

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Mecânica
Departamento de Projeto Mecânico

TESE DE MESTRADO

Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de Calibração
e Medida de Precisão para Robôs Industriais

Aluno: Marcos Antônio Porta Saramago

Orientador: João Maurício Rosário

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Marcos Antônio
 Porta Saramago E APROVADA PELA

COMISSÃO JULGADORA EM 21/6/93

João Maurício Rosário
ORIENTADOR

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

BC
 T/UNICAMP
 Jan 7/96
 28093
 667/96
 R\$ 11,00
 34/07/96
 0000001072 R-7

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
 BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Sa71p Saramago, Marcos Antônio Porta
 Projeto e desenvolvimento de um sistema de calibração
 e medida de precisão para robôs industriais / Marcos
 Antônio Porta Saramago.--Campinas, SP: [s.n.], 1993.

Orientador: João Maurício Rosário.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Calibração. 2. Automação industrial. 3. Robótica.
 I. Rosário, João Maurício II. Universidade Estadual
 de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
 Título.

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

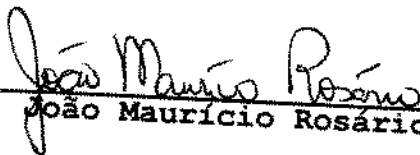
TESE DE MESTRADO

Projeto e Desenvolvimento de um Sistema de Calibração
e Medida de Precisão para Robôs Industriais

Autor: Marcos Antônio Porta Saramago

Orientador: Prof. Dr. João Maurício Rosário

Aprovado por:



Prof. Dr. João Maurício Rosário, Presidente



Prof. Dr. Hans Ingo Weber



Dr. Cesar de Souza Lima

Campinas, 28 de junho de 1993.

DEDICO ESTA DISSERTAÇÃO AOS MEUS PAIS

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. João Maurício Rosário pela seriedade na conduta da orientação deste trabalho, amizade, respeito e incentivo.

Agradeço ao Prof. Dr. Hans I. Weber e Prof. Dr. César S. Lima, por terem aceito participar da banca examinadora e pelas inúmeras sugestões feitas no desenvolvimento deste trabalho.

- ao colega Rubens Morandi pela sua amizade, e suas brilhantes idéias na fabricação de dispositivos deste trabalho;

- ao colega Luis Morelli pela sua amizade, e suas idéias e apoio na realização deste estudo.

RESUMO

Nesta dissertação é especificado o projeto e a implementação de um protótipo de um sistema de calibração e medida de precisão de robôs industriais.

Trata-se do estudo de um processo de baixo custo e de alta resolução, constituindo-se basicamente, de um dispositivo externo de medidas que, possibilite identificar o comportamento dinâmico real na extremidade da ferramenta conectada no elemento terminal do robô durante a realização de trajetórias planas previamente selecionadas.

A partir desse sistema de medidas será possível a verificação do comportamento real de um robô industrial trabalhando com cargas variadas e ambientes adversos, além de fornecer elementos para uma possível correção destes erros nos controladores de posição de cada junta.

CONTEÚDO

Introdução.....	01
1 - Utilização de Robôs em Tarefas Submarinas Automatizadas.....	03
1.1 Estrutura Mecânica Construída.....	04
1.1.1 Maquete.....	05
1.1.2 Base Móvel-Robô e Componentes.....	07
1.1.3 Ferramentas Dedicadas e Acessórios.....	08
1.2 Programação Off-Line.....	09
1.3 Calibração e Identificação de Parâmetros.....	10
1.4 Cometários Finais e Conclusões.....	12
2 - Descrição do Problema de Calibração e Medida de Precisão	
2.1 Posicionamento do Problema.....	13
2.2 Causas dos Erros de Posicionamento.....	15
2.3 Definições para a Avaliação de Posicionamento de Robôs.....	17
2.4 Métodos de Calibração Existentes.....	19
2.4.1 Critérios para avaliação do desempenho de robôs.....	19
2.5 Estudo do Erro do Posicionamento do Robô em Frente ao Painel	24
2.6 Apresentação de um Dispositivo de Calibração de robôs.....	24
3 - Sistema Experimental Proposto	
3.1 Modelagem do Robô.....	28
3.1.1 Modelo Geométrico Direto.....	30
3.1.2 Modelo do Robô Utilizado.....	32

3.2 Sistema de Calibração-Algoritmo.....	34
3.2.1 Modalidade dos Ensaios.....	34
3.2.2 Parâmetros a Identificar.....	38
3.2.3 Identificação pelo processo dos Mínimos Quadrados.....	39
3.2.4 Algoritmo de Identificação.....	40
3.2.5 Critérios de Medidas Utilizados.....	43
3.3 Conclusões e Perspectivas.....	45

4 - Apresentação dos Resultados

4.1 Levantamento das Curvas de Calibração dos Encoders.....	47
4.1.1 Metodologia de Medida.....	47
4.2 Levantamento das Condições de Aderência.....	56
4.2.1 Condições de Aderência do Cabo na Polia.....	56
4.2.2 Resultados.....	57
4.3 Resultados Obtidos com o Triângulo de Calibração.....	58
4.3.1 Ensaios de Repetibilidade e Reversibilidade.....	58
4.4 Precisão Dinâmica do Robô.....	60
4.4.1 Princípios de Medida.....	60
4.5 Conclusão.....	65

Perspectivas e Conclusões.....	66
---------------------------------------	-----------

Bibliografia.....	68
--------------------------	-----------

ANEXOS

A - ESTUDO DO SISTEMA CABO - POLIA - ENCODER.....	77
B - TRIÂNGULO DE CALIBRAÇÃO E SUAS RELAÇÕES TRIGONOMÉTRICAS.....	94
C - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	99
D - LISTAGEM DOS PROGRAMAS UTILIZADOS.....	102

INTRODUÇÃO

O alto risco de exposição do homem, o elevado custo operacional e as dificuldades de acesso inerentes às intervenções submarinas em águas intermediárias e profundas tornam necessária a utilização de telemanipuladores, ferramentas dedicadas e dispositivos robóticos em substituição ao homem.

Durante um convênio de cooperação científica envolvendo a UNICAMP, PETROBRÁS-CENPES e GKSS - Instituto Tecnológico de Geesthacht, da Alemanha, criou-se a oportunidade da realização de um trabalho conjunto na área de utilização de robôs para intervenções submarinas automatizadas, onde através do Laboratório de Robótica do Centro de Tecnologia da Unicamp tornou-se possível a adequação de um robô industrial para intervenções submarinas automatizadas.

Entretanto a maioria dos manipuladores e robôs industriais existentes no mercado, não possuem uma precisão suficiente para execução de algumas tarefas, exigidas para a aplicação descrita anteriormente, a qual requer o desenvolvimento de um "software" de programação off-line, de maneira que o modelo geométrico exato do robô e seu ambiente de atuação sejam introduzidos neste programa computacional. Além disso, as tarefas necessárias para essas aplicações exigem que o robô trabalhe com cargas variáveis e muitas vezes além de sua capacidade, acarretando a possibilidade de flexões de sua estrutura.

O desenvolvimento de metodologias para identificação dos parâmetros geométricos de um robô e medida de precisão na ferramenta, torna-se necessário para o sucesso na realização de trajetórias off-line a partir de desenvolvimento de "software" em computador. Com este objetivo, neste trabalho de tese, serão estudados e implementados metodologias para a calibração e medida de precisão utilizando-se um robô industrial - Manutec-r3, cedido pelo GKSS, para realização deste projeto de pesquisa.

Este trabalho foi dividido em quatro capítulos, que apresentaremos a seguir:

No capítulo 1, mostramos as linhas gerais da pesquisa, necessárias para a automação de tarefas em águas profundas utilizando-se robôs industriais. Para tanto, são descritas as principais tarefas a serem realizadas, as adaptações construtivas realizadas no robô, a construção de ferramentas dedicadas, e finalmente uma maquete construída na UNICAMP que representa parte de um ambiente submarino, onde o robô deverá atuar.

No capítulo 2 são abordadas as principais metodologias utilizadas para medida de precisão e repetibilidade em robôs industriais. Para tanto, baseado na literatura, são descritos os principais parâmetros que devem ser identificados, e os métodos experimentais para visualização dos erros de posicionamento e orientação do elemento terminal de um robô. No decorrer deste capítulo é apresentado um dispositivo de calibração para medida da posição do elemento terminal do robô em estudo.

No capítulo 3, apresentamos a metodologia utilizada para medida de posição do elemento terminal do robô a partir da construção necessária de um dispositivo de calibração proposto no capítulo anterior. Para implementação experimental torna-se necessária a modelagem geométrica do robô industrial Manutec-r3.

Finalmente, no capítulo 4, são apresentados os resultados referentes à identificação dos parâmetros encoder-cabo-polia, as condições de aderência de um sistema Cabo-Polia, ensaios de repetibilidade e reversibilidade e a identificação e comparação de posicionamentos e trajetórias obtidas através do controlador do robô e de um sistema externo de medidas, com suas respectivas montagens experimentais.

CAPÍTULO 1

UTILIZAÇÃO DE ROBOS EM TAREFAS SUBMARINAS AUTOMATIZADAS

O alto risco de exposição do homem, o elevado custo operacional e as dificuldades de acesso inerentes às intervenções submarinas em águas intermediárias e profundas tornam necessária a utilização de telemanipuladores, ferramentas dedicadas e dispositivos robóticos em substituição ao homem. Um convênio de cooperação existente entre a Petrobrás e o Instituto Tecnológico de Geesthacht - GKSS da Alemanha, cria a oportunidade de um trabalho conjunto GKSS-PETROBRÁS-UNICAMP na área de utilização de robôs para intervenções submarinas em grandes profundidades.

A adaptação de robôs industriais para trabalhos submarinos tem sido feita para possibilitar inspeções, reparos e manutenções em águas intermediárias e profundas. Para isto está sendo construído no Centro de Tecnologia da Unicamp e no GKSS uma maquete em escala real que represente um ambiente submarino típico.

A partir da utilização de um robô industrial marinizado, com sua respectiva unidade de controle e fixo a uma base móvel sem mecanismo de propulsão foram realizadas tarefas complexas. A partir do modelo geométrico do robô e cenários de atuação foi desenvolvido um "software" de programação off-line que permitiu a visualização e geração automática de trajetórias para utilização no robô industrial Manutec-r3 cedido, pelo GKSS-Alemanha. As principais fases desse projeto foram:

- i) Construção mecânica de um cenário para testes;
- ii) Desenvolvimento de dispositivos e ferramentas para o robô;
- iii) Desenvolvimento de "software" de programação "off-line" para geração automática de trajetórias;
- iv) Implementação de sistemas de calibração e medida de acurácia;
- v) Realização de testes para validação da metodologia desenvolvida.

No decorrer deste capítulo descreveremos as principais etapas desse projeto com o objetivo de motivarmos o leitor para a necessidade do desenvolvimento de dispositivos experimentais que permitam calibrarmos e medirmos a precisão do dispositivo robótico em desenvolvimento.

1.1 - ESTRUTURA MECÂNICA CONSTRUÍDA

1.1.1 - Maquete

Para realização de tarefas submarinas automatizadas foram construídas na UNICAMP e no GKSS dentro do projeto de pesquisa "Desenvolvimento de Metodologias para Intervenções Submarinas Automatizadas", duas estruturas simplificadas de um cenário submarino típico (template-manifold), que permitirá a execução de testes a seco (UNICAMP) e em águas rasas (GKSS-Alemanha).

Esta estrutura simula uma parte de um equipamento projetado pela Petrobrás, o OCTOS-1000TM, que será instalada no GKSS e UNICAMP para um programa conjunto de testes.

O desenvolvimento do projeto considera uma construção modular (braço de exportação, braço de produção, painéis, sistemas de trilhos e um manifold central). Com isso será possível a realização de testes intermediários utilizando partes da estrutura construída. Assim, a estrutura mecânica principal (figura 1.1) deverá conter os seguintes elementos:

- construção mecânica básica, incluindo trilhos para deslocamento do robô e sua base móvel;
- painéis de testes e sistema de calibração automática;
- construção de réplica das ferramentas, válvulas e dispositivos utilizados, a serem definidos pela Petrobrás.

O robô e sua base móvel deverá se deslocar através de um sistema de trilhos solidários a essa estrutura, até se posicionar em frente aos painéis colocados nas extremidades dos braços dessa estrutura (exportação ou produção). Após a fixação automática do conjunto nos trilhos, será possível a realização de operações automatizadas (posicionamento automático, tarefas complexas através do software de programação off-line, calibrações, exatidão, etc.).

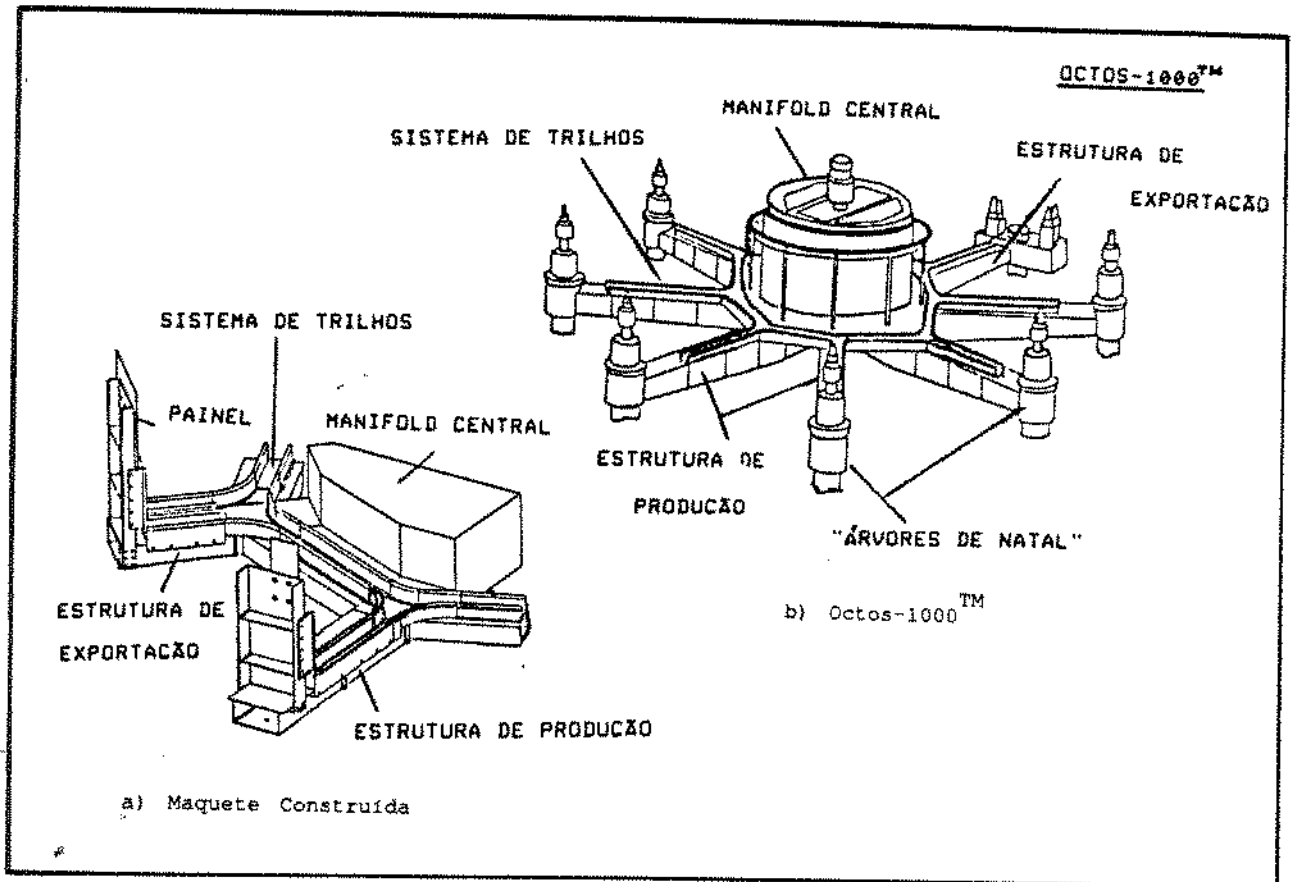


Figura 1.1: Representação da maquete do OCTOS-1000

As operações a serem realizadas nesta maquete, vêm a ser, resumidamente:

- i) Deslocamento, posicionamento e fixação do conjunto robô-base móvel em frente a painéis de atuação;
- ii) Fixação do sistema completo (robô base-móvel) em posição pré-definida na maquete;
- iii) Troca de conectores, conexões e deslocamento;
- iv) Acionamento de válvulas.

Finalmente, a partir deste ambiente típico de trabalho será possível:

- a simulação, validação e testes do sistema ("hardware" e "software") desenvolvido;
- a elaboração de uma interface ("hardware" e "software") entre o robô e o microcomputador utilizado.
- a utilização do "software" de visualização e geração automática de trajetórias em desenvolvimento no projeto de pesquisa "Desenvolvimento de Metodologias para Intervenções Submarinas".

1.1.2 - Base móvel-Robô e componentes

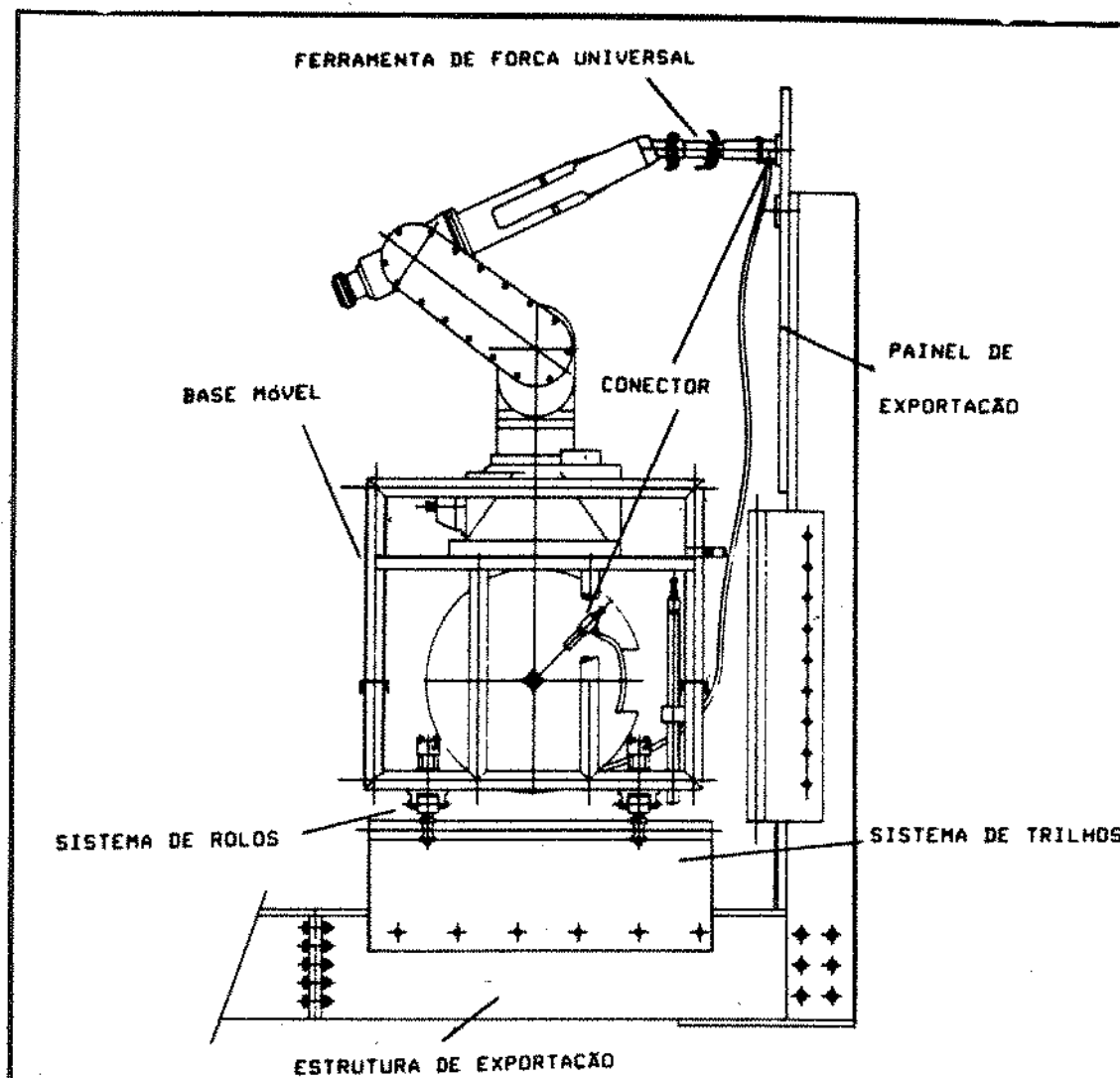
O sistema para inspeção reparos e manutenção, proposto para trabalhar submerso, consiste de um robô marinizado, montado sobre uma base móvel (figura 1.2). A mesma apresenta as seguintes características:

- sem sistema automático de propulsão pois o conjunto deverá ser deslocado através de um ROV (Remoted Operated Vehicle);
- sistema automático de posicionamento e fixação sobre os trilhos;
- sistema automático de transferência de trilhos e mudança de direção.

Os principais componentes da base móvel são, a estrutura de fixação do um sistema de ajuste de roletas deslizantes sobre os trilhos, a caixa de ferramentas com ferramentas e conectores, e um sistema de carretel para distribuição de um cabo hidráulico designado "umbilical". O movimento da base móvel sobre o sistema de trilhos é feita através de um veículo submarino operado remotamente "ROV".

Um esforço particular para realização do trabalho constituiu na modificação das seis juntas do robô "Manutec-r3" em sua marinização. Este robô protótipo foi desenvolvido pelo GKSS em cooperação com a SIEMENS AG, da Alemanha. Atualmente estes robôs podem trabalhar em ambientes com pressões acima de 120 bar. A principal meta para a realização de uma série de operações é a automação de tarefas especiais repetitivas, testes não destrutivos, corte a jato com abrasivos e solda de materiais e componentes.

As operações com este robô considera especialmente trabalhos de corte com jato de água utilizando abrasivos, operações de limpeza e novas técnicas pesquisadas para aplicações submarinas



1.1.3 - Ferramentas Dedicadas e Acessórios

Para realização das operações descritas anteriormente tornou-se necessário o desenvolvimento de acessórios especiais (figura 1.3). Os principais acessórios desenvolvidos foram:

- ferramenta universal com sistema de engate hidráulico;

Através desta ferramenta será possível a realização de tarefas do tipo conexão e desconexão de um conector macho com sua respectiva fêmea no painel de exportação.

- ferramenta de torque (hidráulica).

Esta ferramenta será utilizada em testes de operações de controle de válvulas no painel horizontal localizado no manifold central.

Além disso foram construídos acessórios especiais para as operações descritas anteriormente. Os principais elementos são descritos a seguir:

- magazine hidráulico de ferramentas;
- sistema de engate rápido de ferramentas - porta-ferramentas hidráulico.

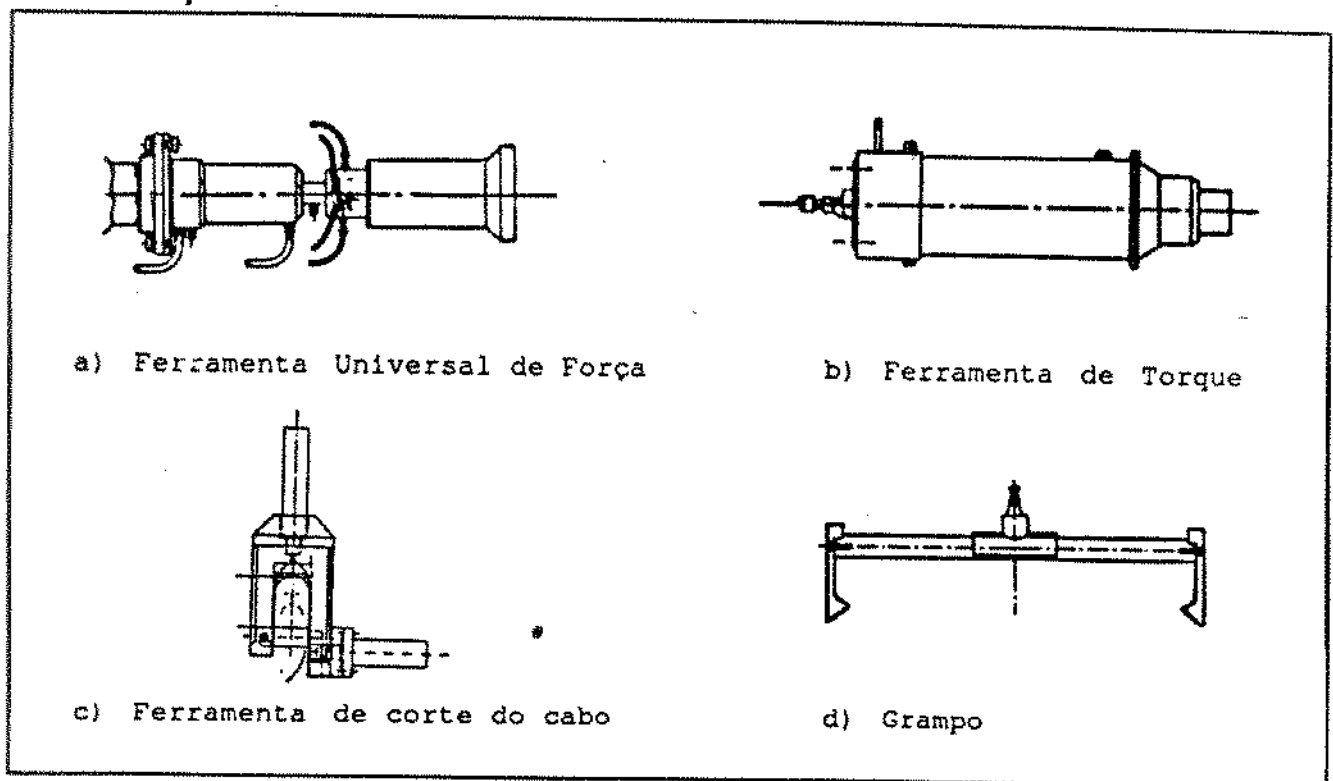


Figura 1.3: Ferramentas especiais desenvolvidas para os testes.

1.2 - PROGRAMAÇÃO OFF-LINE

A programação off-line consiste no desenvolvimento de um programa para a simulação gráfica de um cenário completo (sistema completo de manuseio, ferramentas diferentes, caixa de ferramentas, ambiente, etc.).

Para isso foi desenvolvido o modelo cinemático para o robô em estudo baseado em transformações homogêneas descrevendo as posições e as orientações das coordenadas das juntas. Com um sistema de programação modular em CAD obtém-se trajetórias que podem ser enviadas diretamente ao controlador do robô. Este software apresenta as seguintes características:

- utilização de material de baixo custo (computador compatível com a linha IBM-PC-AT);
- fácil interação com o operador;
- estrutura modular;
- simulação e visualização de tarefas;
- software completo de geração automática de trajetórias;
- transmissão de dados programa de Visualização - Interface de comunicação com o Robô, via linha serial RS-232;
- padronização dos arquivos de dados.

