

87  
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA E DE  
SISTEMAS MECÂNICOS

note final  
9,9 (more & more)

W. A. M.

Projeto e Implementação de um Robô Cirúrgico de  
Cadeia Cinemática Paralela.

Luís Augusto Sakata Mirandola  
Mauricio Butkeraitis  
Raphael Alexandre de Souza

São Paulo  
2005

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA E DE  
SISTEMAS MECÂNICOS**

**Projeto e Implementação de um Robô Cirúrgico de  
Cadeia Cinemática Paralela.**

**Trabalho de formatura apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para Obtenção do Título de Graduação em  
Engenharia Mecatrônica.**

**Luís Augusto Sakata Mirandola  
Mauricio Butkeraitis  
Raphael Alexandre de Souza**

**Orientadores:  
Lucas Antônio Moscato  
Tarcísio Antônio Hess Coelho**

**Área de Concentração:  
Engenharia Mecatrônica**

**São Paulo  
2005**

*Às nossas famílias.*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos nossos orientadores, Prof. Dr. Lucas Antônio Moscato e Prof. Dr. Tarcísio Antônio Hess Coelho, pela confiança, incentivo e orientação neste trabalho.

Ao Dr. Marcos Corsato, pelas valiosas informações sobre cirurgias ortopédicas e a Dra. Maria Elisa Rostelato pelos esclarecimentos sobre procedimentos cirúrgicos invasivos.

Ao colega Rodrigo Guerato Siqueira, pelo auxílio técnico em eletrônica.

Ao Sr. Nilson Noris Francischetti pelo auxílio na confecção dos circuitos.

Aos técnicos da oficina do departamento de engenharia mecânica, pelas valiosas contribuições.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução deste trabalho.

## **Luís Augusto Sakata Mirandola**

Agradeço aos meus pais, Regina e Ademir, pelo amor incondicional, pela paciência e compreensão e por todas as oportunidades que eles me proporcionaram.

A minha família pelo apoio incondicional.

A Amanda Carla Minella, por seu companheirismo e paciência.

Aos meus amigos, por terem se tornado minha segunda família.

Aos meus colegas, pelo auxílio durante essa árdua fase chamada graduação.

## **Maurício Butkeraitis**

Agradeço aos meus pais, Hugo e Deise, as minhas irmãs Renata e Paula e aos meus avós, pelo grande apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida.

A Natasha Louzada Kozlovsky, pela compreensão, paciência e colaboração.

Aos meus amigos, pela amizade e companheirismo.

## **Raphael Alexandre de Souza**

Agradeço aos meus pais, Romeu e Cilene, pelo apoio, amor, incentivo e pela educação que me proporcionaram.

Aos meus irmãos, Ellen e Daniel, por todo o carinho e companheirismo.

A minha avó, Áurea, por todo amor e carinho.

Ao meu cunhado, Flávio, por todo incentivo e por todas as risadas.

A minha sobrinha, Mariana, por deixar a casa sempre alegre.

A minha noiva, Nathalie Baharlia, pelo amor, incentivo, paciência e companheirismo.

A todos os meus familiares que me apoiaram.

A todos meus amigos, que foram peças fundamentais para esta conquista e que me apoiaram por toda jornada acadêmica.

Projeto e Implementação de um Robô Cirúrgico de  
Cadeia Cinemática Paralela.

Luís Augusto Sakata Mirandola  
Mauricio Butkeraitis  
Raphael Alexandre de Souza

**RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo a construção de um robô de cadeia cinemática paralela para uso cirúrgico. As escolhas descritas neste projeto foram baseadas em análises mecânicas, elétricas, eletrônicas e de controle. Inicialmente desenvolveu-se uma análise das forças e movimentos desejados para o robô, tomando-se como referência os critérios de Gruebler-Kutzbach e de mobilidade do sistema, definindo-se assim sua configuração geométrica além das características dos atuadores a serem empregados. Como seqüência ao projeto, placas eletrônicas foram projetadas e construídas de forma a permitir o acionamento e controle dos atuadores, através da medição e comparação do sinal fornecido pelos sensores internos dos sistemas de movimentação. Testes de rigidez e de movimentação foram realizados para comprovar a funcionalidade da configuração cinemática escolhida.



Projeto e Implementação de um Robô Cirúrgico de  
Cadeia Cinemática Paralela.

Luís Augusto Sakata Mirandola  
Maurício Butkeraitis  
Raphael Alexandre de Souza

**ABSTRACT**

The present work aims the construction of a parallel-kinematics robot for surgical application. The choices made in this project were based upon mechanical, electrical, electronic and control analysis. Initially, the forces and desired movements were analysed, taking as reference the Gruebler-Kutzbach and the system mobility criteria, defining its geometrical and topological configuration and the characteristics of the employed actuators. As a sequence, the electronic boards were designed and built as to drive and allow the control over the actuators through the comparison with a signal supplied by an internal movement sensor. Stiffness and movement tests were carried out to prove the functionality of the kinematics configuration that was chosen.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. Histórico .....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Motivação .....	4
1.4. Cirurgias ortopédicas.....	4
1.5. Revisão bibliográfica .....	9
<b>2. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO E PROTÓTIPO</b> .....	11
2.1. Síntese do mecanismo .....	14
2.2. Análise cinemática inversa .....	16
2.3. Análise cinemática direta.....	17
2.4. Desenvolvimento do Protótipo.....	18
2.4.1 Estrutura Mecânica.....	18
2.4.1.1 Atuadores .....	18
2.4.1.2. Base e Mesa.....	21
2.4.1.3. Juntas .....	21
2.4.1.3.1. Juntas Esféricas .....	21
2.4.1.3.2. Juntas Universais .....	22
2.4.1.3.3. Juntas Rotativas .....	23
2.4.1.4. Conexões .....	23
2.4.2. Estrutura Elétrica e Eletrônica .....	24
2.4.2.1. Divisor de Tensão e Gerador PWM.....	25
2.4.2.2. Circuito de Potência .....	26
2.4.2.3. Configuração final da placa de acionamento.....	26
2.4.3. Configuração Final do Protótipo .....	27
2.4.4. Montagem final .....	29
<b>3. SIMULAÇÕES</b> .....	33
<b>4. RESULTADOS</b> .....	35
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	37
<b>6. BIBLIOGRAFIA</b> .....	38

