

DIOGO MORETTI BRANCHINI

note final
9.3 (nove e tres)
DM

**DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO BASEADO
EM UM MECANISMO DE CINEMÁTICA PARALELA**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Engenheiro

São Paulo
2004

DIOGO MORETTI BRANCHINI

**DESENVOLVIMENTO DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO BASEADO
EM UM MECANISMO DE CINEMÁTICA PARALELA**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Engenheiro

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr.
Tarcisio Antonio Hess Coelho

São Paulo
2004

AGRADECIMENTOS

Primeiramente estou muito grato aos meus pais Maria Luiza Moretti e Ubiraci José Padrão Branchini, meu grande irmão Rodrigo Moretti Branchini e familiares pelo o apoio e incentivo dado tanto durante as minhas conquistas como também nas derrotas.

Ao meu amigo e orientador Dr. Eng. Tarcisio Antonio Hess Coelho pela atenção, paciência e grande ajuda neste Trabalho de Formatura e na Iniciação Científica de 2003/2004.

Aos meus grandes amigos da faculdade e do colégio que sempre colaboraram, ajudaram nos estudos e, principalmente, na curtição fora da faculdade.

Aos meus colegas e amigos da Pós-Graduação Mateus H. F. Araújo e Thiago Almeida Franco pela ajuda e apoio no projeto eletrônico.

Professor Dr. Eng. Celso Massatoshi Furukawa pelo empréstimo de duas placas de micro-controlador.

Este trabalho teve o apoio conjunto da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processo Fapesp N. 2003/13862-9) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através de bolsa PIBIC.

A todos que, diretamente ou indiretamente, ajudaram na execução deste trabalho.

RESUMO

A importância do estudo de um manipulador robótico baseado em um mecanismo de cinemática paralela deve-se ao seu grande potencial para aplicações em equipamentos como manipuladores robóticos e em máquinas - ferramentas. Esta arquitetura não-convencional apresenta, potencialmente, uma série de vantagens se comparada à tradicional serial. Dentre elas podem ser citadas: alta rigidez, leveza, rapidez, precisão e alta capacidade de carga. Além disto, são mais leves o que lhe confere um desempenho dinâmico superior.

Este projeto tem por objetivo o desenvolvimento de um robô com arquitetura paralela, de modo a realizar operações de posicionamento de objetos num espaço tridimensional.

ABSTRACT

The most frequent machines used for manufacturing components or in assembly have serial kinematics mechanism, where each part of the machine has to support the next parts. Analyzing serial mechanism it is possible to notice that the moving parts have to be sufficient heavy to provide stiffness for limiting the structural flexibility of the components. Consequently, that lowers the precision of the machine which causes a limitation on the dynamics performance of operations.

However, because of the fact that parallel mechanism have a parallel movement of its platform intermediate by some serial mechanism, it provides very fast movements, precise and with high acceleration. In addition, this kind of mechanism has a high stiffness in its work-space and it has high relation on load/weight in comparison with serial mechanism. Because of the fact that the actuator are located on or near the fixed platform, the arms of the mechanism can be very light weighted which provides a better dynamic movement. As a result of its typical topology it has a minimization on the accumulative errors contributing in a high precision on the relation position/orientation

Despite some advantages, parallel mechanism presents some disadvantages, as example the need of a complex control, limited working space, some singulars in the work space, and an unfavorable relation between work space and occupied volume of the machine.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos.....	1
CAPÍTULO 2: REVISÃO DA LITERATURA	3
2.1. Definições de mecanismos paralelos	3
2.2. Surgimento do mecanismo paralelo.....	5
2.3. Aplicações de mecanismos paralelos.....	7
2.3.1. Alguns exemplos de suas aplicações.....	7
2.3.1.1. Em indústrias	7
2.3.1.2. Na medicina.....	7
2.3.1.3. Em simuladores de movimentos	7
CAPÍTULO 3: METODOLOGIA DO PROJETO.....	8
3.1. Projeto Mecânico.....	8
3.2. Projeto Eletrônico.....	8
CAPÍTULO 4: TOPOLOGIA	9
4.1. Considerações iniciais.....	9
4.2. Requerimentos mecânicos para o manipulador.....	11
CAPÍTULO 5: MÉTODOS DE GERAÇÃO DE ARQUITETURAS	14
5.1.1. Graus de liberdade	14
5.1.2. Graus de Mobilidade	14
5.1.3. Método da enumeração das cadeias ativas	15
5.1.4. Método da adição de uma cadeia passiva	15
CAPÍTULO 6: PROJETO DA ARQUITETURA DO ROBÔ	16
CAPÍTULO 7: DIMENSIONAMENTO	21
7.1. Introdução	21
7.2. Dimensionamento dos Braços	21
7.2.1. Considerações iniciais.....	21

7.2.2. Procedimento para o calculo dos ângulos das juntas	22
7.3. Dimensionamento das Bases	28
7.3.1. Considerações iniciais.....	28
7.3.2. Analise das variações do ângulo da articulação.....	29
7.3.3. Analise da área de trabalho.....	30
CAPÍTULO 8: SELEÇÃO DE MATERIAIS	32
CAPÍTULO 9: SELEÇÃO DOS ATUADORES.....	34
9.1. Introdução	34
9.2. Seleção do Atuador.....	34
CAPÍTULO 10: CINEMÁTICA	39
10.1. Introdução	39
10.2. Cinemática Inversa.....	39
CAPÍTULO 11: FABRICAÇÃO.....	45
CAPÍTULO 12: PROJETO ELETRÔNICO.....	52
CAPÍTULO 13: DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	55
CAPÍTULO 14: CONCLUSÕES	62
14.1. Dificuldades Encontradas	64
14.1.1. Bibliografias	64
14.1.2. Softwares	64
14.1.3. Projeto Mecânico	65
14.1.4. Projeto Eletrônico	65
14.2. Discussão dos Principais Problemas Apresentados pelo Projeto	66
ANEXO A - DESENHOS de FABRICAÇÃO.....	67
ANEXO B - PROGRAMA DA CINEMÁTICA INVERSA 2D.....	76
ANEXO C – PROGRAMA DA CINEMÁTICA INVERSA 3D.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Resumo das Figura 4.1e Figura 4.2 aplicado a função de “Pick & Place”.	12
Tabela 6.1 – Matriz de decisão para o método de enumeração de cadeias ativas.	17
Tabela 6.2 – Matriz de decisão para o método de enumeração de cadeias passivas.	18
Tabela 6.3 – Matriz de decisão da arquitetura final que será usada neste projeto.	19
Tabela 7.1 – Tabela mostrando a ordem crescente do torque em relação as configurações dos braços.	28
Tabela 8.1 – Materiais indicados para cada componentes com relação as suas principais características requeridas.	33
Tabela 8.2 – Materiais utilizados para a fabricação dos componentes do manipulador robótico.	33
Tabela 9.1 – Matriz de decisão para o tipo de atuador.	36
Tabela 9.2 – Nota final obtida na matriz de decisão para o tipo de atuador.	36
Tabela 9.3 – Matriz de decisão de motores elétricos.	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diagrama cinemático de um mecanismo paralelo e suas partes.	3
Figura 2.2 - Cadeias cinemáticas: (a) aberta; (b) fechada.	4
Figura 2.3 - Estruturas: (a) paralela; (b) serial.....	5
Figura 2.4 - Plataforma de Stewart (a) esboço (Parallemic, 2004); (b) ilustração (Nanosystems, Drexler 1992).....	6
Figura 2.5 - Máquinas-ferramenta “Variax”.....	6
Figura 4.1 - Diagrama exemplificando a relações entre o potencial de performance de cada característica do robô paralelo com as suas possíveis aplicações e também com as necessidades de cada tipo de indústrias (Traduzido do Brogard, 2002).	10
Figura 4.2 - Números de graus de liberdade requeridos pelo o órgão terminal para cada tipo de aplicação (Traduzido do Brogard, 2002).	11
Figura 6.1 - Cinemática da arquitetura 3 RSR.....	18
Figura 6.2 - Cadeia cinemática 3RSS + CP.....	19
Figura 7.1 – Modelo 2D (2RRR + RP).....	21
Figura 7.2 – Variação do ângulo da articulação 1 em relação ao deslocamento no eixo x, para cada configuração de braço.	23
Figura 7.3 - Variação do ângulo da articulação 2 em relação ao deslocamento no eixo x, para cada configuração de braço.	23
Figura 7.4 – Máxima variação dos ângulos das articulações com relação as configurações dos braços.....	24
Figura 7.5 - Máximas variações dos ângulos dos motores em relação às configurações dos braços.....	25
Figura 7.6 – Modelos para medir o torque: (a) Posição inicial - vertical, (b) Posição final – horizontal.	26
Figura 7.7 - Torque requerido para a configuração de braço (4,11) para movimentar uma carga de 0.3Kg.....	26
Figura 7.8 - Torque requerido para a configuração de braço (07, 08) para movimentar uma carga de 0.3Kg.....	27

Figura 7.9 – Comparativo da máxima variação do ângulo da articulação com relação a posição no eixo y para diferentes configurações de bases.	29
Figura 7.10 – Área de trabalho nos eixos x e y para três configurações de base.	30
Figura 9.1 – (A) Motor CC com encoder. (B) Modelo virtual do motor CC.....	38
Figura 10.1 – Esquema do (3RSS + CP) usado para o calculo da cinemática inversa.....	40
Figura 10.2 – (A) Mostra a posição de P, H, v e θ. (B) Posição de h.....	41
Figura 10.3 – Posição de L no triângulo formado por A1, A2, e A3.	41
Figura 10.4 – Posição dos ângulos α_1, α_2 e α_3	42
Figura 11.1 – Vista isométrica do desenho de conjunto.....	45
Figura 11.2 – Imagem destacando o manipulador.....	45
Figura 11.3 – Vista inferior.....	46
Figura 11.4 – Maquete do robô manipulador.	46
Figura 11.5 – Outras vistas da maquete.....	47
Figura 11.6 – Junta tipo elástico.....	47
Figura 11.7 – Esquema demonstrando o momento causado na guia linear.....	48
Figura 11.8 – Guia linear utilizada no projeto.....	48
Figura 11.9 – Base de fixação dos motores.....	49
Figura 11.10 – Base de fixação dos motores e da guia linear.....	49
Figura 11.11 – Vista lateral do protótipo.	50
Figura 11.12 – Vista frontal do protótipo.....	50
Figura 11.13 – Vista inferior do protótipo.	51
Figura 11.14 – Manipulador em detalhe.	51
Figura 12.1 – Esquema do micro-controlador Motorola.....	52
Figura 12.2 – Micro-controlador Motorola.....	52
Figura 12.3 – Foto da placa acionadora de Motor CC.	53
Figura 13.1 – Manipulador robótico (3RSS + CP) projetado.....	55
Figura 13.2 – Vista Frontal do Volume de trabalho (plano yz).	56
Figura 13.3 – Vistas: (A) Lateral (plano xz) e (B) Superior (plano xy).	56
Figura 13.4 – Vista Isométrica do volume de trabalho.....	57
Figura 13.5 – Vista lateral do espaço de trabalho.....	57

Figura 13.6 – Vistas frontais da garra: (A) centro e (B) deslocada para à direita.	58
.....	58
Figura 13.7 – Coordenadas adotados no manipulador.....	58
Figura 13.8 – Comparaçao entre vistas frontais.....	59
Figura 13.9 – Comparaçao entre vistas laterais.....	60
Figura 13.10 – Comparaçao entre vistas superior.....	60
Figura 13.11 – Comparaçao entre vistas isométricas.	61
Figura 14.1 – Manipulador robótico (3RSS + CP) projetado.....	62
Figura 14.2 – Coordenadas adotados no manipulador.....	63
Figura 14.3 – Visualização do ângulo formado pela garra e a vertical.....	63

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

As maquina-ferramentas mais convencionais para a manufatura de componentes ou montagem têm arquiteturas cinemáticas seriais, com cada eixo de movimento suportando os próximos eixos e providenciando o movimento dos mesmos. Analisando a arquitetura serial percebe-se que as partes móveis têm que ser suficientemente pesadas para gerar rigidez suficiente para o limitar à flexão dos componentes das estruturas que diminuem a precisão da maquina. Isso acaba restringindo a performance de sua dinâmica e reduzindo a sua flexibilidade de operação.

Contudo, o mecanismo paralelo pelo fato de apresentar um movimento paralelo de sua plataforma por intermédios de diversos mecanismos seriais é capaz de efetuar movimentos muitos rápidos, precisos e com altas acelerações; além de possuírem características de alta rigidez dentro de seu espaço de trabalho e conseguirem altas relações carga/peso do que arquiteturas seriais. Como seus atuadores localizam-se na base ou junto a esta, os seus braços são muito mais leves, demonstrando um melhor desempenho dinâmico. Devido à sua topologia típica, minimiza-se o acúmulo de erros dos atuadores, um fator que contribui para sua alta precisão de posicionamento/orientação.

Entretanto, os mecanismos paralelos apresentam algumas desvantagens como, por exemplo, a necessidade de um controle complexo, espaço de trabalho limitado, singularidades com o espaço de trabalho, além de apresentar uma relação desfavorável entre o seu espaço de trabalho e o volume ocupado pelo sistema.

1.2. Objetivos

No presente trabalho realizou-se o estudo de manipuladores robóticos cuja arquitetura se baseia em uma cinemática paralela. Os objetivos gerais foram estudar, projetar e construir um protótipo de um robô cuja arquitetura se baseie em um

mecanismo de cinemática paralela, de modo a realizar operações de posicionamento de objetos num espaço tridimensional.

CAPÍTULO 2: REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Definições de mecanismos paralelos

Um *mecanismo de cinemática paralela* pode ser definido como sendo um mecanismo de *cadeia fechada* composto por duas ou mais *cadeias cinemáticas* que conectam a plataforma móvel do efetuador a uma base fixa. Pela essa definição exclui-se qualquer tipo de robô serial, os quais apresentam uma *cadeia aberta*.

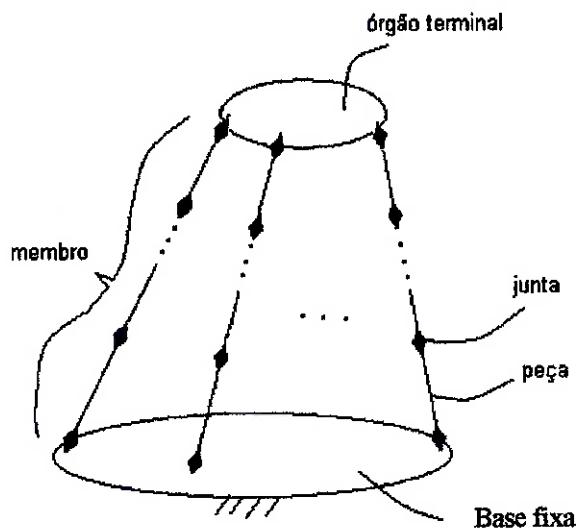


Figura 2.1 - Diagrama cinemático de um mecanismo paralelo e suas partes.

Feita a definição anterior, faz-se necessário à explicação de algumas terminologias.

Uma *cadeia cinemática* é um sistema composto por peças que são conectados por intermédio de *juntas* ou *pares cinemáticos*. Sendo que uma *junta* define o movimento relativo entre essas duas peças; e que o tipo de movimento de uma junta é definido pelo o número de graus de liberdade que ela permite ou restringe.

Duas cadeias são *dependentes* quando o movimento de uma cadeia é determinado pelo da outra. Por outro lado, consideram-se duas cadeias como *independentes*, no caso em que o movimento de uma cadeia não é afetado pelo movimento da outra.

Um mecanismo é dito como sendo *paralelo* devido a sua forma de atuação ou açãoamento do mecanismo.

O termo *cadeia fechada* significa que as suas duas extremidades encontram-se unidas, entretanto, quando as duas extremidades da cadeia estão separadas, a cadeia é denominada aberta.

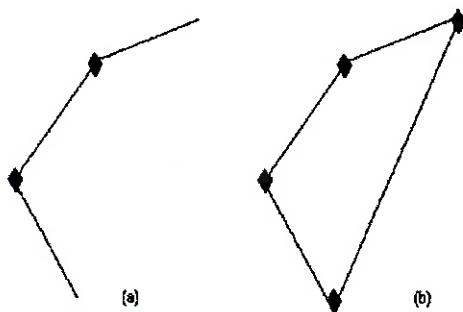


Figura 2.2 - Cadeias cinemáticas: (a) aberta; (b) fechada.

Singularidades são configurações geométricas em que um mecanismo paralelo perde completamente a sua inerente rigidez, e o órgão terminal passa a apresentar graus de liberdade adicionais, tornando-se incontrolável (Merlet, 2000). Por outro lado, quando o órgão terminal se aproxima dos limites de seu espaço de trabalho, o mecanismo pode perder um ou mais graus de liberdade, ocupando também uma configuração singular, porém de natureza distinta (Tsai, 1999).

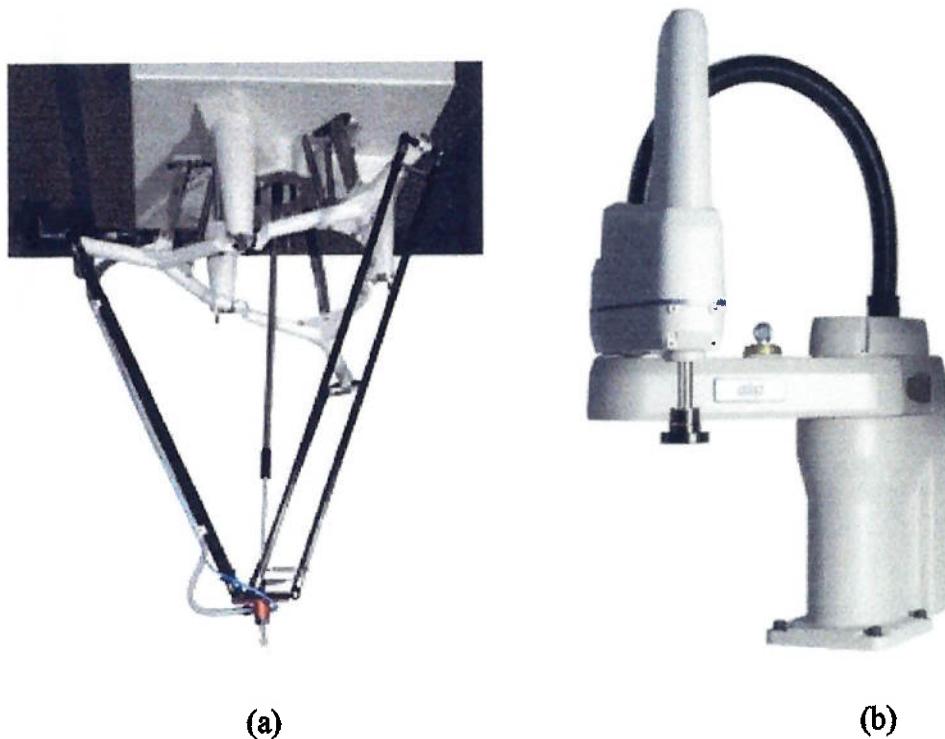


Figura 2.3 - Estruturas: (a) paralela; (b) serial.

2.2. Surgimento do mecanismo paralelo

A necessidade de mecanismos paralelos apareceu na década de 60 com o desenvolvimento da indústria aeroespacial. As simulações das dinâmicas das cabines de pilotos requisitavam manipuladores com alta área de freqüências e o uso de manipuladores com cadeias seriais provaram dificuldades nesse aspecto, então Stewart recomendou, em 1965, o uso de uma estrutura do tipo paralela.

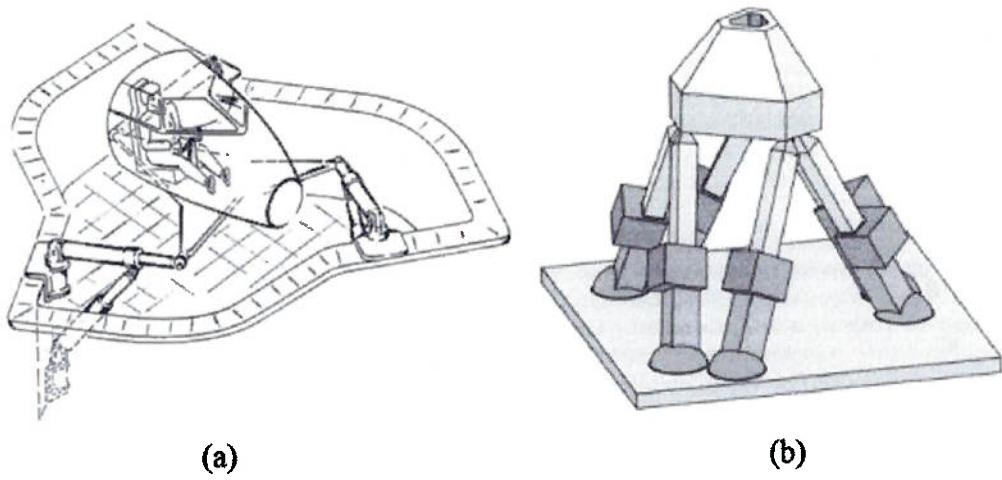


Figura 2.4 - Plataforma de Stewart (a) esboço (Parallemic, 2004); (b) ilustração (Nanosystems, Drexler 1992).

Novas estruturas paralelas surgiram após, aproximadamente, 20 anos, Hunt (1983), Clavel (1985) and Kohli (1986). A plataforma Hexapod, introduzida por Mannesmann-Rexroth em 1990, a qual era usada para testes de carros não atraiu muitos interesses, o que somente foi acontecer em 1994 quando duas companhias Norte Americanas, Giddings & Lewis and Ingersoll, apresentaram um novo tipo de máquina-ferramenta, *Variax*, baseado numa estrutura paralela. Essa atividade básica foi o que levou ao interesses de intensivas pesquisas na área de mecanismos paralelos e de suas aplicações.



Figura 2.5 - Máquinas-ferramenta “Variax”.

