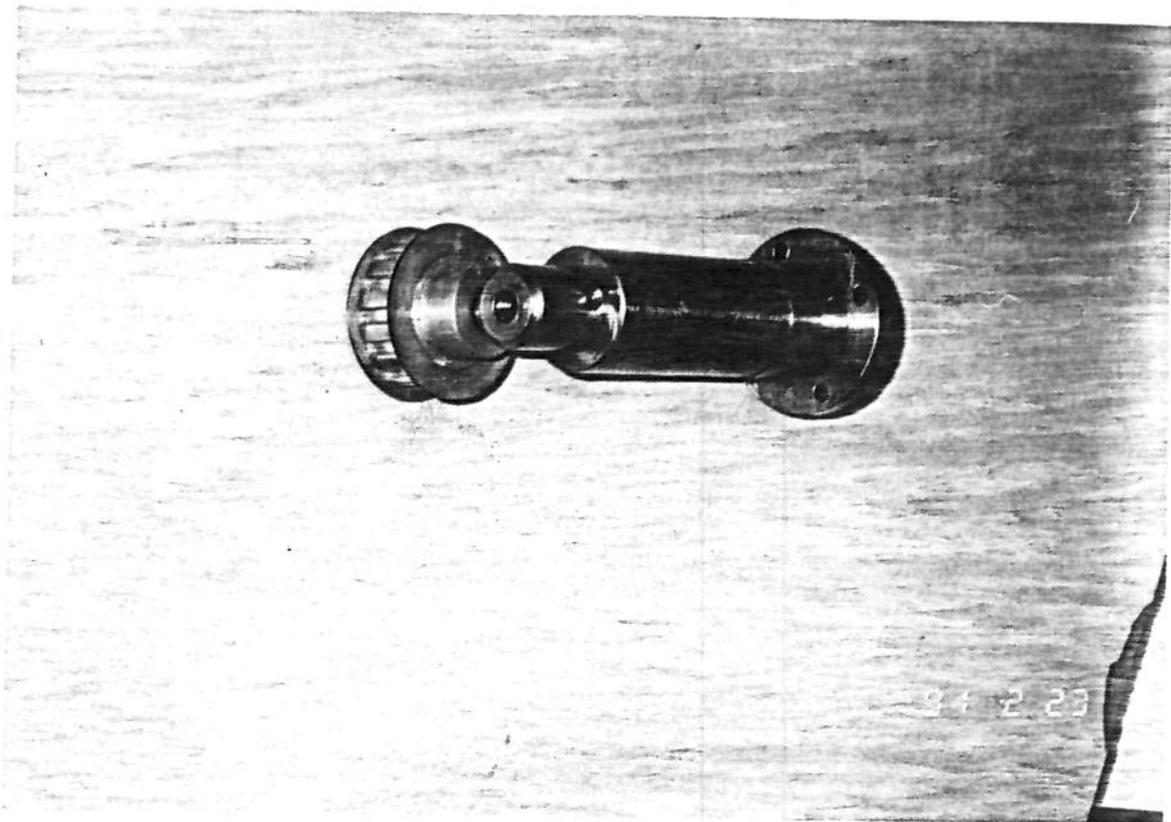


FOTO 110! Eixo de acionamento da base e polia sincronizada do eixo.

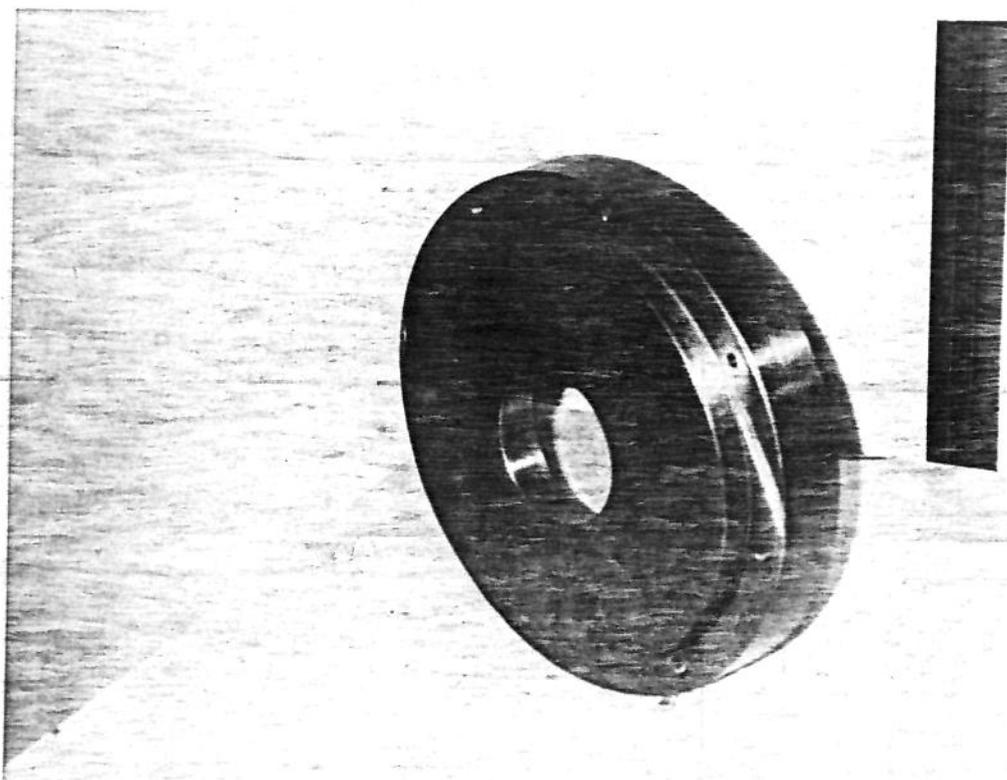


FOTO 111! Mesa fixa inferior da base,(parte inferior),(Des. 88070203).

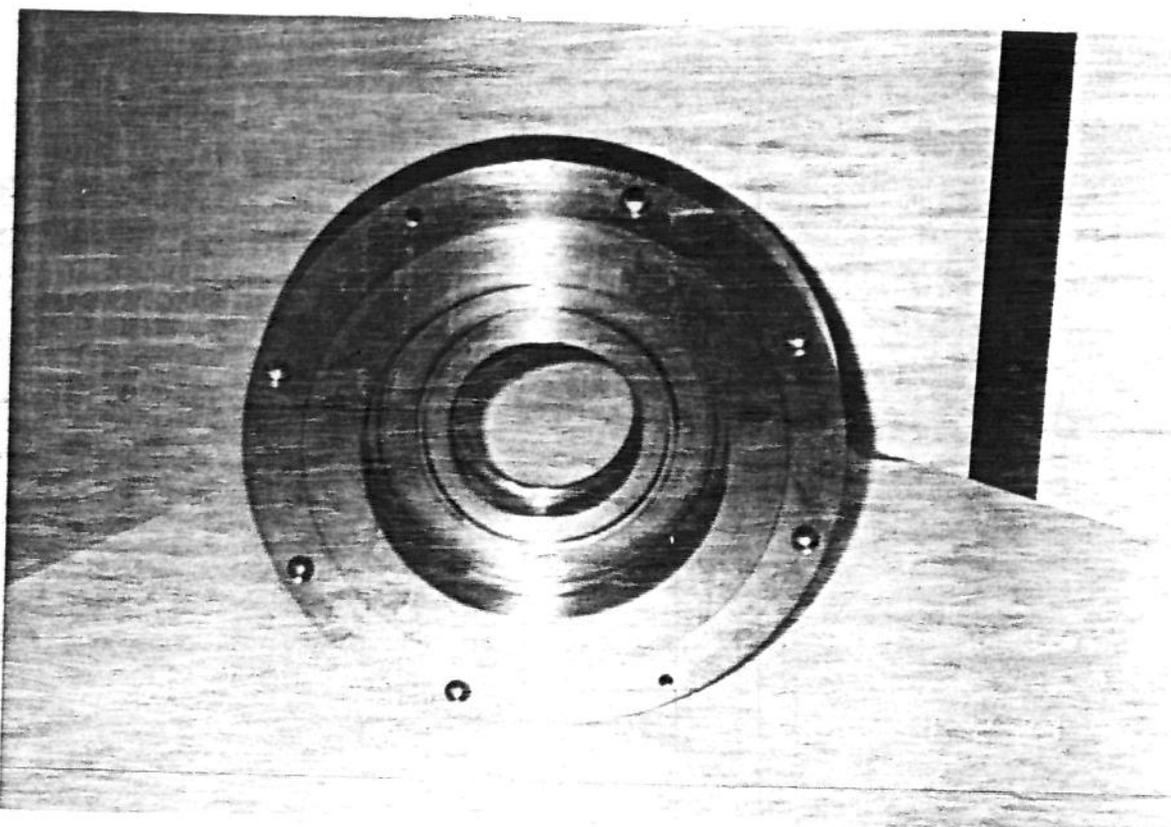


FOTO 112! Mesa fixa inferior da base, (parte superior),(Des. 88070203).

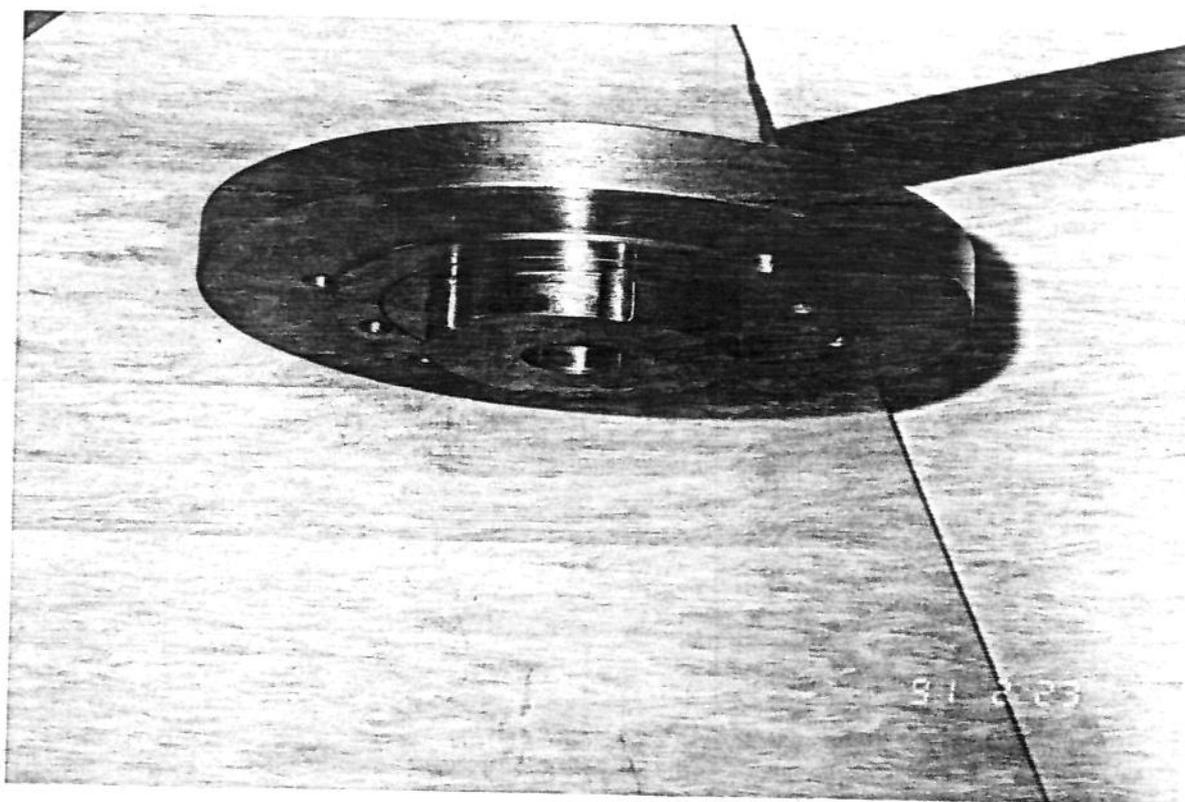


FOTO 113! Mesa giratória superior da base, (parte inferior), (Des. 88070201).