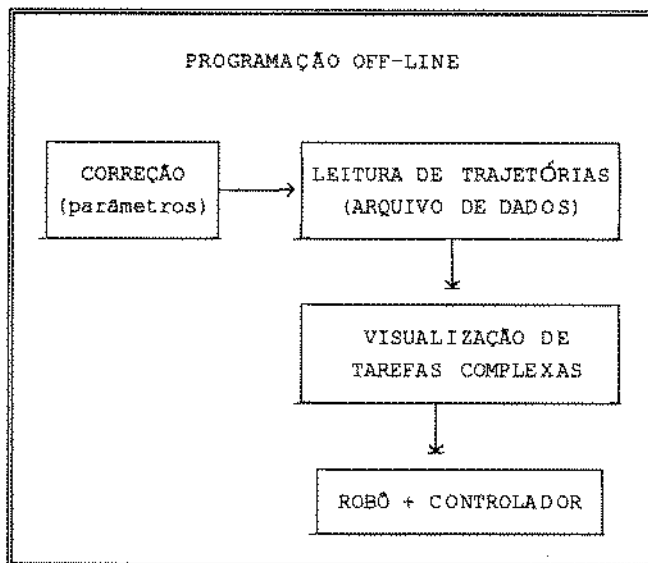


Figura 1.4: Estrutura de programação off-line.

O pacote computacional de programação off-line, (figura 1.4) consiste de um programa modular com as seguintes características:

- Criação de ferramentas e ambientes:

Um programa utilitário para a criação de arquivos contendo diferentes ferramentas e ambientes típicos. Uma imagem gráfica do cenário completo pode ser realizada:

- Simulação:

Um programa para simulação e visualização de um cenário completo, o qual contém o robô base móvel, diferentes ferramentas, acessórios, ambientes, etc. As principais características deste software são descritas abaixo:

- Simplicidade de utilização e modificação, com simples operações de interface;
- Modelo inverso simples de cadeias cinemáticas complexas representando o robô;
- Possibilidades de evitar colisões.

1.3 - CALIBRAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS

O modelo proposto da programação off-line considera somente a geometria do robô. O posicionamento de sistemas de trabalhos submarinos a partir de trajetórias construídas via CAD é desconhecida, e os efeitos dinâmicos em ambientes submarinos podem ser significativos tornando-se necessário introduzir algumas correções da tarefas do robô no seu local de trabalho.

Este procedimento de calibração é muito importante dentro do escopo deste projeto de pesquisa para um alto desempenho de tarefas do robô em estudo e, conseqüentemente, nosso objetivo é fornecer uma metodologia sistemática para o posicionamento e calibração de um robô industrial em um cenário submarino. Serão estudados os seguintes problemas:

- Calibração do robô

A construção de um dispositivo de medida X-Y-Z altamente preciso para calibração estática (identificação de parâmetros geométricos, precisão, repetibilidade, etc). A construção de um dispositivo de medida externa para calibração estática e dinâmica do robô para a calibração em ambiente sêco com cargas variadas.

- Posicionamento dinâmico

Posicionamento dinâmico (posicionamento do robô) considerando o espaço de trabalho (guiar um sensor de tato ou de proximidade para "tocar" a superfície sob investigação em vários pontos de modo a coletar informações);

- Monitoramento

Desenvolvido software para aquisição automática e tratamento dos sinais dos encoders de posição de cada junta do robô. Isto permitirá um estudo comparativo da trajetória real do robô e a trajetória imposta via programação off-line.

- Pré-inicialização

Utilização de um sistema laser, adequado para a identificação automática do vetor posição e a matriz de orientação do robô Manutec-r3 com relação ao painel de intervenção (interface com o programa off-line).

1.4 COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

No caso deste projeto específico, como já foi exposto anteriormente, apesar do robô utilizado ser um modelo industrial de grande precisão, possui capacidade de carga reduzida e como nestas operações existirão cargas variadas, inclusive ultrapassando sua capacidade, haverá erros de posicionamento quando trabalhar com grandes cargas devido à flexão nos seus três primeiros graus de liberdade. Isto justifica o estudo e a construção de um dispositivo externo de medidas para identificar estes erros, e consequente correções através de uma realimentação no controlador do robô.

O interesse deste trabalho de pesquisa, é de medir o comportamento da trajetória efetuada em relação aos sensores de posição do robô e na ponta da ferramenta, através de uma sistema externo de medição.

Para a comparação entre os resultados obtidos na UNICAMP e no GKSS, podemos considerar este comportamento com um critério, considerando que o hardware e o software são diferentes nos dois Centros de Pesquisa, como também são diferentes para os robôs utilizados e suas respectivas unidades de controle. A maquete também pode apresentar diferentes erros nas tolerâncias de suas medidas. Consequentemente, somente as tarefas a serem executadas são as mesmas.

Este trabalho propõe um método, de baixo custo, para solucionar estes problemas de execução imediata para o desenvolvimento dos trabalhos em ambiente a seco, que serão realizados na UNICAMP.

CAPÍTULO 2

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE CALIBRAÇÃO E MEDIDA DA PRECISÃO DE ROBÔS INDUSTRIAIS

A utilização de robôs para operações em fabricações de precisão, vem sendo estudado há vários anos. Robôs são versáteis e flexíveis e podem ser reprogramados com facilidade para realização de novas tarefas quando requerido. A utilização de robôs industriais em tarefas automatizadas exige uma grande precisão no posicionamento de seu elemento terminal.

Como foi apresentado no capítulo anterior, existe a necessidade de se garantir o posicionamento preciso do elemento terminal do robô em relação aos painéis de atuação fixos localizados nas extremidades da maquete onde o robô deverá atuar. Um dos objetivos deste trabalho consiste na verificação experimental do desempenho do robô, estático e dinâmico, e a identificação de seus principais parâmetros.

Conseqüentemente neste trabalho será construído um dispositivo mecânico para medida da precisão de um robô. Durante este capítulo inicialmente serão definidos os principais tipos de erros durante a realização de trajetórias em robôs industriais. A seguir serão descritos alguns métodos utilizados para medida de precisão, e finalmente será apresentado um dispositivo experimental que permita medirmos as trajetórias do robô em relação ao seu elemento terminal a ser desenvolvido neste trabalho.

2.1 - POSICIONAMENTO DO PROBLEMA

O problema do deslocamento dos robôs em operações em ambiente comum, exige uma padronização geométrica. Para isso temos que satisfazer as seguintes condições:

• Em uma intervenção robotizada, os movimentos do robô são uma sucessão de trajetórias. Aparecem dois espaços de operação em correlação para troca de coordenadas diretas e inversas, (espaço operacional cartesiano e o espaço de coordenadas generalizadas).

• A otimização dos movimentos consiste, em função do grau de precisão do reconhecimento geométrico a priori, e a possibilidade de comando a partir das informações dos encoders, a definir um conjunto de posições efetuadas.

As modificações de coordenadas (entrada), supondo uma modelagem de robôs, determina um compromisso entre a complexidade do modelo construído e a precisão do sistema eletrônico de medida.

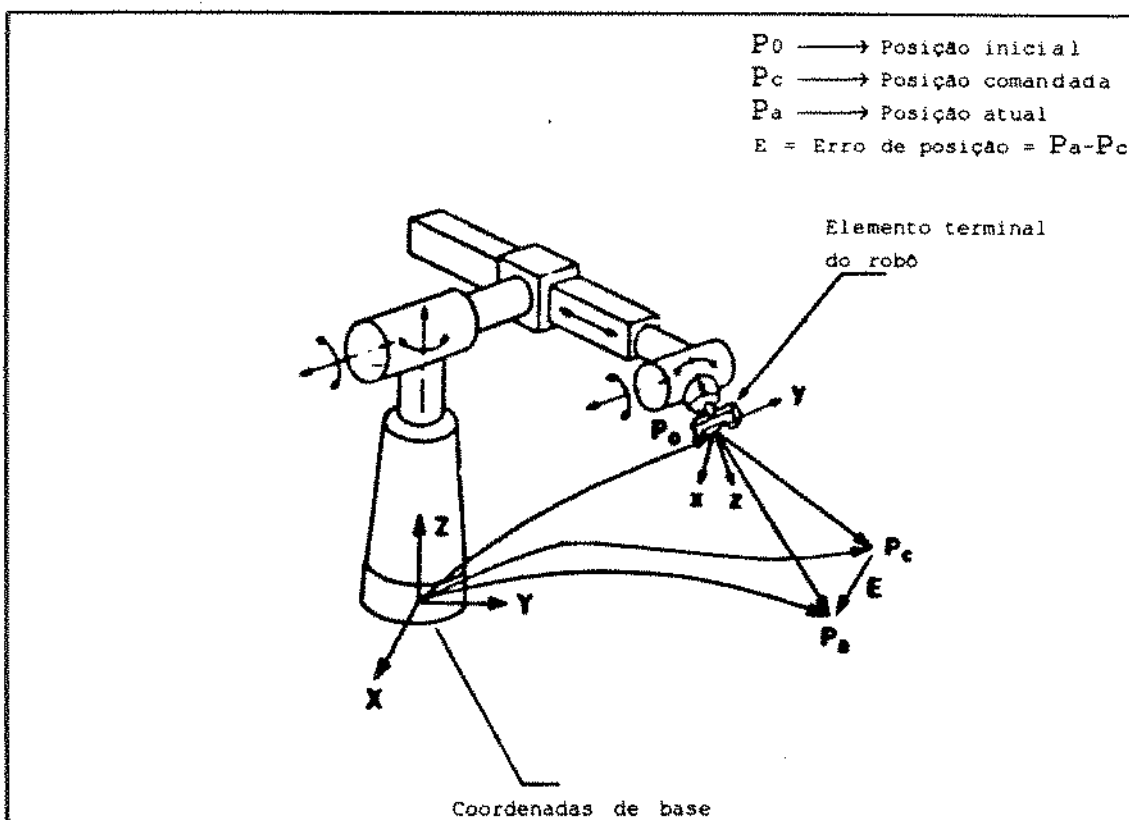


Figura 2.1: Robô com seu elemento terminal posicionado em um dado ponto de seu volume de trabalho.

A figura 2.1 mostra um robô realizando uma determinada tarefa, ou seja, ele é comandado para um ponto P_c ($X_c, Y_c, Z_c, \alpha_c, \beta_c, \gamma_c$), quando de fato, vai para P_a ($X_a, Y_a, Z_a, \alpha_a, \beta_a, \gamma_a$).

X, Y, Z e α, β, γ são respectivamente, as coordenadas de posição e ângulos de orientação para o elemento terminal do robô.

A diferença entre o ponto atual e o ponto comandado P_c é chamado de erro de posição. A cinemática atual e o modelo cinemático usado para posicionar e controlar o robô são diferentes, conseqüentemente haverá um erro de posicionamento. A seguir serão apresentados os diferentes fatores que afetam a capacidade de um robô posicionar com precisão o seu elemento terminal.

2.2 - CAUSAS DOS ERROS DE POSICIONAMENTO

Os transdutores de posição de um robô são geralmente montados à frente de redutores de velocidade localizados geralmente entre a árvore motriz e o eixo mecânico das ligações com outras articulações. Se ignorarmos a deformação da estrutura mecânica, as folgas, os atritos, os defeitos de orientação dos eixos, etc., os resultados obtidos durante a simulação numérica, comparados com as leituras dos transdutores de posição não se mostram confiáveis para medir a posição real do elemento terminal do robô. A tabela 2.1 apresenta os principais tipos de erros a serem considerados.

ERRO	PRINCIPAIS CUSAS
GEOMÉTRICOS	Imprecisões devido à fabricação
OPERACIONAL	Engrenagens, folgas, atritose variações inerciais
AMBIENTAL	Temperatura, umidade, ruídos elétricos
COMPUTACIONAL	Aproximações, linearidade
MEDIDAS	Resolução, não linearidade ds encoders
APLICAÇÃO	Instalação inadequada

Tabela 2.1: Erros de medida e suas causas.

Com objetivo de medir a posição real de um robô no espaço de trabalho e estudar os problemas de desempenho do mesmo, (estático e dinâmico) torna-se necessário que o sistema de calibração utilizado satisfaça os seguintes critérios:

- Posicionamento em torno dos pontos pré-programados (precisão estática e dinâmica, repetibilidade, etc);
- Possibilidade de realização de trajetórias e velocidades do robô estudado;

A figura 2.2 apresenta de maneira geral, uma classificação das medidas de desempenho durante o posicionamento de robôs industriais.

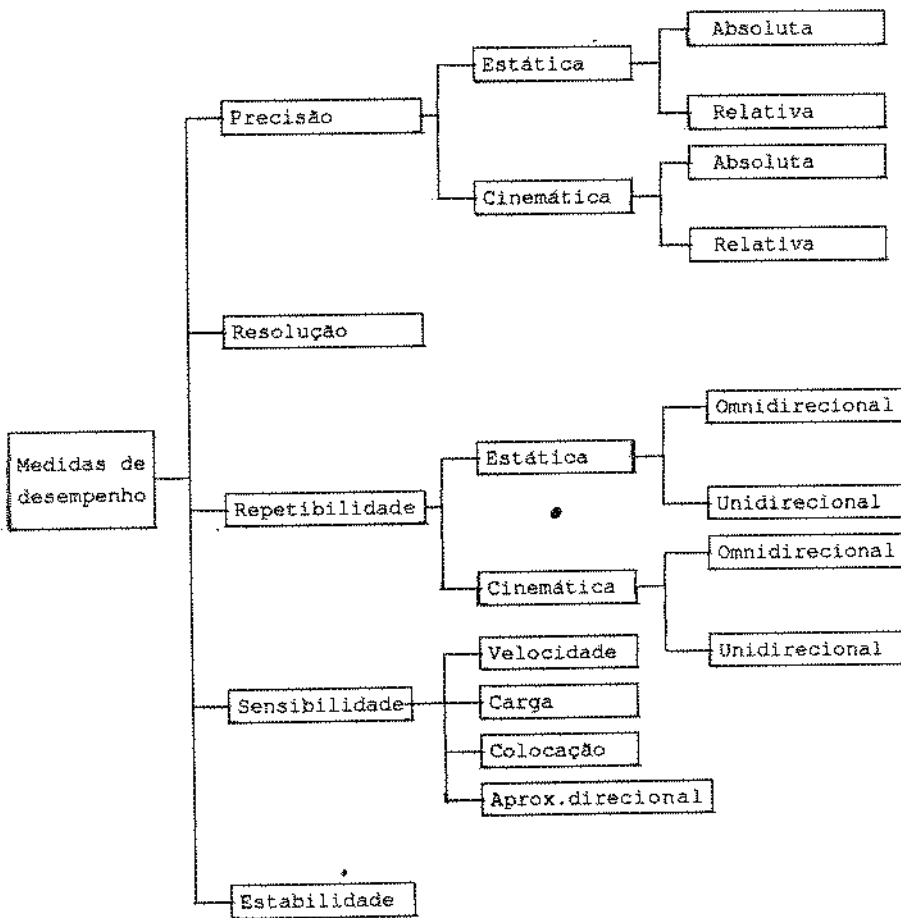


Figura 2.2: Classificação do posicionamento de um robô e sua avaliação de medida de desempenho.

2.3 - DEFINIÇÕES PARA A AVALIAÇÃO DE POSICIONAMENTO DE ROBÔS

Para a caracterização destes erros são apresentados as seguintes definições, conforme a norma E 61-1104 [1]

• **Precisão Estática**

A precisão estática de posicionamento de um robô caracteriza o grau de coincidência entre a posição realmente atendida pelo seu elemento terminal e o ponto programado. Geralmente os ensaios são conduzidos a cargas nominais e de operação.

• **Precisão Dinâmica**

A precisão dinâmica mede o erro existente entre a trajetória real e a trajetória programada. Precisão estática e dinâmica são funções de três fatores:

- Flexibilidade da estrutura mecânica.
- Folga das articulações.
- Erro de dependências.
- Velocidade.
- Complexidade da trajetória.

• **Repetibilidade**

A medida quantitativa da capacidade do robô posicionar seu elemento terminal nas mesmas localizações para traçar um caminho sobre o anterior. A repetibilidade estática refere-se a uma localização enquanto a repetibilidade cinemática é quando se leva em consideração a trajetória realizada para chegar a uma localização desejada.

• **Resolução**

A mínima alteração incremental nas coordenadas do elemento terminal do robô, que resultam nas mínimas alterações dos valores das variações de juntas.

• **Sensibilidade**

O efeito ou influência sobre a posição ou repetibilidade própria para alterar parâmetros internos ou externos do sistema robótico. A localização do elemento terminal, a carga nominal, velocidade do robô na região de trabalho, e direções de aproximações são parâmetros que são normalmente considerados na investigação da sensibilidade do robô.

• **Estabilidade**

A medida da capacidade do robô de manter sua estrutura fixa (sem oscilações) sobre a influência das oscilações externas.

• **Reversibilidade**

A medida quantitativa da capacidade do robô posicionar seu elemento terminal nas mesmas localizações. A sua diferença conceitual com o conceito da repetibilidade, é que o robô deve posicionar seu elemento terminal no ponto usando a mesma trajetória, enquanto que no erro de reversibilidade este posicionamento é realizado com trajetórias diferentes.

A figura 2.3 apresenta de uma maneira prática a visualização dos conceitos de precisão e repetibilidade.

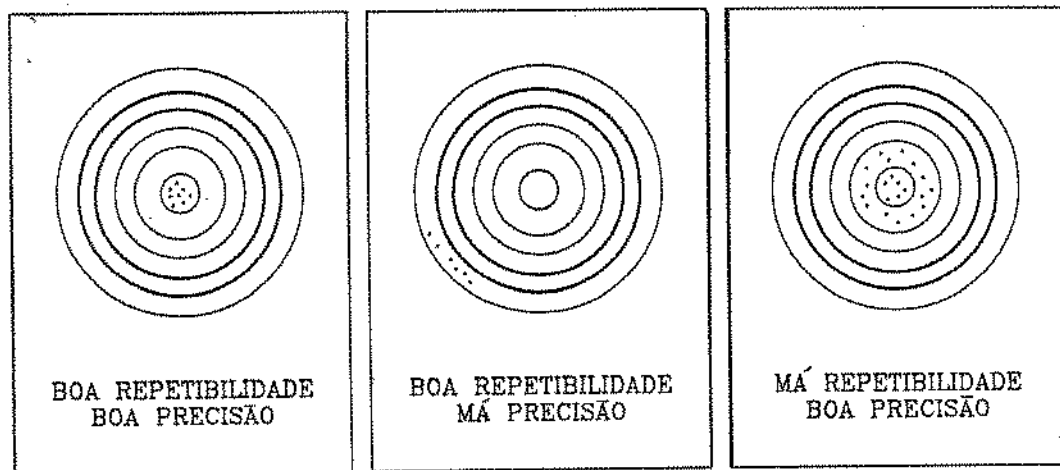


Figura 2.3: Precisão e Repetibilidade.

2.4 - MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO EXISTENTES

2.4.1 - Critérios para avaliação do desempenho de robôs

Para a avaliação do desempenho de um robô, deve-se desenvolver um sistema apropriado de medidas. As características desse sistema devem ser:

- A capacidade de estimar os principais desempenhos do robô em todo o seu volume de trabalho;
- Estimar a reversibilidade, ele deve permitir acesso a todas as posições dentro do volume de trabalho;
- Estimar o posicionamento completo do elemento terminal do robô dentro de seu referencial da base R_0 ;
- Poder medir diferentes situações dentro de um intervalo de tempo relativamente curto;
- Não modificar o comportamento do robô no momento das medidas;
- A capacidade de medir a evolução dinâmica do robô no volume de trabalho;
- Possuir uma boa precisão (resolução inferior à 1/10mm).

Atualmente vários métodos experimentais são utilizados pela indústria para a calibração de dispositivos robóticos. neste item serão apresentados uma descrição resumida dos principais métodos de calibração existentes. A figura 2.4 apresenta um resumo destes métodos e o aparato experimental necessário para a sua implementação.

i) Método de medida com dispositivo e encoder

Consiste de um dispositivo externo de medição com contato, utilizado industrialmente, possuindo uma precisão de 34 μm . Uma barra com uma escala linear desloca-se sobre rolamentos de precisão dentro de uma caixa. Esta caixa possui um eixo horizontal no qual está acoplado um encoder incremental possibilitando movimentos angulares da barra. Este conjunto é sustentado sobre uma base com um eixo vertical que também possui acoplado um encoder incremental. No elemento terminal do robô existe um sistema esférico o qual possibilita os movimentos em um plano tridimensional.

SISTEMAS DE CALIBRAÇÃO E MEDIDA	
DESCRIÇÃO DO MÉTODO	PRINCIPAIS COMPONENTES
Dispositivo e encoder tipo-contato	Réguas graduadas encoders
Teodolitos tipo não-contato	3 teodolitos fibra ótica fonte laser
Rastreamento laser tipo não-contato	fonte laser espelho refletor controle
Rastreamento com 2 câmeras tipo não-contato	2 câmeras de vídeo leds p/ emissão de luz infravermelha

Figura 2.4: Principais métodos de calibração e medida de precisão utilizados pela indústria.

O sistema externo de medida, então, acompanha o posicionamento do elemento terminal do robô num espaço de trabalho esférico no qual, através da barra graduada e dos encoders acoplados nos eixos horizontais e verticais, obtém-se de suas leituras os parâmetros de posicionamento do robô.

Este sistema está acoplado em microcomputadores que tratam adequadamente estes parâmetros de posicionamento e ainda armazenam estes dados para futuras calibrações, possibilitando realimentações automatizadas no sistema robótico.

ii) Método usando teodolitos

Este método utiliza a técnica de triangularização (não existe contato), usando três teodolitos para determinar um objetivo comum fixado no elemento terminal do robô (figura 2.5).

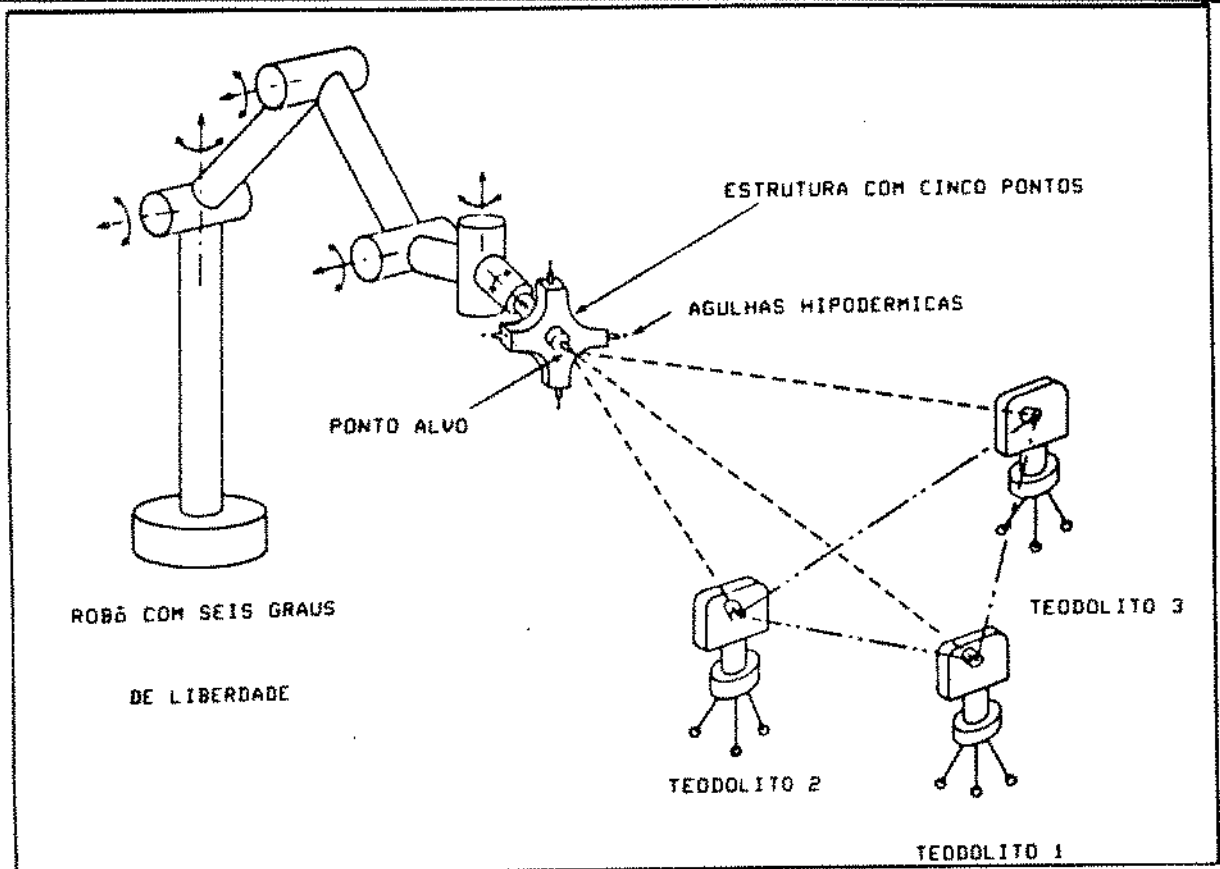


Figura 2.5: Utilização de teodolitos para medida de precisão de um robô industrial.

A triangularização é um método pelo qual uma posição cartesiana tridimensional de um ponto é determinada pelo "avistamento" obtido por dois ou mais teodolitos. A medida angular horizontal e vertical determinada pelos teodolitos, são geralmente registradas em ordem para produzir cinco pontos localizados em um acessório em forma de estrela de 5 (cinco) pontas localizado no elemento terminal do robô. Em cada um destes cinco pontos existe uma agulha que possui um cabo de fibra ótica, que possui na sua extremidade livre uma minúscula esfera de 0.3mm. Para a outra extremidade do cabo existe uma fonte de laser que ilumina a esfera minúscula. Atravessando estas esferas iluminadas continuamente através dos teodolitos, a avaliação de posicionamento do elemento terminal do robô é realizada. A precisão deste sistema de medidas está na ordem de 2.5 μm .

iii) Método de rastreamento laser

Consiste de um sistema interferométrico automático de rastreamento laser (figura 2.6).

Este método envolve o rastreamento do elemento terminal do robô através de uma barra, que é uma fonte laser que mira um espelho alvo colocado no elemento terminal do robô, em uma distância conveniente longe do robô. O rastreamento é conseguido por reflexão da fonte laser através do espelho alvo. A mira da fonte e o espelho são servo controlados por um microprocessador dedicado para retornar à fonte laser origem que através de um controlador, realimenta o sistema de modo que a mira da fonte acompanhe os movimentos do espelho refletor do laser. O sistema interferométrico fornece parâmetros precisos de distância e os ângulos do espelho rastreado.