2.3. Aplicações de mecanismos paralelos

Tradicionalmente, os mecanismos ditos paralelos são empregados como simuladores de vôo para treinamento de pilotos ou entretenimento em centros de lazer. Sendo que os mecanismos paralelos têm aplicações que abrangem desde simuladores de movimento até manipuladores de altas velocidades e sensores de força e torque. Recentemente, estes sistemas mecânicos têm despertado um grande interesse das comunidades acadêmicas e industriais devido às seus potenciais aplicações como manipuladores robóticos e máquinas-ferramenta.

2.3.1. Alguns exemplos de suas aplicações

2.3.1.1. Em indústrias

- Maquinas CNC de manufatura;
- Prototipagem rápida de peças;
- Maquinas de mineração;
- Montagem de componentes;
- Manipulação de peças;
- Soldagem;
- Máquinas de usinagem.

2.3.1.2. Na medicina

- Microscópios de nano precisão;
- Dispositivo de cirurgias e dispositivos de assistência à distância.

2.3.1.3. Em simuladores de movimentos

- Treinamento de pilotos;
- Desenvolvimento de veículos.

CAPÍTULO 3: METODOLOGIA DO PROJETO

O trabalho foi dividido em duas etapas: a primeira é o projeto e construção mecânica e a segunda o projeto eletrônico.

3.1. Projeto Mecânico

Nesta etapa faz-se a geração e o estudo algumas alternativas de arquiteturas paralelas para que depois possa ser escolhida a mais adequada para o projeto incluindo desempenho dinâmico, volume de trabalho, o custo, disponibilidade de materiais entre outros fatores.

Definida a arquitetura, serão feitos cálculos para dimensionamento do manipulador, escolha de materiais a serem utilizados na construção, desenhos de conjuntos, simulações virtuais para análise de desempenho e por último a fabricação.

3.2. Projeto Eletrônico

O projeto eletrônico é constituído dos drivers e de micro controladores para o controle dos motores. Aqui será feito o estudo para escolher a melhor maneira de controlar os atuadores.

Os critérios para a escolha da eletrônica são baseados nos custos e disponibilidade de materiais pela faculdade.

CAPÍTULO 4: TOPOLOGIA

4.1. Considerações iniciais

Para cada aplicação e tipo de instalação em uma planta de manufatura do usuário final, um estudo detalhado precisa ser feito para achar um robô de cinemática paralela que satisfaça todos os requerimentos necessários de seu usuário. Então, o primeiro passo seria fazer um estudo para achar uma estrutura paralela que atenda as necessidades do seu usuário.

As informações e requerimentos fornecidos pelo usuário poderão ser classificados como:

- Cinemática: espaço de trabalho; precisão, máximo movimento das juntas passivas;
- Dinâmica: carga na plataforma, rigidez do robô;
- Geometria: tamanho global do robô, tamanho máximo dos seus componentes;
- Tecnologia: informações completas dos seus atuadores, sensores e juntas passivas. Dependendo do contexto de sua aplicação, algumas imposições de restrições de componentes devem ser feitas.

Lembrando que muitos dos requerimentos providenciados pelo o consumidor final serão apenas sub sistemas dos requerimentos usados pelo projetista. Por exemplo, o requerente poderá fornecer apenas requerimentos sobre espaço de trabalho e habilidades para transporte de cargas, porém o projetista terá que considerar, por exemplo, as singularidades e movimentos máximos das juntas passivas. Geralmente na lista de requerimentos, o usuário final fornece apenas detalhes sobre o espaço de trabalho e precisão.

O usuário final tem que classificar os seus requerimentos de acordo com a sua importância. Isso é crucial, uma vez que em alguns casos é necessário relaxar alguns requerimentos para se satisfazer outros. É importante salientar que alguns requerimentos poderão ter seus valores fixos como precisão de posicionamento, por outro lado, pode-se ter um valor máximo para o requerimento como, por exemplo, o máximo erro de posicionamento.

Conseqüentemente, isso significa que muitas simulações devem ser feitas para ter certeza que o número de graus de liberdade, espaço de trabalho, e tipos de movimentos do mecanismo de cinemática paralela satisfaça todos os requerimentos necessários.

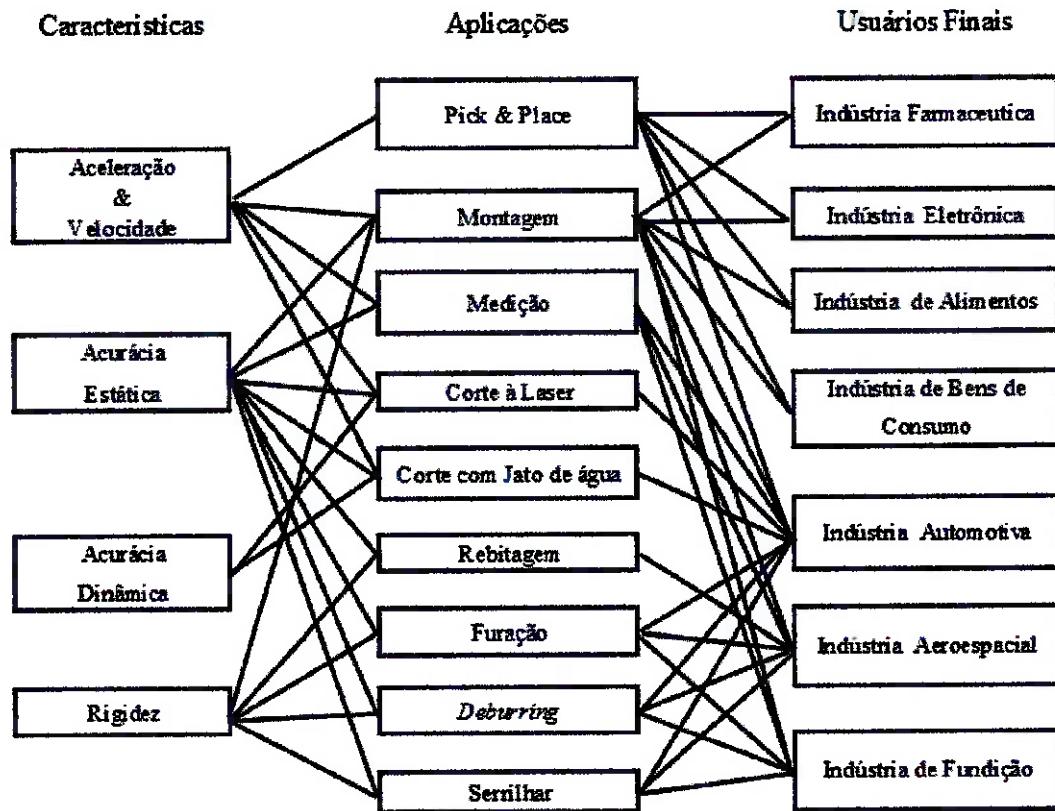


Figura 4.1 - Diagrama exemplificando a relações entre o potencial de performance de cada característica do robô paralelo com as suas possíveis aplicações e também com as necessidades de cada tipo de indústrias (Traduzido do Brogard, 2002).

Na busca por novas estruturas de mecanismos de cinemáticas paralelas ou na análise de estruturas já existentes devem-se determinar as seguintes características básicas de sua cinemática: tipo de movimento do robô e o seu número de graus de liberdade requeridos na aplicação. Vide próxima figura.

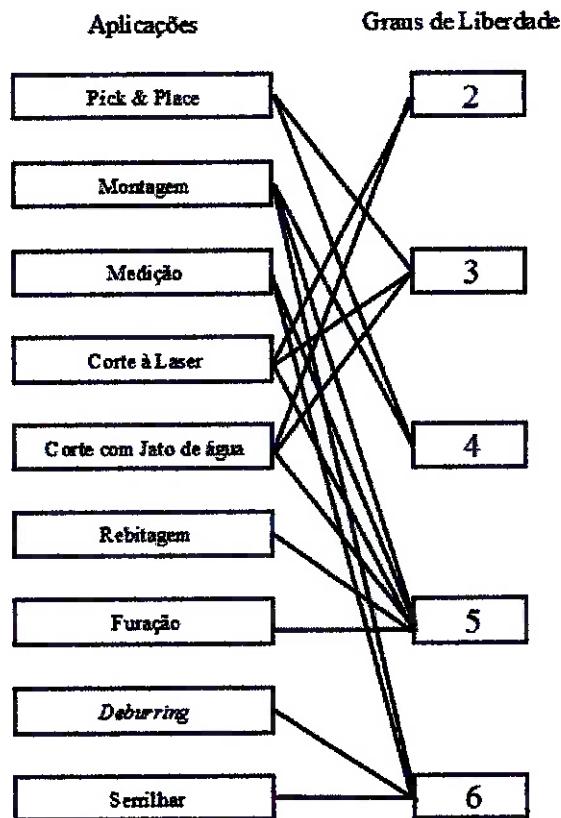


Figura 4.2 - Números de graus de liberdade requeridos pelo o órgão terminal para cada tipo de aplicação (Traduzido do Brogard, 2002).

Existem milhares de possibilidades para se projetar uma nova estrutura de cinemática paralela, entretanto, muitas dessas novas estruturas não se encaixaram nos requerimentos das indústrias de automação. Portanto, é muito importante considerar as restrições das indústrias de automação no projeto de novas estruturas.

Para o projeto de um novo manipulador robótico baseado em um mecanismo de cinemática paralela é muito importante levar em consideração, na fase inicial, as idéias contidas na Figura 4.1 e Figura 4.2.

4.2. Requerimentos mecânicos para o manipulador

Como dito anteriormente, o tipo de movimento do robô e o seu número de graus de liberdade requeridos na sua aplicação são características básicas de sua cinemática que devem ser determinadas.

Com base nessa informação, o manipulador robótico escolhido para esse projeto terá sua aplicação na área de “Pick & Place”.

Pick & Place	
Características	Velocidade & Aceleração
Graus de Liberdade	3 ou 4
Usuários Finais	Indústria Farmacêutica
	Indústria Eletrônica
	Indústria Alimentos
	Indústria de Bens de Consumo
	Indústria Automotiva

Tabela 4.1 – Resumo das Figura 4.1e Figura 4.2 aplicado a função de “Pick & Place”.

Essa decisão foi feita pelo o fato de que os robôs “Pick & Place” não apresentam características de funcionamento muito complexas, como a necessidade de altas precisões estáticas e dinâmicas, e alta rigidez. Apesar dessa falta de complexidade, o seu estudo terá uma grande importância na área acadêmica.

Outros parâmetros de projeto que também foram decididos são:

- Cinemática: Três graus de liberdade para o órgão terminal, espaço de trabalho com dimensões de um cubo com 0.15m de aresta;
- Tecnologia: Utilização de atuadores de revolução nas cadeias ativas.

Os motivos que levaram nessas decisões acima foram, primeiramente, devido ao fato de não haver necessidade de mais graus de liberdade para o posicionamento do órgão terminal quando utilizado numa função de “Pick & Place”. Uma vez que três graus de liberdade são suficientes para a movimentação do órgão terminal num espaço tridimensional. Já com relação ao segundo item relacionado à cinemática, um espaço de trabalho com dimensões de $0.15 \times 0.15 \times 0.15 \text{ m}^3$ é suficiente para a realização de estudos didáticos e, também, não requerem o projeto de arquiteturas de grande porte, consequentemente o há necessidade da utilização de atuadores de alto torque. Com relação ao item tecnologia, sua escolha foi baseada na simplicidade de controle de atuadores de revolução e também na sua disponibilidade para o uso neste projeto.

Entretanto, existem informações a serem definidas somente após a seleção da arquitetura final:

- Cinemática: espaço de trabalho viável, precisão, máximo movimento das juntas passivas;
- Dinâmica: carga na plataforma, rigidez do robô;
- Geometria: tamanho global do robô, tamanho máximo dos seus componentes;

Decididos os principais parâmetros de projeto, a próxima etapa será a geração de arquiteturas utilizando os dois métodos que serão detalhados nos itens 5.1.3 e 5.1.4.

CAPÍTULO 5: MÉTODOS DE GERAÇÃO DE ARQUITETURAS

A geração de arquiteturas paralelas consistiu em dois métodos: método da enumeração das cadeias ativas e o método da adição de uma cadeia passiva.

Antes de demonstrar os dois métodos citados anteriormente, faz-se necessário à explicação de duas terminologias: graus de liberdade e graus de mobilidade.

5.1.1. Graus de liberdade

Considera-se que o grau de liberdade seja uma propriedade associada a um determinado par cinemático. Esta propriedade refere-se ao número de movimentos independentes possíveis que uma das peças do par pode executar em relação à outra (Coelho, 2004).

5.1.2. Graus de Mobilidade

“O grau de mobilidade é uma propriedade associada a um determinado mecanismo. Esta propriedade refere-se ao número de movimentos independentes possíveis que as peças móveis do mecanismo podem executar. Na maioria dos casos, coincide com o número de motores necessários para a movimentação do mecanismo. Para determinação da mobilidade de um mecanismo, emprega-se o critério de Gruebler”.

$$M = 3 * (n - 1) - 2 * n_{p1} - n_{p2} \quad (4.1)$$

Sendo M é a mobilidade, n é o número de peças incluindo a peça imóvel, nPI é o número de pares cinemáticos que permitem apenas um grau de liberdade e $nP2$ é o número de pares cinemáticos que permitem dois graus de liberdade. O critério expresso pela equação acima é válido apenas para mecanismos planos, ou seja, que se movimentam dentro de um espaço bidimensional.

Para determinar-se a mobilidade de mecanismos tridimensionais, emprega-se o critério de Kutzbach-Gruebler.

$$M = 6 * (n - 1) - 5 * n_{p1} - 4 * n_{p2} - 3 * n_{p3} - 2 * n_{p4} - n_{p5} \quad (4.2)$$

Sendo M é a mobilidade, n é o número de peças incluindo a peça imóvel, n_{Pj} ($j=1,\dots,5$) é o número de pares cinemáticos que permitem j graus de liberdade.(Coelho, 2004)

5.1.3. Método da enumeração das cadeias ativas

O método admite que o número de cadeias ativas – aquelas cadeias abertas que ligam a base ao órgão terminal - coincide com a mobilidade desejada para o mecanismo. Além disto, a *conectividade total CT* [5], definida como a soma dos graus de liberdade de todas as cadeias presentes, deve ser determinada pela equação abaixo. O valor de λ corresponde ao número de movimentos independentes que uma peça sem qualquer vínculo possa executar dentro do espaço de movimentação do mecanismo. Uma vez obtida a conectividade total, é possível enumerar um número expressivo de estruturas cinemáticas que satisfaçam estas condições. (Coelho, 2004)

$$C_t = M * (\lambda + 1) - \lambda \quad (4.3)$$

5.1.4. Método da adição de uma cadeia passiva

Tal método considera que o movimento do órgão terminal seja restringido pela presença de uma cadeia passiva a ele conectada. Desta forma, a cadeia passiva é cuidadosamente escolhida de tal maneira que a mobilidade M e os tipos de movimentos disponíveis para o órgão terminal realmente correspondam àqueles desejados (especificados). Além disto as conectividades parciais das cadeias ativas restantes devem ser iguais a λ . (Coelho, 2004).

CAPÍTULO 6: PROJETO DA ARQUITETURA DO ROBÔ

Neste capítulo mostram-se: algumas arquiteturas projetadas usando os dois métodos de geração de arquiteturas descritos anteriormente; critérios para seleção de arquiteturas e finalmente a arquitetura selecionada.

No projeto de uma arquitetura paralela procura-se desenvolver arquiteturas que apresentam as principais características de robôs de cinemática paralela, como a alta rigidez dentro de seu espaço de trabalho e altas relações carga/peso e evitar a obtenção de um espaço de trabalho limitado, e singularidades com o espaço de trabalho.

Em busca da obtenção dessas vantagens cinemáticas e dinâmicas dos robôs paralelos, e da minimização de algumas desvantagens, foram considerados os seguintes critérios de seleção:

- Um dos principais critérios é a simplicidade do projeto. Uma vez que soluções simples são mais fáceis de serem analisadas, projetadas, explicadas e melhoradas.
- Presença de juntas de grande alcance como as juntas de revolução, prismáticas e cilíndricas as quais podem proporcionar áreas de trabalho maiores do que as juntas do tipo esférica e universal.
- Algumas configurações de juntas ou o próprio posicionamento das mesmas podem proporcionar áreas de trabalho maiores.
- Estruturas simétricas podem ser simplificadas por modelos cinemáticos e dinâmicos mais simples.
- Complexidade de controle requerido pela arquitetura.

Estes critérios foram levados em conta durante a geração de novas arquiteturas a fim de evitar desperdício de tempo ao se desenvolver arquiteturas que possam não satisfazer os critérios de projeto.

Primeiramente serão selecionadas separadamente as melhores opções de arquiteturas de cada método de geração de arquiteturas. Em seguida será selecionado o melhor mecanismo entre esse dois métodos.

Legenda das notas:

- 5 – Ruim;
- 10 – Bom.

Legenda de pesos:

- 1 – Pouco relevante;
- 2 – Muito relevante.

A tabela a seguir mostra a matriz de decisão para o método de enumeração de cadeias ativas.

Atributo Analisado	3 RSR			3 RRS			3 RUU		
	Nota	Peso	Total	Nota	Peso	Total	Nota	Peso	Total
Presença de juntas de longo alcance	10	1	10	10	1	10	5	1	5
Simplicidade e complexidade	5	1	5	5	1	5	5	1	5
Espaço de trabalho	10	3	30	5	3	15	5	3	15
Total	-	-	45	-	-	30	-	-	25

Tabela 6.1 – Matriz de decisão para o método de enumeração de cadeias ativas.

Portanto, a arquitetura selecionada pela matriz de decisão foi a (3 RSR).

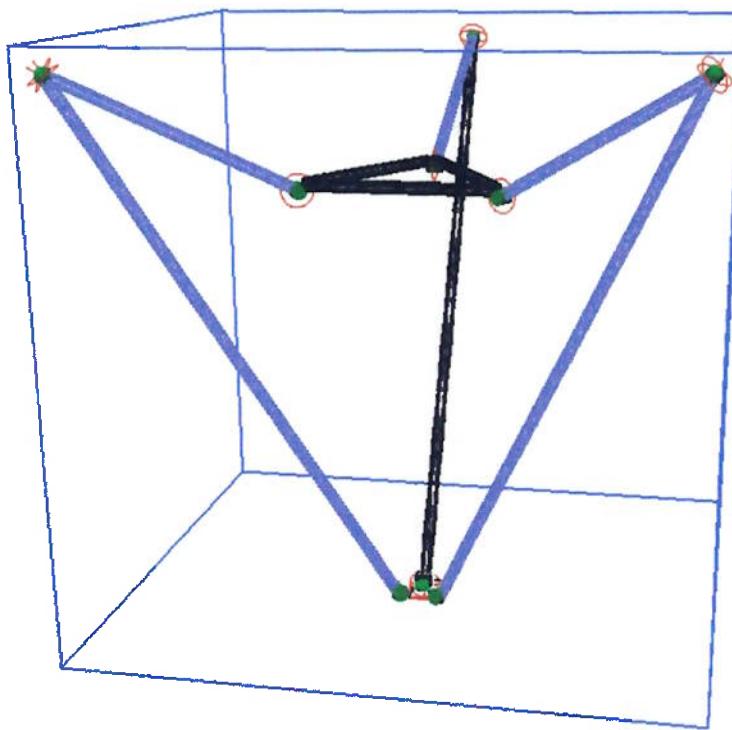


Figura 6.1 - Cinemática da arquitetura 3 RSS

A próxima tabela mostra a matriz de decisão para o método de enumeração de cadeias passivas.

Atributo Analisado	3 RSS + CP			3 RSS + RP			3 RSS + UP		
	Nota	Peso	Total	Nota	Peso	Total	Nota	Peso	Total
Presença de juntas de longo alcance	10	1	10	10	1	10	5	1	5
Simplicidade e complexidade	5	1	5	10	1	10	10	1	10
Espaço de trabalho	10	3	30	5	3	15	5	3	15
Total	-	-	45	-	-	35	-	-	30

Tabela 6.2 – Matriz de decisão para o método de enumeração de cadeias passivas.

Portanto, a arquitetura final selecionada será o (3 RSS + CP).

A próxima figura mostra uma cadeia cinemática da arquitetura selecionada.

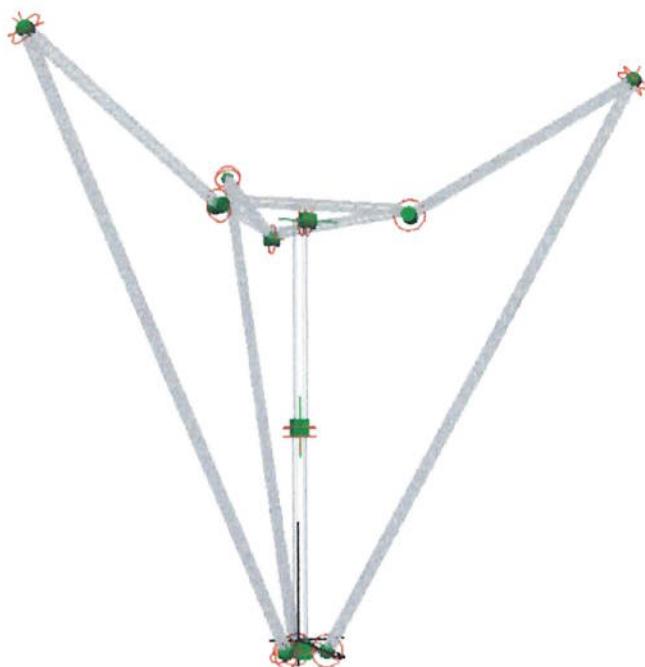


Figura 6.2 - Cadeia cinemática 3RSS + CP.

Abaixo temos a matriz de decisão para as duas arquiteturas selecionadas anteriormente.

Atributo Analisado	3 RSR			3 RSS + CP		
	Nota	Peso	Total	Nota	Peso	Total
Presença de juntas de longo alcance	10	1	10	10	1	10
Simplicidade e complexidade	5	1	5	10	1	10
Espaço de trabalho	10	3	30	5	3	15
Complexidade de controle	5	3	15	10	3	30
Total	-	-	50	-	-	65

Tabela 6.3 – Matriz de decisão da arquitetura final que será usada neste projeto.