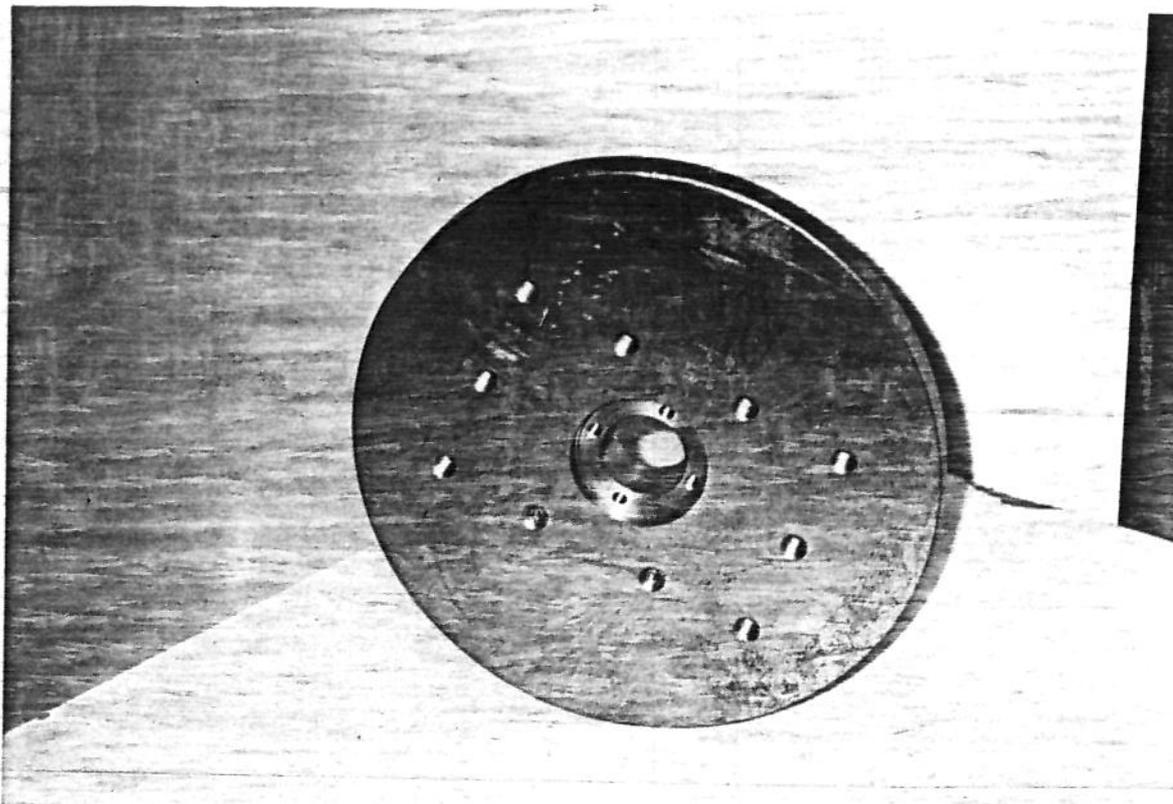


FOTO 114! Mesa giratória superior da base, (parte superior), (Des.88070201 ).

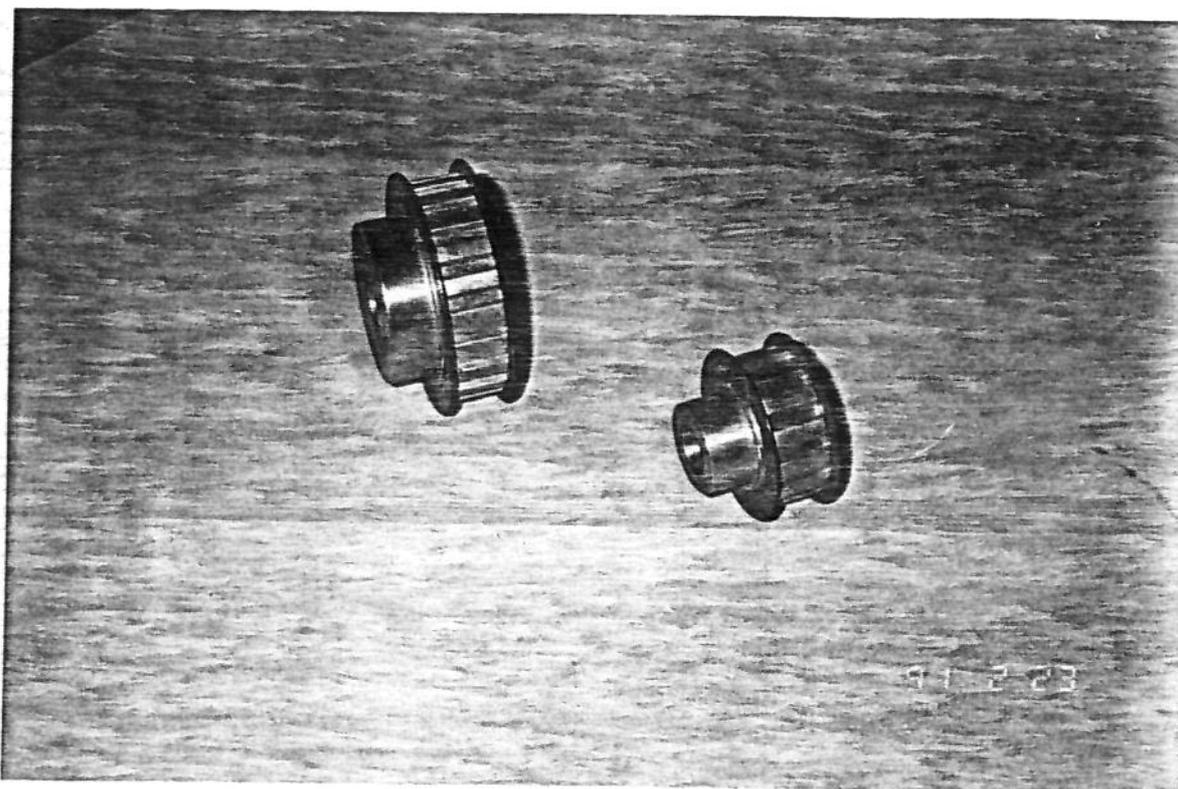


FOTO 115! Polias sincronizadas .

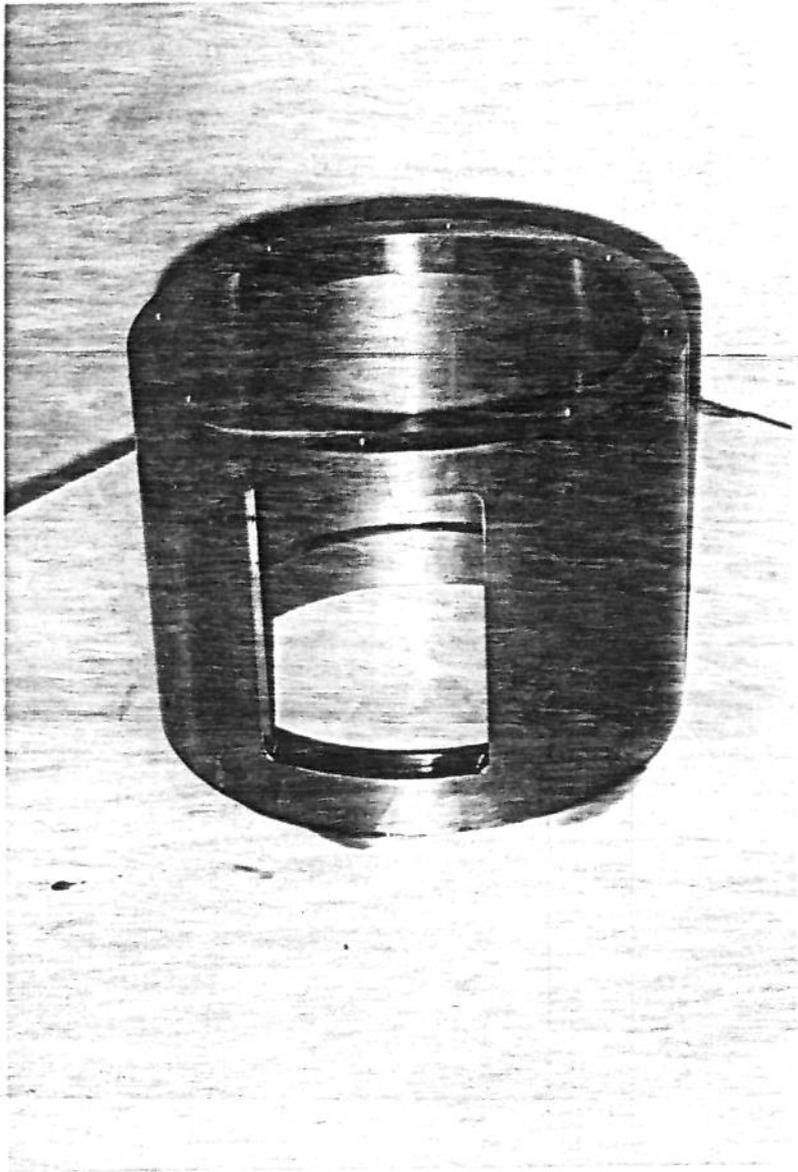


FOTO 1161 Coluna da base giratória, (Des. 88070205) .

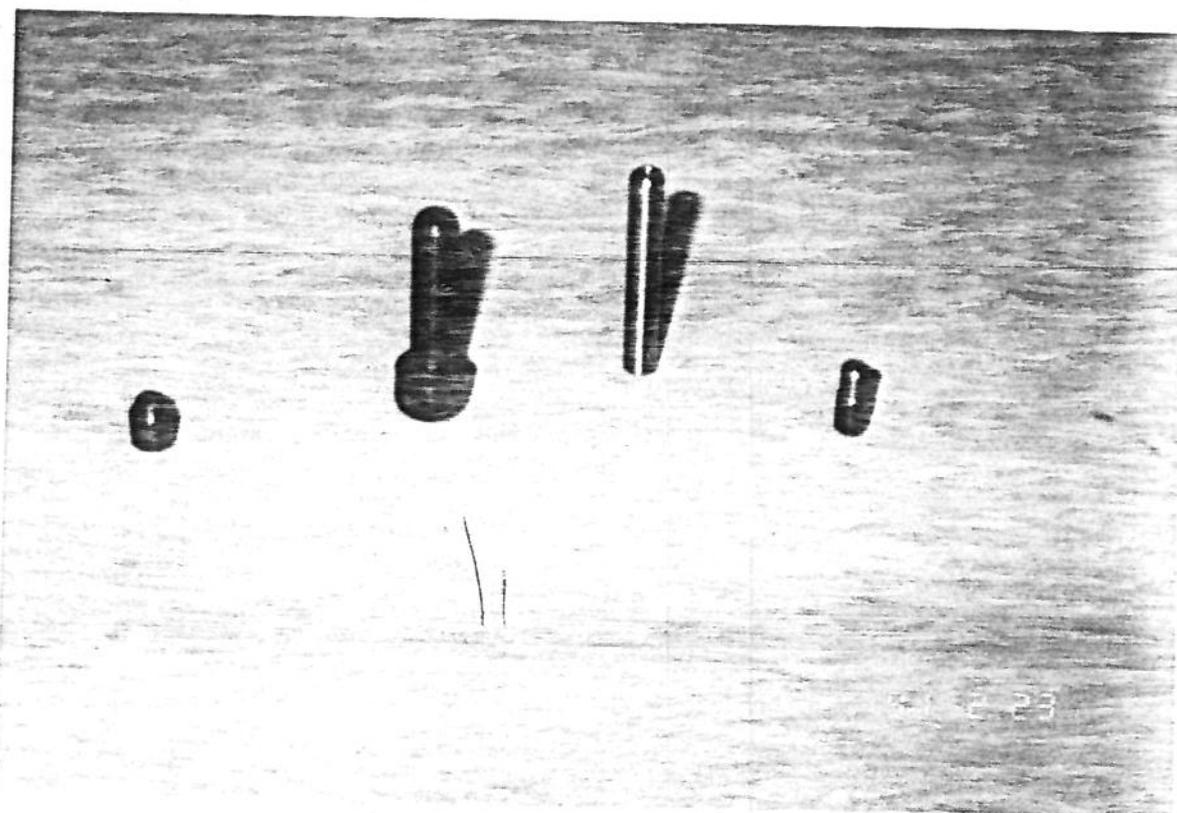


FOTO 1171 Parafusos comerciais e especiais e pino de guia .