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Plataforma de teste de pneus de Gough.....	1
Figura 2: Plataforma simuladora de aeronaves de Chappel.....	2
Figura 3: Procedimentos cirúrgicos básicos. (a) Perfuração. (b) Introdução de um parafuso. (c) Aplicação de uma placa. (d) Corte com um osteotomo. (e) Corte com uma serra elétrica. (f) Dando-se forma ao osso com um cinzel. (g) Dando-se forma ao osso com uma goiva. (h) O ato de mandrilar.....	7
Figura 4: Três maneiras de fixação óssea: (a) Com um parafuso único - este é um parafuso defasado (rosqueado apenas em sua parte distal), adquirindo-se, deste modo, compressão interfragmentar; (b) placa e parafusos - o modo mais comum de fixação de urna fratura diafisária; (c) metálico intramedular. ....	7
Figura 5: Primeira maquete experimental.....	11
Figura 6: Terceiro protótipo.....	12
Figura 7: Detalhes construtivos do terceiro protótipo.....	13
Figura 8: Modelo.....	13
Figura 9: Modelagem do atuador.....	14
Figura 10: Modelagem do atuador.....	15
Figura 11: (a) foto Eletrack 1 sem potenciômetro. (b) foto Eletrack 1 com potenciômetro. (c) Desenho esquemático do atuador Eletrack 1.....	19
Figura 12: Dimensões dos atuadores.....	20
Figura 13: Gráficos de força, velocidade e corrente.....	20
Figura 14: Projeto mecânico da mesa (b) e da base (a) respectivamente.....	21
Figura 15: Conexão.....	23
Figura 16: Diagrama de bloco do subsistema elétrico.....	24
Figura 17: Esquema elétrico do divisor de tensão e do gerador PWM.....	25
Figura 18: Esquema elétrico do circuito de potência.....	26
Figura 19: Foto do circuito de acionamento.....	27
Figura 20: Robô Conceito.....	27
Figura 21: Robô Conceito: (a) vista superior e (b) vista frontal.....	28
Figura 22: Desenho Conceito: detalhe das junta esféricas (a), rotativas (b) e universais (c).....	29
Figura 23: Foto do protótipo (vista frontal).....	30
Figura 24: Foto do protótipo (vista lateral).....	30
Figura 25: Foto do protótipo (vista superior).....	31
Figura 26: Foto do protótipo (junta rotativa).....	31
Figura 27: Foto do protótipo (junta esférica).....	32
Figura 28: Foto do protótipo (junta univereal).....	32
Figura 29: Gráfico simulação do volume de trabalho (translação: $\theta=0$ e $\alpha=0$ ). ....	33
Figura 30: Gráfico simulação do volume de trabalho (translação: $\theta=15$ e $\alpha=0$ ). ....	33
Figura 31: Gráfico simulação do volume de trabalho (translação: $\theta=0$ e $\alpha=15$ ). ....	34
Figura 32: Gráfico simulação do volume de trabalho (translação: $\theta=15$ e $\alpha=15$ ). ....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Característica elétricas dos atuadores.....	20
Tabela 2: Características das juntas esféricas Imetex.....	22
Tabela 3: Características das juntas universais Imetex.....	22
Tabela 4: Características das juntas rotativas. ....	23

## **ANEXOS**

**Anexo A: Código Fonte Simulação**

**Anexo B: Desenho de Fabricação Plataforma Inferior**

**Anexo C: Desenho de Fabricação Ligamento Inferior**

**Anexo D: Desenho de Fabricação Ligamento Superior**

**Anexo E: Desenho de Fabricação Junção Superior**

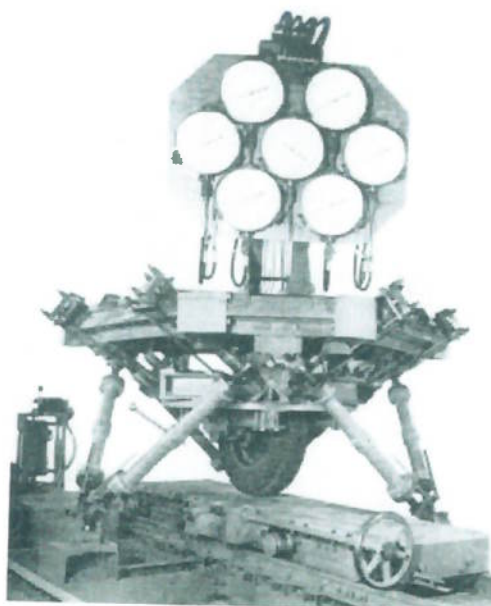
**Anexo F: Desenho de Fabricação Plataforma Superior**

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1.Histórico

Os robôs de arquitetura paralela surgiram para a simulação de ambientes móveis na forma de plataformas, inicialmente para o entretenimento (em cinemas) e então para o treinamento de profissionais da área aeronáutica. Na verdade, o primeiro robô chamado "industrial" (patenteado em 1942 por Willard L.G. Pollard Jr.) era paralelo. Ele tinha cinco graus de liberdade e foi desenhado para controlar pistolas de tinta para automóveis.

Pouco tempo depois, em meados da década de 1950, surgiu o primeiro hexapod octaédrico, um robô paralelo com seis graus de liberdade, utilizado para testes de pneus sob a ação de diversos tipos de carregamento. A plataforma de Gough, como foi batizado esse sistema devido ao seu inventor, foi baseada em plataformas anteriores chamadas de MAST (Multi-Axis Shake Table), que são fabricadas até hoje.