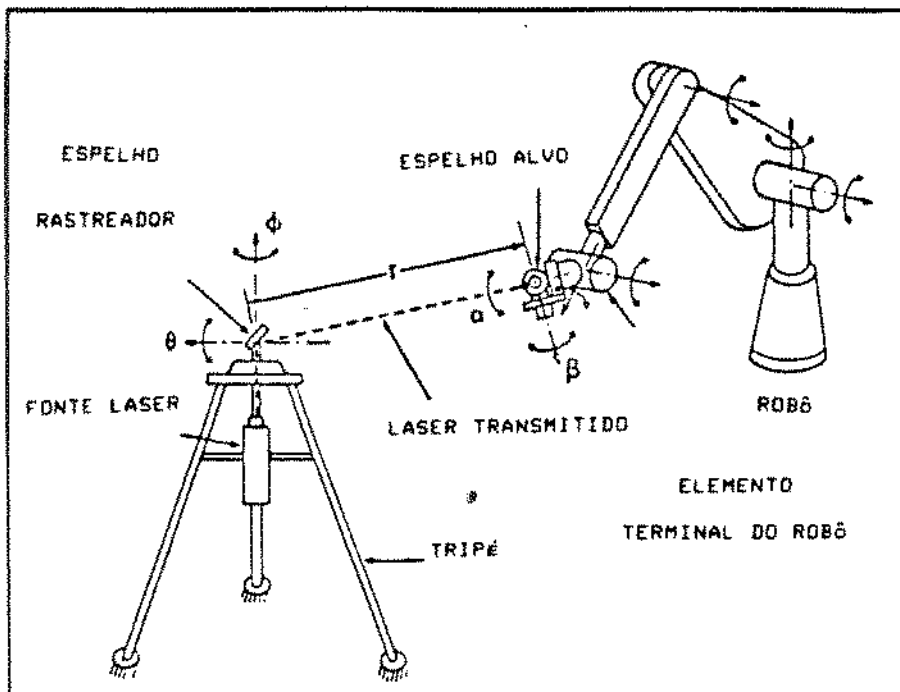


Figura 2.6: Utilização do método de rastreamento com lasers para medida de precisão de um robô industrial.

iv) Método de rastreamento com duas câmeras

Este método de duas câmeras envolve o rastreamento do objeto iluminado fixado no elemento terminal do robô, via câmeras posicionadas numa distância conhecida (figura 2.7). A imagem da objetiva é projetada sobre um plano fotoelétricamente sensível localizado em um plano focal de uma câmera. A informação da imagem recebida por duas câmeras é eletronicamente processada pela apuração instantânea da localização da mira.

Na calibração são usados "leds" para a emissão de luz infravermelha para rastrear a trajetória do movimento do robô e analisar o posicionamento. É sugerido que este processo seja usado em ambientes de laboratório com ambiente controlado, porque erros podem ser introduzidos na própria medida pela reflexão da luz infravermelha nas superfícies das objetivas dentro do campo de visão da câmera.

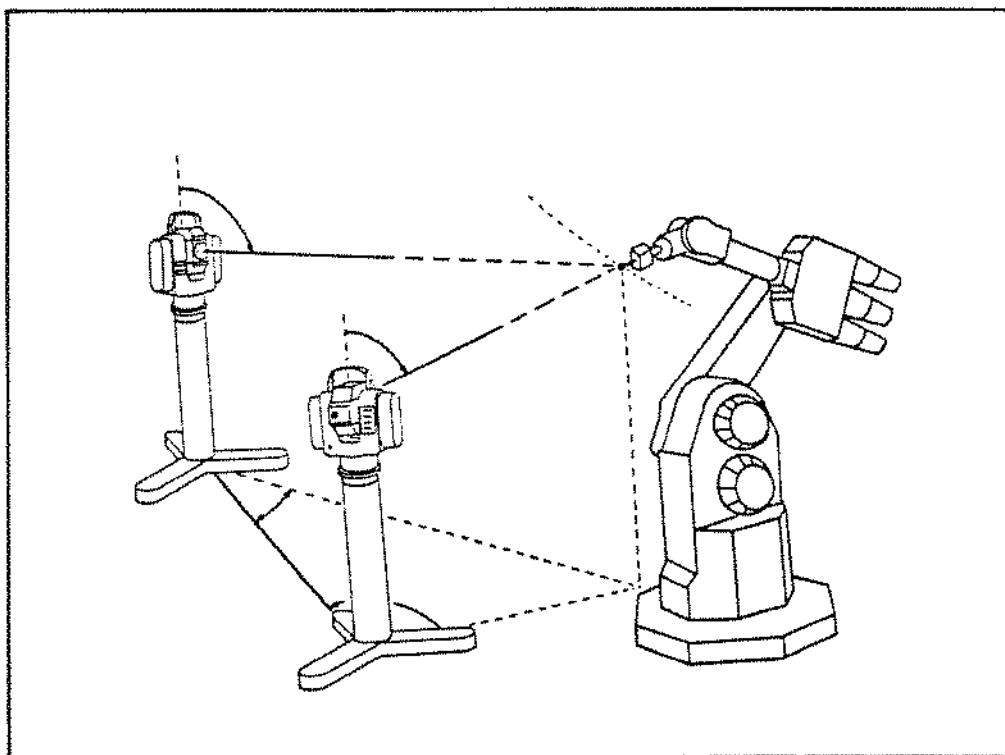


Figura 2.7: Utilização do método de rastreamento com duas câmeras para medida de precisão de um robô industrial.

2.5 - ESTUDO DO ERRO DE POSICIONAMENTO DO ROBÔ EM FRENTE AO PAINEL

Existe a necessidade do desenvolvimento de procedimentos para implementar um software para a identificação do posicionamento do robô em relação a um plano de trabalho.

Neste processo de calibração é necessário o conhecimento exato deste posicionamento para identificar o referencial do sistema externo em relação ao referencial do robô. Deve-se verificar os erros de paralelismo e perpendicularismo dos eixos sucessivos. Para isto foi desenvolvido um método que consiste de 4 fases:

1. Usando o modelamento do robô, deve-se encontrar a melhor função que relacione os parâmetros deste posicionamento, e a posição do elemento terminal em relação ao seu sistema de coordenadas;
2. Obter as medidas deste posicionamento usando um dispositivo externo de verificação;
3. Identificar os parâmetros através de um algoritmo, que usa uma entrada de medidas geradas na segunda fase, utilizando a técnica dos mínimos quadrados;
4. Correção no controle, consistindo dos valores dos parâmetros identificados, no software de controle e de programação off-line do robô.

A partir da utilização da sistemática de Denavit-Hartenberg, faz-se a modelagem do robô, que será apresentada no próximo capítulo.

2.6 - APRESENTAÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE CALIBRAÇÃO DE ROBOS

Com o objetivo de conhecermos o comportamento real do elemento terminal, tanto para medida de precisão como para analisarmos o comportamento de sua trajetória, foi desenvolvido um sistema constituído de três encoders de posição montados nos vértices de um triângulo de medida e de um sistema de aquisição de sinais (figura 2.8).

A principal vantagem deste método é o baixo custo, e a capacidade de medirmos, com boa precisão, o comportamento dinâmico do elemento terminal do robô.

O robô deve se deslocar (junta 2 e 3) sobre o plano do triângulo. O sistema de encoders são constituídos de uma polia sobre a qual se enrola um cabo através de uma peça ligada ao elemento terminal do robô.

O encoder ligado na polia lê um número de pulsos proporcional ao comprimento deslocado de uma posição inicial até a posição atual. A partir de um sistema de aquisição de dados via microcomputador, é realizado o armazenamento de todos os pontos durante a execução de uma trajetória pré-determinada.

A seguir são executadas várias trajetórias e vários pontos determinados pelo controlador do robô e durante estas evoluções são registrados os parâmetros e posteriormente são comparados.

Para isso são utilizados 2 microcomputadores, um para aquisição dos sinais dos encoders do robô (2 juntas) e um outro para aquisição dos sinais dos encoders do triângulo de medidas. Estes sinais são sincronizados utilizando a mesma base de tempo e um sinal

A partir do tratamento matemático dessas informações, torna-se possível a medida do erro existente entre a trajetória real e a trajetória utilizada pelo controlador, obtido a partir do modelo do robô e informações dos encoders de posição do dispositivo.

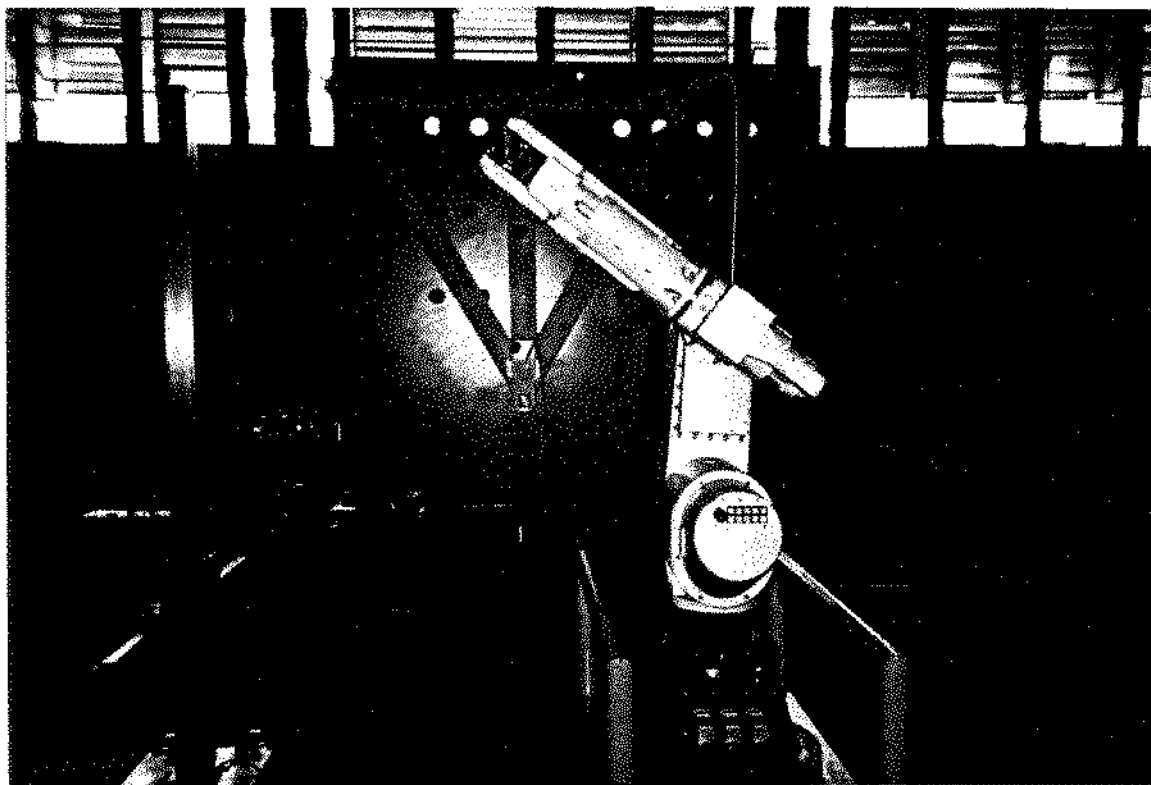


Figura 2.8: Dispositivo para calibração e medida desenvolvido.

A figura 2.9 apresenta um resumo do sistema de medida proposto com suas equações principais e a comparação do sistema de medida externo com os sinais dos transdutores de posição do robô. A descrição detalhada metodologia utilizada será apresentada no próximo capítulo.

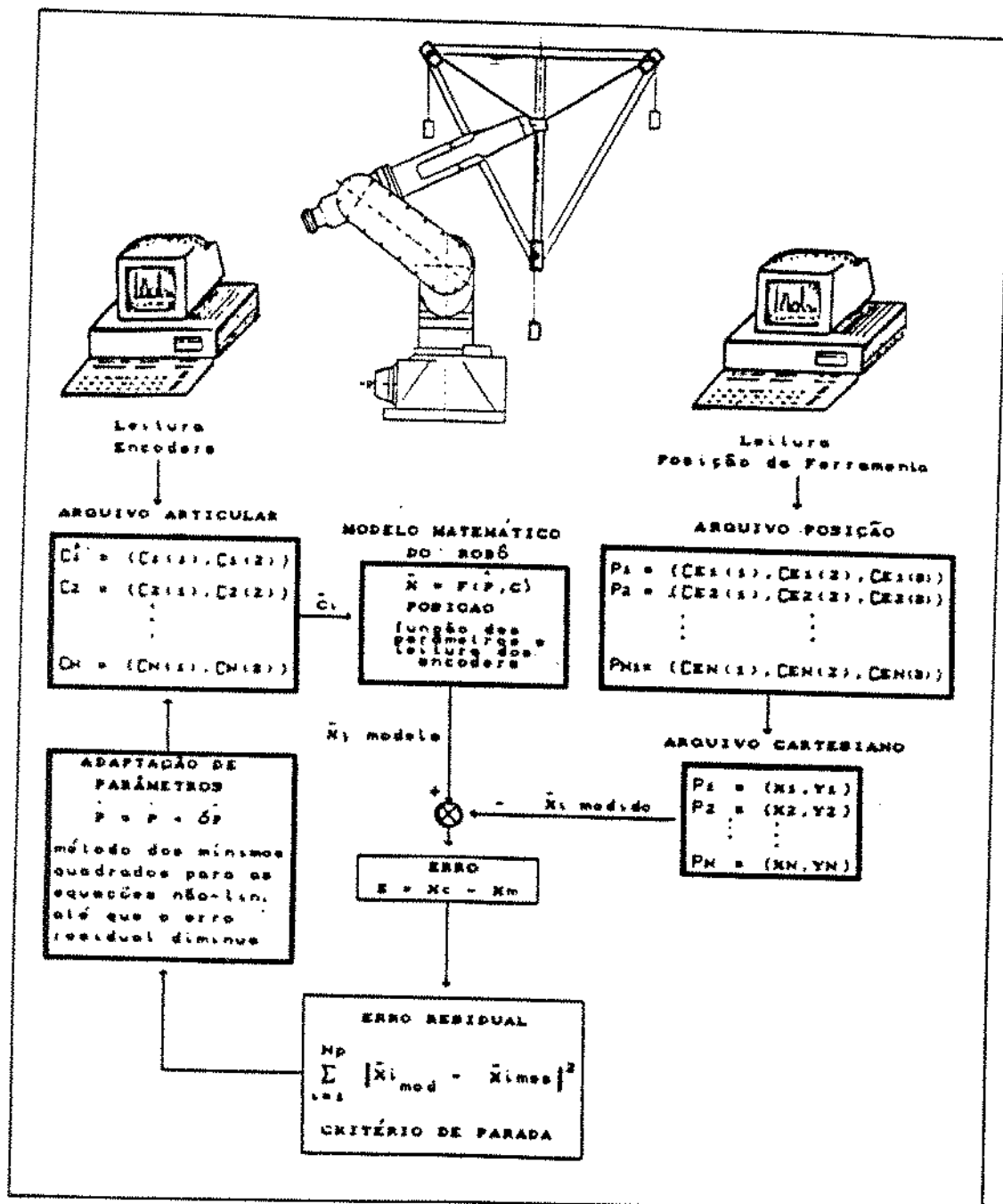


Figura 2.9: Esquema geral do sistema de calibração e medida proposto.

Destaca-se que teóricamente apenas 2 encoders para determinar a posição exata do elemento terminal do robô em qualquer ponto do triângulo de medidas. Entretanto para obtermos uma calibração mais precisa do elemento terminal do robô é recomendado utilizar um número mínimo de três encoders. Isto permite, como mostra a figura 2.10, uma redução da zona de erro.

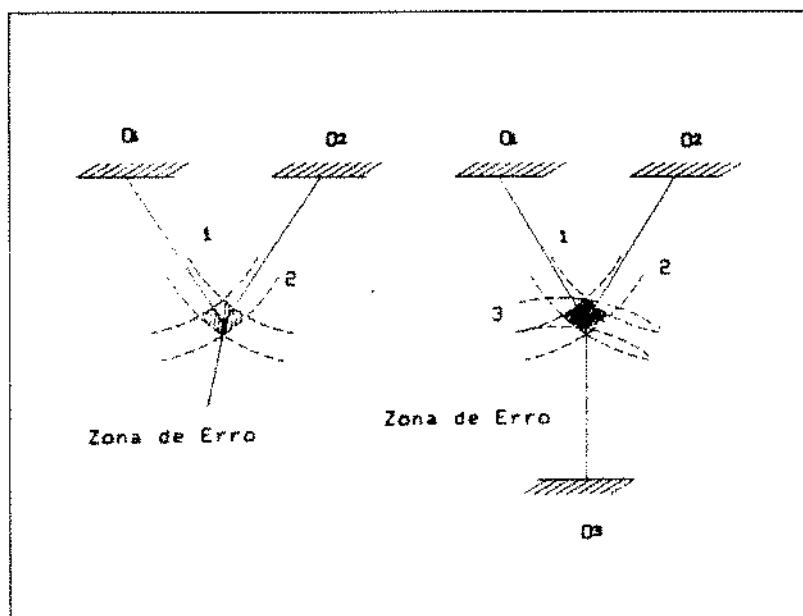


Figura 2.10: Justificativa para o uso de três encoders.

CAPÍTULO 3

SISTEMA EXPERIMENTAL PROPOSTO

No capítulo 2 foi abordado o problema de medida de acurácia e precisão de robôs, com a descrição de diferentes dispositivos utilizados pela indústria.

Neste capítulo será desenvolvido as ferramentas matemáticas para a verificação da precisão do elemento terminal. Para isso será apresentado o modelo geométrico do robô em estudo e a seguir o desenvolvimento matemático do método de calibração proposto neste trabalho.

Não é objetivo deste trabalho a abordagem dos algoritmos de controle de junta, visto ser este assunto objeto de interesse de outros trabalhos de pesquisa do Laboratório de Automação e Robótica da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP [6], sendo que os algoritmos estudados e testados no citado trabalho são aproveitados integralmente para uso no sistema em desenvolvimento.

A necessidade do modelo geométrico direto é necessário para comparar a posição de seu elemento terminal com relação aos resultados obtidos a partir de um sistema externo de medidas.

Para o desenvolvimento dos algoritmos apresentados neste capítulo, foi utilizado um modelo do robô industrial Manutec-r3, de seis graus de liberdade. A seguir são apresentados a metodologia para a identificação dos parâmetros deste robô através do sistema externo de medidas.

3.1 - MODELAGEM DO ROBÔ

Neste estudo, como já visto, existe a necessidade do cálculo do modelo geométrico do robô, que será útil para a comparação da posição do elemento terminal em relação ao seu controlador e pelo sistema externo de medidas (figura 3.1).

Como a metodologia pode ser extendida a outros manipuladores, consideremos um robô com "n" graus de liberdade cuja configuração seja definida por "n" coordenadas:

$$q_1, q_2, \dots, q_n$$

onde q_i é denominado coordenadas generalizadas do robô. A situação da ferramenta ou elemento terminal, por sua vez, é definida por "m" coordenadas designadas por w_1, w_2, \dots, w_m .

A descrição completa do elemento terminal terá seis coordenadas (três para posicionamento e três para orientação) ditas coordenadas operacionais e designadas por w_m , com $m \leq 6$.

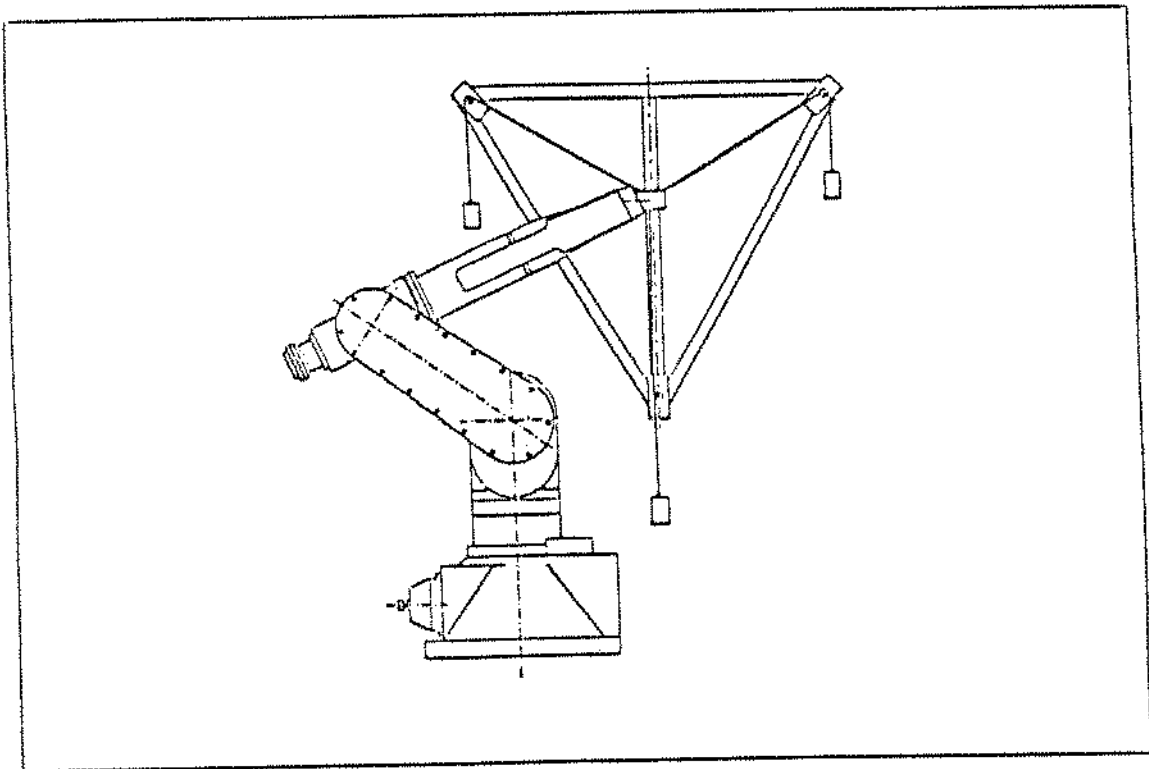


Figura 3.1: Montagem do robô em relação ao dispositivo externo de medidas.

3.1.1 Modelo Geométrico Direto

O modelo geométrico direto de um robô é a função "f" que permite exprimir a situação do elemento terminal, em termos de posição e orientação, conhecendo-se a configuração assumida pelo robô.

Assim sendo, "W" a matriz coluna, de dimensão $n \times 1$, das coordenadas generalizadas, o modelo geométrico do robô é obtido a partir de:

$$W = f(q) \quad (3.1)$$

Uma maneira muito empregada baseia-se na vinculação de sistemas de coordenadas ortonormais convenientes ($B_i, i = 0, 1, \dots, n$), a cada um dos " $n + 1$ " corpos identificáveis a partir da cadeia cinemática do robô, e condensa as informações de posição e de orientação do elemento terminal numa matriz 4×4 , denominada matriz de transformação homogênea.

Por exemplo, para o robô Manutec-r3, que possui seis graus de liberdade apresentado na figura 3.2, se convencionarmos " θ_1 " o ângulo entre versores " $X_{(i-1)}$ " e " X_i " medido em torno de " $Z_{(i-1)}$ ", teremos o vetor,

$$q = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6)^T \quad (3.2)$$

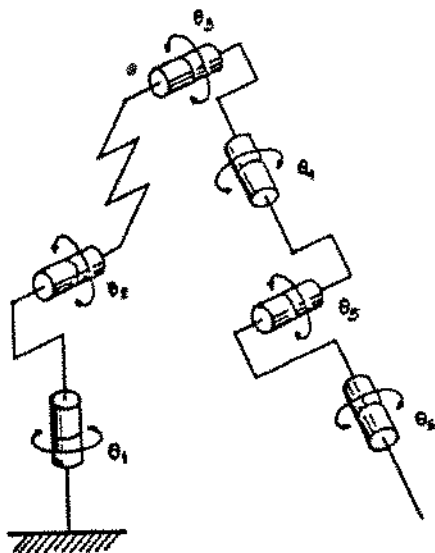


Figura 3.2: Sistema de coordenadas generalizadas correspondente aos seis graus de liberdade do robô.

Se o mesmo for conhecido, a configuração do robô estará completamente definida desde que as dimensões do mesmo sejam perfeitamente conhecidas.

As coordenadas operacionais do robô podem ser vistas na figura 3.3, serão dadas por:

- POSIÇÃO: coordenadas cartesianas do ponto "O_s" em relação à base ortonormal (X_m, Y_m, Z_m); e
- ORIENTAÇÃO: cossenos diretores de cada um dos versores n, s, a em relação aos eixos "X₀", "Y₀", e "Z₀".

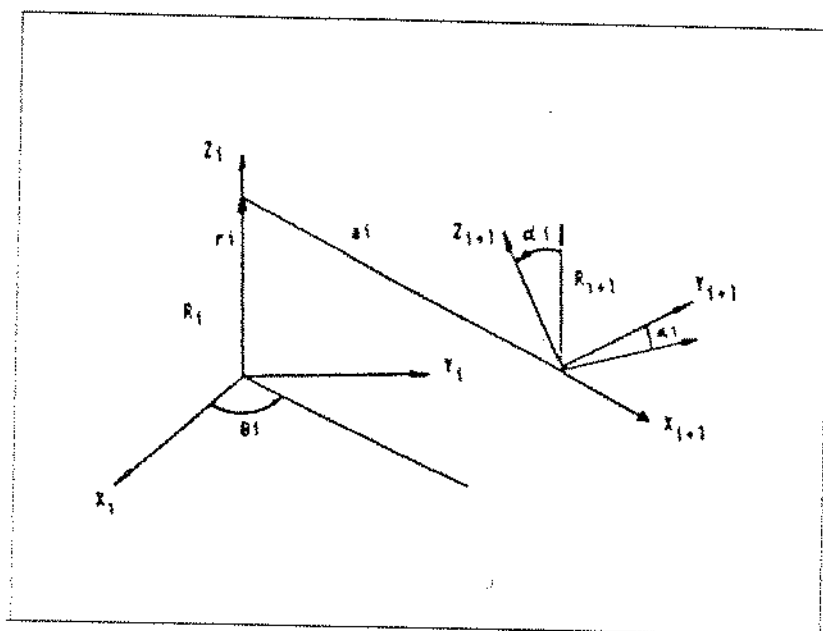


Figura 3.3: Coordenadas cartesianas descrevendo a posição e orientação do elemento terminal do robô

Neste estudo não será de interesse a orientação do elemento terminal, visto que queremos verificar os erros nos "links" de maior dimensão do robô em um plano de medida correspondente a um painel de atuação e na evolução de trajetórias, consequentemente a orientação é constante.

A metodologia poderá ser estendida para uma medida espacial, mas não será objetivo deste trabalho, onde a orientação do elemento terminal pode variar durante uma dada trajetória.

3.1.2 Modelo do robô utilizado

Durante nosso estudo o robô Manutec-r3, que possui seis juntas rotacionais. Os parâmetros de Denavit e Hartenberg desse robô são apresentados na tabela 3.1.

JUNTA	θ (deg)	d (mm)	α (deg)	a (mm)	REPRESENTAÇÃO
1	θ_1	665.0	-90.0	0.0	
2	θ_2	0.0	0.0	500.0	
3	θ_3	0.0	90.0	0.0	
4	θ_4	830.0	-90.0	0.0	
5	θ_5	0.0	90.0	0.0	
6	θ_6	99.5	0.0	0.0	

Tabela 3.1: Parâmetros de D.H. para o robô Manutec r-3.

$$\begin{aligned}
 A_{0,1} &= \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & C_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & A_{1,2} &= \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2.C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & a_2.S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_{2,3} &= \begin{bmatrix} C_3 & 0 & S_3 & 0 \\ S_3 & 0 & -C_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & A_{3,4} &= \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_{4,5} &= \begin{bmatrix} C_5 & 0 & S_5 & 0 \\ S_5 & 0 & -C_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & A_{5,6} &= \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

onde C_i e S_i significam $\cos(\theta_i)$ e $\sin(\theta_i)$, respectivamente.

Tabela 3.2: Matrizes $A_{i-1,i}$ para o robô Manutec-r3.

Utilizando os parâmetros de Denavit-Hartenberg apresentados na tabela 3.1, obtém-se as matrizes $A_{i-1,i}$ descritas na tabela 3.2. Esta tabela apresenta um conjunto de matrizes, onde cada uma representa uma transformação de coordenadas de um *link* i em relação ao *link* $i-1$ a que este está ligado.