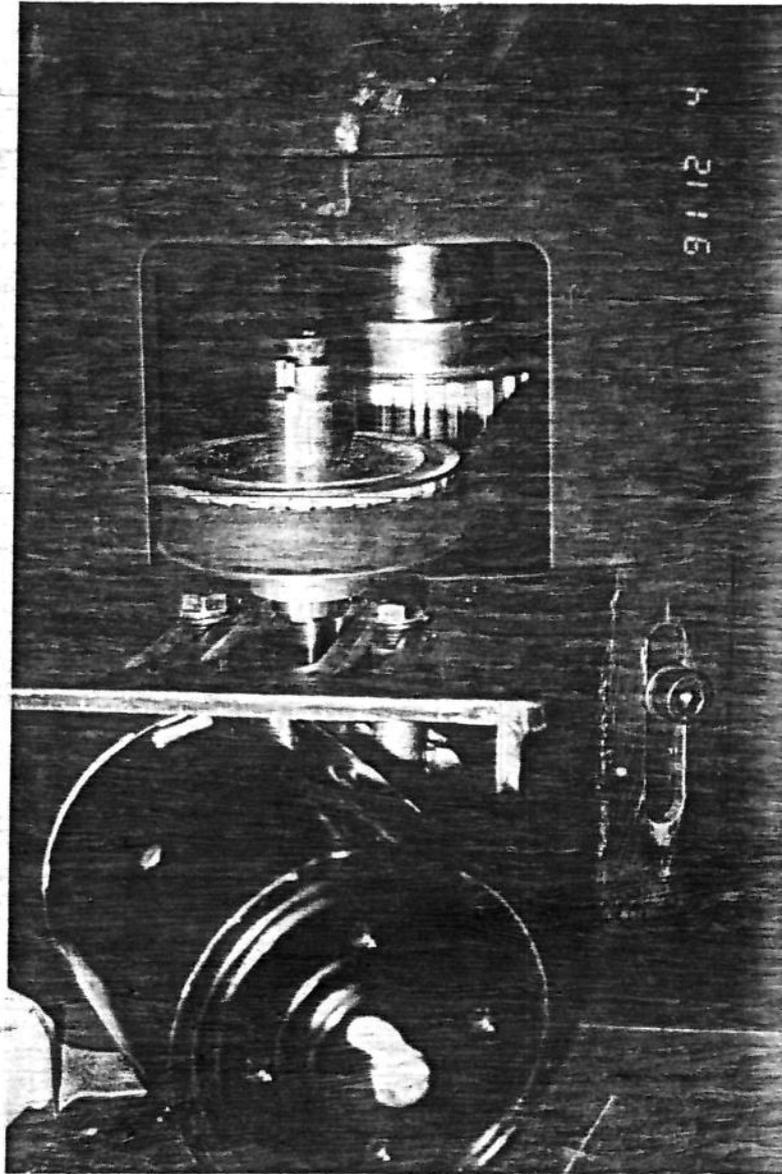


FOTO 118! Motor de acionamento do giro da base .

## 02 CONJUNTO DO BRAÇO , (forma construtiva) :

O conjunto do braço do robô é composto de duas juntas que movimentam o braço e antebraço.

Como descrito no " Capítulo 03 ", a geometria do mesmo é de perfil tubular retangular, constituído por dois perfis tipo " U " em liga de alumínio estrutural e paralelas entre si.

O desenho 88081900, corte A - A , vide Apêndice II, demonstra que as longarinas do braço, itens (09) e (15), encontram-se fixadas à flange de fixação, item (44) , por meio de parafusos e pino de guia. O apoio do braço sobre o eixo, item (14) , bem como, a fixação das longarinas se faz por meio do cubo do eixo do motor, item (12) , com parafusos e pinos de guia, e está ao eixo por meio de chaveta.

O perfil em forma de " U " das longarinas e o posicionamento das barras espaçadoras, dão rigidez ao perfil do braço, evitando desta forma a deformação do conjunto por momentos de torção e cisalhamento quando em movimento.

O moto-redutor de acionamento do braço é acoplado diretamente sobre o eixo, evitando desta forma possíveis interferências de defeitos originários da transmissão.

O moto-redutor de acionamento do ante-braço. encontra-se fixado na parte de trás do braço. Esta localização tem duas funções:

- A primeira é de produzir movimento ao ante-braço, deslocado da junta, por meio de transmissão.
- A segunda é de atuar como contra peso do conjunto do braço, proporcionando equilíbrio ao conjunto.

No detalhe " visto por A " , desenho 88081900 Fol 3/6 , mostra-se todo o sistema de fixação do moto-redutor acoplado direto ao eixo de transmissão, bem como, todo o sistema de transmissão de movimento o antebraço.

No detalhe " A " , desenho 88081099 encontram-se a junta de interligação do braço ao antebraço, bem como, a correia trapezoidal e a polia sincronizadora responsáveis pela transmissão do movimento do motor ao ante-braço.

Para a redução de peso, todas as peças, exceto eixos e caixas de rolamentos, foram fabricadas em liga de alumínio.

Para as juntas do braço e ante-braço, foram utilizados rolamentos do tipo de esferas de contato angular, com pares conjugados.

Nos rolamentos de esferas de contato angular, a linha de ação de carga, nos contatos entre as esferas e as pistas, forma um ângulo com o eixo do rolamento. As pistas dos anéis interno e externo são axialmente deslocados entre si, e os rolamentos podem suportar cargas combinadas (radiais e axiais). Neste caso utilizou-se o rolamento de uma carreira de esferas, de construção não separável, pois ele é adequado tanto para baixas como para altas rotações.

Como uma carga radial aplicada sobre o rolamento dá origem a uma carga axial induzida que deve ser anulada, montou-se o rolamento de modo a que pudesse ser ajustado contra um segundo rolamento.

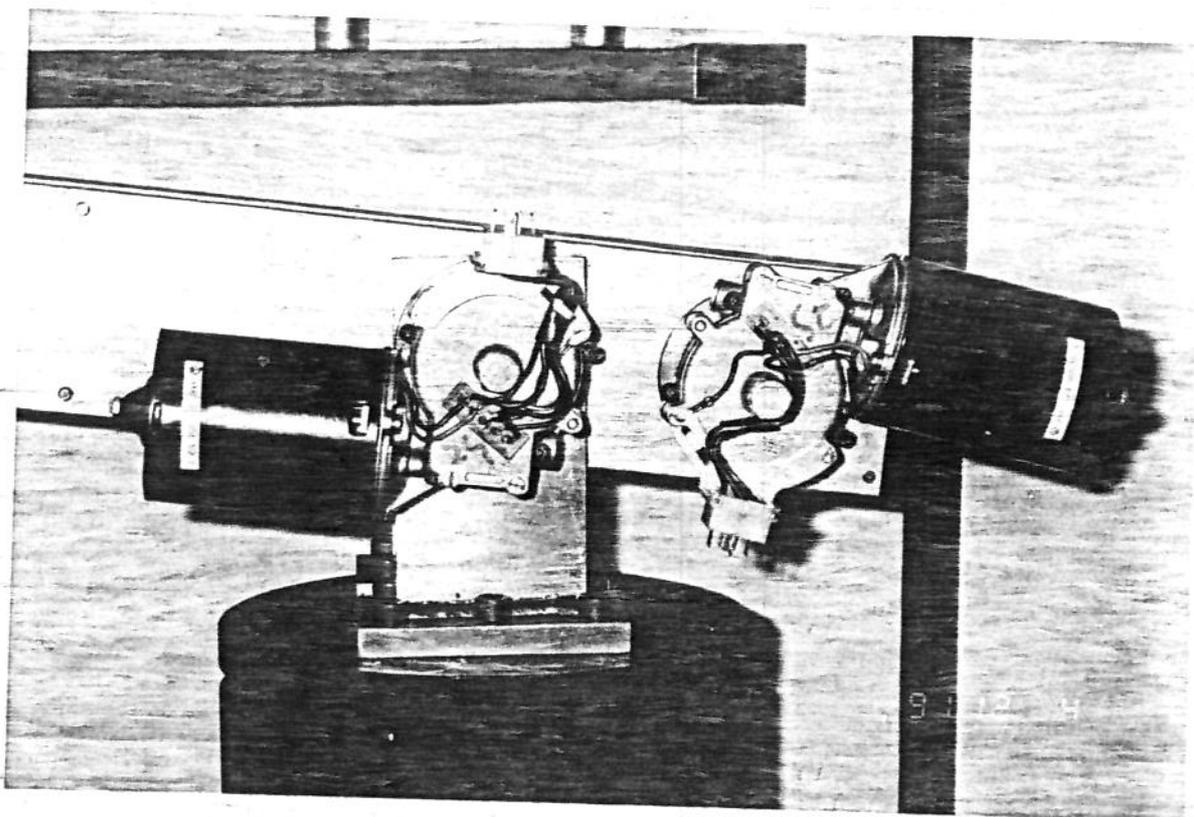


FOTO 1191 Braço do robô com os moto-redutores de c.c. .

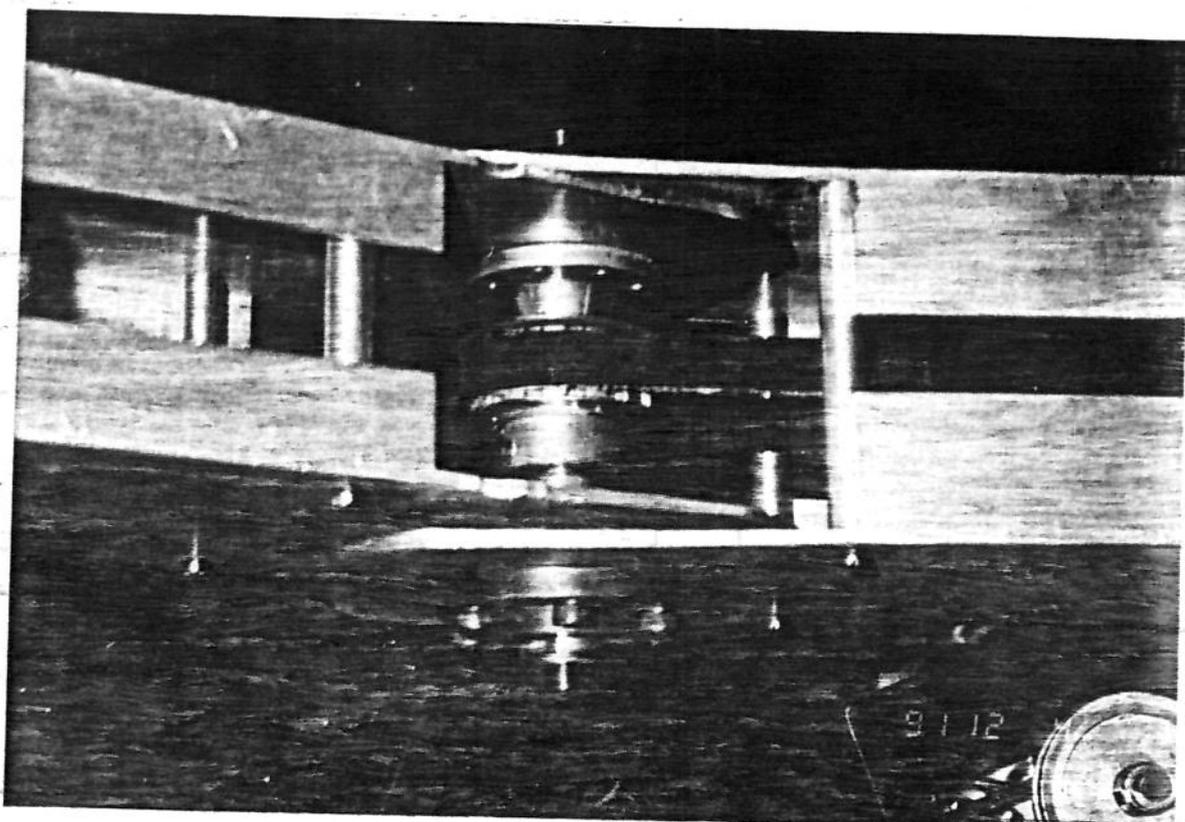


FOTO 120! Articulação e transmissão de movimentos do braço e antebraço.