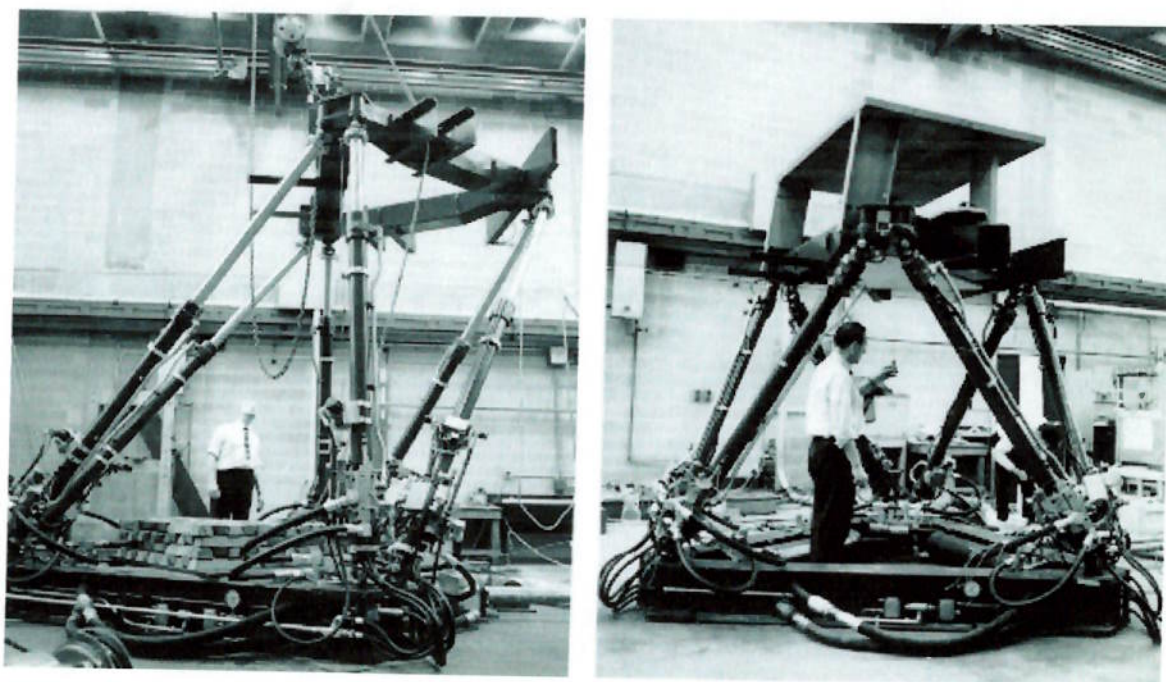


**Figura 1: Plataforma de teste de pneus de Gough.**

Em 1962, Klaus Cappel, inventou e patenteou um hexapod octaédrico muito semelhante ao de Gough, mas para a simulação de aeronaves. Em 1965,

Stewart publicou na revista britânica IMechE um artigo propondo uma outra plataforma de seis graus de liberdade (a renomada plataforma de Stewart), que levantou uma grande discussão sobre os possíveis usos sobre esse tipo de plataforma.

Atualmente, devido às suas características peculiares, os robôs de arquitetura paralela são muito utilizados em máquinas-ferramenta, simuladores de movimentos e plataformas e posicionamento de espelhos e lentes de telescópios, além de estar começando a adentrar o ambiente médico.



**Figura 2: Plataforma simuladora de aeronaves de Chappel**

## **1.2. Objetivos**

O presente trabalho visa o desenvolvimento de um robô cirúrgico de cadeia cinemática paralela tetrapode, que seja capaz de posicionar uma ferramenta que será utilizada em uma operação.

Estes movimentos são realizados por atuadores lineares, os quais em conjunto permitem que a ferramenta seja posicionada e movimentada corretamente.

Uma grande dificuldade na construção de arquiteturas paralelas é evitar pontos de singularidade. Com o objetivo de evitá-las, será utilizada como referência um método descrito em COELHO (N/P).

Outro objetivo buscado com este trabalho é o de conseguir seguir uma metodologia de trabalho, e quando necessário tomar decisões contrárias a ela para obter um resultado ainda melhor.

Além disso tudo, é importante ressaltar que este trabalho não visa apenas o ramo da engenharia, mas o da medicina também, tornando-se necessária então pesquisas sobre o assunto e visitas técnicas a hospitais além de entrevistas com médicos.

A opção pela utilização de um sistema de cadeia fechada está diretamente ligada a suas vantagens:

- melhor estabilidade e precisão;
- baixa relação peso/potência;
- capacidade de manipular cargas relativamente altas;
- altas velocidades e acelerações;
- alta rigidez;
- utilização de atuadores de baixa potência.

Com relação às desvantagens, podemos citar:

- volume de trabalho reduzido;
- complexibilidade no controle;
- singularidades de posição.

Devido a não existência de cadeia seqüenciais abertas nos sistemas paralelos, não há a propagação de erros de posicionamento, gerando uma maior precisão do robô.

A escolha por um sistema tetrapode está relacionada com a quantidade de graus de liberdade que necessitaremos para posicionar de forma correta a ferramenta. Mais à frente, será discutida a relação entre os graus de liberdade e a configuração do robô.



### **1.3. Motivação**

Nos últimos anos, o uso de robôs e sistemas eletrônicos em cirurgias médicas tem-se intensificado com o intuito de torná-las menos invasivas e mais precisas e, com isso, diminuir o tempo de recuperação do paciente e contribuir para um pós-operatório mais rápido. Essa melhoria na qualidade de vida do paciente reflete em economia tanto direta, gerada pela redução nos custos de pós-operatório quanto futura, gerada pela não necessidade de intervenções posteriores para correção de possíveis imprecisões cometidos na cirurgia.