A transformação de coordenadas entre o referencial do último *link* (elemento terminal) e o sistema de referência fixo do robô é dada pela seguinte relação:

$$T_6 (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6) =$$

$$A_{0,6} = A_{0,1} \cdot A_{1,2} \cdot A_{2,3} \cdot A_{3,4} \cdot A_{4,5} \cdot A_{5,6} \quad (3.4)$$

Esta relação pode ser expressa na forma matricial mostrada abaixo:

$$\begin{bmatrix} \underline{n} & \underline{s} & \underline{a} & : & \underline{p} \\ \dots & \dots & \dots & : & \dots \\ & 0 & & : & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

onde:

a matriz $[\underline{n} \quad \underline{s} \quad \underline{a}]$ representa a orientação e o vetor \underline{p} a posição do elemento terminal no interior do volume de trabalho.

A operação de multiplicação dessas matrizes fornece as seguintes expressões para os vetores de posição e orientação do efetuador do robô em relação às coordenadas do referencial da base:

• Expressões do vetor Posição:

$$\begin{aligned} p_x &= \{(C_4 S_5 d_6) \cdot C_{23} + (C_5 d_6 + d_4) \cdot S_{23} + a_2 C_2\} \cdot C_1 - \{S_4 S_5 d_6\} \cdot S_1 \\ p_y &= \{(C_4 S_5 d_6) \cdot C_{23} + (C_5 d_6 + d_4) \cdot S_{23} + a_2 C_2\} \cdot S_1 + \{S_4 S_5 d_6\} \cdot C_1 \\ p_z &= -(C_4 S_5 d_6) \cdot S_{23} + (C_5 d_6 + d_4) \cdot C_{23} - a_2 S_2 + d_1 \end{aligned} \quad (3.6)$$

• Expressões do vetor Orientação :

$$\begin{aligned}
 n_x &= \{(C_1C_{23}C_4 - S_1S_4) \cdot C_5 - C_1S_{23}S_5\} \cdot C_6 + \{-C_1C_{23}S_4 - S_1C_4\} \cdot S_6 \\
 n_y &= \{(S_1C_{23}C_4 + C_1S_4) \cdot C_5 - S_1S_{23}S_5\} \cdot C_6 + \{-S_1C_{23}S_4 + C_1C_4\} \cdot S_6 \\
 n_z &= \{-S_{23}C_4C_5 - C_{23}S_5\} \cdot C_6 + S_{23}S_4S_6 \\
 \\
 s_x &= -\{(C_1C_{23}C_4 - S_1S_4) \cdot C_5 - C_1S_{23}S_5\} \cdot S_6 + \{-C_1C_{23}S_4 - S_1C_4\} \cdot C_6 \\
 s_y &= -\{(S_1C_{23}C_4 + C_1S_4) \cdot C_5 - S_1S_{23}S_5\} \cdot S_6 + \{-S_1C_{23}S_4 + C_1C_4\} \cdot C_6 \\
 s_z &= \{S_{23}C_4C_5 + C_{23}S_5\} \cdot S_6 + S_{23}S_4C_6 \\
 \\
 a_x &= (C_1C_{23}C_4 - S_1S_4) \cdot S_5 + C_1S_{23}C_5 \\
 a_y &= (S_1C_{23}C_4 + C_1S_4) \cdot S_5 + S_1S_{23}C_5 \\
 a_z &= -S_{23}C_4S_5 + C_{23}C_5
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

A partir dessas expressões pode-se também escrever a orientação em função dos ângulos de Euler, cujas relações com os vetores n , s e a são descritas nas equações 3.7 Portanto uma outra possível forma de representação é:

$$T_6(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_6) = (p_x, p_y, p_z, \psi, \theta, \phi) \tag{3.8}$$

onde:

ψ , θ e ϕ são ângulos de Euler;
 p_x , p_y e p_z são componentes cartesianas da posição do elemento terminal.

3.2 - SISTEMA DE CALIBRAÇÃO-ALGORÍTIMO

3.2.1 Modalidade dos ensaios

A partir do conhecimento do modelo geométrico do robô, nosso objetivo será concentrado no desenvolvimento de uma metodologia para a validação deste estudo.

O robô pode ser programado previamente por aprendizagem de modo a se movimentar no plano do triângulo de medidas. Vários ciclos são efetuados automaticamente, e os resultados obtidos a partir da aquisição dos sinais dos encoders (E_1 , E_2 , E_3) situados nos vértices do triângulo de medidas, permitindo a obtenção da trajetória real do robô que deverá ser comparado à trajetória teórica (a partir do modelo geométrico exposto anteriormente).

A posição do ponto M procurado é dado por:

$$\begin{aligned} X_m &= f(l_1) \\ Y_m &= f(l_2) \\ Z_m &= f(l_3) \end{aligned} \quad (3.9)$$

onde l_1 , l_2 , l_3 : são os comprimentos dos fios desenrolados proporcionalmente a uma tensão aplicada pelo robô.

A calibração do robô comporta duas fases:

- O campo de medidas;
- A identificação propriamente dita.

A primeira etapa consiste na elaboração de trajetórias para o robô em várias situações conhecidas, relativamente a um referencial de trabalho (RGC).

Para cada uma de suas posições, a leitura e tratamento dos sinais dos encoders externos colocados na extremidade do triângulo de medidas fornecem as entradas do modelo real, enquanto que a leitura e tratamento das informações dos encoders de posição de cada junta, fornecerá a posição utilizada no controlador do robô.

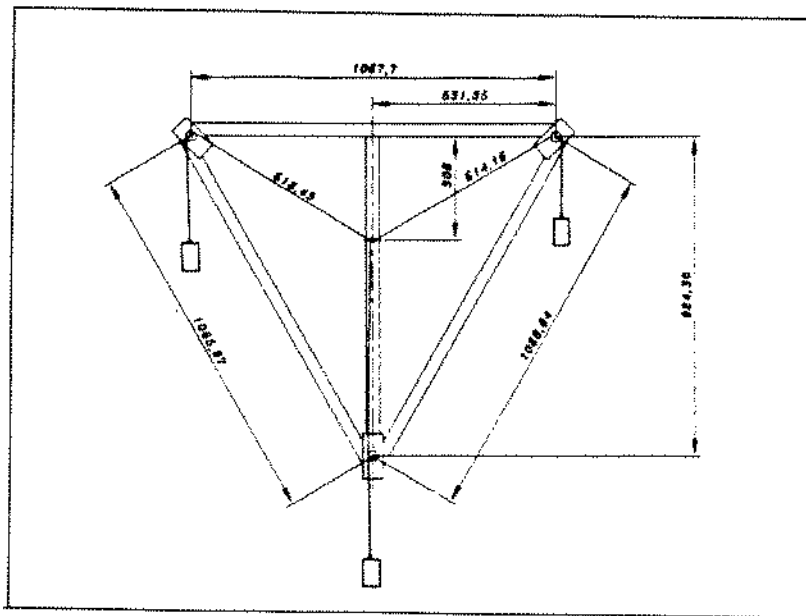


Figura 3.4: Desenho do sistema de medidas externo e seus parâmetros.

O processo de calibração consiste então em identificar seus parâmetros (figura 3.4), a partir de um sistema de medidas entrada/saída do modelo real. Os parâmetros a determinar (calibração num plano) são:

- As grandezas estruturais do robô (L_2 e L_3), que corresponde aos maiores braços do robô);
- As características de cada junta: K_i, C_{i0} ; $i = 1, 2$;
- Os valores que caracterizam a posição de R_2 relativamente à R_{gc} : X_2, Y_2 ;
- e, as distâncias de correção entre o dispositivo de calibração e o plano de calibração.

A partir do modelo geométrico do robô em estudo, torna-se possível, após a identificação desses parâmetros, determinarmos os valores de sua posição em relação ao referencial fixo a base (P_x, P_y, P_z) e posteriormente efetuarmos a comparação desses resultados, com o ponto (P_x, P_y) obtido a partir do sistema de medidas (triângulo).

Ou seja, designando como $A_{0,N}$ a matriz associada ao seu elemento terminal, obtido através dos parâmetros de Denavit Hartenberg, temos:

$$A_{0,N} = \begin{vmatrix} s_x & n_x & a_x & x \\ s_y & n_y & a_y & v \\ s_z & n_a & a_z & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = A_{0,N} = A_{0,1} \cdot A_{1,2} \cdot \dots \cdot A_{i-1,i} \cdot A_{N-1,N} \quad (3.10)$$

A matriz $A_{0,N}$ define inteiramente a mudança de coordenadas diretas do robô. Todos os cálculos são efetuados no referencial de base R_0 , que não é acessível fisicamente para um sistema exterior, ele é somente referenciado de maneira precisa em uma conexão à um referencial R_T , acessado mecanicamente.

Se as medidas são efetuadas em um referencial R_m (referencial de medida), a modelagem real (figura 3.5) do robô pode ser expressa:

$$A_{0,N} = A_{0,T} \cdot A_{T,M} \cdot A_{M,N} \quad (3.11)$$

com $A_{M,N}$ sendo uma matriz de medição.

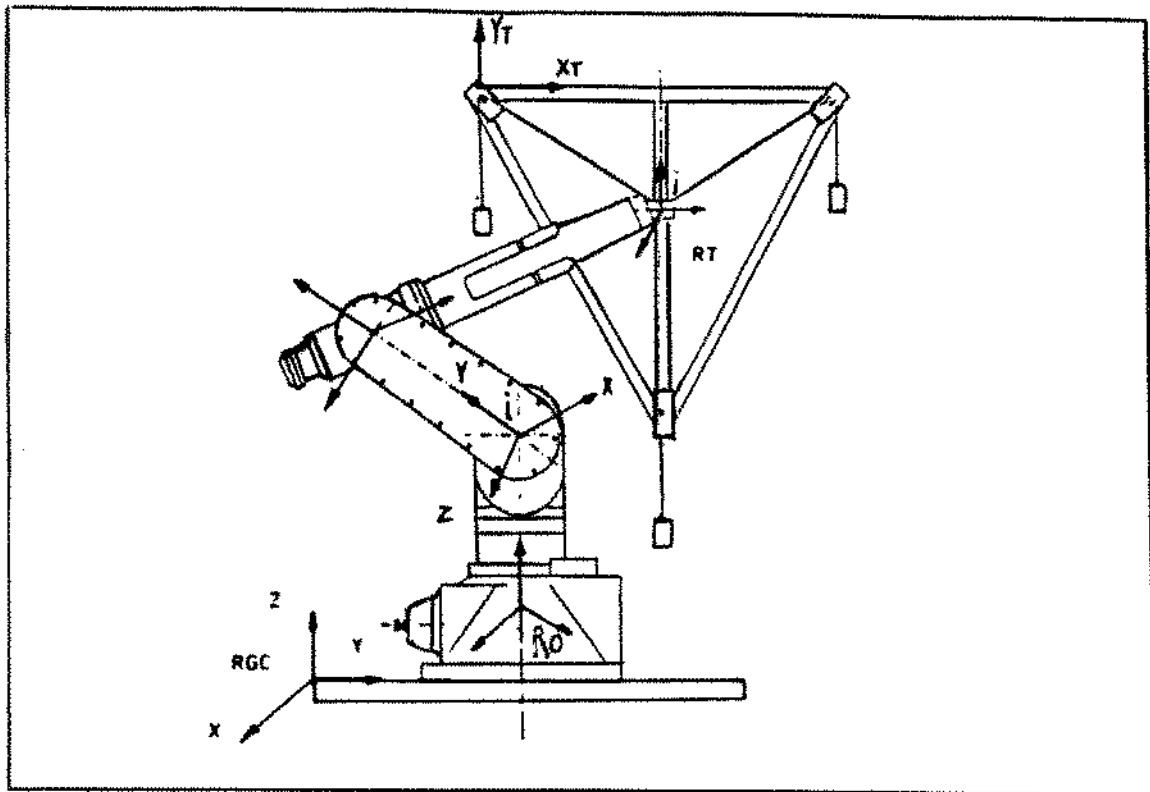


Figura 3.5: Referenciais de base e o ponto P_x , P_y no triângulo de medidas.

A modelagem teórica do robô A_0, N_t não conta com fatores influentes sobre o erro de posicionamento. Pode-se exprimir as coordenadas operacionais medidas no R_0 em fazer a matriz de erro $E_{N_t, N}$ por:

$$A_{0, N} = A_{0, N_t} \cdot E_{N_t, N} \quad (3.12)$$

3.2.2 Parâmetros a identificar

Como foi descrito anteriormente, a posição/orientação do elemento terminal do robô pode ser obtido a partir do conjunto de informações dos encoders de posição do robô em estudo, ou seja:

$$\bar{X} = f(\bar{e}) \quad (3.13)$$

onde:

- \bar{X} : caracteriza a posição/orientação do referencial terminal;
- \bar{e} : vetor das coordenadas generalizadas;
- f : operador função.

O vetor e das coordenadas generalizadas é uma grandeza medida associado a uma origem fixada quando da construção do modelo (pela aplicação dos referenciais dos segmentos físicos do robô). A medida real de posição de cada junta do robô é obtida através de seu transdutor de posição (encoder). Conseqüentemente, a seguinte relação poderá ser escrita:

$$e \quad \bar{e} = \bar{K} \cdot (\bar{C} - \bar{C}_0)^t \quad (3.14)$$

$$\bar{e} = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_n]^t, \quad \bar{K} = [K_1 \ K_2 \ \dots \ K_n]^t$$

$$\bar{C} = [C_1 \ C_2 \ \dots \ C_n], \quad \bar{C}_0 = [C_{10} \ C_{20} \ \dots \ C_{n0}]$$

onde:

K_i = coeficiente próprio da junta $n = i$, função do encoders e da redução da ligação no grau de liberdade.

C_i = medida de posição sobre o encoder da junta i (pulsos).

C_{i0} = posição do eixo i por $e_i = 0$

e_i = coordenada generalizada i (ângulo em radianos).

3.2.3 Identificação pelo processo dos mínimos quadrados

Utilizando as equações (5.10) e (5.11) nós podemos escrever a relação dada a posição de origem do elemento terminal em RGC na forma:

$$[\bar{X}]_{3,1} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} = f(\bar{P}, \bar{C}) \quad (3.15)$$

onde \bar{P} é o vetor dos parâmetros a identificar e \bar{C} é o vetor das informações de posição conhecidas a partir dos sinais dos encoders associados a cada junta.

Esta relação é linear em relação às grandezas estruturais (L_2, L_3) e não linear em relação a outros parâmetros (as variáveis C_{10} aparecem como argumento de funções trigonométricas). Na linearização do sistema em torno de um ponto (\bar{P}, \bar{C}), pode-se escrever:

$$\begin{aligned} dX_0 &= \sum_{i=1}^N \frac{\partial X_0}{\partial P(i)} \cdot dP(i) \\ dY_0 &= \sum_{i=1}^N \frac{\partial Y_0}{\partial P(i)} \cdot dP(i) \\ dZ_0 &= \sum_{i=1}^N \frac{\partial Z_0}{\partial P(i)} \cdot dP(i) \end{aligned} \quad (3.16)$$

onde nesta situação,

$N = 12$: número de parâmetros a identificar
 $P(i)$: vetor de parâmetros a identificar.

Matricialmente:

$$dX = \begin{bmatrix} \frac{\partial X_0}{\partial P(1)} & \dots & \frac{\partial X_0}{\partial P(NP)} \\ \frac{\partial Y_0}{\partial P(1)} & \dots & \frac{\partial Y_0}{\partial P(NP)} \\ \frac{\partial Z_0}{\partial P(1)} & \dots & \frac{\partial Z_0}{\partial P(NP)} \end{bmatrix} \cdot d\bar{P} \quad (3.17)$$

ou, se considerar pequenas variações em torno de um ponto (\bar{P}, \bar{C}) , temos

$$\delta \bar{X} = [M(\bar{P}, \bar{C})]_{(\bar{P}, \bar{C})} \cdot \delta \bar{P} \quad (3.18)$$

com:

$M(\bar{P}, \bar{C})$: matriz de sensibilidade do sistema em torno do ponto de funcionamento (\bar{P}, \bar{C}) ;

N_P : número de parâmetros a identificar.

3.2.4 Algoritmo de Identificação

A identificação é feita a partir da posição do ponto (origem do referencial R_t da figura 3.3). A matriz de sensibilidade é então de dimensão $(3 \times N_P)$. O método para identificação é iterativo. O cálculo do vetor de incremento de parâmetros resultará um critério quadrático. Este critério é a soma dos quadrados dos erros de saída sobre todos os pontos de medida. O procedimento construtivo então é um caminho de identificação do vetor dos parâmetros.

A partir de um vetor inicial P_0 , cálculos sucessivos dos δP são realizados sendo obtido um vetor de parâmetros final (criado em função da estabilização dos incrementos dos parâmetros e pelas respectivas condições impostas sobre o erro de saída).

relação: Sendo N_m o número de pontos de medidas, tem-se a seguinte

$$\Delta \bar{X} = \begin{bmatrix} \partial X (1) \\ \partial X (2) \\ \vdots \\ \partial X (N_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [M_1 (\bar{P}, C)] \\ [M_2 (\bar{P}, C)] \\ \vdots \\ [M_{N_m} (\bar{P}, C)] \end{bmatrix} \cdot \partial P = [M (P, C)] \cdot \partial P \quad (3.19)$$

(3.Nm, 1) (3.Nm, NP) (NP, 1)

O estimador de $\partial \bar{P}$ que minimiza $\sum_{i=1}^{NP} \| \bar{X} \text{ modelo} - \bar{X} \text{ real} \|^2$ e

$$\hat{\partial \bar{P}} = [M(\bar{P}, \bar{C})^t \cdot M(\bar{P}, \bar{C})] \cdot M(\bar{P}, \bar{C})^t \cdot \Delta \bar{X}^{-1} \quad (3.20)$$

(NP, 1) (NP, NP) (NP, 3.Nm) (3.Nm, 1)

ou de novo,

$$\hat{\partial \bar{P}} = \left[\sum_{i=1}^{N_m} M_i(\bar{P}, \bar{C})^t \cdot M_i(\bar{P}, \bar{C}) \right]^{-1} \cdot \left[\sum_{i=1}^{NP} M_i(\bar{P}, \bar{C})^t \cdot \partial \bar{X} (i) \right] \quad (3.21)$$

• ALGORÍTIMO

- [0] → Inicialização do vetor de parâmetros à
- [1] → Cálculo do modelo $\bar{X}_{i_{mod}} = F(C_i, \bar{P})$, $i = 1, Nm$
- [2] → Cálculo de $\partial \bar{X}_i = [\bar{X}_{i_{mod}} - \bar{X}_{i_{med}}]$, $i = 1, Nm$
- [3] → Cálculo de $M_i (\hat{P}, \bar{C}_i)$ e $M_i (\hat{P}, \bar{C}_i)^t$, $i = 1, Nm$
- [4] → Cálculo de $\left[\sum_{i=1}^{Nm} (M_i (\hat{P}, \bar{C}_i)^t \cdot \partial \bar{X}_i) \right]^{-1}$
- [5] → Cálculo de $\sum_{i=1}^{Nm} M_i (\hat{P}, \bar{C}_i)^t \cdot \partial \bar{X}_i$
- [6] → Cálculo de $\partial \hat{P}$ a partir de [4] e [5]
- [7] → $\hat{P} = \hat{P} + \partial \hat{P}$
- [8] → Teste de segurança senão retornar a [1]

Um débito deve ser assegurado para cada iteração correspondente à criação de um novo vetor P para que o sistema seja localmente identificado. Isso satisfaz a cada passo o manuseio do dado de entrada C_i medido, o qual:

$$\text{rang} \left[\sum_{i=1}^{Nm} (M_i (\hat{P}, \bar{C}_i)^t \cdot M_i (\hat{P}, \bar{C}_i)) \right] = N_p \quad (3.22)$$

Se não for o caso, deve-se aumentar o número de informações das entradas.

3.2.5 Critérios de medidas utilizados

Os critérios de medidas utilizados são obtidos a partir da introdução de um ponto calibrado em posições diferentes dentro do plano do triângulo de calibração. A utilização deste sistema de aquisição permite o registro de uma dada posição:

- Dos eixos do robô \bar{C}_i
- Da medida do ponto \bar{C}_{Ei}

A técnica iterativo dos mínimos quadrados, descrita no Anexo A, utiliza seus dados a partir de um número suficiente grande de pontos de medida.

Quando a etapa de identificação é concluída, assim como os erros de saída, a distância entre o ponto associado ao modelo e o ponto de medida é:

$$\bar{X}_{\text{mod}} - \bar{X}_{\text{imed}} =$$

$$\left[(\bar{X}_{\text{mod}} - \bar{X}_{\text{imed}})^2 + (\bar{Y}_{\text{mod}} - \bar{Y}_{\text{imed}})^2 + (\bar{Z}_{\text{mod}} - \bar{Z}_{\text{imed}})^2 \right]^{1/2} \quad (3.23)$$

e o erro médio é máximo sobre todos os pontos de medida.

• Hipótese de simplificação

Os pontos RGC e R₂ da figura 3.3, são coplanares (eixo Z vertical comum). Em dois eixos são 11 parâmetros a identificar, os quais são:

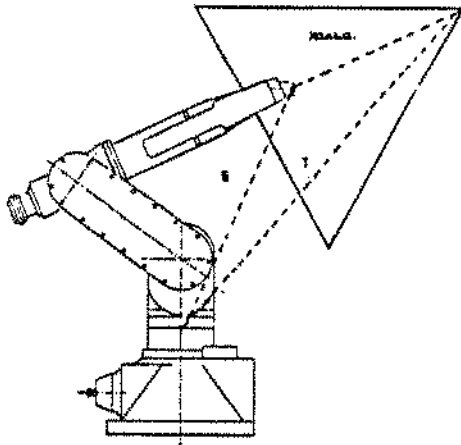
- D : Dimensão do robô
- $\theta = K (C_{\text{fin}} - C_{\text{init}})$: Ângulo de rotação
- K : Relação de transmissão
- C_i : Valores lidos a partir dos encoders do robô
- I_i : Valores iniciais dos encoders
- S : Posição geométrica do elemento terminal em relação ao referencial corrente
- F : Função de transferência à identificar $\Rightarrow S = F(D, \theta)$

• **Medidas**

\bar{X}_{med} : A partir dos encoders
 C_i : Valores lidos a partir dos encoders do robô

• **Cálculo**

A priori são conhecidos:
 \bar{X}_{med} : Posição geométrica do elemento terminal
 C_i : Valor lido no encoder
 K : Relação de transmissão



$$\bar{X}_{calc} = S + T$$

• **A calcular:**

D : Dimensões do robô
 I_i : Valores iniciais do robô
 T : Vetor de translação : T_x, T_y, T_z

• **Critério de otimização: Mínimos quadrados**

$$\epsilon = \bar{X}_{calc} - \bar{X}_{med}$$

(3.24)

Onde \bar{X}_{calc} é dado pelo modelo geométrico direto do robô

3.3 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Com a metodologia e as ferramentas matemáticas descritas neste capítulo, e após os resultados obtidos do estudo dos erros associados ao sistema externo de medidas demonstradas no Capítulo 4, iniciou-se os ensaios sobre este sistema proposto, com o robô executando trajetórias e posicionando-se em determinados pontos do plano interno do triângulo de medidas. Se levarmos em conta de ser um dispositivo de medida de baixo custo, é plenamente justificável seu uso industrial.

No próximo capítulo apresentaremos os principais resultados obtidos durante a calibração. Além disso apresentamos um levantamento dos parâmetros do sistema encoder-polia, e um estudo completo com o intuito da verificação das limitações do sistema de medidas.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

No capítulo 3 foi exposto a metodologia e as ferramentas matemáticas que possibilitam a medida da posição real do elemento terminal do robô, e o rastreamento das trajetórias vista pelos encoders de posição do robô em estudo.

Neste capítulo é apresentado os resultados obtidos em ensaios de repetibilidade, reversibilidade e a identificação de parâmetros geométricos do robô.

A precisão dinâmica do robô é também levantada através da visualização da trajetória a partir da imagem dos encoders.

Conforme o algoritmo de identificação apresentado no capítulo 3, a utilização em vários pontos no interior do plano do sistema de medida externo, possibilita restituir a trajetória real do robô visto a partir de seu elemento terminal.

A validação do sistema externo de medida proposto é apresentado no Anexo A deste trabalho, onde é mostrado um estudo completo da caracterização de erros e limitações do sistema com seus respectivos resultados.

Inicialmente serão apresentados os resultados obtidos referentes a bancada de calibração dos encoders localizados no sistema externo de medidas. A seguir apresentaremos os principais resultados obtidos a partir do sistema de calibração construído.

4.1 - LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS ENCODERS

Para a validação do dispositivo de medição proposto, é necessário um levantamento completo de suas limitações e erros apresentados.

O objetivo deste estudo é construir um dispositivo experimental para padronização de um sistema gerador de impulsos incrementais. Este dispositivo permite medir os comprimentos com auxílio de encoders incrementais. Encoders são sensores eletrônicos constituídos de duas pistas lógicas defasadas de 90° . A partir desses sinais torna-se possível obtermos com grande precisão, a frequência e o sentido de rotação de uma determinada junta de um robô

O trabalho é desenvolvido em duas etapas. A primeira etapa consiste na construção de um dispositivo eletrônico que permitirá obtermos as curvas de calibração associada a cada encoder.

Esta curva exprime a correspondência entre os valores das grandezas de comprimento utilizadas (blocos padrões) e os valores indicados pelo contador de impulsos. Isto também permite o levantamento das características principais dos encoders: sensibilidade, erros de reversibilidade, desvio de linearidade, etc.

O objetivo da segunda etapa consiste no desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para a aquisição e o tratamento das informações dos encoders de posição, e um "software" que permitirá a saída gráfica dos resultados para determinar a validação do sistema externo de medidas.

Uma identificação dos parâmetros do sistema poderá ser realizada a partir desse dispositivo de medidas.

4.1.1 Metodologia de medida

A figura 4.1 mostra uma bancada de testes que foi construída para as verificações experimentais.



Figura 4.1: Esquema de montagem para calibração dos encoders.

No Anexo A e no Anexo C, estão as principais características dos encoders, dos equipamentos, os procedimentos de medida e dos materiais envolvidos no experimento.

As tabelas apresentadas a seguir apresentam um resumo do procedimento adotado.

POSIÇÃO INICIAL DO SISTEMA

- A referência está na origem do sistema de medidas (zero);
- O contador está em zero;
- O fio metálico está estendido e enrolado 1.1/4 de volta;
- A frequência de amostragem do contador é de 25 KHz.

PRINCÍPIO DE MEDIDA

- Medida do sistema em posição inicial;
- Escolher um comprimento medido (bloco padrão);
- Deslocar a referência sobre um comprimento superior ao ao comprimento calibrado escolhido;
- Posicionar o calço móvel no bloco padrão;
- Fazer chegar o alvo da referência com o bloco padrão;
- Congelar os resultados aplicados sobre o contador;
- Levantar os números de impulsos positivos e negativos visualizados sobre o contador;
- Recomeçar esta medida 10 vezes;
- Repetir o princípio de medida com um outro comprimento de bloco padrão.