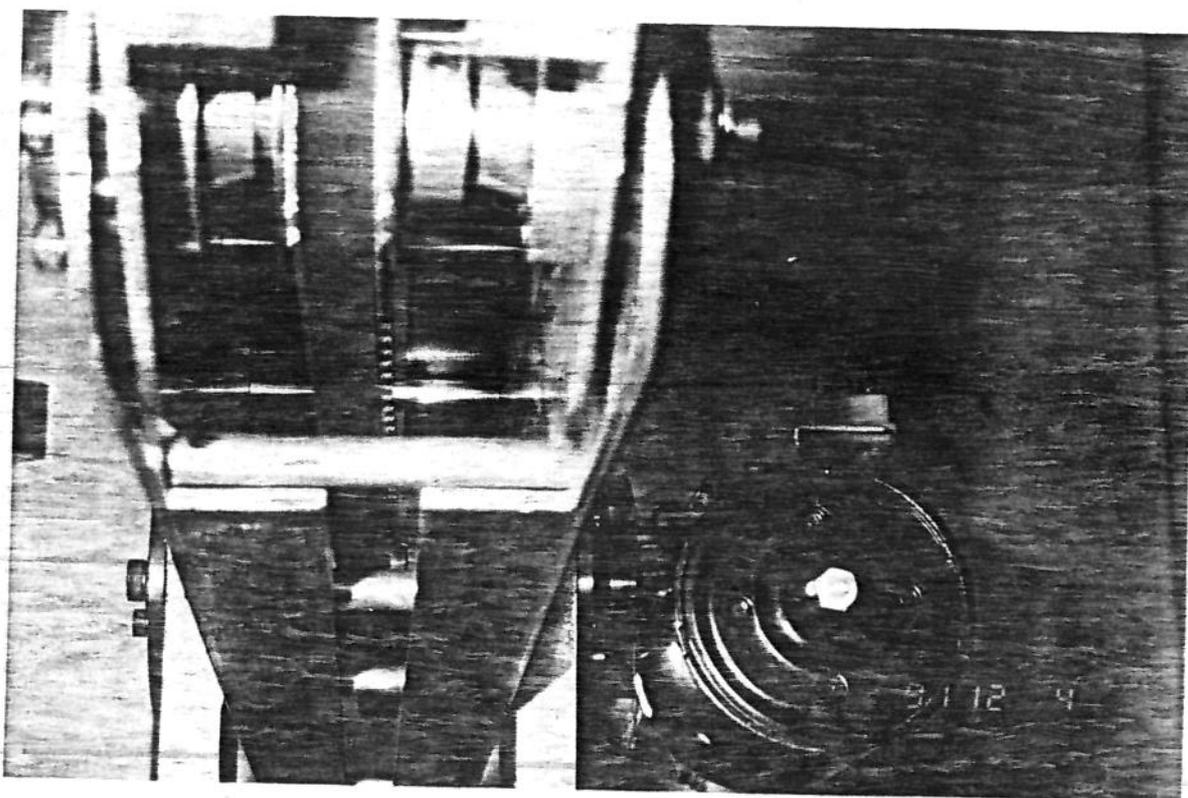


FOTO 121! Articulação e transmissão de movimento do braço e antebraço, de baixo para cima .

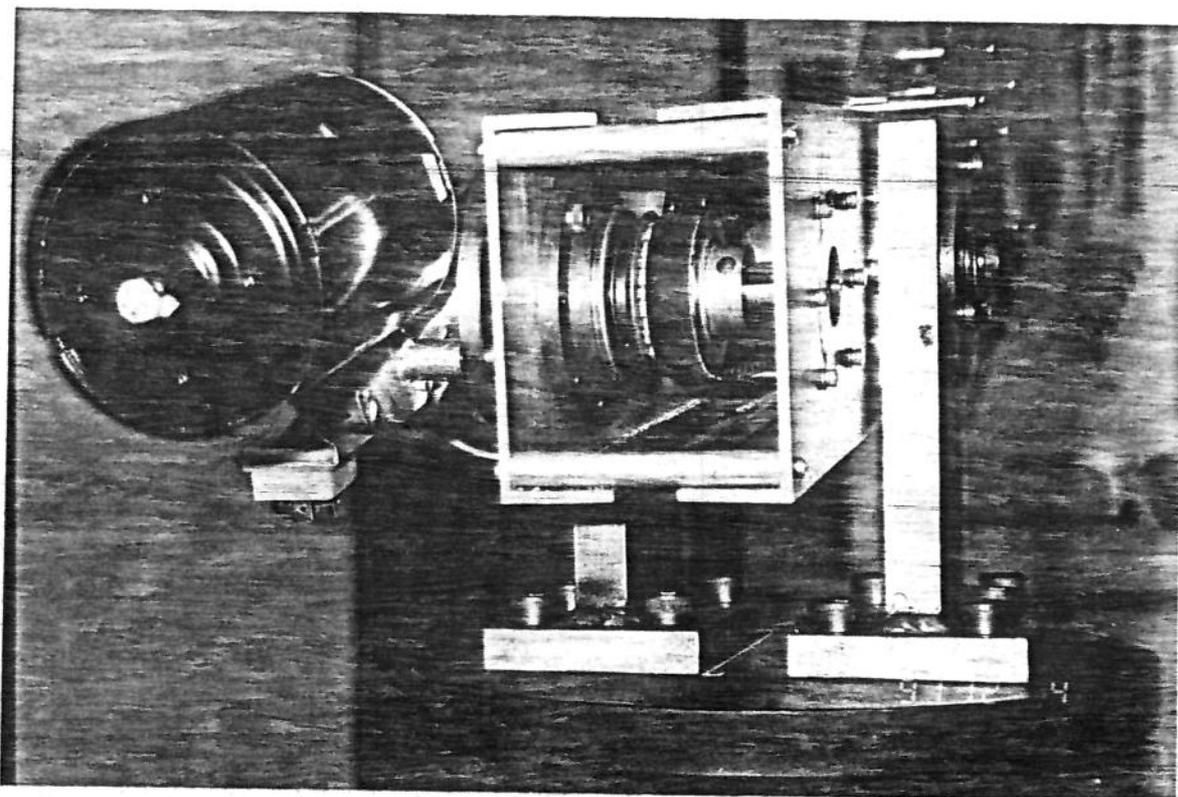


FOTO 1221 Transmissão de movimento ao antebraço .

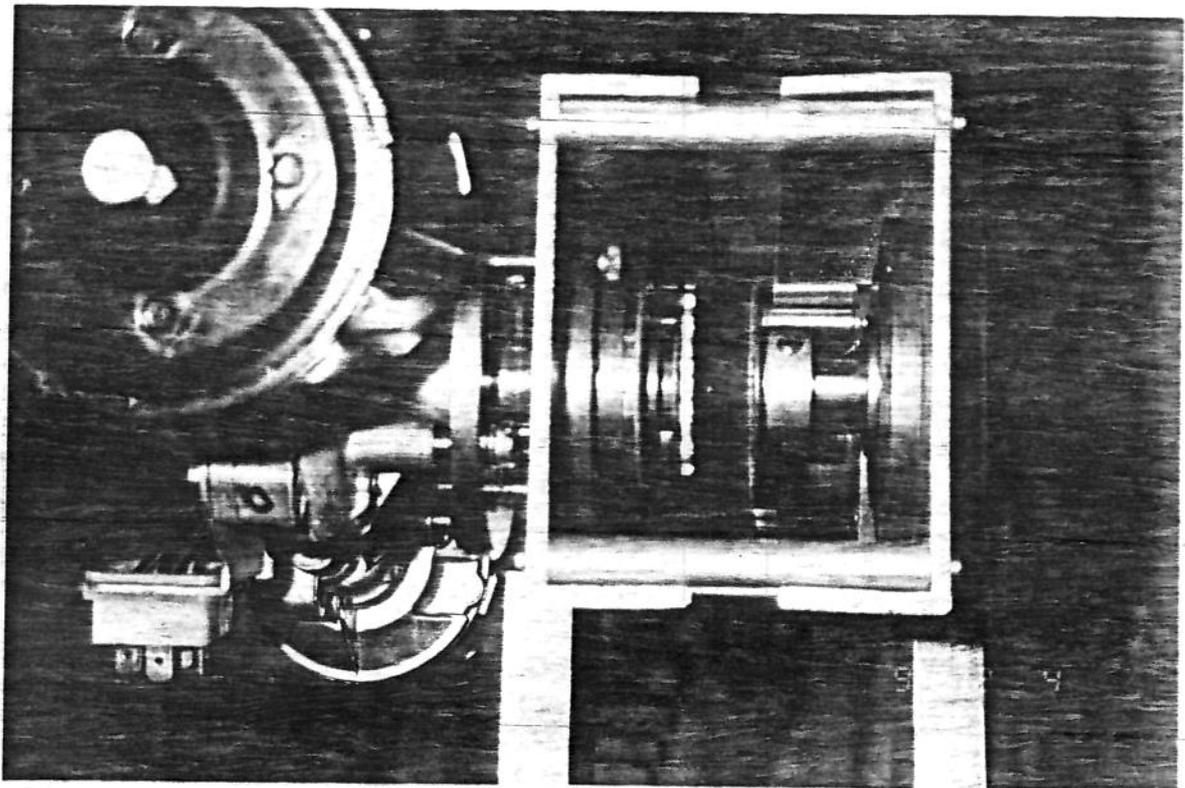


FOTO 123! Moto-reductor com acoplamento e transmissão de movimento ao antebraço.

Para a transmissão de movimentos foram adotadas correias e polias sincronizadoras, já que tais acionamentos são um moderno e eficaz sistema de transmissão de movimentos. Apresentam significativas vantagens sobre o sistema de engrenagens, correntes e até mesmo, sobre aqueles que utilizam correias em " V ". Atuam numa ampla faixa de velocidades, possuem precisão e resistência, são isentos de trepidação e ruídos e proporcionam uma considerável economia de energia e manutenção. As correias e polias com dentes trapezoidais combinam economia, eficiência e precisão [Day].

Para um perfeito funcionamento do sistema de transmissão, as correias sincronizadoras são constituídas de :

- Dentes de neoprene, que asseguram perfeito sincronismo,
- Elementos de tração confeccionados com cordões espirais, que eliminam o perigo de ruptura ou alongamento,
- Revestimento de nylon na parte externa dos dentes, para permitir baixo coeficiente de atrito e, por conseguinte, mínimo desgaste,
- Revestimento externo em neoprene, para proteger os elementos de tração da unidade, óleos e do efeito corrosivo de outros elementos químicos.