Essa questão da economia futura é de suma importância principalmente quando estamos falando do sistema público de saúde. Podemos descrever o exemplo citado pela doutora Maria Elisa Rostelato, do IPEN: "No caso de uma prostectomia o custo médio de uma cirurgia é de R\$5.000,00 enquanto o custo de uma braquiterapia é de R\$10.000,00. Embora a prostectomia tenha um menor custo aparente, a mesma incorre na necessidade de outras cirurgias futuras para correção dos efeitos colaterais gerados por este tipo de cirurgia, fazendo com que o custo futuro supere o valor de uma braquiterapia, procedimento que não oferece efeitos colaterais de mesma magnitude".

Foram analisadas diversas possibilidades de implementação de robôs capazes de auxiliar o médico em procedimentos cirúrgicos, chegando-se à conclusão de que uma boa alternativa para realizar tal função era a criação de um robô de estrutura paralela de quatro pernas, uma vez que ele apresenta boa resistência, alta precisão e quatro graus de liberdade. É importante salientar que o intuito da criação deste tipo de robô não é o de substituir o médico, mas sim auxiliá-lo no procedimento, tornando seu trabalho mais ágil, seguro e preciso.

Acreditamos que o desenvolvimento de tecnologia nacional na área de equipamentos para uso médico é de grande importância para que possamos tornar possível o acesso de toda a população a este tipo de recurso.

### **1.4. Cirurgias ortopédicas**

Nos últimos anos, novas tecnologias mudaram o conceito das cirurgias ortopédicas. Cada vez mais, a comunidade médica se preocupa em oferecer o

máximo de tranquilidade e segurança aos pacientes que enfrentam a necessidade cirúrgica.

A segurança está relacionada principalmente ao modo pelo qual a cirurgia é realizada. Antes mesmo de iniciar a cirurgia propriamente dita, ela é analisada e alguns procedimentos são adotados. Chamamos esta fase de preparação.

A preparação é composta pelas seguintes etapas: planejamento, esterilização, controle radiológico e equipamento.

- **PLANEJAMENTO** - As cirurgias dos ossos devem ser cuidadosamente planejadas com antecedência, efetuando-se medidas acuradas e comparação entre os ossos de um membro, quanto a sua simetria, com os do membro oposto.
- **ESTERILIZAÇÃO** - A necessidade de esterilização na cirurgia óssea é ainda maior que na cirurgia de tecidos moles; a infecção de qualquer ferimento representa um retrocesso, mas uma infecção óssea pode ser desastrosa.
- **CONTROLE RADIOLÓGICO** - Procedimentos que envolvam o realinhamento de ossos e articulações ou a instalação acurada de pinos e fios metálicos devem sempre ser checados por meio de radiografias intra-operatórias preferencialmente a fluoroscopia e a identificação de imagem.
- **EQUIPAMENTO** - As cirurgias ósseas necessitam de instrumentos especiais, sendo indispensáveis brocas (para a perfuração de cavidades), osteotomos (para o corte de porções ósseas inutilizadas), serras (para o corte de osso cortical), cisalhas (para dar forma aos ossos), goivas (para a remoção de tecido ósseo) e lâminas, parafusos e chaves de fenda (para a fixação de ossos).

Após esta fase preliminar, iniciam-se os procedimentos básicos de uma cirurgia ortopédica. Estes procedimentos dividem-se em: perfuração, corte, modelagem, mandrilagem e fixação.

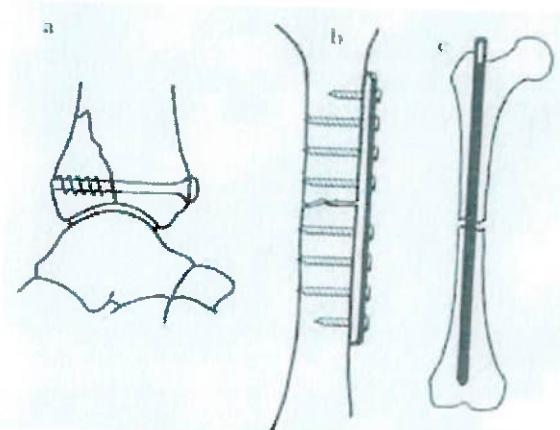
- **PERFURAÇÃO** - A perfuração pode ser necessária, simplesmente, para a retirada de um abscesso ósseo, ou então, uma série de cavidades pode facilitar o corte através do córtex, por meio de um osteotomo. Entretanto, a

broca é utilizada com maior freqüência para a preparação de furos estabelecidos para parafusos.

- **CORTE** - Partes de osso esponjoso podem ser cortadas por meio de um osteotomo; a margem afilada fende a porção mole do osso, mas fragmenta o osso cortical. O eixo tubular, portanto, tem de ser atenuado através da perfuração de uma série de cavidades, antes que se possa aplicar o osteotomo. Uma serra elétrica é menos arriscada e mais acurada.
- **MODELAGEM** - A superfície óssea pode ser moldada com um cinzel, superfícies côncavas são mais bem trabalhadas com o auxílio de uma goiva.
- **MANDRILAÇÃO** - Mandrilar significa (literalmente) dilatar. Um encaixe articular ou a cavidade medular de um osso longo podem necessitar de uma dilatação, antes que uma prótese ou um fio metálico de tamanho apropriado seja aceito.
- **FIXAÇÃO** - Fragmentos ósseos podem ser unidos por meio do simples ato de serrar (especialmente se um pedaço pequeno deve ser fixado de volta à sua posição), ligando-se uma lâmina de união ao osso através de uma fileira de parafusos, passando-se um fio metálico longo para baixo do canal medular, transfixando-se os fragmentos com pinos ou fios, grampeando-se os pedaços uns aos outros (somente nas porções moles dos ossos), prendendo-se os pedaços com um fio maleável ou combinando-se estes métodos. Eventualmente, todos estes se desatarão ou se romperão, a menos que a união natural ocorra.