As notas da arquitetura 3 RSS + CP para os três primeiros critérios foram inferiores do que a do 3 RSR por causa da presença da cadeia passiva. Pois a cadeia passiva acaba atribuindo uma maior complexidade no projeto e também restringe um pouco a área de trabalho. Quanto à complexidade de controle, a presença da cadeia passiva impõe uma maior facilidade de controle, pois ela provoca uma maior

estabilidade na base do efetuador e também fica mais fácil à modelagem de sua cinemática inversa aplicada ao controle de posição.

Concluindo, a melhor arquitetura entre os dois métodos de geração de arquiteturas paralelas, obtida pela a matriz de decisão, foi a (3 RSS + CP).

CAPÍTULO 7: DIMENSIONAMENTO

7.1. Introdução

O processo de dimensionamento será feito através de um modelo bidimensional. Abaixo se segue o modelo bidimensional utilizado nesta etapa.

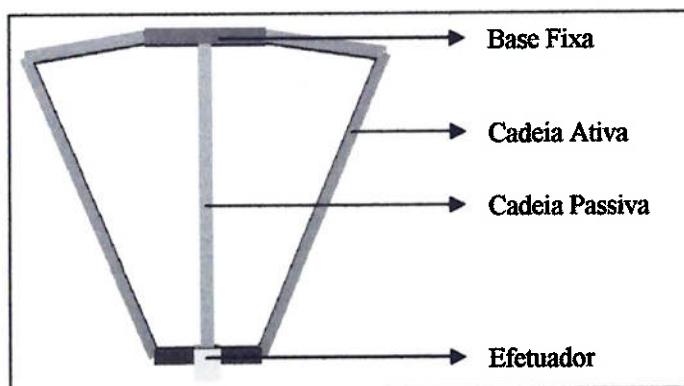


Figura 7.1 – Modelo 2D (2RRR + RP).

Os parâmetros do manipulador a serem dimensionados são: tamanhos dos braços, base do efetuador e da base fixa, além do cálculo do torque requerido pelo o motor.

A limitação de projeto imposta foi à obtenção de um volume de trabalho de aproximadamente 30cm^3 . Já as possíveis limitações construtivas estão relacionadas ao uso: de juntas universais, prismáticas e cilíndricas e o torque fornecido pelo motor.

7.2. Dimensionamento dos Braços

7.2.1. Considerações iniciais

Para o dimensionamento do tamanho dos braços, foi levada em conta a limitação das juntas e do torque requerido pelo o motor. Buscou-se encontrar uma configuração de braços que fornecesse para um dado movimento, a menor variação do ângulo da junta que liga o braço fixo no

motor com o braço preso à base do efetuador e que, também, necessitasse o menor torque para realizar a movimentação.

Serão realizados dois procedimentos para o dimensionamento requerido. O primeiro procedimento obtém as configurações que proporcionavam a menor variação de movimento das juntas. Em seguida, com base nos dados obtidos anteriormente, será verificado qual dessas configurações necessita um menor torque para realizar a movimentação do efetuador.

7.2.2. Procedimento para o calculo dos ângulos das juntas

Este procedimento analisa os ângulos das articulações durante um deslocamento virtual no eixo x de - 6.5 até 6.5cm. A altura no eixo y era mantida constante em 12 cm, durante o deslocamento. Essa movimentação foi realizada para todos as possíveis configurações de braços cuja soma de seus comprimentos fosse de 15cm. Os tamanhos dos braços foram:

(2,13)	(3,12)	(4,11)	(5,10)	(6,9)	(7,8)	(7,5,75)	(8,7)	(9,6)	(10,5)	(11,4)	(12,3)	(13,2)
--------	--------	--------	--------	-------	-------	----------	-------	-------	--------	--------	--------	--------

Onde o primeiro valor entre os parênteses é do braço ligado no motor e o outro valor é do braço ligado à base do efetuador.

Os valores de (1,14) e (14,1) foram desconsiderados, pois eles não permitiam movimentar o efetuador.

Usando o programa do Anexo B, foram obtidas as variações dos ângulos das articulações.

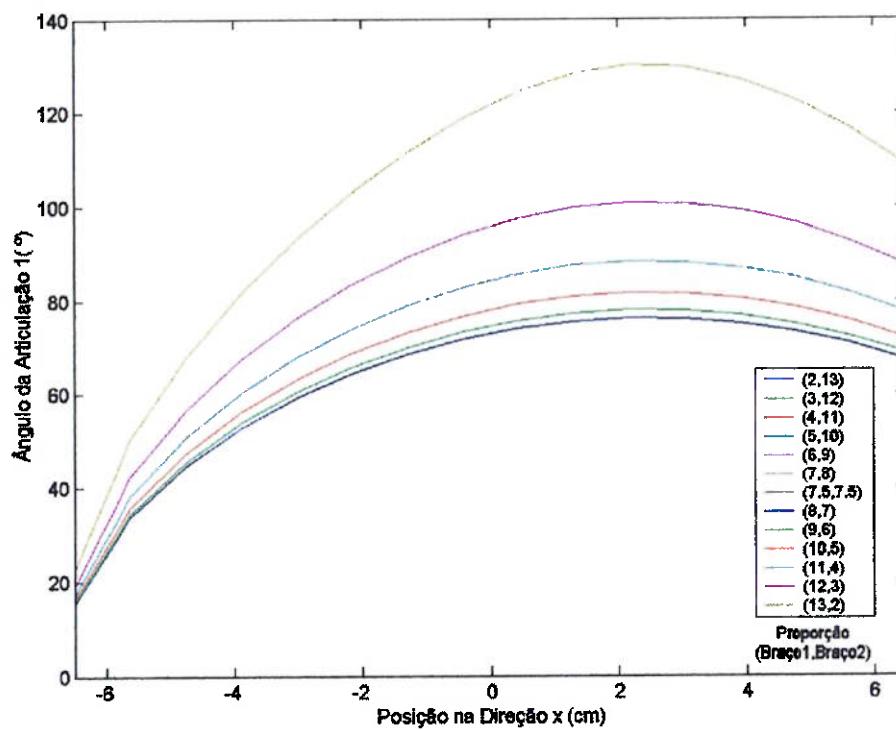


Figura 7.2 – Variação do ângulo da articulação 1 em relação ao deslocamento no eixo x, para cada configuração de braço.

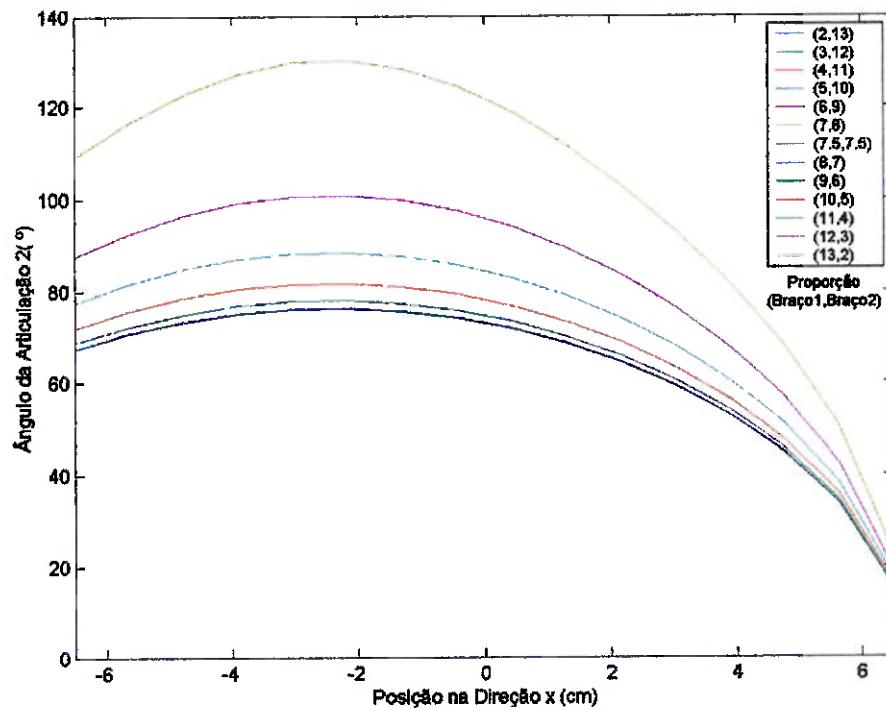


Figura 7.3 - Variação do ângulo da articulação 2 em relação ao deslocamento no eixo x, para cada configuração de braço.

Usando a função range do Matlab, foi possível calcular a máxima variação para cada configuração de braços. Como era esperada, a variação das articulações 1 e 2 foram iguais, uma vez que se trata de um manipulador simétrico.

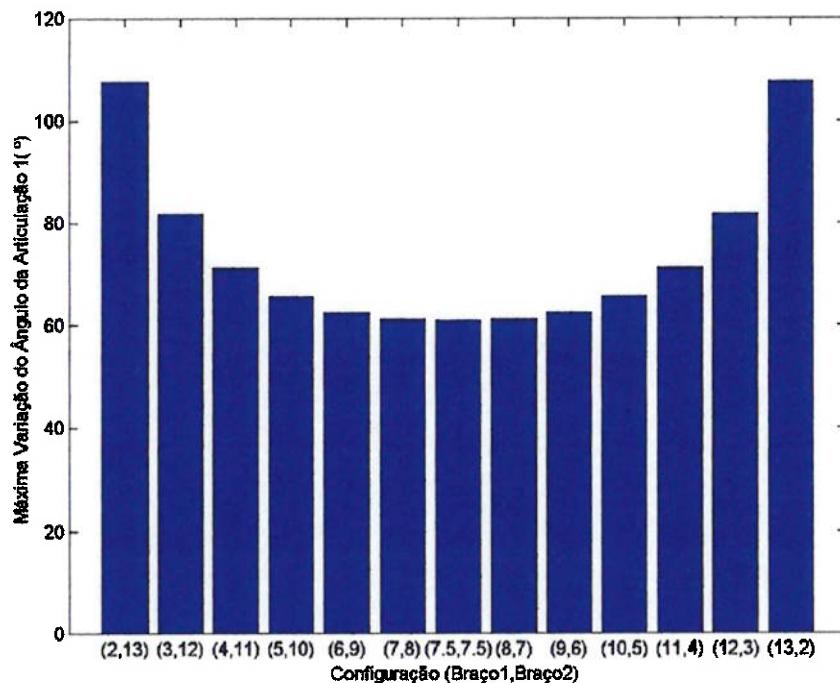


Figura 7.4 – Máxima variação dos ângulos das articulações com relação as configurações dos braços.

Portanto, para que se respeite a limitação de projeto quanto à máxima variação dos ângulos das articulações. As possíveis configurações dos braços podem ser:

(4,11)	(5,10)	(6,9)	(7,8)	(7,5,7,5)	(8,7)	(9,6)	(10,5)	(11,4)
--------	--------	-------	-------	-----------	-------	-------	--------	--------

A escolha destas possíveis configurações ocorre pelo o fato que elas apresentam pouco variação entre si, por volta de 10°.

De modo semelhante, foi feito uma analise das máximas variações dos ângulos dos motores em relação às configurações dos braços.

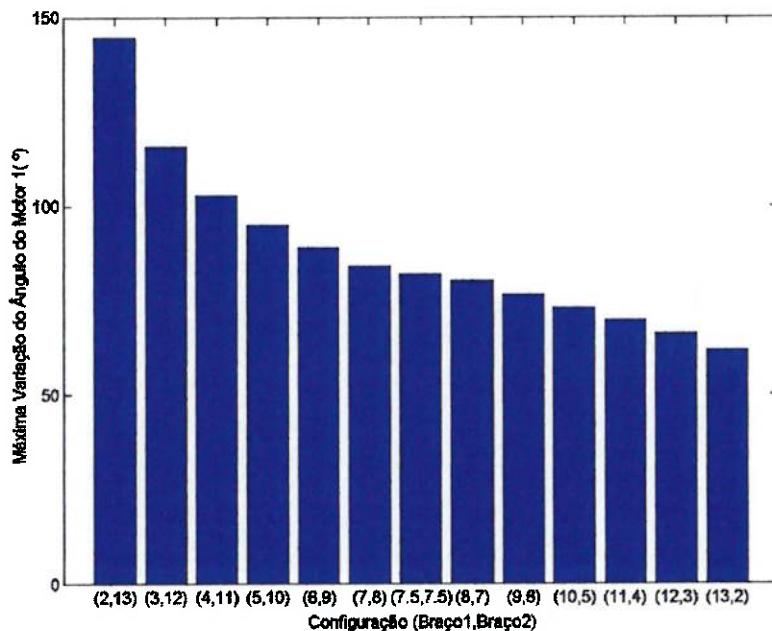


Figura 7.5 - Máximas variações dos ângulos dos motores em relação às configurações dos braços.

Esse gráfico é útil para a seleção do motor, pois se pode saber qual o ângulo de rotação necessário do motor requerido para cada configuração de braços.

O próximo passo é a determinação do menor torque requerido pelo motor dentro às configurações de braços selecionada previamente. Para tanto, foram feitas simulações no VisualNastran4D dos torques para cada configuração. A simulação consistia na movimentação do braço ligado no motor da posição vertical até atingir a posição horizontal, medindo instantaneamente o valor do torque requerido.

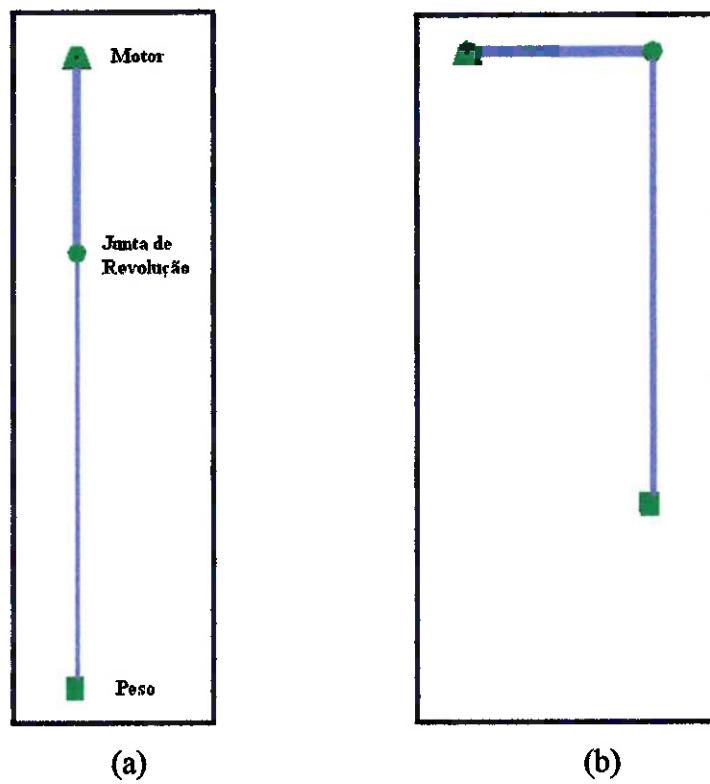


Figura 7.6 – Modelos para medir o torque: (a) Posição inicial - vertical, (b) Posição final – horizontal.

A figura seguinte mostra o torque requerido para a configuração de braço (4,11) ao movimentar uma carga de 0.3Kg no efetuador.

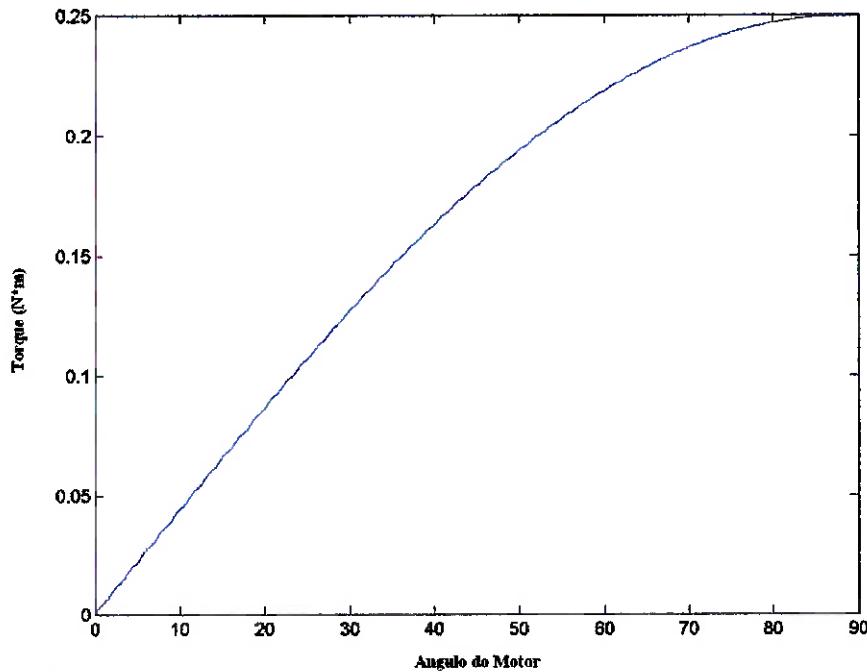


Figura 7.7 - Torque requerido para a configuração de braço (4,11) para movimentar uma carga de 0.3Kg.

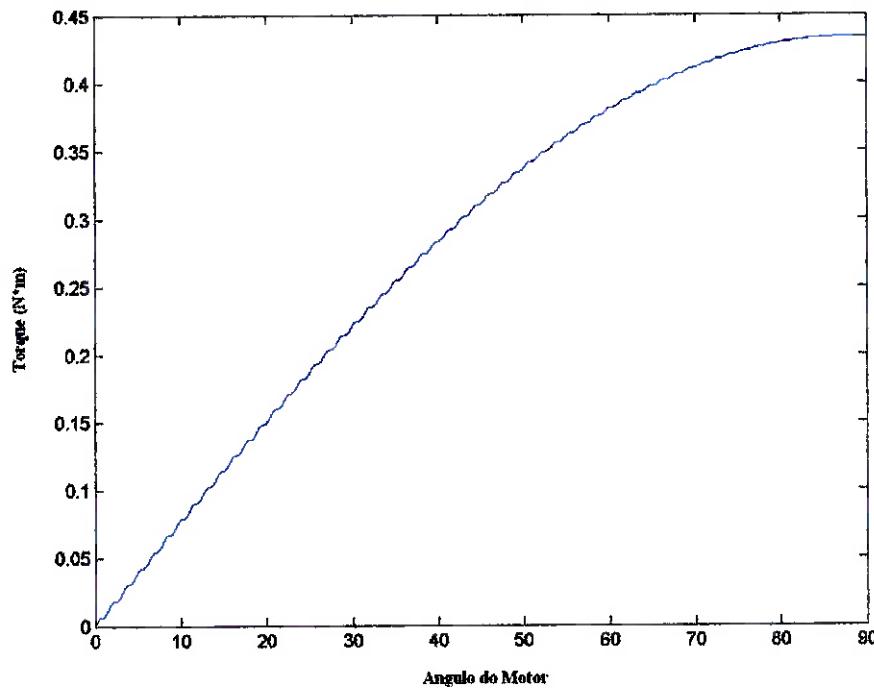


Figura 7.8 - Torque requerido para a configuração de braço (07, 08) para movimentar uma carga de 0.3Kg.

Pelo os gráficos das curvas de torque acima, temos para a configuração (4,11) o torque máximo de 0.25 (N*m) na posição de 90°, já para a configuração (7,8) o torque máximo também foi na posição 90° com um valor, aproximadamente, de 0.43 (N*m). Também foi feito a analise dos torques para as configurações (5,10) e (6,9) os quais obtiveram valores intermediários a (4,11) e (7,8), sendo que o torque de (5,11) foi menor que o de (6,9). Com base nesses valores foi possível concluir que quanto menor for o comprimento do braço ligado no motor, menor será o torque requerido para a movimentação do manipulador. O que era esperado uma vez que o torque é dado pela a seguinte formula.

$$T = L \cdot F \quad (7.1)$$

Onde L significa o comprimento do da barra e F é a força imposta na barra.

Em resumo, a seqüência crescente do torque requerido pelas configurações foi:

$$(4,11) < (5,10) < (6,9) < (7,8) < (7.5,75) < (8,7) < (9,6) < (10,5) < (11,4)$$

Tabela 7.1 – Tabela mostrando a ordem crescente do torque em relação as configurações dos braços.

Portanto, com base nesses dois últimos procedimentos, o de análise dos ângulos das articulações e o do torque, conclui-se que a configuração (4,11) é melhor opção para os comprimentos dos braços do robô manipulador. Entretanto, vai ser adotada a configuração de (4.5, 10.5), por que se pode abaixar um pouco a máxima variação dos ângulos das articulações, mas aumentando muito pouco o torque requerido.

7.3. Dimensionamento das Bases

7.3.1. Considerações iniciais

Serão utilizados dois procedimentos para analisar o melhor dimensionamento para a base fixa, e do efetuador. O primeiro procedimento verifica qual configuração para as bases permite uma menor variação nos ângulos das articulações que liga os dois braços entre si. No segundo procedimento, analisa a área de trabalho permitida pelas configurações das bases.

Entretanto, não existe um método que facilite a atribuição de valores para os comprimentos das bases. Isto, pois não há uma relação de proporção entre as bases fixa e do efetuador. Então é feita a atribuição valores às bases usando um pouco do conhecimento que se tem em robótica e pouco por tentativa e erro.

Nessa etapa, foi usado o a configuração (9, 21) a qual é o dobro da (4.5,10.5) selecionada anteriormente.

Para a analise dos comprimentos das bases a configurações mais interessantes foram (08, 09), (10, 11) e (14, 20). Sendo que o primeiro valor entre os parênteses representa o comprimento da base do efetuador e o outro o da base fixa, ou seja, (Base Efetuador, Base Fixa).

7.3.2. Analise das variações do ângulo da articulação

Para a analise da máxima variação dos ângulos das articulações foram feito simulações no programa do Matlab para deslocamentos do efetuador no eixo x para as diferentes configurações de bases. Isto era feito para alturas no eixo y que iam de 20cm até 28cm e em seguida eram calculados as máximas variações dos ângulos para cada altura y. O próximo gráfico mostra o resultado obtido.