As polias sincronizadoras são produzidas em liga de alumínio, seguindo com rigor as exigências das normas, de forma a assegurar o perfeito sincronismo do conjunto.

### 03 CONTROLADOR (Controle Hierárquico):

Cada conjunto composto de " CPU + Software ", denomina-se " unidade ". Todas as " unidades " devem possuir os núcleos de " hardware " idênticos, porém possuir " software " aplicativos diferentes. Cada "unidade" pode operar, transmitindo informações, controlando, atuando e monitorando o sistema. Aplicado a um robô, cada junta possui uma " unidade " atuando e monitorando através de um programa apropriado as necessidades locais. Outra " unidade " idêntica em " hardware " concentra e distribui informações de unidades de nível lógico inferior. A "unidade raiz" concentra todas as informações do sistema, e comunica-se com um micro computador, tipo IBM - PC, que realiza a supervisão geral do sistema. Toda a comunicação que define a hierarquia do sistema é realizada por meio de canais seriais.

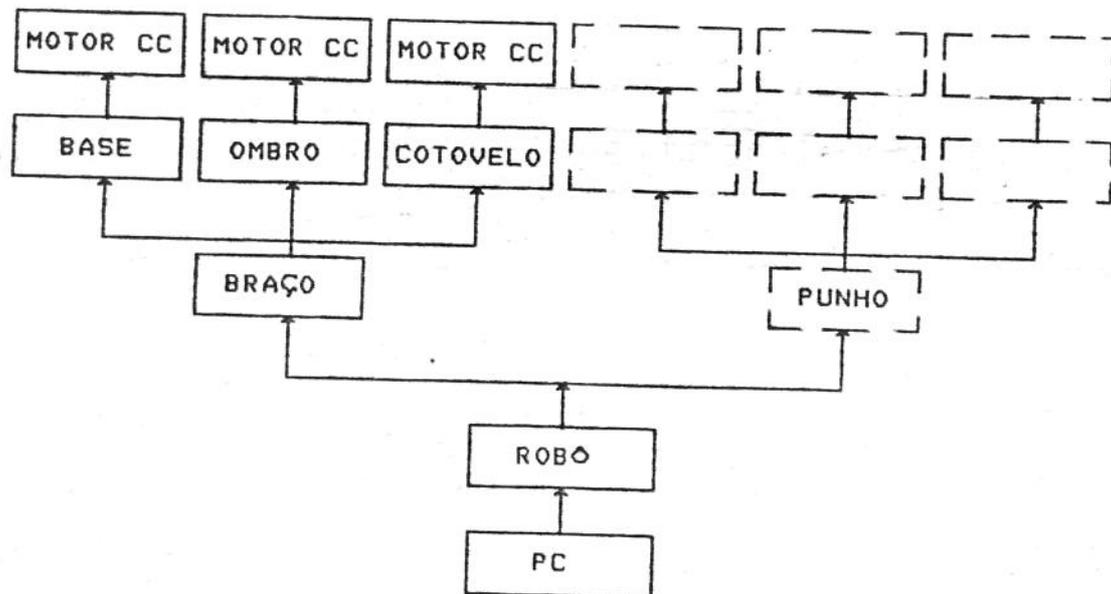


FIG. (13) Fluxograma de aplicação ao robô.

A hierarquia trabalha com o critério que realiza o balanceamento entre inteligência e precisão, ou seja, as "unidades" mais inteligentes são menos precisas a nível do processo, enquanto que as "unidades" mais precisas são menos inteligentes [Mendel-90].

No último nível, onde temos base, braço e antebraço utilizam-se três "unidades". Enquanto no nível mais alto há uma única "unidade" para coordenar as informações e fazer a comunicação com o "PC".

Nas "unidades" das juntas são utilizados programas de controle específicos para as características locais, ou seja, programas para atuar com motores de corrente contínua, algoritmos de controle com as constantes apropriadas ao local, aceleração, detecção de falhas, fim de curso e perda de alimentação [Mendel-91], [Molina-91].

#### Descrição do Hardware :

Para controle do servo-motor, faz-se necessário, que o "hardware" execute as tarefas sob comando de um controle central. Tais tarefas são :

- Realimentação da posição do motor,
- Controle da velocidade e direção,
- Detecção das condições de sobrecarga,
- Comunicação com o controle principal .

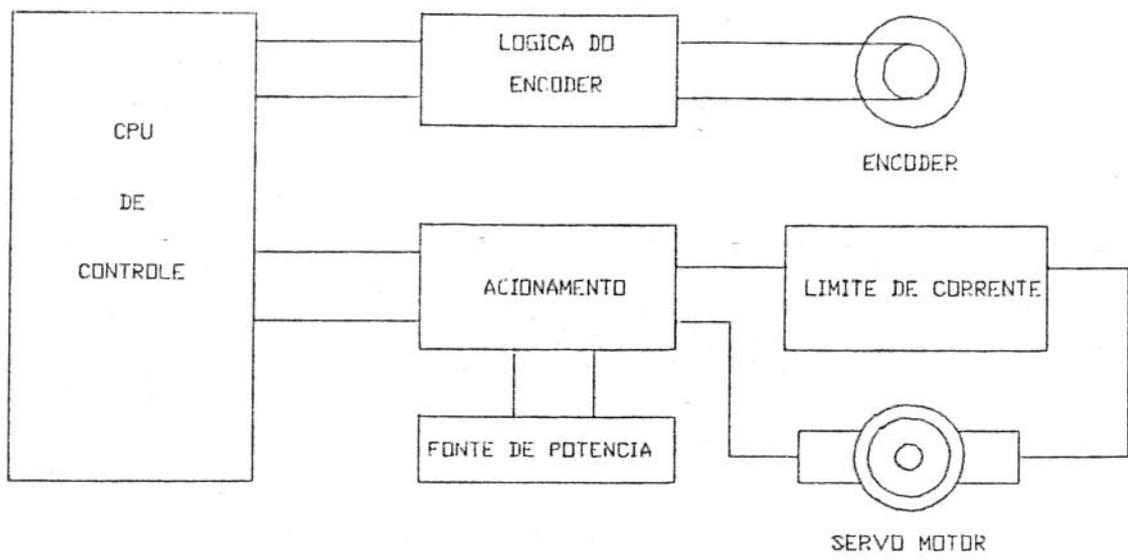


FIG. (14) Hardware e controle .

### Constituição Física do Controlador :

Abaixo estão relacionados os principais componentes que compõe o controlador utilizado no Robô JOPOC - 8808 :

- Fonte de alimentação, 5 Vcc .
- 4096 bytes de memória de programa (exceto 8031).
- 128 bytes de memória de dados.
- 4 bancos de resistores.
- 128 "flags" redefiníveis pelo usuário.
- 64 Kbytes de memória externa de programa e 64 Kbytes de memória externa de dados.
- Instruções executadas em  $1 \mu s$  com oscilador de 12 Mhz .
- 32 linhas de entrada e saídas bidirecionais divididas em quatro grupos de oito (16 no 8031).
- Porta serial programável de alta velocidade.
- Dois contadores programáveis de 16 bits.
- Estrutura de interrupção priorizada em dois níveis.
- Conjunto de instruções expandida do MCS -48 .
- Bytes e bits endereçáveis diretamente.
- Aritmética decimal de binária.
- Detecção de estouro com sinal de paridade.
- Multiplicação e divisão em  $4 \mu s$ .
- Processador Booleano integrado.

## 04 ENCODER ÓTICO :

No "Capítulo 03" item (3.4), descrevemos a finalidade do encoder BDG 6360 . Neste apêndice apresentamos as características técnicas básicas, a saber :

### A Dados Técnicos Mecânicos :

DADOS MECÂNICOS		BDG 6360	BDG 6110
Código do Eixo		60	10
Diâmetro do Eixo		6 mm	10 mm
Carga admissível no Eixo	radial max.	10 N	20 N
	axial max.	10 N	10 N
Torque Máximo		$2 \cdot 10^{-3}$ Nm	$4 \cdot 10^{-3}$ Nm
Momento de Inércia Máximo		$14 \cdot 10^{-7}$ kgm <sup>2</sup>	$18 \cdot 10^{-7}$ kgm <sup>2</sup>
Rotação min <sup>-1</sup>		12 000	12 000
Vida dos Rolamentos		50 000 h	50 000 h
Peso		0,4 kg	0,4 kg
NR Máximo de Pulsos por rotação		5000	5000
Classe de Proteção		IP 65	
Faixa de Temperatura		Temperatura de trabalho - 20°C.. + 70°C. *	
Vibração		$\leq 100$ m/s <sup>2</sup> (10... 2000 Hz)	
Carga de Impacto		$\leq 1000$ m/s <sup>2</sup>	

\*quando a alimentação for 5v nos demais -20°C+60°C

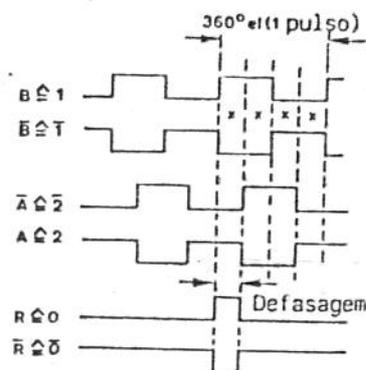
TAB. (06) Dados mecânicos .

## B Dados Técnicos Elétricos :

### DADOS ELÉTRICOS

Fonte Emissora	Elemento Infra vermelho
Alimentação do Circuito Eletrônico, inclusive LED	+5V ±5%/typ. 110 mA, 12...17V ±5%/typ. 100 mA, 24V ±25%/typ. 85 mA
Formação de Pulso	Gerado internamente

#### Sinal de Saída



Incremental: Encoder Bidirecional com 2 sinais de saída A e B e complementar  $\bar{A}$  e  $\bar{B}$ .