• RESULTADOS OBTIDOS

i) Encoder n.º 1

Modelo Linear: $Y = A + B.X$

onde,

$A=4952.02685546875$

$B=-48.63527297973633$

Resíduo da soma quadrática=-227413744

Resíduo mínimo quadrático=-12634097

A figura 4.2 mostra os resultados dos ensaios no encoder 1

Medida	Medida Linear(mm)	N.º Impulsos	Erro
1	92.00	211.40	0.152
2	92.50	232.90	0.040
3	94.00	296.50	0.053
4	95.00	339.80	0.069
5	97.50	446.60	0.046
6	100.50	574.90	0.016
7	103.00	681.30	0.021
8	108.00	894.10	0.010
9	111.00	1021.00	0.036
10	137.00	2125.40	0.023
11	153.00	2803.10	0.014
12	161.00	3144.00	0.011
13	162.00	3185.20	0.005
14	178.00	3866.40	0.016
15	183.00	4079.60	0.007
16	186.00	4207.30	0.004
17	187.00	4249.90	0.002
18	237.00	6378.10	0.010
19	262.00	7437.50	0.009

Figura 4.2: Resultados das medidas de calibração - encoder 1.

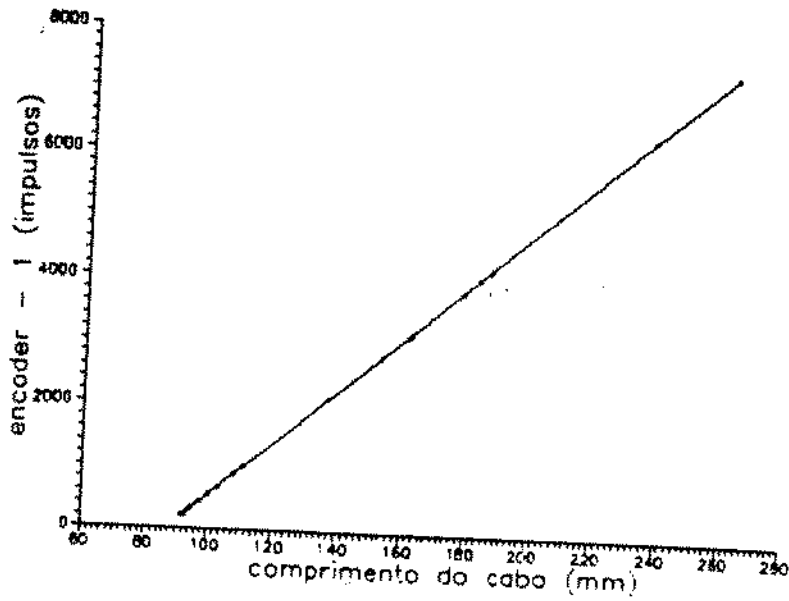


Figura 4.3: Curva de calibração - encoder 1.

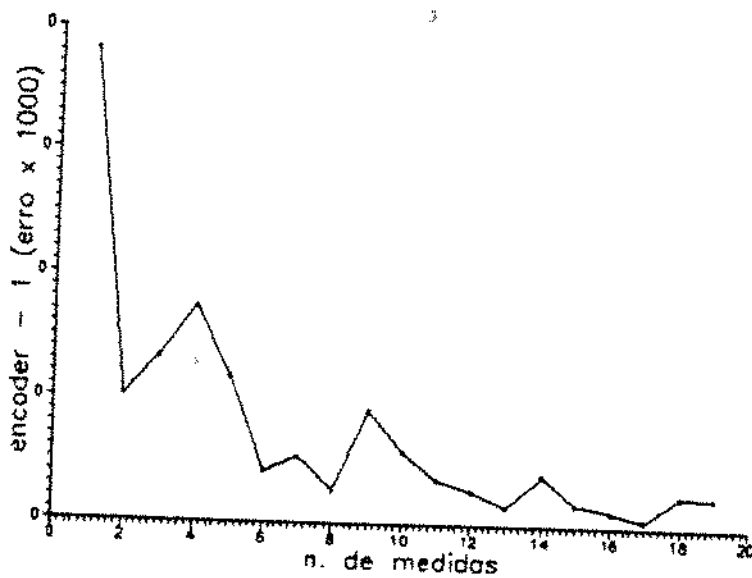


Figura 4.4: Curva de erro de calibração - encoder 1.

ii) Encoder n.º 2

Modelo Linear: $Y = A + B.X$

onde,

$A=4951.1279296875$

$B=-48.53776931762695$

Resíduo da soma quadrática=-227227200

Resíduo mínimo quadrático=-12623733

A figura 4.3 mostra os resultados dos ensaios no encoder 2

Medida	Medida Linear (mm)	Nº Impulsos	Erro
1	92.00	212.00	0.000
2	92.50	232.00	0.000
3	94.00	296.00	0.000
4	95.00	338.89	0.027
5	97.50	447.00	0.000
6	100.50	574.70	0.025
7	103.00	679.79	0.018
8	108.00	892.70	0.031
9	111.00	1020.09	0.009
10	137.00	2134.19	0.005
11	153.00	2808.80	0.004
12	161.00	3150.00	0.000
13	162.00	3192.89	0.002
14	178.00	3875.69	0.005
15	183.00	4089.00	0.000
16	186.00	4216.39	0.003
17	187.00	4258.10	0.002
18	237.00	6387.50	0.004
19	262.00	7454.70	0.001

Figura 4.5: Resultados das medidas de calibração - encoder 2.

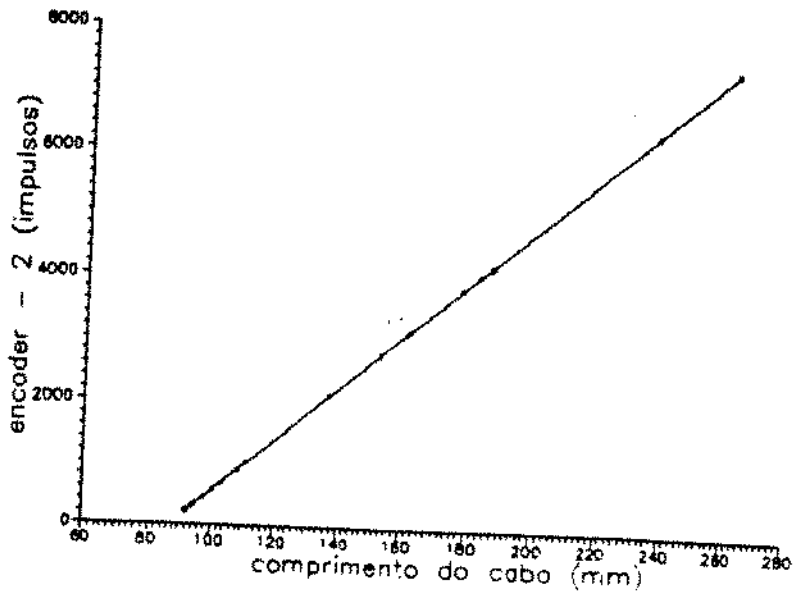


Figura 4.6: Curva de calibração - encoder 2.

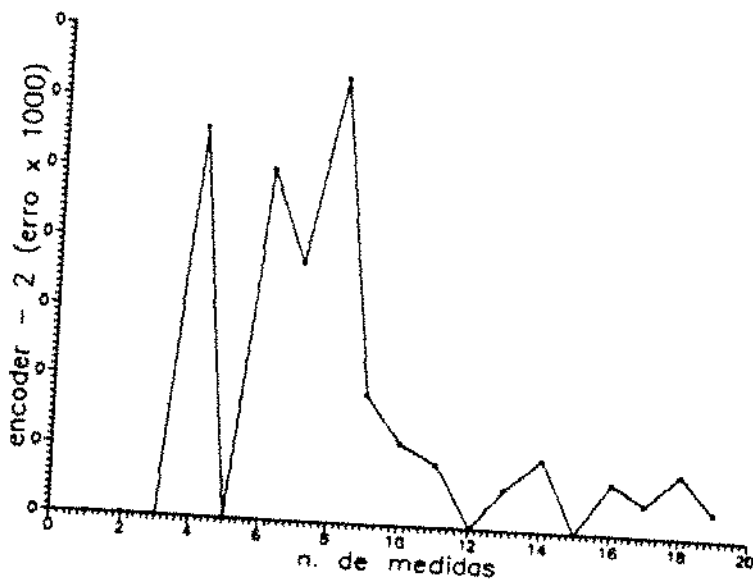


Figura 4.7: Curva de erro de calibração - encoder 2.

iii) Encoder n.º 3

Modelo Linear: $Y = A + B.X$

onde,

$A=4951.07080078125$

$B=-48.67195510864258$

Resíduo da soma quadrática=-227361920

Resíduo mínimo quadrático=-12631218

A figura 4.8 mostra os resultados dos ensaios no encoder 3

Medida	Medida Linear (mm)	N.º Impulsos	Erro
1	92.00	210.60	0.137
2	92.50	232.00	0.086
3	94.00	295.10	0.121
4	95.00	337.70	0.042
5	97.50	444.79	0.053
6	100.50	572.59	0.036
7	103.00	678.50	0.042
8	108.00	891.09	0.010
9	111.00	1018.50	0.039
10	137.00	2122.50	0.007
11	153.00	2800.60	0.012
12	161.00	3141.00	0.010
13	162.00	3182.89	0.008
14	178.00	3863.60	0.008
15	183.00	4076.89	0.005
16	186.00	4202.20	0.006
17	187.00	4244.29	0.006
18	237.00	6370.10	0.004
19	262.00	7430.50	0.005

Figura 4.8: Resultados das medidas de calibração - encoder 3.

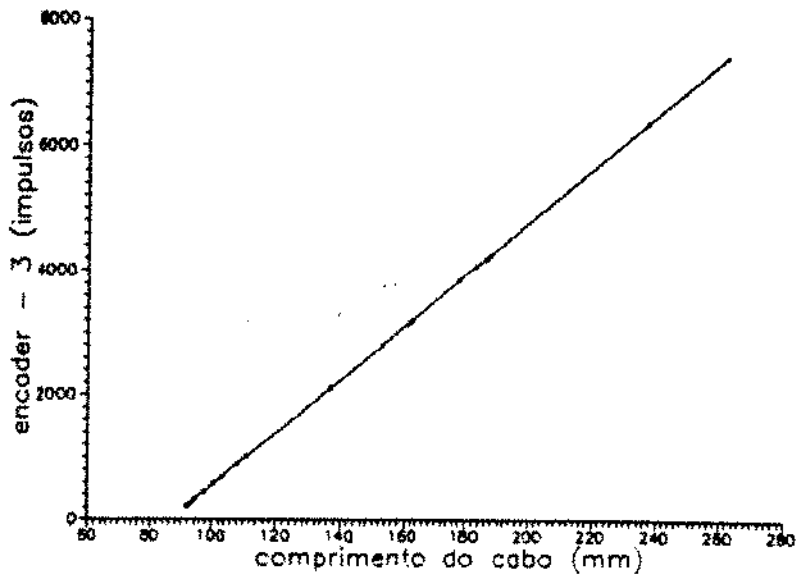


Figura 4.9: Curva de calibração - encoder 3.

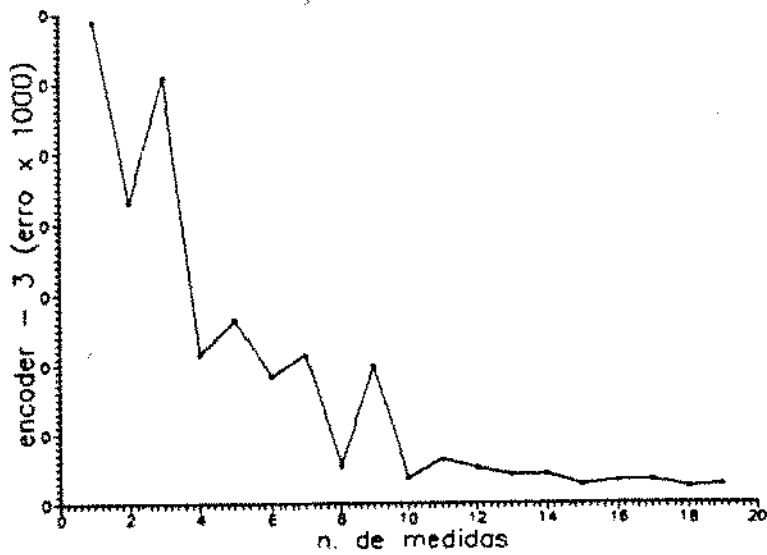


Figura 4.10: Curva de erro de calibração do encoder 3.

4.2 - LEVANTAMENTO DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA E DA IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA CABO-POLIA

4.2.1 Metodologia de Medida

Para o levantamento completo das condições de aderência e identificação dos parâmetros de um sistema constituído por um cabo de aço, um encoder e um polia, foi construído um dispositivo experimental mostrado na figura 4.11.

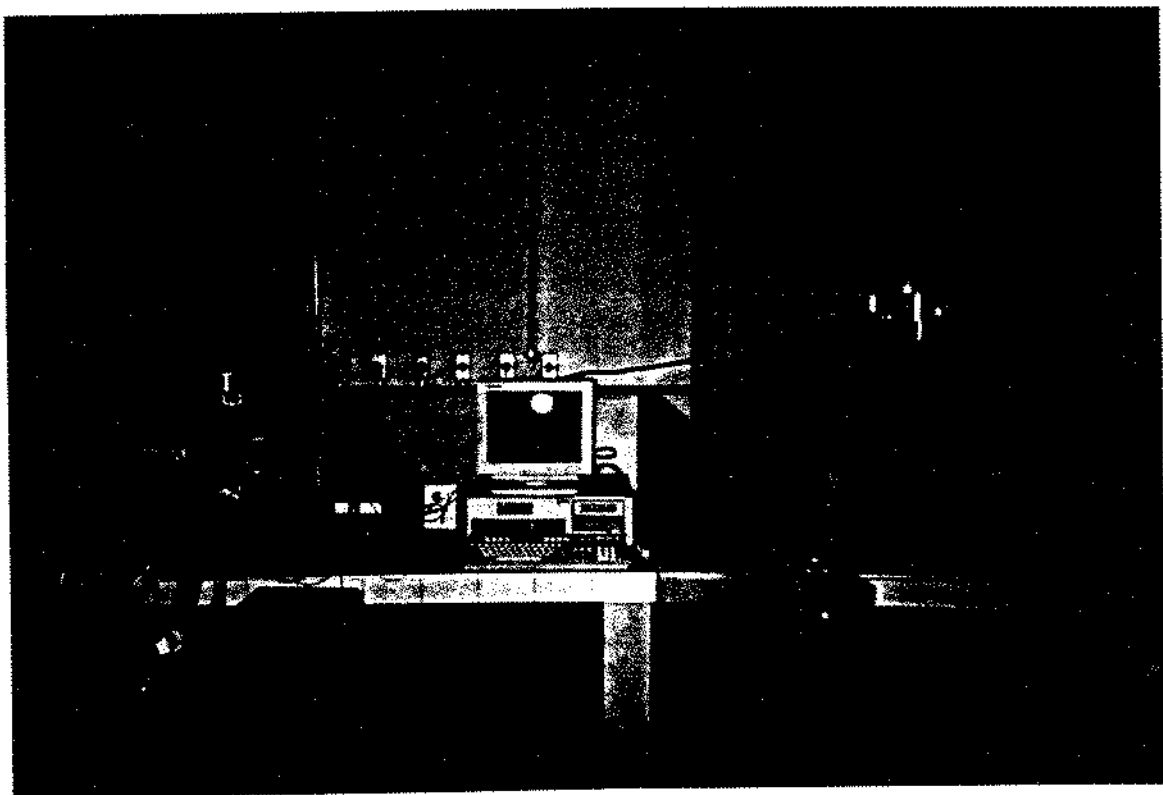


Figura 4.11: Bancada experimental utilizada.

Uma descrição completa dos procedimentos experimentais utilizados para medida de escorregamento de um sistema polia-cabo, incluindo os parâmetros identificados e valores limites são apresentados no Anexo A.

4.2.2 - Resumo dos resultados obtidos

A partir da metodologia experimental proposta anteriormente torna-se possível conhecermos os principais parâmetros do sistema de medidas proposto. Na figura 4.12 são apresentadas as principais características do sistema polia-encoder utilizado.

ENCODER	A	B	COEF. CORRELAÇÃO
1	13367	6.61	0.99879
2	7545	5.65	0.99982
3	12380	6.32	0.99995

ENCODER	TORQUE DE PARTIDA (N.cm)	COEF. DO TORQUE DE VISCOSIDADE (N.cm.s)	INÉRCIA (g.cm ²)
1	0.022	0.0029	42.38
2	0.016	0.0007	33.07
3	0.023	0.0024	41.34

Figura 4.12: Principais parâmetros do sistema de medida.

4.3 - RESULTADOS OBTIDOS COM O TRIÂNGULO DE CALIBRAÇÃO

4.3.1 Ensaio de Repetibilidade e Reversibilidade

A partir do controlador RCM-2 de posição do robô industrial Manutec-r3, gerou-se uma trajetória trapezoidal que foi enviada a cada uma das duas juntas utilizadas necessárias para realização de um movimento planar (juntas 2 e 3). O deslocamento angular de cada junta do robô foi obtido a partir das informações de seus encoders de posição. Ao mesmo tempo a partir de contadores digitais, foi possível visualizarmos o deslocamento de cada um dos encoders dispostos nas extremidades do triângulo de medidas. Com isso foi possível verificarmos as condições de repetibilidade e reversibilidade do sistema proposto neste trabalho.

A tabela apresentada na figura 4.13-A e 4.13-B mostra um resumo dos ensaios realizados.

N. ENSAIO	EIXO 2		EIXO 3		NUMERO DE MEDIDAS
	PI	PF	PI	PF	
1	15000	19200	38000	38000	11
2	19200	23600	38000	38000	11
3	23600	27800	38000	38000	11
4	27800	32000	38000	38000	12
5	32000	36200	38000	38000	12
6	26000	26000	10000	20000	11
7	26000	26000	20000	30000	12
8	26000	26000	30000	40000	10
9	26000	26000	40000	50000	11
10	26000	26000	50000	60000	11
11	26000	26000	60000	70000	11
12	15000	17600	38000	40900	11
13	17600	20200	40900	43000	12
14	20200	22800	43000	45100	12
15	22800	25400	45100	47200	13
16	25400	28000	49600	52500	13
17	28000	30600	52500	55400	13
18	30600	33200	55400	58300	13
19	33200	35800	58300	61200	13
20	35800	38400	61200	64100	12

onde:

PI : Posição inicial (impulsos)

PF : Posição final (impulsos)

Figura 4.13-A: Resumo dos ensaios realizados.

N. ENSAIO	ENCODER 1		ENCODER 2		ENCODER 3	
	IDA	VOLTA	IDA	VOLTA	IDA	VOLTA
1	3408	3410	120	119	85	86
2	3531	3531	35	34	1950	1951
3	2886	2888	49	47	2939	2940
4	1764	1764	103	103	3359	3359
5	28	28	210	211	3413	3414
6	3698	3698	3205	3204	2594	2594
7	1096	1096	2011	2011	3864	3865
8	2501	2502	609	609	3998	3999
9	4098	4097	774	774	2029	2029
10	3716	3715	2144	2143	1621	1622
11	2340	2341	3288	3287	3897	3898
12	862	863	36	36	128	128
13	1231	1232	2	3	74	75
14	1220	1223	54	55	373	374
15	1173	1174	118	117	638	640
16	731	730	380	379	705	706
17	612	616	483	484	837	837
18	445	447	587	588	927	927
19	260	259	689	691	989	990
20	59	56	777	778	1020	1021

Figura 4.13-B: Resumo dos ensaios realizados.

• Parâmetros geométricos

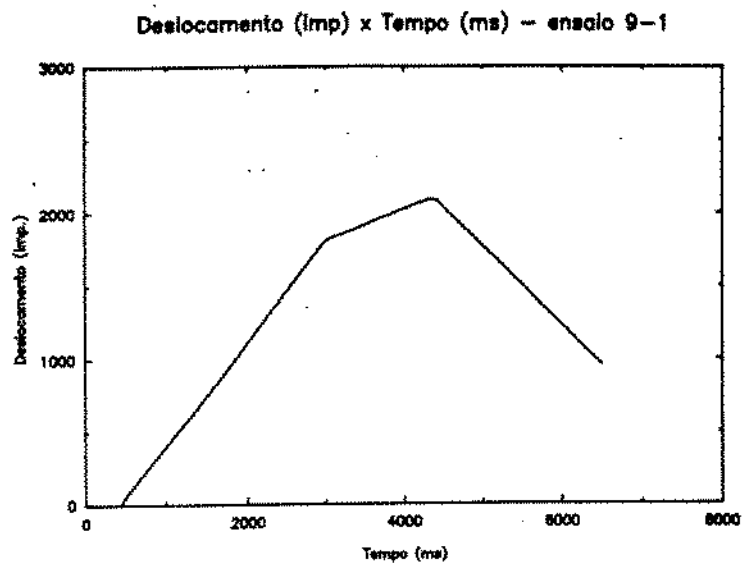
PARÂMETRO	INCREMENTO ($\times 10^{-4}$)
$X_T = 145.45$	0.12385
$Y_T = -489.67$	0.2458
$L_2 = 499.89$	0.0056
$L_3 = 830.06$	0.0296
$\beta_2 = 288.867 \text{ imp/deg.}$	0.0367
$\beta_3 = 288.932 \text{ imp/deg.}$	0.0006

4.4 - PRECISÃO DINÂMICA DO ROBÔ

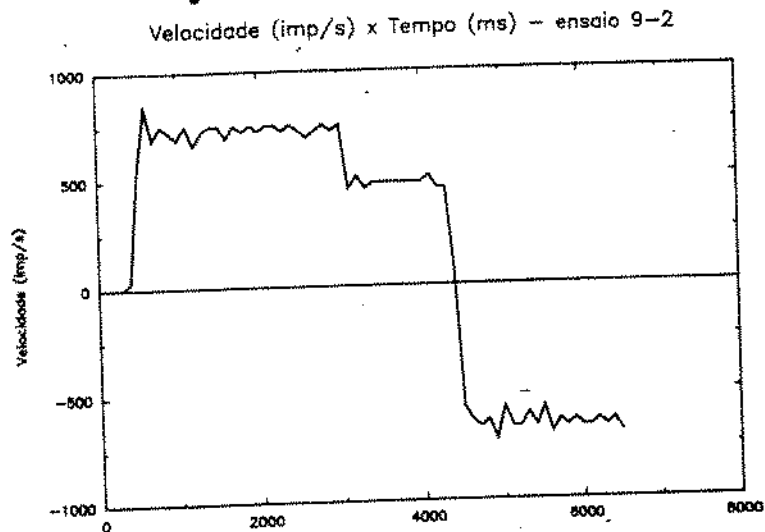
4.4.1 Princípio de medida

Conforme comandado para executar uma determinada trajetória, a aquisição da posição dos eixos é utilizada para obter uma medida de posição dada pelo encoder.

A visualização da trajetória executada é apresentado nas figuras abaixo:

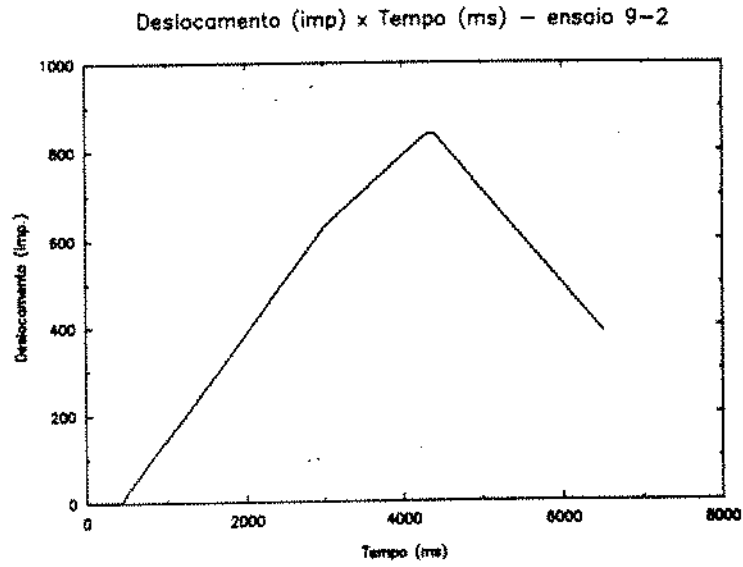


(a) Deslocamento (impulsões) x tempo (ms)

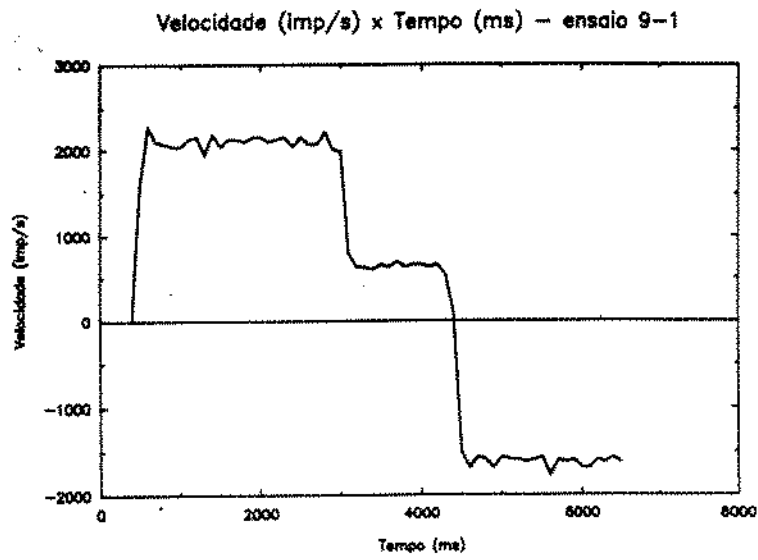


(b) Deslocamento (impulsões) x tempo (ms)

Figura 4.14: Medidas realizadas no encoder n^o 1.

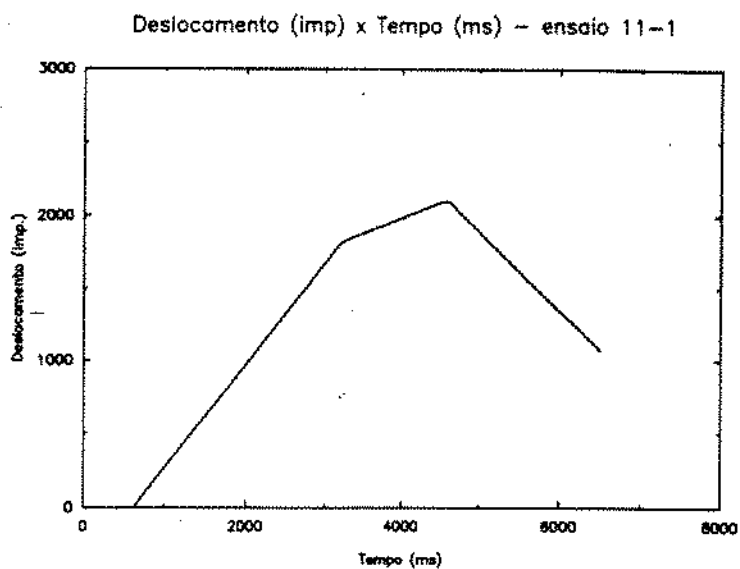


(a) Deslocamento (impulsões) x tempo (ms).