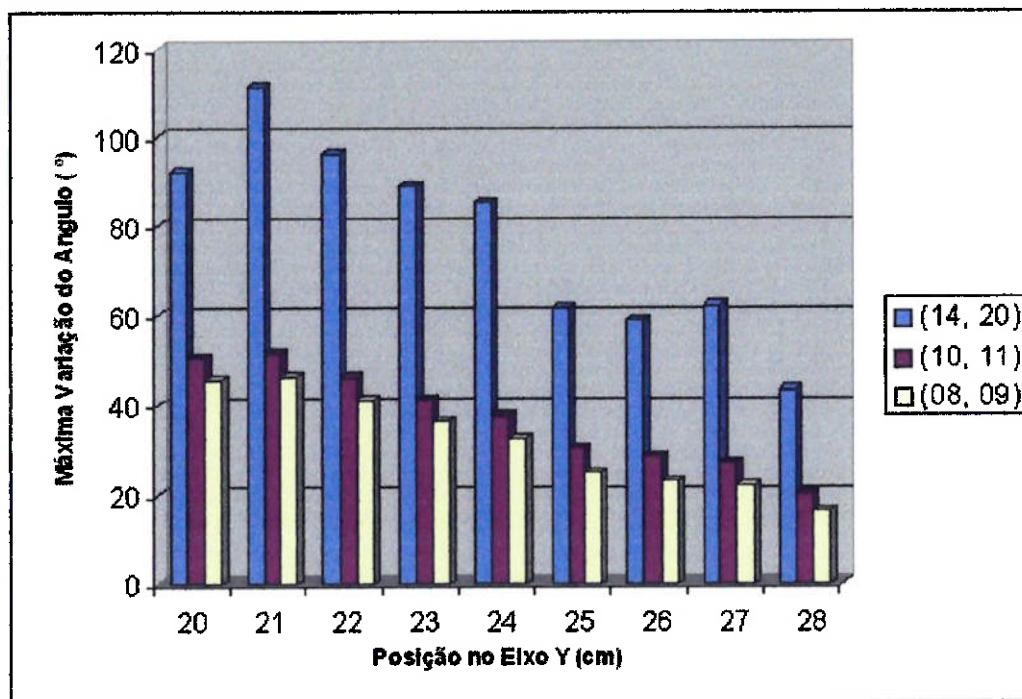


Figura 7.9 – Comparativo da máxima variação do ângulo da articulação com relação a posição no eixo y para diferentes configurações de bases.

Após uma analise critica do gráfico verificou-se que a configuração (08, 09) é a melhor alternativa, pois apresenta uma menor variação de ângulo para qualquer altura no eixo y.

7.3.3. Analise da área de trabalho

Entretanto, essa conclusão anterior não é definitiva uma vez que ainda não foi verificado a qual alternativa que apresenta a melhor área de trabalho.

Para essa analise, foram feitos para cada configuração, deslocamentos no eixo x até aparecer ângulos imaginários para as juntas dos braços e do motor. Isso significa que nesse ponto o efetuador já atingiu o seu limite, singularidade.

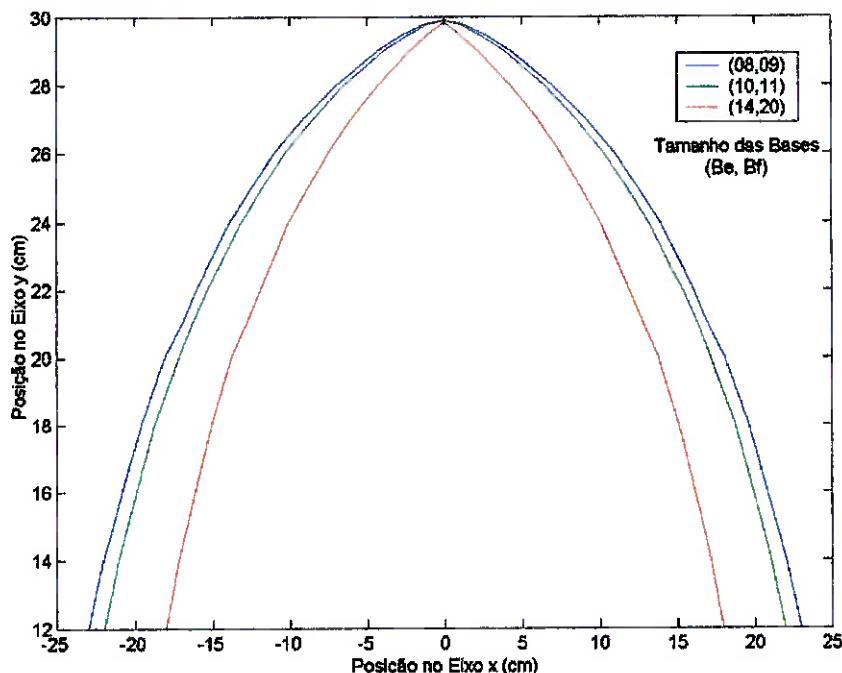


Figura 7.10 – Área de trabalho nos eixos x e y para três configurações de base.

Neste ultimo gráfico, percebe-se claramente que a configuração (08, 09) obteve a melhor área de trabalho, depois vem à configuração (10, 11) e por último a configuração (14, 20).

Portanto, com base nas duas ultimas figuras, foi concluído que a configuração de 08cm na base do efetuador e 09 para a base fixa é a melhor configuração de base para o manipulador robótico.

Em resumo, as dimensões do robô manipulador serão de 09cm para os braços ligados ao motor, 21cm para os braços ligados à base do efetuador, 08cm para a base do efetuador e por fim, 09cm para a base fixa.

CAPÍTULO 8: SELEÇÃO DE MATERIAIS

Neste capítulo, procura-se selecionar materiais que possam aproveitar e até otimizar as principais características de um manipulador robótico de cadeia paralela. Para tanto, primeiramente serão destacadas as principais características desses tipos de manipuladores para em seguida selecionar os materiais mais indicados para cada componente do manipulador robótico.

Como dito anteriormente no capítulo um, os principais adjetivos que caracterizam esse tipo de arquitetura são: alta rigidez, leveza, rapidez, precisão e alta capacidade de carga. Além do mais, pelo o fato dos seus atuadores localizam-se na base ou junto a esta, os seus braços são muito mais leves, demonstrando um melhor desempenho dinâmico.

Em cima dessas características fez-se uma tabela contendo os componentes do manipulador, suas principais características requeridas e os materiais indicados a eles.

Componentes	Características requeridas	Materiais indicados
Base do Motor (sustenta todo o peso do manipulador).	Rigidez; Inflexão; Resistência.	Aço ou Madeira.
Base do Efetuador (Aonde ocorre a movimentação, portanto, procura-se menor inércia e torque requerido)	Leveza; Rigidez.	Alumínio, Acrílico ou Madeira.
Juntas / Articulações	Rigidez; Resistência; Leveza.	Latão, Alumínio, Madeira ou Borracha.
Cadeia Ativa (Busca-se obter menor inércia e deflexão)	Leveza; Rigidez.	Alumínio.
Cadeia Passiva (Busca-se obter menor inércia e deflexão)	Leveza; Rigidez.	Alumínio ou Madeira e Guia Linear.

Tabela 8.1 – Materiais indicados para cada componentes com relação as suas principais características requeridas.

Levando em consideração o custo dos materiais e a sua disponibilidade na faculdade, temos a seguinte tabela sobre os materiais a serem utilizados.

Componentes	Material Utilizado
Base do Motor	Madeira
Base do Efetuador	Madeira MDF
Juntas / Articulações	Metal e Borracha
Cadeia Ativa	Alumínio
Cadeia Passiva	Madeira e Guia Linear

Tabela 8.2 – Materiais utilizados para a fabricação dos componentes do manipulador robótico.

CAPÍTULO 9: SELEÇÃO DOS ATUADORES

9.1. Introdução

Neste capítulo, realizou-se uma análise do torque requerido pelo o modelo 2D, descrito anteriormente, para selecionar o atuador de revolução mais adequado para o uso no manipulador robótico.

Para tanto, algumas suposições foram feitas.

Primeiramente, o manipulador movimentará uma carga de aproximadamente 0.2 Kg.

9.2. Seleção do Atuador

Características desejadas nos atuadores.

- Baixa inércia;
- Compacto;
- Alta capacidade de esforços;
- Acuracidade;
- Baixo custo;
- Facilidade de controle;
- Qualidade de movimento (vibração e flutuação de velocidade).

Tipos de atuadores:**A. Motor elétrico;**

- i. Facilidade de controle;
- ii. Baixo custo;
- iii. Rrigidez média
- iv. Baixa relação esforço / peso;
- v. Boa qualidade de movimento (Baixa vibração);
- vi. Boa acurácia.

B. Atuador hidráulico;

- i. Difícil controle;
- ii. Alta Rigidez;
- iii. Alta relação esforço / peso;
- iv. Limitações de movimentos;
- v. Baixa precisão e acurácia;
- vi. Alto custo.

C. Atuador pneumático.

- i. Boa relação esforços / peso;
- ii. Custo médio;
- iii. Dificuldade de movimento;
- iv. Baixa precisão e acurácia;
- v. Limitações de movimentos;
- vi. Difícil controle;
- vii. Baixa rigidez.

A próxima etapa foi à construção de uma matriz de decisão com relação aos tipos de atuadores.

Sendo que as notas valerão de 0 à 10. Quanto maior for a nota, melhor a característica do atuador neste item.

Foram levados em conta as principais características dos manipuladores de cinemática paralela (precisão, acurácia e boa qualidade de movimento) e o baixo peso a se movimentado (0.2Kg) para distribuir os pesos na matriz de decisão.

Tipos	Características					
	Capacidade de carga (Peso 1)	Rigidez (Peso 1)	Tamanho / Peso (Peso 1)	Facilidade de Controle (Peso 3)	Qualidade do Movimento (Peso 3)	Custo (Peso 3)
Elétrico	1	3	1	10	6	10
					Pistão Motor	
Hidráulico	10	10	10	5	8 1	1
Pneumático	3	3	3	2	3 1	8

Tabela 9.1 – Matriz de decisão para o tipo de atuador.

Tipos	Nota Final para Motores
Elétrico	83
Hidráulico	51
Pneumático	42

Tabela 9.2 – Nota final obtida na matriz de decisão para o tipo de atuador.

Das matrizes de decisão acima, temos que o motor elétrico é o mais indicado para o manipulador desse projeto.

O próximo passo será a determinação do tipo de motor elétrico a ser utilizado.

Tipos de motores elétricos:

A. Motor de Passo.

- i. Baixo torque;
- ii. Baixo custo;
- iii. Alta inércia;
- iv. Facilidade de controle;

B. Motor de Corrente Contínua com escovas.

- i. Alto torque;
- ii. Custo médio;
- iii. Alta inércia;
- iv. Facilidade de controle;

C. Motor de Corrente Contínua sem escovas.

- i. Alto torque;
- ii. Alto custo;
- iii. Baixa inércia;
- iv. Fácil controle;

D. Servo – Motor CC.

- i. Médio torque;
- ii. Baixo custo;
- iii. Baixa inércia;
- iv. Extremamente fácil de controlar.

E. Motor Assíncrono.

- i. Alto torque;
- ii. Baixo custo;
- iii. Baixa inércia;
- iv. Difícil controle

Sendo que as cargas a serem movimentadas pelos os atuadores serão muito baixas, não há uma grande necessidade de altos torques.

Tipos	Características				
	Torque (Peso 1)	Custo (Peso 3)	Inércia (Peso 2)	Controle (Peso 3)	Nota final
Motor de Passo	5	10	3	8	65
Motor C.C. com escovas	10	10	8	10	86
Motor C.C. sem escovas	10	3	10	10	69
Servo - Motor C.C.	5	10	10	10	85
Motor Assíncrono	10	3	10	5	45

Tabela 9.3 – Matriz de decisão de motores elétricos.

Visto a tabela acima, podemos concluir tanto o Motor C.C. com escovas como o Servo - Motor C.C. são indicados para o uso no manipulador robótico, uma vez que eles apresentam notas muito próximas.

Será utilizado no projeto o Motor C.C. com escovas e com encoder óptico, devido a sua disponibilidade na faculdade. Veja o modelo a seguir.

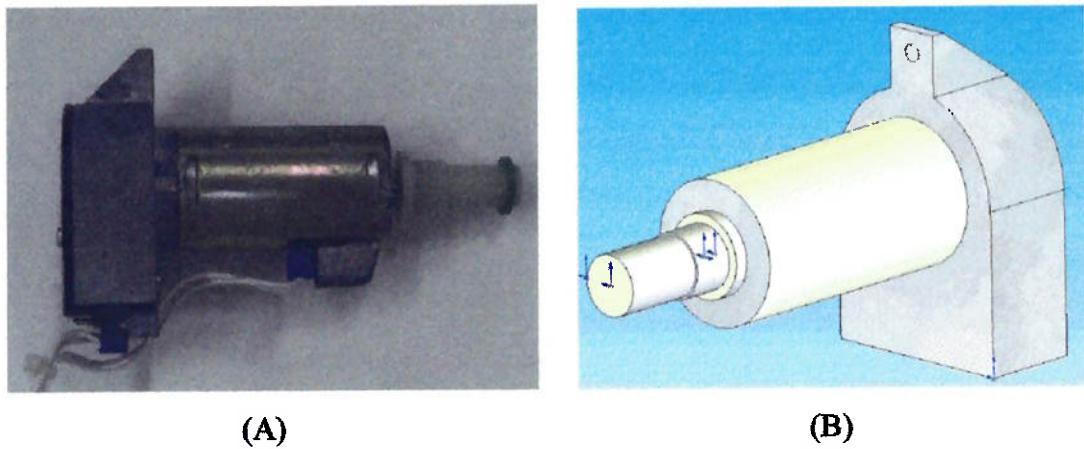


Figura 9.1 – (A) Motor CC com encoder. (B) Modelo virtual do motor CC.

CAPÍTULO 10: CINEMÁTICA

10.1. Introdução

A *cinemática direta* permite determinar a posição do efetuador uma vez conhecida todas as posições dos motores e das juntas.

Em contra partida, a *cinemática inversa* permite o cálculo da posição dos motores e das juntas para uma dada posição do efetuador. Supondo que temos um robô numa posição conhecida, isso significa que todos os comprimentos de suas ligações e os ângulos das juntas do robô são conhecidos.

Na realidade, as equações da cinemática inversa são mais importantes do que a direta, pois o controlador do robô precisa calcular os valores das juntas para comandar o efetuador para uma posição desejada.

Tratando-se de arquiteturas paralelas, o equacionamento da cinemática direta é extremamente difícil. Entretanto, a cinemática inversa não apresenta tanta dificuldade. Para o caso de robôs seriais ocorre o contrário.

Como esta sendo feito um projeto de um manipulador de cinemática paralela, será feito o equacionamento da cinemática inversa.

10.2. Cinemática Inversa

Calculando a cinemática inversa do modelo tridimensional (3RSS + CP) usando o método algébrico.

A próxima figura mostra o esquema cinemático a ser estudo enfatizando o sistema de coordenadas x,y e z; os possíveis movimentos da cadeia passiva; e a enumeração das juntas cinemáticas.

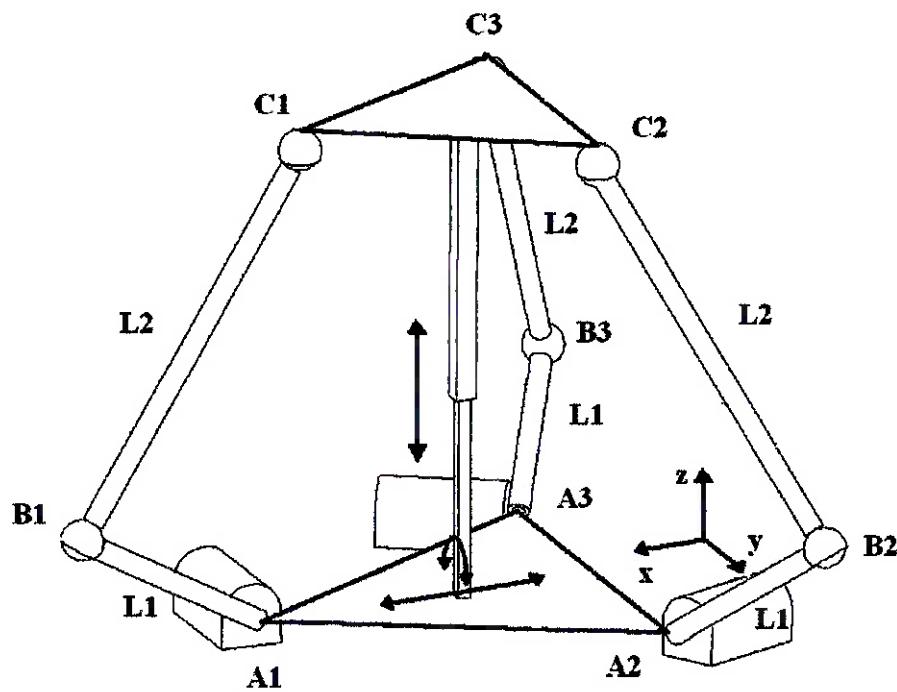


Figura 10.1 – Esquema do (3RSS + CP) usado para o cálculo da cinemática inversa.

Fatos importantes mostrados na figura anterior são: os eixos de movimentação da cadeia passiva, e as direções que cadeia passiva pode transladar nos eixos x e z e rotacionar em relação ao eixo x.

Lembrando que os valores dos braços são:

- $L1 = 09 \text{ cm}$;
- $L2 = 21 \text{ cm}$.

As figuras seguintes tem por objetivo mostrar as posições adotadas para: P , h , H , L , v e θ .

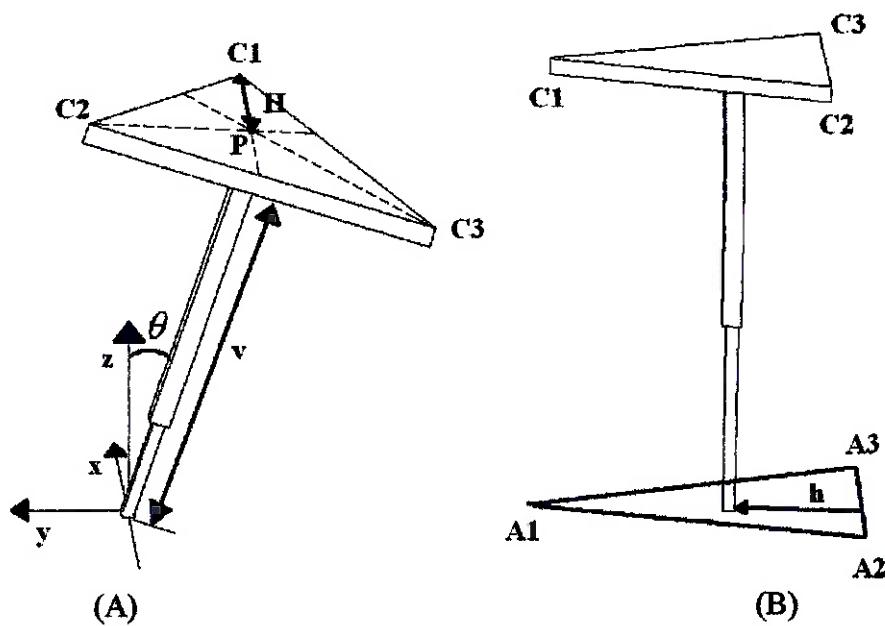


Figura 10.2 – (A) Mostra a posição de P, H, v e θ . (B) Posição de h.

O valor de H é dois terços da altura do triângulo equilátero formado pelos os pontos C1,C2 e C3. Como o lado do triângulo vale 14 cm, $H = \frac{2}{3} \cdot \sin(60^\circ) \cdot 14$ cm.

Analiticamente é realizado para L só que para o triangulo é formado por A1, A2 e A3. Portanto $L = 2/3 \cdot \sin(60^\circ) \cdot 20$ cm. Como pode ser visto a seguir.

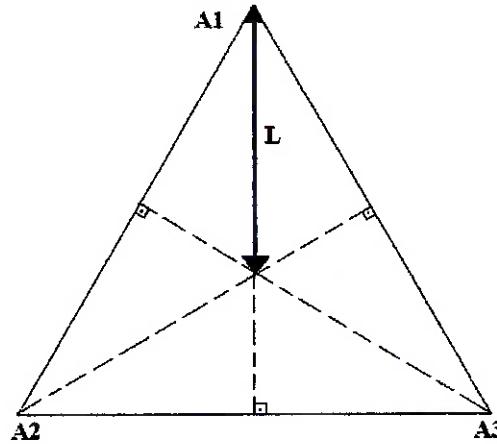


Figura 10.3 – Posição de L no triângulo formado por A1, A2, e A3.

A ilustração seguinte mostra a posição dos ângulos α_1 , α_2 e α_3 .

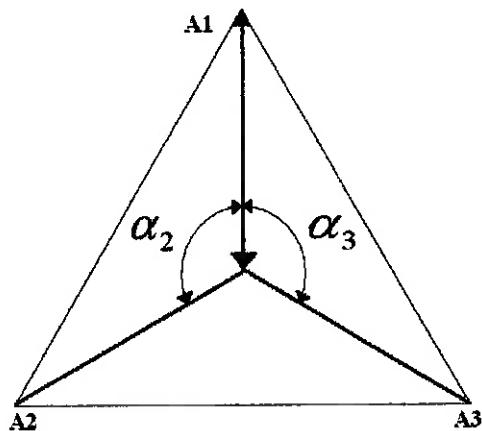


Figura 10.4 – Posição dos ângulos α_1, α_2 e α_3 .