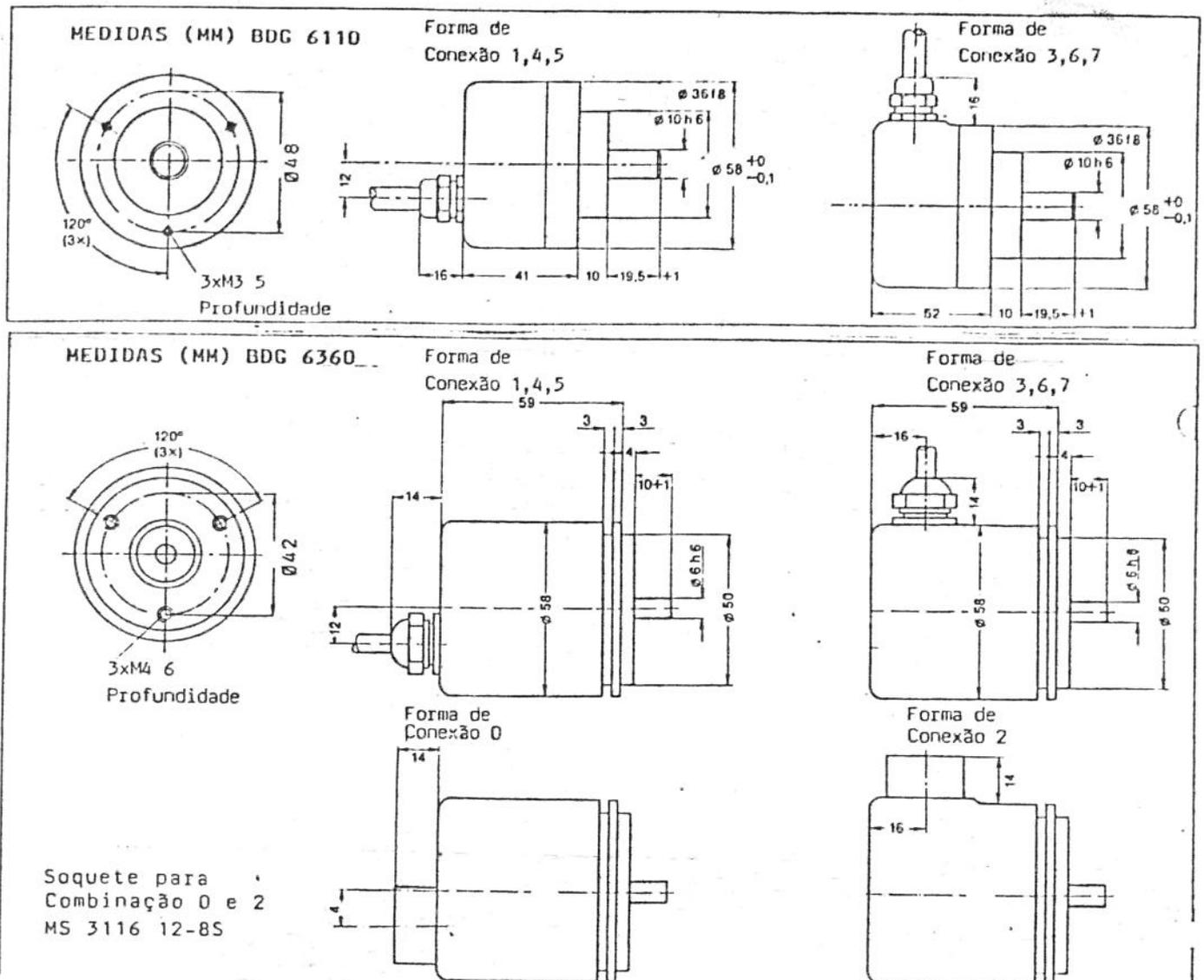
Seqüência de Pulsos: A atrasado em 90° elétricos com relação a B, girando no sentido horário (vista olhando-se para o eixo). A precisão do Encoder é dada em graus elétricos. 360° elétricos são definidos como o ângulo mecânico do eixo que corresponde a um período do sinal de saída (360° mecânicos divididos pelo número de pulsos do Encoder). O erro de divisão corresponde a grandeza de variação em relação à distância nominal entre dois pulsos proveniente do mesmo ou diferentes sinais de saída e consiste do erro de reprodução do ângulo mecânico e eletrônico. O erro de divisão não é acumulativo, pois não aumenta quando o Encoder é girado mais de uma volta completa.

Impulso de Referência: 1 impulso R por rotação com inversão possível  $\bar{R}$ , largura do pulso 90° el.

	BDG 6360, BDG 6110	BDG 6360	BDG 6360	Esquema de saída
Tabela de Sinais	5V AM 26LS 31 $U_{High} \geq 2,4V$ a $I_{High} \leq 20mA$ $U_{Low} \leq 0,5V$ a $I_{Low} \leq 40mA$	12...17V FZH 261 $U_{High} \geq 10V$ a $I_{High} = 0,1mA$ $U_{Low} \leq 1,7V$ a $I_{Low} = 15mA$ $U_{High} \geq 12V$ a $I_{High} = 0,1mA$ $U_{Low} \leq 1,7V$ a $I_{Low} = 18mA$	24V sem sinal complementar $U_{Low} \leq 0,75V$ a $I_{Low} = 16mA$ $U_{Low} \leq 0,95V$ a $I_{Low} = 50mA$	
Tempo de Comutação	$t_{pLH} \leq 100ns$ $t_{pHL} \leq 100ns$ medida na faixa 10-90% s/cabos e s/carga Retardamento do Pulso R em relação ao sinal A e B: $t_p \leq 60ns$	$t_{pLH} \leq 185ns$ $t_{pHL} \leq 150ns$ medida c/carga $C = 10pF$	$t_{pLH} \leq 400ns$ $t_{pHL} \leq 100ns$	
Distância de Ângulo	$X \geq 1,8\mu s$ a frequência de detecção = 200 kHz	$X \geq 1,8\mu s$ a frequência de detecção = 100 kHz	$X \geq 1,8\mu s$ a frequência de detecção = 100 kHz	
Carga = C	$I_{High} \leq 20mA$ , $I_{Low} \leq 20mA$ Carga $\leq 1000pF$	$I_{High} \leq 10mA$ , $I_{Low} \leq 10mA$	$I_{High} \leq 35mA$ , $I_{Low} \leq 50mA$	
Rotações Máximas	$n_{max} [min^{-1}] = \frac{f}{z} \cdot 60$		f = Frequência de comutação z = Número de divisões	

TAB. (07) Dados elétricos .

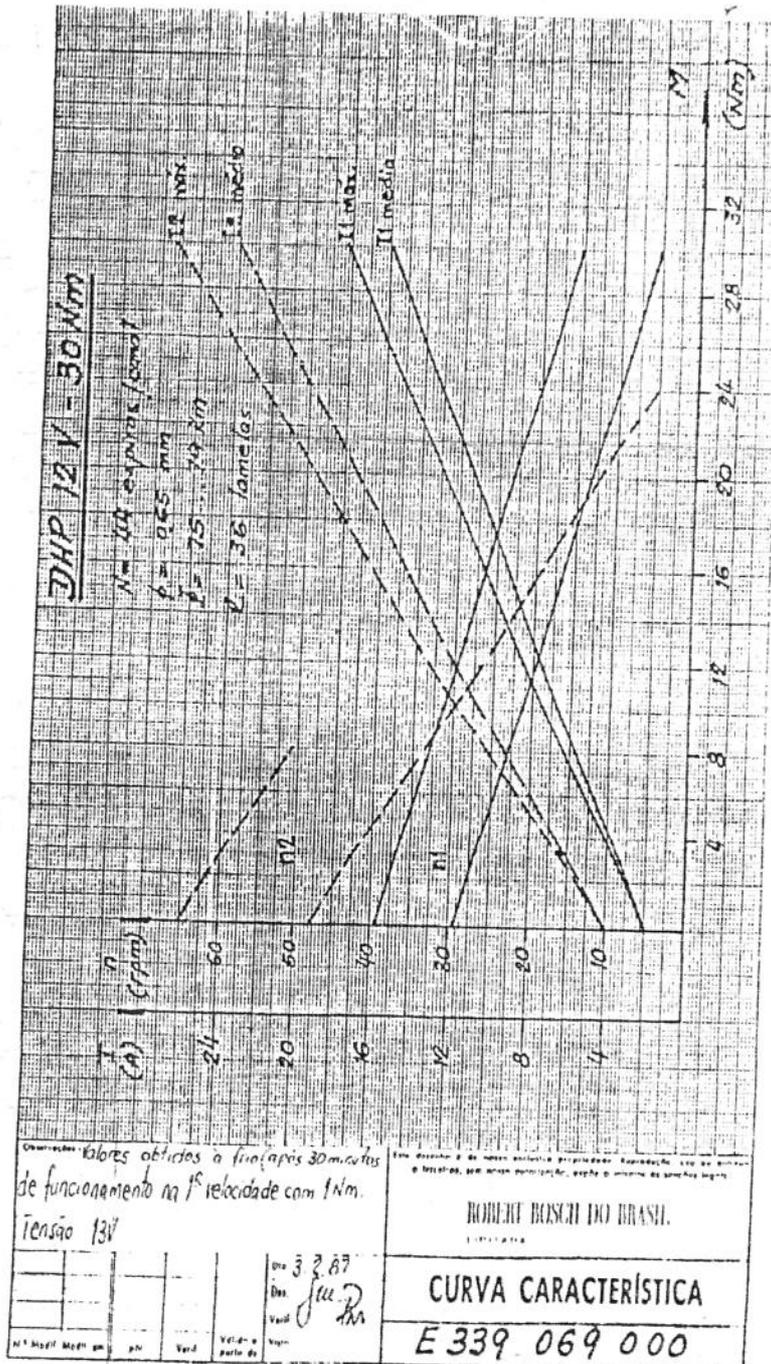
**C Dados Técnicos Dimensionais :**



TAB. {08} Dados dimensionais.

05 MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA :

No "Capítulo 03" Item (3.5), apresentamos as características básicas do moto-reductor. Neste apêndice, complementamos os dados com o gráfico de curva característica do motor de referência E 339 069 000, de fabricação da Robert Bosch do Brasil Limitada.



Valores obtidos à frio (após 30 minutos de funcionamento na primeira velocidade com 1 Nm, tensão 13 V).

TAB. (09)

Curva característica.

APÉNDICE II

## APÊNDICE II

### DESENHOS E DOCUMENTOS TÉCNICOS DO PROJETO

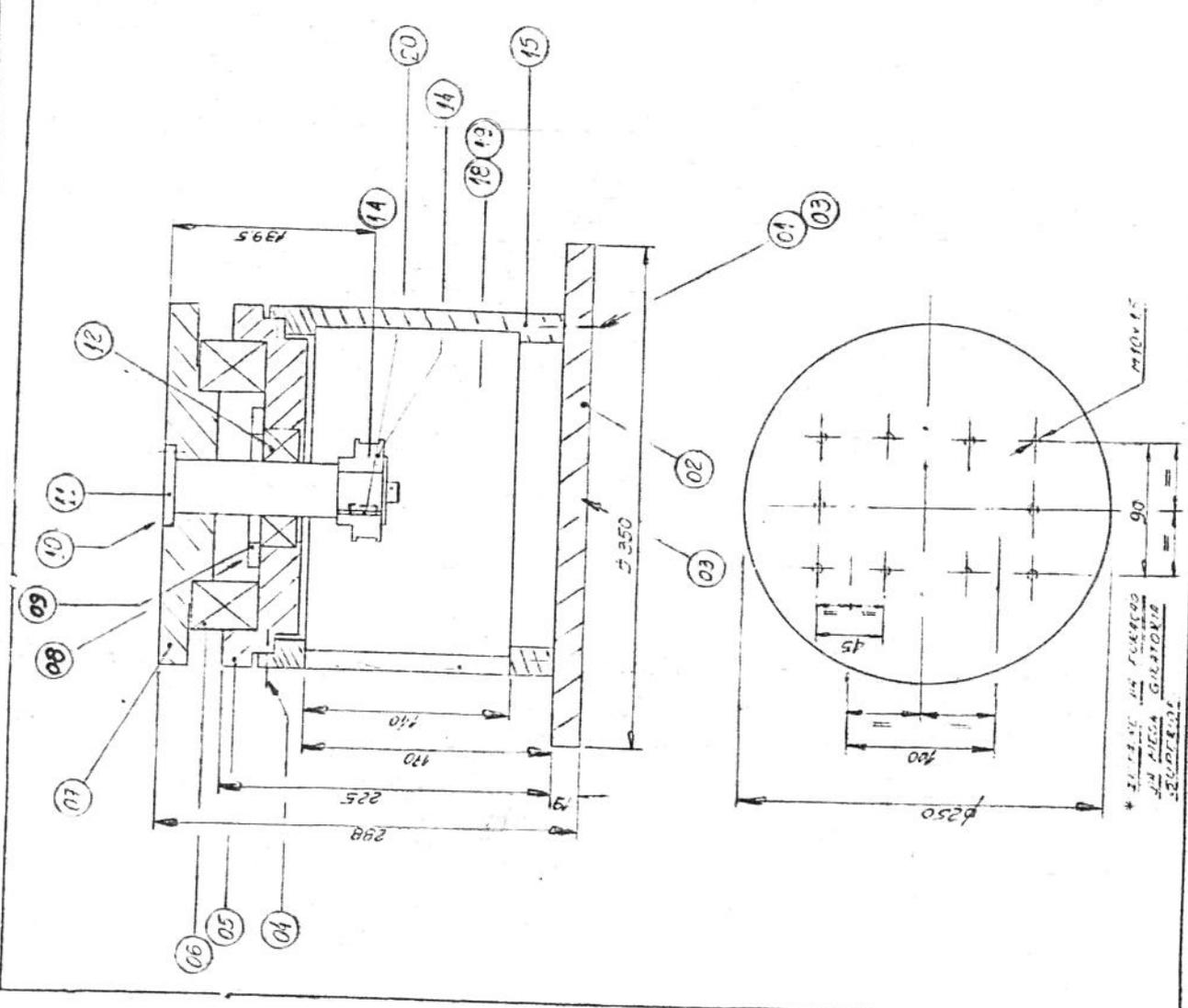
#### Apresentação :

Este apêndice tem como finalidade conter de forma ordenada, os desenhos de sub-montagem e montagens, lista de materiais e especificações técnicas complementares utilizadas na fabricação, bem como, para fins de consulta e complementação das descrições anteriormente expostas nos capítulos antecedentes.