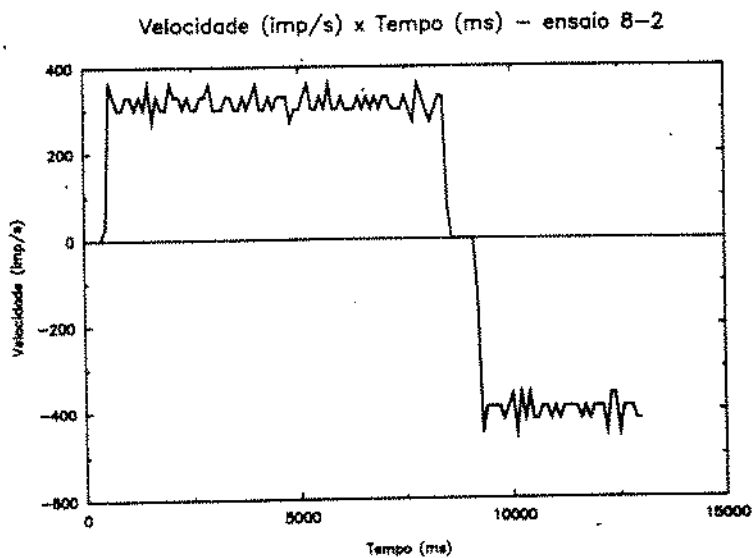


(b) Velocidade (imp/s) x tempo (ms).

Figura 4.15: Medidas realizadas no encoder n^o 2



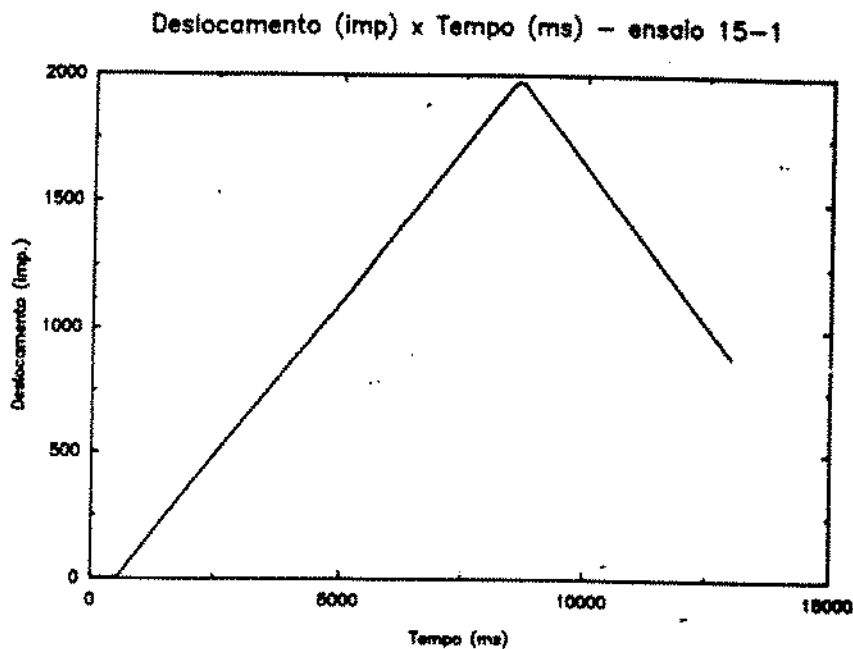
(a) Deslocamento (impulsos) x tempo (ms)



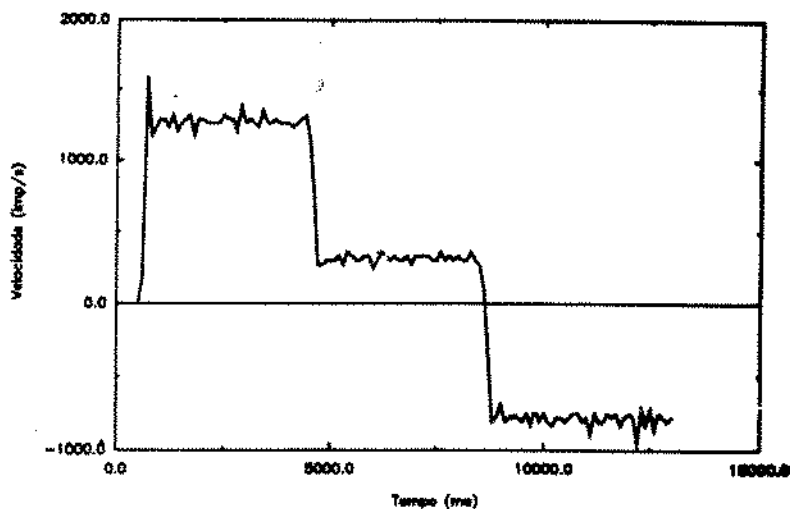
(b) Velocidade (impulsos/s) x tempo (ms)

Figura 4.16: Medidas realizadas no encoder n^o 3.

Conforme o algoritmo de identificação (capítulo 3), a sua utilização em todos os pontos do sistema externo de medidas, pode-se restituir a trajetória real do robô em estudo, dentro do plano do dispositivo.



(a) Deslocamento (imp) x Tempo (ms)
 Velocidade (imp/s) x Tempo (ms) - ensaio 7-1



(b) Velocidade (imp/s) x tempo (ms)

Figura 4.17: Comportamento do robô a partir dos encoders de posição do robô junta-2 e junta-3

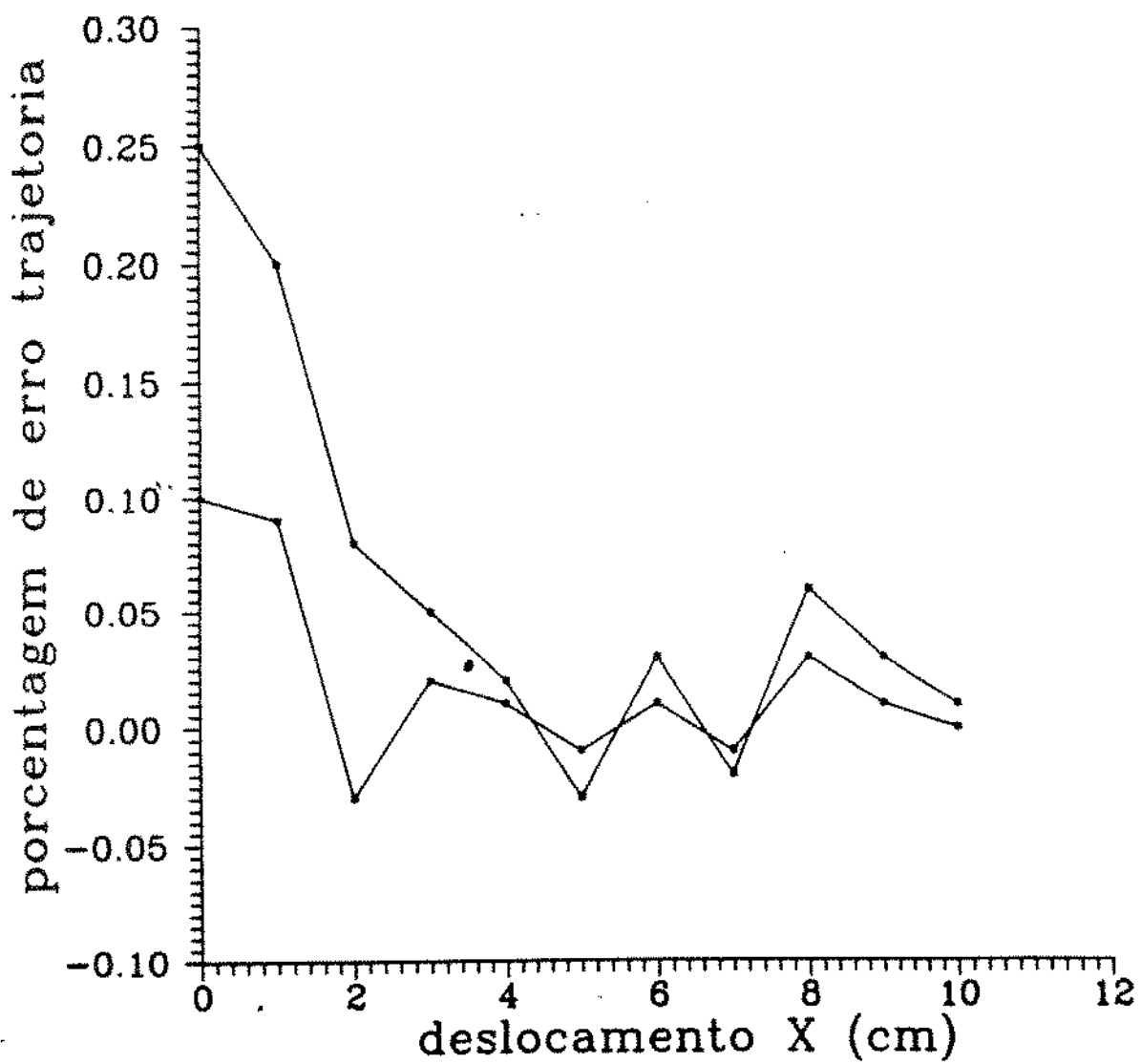


Figura 4.18: Estudo do erro - Junta 2

4.5 - CONCLUSÕES

Os resultados comparados a partir da trajetória obtida no sistema externo de medidas ligado direto ao seu elemento terminal apresentou a existência de oscilações, não notadas nas trajetórias a partir dos encoders de posição do robô.

Este estudo mostra a viabilidade de utilização do sistema externo de medidas restituir a trajetória real de um robô em relação ao seu elemento terminal. As limitações desse sistema de medidas são apresentados no Anexo A.

Além disso em analogia com o sistema desenvolvido é conveniente modelizar e corrigir os erros e imprecisões dinâmicos. Na evolução dos modelos geométricos, promovem em desenvolvimentos de dispositivos eletrônicos mais rápidos e sensíveis, permitindo tratar modelos mais complexos em um tempo mais compatível com a velocidade de execução dos robôs.

PERSPECTIVAS E CONCLUSÕES

O sistema de medida desenvolvido nesta tese, possibilitou um levantamento completo dos erros de precisão e calibração de parâmetros do robô Manutec-r3, de tal forma que em projetos específicos de trabalhos realizados com cargas variáveis, em particular, cargas elevadas onde o robô perde sua precisão devido a flexão de seus braços de maiores dimensões, pode-se, a partir destas informações, corrigir estes erros detectados diretamente no controle do robô.

Através deste estudo, as seguintes conclusões podem ser observadas:

1. A análise dos resultados dos erros na calibração, em posicionamento do elemento terminal e no rastreamento de trajetórias do robô dentro do plano do triângulo de medidas, demonstrou que este dispositivo é uma poderosa ferramenta, levando-se em conta o seu baixo custo e facilidade de manuseio.
2. A instalação do dispositivo é versátil e de fácil montagem nos locais onde o equipamento está instalado, não necessitando desalojar o robô da sua base de trabalho.
3. Apesar do dispositivo de calibração ser limitado em um único plano de trabalho, é possível realizar a calibração em vários planos de tal forma que se pode levantar uma calibração espacial. Ressalta-se que para a maioria das aplicações o robô deve atuar num plano de trabalho, sendo suficiente a metodologia apresentada neste trabalho.
4. Finalmente, a facilidade de correção dos erros nos robôs mostra eficiência do processo no meio industrial.

Entretanto, as seguintes recomendações podem ser realizadas em trabalhos futuros:

1. Após um estudo teórico e experimental do processo, propõem-se uma continuidade dessa linha de pesquisa em termos de se construir um dispositivo de calibração espacial, ou seja, dentro de um determinado volume de trabalho, usando basicamente a mesma tecnologia.
2. Para uma maior eficiência no levantamento dos resultados, é interessante desenvolver um "software" que permita rapidamente a aquisição e processamento dos resultados obtidos, de maneira computacional a automatizar o processo de medidas.
3. Finalmente a tese apresentada abre um campo promissor na área de processos, dispositivos de calibração e medida de precisão de robôs e manipuladores industriais, os quais são cada vez mais exigidos em suas funções e desempenho.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ahmad, S. I.
"Programming, Task and Motion"
International Encyclopedia of Robotics-Applications and
Automation, Editor R. C. Dorf, 1988
Ed. Wiley-Interscience Publication-John Wiley & Sons
Vol. 2, pág. 1260-1268

- [2] Aho, A. V.; Sethi, R.; Ullman, J. D.
"Compilers: Principles, Techniques, and Tools"
Ed. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1986

- [3] Ageles, J.; Alivizatos, A; Zsombor-Murray, P. J.
"The Synthesis of Smooth Trajectories for Pick-and-Place
Operations"
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,
Vol. SMT-18, n° 1, January/February 1988, pág. 173-178

- [4] Benhabib, B.; Zak, G.; Tabarah, E.
"Position Control of Two-Arm Manipulators for Coordinated
Point-to-Point Motion"
Journal of Robotic Systems, 5 (2), pág. 103-124
Ed. John Wiley & Sons, Inc. 1988

- [5] Bennett, D. J.; Hollerbach, J. M.
"Identifying the Kinematics of Robots and for their Tasks"
IEEE International Conference on Robotics and Automation
Proceedings 1989, pág. 580-586

- [6] Chang, Y. H.; Lee, T. T.; Liu, C. H.
"On-Line Cartesian Path Trajectory Planning for Robot
Manipulators"
IEEE International Proceedings 1988, pág. 62-67

-
- [7] Connell, J. H.
"A Behavior-Based Arm Controller"
Vol. 5, n° 6, December 1989, pág. 784-791
- [8] Craig, J. J.
"Introduction to Robotics Mechanics & Control"
Ed. Addison-Wesley Publishing Company - 1986
- [9] Denavit, J.; Hartenberg, R. S.
"A Kinematic Notation for Lower Pair Mechanisms Based on Matrices"
Journal of Applied Mechanics, June 1985, pág. 215-221
- [10] Dillmann, R.
"Application of all Methods in Robotics"
1° SAI - SIMPÓSIO DE AUTOMAÇÃO INTEGRADA - 1990
Curitiba - Paraná - Brasil
- [11] Diabka, M; Held, J.; Zhang, Y.
"A Practical Approach for Planning and Realization of Optima Trajectories for Industrial Robots"
IFAP Robot Control - Proceeding Series 1989
n° 10, pág. 517-522
- [12] Featherstone, R.
"Robot Dynamics Algorithms"
Ed. Kluwer Academic Publishers 1987
- [13] Fu, K. S.; Gonzalez, R. C.; Lee, G. S. G.
"ROBOTICS: Control, Sensing, Vision and Intelligence"
Ed. McGraw-Hill Book Company 1987
- [14] Goldenberg, A. A.; apkarian, J. A.; Smith, H. W.
"A New Approach to Kinematic Control of Robot Manipulators"
Transactions of The ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 109, June 1987, pág. 97-103
- [15] Goma, H.
"Programming of Multiple e Robot Systems"
International Encyclopedia of Robotics-Applications and Automation, Editor R. C. Dorf, 1988
Ed. Willey-INTerscience Publication-John Wiley & Sons
Vol. 2, pág. 1250-1260

- [16] Gousenes, L.
"Strategies for Solving Collision-Free Trajectories Problems for Mobile and Manipulator Robots"
The International Journal of Robotics Research
Vol. 3, n° 4, Winter 1984, pág. 51-65
- [17] Graham, J. H. Editor
"Computer Architectures for Robotics and Automation"
Ed. Gordon and Breach Science Publishers S.A.
- [18] Grosman, D. D.; Taylor, R. H.
"Interactive Generation of Object Models with a Manipulator"
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Vol. SMC-8, n° 9
September 1978, pág. 667-678
- [19] Kim, B. K.; Kang, G. S.
"Minimum-Time Path Planning for Robot Arms and Their Dynamics"
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics
Vol. SMC-15, n° 2, March/April 1985, pág. 213-223
- [20] Kopacek, P. Truch, I.
"Software for Simulation and Control of Robots and Manipulators"
IFAC Software for Computer Control 1988
Editores: I. M. Macleod and A. D. Heher, n° 2, pág. 119-126
- [21] Kusiak, A.
"Programming, Off-Line Languages"
International Encyclopedia of Robotics-Applications and Automation, Editor R. C. Dorf, 1988
Ed. Willey-Interscience Publication-John Wiley & Sons
Vol. 2, pág. 1235-1250
- [22] Langrudi, S.A.; Ochs, J. B.
"A Graphic Simulator of the Off-Line Programming Language VAL-II"
in "Off-Line Programming of Industrial Robots"
Editores: A. Storr, J. F. McWaters
Ed. Elsevier Science Publishers B. V. (N-Holland) IFIP 1987, pág. 119-135
- [23] Lee, C. S. G.
"Robot Arm Kinematics Dynamics and Control"
IEEE COMPUTER, December 1982, pág. 62-79

-
- [24] Lee, C. S. G.; Lee, B. H.
Development of Generalized d'Alembert Equations of Motion for
Robot Manipulators"
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics
Vol. SMC-17, n° 2, March/April 1987, pág. 311-325
- [25] Lin, Chun-Shin; Chang; Po-Rong
"Joint Trajectories of Mechanical Manipulators for Cartesian Path
Aproximation"
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics
Vol. SMC-13, n° 6, November 1983, pág. 1094-1102
- [26] Luh, J. Y. S.; Lin, C. S.
"Approximate Joint Trajectories for Control of Industrial Robots
Along Cartesian Pths"
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics
Vol. SMC-14, n° 3, May/June 1984, pág. 444-450
- [27] Maciejewski, A.
"Kinetic Limitations on the Use of Redundancy in Robotic
Manipulators"
IEEE International Conference on Robotics and Automation
Proceeding 1989, pág. 113-118
- [28] Malcolm Jr., D. R.
"ROBOTICS: An Introduction"
2ª Edição 1988 - Ed. Delmar Publishers, Inc.
- [29] MacDonald, A. C.
"Robot Technology - Theory Design and Applications"
Ed. Prentice - Hall New Jersey 1986
- [30] Merian, J. L.
"Dynamics"
Ed. John Wiley & Sons - 1981
- [31] Mooring, B. W.; Padavala, S. S.
"The Effect of Kinematic Model Complexity on Manipulator
Accuracy"

- [32] Lovass-Nagy, V.; Schilling, R. J.
"Control of Kinematically Redundant Robots Using {1} - Inverses"
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,
Vol. SMC-17, n° 4, July/August 1987, pág. 644-649
- [33] Nakamura, Y.; Hanafusa, H.
"3D Autonomous Trajectory Control of Robot Manipulators"
Robotics & Computer-Integrated Manufacturing
Vol. 3, n° 4, 1987, pág. 395-408
- [34] N-Nagy, F.; Siegler, A.
"Engineering Foundations of Robotics"
Ed. Prentice-Hall International 1986
- [35] Orin, D. E.; Schrader, W. W.
"Efficient Computation of the Jacobian for Robot Manipulators"
The International Journal of Robotics Research
Vol. 3, n° 4, Winter 1984, pág. 66-75
- [36] Paul, D. K.; Leu, M. C.
"Generic Singularities of Robot Manipulators"
IEEE International Conference on Robotics and Automation
Proceeding 1989, pág. 738-744
- [37] Parker, J. K. Goldberg, D. E.
"Inverse Kinematics of Redundant Robots Using Genetic Algorithms"
IEEE International Conference on Robotics and Automation
Proceeding 1989, pág. 271-276
- [38] Pollmann, W.; Dzembitzki, H.
"Off-Line Programming of Industrial Robots (IR)"
Editores: A. Storr, J. F. McWaters
Ed. Elsevier Science Publisches B. V. (N-Holland)
IFIP 1987, pág. 7-15
- [39] Pritschow, G.; Storr; A. Gruhler, G.; Schumacher, H.
"Off-Line Programming System with Geometrical Data Recording by
Manually Guided Industrial Robot"
Off-Line Programming of Industrial Robots
Editores: A. Storr, J. F. McWaters
Ed. Elsevier Science Punlischers B. V. (N-Holland)
IFIP 1987, pág. 53-68

-
- [40] Sakaue, S.; Sigimoto, K.
"Path Generation by Rate Control of Manipulators"
Robotics & Computer-Integrated Manufacturing
Vol. 3, n° 4, 1987, pág. 381-387
- [41] Saridis, G. N. Editor
"Advances in Automation and Robotics"
Ed. J. A. I. Press, Inc. 1985
- [42] Shimano, B.; Geschke, C.; Spalding, C.
"VAL II: A Robot Programming Language and Control System"
SME ROBOTS VIII Conference, Detroit, June 1984
- [43] Snyder, W. E.
"Industrial Robots: Computer Interfacing and Control"
Ed. Prentice-Hall, Inc. 1985
- [44] Spur, G.; Duelen, G.; Krause, F. L.
"An Integrated Approach Toward Off-Line Robot Programming"
Off-Line Programming of Industrial Robots
Editores: A. Storr, J. F. McWaters
Ed. Elsevier Science Publishers B. V. (N-Holland)
IFIP 1987, pág. 181-191
- [45] Storr, I. A.; Schumacher, H.
"Programming Methods for Industrial Robots"
Editores: A. Storr, J. F. MacWaters
Ed. Elsevier Science Publsche B. V. (N-Holland)
IFIP 1987, pág. 1-4
- [46] Tan, H. H.; Polls, R. B.
"A Discrete TRajjectory Planner for Robotic Arms with Six Degrees
of Freedom"
IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 5 n° 5
October 1989, pág. 681-690
- [47] Wu, Chi-Haur
"A Kinematic CAD Tool for the Design and Control of a Robot
Manipulator"
The International Journal of Robotics Research, Vol 3 n° 1
Spring 1984, pág. 58-67

- [48] Rosário, J.M.; Messina, L.C.P.; Aust, E.: "Development of A off-line Program for Underwater Work by using Industrial Robots" Third (1993) Int. Offshore and Polar Eng. Conference Singapore, junho de 1993.
- [49] Rosário, J.M.; Messina, L.C.P.; Aust, E.: "Automated Intervention of Subsea Work with aid an Off-Line-Programming and Simulation System for Industrial Robot", OMAE 1993 11th Int. Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Glasgow, Scotland, trabalho a ser publicado em junho de 1993.
- [50] Rosário, J.M.; Weber, H.I.; Aust, E.; Schultieiss, G.F.: "Development for Deep Water Robot Work", Brasil Offshore'91 Engineering, Pentech Press publication, sept. 1991.
- [51] Rosário, J.M.; Weber, H.I.; Morooka, C.: "Development and Control of Advanced Robots for Underwater Tasks, 5 ICAR, PISA, Italia, Jun. 1991, pp 1792-1795.
- [52] Rosário, J.M. "A systematic methode the kinematic analysis of industrial robots and the MANUTEC robot - r15", GKSS, Alemanha, 1990.
- [53] Rosário, J.M.; Cazenave, A.; Blanchard, P.: "Génération de Trajectoires hors-ligne pour robots capables d'intervenir en millieu hostile - HISPANO-SUIZA, França, 1989
- [54] Cazenave, A.; Rosário, J.M.; Blanchard, P.: "Etude et Development d'un Logiciel de Programmation Hors-Ligne et Création de Trajectoires pour le Robot ISIS-2", HISPANO-SUIZA, Projet 4/SPE/1989, Paris, France, 1989.989.
- [55] Rosário, J.M.; Verdin, L. "Etude de faisabilité d'un asservissement de position par commande tout-ou-rien", ISMCM, 1987.
- [56] Rosário, J.M.; Pelissou, P.; Bouzid, L. "Mise en oeuvre d'un dispositif de mesure d'une longueur à partir d'un système incrémental générateur d'impulsions", ISMCM, 1987.
- [57] Guyomard, H.; Rosário, J.M. "Les armoires de commande en robotique", ISMCM, 1987.

-
- [58] Belloeil, Y.; Rosário, J.M. "Etalonnage et mesure des performances des robots", ISMCM, 1987.
- [59] Rosário, J.M.: "Estudo e Concepção de um Controlador Não-linear para Aplicação em Robôs Industriais", XI COBEM, pag. 541-544, vol. I, S. Paulo, 1991.
- [60] Saramago, M.A.P.; Rosário, J.M.: "Projeto e Construção de um Sistema de Calibração e Medida de Precisão para Robôs Industriais", XI COBEM, pag. 41-44, vol. II, S.Paulo, 1991.
- [61] Souza, J.P.; Treiguer, J.M.; Rosário, J.M.: "Identificação dos Parâmetros de um Robô a partir das Informações dos seus Transdutores de Posição"; XI COBEM, pag. 313-316, S.Paulo, 1991.
- [62] Zampieri, D.E.; Rosário, J.M.; Martins, J.L.F.; Saramago, M.A.P.: "Projeto e Modelagem de um Manipulador", Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, pag. 9-16, Natal, março 1991.
- [63] Rosário, J.M.: "Feasibility Study of Non-Linear Controller for Robotic Manipulators, IV DINAME, Pouso Alegre, Minas Gerais, Março de 1991, pag. 105-106.

ANEXO A

ESTUDO DO SISTEMA CABO - POLIA - ENCODER

A.1 - LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS ENCODERS

Para a validação do dispositivo de medição proposto, é necessário um levantamento completo de suas limitações e erros apresentados.

O objetivo deste estudo é construir um dispositivo experimental para padronização de um sistema gerador de impulsos incrementais. Este dispositivo permite medir os comprimentos com auxílio de encoders de impulsos.

Isto se faz em duas etapas. A primeira etapa consiste na construção de um contador que irá permitir plotar a curva de calibração das medidas de comprimento associada a cada encoder.

Esta curva exprime a correspondência entre os valores das grandezas medidas e os valores indicados pelo contador de impulsos. Isto permite determinar as características principais do encoder: sensibilidade, erros de reversibilidade, desvio de linearidade, etc.

O objetivo da segunda etapa é a validação de um dispositivo experimental com encoders como sistema de calibração de um robô para padronizar calibrar um robô.

Neste anexo apresentamos os procedimentos experimentais com seus resultados, de maneira a garantirmos o uso do dispositivo de calibração desenvolvido para medida de precisão de robôs.

A.1.1 Formulação matemática

A relação matemática apresenta o primeiro procedimento para o levantamento das medidas.

$$\text{imp. (+)} - \text{imp. (-)} = n^{\circ} \text{ impulsos do encoder} \times \text{coef. } X \quad (\text{A.1})$$

onde

X: coeficiente de calibração;

O procedimento utilizado para levantamento do coeficiente de proporcionalidade consiste em utilizarmos blocos padrões. A partir do cálculo das medidas efetuadas para cada comprimento do bloco padrão para posteriormente traçar a curva de calibração do encoder.

$$\text{Número de impulsos} = F (\text{comprimento bloco padrão mm}) \quad (\text{A.2})$$

A.1.2 Metodologia de medida

A figura A.1 apresenta uma bancada de testes que foi construída para a aferição do sistema de medida proposto neste trabalho. A instrumentação de medida é constituída basicamente dos seguintes elementos:

- 1) Contra-peso
- 2) Massa variável
- 3) Sistema Polia-Encoder
- 4) Tratamento das informações dos encoders
- 5) Detector de sentido e frequência de rotação
- 6) Contador

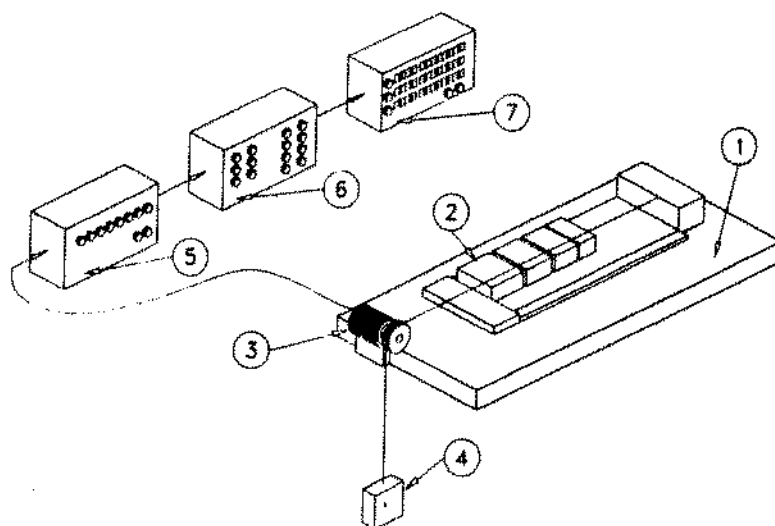


Figura A.1: Esquema de montagem para calibração dos encoders.