Os valores para α_1, α_2 e α_3 são:

$$\alpha_1 = 0;$$

$$\alpha_2 = \frac{2\pi}{3};$$

$$\alpha_3 = \frac{4\pi}{3} \text{ ou};$$

$$\alpha_3 = -\frac{2\pi}{3}.$$

A matriz abaixo mostra a posição de P no espaço x, y e z. Sendo que a P esta representado na Figura 10.2 – (A) Mostra a posição de P, H, v e θ . (B) Posição de h..

$${}^bP = \begin{bmatrix} h \\ -v\sin\theta \\ v\cos\theta \end{bmatrix}$$

Já as duas matrizes seguintes mostram respectivamente a posição de bC_j e bB_j no espaço 3D. Sendo $j = 1, 2$ e 3 .

$${}^bC_j = \begin{bmatrix} H \cos\alpha_j + h \\ (H \sin\alpha_j)\cos\theta - v\sin\theta \\ (H \sin\alpha_j)\sin\theta + v\cos\theta \\ 1 \end{bmatrix}$$

$${}^b B_j = \begin{bmatrix} (L_1 \cos \alpha_j) \cos \theta_j + L \cos \alpha_j \\ (L_1 \sin \alpha_j) \cos \theta_j + L \sin \alpha_j \\ (L_1) \sin \theta_j \\ 1 \end{bmatrix}$$

Como o módulo da distância entre ${}^b B_j - {}^b C_j$ resulta no comprimento do braço L2, temos:

$$\begin{aligned} \|{}^b B_j - {}^b C_j\| &= L2 \\ ({}^b B_j - {}^b C_j)^T ({}^b B_j - {}^b C_j) &= L2^2 \\ j &= 1, 2, 3. \end{aligned}$$

Para calcular a cinemática inversa, precisamos obter os valores dos ângulos θ_j . Para tanto, basta modificar a equação anterior para que ela assuma a seguinte forma.

$$(E_j) \cos(\theta_j) + (F_j) \sin(\theta_j) + (G_j) = 0$$

Como os valores de $\cos(\theta_j)$ e $\sin(\theta_j)$ são:

$$\begin{aligned} \bullet \quad \cos(\theta_j) &= \frac{1-u^2}{1+u^2}; \\ \bullet \quad \sin(\theta_j) &= \frac{2u}{1+u^2}. \end{aligned}$$

Temos:

$$(E_j) \left(\frac{1-u^2}{1+u^2} \right) + (F_j) \left(\frac{2u}{1+u^2} \right) + (G_j) = 0$$

$$(E_j)(1-u^2) + (F_j)(2u) + (G_j)(1+u^2) = 0$$

$$(G_j - E_j)(u^2) + (F_j)(2u) + (G_j + E_j) = 0$$

Então:

$$u = \frac{-F_j \pm \sqrt{F_j^2 - G_j^2 + E_j^2}}{(G_j - E_j)}$$

Sendo $u = \tan\left(\frac{\theta_j}{2}\right)$, portanto temos que:

$$\theta_j = 2 \arctan(u)$$

Achando θ_j para $j = 1, 2$ e 3 temos os ângulos dos motores em A1, A2 e A3.

CAPÍTULO 11: FABRICAÇÃO

Antes de iniciar a fabricação dos componentes foram feitos diversos desenhos em CAD. Estes desenhos em CAD estão anexados no Anexo A – Desenhos de Fabricação.

Abaixo é possível visualizar alguns desenhos de conjunto do manipulador.

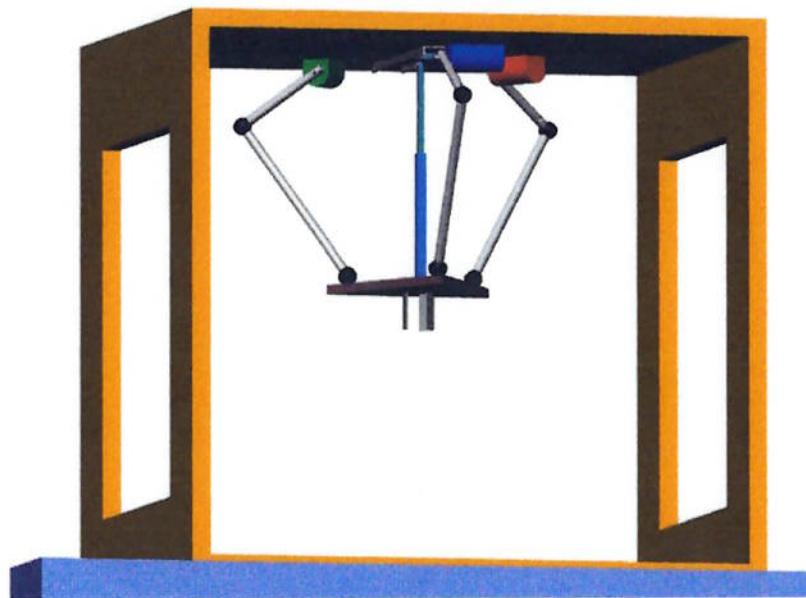


Figura 11.1 – Vista isométrica do desenho de conjunto.

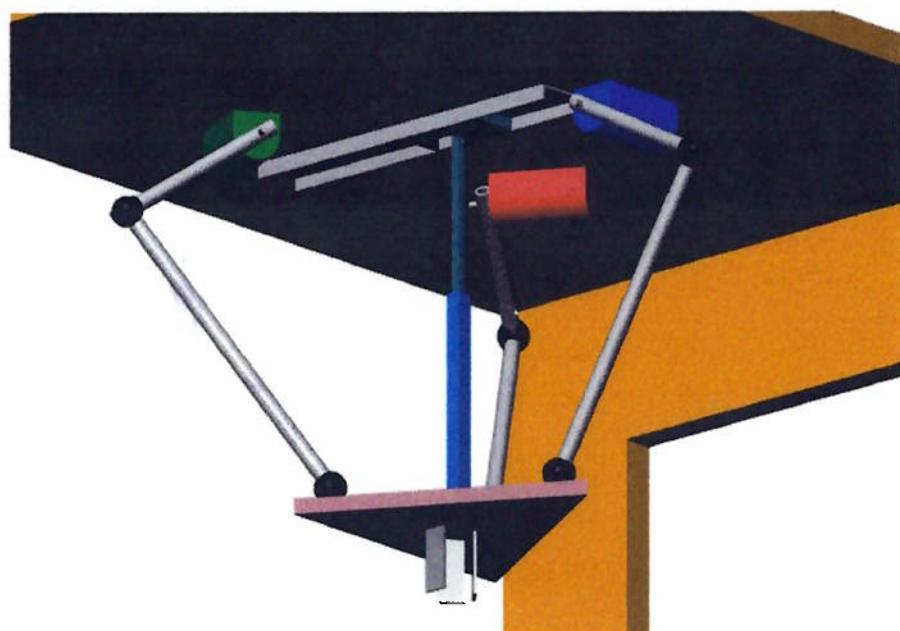


Figura 11.2 – Imagem destacando o manipulador

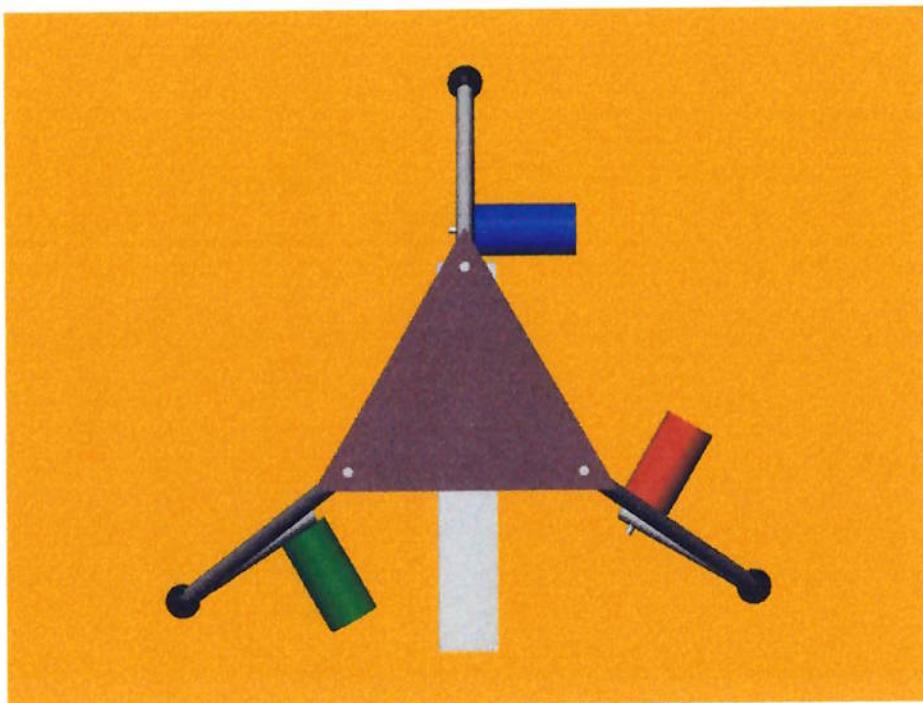


Figura 11.3 – Vista inferior.

Analisado e corrigidos as falhas de projeto ou de planejamento dos desenhos feitos em CAD teve-se inicio a construção de uma maquete em escala real antes de construir o protótipo final.



Figura 11.4 – Maquete do robô manipulador.



Figura 11.5 – Outras vistas da maquete.

A maquete teve por objetivo visualizar o espaço de trabalho do efetuador poderia efetuar e verificar alguma falha de projeto. Além do mais, ainda havia dois gargalos no projeto que poderiam ser solucionados com o auxílio de uma maquete. Caso estes gargalos não fossem solucionados não teria como dar continuidade ao projeto, pois o mecanismo não funcionaria.

O primeiro gargalo estava relacionado ao material que seria utilizado no lugar de uma junta esférica, já que esta apresentava um custo muito elevado e tinha grandes limitações de ângulo de movimento. A solução encontrada foi o uso de uma borracha de vedação de tubos a qual seria cortada e utilizada como junta tipo elástico.



Figura 11.6 – Junta tipo elástico.

Já o segundo problema tinha relação com a guia linear que seria usada na cadeia passiva. Pelo o fato de que qualquer força no eixo x da extremidade da cadeia passiva gerava um momento torçor no eixo y o qual provocava um travamento na guia.

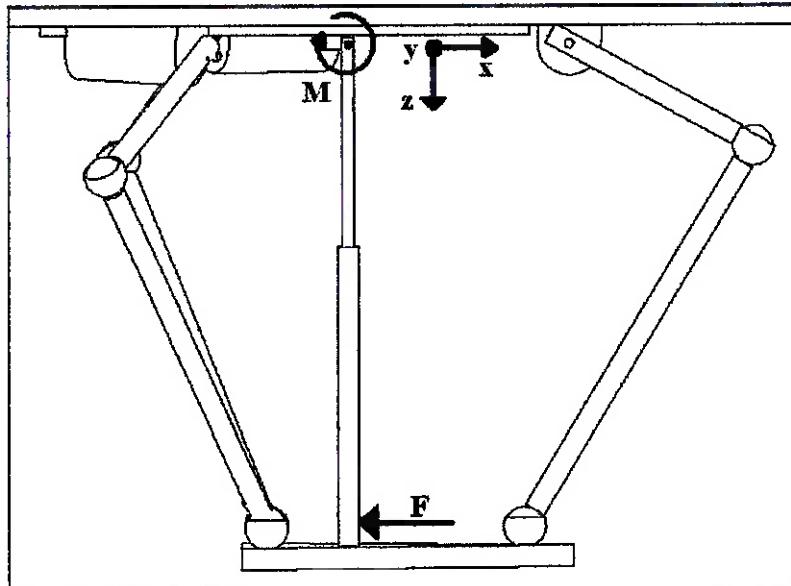


Figura 11.7 – Esquema demonstrando o momento causado na guia linear.

Como solução, foi utilizado um trilho de armário como guia linear uma vez que esta apresenta um custo muito inferior do que por exemplo uma guia da NKS.

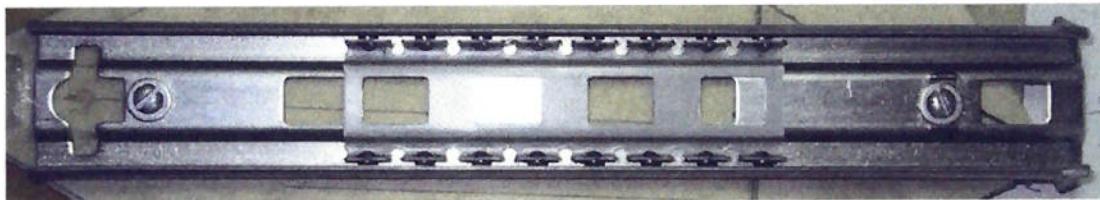


Figura 11.8 – Guia linear utilizada no projeto.

Solucionados os gargalos e analisado o comportamento espacial da base do efetuador iniciou-se a fabricação do protótipo final.

As próximas fotos mostram alguns componentes fabricados para a construção do manipulador paralelo e o protótipo final construído.



Figura 11.9 – Base de fixação dos motores.

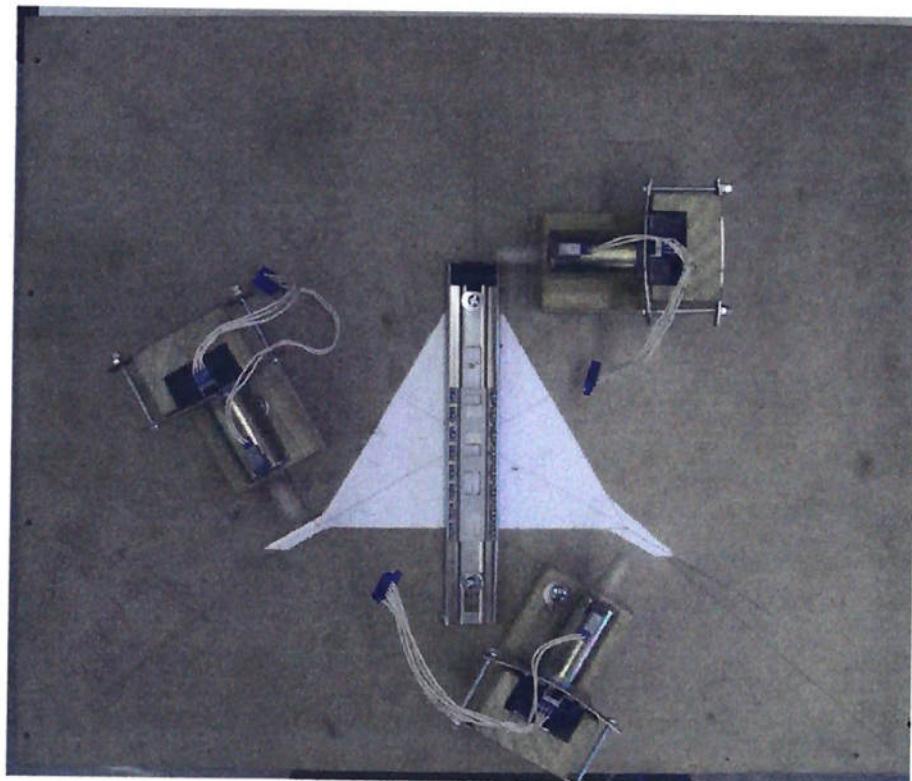


Figura 11.10 – Base de fixação dos motores e da guia linear.



Figura 11.11 – Vista lateral do protótipo.



Figura 11.12 – Vista frontal do protótipo.

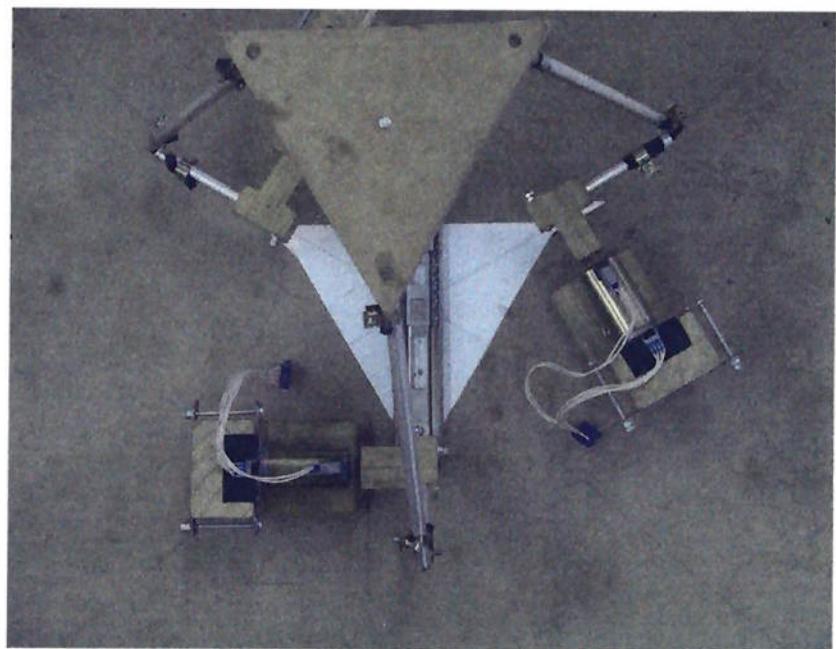


Figura 11.13 – Vista inferior do protótipo.

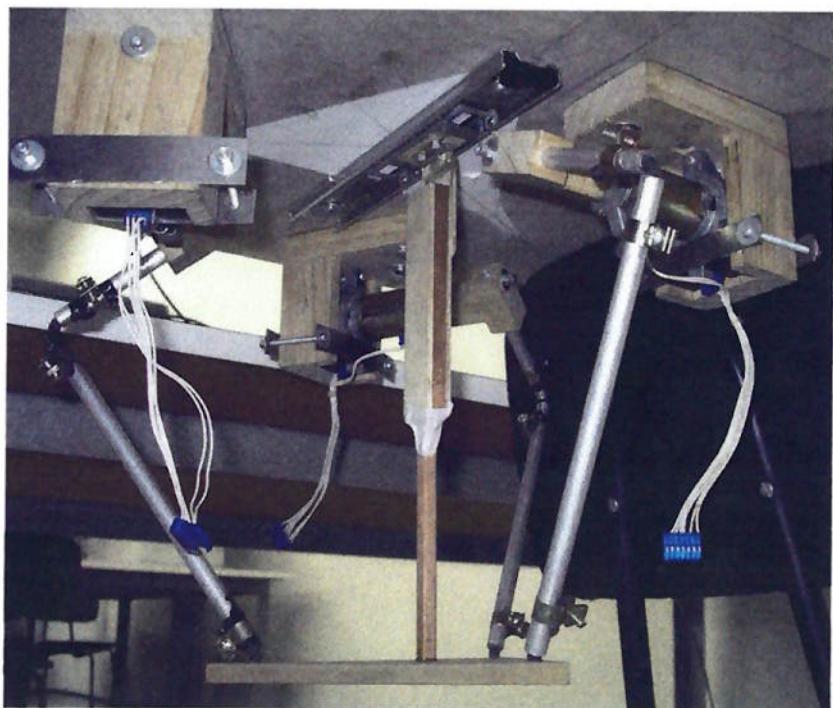


Figura 11.14 – Manipulador em detalhe.

CAPÍTULO 12: PROJETO ELETRÔNICO

Como principal requisito do projeto eletrônico era o controle simultâneo de posição dos três motores usados para movimentar o efetuador. Essa sincronia dos atuadores apresentou uma grande dificuldade para encontrar uma forma de adequado controle. Como o motor utilizado é um motor de corrente continua com encoder óptico, o controle de posição seria dado pelos valores fornecidos pelo encoder. O encoder presente no motor tem resolução de $0,7143^\circ$ ou seja, 504 pulsos em 360° .

Então era necessário o uso de um micro-controlador que fosse capaz de gerar ondas em PWM e também conseguisse ler os valores fornecidos pelo o encoder. Então, o micro-controlador escolhido foi o Motorola da placa de desenvolvimento M68EVB908Q.

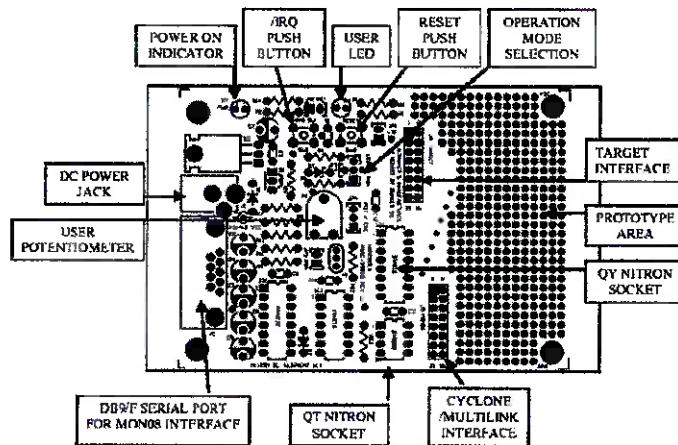


Figura 12.1 – Esquema do micro-controlador Motorola.

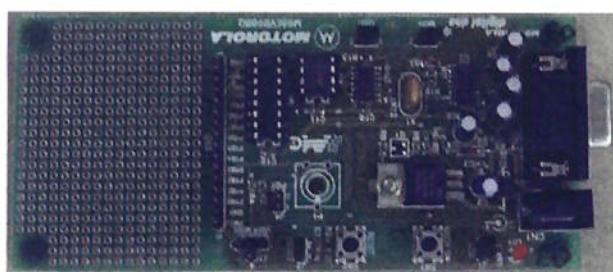


Figura 12.2 – Micro-controlador Motorola.

Para realizar o controle dos motores foram necessários três micro-controladores iguais para que fosse possível gerar três diferentes pulsos de PWM, um para cada motor.

Para realização do posicionamento dos motores foi criada uma função de interrupção de PWM assim que o número específico de leituras do encoder fosse atingido, o que garante que a posição desejada do motor será atingida. Com isso foi feito um programa que gera o número necessário de leitoras de encoder, sentido de rotação dos motores e a Modulação em Largura de Pulso (PWM) quando fornecido o deslocamento desejado para o efetuador.

Já para o acionamento dos motores foram utilizadas três placas acionadoras de motor de corrente continua*, uma para cada motor.

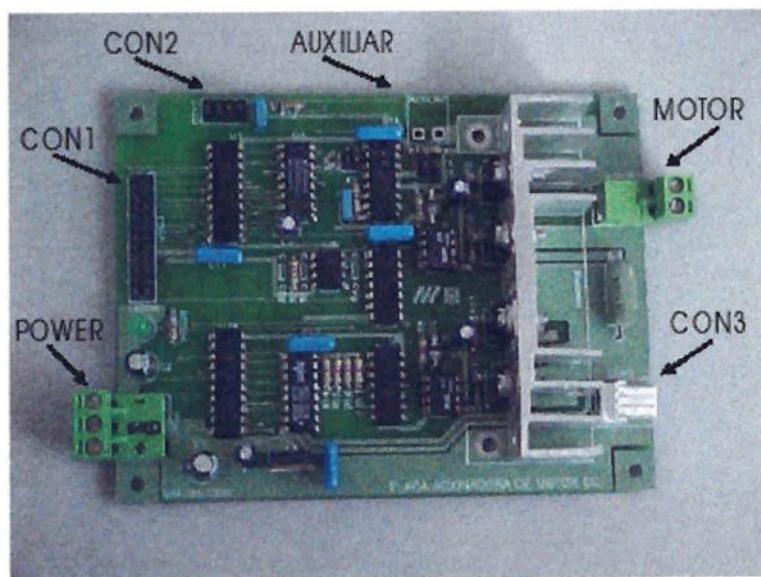


Figura 12.3 – Foto da placa acionadora de Motor CC.