**Figura 3: Procedimentos cirúrgicos básicos. (a) Perfuração. (b) Introdução de um parafuso. (c) Aplicação de uma placa. (d) Corte com um osteotomo. (e) Corte com uma serra elétrica. (f) Dando-se forma ao osso com um cinzel. (g) Dando-se forma ao osso com uma goiva. (h) O ato de mandrilar.**



**Figura 4: Três maneiras de fixação óssea: (a) Com um parafuso único - este é um parafuso defasado (rosqueado apenas em sua parte distal), adquirindo-se, deste modo, compressão interfragmentar; (b) placa e parafusos - o modo mais comum de fixação de uma fratura diafisária; (c) metálico intramedular.**

Um exemplo comum de cirurgia óssea é a osteotomia. Ela pode ser empregada para corrigir deformidades ou para aliviar a dor da artrite. Para a sua realização é essencial um planejamento pré-operatório, com medidas precisas do paciente e radiografias. Deve-se determinar:

- o local exato da divisão óssea;
- a quantidade de correção referida;
- o método de correção.

Alguns cuidados devem ser tomados também com os materiais que serão implantados nos pacientes. Estes implantes podem ocorrer em qualquer etapa da cirurgia, mas ocorrem com mais frequência na fixação.

Exemplos de materiais implantados são: metais, compostos de silicone e cerâmica.

- **Metal**

O metal utilizado em implantes deve ser duro, forte, não corrosível, biologicamente inerte e facilmente esterilizável. Os mais comumente usados são aço inoxidável, ligas de cobalto e cromo e ligas de titânio.

Nenhum dos materiais é ideal para todos os propósitos. O aço inoxidável, em virtude de sua relativa plasticidade, pode ser trabalhado a frio e com isto consegue-se manufaturar tais implantes com maior facilidade, assim como endurecer e reforçar o material. Além disso, a sua plasticidade tênsil torna possível curvar-se placas de aço inoxidável até os formatos requeridos, durante a cirurgia sem comprometer seriamente a sua força.

Ligas baseadas em cobalto devem ser cilíndricas ou forjadas. Os implantes são assim, difíceis de se manufaturar, porém são mais fortes, mais rígidos e menos propensos a corrosão que o aço.

Ligas de titânio podem ser trabalhadas e moldadas de modo semelhante ao aço, sendo resistente à corrosão; contudo, nos casos de prótese de metal com metal, estão mais sujeitas à aderência com o uso, bem como a formação de resíduos.

- **Compostos de Silicone.**

Existe uma grande variedade de polímeros de silicone, dos quais a borracha de silicone (Silastic) é particularmente útil. Este composto é firme, duro, flexível e inerte, sendo empregado na produção de dobradiças para a substituição de dedos e de articulações digitais, e também na fabricação de próteses para a

substituição de ossos ressecados. O Silastic funciona bem, porém pode sofrer fratura, caso a superfície do implante tenha sido retalhada ou torcida por um instrumento cortante ou por um pedaço de osso.

- **Cerâmica**

Materiais baseados em cerâmicas estão sendo empregados, tanto isoladamente quanto associados a metais, em próteses para substituições articulares. São duros e fortes, sendo que os implantes de cerâmica porosa podem servir de meio de fixação, permitindo, assim, o crescimento ósseo; contudo, são também quebradiços, não tendo encontrado larga aceitação.

Hoje ganham evidência as cirurgias minimamente invasivas, que abordam mais seletivamente as regiões acometidas pela doença, sem interferir nas regiões sãs. Na aplicação cirúrgica, um computador acompanha a interação de instrumentos e implantes manipulados pelo cirurgião com a parte do corpo do paciente que é operada. O monitor nos mostra imagens virtuais em dois ou mais planos com a apresentação de médias de distâncias e ângulos. As imagens e medidas facilitam a cirurgia e garantem a precisão dos movimentos médicos. Apenas os tecidos afetados sofrem incisões.

Atualmente, algumas cirurgias já podem ser realizadas sem a exposição ao ambiente das estruturas envolvidas, permitindo que a região seja poupada e permaneça intacta. Como consequência, reduz-se o grau de agressividade da cirurgia. É neste ponto que técnicas minimamente invasivas e cirurgia por navegação convergem, determinando grande avanço para a cirurgia ortopédica. Os benefícios ao paciente são a recuperação mais rápida, internação mais curta, redução de riscos de infecção e maior durabilidade de implantes.

### **1.5. Revisão bibliográfica**

A sistemática que será seguida é a proposta por VIDAL FILHO (2003), dividindo-se conceito do sistema robótico completo em subsistemas elétricos e mecânicos e cada um desses em outros subsistemas mais específicos (p. ex.: sistema estrutural, sistema de atuação, sistema de controle, sistema de potência, etc...) e projetando-se cada um deles quase independentemente, apenas

passando-se variáveis de projeto entre cada subsistema. Além disso, a topologia dos mecanismos das possíveis soluções será obtida seguindo os passos descritos por COELHO (N/P) para a geração de mecanismos de arquiteturas paralelas baseada nos graus de liberdade e mobilidade necessários.

Algumas bibliografias (BOUAZZA-MAROUF et al. (1996), RODRIGUES e SCHOLTZ (2001), RODRIGUES (2005), CRIGOS, entre outras) são de grande importância para que se possa penetrar no mundo médico-cirúrgico e de aparelhos mecatrônicos em ambientes médicos, obter requisitos e restrições e observar o que já existe feito e consolidado. Outras bibliografias (como TARTARI FILHO e MARCHIORI (2003), BRANCHINI (2004) e Parallemic, por exemplo) são importantes principalmente para um primeiro contato com robôs de arquitetura paralela e para a observação de seu estado da arte, além da fixação de novos conceitos. Finalmente, é importante observar o que o mercado atual oferece, com quais restrições e operacionalidades e sob quais custos em termos de arquiteturas paralelas (M-850 HEXAPOD, MicroDex Robot).