No Anexo C estão as características dos encoders, dos equipamentos e dos materiais envolvidos no experimento.

Nos encoders existem acoplado nos seus eixos, uma polia a qual se enrola um cabo de aço flexível, sendo que em uma das extremidades serão presos contra-pesos com massa aproximadamente de 350 g. Entre estes contra-pesos está preso um dispositivo de apoio referencial, e um outro apoio preso no cabo, os quais permitem determinar um comprimento de acordo com um ou mais blocos padrões localizados entre eles, conforme mostra a figura A.1.

O diâmetro do fio metálico utilizado para medidas tem uma grande importância. Nós utilizaremos um fio de 2mm. de diâmetro para o sistema. Para minimizar o escorregamento do fio em torno da polia fixada sobre o eixo do encoder, é enrolado 1.1/4 de volta.

Para cada comprimento de blocos padrões selecionados, realiza-se 10 medidas cujos valores mostrados num contador digital são anotados.

Deste modo, monta-se uma tabela composta de um comprimento determinado por vários blocos padrões alinhados, e dos correspondentes valores de pulsos obtidos diretamente do contador.

Estes valores permitem visualizarmos os diferentes impulsos gerados pelos encoders; positivos em um sentido de rotação definido ou negativos para um sentido de rotação contrário.

Com esta tabela faz-se a leitura dos valores dos impulsos medidos, permitindo através de um programa gráfico levantar a curva de calibração para cada encoder ensaiado com sua respectiva polia. Ressalta-se que é importante adicionarmos a medida $L_0=87\text{mm}$ do apoio dos blocos padrões com o centro do respectivo encoder estudado.

O registro deste comprimento L_0 acrescentado ao bloco padrão, proporciona um melhor precisão dos resultados.

A.1.3 Manipulação dos Dados Obtidos

Inicialmente, o ressalto móvel está em contato com o seu apoio. O contador é "ressetado" e apresenta o valor zero. Puxa-se o fic em um sentido, após o local do comprimento estendido entre o bloco padrão e o ressalto. Sob a ação do contra-peso, o ressalto escorrega até aquele entrar em contato com o bloco padrão. Anota-se então, o valor registrado no contador (número de impulsos) assim como o comprimento do bloco padrão utilizado (em mm). A fim de verificar a fidelidade do contador, medidas são renovadas para um mesmo valor da grandeza medida.

A.1.4 Exploração dos resultados.

A partir dos valores obtidos, determina-se as características principais de cada encoder: sensibilidade, desvio de linearidade, erro de fidelidade, erro de zero, erro de reversibilidade e erro de histeresis.

O traçado das curvas de calibração de cada encoder se faz por intermédio de três programas (linguagem basic).

1) Programa EIENC.BAS.

Este programa permite efetuar a média de 10 resultados das medidas e calcular a porcentagem de erro de cada ponto (de medida) para relatar aquela média, durante as medidas de porcentagem do erro inferior à 1%. Quando um ponto exceder o coeficiente de erro, sobre a emissão de uma nova medida efetuada até que o total de pontos sejam aceitos. Os resultados são registrados em duas tabelas.

1.1 EIENC.INT: Apresenta os resultados de medidas;

1.2 ERR_FIM: Apresenta a porcentagem de erro obtido para cada comprimento de bloco padrão.

2) Programa INTERPOL.BAS.

Este programa representa os resultados registrados nas tabelas EIENC.INT e permite obter uma interpolação linear destes dados.

Ele permite definir os parâmetros A e B diretamente de cada $Y = A + Bx$ obtido; e gerar uma tabela de dados EIENC.FIM onde Y é um valor teórico obtido direto, e X representa o comprimento do bloco padrão utilizado.

3) Programa ERR_FIM.

Este programa manipula os dados estocados nas tabelas EIENC.INT, cuja redução dos valores teóricos registrados na tabela EIENC.FIM, e colocado o resultado na tabela EIENC.FIM. A tabela agora é utilizada para visualizar a porcentagem de erro entre os valores dos pontos medidos e os valores teóricos dados pela curva.

A.2 - LEVANTAMENTO DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA E DA IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA CABO-POLIA

A figura A.2 ilustra um dispositivo experimental utilizado para verificações das condições de aderência num sistema cabo-polia.

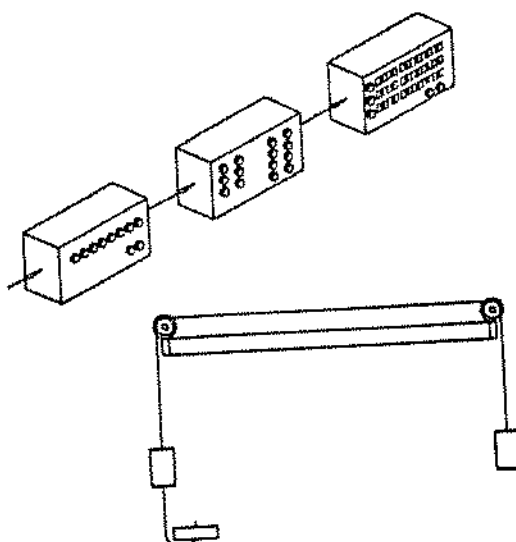


Figura A.2: Dispositivo experimental

A.2.1 - Valores limites da massa do contra-peso

As tensões F e t são encontradas através da relação:

$$F = T \cdot e^{f\alpha} \quad [N] \quad (A.3)$$

onde: $f = 0,15$: coeficiente de atrito (fricção) entre o cabo e a polia;
 $\alpha = 450^\circ$ (1.1/4 volta): ângulo de enrolamento (em radianos);
 $F = m \cdot g \approx 10 \cdot m$ (em N).

A.2.2 - Cálculo da massa máxima

O robô pode suportar uma força limite máxima "T" de 1.5N (direção radial do encoder), onde:

$$m = e^{\hat{f}\alpha} \quad [Kg] \quad (A.4)$$

onde $m_{\max} \approx 2Kg$ ($\hat{f} = 0,1$, $\alpha = 450^\circ$).

A.2.3 - Cálculo massa mínima:

O cabo suporta um esforço máximo de tração que tende a deformar. A deformação segue a lei de Hooke.

$$\sigma = E \cdot \epsilon = T/S \quad (A.5)$$

com:

$\Delta L = 5/100$ mm : resolução do encoder.
 $L_{\max} = 1000$ mm : comprimento máximo do fio.
 $E = 21 \times 10^{10}$ N.m² : módulo de elasticidade.
 $\epsilon = \Delta L/L = 5 \times 10^{-5}$: deformação.
 $\phi = 3/10$ mm. : diâmetro do fio.
 $S = 0,0071$ mm² : área do fio;

onde

$T_{\min.} \approx 0.74$ N $\Rightarrow m_{\min} \approx 150$ g.

A.2.4 - Condições de resistência do cabo

i) Exemplo de enfraquecimento para velocidades lineares

$$S \approx \frac{T}{E} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{A.6})$$

com $T \approx 12 \text{ N}$ (condições de aderência)

$$\left[\begin{array}{l} S_{pv} \approx 0,00571 \text{ mm}^2 \\ S_{\text{util.}} = 0,0314 \text{ mm}^2 > S_{pv} \end{array} \right.$$

ii) Exemplo de grandes velocidades lineares

$$S \approx \frac{T}{E - T_0} \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{A.7})$$

$$T_0 = 0,785 \cdot V^2 \quad [\text{N/cm}^2]$$

com $V = 10 \text{ m/s}$ ($\phi = 280 \text{ mm}$)

$$\left[\begin{array}{l} S_{gv} \approx 0,005 \text{ mm}^2 \\ S_{\text{util.}} = 0,0314 \text{ mm}^2 > S_{gv} \end{array} \right.$$

A.3 - IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA CABO-POLIA

• Resumo da Identificação dos Parâmetros do Sistema Encoder-Cabo-Polia

Este experimento consiste no levantamento dos parâmetros das inércias e dos atritos dos eixos inerentes aos encoders, e dos limites onde ocorre escorregamento do cabo em relação à polia.

Isso permite identificar a máxima velocidade do elemento terminal do robô nos ensaios garantindo a fidelidade dos resultados.

Os quadros apresentados a seguir, mostram o procedimento para a verificação das condições de aderência para cada encoder e da verificação do comportamento do sistema Cabo-Polia, comparando as aquisições de dados de dois encoders.

CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA
- Levantamento da massa inicial
- Adição de massas adicionais à inicial
- Verificar a eminência do movimento da polia
- Fazer aquisições dos dados fornecidos pelo encoder
- Tratamento dos dados

IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA CABO-POLIA
- Adição de massas diferentes no sistema
- Fazer aquisição dos dados fornecidos pelos encoders
- Realizar vários movimentos e aquisições
- Tratamento dos dados
- Comparação dos resultados

• Equações do modelo

i) Equilíbrio Dinâmico

$$\Sigma M_o = I \cdot \ddot{W}$$

(A.8)

onde: $m.g.r. = I \cdot W$

com:

- . I : Inércia do sistema fio-polia-encoder
- . W : Velocidade angular do cabo
- . \dot{W} : Aceleração angular do fio
- . g : Constante gravitacional $\approx 9,81$
- . r : Raio da polia
- . Cr : $C_o + C_w$: coeficiente resistivo (rolamento)
- . C_o : Coeficiente de partida
- . C_w : Coeficiente de viscosidade

ou pode-se escrever:

$$\begin{cases} m.g.r - C_o = C_w \cdot W + I \cdot \dot{W} \\ \dot{W} + \alpha \cdot W = \beta \end{cases}$$

(A.9)

com:

$$\beta = \frac{m.g.r - C_o}{I}, \quad \alpha = \frac{C_w}{I}$$

Que representa uma equação diferencial de 2^a ordem, onde, $m.g.t$ são conhecidas e C_o representa o coeficiente de saída do sistema, e pode ser obtido a partir de ensaios de saída.

Pode-se escrever:

$$C_o = m_d \cdot g \cdot r$$

(A.10)

Com m_d = massa para iniciar o movimento

• Solução

Equação Homogênea (SH)

$$\frac{dw}{dt} = \alpha \cdot W = 0$$

Solução do tipo:

$$W(t) = K_1 \cdot e^{-\alpha t} \quad (\text{A.11})$$

Equação Particular (SP)

Solução do tipo:

$$W(t) = K_1 \cdot e^{-\alpha t} + K_2 \quad (\text{A.12})$$

e a partir de (A.16), podemos escrever:

$$\beta = \alpha \cdot \left(K_1 \cdot e^{-\alpha t} + \beta/\alpha \right) - \alpha \cdot K_1 \cdot e^{-\alpha t} \quad (\text{A.13})$$

Solução Geral (SG)

$$\boxed{SG = SH + SP}$$

$$\boxed{W(t) = K_1 \cdot e^{-\alpha t} + \beta/\alpha} \quad (A.14)$$

e, se o valor $W(0) = W_0$ (começo de movimento), para descobrir o valor de K_1 , a partir da curva "velocidade x tempo";

$$\boxed{K_1 = W_0 - \beta/\alpha} \quad (A.15)$$

e, finalmente:

$$\left[\begin{array}{l} W(t) = (W_0 - \beta/\alpha) \cdot e^{-\alpha t} + \beta/\alpha \\ \dot{W}(t) = (-\alpha \cdot W_0 + \beta) \cdot e^{-\alpha t} \end{array} \right. \quad (A.16)$$

$$\text{com } \alpha = \frac{C_w}{I}; \quad \beta = \frac{m \cdot g \cdot r - C_0}{I} \quad \text{e} \quad \frac{\beta}{\alpha} = \frac{m \cdot g \cdot r - C_0}{C_w}$$

e a partir das curvas de velocidade e aceleração do modelo para permitir a identificar os valores de C_0 , I e C_w .

Utilização de uma massa de uma massa = m , e o registro das curvas de deslocamento x tempo e velocidade x tempo.

• Aproveitamento dos resultados

A partir de (A.16), podemos identificar os parâmetros de cada encoder a partir do cálculo da função exponencial do tipo:

$$\boxed{Y = A \cdot \exp(B \cdot t)} \quad (A.17)$$

onde "Y" é um valor teórico obtido da exponencial e "t" representa a variável de tempo.

Fórmulas utilizadas (Função exponencial)

• **Cálculo das médias:**

Média dos X	Média dos Y
$X_m = \frac{\sum X_k}{N}$	$Y_m = \frac{\sum Y_k}{N}$

(A.18)

• **Cálculo dos tipos de desvios:**

Desvio tipo sobre X	Desvio tipo sobre Y
$X_s = \sqrt{(\sum X_k^2)/N - X_m^2}$	$Y_s = \sqrt{(\sum Y_k^2)/N - Y_m^2}$

• **Cálculo da Covariância:**

$$\text{COV} = \frac{\sum X_k \cdot Y_k}{N} - X_m \cdot Y_m$$

(A.20)

• **Cálculo da ordenada origem:**

$$A = Y_m - B \cdot X_m$$

(A..21)

• Equação da regressão:

$$Y = A + B \cdot X$$

(A..22)

• Cálculo do coeficiente de correção :

$$R = A \cdot \text{ABS} (X_s/Y_s)$$

(A.23)

• Resumo

MÉDIA	
$X_m = \frac{\sum X_k}{N}$	$Y_m = \frac{\sum Y_k}{N}$
DESVIO	
$X_s = \sqrt{\frac{\sum X_k^2}{N} - X_m^2}$	$Y_s = \sqrt{\frac{\sum Y_k^2}{N} - Y_m^2}$
COVARIANÇA	
$\text{COV} = \frac{\sum X_k \cdot \ln Y_k}{N} - X_m \cdot Y_m$	
EQUAÇÃO EXPONENCIAL	
$R = A \cdot \text{ABS} \left(\frac{X_s}{Y_s} \right)$	com $A = Y_m \cdot e^{-Bt}$

• Condições de escorregamento

Hipótese: Se F é o mesmo (número de voltas sobre a polia n°2), podemos verificar a condição de escorregamento sobre a polia n° 1

$$\text{escorregamento} = \frac{V - v'}{V} \quad (\text{A.24})$$

com:

- . V = velocidade linear polia-encoder (encoder 1)
- . v' = velocidade linear do fio (a partir do encoder n° 2).

• Levantamento das condições de aderência

O objetivo deste estudo é o levantamento das inércias, atrito dos eixos e o escorregamento do cabo sobre a polia do sistema polia-encoder.

Isto permite determinar as condições e limitações no ensaio da calibração do robô através do triângulo de calibração, como por exemplo a velocidade máxima do órgão terminal.

• Equações do modelo

Verificação da influência da velocidade a partir da curva posição x velocidade angular W (t)

$$X(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{V(t)^2}{g} \quad (\text{A.25})$$

ou:

$$X(t) = K \cdot V(t)^2 \quad \text{com } K = g/2$$

Equações de correção do modelo - Vetor deslocamento x tempo

$$Y_a = Y_b \cdot A + B$$

(A.26)

com

- Y_a : Vetor posição corrigido a partir de parâmetros estáticos obtido da curva de calibração do encoder.
- Y_b : Vetor posição a partir do encoder.

A partir destas informações pode-se conhecer o vetor posição do fio Y_1 do sistema cabo-polia Y_2 :

$$\% \text{ de erro} = \frac{(Y_2 - Y_1)}{Y_1} \cdot 100$$

(A.2)

A.4 - RESULTADOS DAS CONDIÇÕES DE ADERÊNCIA

A figura A.3 mostra o sistema de montagem para o levantamento dos parâmetros relativo à aderência entre o cabo e a polia.

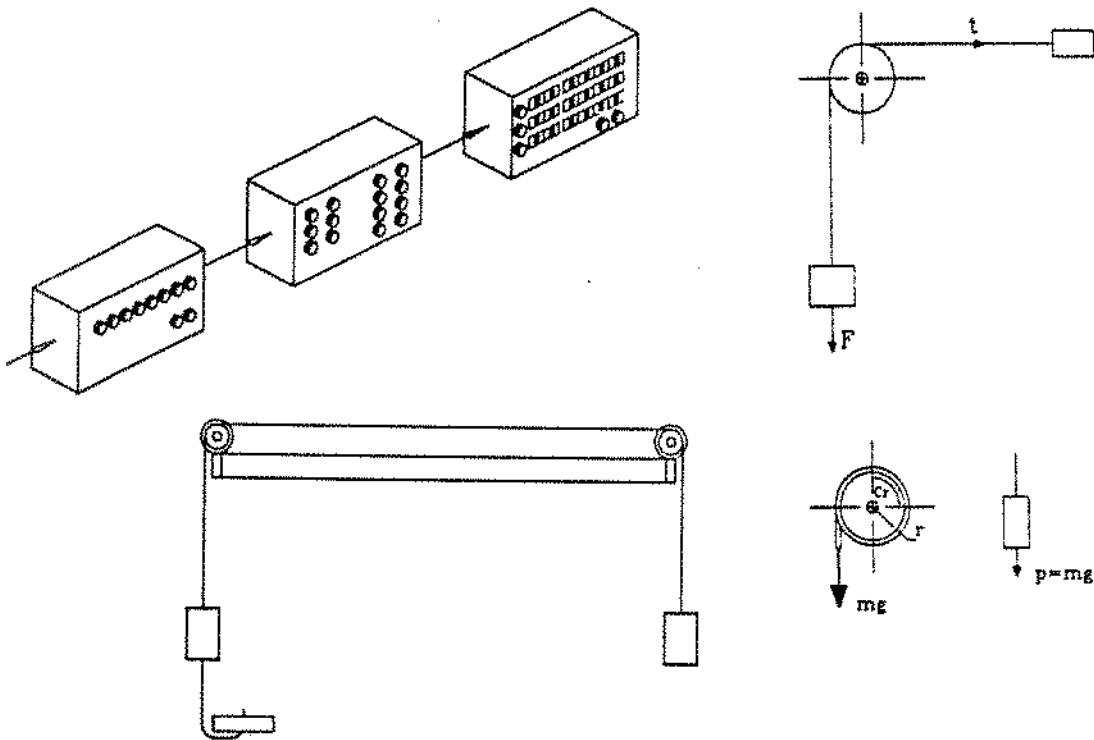


Figura A.3: Esquema de montagem

• Resultados das Condições de Aderência

Dados usando a aquisição para cada encoder:

- . Massa do sistema de contra-pesos = 140g
- . Frequência de aquisição = 25Khz

i) Início de movimento

ENSAIO N.	MASSA (g)	ENCODER
1	421.9	1
2	445.2	2
3	432.7	3

ii) Valores numéricos

	ENCODER 1	ENCODER 2	ENCODER 3
VALORES ESTIMADOS	23.34577	21.67523	21.55632
COEF. DE CORRELAÇÃO	0.999932	0.999998	0.999999
COVARIANÇA	483426.2	453487.5	399527.1
MODELO LINEAR A	23.3548	21.68231	21.56343
Y = AX + B B	-1.08843	0.797650	-0.21187

iii) Resultados experimentais

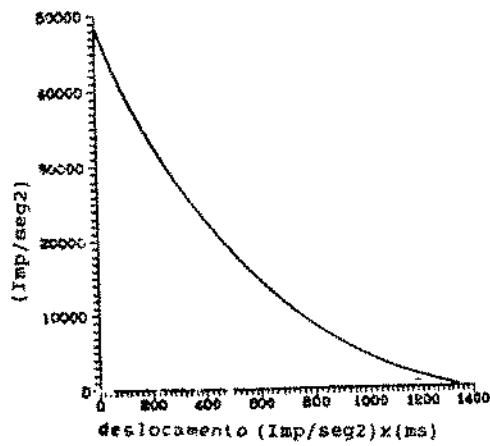
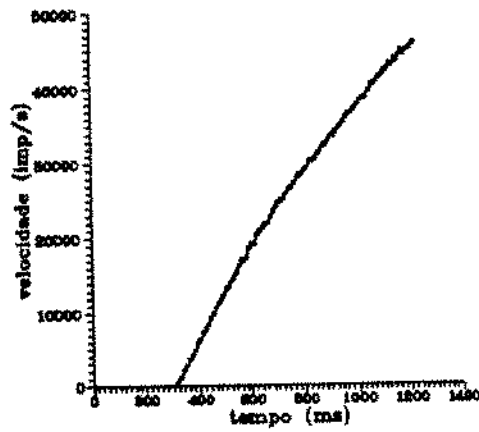
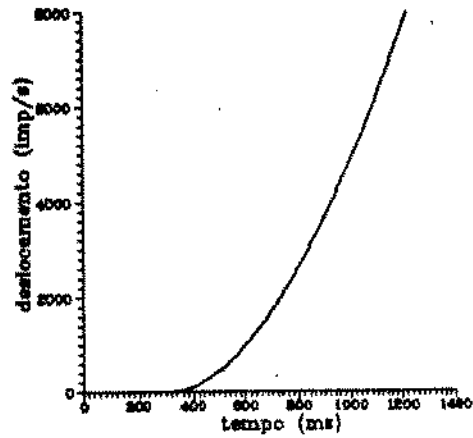


Figura A.3: Encoder - 1 m = 421.9g

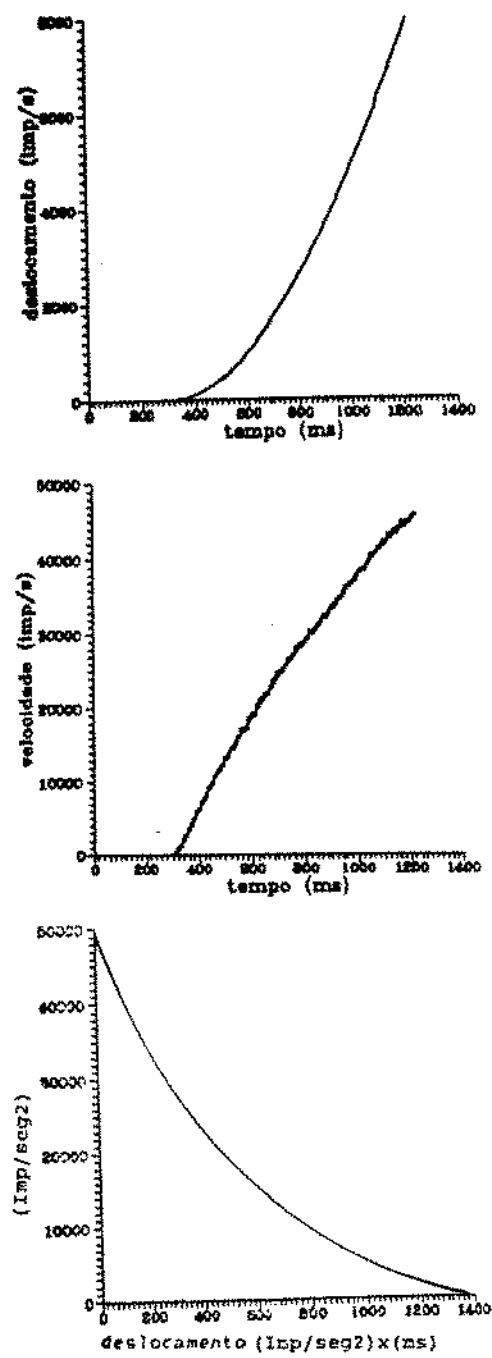


Figura A.4: Encoder - 2 m = 445.2g

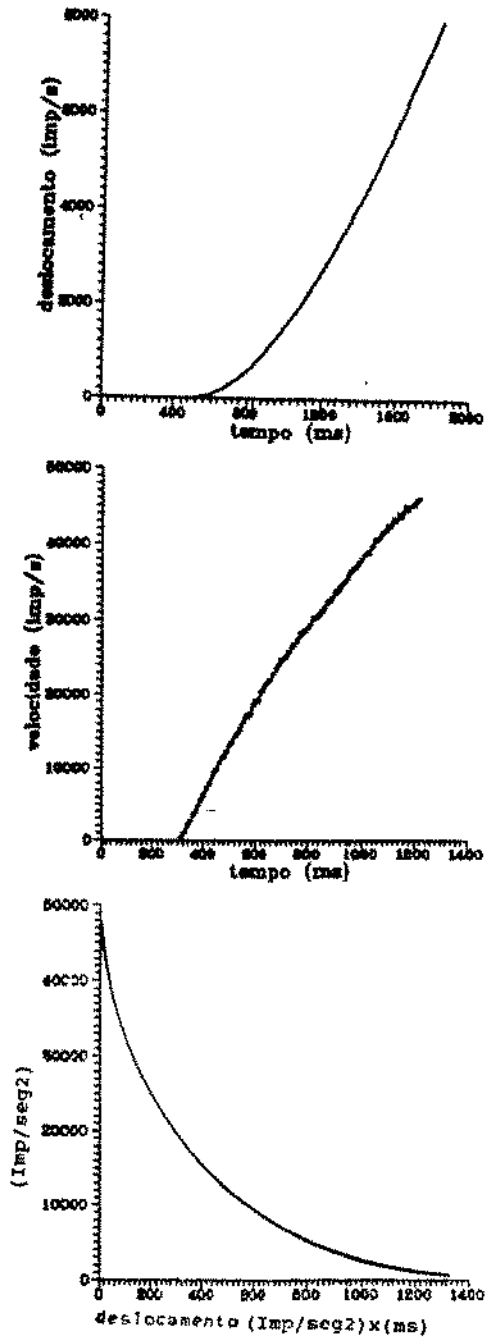


Figura A.5: Encoder - 3 m = 432.7g

CURVA DESLOCAMENTO - ENCODER 1
GRAU 2
SOMA DOS RESÍDUOS QUADRADOS 152496
PORCENTAGEM DE RESÍDUOS SOBRE A MÉDIA 100
COEFFICIENTE POLINOMIAL 0.002252625

CURVA VELOCIDADE - ENCODER 1
GRAU 2
SOMA DOS RESÍDUOS QUADRADOS 6638690
PORCENTAGEM DE RESÍDUOS SOBRE A MÉDIA 100
COEFFICIENTE POLINOMIAL -0.0166662

CURVA ACELERAÇÃO - ENCODER 1
GRAU 2
SOMA DOS RESÍDUOS QUADRADOS 3345690
PORCENTAGEM DE RESÍDUOS SOBRE A MÉDIA 100
COEFFICIENTE POLINOMIAL 0.0036762

CURVA DESLOCAMENTO - ENCODER 2
GRAU 2
SOMA DOS RESÍDUOS QUADRADOS 833944
PORCENTAGEM DE RESÍDUOS SOBRE A MÉDIA 100
COEFFICIENTE POLINOMIAL 0.0074351

CURVA VELOCIDADE - ENCODER 2
GRAU 2
SOMA DOS RESÍDUOS QUADRADOS 6638690
PORCENTAGEM DE RESÍDUOS SOBRE A MÉDIA 100
COEFFICIENTE POLINOMIAL -0.0166662

CURVA ACELERAÇÃO - ENCODER 2
GRAU 2
SOMA DOS RESÍDUOS QUADRADOS 2445690
PORCENTAGEM DE RESÍDUOS SOBRE A MÉDIA 100
COEFFICIENTE POLINOMIAL 0.0156862


```
CURVA DESLOCAMENTO - ENCODER 3  
GRAU 2  
SOMA DOS RESÍDUADOS QUADRADOS 174376  
PORCENTAGEM DE RESÍDUOS SOBRE A MÉDIA 100  
COEFFICIENTE POLINOMIAL 0.003633325
```

```
CURVA VELOCIDADE - ENCODER 3  
GRAU 2  
SOMA DOS RESÍDUADOS QUADRADOS 6788690  
PORCENTAGEM DE RESÍDUOS SOBRE A MÉDIA 100  
COEFFICIENTE POLINOMIAL -0.0022662
```

```
CURVA ACELERAÇÃO - ENCODER 3  
GRAU 2  
SOMA DOS RESÍDUADOS QUADRADOS 3467890  
PORCENTAGEM DE RESÍDUOS SOBRE A MÉDIA 100  
COEFFICIENTE POLINOMIAL 0.0028452
```

A.5 - CONCLUSÕES

Através das formulações matemáticas apresentadas neste anexo, e dos resultados experimentais das condições de aderência, foi possível garantir a validação do método de calibração proposto neste estudo. Os resultados principais são apresentados no Capítulo 4.