Esta placa encontra-se configurada para acionar um motor CC de 12V/10A. O Circuito de acionamento é composto por quatro Transistores MOSFETs em configuração “ponte H”, o que permite o acionamento nos dois sentidos de rotação.

O Acionamento é realizada através de Modulação em Largura de Pulso (PWM), realizado pelo CI 3524. A tensão aplicada na entrada deste CI implica que a ondulação gerada varie de 0 a 100% a razão cíclica (Duty-cicle). Isto significa que aplicando 2,5V na referência do CI3524 o motor fica parado, pois teremos 50% de

* Os drivers utilizados neste projeto foram emprestados pela EPUSP.

nível lógico 1 e 50% de nível lógico 0 aplicados à Ponte H. Ou seja, de 2,5V a 0V o motor rotaciona no sentido anti-horário, e de 2,5 V a 5V o motor rotaciona no sentido horário.

CAPÍTULO 13: DISCUSSÃO DE RESULTADOS

No caso deste trabalho, a arquitetura projetada para a função de “Pick and Place” foi (3RSS + CP). Uma vez que foi a arquitetura que melhor satisfez os requisitos de projeto como: a maximização do espaço de trabalho (devido à presença de juntas de longe alcance), rigidez na base do efetuador e facilidade de controle.

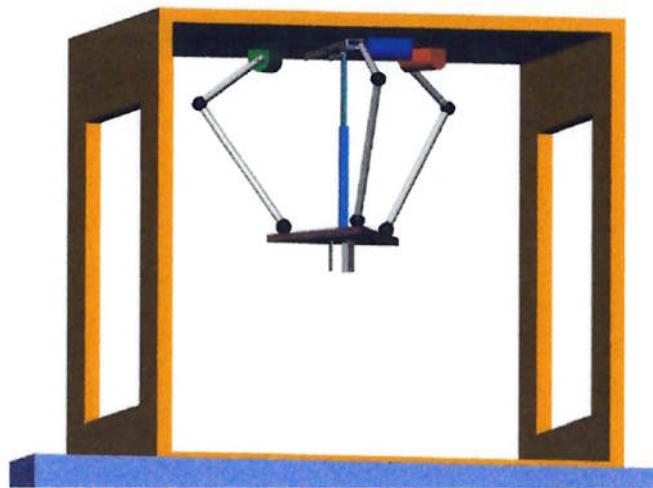


Figura 13.1 – Manipulador robótico (3RSS + CP) projetado.

Com relação ao volume de trabalho, um programa feito em Matlab para percorrer um cubo verificando pontos que pertenciam ao espaço de trabalho da arquitetura. Cada ponto pertencente ao volume de trabalho era marcado em vermelho. A seguir têm-se algumas plotagens do espaço de trabalho.

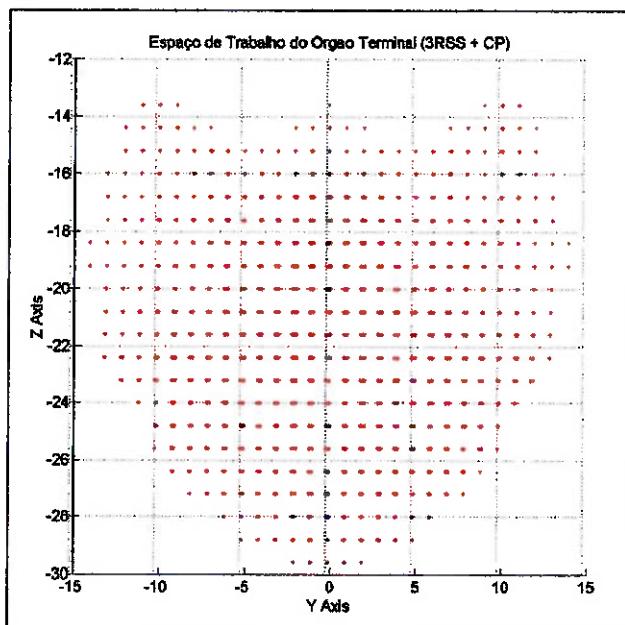


Figura 13.2 – Vista Frontal do Volume de trabalho (plano yz).

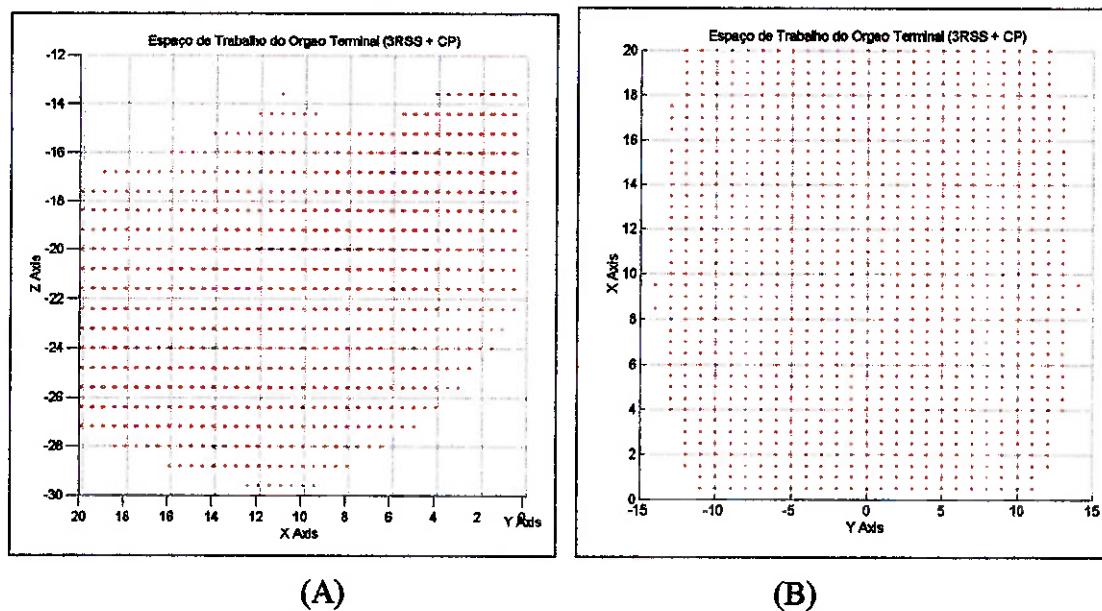


Figura 13.3 – Vistas: (A) Lateral (plano xz) e (B) Superior (plano xy).

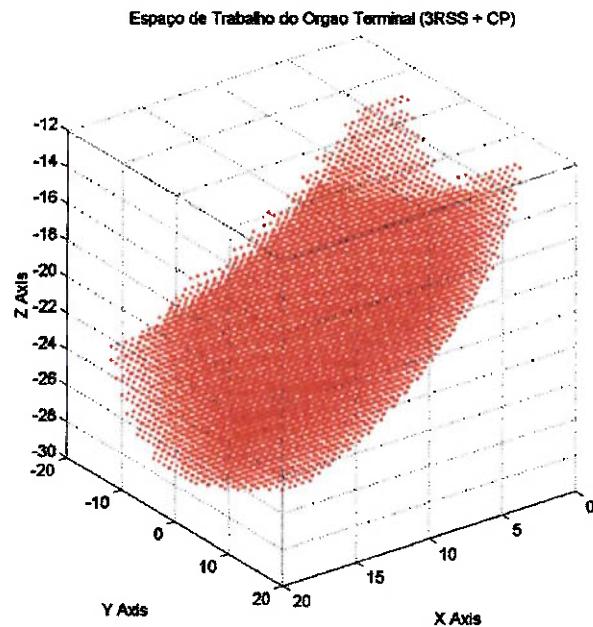


Figura 13.4 – Vista Isométrica do volume de trabalho.

Para melhor visualização do espaço de trabalho as próximas três figuras apresentaram imagem do manipulador robótico com o seu espaço de trabalho viável.

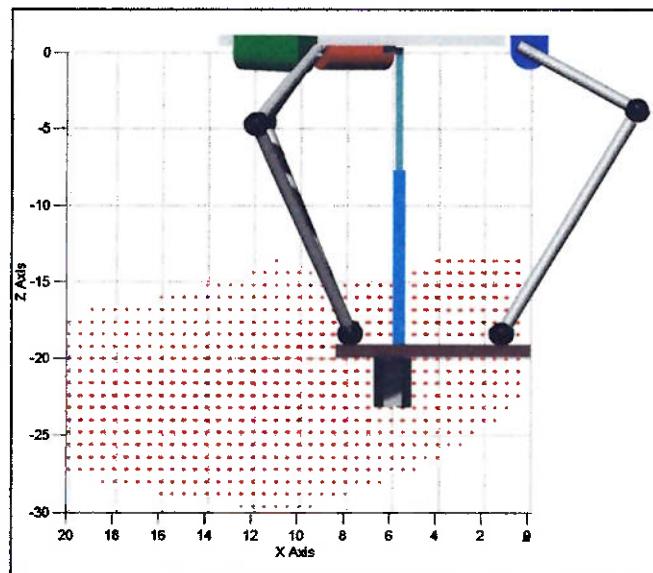


Figura 13.5 – Vista lateral do espaço de trabalho.

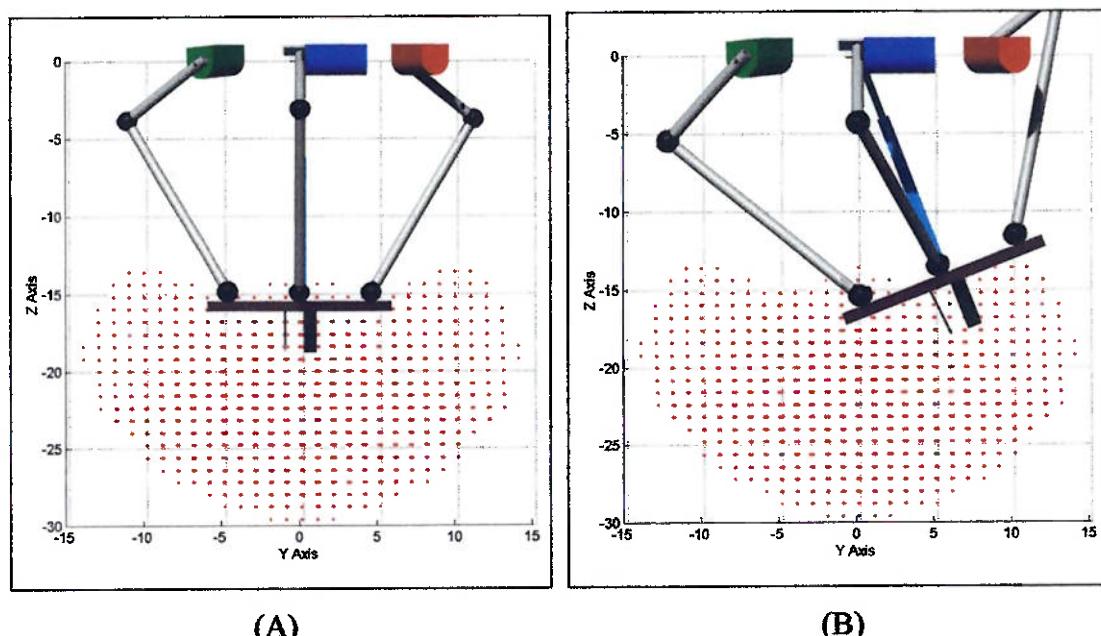


Figura 13.6 – Vistas frontais da garra: (A) centro e (B) deslocada para à direita.

Analizando o espaço de trabalho percebe-se que o manipulador pode realizar um bom posicionamento de objetos no plano formado pelos eixos xz.

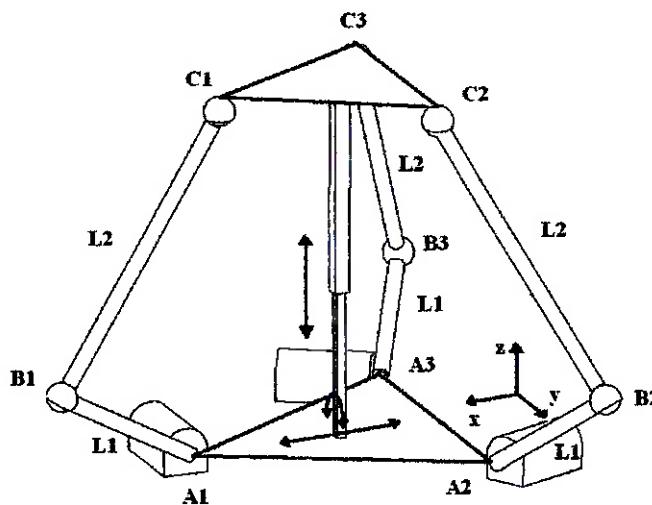


Figura 13.7 – Coordenadas adotados no manipulador.

Entretanto, os movimentos nos planos yz e zy posicionam a garra de forma inclinada em relação a vertical o que dificulta a manipulação de objetos. Isso pode ser verificado com a Figura 13.6 – Vistas frontais da garra: (A) centro e (B) deslocada para à direita.

Uma solução para esse problema seria a utilização de uma garra que consiga ficar sempre perpendicular a horizontal.

A partir da cinemática inversa feita para o (3RSS+CP) no Matlab realizou-se uma otimização do espaço de trabalho variando os comprimentos dos braços L1 e L2 com relação a seguinte função: $L1 + L2 = 30$. Para cada combinação de L1 e L2 o Matlab resultava os números de pontos pertencentes ao espaço de trabalho.

Para a combinação de braços usados no manipulador deste projeto, $L1 = 9\text{cm}$ e $L2 = 21\text{cm}$, foram 10.104 pontos. Já a combinação otimizada apresentou 21.921 pontos para a combinação de $L1 = 18\text{cm}$ e $L2 = 12\text{cm}$, aproximadamente o dobro do número de pontos obtidos pela combinação anterior.

As próximas figuras mostram uma comparação entre o espaço de trabalho de ($L1 = 9\text{cm}$, $L2 = 21\text{cm}$) e ($L1 = 18\text{cm}$, $L2 = 12\text{cm}$).

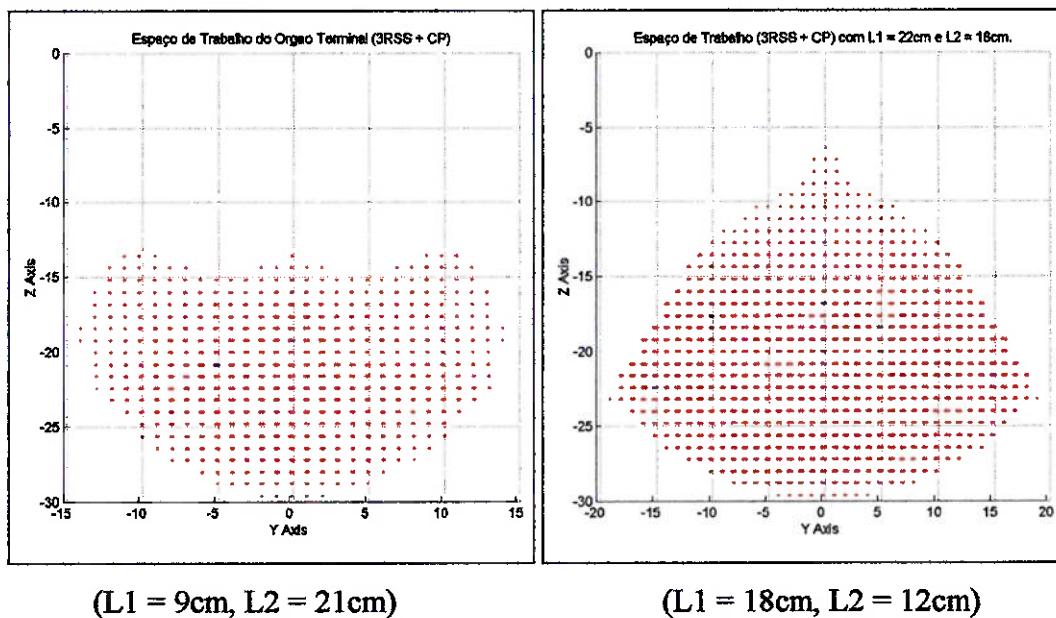


Figura 13.8 – Comparação entre vistas frontais.

Vale ressaltar que nas figuras a cima a da esquerda o eixo y varia de (-15, 15) e a outra figura de (-20, 20).

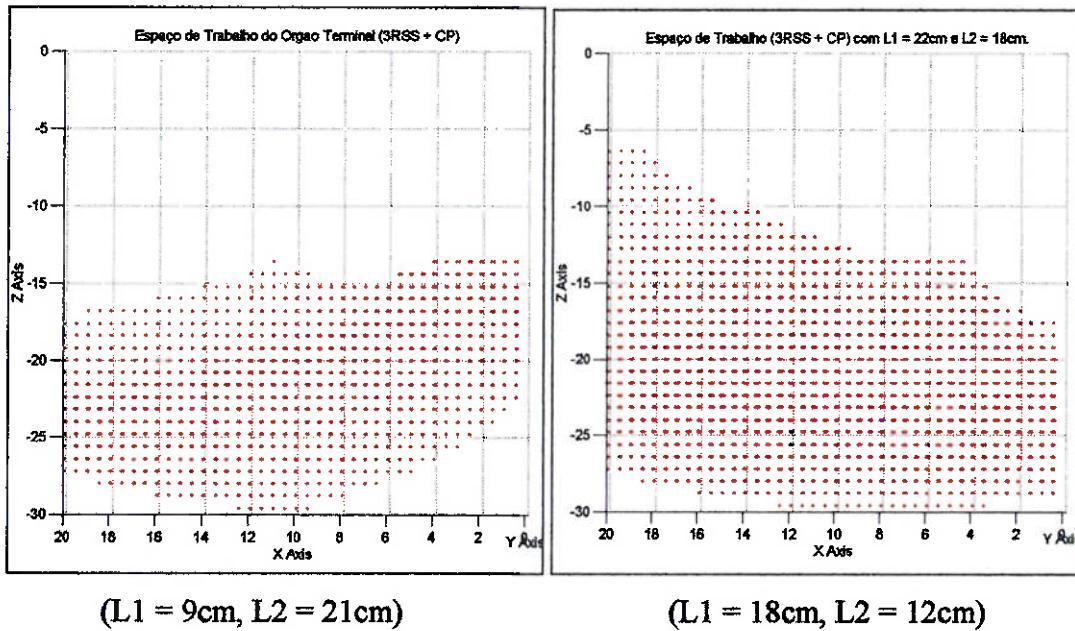


Figura 13.9 – Comparação entre vistas laterais.

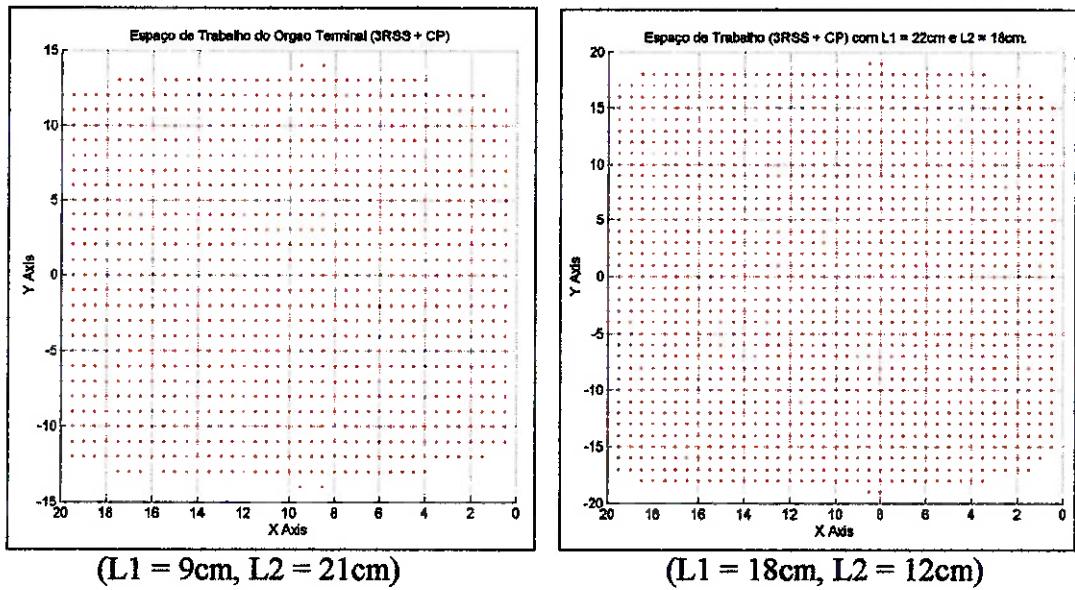


Figura 13.10 – Comparação entre vistas superior.