Com essa bibliografia, pôde-se fazer o levantamento preliminar dos requisitos do projeto começar a fazer esboços bastante primitivos de soluções (figura 4.1a e 4.1b). Algumas soluções já começaram a ser caracterizadas e discutidas, mas um amadurecimento melhor de idéias ainda é necessário.

## 2. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO E PROTÓTIPO

A idéia inicial de desenvolvimento do tetrapode visava o projeto e a construção integral do robô, desde sua arquitetura até o projeto dos atuadores.

Um estudo mais detalhado das características dos atuadores necessários fez com que esta parte do projeto fosse substituída devido à sua complexidade e ao prazo para execução do projeto. Optou-se, então pela compra de atuadores lineares, o que gerou a necessidade de definição dos parâmetros mínimos para aquisição dos equipamentos disponíveis no mercado.

As características dos atuadores que serão utilizados neste projeto serão apresentadas em um tópico mais à frente, assim como os fatores que levaram à sua escolha.

Algumas maquetes foram feitas com o intuito de se observar o funcionamento do mecanismo e as possíveis singularidades do mesmo.

A primeira tentativa de geração da maquete pode ser vista nas fotos abaixo:



**Figura 5: Primeira maquete experimental**

Como pode ser visto, a maquete foi construída com a base e a plataforma móvel de madeira, antenas foram utilizadas como atuadores lineares e borrachas como juntas esféricas e universais. O protótipo apresentou-se completamente instável.

Após realização de um melhor estudo e de cálculos relativos à mobilidade do sistema, verificou-se que a instabilidade do primeiro protótipo estava diretamente ligada à escolha dos tipos das juntas.

Um segundo protótipo foi construído, seguindo os parâmetros obtidos pela análise de mobilidade. Desta vez, foram utilizadas quatro juntas esféricas na



plataforma móvel. No entanto, o sistema se mostrou muito frágil e instável, uma vez que estavam sendo utilizadas antenas como atuadores e borrachas como juntas esféricas, e, portanto, foi necessária a criação de uma nova maquete.

Nesta nova construção, as antenas foram substituídas por peças mais rígidas, feitas com tubos e hastes roscadas. As juntas inferiores foram substituídas por duas juntas rotativas e duas juntas universais (eixos-cardã de um automodelo).

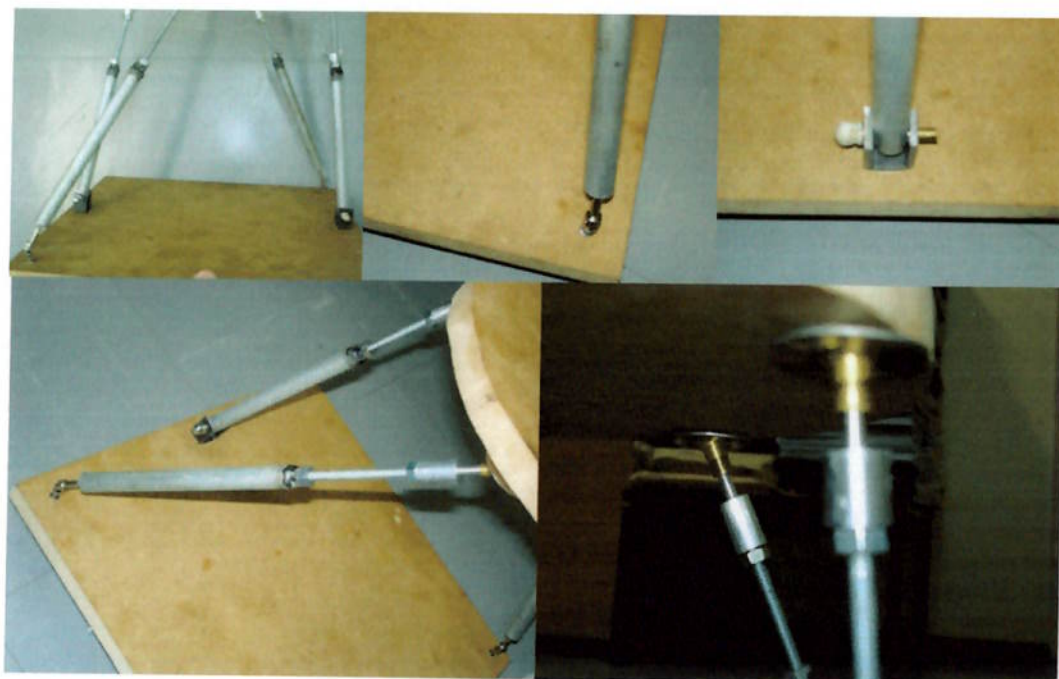
Esse modelo apresentou boa estabilidade e rigidez, salvo pequenas movimentações indesejadas geradas por pequenas folgas nas juntas.



**Figura 6: Terceiro protótipo**

Esse último protótipo possibilitou a descoberta de diversas características que seriam impossíveis de serem verificadas apenas com cálculos teóricos. Um exemplo é o fato de que para que haja estabilidade, os atuadores ligados às juntas universais devem estar em planos cruzados e os atuadores ligados às juntas rotativas devem estar em planos paralelos. Desse modo, evita-se que os atuadores formem ângulos próximos a  $90^\circ$  com a base, o que geraria uma instabilidade no atuador. Outro exemplo é o fato de que as juntas universais devem estar posicionadas de forma a não facilitar a movimentação no eixo y, ou seja, o eixo de deslocamento das juntas rotativas.

As fotos abaixo dos detalhes do robô ilustram de forma mais sólida os exemplos citados acima:



**Figura 7: Detalhes construtivos do terceiro protótipo**

Com base nestes protótipos, foram realizados estudos e a criação de um modelo feito em CAD para representar uma possível configuração final do mecanismo de placas paralelas.