ANEXO B

TRIÂNGULO DE CALIBRAÇÃO COM SUAS RELAÇÕES TRIGONOMÉTRICAS

B.1 - DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DO TRIÂNGULO DE MEDIDAS

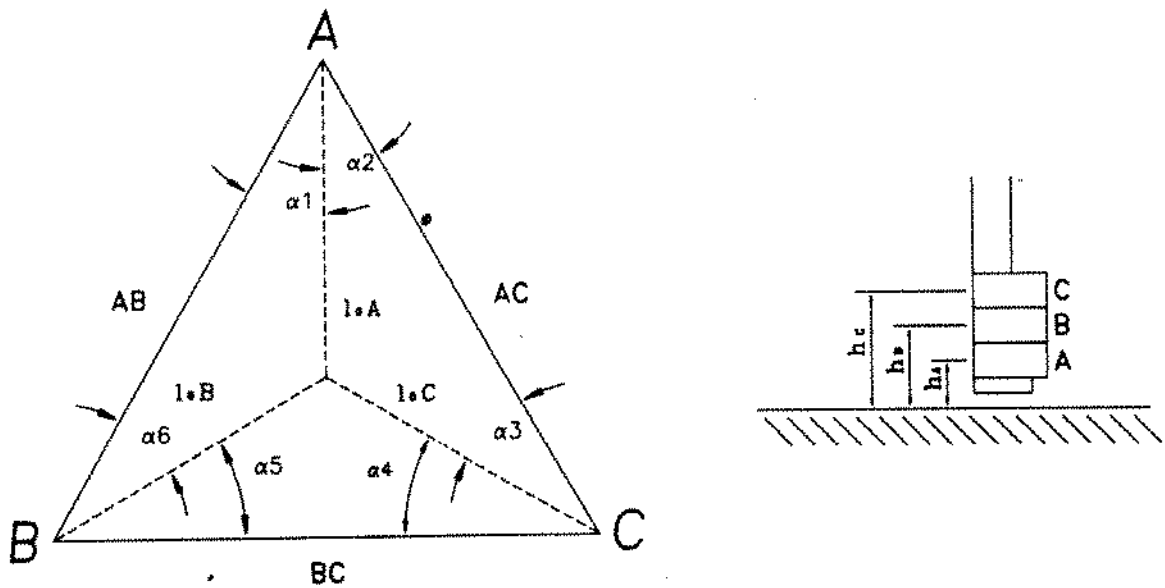


Figura B.1: Representação em um plano do triângulo de medidas

Na figura B.1 os seguintes parâmetros podem ser definidos:

. h_A, h_B, h_C . distância de cada cabo a partir da ferramenta ao plano do triângulo.

. l_A, l_B, l_C . Projeção dos comprimentos dos cabos no plano do triângulo.

• **Estimação dos parâmetros geométricos do sistema de medidas**

Estimação das dimensões de um triângulo (acima) a partir do conhecimento das distâncias L_1, L_2, L_3 .

• **Equações:**

Da Lei dos senos temos as seguintes expressões:

$$l_B = \overline{BC} \cdot \frac{\text{sen } \alpha_{13}}{\text{sen } \alpha_{12}} \qquad l_C = \overline{BC} \cdot \frac{\text{sen } \alpha_{11}}{\text{sen } \alpha_{12}}$$

$$l_A = \overline{AC} \cdot \frac{\text{sen } \alpha_{33}}{\text{sen } \alpha_{32}} \qquad l_C = \overline{AC} \cdot \frac{\text{sen } \alpha_{31}}{\text{sen } \alpha_{32}}$$

$$l_B = \overline{AB} \cdot \frac{\text{sen } \alpha_{23}}{\text{sen } \alpha_{22}} \qquad l_A = \overline{AB} \cdot \frac{\text{sen } \alpha_{21}}{\text{sen } \alpha_{22}}$$

Da Lei dos cossenos temos as seguintes expressões:

$$\overline{BC} = \sqrt{l_B^2 + l_C^2 - 2 \cdot l_B \cdot l_C \cdot \text{COS } \alpha_{12}}$$

$$\overline{AB} = \sqrt{l_B^2 + l_A^2 - 2 \cdot l_B \cdot l_A \cdot \text{COS } \alpha_{22}}$$

$$\overline{AC} = \sqrt{l_A^2 + l_C^2 - 2 \cdot l_A \cdot l_C \cdot \text{COS } \alpha_{32}}$$

Ainda:

$$\alpha_{11} + \alpha_{21} + \alpha_{13} + \alpha_{33} + \alpha_{31} + \alpha_{23} = 3.1416$$

$$\alpha_{12} + \alpha_{22} + \alpha_{32} = 6.2832$$

Em relação sistema de coordenadas como exposto no triângulo tem-se os valores de X e Y, que corresponde ao ponto do elemento terminal do robô visto pelo sistema externo de medição.

• Dimensões do Triângulo de Calibração

Ver figura B.2

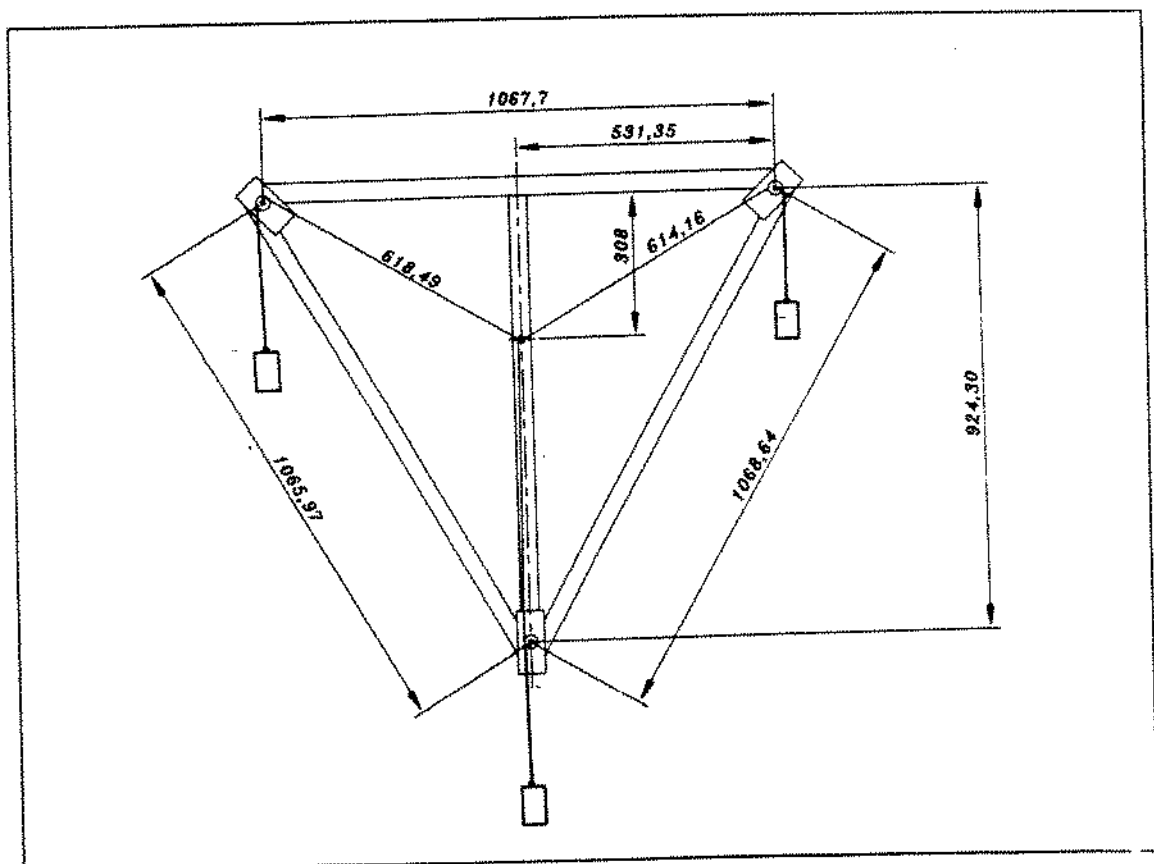


Figura B.2: Triângulo de Calibração com seus parâmetros

$$Y = -l_A \cdot \text{sen}(\alpha_{11})$$
$$X = \sqrt{l_A^2 - Y^2}$$

• Medições

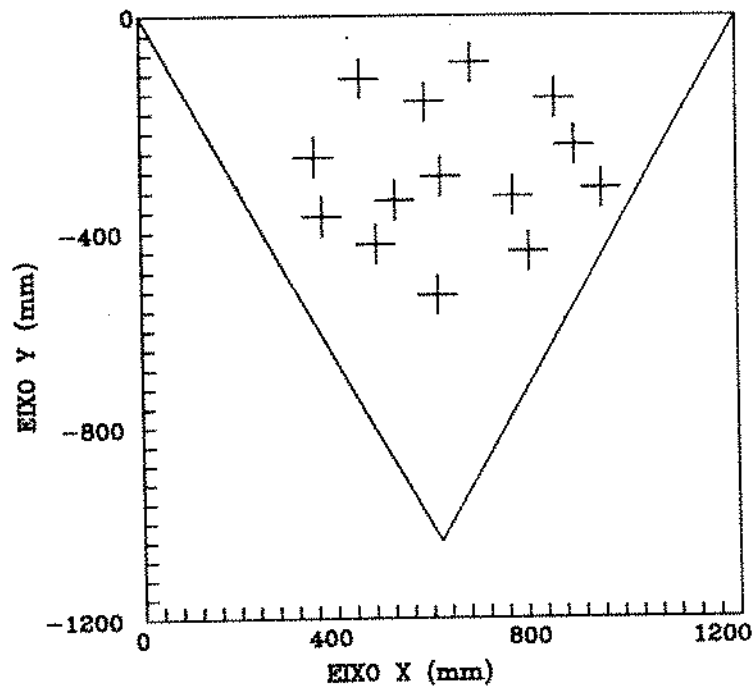


Figura B.3: Plano de Medidas

ANEXO C

CARACTERISTICAS DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

C.1 - ROBO INDUSTRIAL MANUTEC R-3

C.1.1 Dados Técnicos do Robô

- Sistema Elétrico: - 50 Hz
- 500/440/420/380V \pm 10%
- 1 KW

- Peso: - Estrutura mecânica: 260 Kg
- Controlador RCM 2: 250 Kg

- Capacidade de Carga com precisão do elemento terminal de \pm 0.1mm:
- 15 Kg

- Velocidade Máxima:
- 1.0 m/s

- Condições de Instalação:
- Temperatura: de 0 a 45°C
- Umidade: 20 a 90 % Relativa

- Espaço de Trabalho e Medidas ver figuras C.1 e C.2

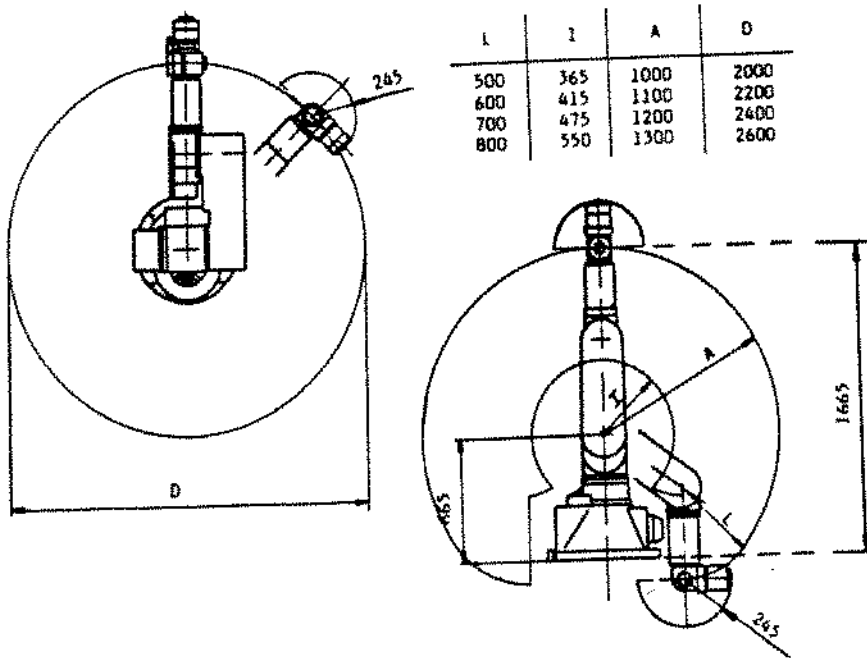


Figura C.1: Espaço de Trabalho

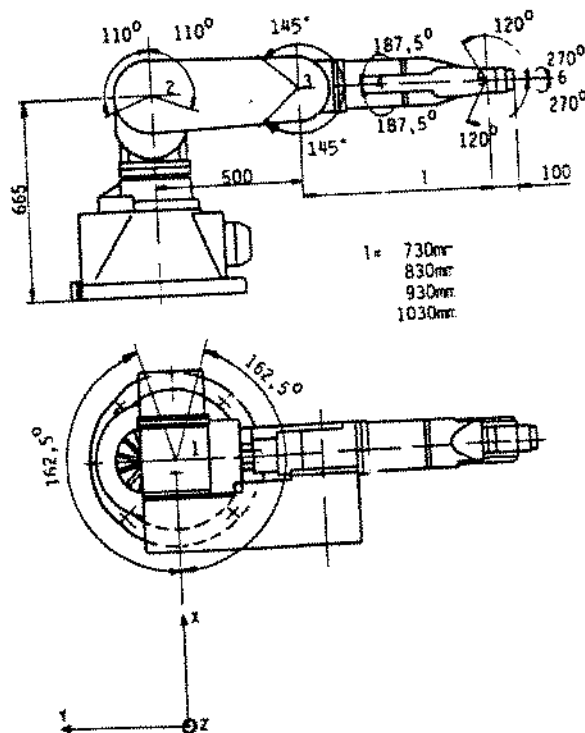


Figura C.2: Principais Parâmetros do Robô.

C.2 - GERADORES DE PULSOS ROTATIVOS TIPO INCREMENTAL MODELO BA - INCREMENTAL

C.2.1 Dados Técnicos

- Velocidade Máxima: 6000 RPM
- Momento de Inércia: 100g cm²
- Torque: 0.2 Ncm s/selo
- Carga Máxima no Eixo: 50N-axial e radial
- Vibração: 10g (10 a 2000 Hz)
- Impacto: 30g (4ms)
- Peso: 800g
- Alimentação: "Push-Pull": 11 a 30 Vcc
"Line Driver CMOS": 12 a 30Vcc
"Line Driver TTL": 5 Vcc
- Carga Máxima na Saída: "Push-Pull": 20mA
"Line Driver CMOS": 40mA
"Line Driver TTL": 40mA
- Consumo Máximo: "Push-Pull": 20 a 90 mA
"Line Driver CMOS": 25 a 60 mA
"Line Driver TTL": 20 a 50 mA
- Frequência de Saída: 50 Khz (Push-Pull)
100 Khz (Line Driver)
- Temperatura de Trabalho: 0°C a 60°C
- Número de Pulsos por Rotação: 1 a 2500
- Elemento Sensitivo: Foto-Transistor - "OPTO-Schmitt"
- Fonte de Luz: "LED" infravermelho

C.3 - BALANÇA SARTORIUS 1103

Capacidade: 2000g
alimentação: 220V

C.4 - GERADOR DE FUNÇÃO

FG 503
TM 501

ANEXO D

LISTAGEM DOS PROGRAMAS UTILIZADOS

PROGRAMA 1: INTERPOLAÇÃO LINEAR

```
10 OPTION BASE 1
20 REM INTERPOLACAO
30 DIM XX(100), V(100), E(100)
40 REM INTERPOLACAO LINEAR TYPE V=A+B*X
50 ABORT = 0
60 Y1 = 0: X1 = 0: Z = 0: X2 = 0: Y2 = 0
70 INPUT "NO ENSAIO "; F$: INPUT "NO ENCODER "; KK$
80 INPUT "No de pontos"; NPT
90 FOR I = 1 TO NPT
100 PRINT "Xm("; I; ")=": INPUT XX(I): PRINT "L("; I; ")=": INPUT V(I):
    PRINT "Erro("; I; ")=": INPUT E(I)
110 NEXT
120 FOR I = 1 TO NPT
130 PRINT "Xm("; I; ")"; "L("; I; ")"; "E("; I; ")", XX(I), V(I), E(I)
140 NEXT
150 INPUT "Voce quer mudar .... sim (1) nao (2) ?"; AFF
160 IF AFF = 2 THEN GOTO 180
170 IF AFF = 1 THEN INPUT "No ponto ="; I: PRINT "X("; I; ")=":
    INPUT XX(I): PRINT "L("; I; ")=": INPUT V(I):PRINT "E("; I; ")=": I
180 FOR I = 1 TO NPT
190 X1 = X1 + XX(I)           'SOMA DOS X
200 Y1 = Y1 + V(I)          'SOMA DOS Y
210 X2 = X2 + XX(I) * XX(I) 'SOMA DOS X QUADRADOS
220 Y2 = Y2 + V(I) * V(I)  'SOMA DOS Y QUADRADOS
230 Z = Z + V(I) * XX(I)   'SOMA DOS X*Y
240 NEXT
250 X1 = X1 / NPT
260 Y1 = Y1 / NPT
270 B = (Z - NPT * X1 * Y1) / (X2 - NPT * X1 * X1)
280 A = Y1 - B * X1
```

```
290 PRINT "MODELO LINEAR Y=A+BX "  
300 PRINT "A="; A: PRINT "B="; B  
310 TOTALSS = Y2 - NPT * Y1 * Y1  
320 REGSS = (Z - NPT * X1 * Y1) ^ 2 / (X2 - NPT * X1 * X1)  
330 RESSS = TOTALSS - REGSS  
340 PRINT "RESIDO SOMA QUADRADOS="; RESSS  
350 REGMS = REGSS  
360 RESMS = RESSS / (NPT - 2)  
370 PRINT "RESIDO MINIMOS QUADRADOS ="; RESMS  
380 IF RESMS = 0 THEN GOTO 410  
390 F = REGMS / RESMS  
400 PRINT "F="; F  
410 DFREG = 1  
420 DFRES = NPT - 2  
430 DFTOT = DFREG + DFRES  
440 ABORT = 1  
450 INPUT "Guardar .... SIM (1)   NAO (2)"; AFF  
460 IF AFF = 2 THEN GOTO 480  
470 GOSUB 490  
480 END  
490 REM ROTINA de Armazenamento  
500 F2$ = "E" + F$ + "ENC" + KK$ + ".INT"  
510 FI2$ = F2$  
520 OPEN "O", 2, FI2$  
530 PRINT #2, NPT  
540 FOR I = 1 TO NPT  
560 PRINT #2, I; XX(I); V(I); E(I)  
590 NEXT I  
600 CLOSE #2  
610 PRINT : PRINT "File "; F2$; " escrito no directorio"  
620 RETURN
```

PROGRAMA 2: CALCULO DA CURVA DE CALIBRACAO

```
10 OPTION BASE 1
20 REM ERRO FINAL
30 DIM XX(100), YY(100), V(100), E(100)
40 REM INTERPOLACAO LINEAR TYPE V=A+B*X
50 ABORT = 0
60 Y1 = 0: X1 = 0: Z = 0: X2 = 0: Y2 = 0
70 INPUT "NO ENSAIO "; F$: INPUT "NO ENCODER "; KKS
73 PRINT "MODELO LINEAR Y=A+BX": PRINT
75 INPUT "A ="; A: INPUT "B ="; B
76 PRINT "MODELO LINEAR Y=A+BX "
77 PRINT "A="; A: PRINT "B="; B: PRINT
109 GOSUB 630
110 PRINT "No de pontos"; NPT
120 FOR I = 1 TO NPT
130 PRINT "Xm("; I; ")"; "L("; I; ")"; "E("; I; ")"; XX(I), V(I), E(I):
140 NEXT
180 FOR I = 1 TO NPT
190 YY(I) = A + B * V(I) 'reta de calibracao
200 E(I) = ABS(YY(I) - XX(I))
210 PRINT "Xm("; I; ")"; "Xr("; I; ")"; "Erro("; I; ")"; XX(I), YY(I), E(I)
240 NEXT
450 INPUT "Guardar .... SIM (1) NAO (2)"; AFF
460 IF AFF = 2 THEN GOTO 480
470 GOSUB 490
480 END
490 REM ROTINA de Armazenamento
500 F2$ = "E" + F$ + "ENC" + KK$ + ".FIM"
510 FI2$ = F2$
520 OPEN "O", 2, FI2$
530 REM PRINT #2, PARAM
540 FOR I = 1 TO NPT
560 PRINT #2, I; XX(I); YY(I); E(I)
590 NEXT I
600 CLOSE #2
610 PRINT : PRINT "File "; F2$; " escrito no diretorio"
620 RETURN
630 REM ROTINA de Leitura de arquivos
640 F2$ = "E" + F$ + "ENC" + KK$ + ".INT"
650 FI2$ = F2$
```

```
660 OPEN "I", 2, F12$
670 INPUT #2, NPT
675 PRINT NPT
680 FOR I = 1 TO NPT
690 INPUT #2, I
691 INPUT #2, XX(I)
692 INPUT #2, V(I)
693 INPUT #2, E(I)
696 PRINT I, XX(I), V(I), E(I)
700 NEXT I
710 CLOSE #2
720 PRINT : PRINT "File "; F2$; " final de leitura"
730 RETURN
```

PROGRAMA 3: CÁLCULO DO ERRO COMPARATIVO

```
10 OPTION BASE 1
20 REM ERRO FINAL
30 DIM XX(100), YY(100), V(100), E(100)
40 REM INTERPOLACAO LINEAR TYPE V=A+B*X
50 ABORT = 0
60 Y1 = 0: X1 = 0: Z = 0: X2 = 0: Y2 = 0
70 INPUT "NO ENSAIO "; F$: INPUT "NO ENCODER "; KK$
73 PRINT "MODELO LINEAR Y=A+BX": PRINT
75 INPUT "A ="; A: INPUT "B ="; B
76 PRINT "MODELO LINEAR Y=A+BX "
77 PRINT "A="; A: PRINT "B="; B: PRINT
109 GOSUB 630
110 PRINT "No de pontos"; NPT
120 FOR I = 1 TO NPT
130 PRINT "Xm("; I; ")"; "L("; I; ")"; "E("; I; ")"; XX(I), V(I), E(I):
140 NEXT
180 FOR I = 1 TO NPT
190 YY(I) = A + B * V(I) 'reta de calibracao
200 E(I) = ABS(YY(I) - XX(I))
210 PRINT "Xm("; I; ")"; "Xr("; I; ")"; "Erro("; I; ")"; XX(I), YY(I), E(I)
240 NEXT
450 INPUT "Guardar .... SIM (1) NAO (2)"; AFF
460 IF AFF = 2 THEN GOTO 480
470 GOSUB 490
480 END
490 REM ROTINA de Armazenamento
500 F2$ = "E" + F$ + "ENC" + KK$ + ".FIM"
510 FI2$ = F2$
520 OPEN "O", 2, FI2$
530 REM PRINT #2,PARAM
540 FOR I = 1 TO NPT
560 PRINT #2, I; XX(I); YY(I); E(I)
590 NEXT I
600 CLOSE #2
610 PRINT : PRINT "File "; F2$; " escrito no directorio"
620 RETURN
630 REM ROTINA de Leitura de arquivos
640 F2$ = "E" + F$ + "ENC" + KK$ + ".INT"
650 FI2$ = F2$
```

```
660 OPEN "I", 2, F12$
670 INPUT #2, NPT
675 PRINT NPT
680 FOR I = 1 TO NPT
690 INPUT #2, I
691 INPUT #2, XX(I)
692 INPUT #2, V(I)
693 INPUT #2, E(I)
696 PRINT I, XX(I), V(I), E(I)
700 NEXT I
710 CLOSE #2
720 PRINT : PRINT "File "; F2$; " final de leitura"
730 RETURN
```

PROGRAMA 4: CALCULO DAS COORDENADAS (X,Y) NO PLANO DO TRIANGULO

```

*****
Eureka: The Solver, Version 1.0
Wednesday June 16, 1993, 5:50 pm.
Name of input file: D:UREKAARA3
*****
; Deseja-se Xm, Ym
; conhecendo-se LA, LB, LC
; a partir da medida das cotas atraves da
; mesa tri-dimensional (A,B,C)
; LA = ENCA + LoA

LA = AC * sin (alf33)/ sin (alf32)
LB = BC * sin (alf13)/ sin (alf12)
LC = BC * sin (alf11)/ sin (alf12)
LB = AB * sin (alf23)/ sin (alf22)
LA = AB * sin (alf21)/ sin (alf22)
LC = AC * sin (alf31)/ sin (alf32)

BC = SQRT ( LB^2 + LC^2 - 2 * LB * LC * cos(alf12))
AB = SQRT ( LB^2 + LA^2 - 2 * LB * LA * cos(alf22))
AC = SQRT ( LA^2 + LC^2 - 2 * LA * LC * cos(alf32))

alf11 + alf21 + alf13 + alf33 + alf31 + alf23 = 3.1416
alf12 + alf22 + alf32 = 6.2832

Y = - LC * sin (alf13)
X = SQRT (LC^2 - Y^2)

```

```
; dimensoes conhecidas
```

```
AB = 1068.64
```

```
AC = 1065.97
```

```
BC = 1067.70
```

```
LA = 616.30
```

```
LB = 618.49
```

```
LC = 614.16
```

```
; Solution
```

Variables		Values
AB	=	1068.6400
AC	=	1065.9700
alf11	=	.52117295
alf12	=	2.0952017
alf13	=	.52522551
alf21	=	.52364964
alf22	=	2.0922472
alf23	=	.52570276
alf31	=	.52192198
alf32	=	2.0957511
alf33	=	.52392715
BC	=	1067.7000
LA	=	616.30000
LB	=	618.49000
LC	=	614.16000
X	=	531.37792
Y	=	-307.94482

```
Maximum error is .057043347
```


**PROGRAMA 5: PROGRAMA DE UMA TRAJETORIA NO PLANO DO TRIANGULO
(OBTIDO ATRAVES DO CONTROLE DO ROBO)**

SIROTEC PS

PROGRAMMDOKUMENTATION

HP 60 SEITE 1

HAUPTPROGRAMM 60

```
1      DEF HP60
2      WRT E4 H
3      GES ALL 10
4      PTP X-764.24 Y+171.15 Z+865.30
          A-6.087 B+64.760 C-87.402
          UEB A1P A2P A3N A4N A5N A6N
5      WRT E5 H
6      PTP X-755.04 Y+170.30
          A-6.087 B+64.760 C-87.402
```