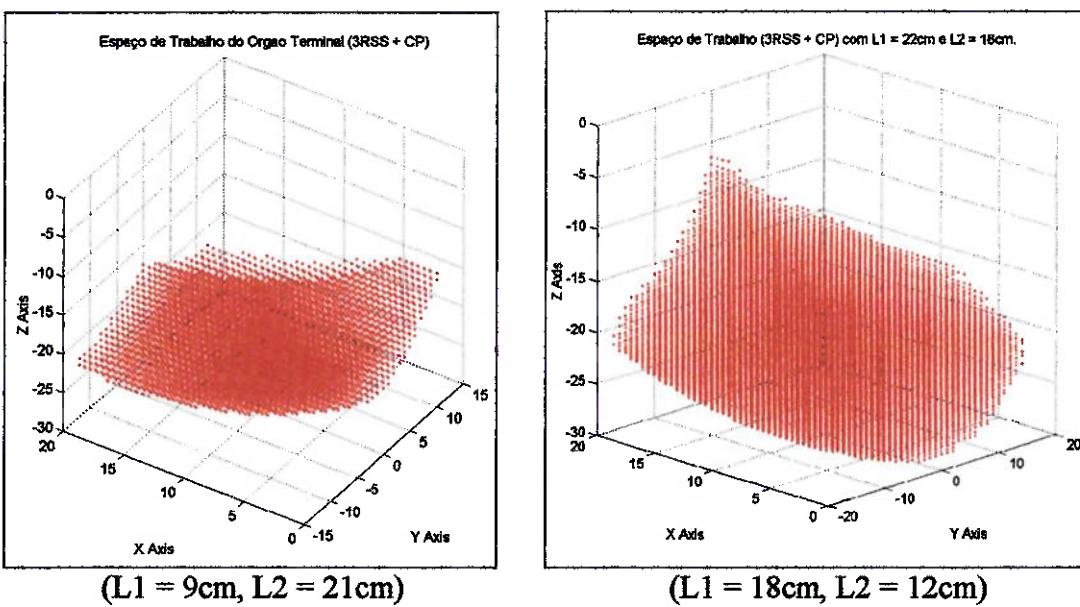


Figura 13.11 – Comparação entre vistas isométricas.

Dessas comparações feitas anteriormente pode-se concluir que a otimização resultou numa combinação de braços o que levou a um melhor espaço de trabalho do que a combinação usada neste projeto. Desse resultado pode-se chegar à conclusão de que o dimensionamento dos braços a partir de um modelo bidimensional não gerou a melhor combinação de braços.

Entretanto, o uso de braços L1 maiores provoca maiores torques requeridos nos atuadores, pois o aumento de L1 provoca aumento no momento atuante no motor.

Enfim, seria necessário uma otimização mais complexa para avaliar a melhor opção para (3RSS+CP) a qual gerasse um espaço de trabalho maximizado. Seriam preciso avaliar outros fatores além da combinação de braços, como: relação entre os comprimentos das bases, torque requerido nos motores, variação de ângulo de juntas, acelerações necessárias, singularidades, disponibilidade de materiais, etc.

CAPÍTULO 14: CONCLUSÕES

O conceito de mecanismos paralelos existe por volta de quatro décadas, com o projeto de uma plataforma para o uso em simulações de vôo aeroespacial feito por Stewart. Quase meio séculos se passaram e ainda o conceito de robôs paralelos continua pouco explorado.

Ainda tem muitas arquiteturas que podem a ser desenvolvida. Algumas técnicas de desenvolvimento de arquiteturas com as utilizadas neste projeto auxiliam na criação de novas arquiteturas. Entretanto, o projeto de novos sistemas paralelos são muitos influenciados e dependem dos conhecimentos, “Know How”, criatividade e o bom senso dos engenheiros.

No caso deste trabalho, a arquitetura (3RSS + CP) projetada para a função de “Pick and Place” foi a que melhor satisfez os requisitos de projeto como: a maximização do espaço de trabalho (devido à presença de juntas de longe alcance), rigidez na base do efetuador e facilidade de controle.

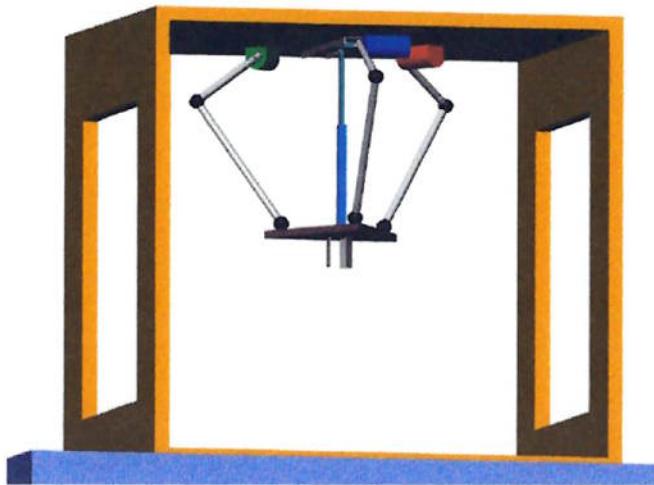


Figura 14.1 – Manipulador robótico (3RSS + CP) projetado.

Com relação ao volume de trabalho, esta arquitetura é muito boa na utilização de posicionamentos de objetos no plano formado pelos eixos xz.

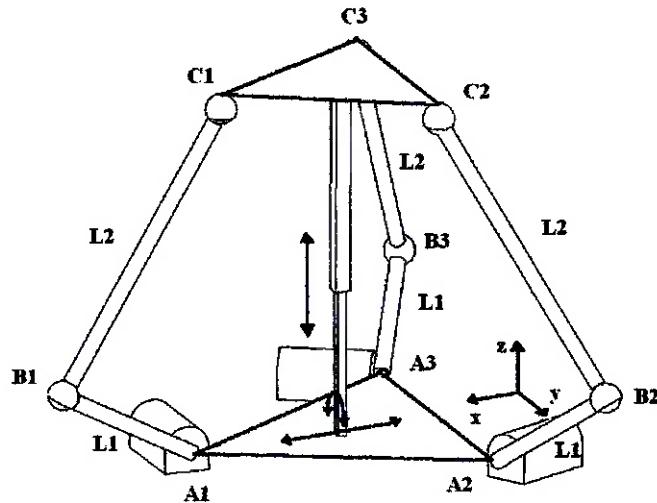


Figura 14.2 – Coordenadas adotados no manipulador.

Entretanto, os movimentos nos planos yz e zy posicionam a garra de forma inclinada em relação a vertical o que dificulta a manipulação de objetos. Isso pode ser verificado na figura abaixo.



Figura 14.3 – Visualização do ângulo formado pela garra e a vertical.

Uma solução para esse problema seria a utilização de uma garra que consiga ficar sempre perpendicular a horizontal.

Com relação ao projeto eletrônico, o (3RSS + CP) requer um sistema de controle muito complexo uma vez que para efetuar qual quer movimentação em um espaço 3D é requerida sincronia entre os três motores.

Dependendo da movimentação as velocidades dos motores poderão ser diferentes entre si e variam no tempo. Essas características da arquitetura dificultam muito o projeto eletrônico e o controle dos motores.

Lembrando que essa dificuldade de controle foi um dos grandes motivos que causou o desenvolvimento tardio de arquiteturas paralelas, uma vez que não havia computadores e sistemas eletrônicos capazes de realizar essa complexidade de controle.

14.1. Dificuldades Encontradas

As maiores dificuldades encontradas durante o projeto foram com relação à acessibilidade às bibliografias, aprendizado dos softwares, controle dos atuadores e alguns problemas mecânicos, etc.

14.1.1. Bibliografias

Por se tratar de um tema muito recente, existem poucas bibliografias relacionadas a manipuladores robóticos baseado em um mecanismo de cinemática paralela consequentemente fica muito difícil o acesso a livros nas bibliotecas e muitos dos textos presente na Internet apresentam apenas noções básicas sobre o assunto em questão. São muitos poucos os “web sites” que apresentam trabalhos, pesquisas, ou “papers” integrais com temas que aprofundam este assunto.

14.1.2. Softwares

Os softwares Matlab, Solid Works 3D e Visual Nastran 4D requisitaram muito tempo até a sua familiarização e aprendizado. Uma vez que se teve o pleno domínio desses softwares, eles se tornam uma ferramenta de grande importância. O tempo gasto com o seu aprendizado foi muito recompensado na hora de sua

utilização no projeto. Essas ferramentas auxiliaram muito no planejamento, projeto e simulação de movimentos do mecanismo paralelo que foi projetado.

14.1.3. Projeto Mecânico

Durante o projeto mecânico, algumas fases necessitaram de grandes atenções, pois não permitiam qualquer erro, caso contrário o projeto falharia. Eses fatos ocorreram nas etapas de:

- Desenvolvimento e seleção: tomou-se muito tempo para o domínio do assunto de mecanismos, além de mais, qualquer falha de projeto da arquitetura ou da seleção da mesma resultaria em um manipulador que não satisfaria os requisitos de projeto;
- Escolha de materiais: os materiais requisitados para fabricação influenciam muito no desempenho do mecanismo. Por exemplo, qualquer aumento de peso provoca uma maior inércia do mecanismo e pode até sobrecarregar os motores. Sendo que a guia linear e a uma junta que funcionasse como junta esférica eram os gargalhos para a fabricação e um bom funcionamento do robô;
- Construção do protótipo: nessa etapa requereu muita atenção para se construir um robô preciso e sem falhas construtivas.

Outra grande dificuldade apresentada foi o uso da cinemática inversa para realizar o dimensionamento. Nessa fase, alguns pequenos erros de programação atrasaram muito o andamento do projeto, pois não se sabia se os dados obtidos eram corretos. Uma vez feita à validação do programa, o projeto fluiu mais rapidamente.

14.1.4. Projeto Eletrônico

Por fim, o projeto eletrônico foi muito critico para permitir o funcionamento do mecanismo. Não adianta ter um maquina bem construída se a parte eletrônica não funciona.

As maiores dificuldades encontradas foram: permitir o sincronismo entre os três atuadores presentes no manipulador e realizar o controle de posição dos motores utilizando ondas com pulsos PWM e encoders.

14.2. Discussão dos Principais Problemas Apresentados pelo Projeto

A idéia desse item é apresentar os principais problemas verificados durante os teste do protótipo final e algumas sugestões para possíveis soluções.

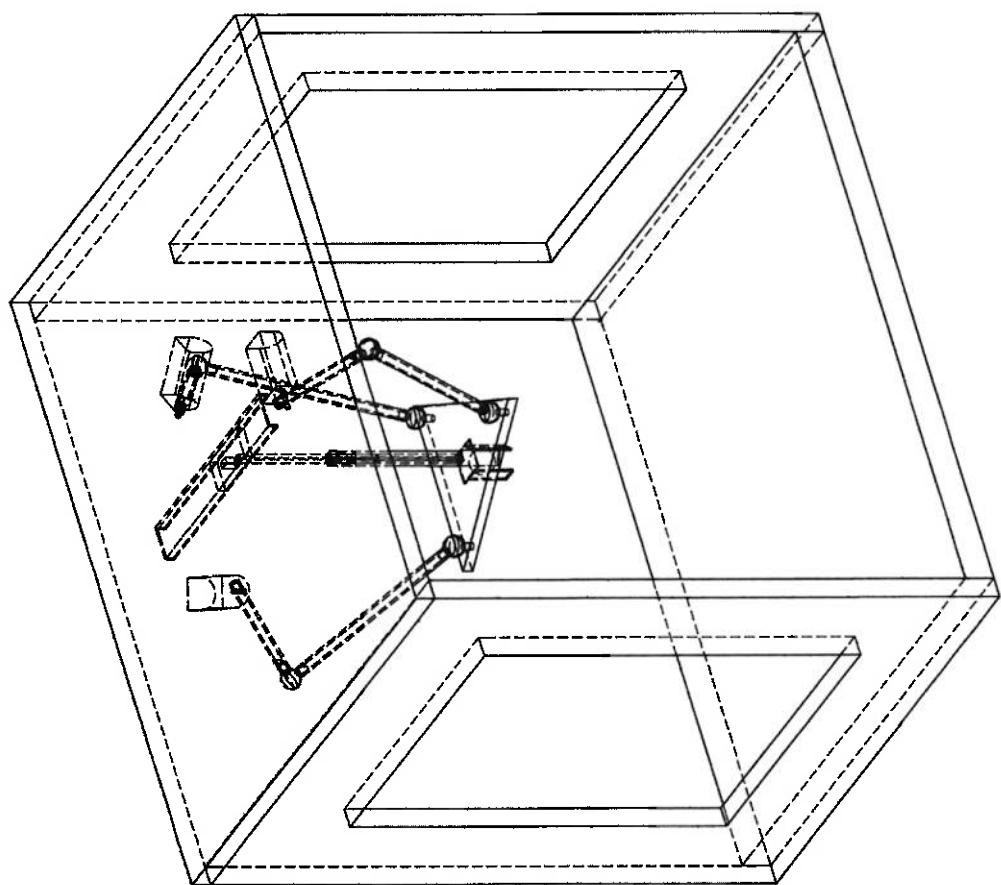
Durante os teste do protótipo percebeu-se que o torque de saída requerido pelos os motores era maior do que o esperado consequentemente os motores CC utilizados neste projeto não satisfaziam os mínimos requisitos para o funcionamento do manipulador. Além do mais, os motores CC não apresentam redução e nem torque de retenção, portanto não era possível realizar um controle de posição do efetuador. Uma solução para esse caso seria o uso de motores de passo com alto torque de saída, o que solucionaria os problemas enfrentados com os motores de CC, uma vez que motores de passos apresentam torque de retenção.

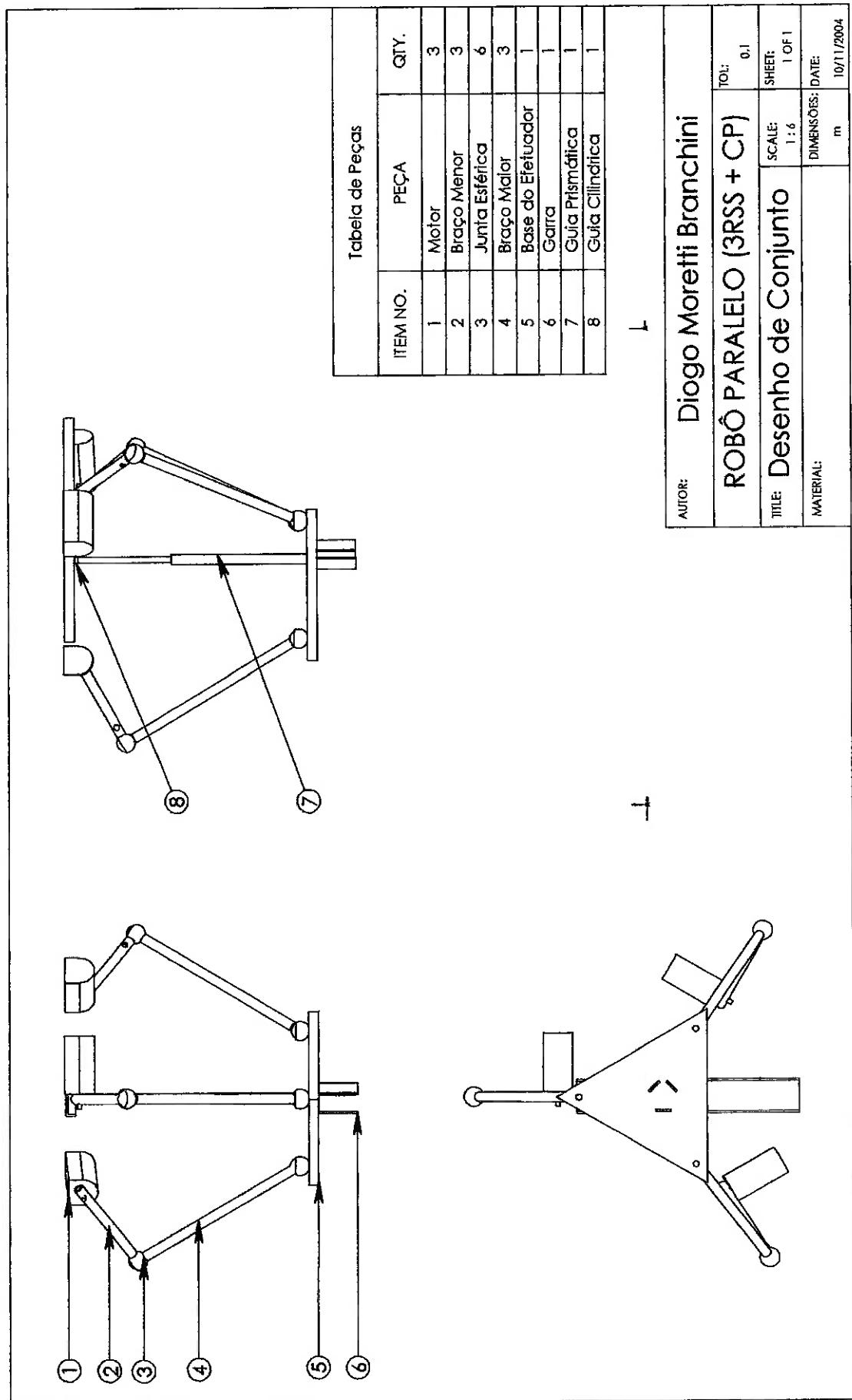
Com relação ao projeto eletrônico, o uso de um controlador que permita um controle dos atuadores em tempo real proporcionaria um melhor desempenho do manipulador robótico o que não é possível com os micro-controladores Motorola utilizados.

O último problema relaciona-se com a cadeia passiva. A guia linear desse projeto foi uma boa solução para um primeiro um protótipo, mas caso esse projeto tiver continuidade será necessário o uso de uma guia linear específica para sistemas mecânicos de precisão. Uma vez que a guia prismática usada apresenta muito travamento quando há algum torque com relação ao eixo Z. A utilização de uma guia de qualidade é essencial para essa arquitetura, caso contrário será muito difícil realizar movimentos do efetuador ao longo do eixo Z.

ANEXO A - DESENHOS de FABRICAÇÃO

AUTOR:	Diogo Moretti Branchini
ROBÔ PARALELO (3RSS + CP)	TO: 0.1
TITLE: Desenho de Conjunto	SCALE: 1 : 7
MATERIAL:	SHEET: 1 OF 1
M	DIMENSÕES: DATE: 10/11/2004





RELAÇÃO DE PEÇAS			
ITEM NO.	PEÇA	QTY.	
1	MOTOR	3	
2	BRAÇO MENOR	3	
3	JUNTA ESFÉRICA	6	
4	BRAÇO MAIOR	3	
5	BASE DO EFETUADOR	1	
6	GARRA	1	
7	JUNTA CILINDRICA	1	
8	JUNTA PRISMÁTICA	1	