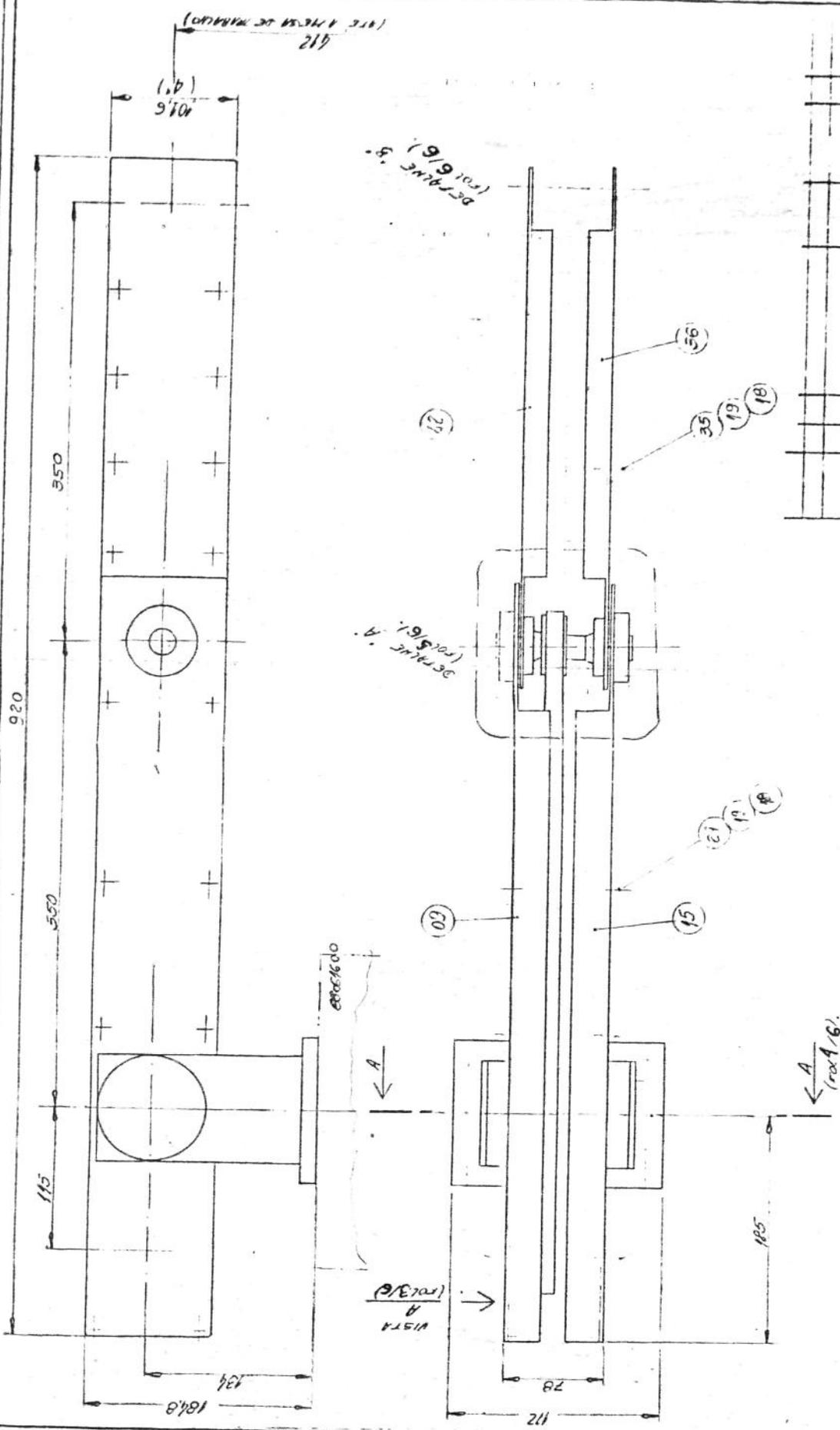
#### Estrutura sequencial deste apêndice :

- Desenhos de sub-montagem e montagens ,
- Lista de materiais ,

DESENHOS  
MONTAGEM E SUB-MONTAGEM

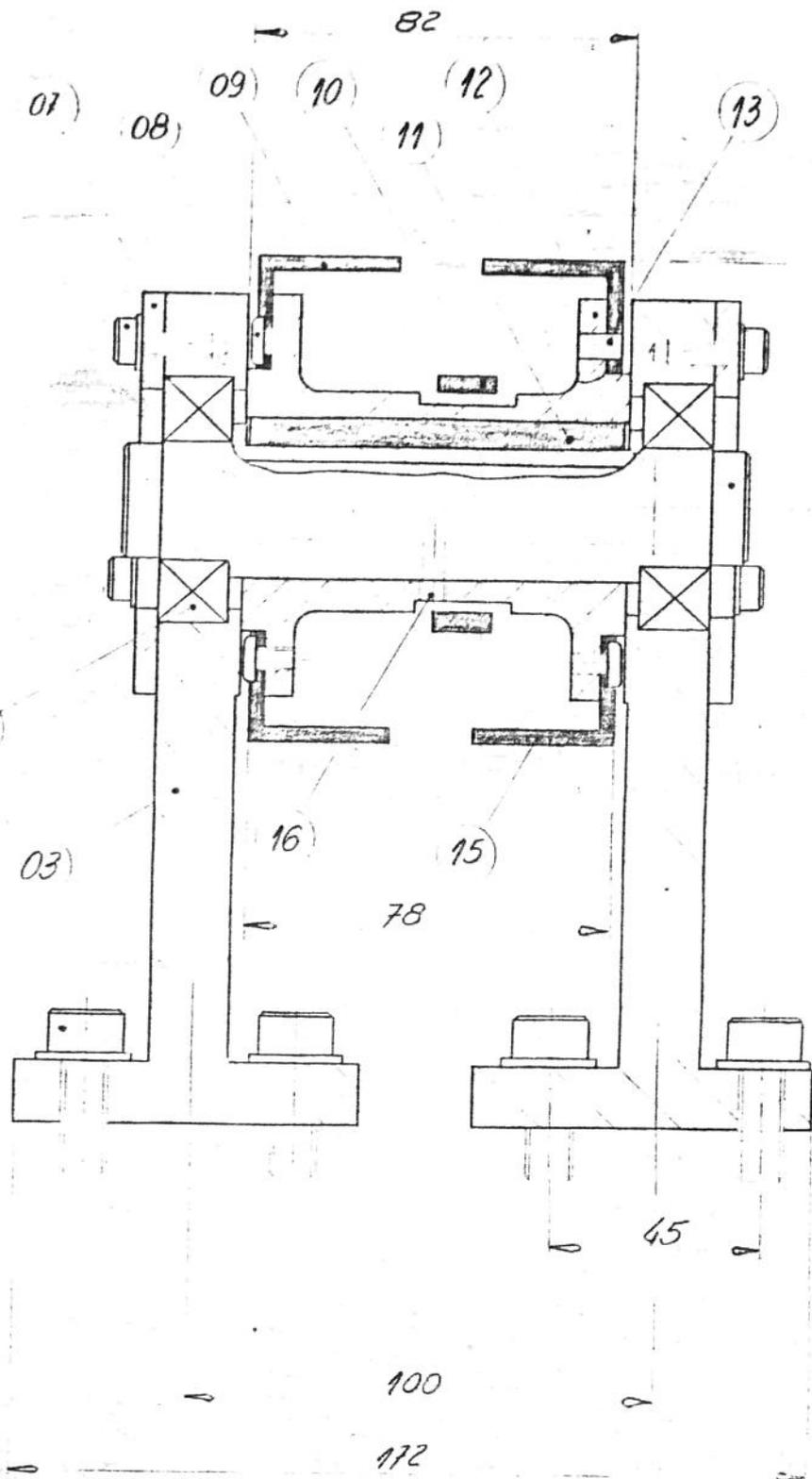


Item	Qty	Description	Material	Dimensions	Unit	Obs
26	01	CHAVETA - 8x12,50	410			
25	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
24	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
23	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
22	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
21	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
20	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
19	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
18	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
17	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
16	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
15	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
14	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
13	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
12	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
11	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
10	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
09	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
08	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
07	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
06	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
05	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
04	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
03	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
02	01	TRAB. DE CILINDRO	410			
01	01	TRAB. DE CILINDRO	410			









88081900

				PROJ. JOPOX-8803		Fol.	46
				Titulo: CORTE A:A			
				* MANCAL DE SUSTENÇÃO DO CONJUNTO DO BRACO.			
				Des. nº		88081900	
Desenhado		11.06.89		Nome		J.O.P.	
Verificado		"		Substitui		Esc.	





LISTA DE MATERIAIS

CC - Comp. Comerc.  
 CMP - Comp. Mat. Prima  
 CSN - Comp. Sáb/Negóc.

Projeto		Nº								
Evento <u>BASE DO ROLO JUNCO 8714</u>		Nº <u>8806.600 (A)</u>								
		Folha <u>01/02</u>								
Item Seq.	Item Projeto	Qtde. Unit.	Qtde. Total	Desenho	Rev.	Denominação	Mat. Bruta	Unit.	Obs.	Comp.
				Material						
1	01	06		ACO LIG4		PARAF. CILIND. SEXT. INTERNO			DIN 912-60	
2	02	01		88070206		BASE				
				ACO ABNT 1020/1020		# 3/4" x Ø 360			ACABAMTO OXIDACAO PRETA	
3	03	02		ACO LIG4		PINO DE GUA - Ø 6 x 40			DIN 6325 TOL. m6	
4	04	06		ACO LIG4		PARAF. CABECA CILIND. SEXT. INTERNO			DIN 912-60	
5	05	01		88070203	A	MESA FIXA INFERIOR				
				ACO ABNT 1045		Ø 1 1/2" x 65			ACABAMTO OXIDACAO PRETA	
6	06	01		ACO CARBONO		ROLAM TO. ROLO CONICO - 32026X			REF. "S.K.F."	
7	07	01		88070201		MESA GIRATORIA SUPERIOR				
				ACO ABNT 1020/1020		# 1 1/2" x Ø 260			ACABAMTO OXIDACAO PRETA	
8	08	04		ACO LIG4		PARAF. CABECA CILIND. SEXT. INTERNO			DIN 912-60	
9	09	01		88070204		TAMPA PARA ROLAMENTO				
				ACO ABNT 1020/1020		# 3/8" x Ø 115 x Ø 60			ACABAMTO OXIDACAO PRETA	
10	10	04		ACO LIG4		PARAF. CABECA CILIND. SEXT. INTERNO			DIN 912-60	
11	11	01		88070202	A	EIXO PRINCIPAL				
				ACO CARBONO		VIDE LIGEPED			ACABAMTO OXIDACAO PRETA	
12	12	01		ACO CARBONO		ROLAMENTO AUTO COMPENSADOR				
						ROLOS 9/ BUCHA FIXAS			22209CK + H308 (S.K.F)	
13	13	-	-		A					
14	14	01		88070207	A	PLACA SINCRONIZADA COE. 29L-50				
				ALUMINIO					FAB DA BAHIA	
15	15	01		88070205	A	COLUNA DA BASE				
				ACO CARBONO		Ø 250 x Ø 210 x 215			TUBO MECANICA ST 52	

Emit. J.P.R. 11/11/83 /Terc. Aprox.      /      /     

Obs: \* CLASSE DE ROLAM/TO PARA OS ITENS DO PROJ 000 E (12) SERVO IGUAIS OU SUPERIOR A "P4".