As figuras abaixo mostram uma idéia da arquitetura do robô:



**Figura 8: Modelo**

A figura, também feita em CAD, é uma representação do atuador a ser utilizado:



Figura 9: Modelagem do atuador

## 2.1. Síntese do mecanismo

Para que se possa aplicar o método da enumeração das cadeias ativas descrito em COELHO (N/P), deve-se primeiro ter o número de graus de liberdade do mecanismo que se deseja projetar ( $N$ ) e o número de graus de liberdade que o espaço em que esse mecanismo vai atuar permite ( $\lambda$ ). Com isso, pode-se definir a *conectividade total* do mecanismo, que é soma dos graus de liberdade de cada mecanismo atuador individualmente, através da seguinte equação:

$$C_t = (\lambda + 1) \cdot N - \lambda \quad (6.1)$$

Para os nossos requisitos, o mecanismo deve ter 4 graus de liberdade (duas translações –  $x$  e  $z$  – e duas rotações – em torno de  $x$  e  $y$ ) e mover-se no espaço tridimensional (portanto, com 6 graus de liberdade possíveis). Desse modo, a conectividade total desse sistema deve ser 22.

A arquitetura inicialmente proposta é composta por duas plataformas (uma fixa, chamada de base, e outra móvel) ligadas apenas pelos mecanismos atuadores. Como se deseja utilizar apenas quatro deles, é imediato que eles não poderão ser todos iguais. Dividindo-se então em pares de mecanismos iguais e considerando que cada um deles não pode ter mais de seis graus de liberdade não redundantes, conclui-se que é possível utilizar dois mecanismos atuadores com cinco graus de liberdade e dois com seis.

Para se obter a topologia de cada mecanismo atuador será utilizado o critério de Gruebler-Kutzbach descrito abaixo. Ele permite calcular o número de graus de liberdade ( $F$ ) de um mecanismo qualquer baseado apenas no seu número de partes e no número ( $j$ ) e tipo de ligações ( $f_i$ ) entre essas partes.

$$F = \lambda \cdot (n - 1 - j) + \sum_{i=1}^j f_i \quad (6.2)$$

Os mecanismos atuadores dos hexapods existentes, baseados na plataforma de Gough e na plataforma de Stewart, são todos do tipo UPS (uma junta universal, um atuador prismático e uma junta esférica), tendo, portanto, seis graus de liberdade e sendo apropriados para este projeto.

O outro tipo de mecanismo atuador deve ter um grau de liberdade a menos. Com isso em mente e considerando os tipos e características das juntas existentes e os movimentos desejados, chegou-se à conclusão de que o outro par de mecanismos atuadores deve ser do tipo RPS (uma junta rotativa, um atuador prismático e uma junta esférica). Aplicando-se o critério de Gruebler-Kutzbach, confirma-se que eles terão cinco graus de liberdade.

Desse modo, a topologia completa do mecanismo será:

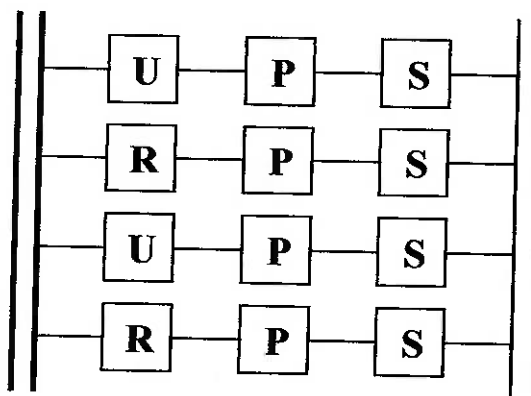


Figura 10: Modelagem do atuador

De modo que o critério da conectividade total é satisfeito. Finalmente, aplicando-se o critério de Gruebler-Kutzbach para o mecanismo completo, obtém-se:

$$F_t = \lambda \cdot (n - 1 - j) + \sum_{i=1}^j f_i = 6 \cdot (10 - 1 - 12) + [2 \cdot (2 + 1 + 3) + 2 \cdot (1 + 1 + 3)] = -18 + 22 = 4.$$

Esse resultado confirma que a topologia obtida para esse mecanismo deve satisfazer os requisitos.

## 2.2. Análise cinemática inversa

Uma vez que os graus de liberdade do sistema e a posição dos atuadores foram definidos, a análise cinemática inversa é bastante simples. Sejam:

- $a$  o raio da plataforma móvel,
- $b$  metade do comprimento do lado da base,
- $h$  a distância vertical da plataforma móvel até a base,
- $x$  o deslocamento no eixo  $x$  da plataforma móvel,
- $\alpha$  o ângulo de inclinação da plataforma móvel em relação ao eixo  $x$ ,
- $\theta$  o ângulo de inclinação da plataforma móvel em relação ao eixo  $y$  e
- $L_1, L_2, L_3$  e  $L_4$  os comprimentos totais dos atuadores 1, 2, 3 e 4 respectivamente.

Colocando-se um sistema de coordenadas  $S_1$  fixo na base e um sistema de coordenadas  $S_2$  solidário à plataforma móvel, pode-se descrever o ponto de fixação dos atuadores na base da seguinte forma:

$$A_1 = (a, 0, 0)_{S_1}, \quad A_2 = \left( a \frac{\sqrt{2}}{2}, a \frac{\sqrt{2}}{2}, 0 \right)_{S_1}, \quad A_3 = (-a, 0, 0)_{S_1} \text{ e } A_4 = \left( -a \frac{\sqrt{2}}{2}, -a \frac{\sqrt{2}}{2}, 0 \right)_{S_1}.$$

Além disso, a fixação dos atuadores na plataforma móvel é dada pelas seguintes coordenadas:

$$B_1 = (b, 0, 0)_{S_2}, \quad B_2 = (0, b, 0)_{S_2}, \quad B_3 = (-b, 0, 0)_{S_2} \text{ e } B_4 = (0, -b, 0)_{S_2}.$$