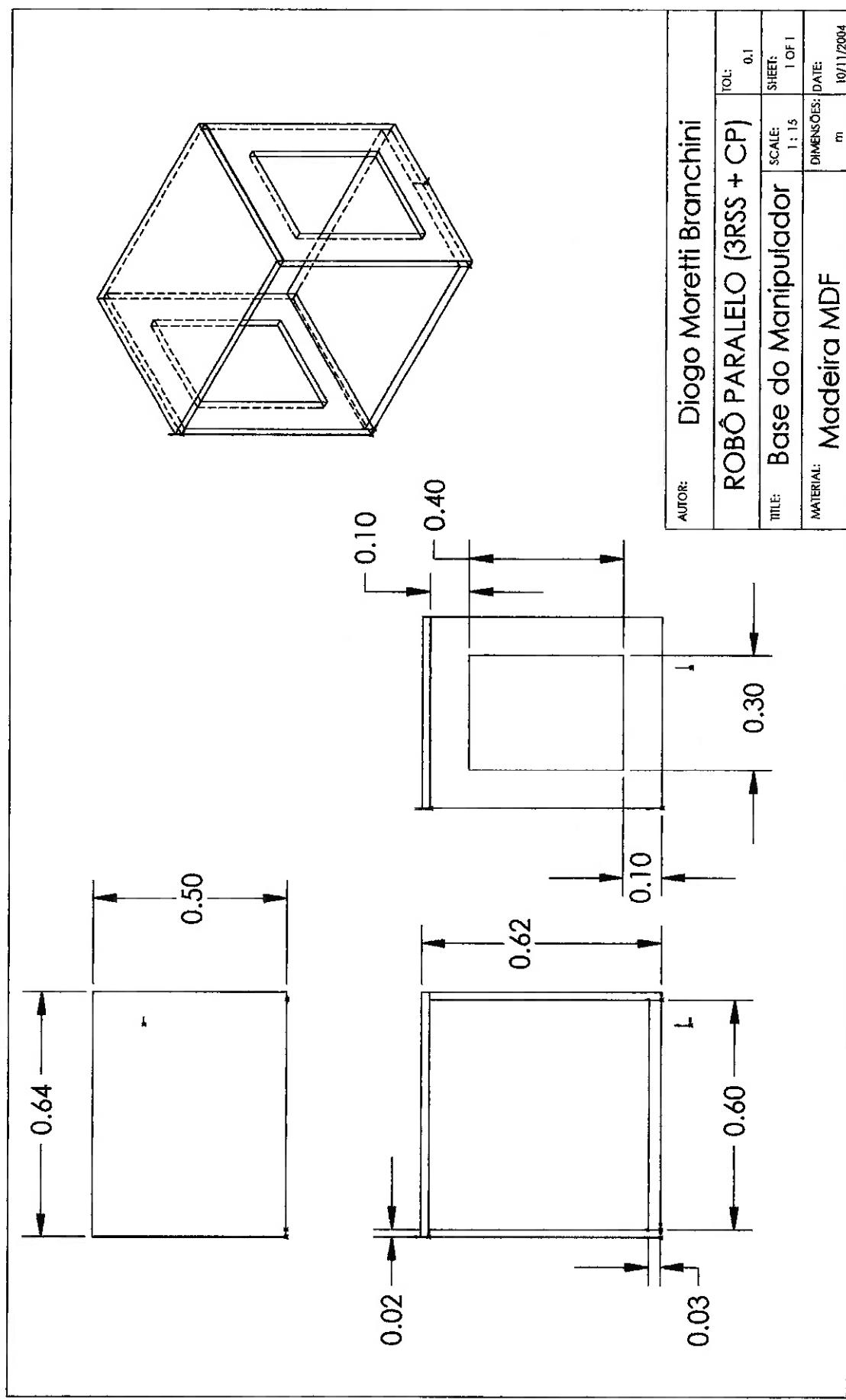
AUTOR: Diogo Moretti Branchini

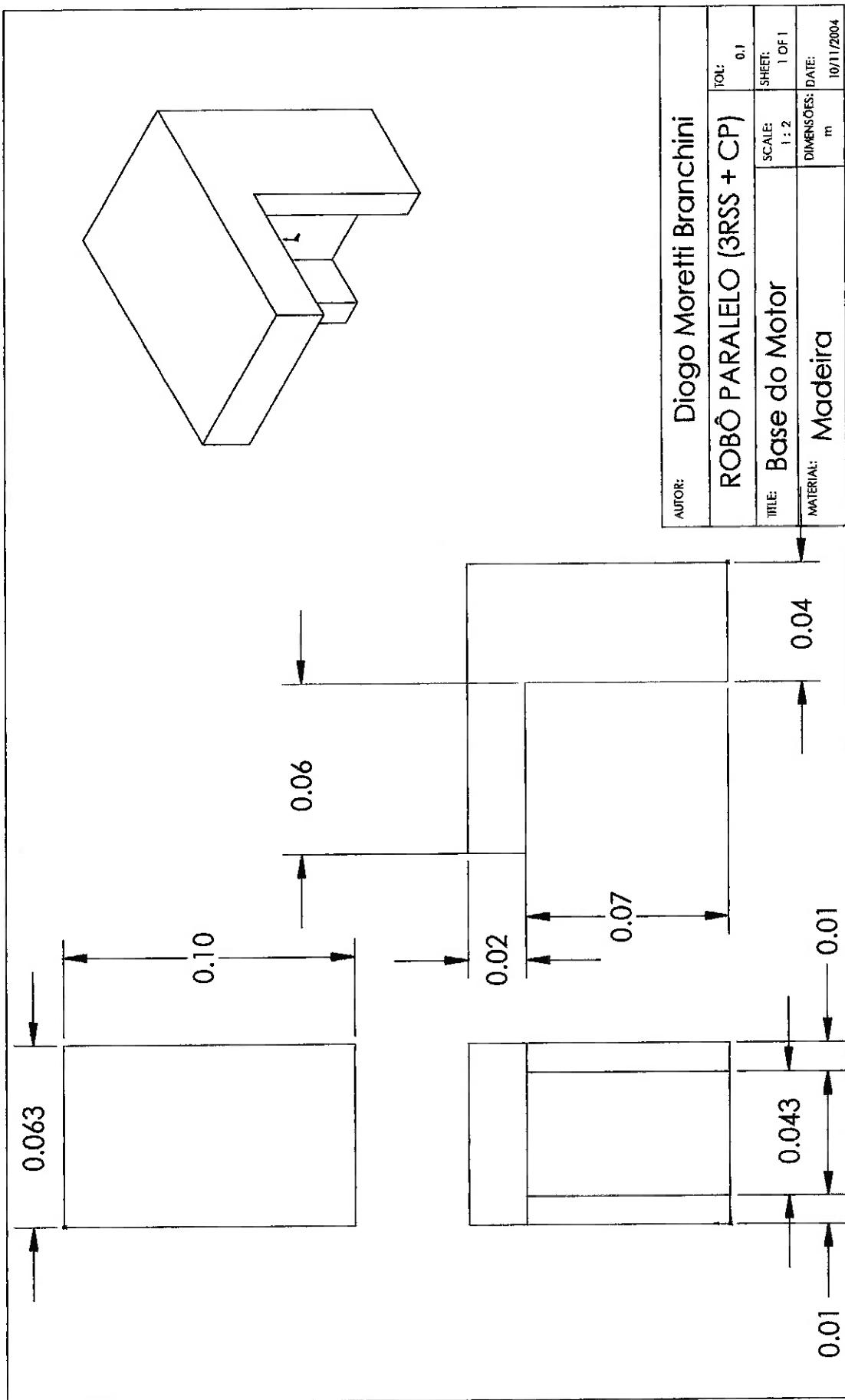
ROBÔ PARALELO (3RSS + CP) TOL: 0:1

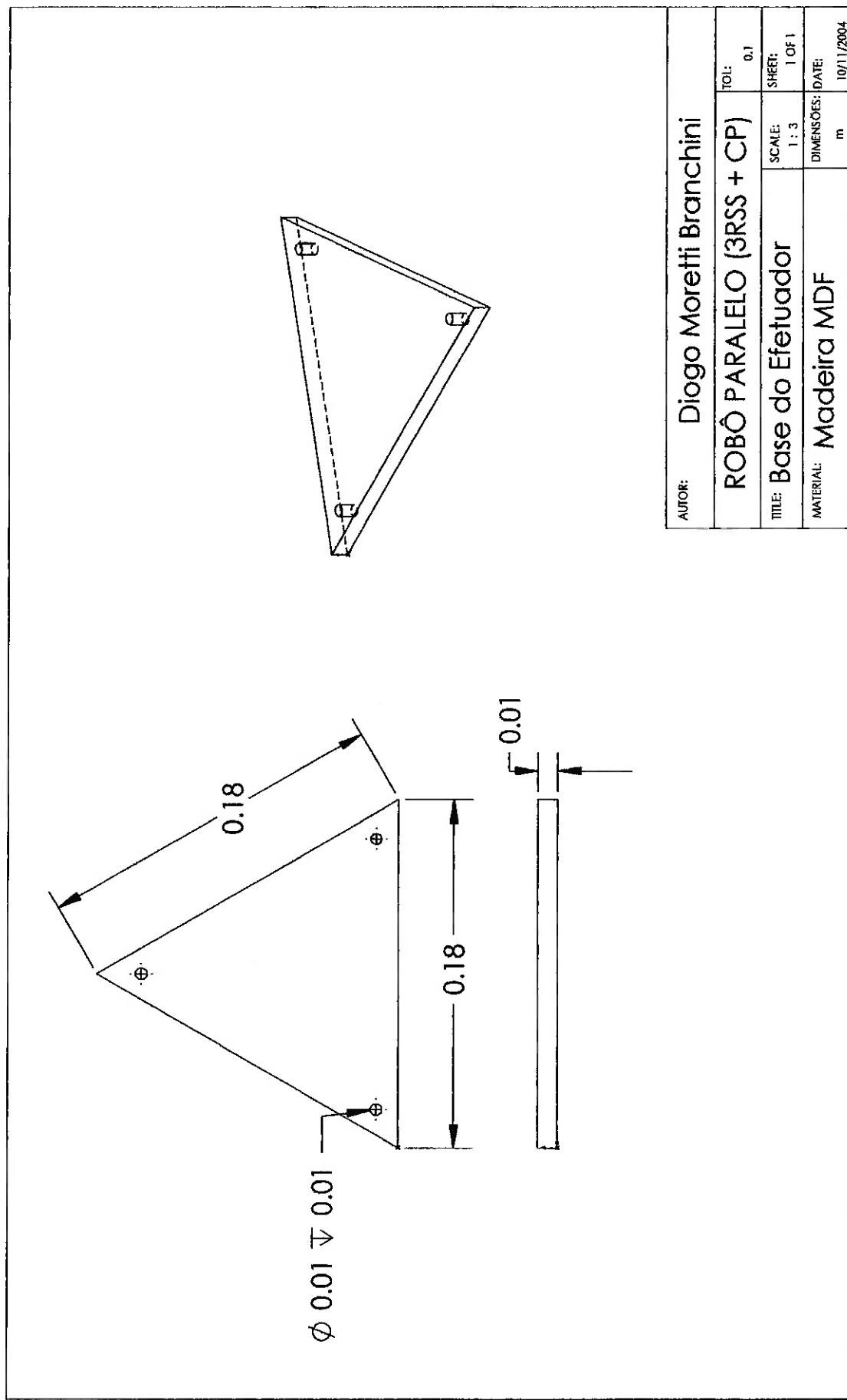
TITLE: Desenho de Conjunto SHEET: 1 OF 1

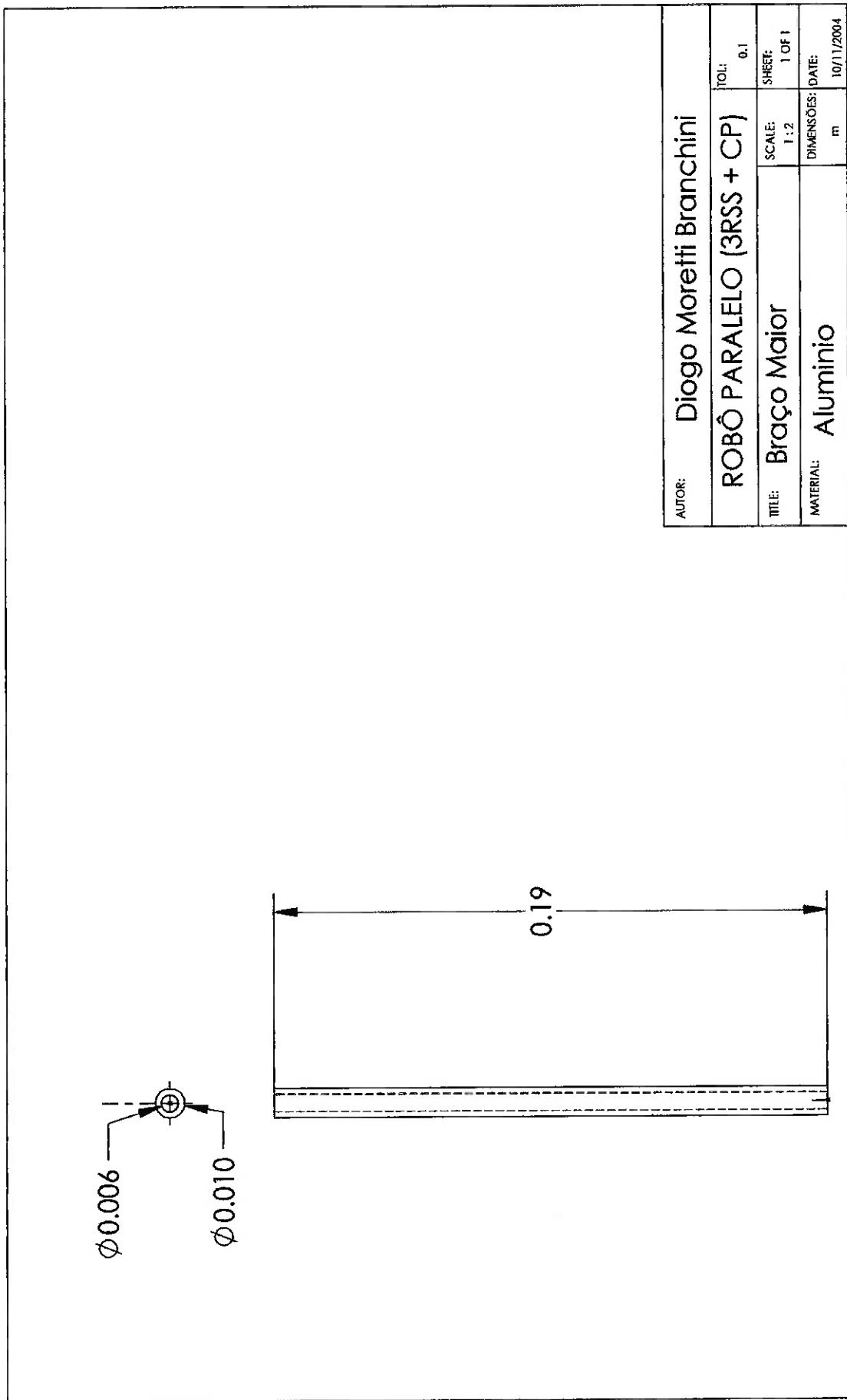
SCALE: 1:3 DIMENSÕES: DATE:

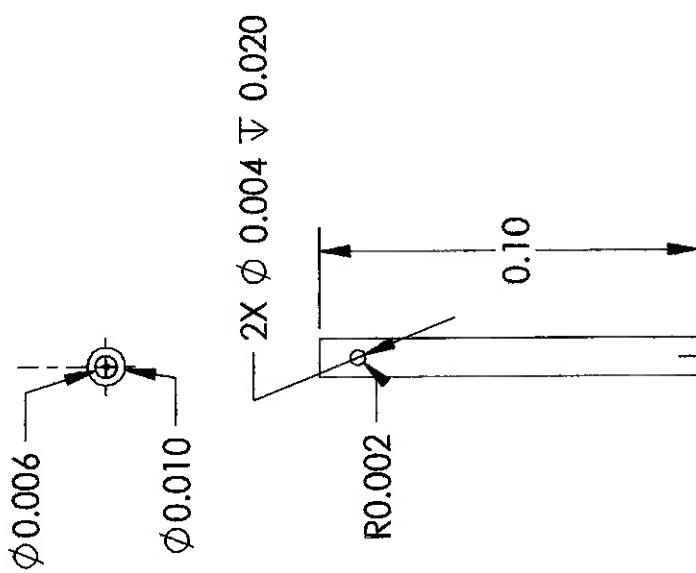
MATERIAL: m 10/11/2004











AUTOR:	Diogo Moretti Branchini
ROBÔ PARALELO (3RSS + CP)	TOL: 0.1
NAME: Braço Menor	SCALE: 1 : 2
MATERIAL: Aluminio	SHEET: 1 OF 1 DIMENSÕES: DATE: 10/11/2004

ANEXO B - PROGRAMA DA CINEMÁTICA INVERSA 2D

% Cinemática Inversa 2d feito em Matlab

```

function f = m12final (y, xe,ye,xf,yf,bb,xal,a11,a21,r)
xb=0;
yb=0;
ya1=0;
ya2=0;
a12=a11;
a22=a21;
xa2 = - xal;

b11 = ((xal - xb)^2 + (yal - yb)^2)^0.5;
b12 = ((xa2 - xb)^2 + (ya2 - yb)^2)^0.5;

xp = xf - xe;
yp = yf - ye;
xi = xe;
yi = ye;

if r > 0,
    r1 = (xe*xe)^0.5;
end

if r < 0,
    r2 = (xe*xe)^0.5;
end

for i = 0:y,
    k = xp*i/y;
    ky = yp*i/y;
    xe = xe + k;

    if r > 0,
        ye = (r1^2 - xe^2)^0.5 + yi;
    end

    if r < 0,
        ye = -1*(r2^2 - xe^2)^0.5 + yi;
    end

    if r == 0
        if xp == 0,
            ye = ye + ky;
        else
            xe;
            m = (yp/xp);
            xx = xe - xi;
            ye = m*xx + yi;
        end
    end

d01 = ((xe - xb)^2+(ye - yb)^2)^0.5;
d11 = ((xe - xal)^2+(ye - ya1)^2)^0.5;

d02 = ((xe - xb)^2+(ye - yb)^2)^0.5;
d12 = ((xe - xa2)^2+(ye - ya2)^2)^0.5;

tetaO1 = acos((d01^2 + b11^2 - d11^2)/(2*b11*d01));
teste = tetaO1*180/pi;

tetaanterior = acos((d02^2 + b12^2 - d12^2)/(2*b12*d02));
tetaO2 = pi - tetaanterior;

xc1 = bb*sin(tetaO1) + d01*cos(tetaO1);
yc1 = - bb*cos(tetaO1) + d01*sin(tetaO1);

xc2 = -bb*sin(tetaO2) + d02*cos(tetaO2);

```

```

yc2 = +bb*cos(tetaO2) + d02*sin(tetaO2);

d21 = ((xc1 - xa1)^2+(yc1 - ya1)^2)^0.5;
d31 = ((xc1 - xb)^2+(yc1 - yb)^2)^0.5;

d22 = ((xc2 - xa2)^2+(yc2 - ya2)^2)^0.5;
d32 = ((xc2 - xb)^2+(yc2 - yb)^2)^0.5;

teta21 = (acos((-a21^2 + a11^2 + d21^2)/(2*a11*d21)))*180/pi;
teta31 = (acos((d21^2 + b11^2 - d31^2)/(2*b11*d21)))*180/pi;

teta12 = (acos((-a22^2 + a12^2 + d22^2)/(2*a12*d22)))*180/pi;
teta32 = (acos((d22^2 + b12^2 - d32^2)/(2*b12*d22)))*180/pi;

teta11 = 180 - teta21 - teta31;
teta22 = teta12 + teta32;

art01= (acos((-a11^2 + a21^2 + d21^2)/(2*a21*d21)))*180/pi;
art02= (acos((-a12^2 + a22^2 + d22^2)/(2*a22*d22)))*180/pi;

art11= art01 + teta21;
art22= art02 + teta12;

pxy = [xe, ye]

m12 = [teta11
        teta22]

art12 =[art11
        art22]

xe = xe-k;
if xp == 0,
    ye = ye - ky;

end
end

```

ANEXO C – PROGRAMA DA CINEMÁTICA INVERSA 3D

% Cinemática Inversa 3D feito em Matlab

```

function f = ci3final (x1, y1, z1, x2, y2, z2, k)
% revisao 28/11/04
alfa1 = 0 ;
alfa2 = 2*pi/3;
alfa3 = 4*pi/3;
L1 = 9;
L2 = 21;
H = 14*sin(pi/3)*2/3;
L = 20*sin(pi/3)*2/3;
for i = 0:k,
xp = x2-x1;
yp = y2-y1;
zp = z2-z1;
kx = xp*i/k;
ky = yp*i/k;
kz = zp*i/k;
x = x1 + kx;
y = y1 + ky;
z = z1 + kz;
v = (y^2 + z^2)^0.5;
teta = atan(y/z);
h = 20*sin(pi/3) - x ;
x11 = 20*sin(pi/3) - h - H;
if x11 >= 0
gama = acos(-(21^2-81-(x11^2+v^2))/(2*9*(x11^2+v^2)^0.5))*180/pi;
beta = atan(v/x11)*180/pi;
m11 = 180 - (beta + gama);
elseif x11 < 0
gama = acos(-(21^2-81-(x11^2+v^2))/(2*9*(x11^2+v^2)^0.5))*180/pi;
beta = atan((x11^2)^0.5/v)*180/pi;
m11 = 180 - (90 + beta + gama);
end
E2 = [(-2*cos(alfa2)*(H-L)*L1) - (2*h*L1*cos(alfa2)) - (2*(H*cos(teta) - L)*L1*(sin(alfa2))^2) +
(2*L1*sin(alfa2)*v*sin(teta))] ;
F2 = [(-2*L1*H*sin(alfa2)*sin(teta)) - (2*v*L1*cos(teta))] ;
G2 = (v^2 + h^2 + ((cos(alfa2))^2*(H-L)^2) + 2*h*(cos(alfa2))*(H - L) + (2*H*v*sin(alfa2)*sin(teta)*cos(teta)) +
((H^2)*((sin(alfa2))^2)*((sin(teta))^2)) + ((sin(alfa2))^2)*(((H*cos(teta) - L))^2) - (2*v*sin(teta)*sin(alfa2)*(H*cos(teta) - L))-
L2^2);
u22 = (-F2 - (F2^2 - G2^2 + E2^2)^0.5)/(G2 - E2);
tetam22 = 2*atan(u22);
m22 = tetam22*180/pi;
E3 = [(-2*cos(alfa3)*(H-L)*L1) - (2*h*L1*cos(alfa3)) - (2*(H*cos(teta) - L)*L1*(sin(alfa3))^2) +
(2*L1*sin(alfa3)*v*sin(teta))] ;
F3 = [(-2*L1*H*sin(alfa3)*sin(teta)) - (2*v*L1*cos(teta))] ;
G3 = (v^2 + h^2 + ((cos(alfa3))^2*(H-L)^2) + 2*h*(cos(alfa3))*(H - L) + (2*H*v*sin(alfa3)*sin(teta)*cos(teta)) +
((H^2)*((sin(alfa3))^2)*((sin(teta))^2)) + ((sin(alfa3))^2)*(((H*cos(teta) - L))^2) - (2*v*sin(teta)*sin(alfa3)*(H*cos(teta) - L))-
L2^2);
u32 = (-F3 - (F3^2 - G3^2 + E3^2)^0.5)/(G3 - E3);
tetam32 = 2*atan(u32);
m32 = tetam32*180/pi;
% Resultados
m1 = m11
m2 = m22
m3 = m32
% Reset das variaveis x, y, z por causa das iteracoes
x = x1 - kx;
y = y1 - ky;
z = z1 - kz;
end

```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Araujo, M. H. F., **Projeto de um Dispositivo para Simulador de Rigidez**, São Paulo, c 2003.
- [2] Brogårdh, T., **PKM Research - Important Issues, as seen from a Product Development Perspective at ABB Robotics**. In Proceedings of the WORKSHOP on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators October 3–4, 2002, Quebec City, Quebec, Canada, 2002, pp 68-82.
- [3] Coelho, T. A. H., Batalha, G. F., Moraes, D. T. B., Boczko, M. A **Prototype of a Contour Milling Machine Based on a Parallel Kinematic Mechanism**, Proceedings of the 32nd ISR (International Symposium on Robotics), 19-21 April 2001, Seul, Corea.
- [4] Coelho, T. A. H., **Topological Synthesis of a Parallel Wrist Mechanism**, 28th Conference of Mechanism and Robotics (ASMTECHNICAL Conference), 2004.
- [5] Craig, J. J. **Introduction to Robotics – Mechanism and Control**. Addison-Wesley, Second Edition, c 1989
- [6] Erdman, A. G.; Sandor, G. N. **Mechanism Design – Analysis and Synthesis**. Prentice Hall, vol. 01, Third Edition, c1997.
- [7] Guilin, Y.. **Kinematicas, Dynamicas, Calibration, And Configurations Optimazation Of Modular Reconfigurable Robots**. 1999. 187p. Dissertação (Doutorado) - School Of Mechanical And Production Engineering, Nanyang Technological University. 1999.
- [8] Hunt, K. H., **Structural kinematics of in-parallel-actuated robot arms**. **Journal of Mechanisms, Transmission and Automation in Design**. Transactions of the ASME, vol. 105, 1983, pp 705-712.
- [9] Merlet, J. P., **Parallel robots**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, c 2000
- [10] OTTAVIANO, E., CECCARELLI, M. **Optimum Design of Parallel Manipulators for Workspace and Singularity Performances**. Trabalho

apresntado ao workshop on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators, Quebec City, Canada, 2002.

[11] PARALEMIC – THE PARALLEL MECHANISMS INFORMATION CENTER. Apresenta recursos e atividades desenvolvidas. Disponível em <<http://www.paralemic.org>>. 2003, 2004.

[12] Souza, C. H. J., "Análise da Posição e orientação da Plataforma de Stewart tipo 3-3 em função de erros nos atuadores", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1997.

[13] Vidal Filho, W. B. Desenvolvimento de Uma Estação Robótica Para Cirurgias Minimamente Invasivas. São Paulo, c 2003.