FC - Fabr. de  
 FCT - Fabr. de  
 FT - Fabr. Tencidos

CC - Comp. Comerc.  
 CMP - Comp. Mat. Prima  
 CSN - Comp. Sob. Negóc.

Projeto \_\_\_\_\_ Nº \_\_\_\_\_ /

Evento BASE DO ROBO "JOPOC 8303" Nº 88061600(A) Folha 02/02

E. Sec.	Item Projeto	Ciclo. Unid.	Ciclo. Total	Desenho	Denominação	Fabr.
				Rev.		
1	16	01			PINO DE GUIA $\phi 5 \times 18$ AÇO LIGA	DIN 6325 TOL. m <sup>6</sup>
2	17	02			PINO DE GUIA $\phi 6 \times 20$ AÇO LIGA	DIN 6325 TOL. m <sup>6</sup>
3	18	01			ARRIELA ESPECIAL $3 \times \phi 46 \times \phi 8,5$ AÇO CARBONO	AÇO 44 m/12 OXIDIZADO PRETO
4	19	01			PARAT C/3. CILIND. C/SEXT. INTERIO AÇO LIGA	M8 x 9,25 - 15 x 15 DIN 912. 6g
5	20	01			CHAVETA - 8 x 7 x 25 AÇO CARBONO	ABNT P-28-122
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						

FC - Fabr. de F.  
 FCT - Fabr. de Terc.  
 FT - Fabr. Terciarias

Emit. J.O.P. 11/11/88 Aprov.          

Obs: \_\_\_\_\_

CC - Comp. Comarc.  
 CMP - Comp. Mat. Prima  
 CSN - Comp. Sob/Margoc.

Projeto BASE DO COBO JUVOC - 8809

Nº 88061600

Evento EIXO PRINCIPAL

Nº 88070202(A) Folha 01/01

Item	Seq.	Item Projeto	Qtd. Unit.	Qtd. Total	Desenho	Flav	Denominação		Fabr.	Comp.
					Material		Dir. Bruta Unit.	Obs.		
1	01	01					TUBO MECANICO ST 52			
					ACO CARBONO		Ø56 x Ø28 x 130			
2	02	01					PONTA			
					ACO ABNT 1040		Ø 1 1/2" x 50			
3	03	01					TAMPA			
					ACO CARBONO		# 14			
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										

Emit. J.O.P. 11/11/88 Aprox.     

Obs: \* 1) ESTA PEÇA DEVERIA TRATAR-SE TERMICO.

FC - Fabr.       
 FCT - Fabr.      / Terc.  
 FT - Fabr. Tercarios

FI - Fabric. Interna  
 FE - Fabric. Externa  
 FC - Fabric. Composta (FE + FI)

CC - Compra Comercial  
 CMP - Compra Mat. Prima  
 CSN - Compra Sob. Negócio

LIGEPROT.

Proj. 1.02  
 02/05/89

Even. ANTE-BRACO E BRACO

Item	Sq	Proj.	Qde	Unit.	Qde Tot.	Desenho	Rev	Material	Denominação	Dimensão (Bruta)	Comp. Fabric	n: Ordem	Obs.
01	01	10	10			88110105	A	PROF. CILINDRICA C/ SEXTADO INTERNO 2002				58081900	ACABAMENTO OTURADO PRETA
02	02	10	10					ACAO LIGA	ARVUELA DE PRESSAO Ø INT. 105 mm.	110 X 1,5 - 25 X 25			ACABAMENTO OTURADO PRETA
03	03	02	02					ACO MOLA	MANGAL DE SUSTENTACAO				ACABAMENTO OTURADO PRETA
04	04	02	02					VIDE "LIGEPROT"	ROLAMENTO CILINDRICO CONTATO ANGULAR - REF. B. 7205CTAPRUL				
05	05	06	06					PROF. CILINDRICA C/ SEXTADO INTERNO - DIM. 012					FERRIC. F7G
06	06	06	06					ACO LIGA	ARVUELA DE PRESSAO Ø INT. 53	15 X 0,8 - 12 X 12			ACABAMENTO OTURADO PRETA
07	07	02	02			88111101		ACO MOLA	FUNDA DE ROLAMENTO				ACABAMENTO OTURADO PRETA
08	08	24	24					ACO ABNT 1010/1020	ARAFUNDO C/ABRASA ABRAVADA	Ø 1/4" x Ø 95			ACABAMENTO OTURADO PRETA
09	09	01	01			89030102	A	ACO LIGA	LATERAL ESQUERDA	15 X 0,8 - 6 X 6			ACABAMENTO OTURADO PRETA
10	10	01	01			89050101	A	ALUMINIO (PERFIL U)	CORRETA SINCROMETRADA	1/2" x 2" x 3,15 x 600			
11	11	01	01					VIDE "LIGEPROT"	CHAVETA PARALELA - TIPO "B" - 10 X 8 X 80				
12	12	01	01			88110103	A	ACO ABNT 1005/1050	CUBO DO EIXO - MOTOR DO ANTE-BRACO				NORMA ABNT P-18-122
13	13	04	04					ALUMINIO ABNT 2017	PINO ELASTICO - Ø 5 x 8 mm.	Ø 3/8" x 100			
14	14	01	01			88110102		ACO MOLA	EIXO DO MOTOR DO ANTE-BRACO				Ø 70 x 129
15	15	01	01			89030101	A	TUBO MECANICO ST-52	LATERAL DIREITA	Ø 36 x Ø 16 x 160			Ø 70 x 129
								ALUMINIO (PERFIL U)		1/2" x 2" x 3,15 x 600			

CC - Compra Comercial  
 CMP - Compra Mat. Prima  
 CSN - Compra Sob. Negócio

F1 - Fabric. Interna  
 FE - Fabric. Externa  
 FC - Fabric. Composta (FE + F1)

Item	Item	Item	Item	Qtd	Qtd	Qtd	Qtd	Qtd	Qtd	Desenho	Rev	Denominação		Comp. Fabric	Comp. n: Ordem	Obs.
												Material	Dimensão (Bruta)			
LIGE PROJ																
F.O.P. 02/05/79																
Even. ANTE-BOGO E BIRAO																
No 88081900																
01	16	01	88111104										PAPEL CABEÇA C/ SEXTAVADO INTERNO			ACABAMENTO OXIDADO PEETA
02	17	02	88080602										ACO UGA 146x10 - 16 x 16			FABR. DAY-BRANL.
03	18	28											POLIA SINCRONIZADORA PARA TRAPEZOIDAL - DEF. 161 - 050			ACABAMENTO OXIDADO PEETA
04	19	28											ALUMINIO			FABR.
05	20	01											PAPEL CABEÇA CILINDRICA SEXTAVADO INTERNO - 319.912			ACABAMENTO OXIDADO PEETA
06	21	01	88122903										ACO LIGA 143x0,5 - 8x8			OXIDADO PEETA
07	22	01	89050201										ARVUELA DE PRESSO Ø INT 33 mm.			ACABAMENTO OXIDADO PEETA
08	23	02											ACO MOLA			OXIDADO PEETA
09	24	01	88122902										BOUMITE: ESFERAS DE CONTATO ANGULAR - REF. 37005 CTARUL			TR. FVG.
10	25	01	88122901										FLANGE			ACABAMENTO OXIDADO PEETA
11	26	01											ACO ABNT 1620 Ø 3 1/2" x 20			OXIDADO PEETA
12	27	08	88122701										PARAFUSO SEM CABEÇA COM SEXTAVADO INTERNO			OXIDADO PEETA
13	28	16											ACO LIGA 145 x 0,8 - 16 x 16			OXIDADO PEETA
14	29	16											CABEÇA PARALELA TIPO "B" - 5x5 x 20			OXIDADO PEETA
15	30	02	88080603										ACO ABNT 1065/1050			OXIDADO PEETA
													FLANGE			OXIDADO PEETA
													ACO ABNT 8620 Ø 3 1/2" x 20			OXIDADO PEETA
													EIXO DE ACOINAMENTO 30 MOTOR TRAPEZOIDAL			OXIDADO PEETA
													ACO ABNT 8620 Ø 1 1/2" x 80			OXIDADO PEETA
													ROLAMENTO DE ESFERAS DE CONTATO ANGULAR - REF. 37000 CTARUL			OXIDADO PEETA
													PARAFUSO SEM CABEÇA			OXIDADO PEETA
													PARAFUSO SEM CABEÇA COM SEXTAVADO INTERNO			OXIDADO PEETA
													ALUMINIO ABNT 2014/2017/7075 Ø 3/8" x 65			OXIDADO PEETA
													PAPEL CABEÇA CILINDRICA C/ SEXT. INTERNO - 319.912			OXIDADO PEETA
													ACO UGA 143x0,5 - 6x6			OXIDADO PEETA
													ARVUELA DE PRESSO - Ø INT 33 mm.			OXIDADO PEETA
													ACO MOLA			OXIDADO PEETA
													FORÇA ESPECIAL			OXIDADO PEETA
													ALUMINIO ABNT 2014-2017-7075 Ø 1" x 15			OXIDADO PEETA



CC - Compra Comercial  
 CMP - Compra Mat. Prima  
 CSN - Compra Sob. Negócio

FI - Fabric. Interna  
 FE - Fabric. Externa  
 FC - Fabric. Composta (FE + FI)

Item Seq.	Item Proj.	Qtd. Unit.	Qtd. Tot.	Desenho	Rev	Denominação		Dimensão (Bruta)	Comp. n: Ordem Fabric n: Ordem	Obs.
						Material				
01	01	01				CHAPA # 58"				
02	02	01				ACO ABNT 1010/1020 CHAPA # 36"		59" x 77 x 125 3 1/8" x 90 x 170		
03										
04										
05										
06										
07										
08										
09										
10										
11										
12										
13										
14										
15										

LIGE PROT

J.O.P.  
03/05/29

Proj.  
Even. MANEJO DE SUSTENTACAO DO ANTE-BRACO

Nº

Nº 88110105

Folha

01

CC - Compra Comercial  
 CMP - Compra Mat. Prima  
 CSN - Compra Sob. Negócio

F1 - Fabric. Interna  
 FE - Fabric. Externa  
 FC - Fabric. Composta (FE + F1)

LIGEPROT		Proj.		NO		NO		NO					
Item Seq	Item	Proj.	Qtd	Unit.	Qtd Tot.	Desenho	Rev	Material	Denominação	Dimensão (Bruta)	Comp. n: Ordem	Fabric n: Ordem	Obs.
01	01	01	01					MOCA - CARGA LEVE	REF. 9-0606-11				
02	02	01	01					ACO MOCA					
03	03	01	01					CANTONEIRA DE ABAS IGUAIS		1/2" x 1/2" x 15			
04	04	04	04					ALUMINIO					
05	05	01	01					CANTONEIRA DE ABAS IGUAIS		1/2" x 1/2" x 15			
06	06	01	01					ALUMINIO					
07	07	01	01					REBITE POP-PO Ø 1/8"					
08								ALUMINIO					
09								ARBUEGA LISA - Ø INT 5,3 mm.					
10								ACO CARBONO					
11								PAPF. CABEÇA CILIND. SEXTAVADO INTERNO - DIM 912					
12								ACO LIGA					
13								CORREIA SINCRONIZADORA DENTES TRAPEZOIDAL - COD. 2101					
14								TECIDO C/BORRACHA					
15								COMPRESSOR. 21"					

J.O.P. 03/05/89

Even. CORREIA SINCRONIZADORA COM ESTICADOR

NO 89050101

NO 89050101