Com isso, basta calcular, para cada atuador  $i$ , a norma do vetor  $(A_i - B_i)_{S_1}$ . Note que, como os pontos  $A_i$  e  $B_i$  não estão inicialmente referenciados no mesmo sistema de coordenadas, é necessário que se construa uma matriz de transformação de homogênea  $H_1^2$ . Essa matriz é da forma  $H_1^2 = \begin{bmatrix} R_1^2 & T_1^2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ , onde  $R_1^2$  denota a rotação do sistema 1 para o sistema 2 e  $T_1^2$  denota a translação entre os sistemas. Conhecidos os ângulos  $\alpha$  e  $\theta$  (descritos previamente) e considerando que não há rotação em torno do eixo  $z$ , a matriz de rotação assume a seguinte forma:

$$R_1^2 = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ s\theta c\alpha & c\alpha & -c\theta s\alpha \\ -s\theta c\alpha & s\alpha & c\theta c\alpha \end{bmatrix}.$$

Além disso, a translação de um sistema para o outro, considerando que não há movimentação na direção y, é dada por:

$$T_1^2 = \begin{bmatrix} x \\ 0 \\ h \end{bmatrix}.$$

A matriz de transformação homogênea será então a seguinte:

$$H_1^2 = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta & x \\ s\theta c\alpha & c\alpha & -c\theta s\alpha & 0 \\ -s\theta c\alpha & s\alpha & c\theta c\alpha & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Portanto, o comprimento L dos atuadores pode ser dado matricialmente por:

$$\{L\} = \|A_{S1} - H_1^2 B_{S2}\|.$$

### 2.3. Análise cinemática direta

A análise cinemática direta, por ter se mostrado muito complexa devido aos atuadores 1 e 3 formarem retas reversas, não será realizada, sendo substituída por simulações com a modelagem da cinemática inversa para que se procure possíveis pontos de singularidade ou instabilidade.

## **2.4. Desenvolvimento do Protótipo**

Nos próximos itens serão descritos os componentes utilizados para a criação do protótipo do robô tetrapode.

No item 9.1.1 serão apresentados dois modelos de atuadores lineares: o Eletrack 1 com potenciômetro com curso de 6 polegadas e o Eletrack 1 sem potenciômetro com curso de 2 polegadas.

A descrição dos dois modelos de atuadores se deve ao seguinte: optou-se inicialmente pela aquisição de 4 unidades dos atuadores com potenciômetro, porém o distribuidor deste equipamento no Brasil não conseguiu entregar o material no prazo estipulado, devido a problemas alfandegários. A solução para o problema foi a substituição do material solicitado por atuadores Eletrack 1 sem potenciômetro, já que este modelo estava disponível para pronta entrega.

A substituição dos atuadores gerou alterações no projeto dos demais componentes do protótipo, devido à redução dimensional dos atuadores, além de gerar a necessidade de acoplamento de um substituto para o potenciômetro interno.

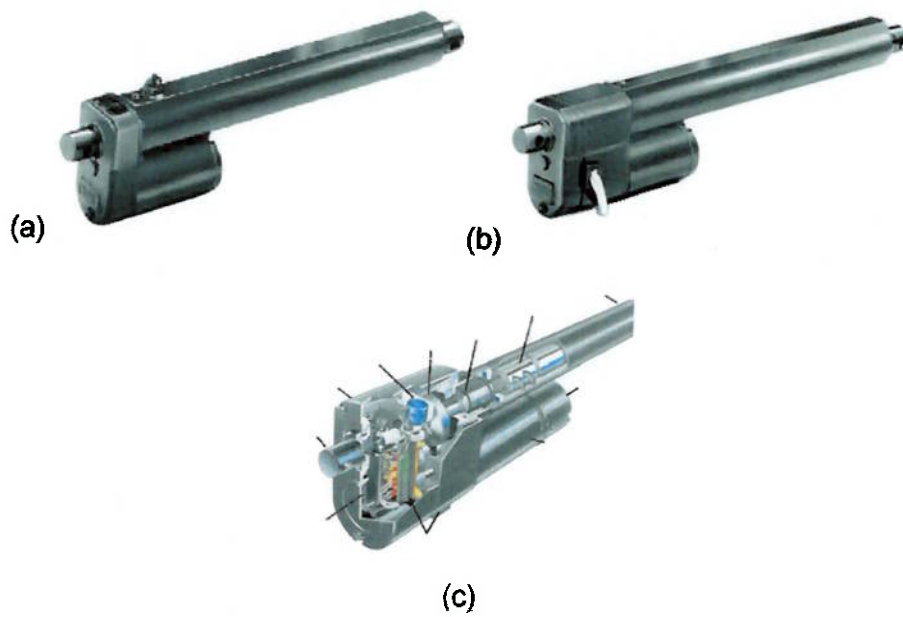
É importante salientar que todo o desenvolvimento do protótipo e de suas peças estão baseadas nas dimensões do Eletrack 1 sem potenciômetro.

### **2.4.1 Estrutura Mecânica**

Nos itens a seguir serão apresentados os componentes que foram adquiridos já fabricados.

#### **2.4.1.1 Atuadores**

Após cuidadosa análise de requisitos, pesquisas de mercado e de viabilidade financeira, optou-se pela utilização de atuadores lineares modelo Eletrack 1 com potenciômetro.



**Figura 11: (a) foto Eletrack 1 sem potenciômetro. (b) foto Eletrack 1 com potenciômetro. (c) Desenho esquemático do atuador Eletrack 1.**

Embora a movimentação deste atuador não ofereça grande precisão, o potenciômetro permitiria a montagem de um sistema de controle realimentado que aumentaria consideravelmente sua precisão, atendendo as necessidades deste projeto.

A figura 11.2 abaixo apresenta as características geométricas deste atuador, assim como a tabela 11.1 apresenta suas características elétricas.

Pode-se verificar também as dimensões do Eletrack 1 sem potenciômetro, que serão utilizados na montagem do protótipo, pelos motivos já explicados anteriormente.



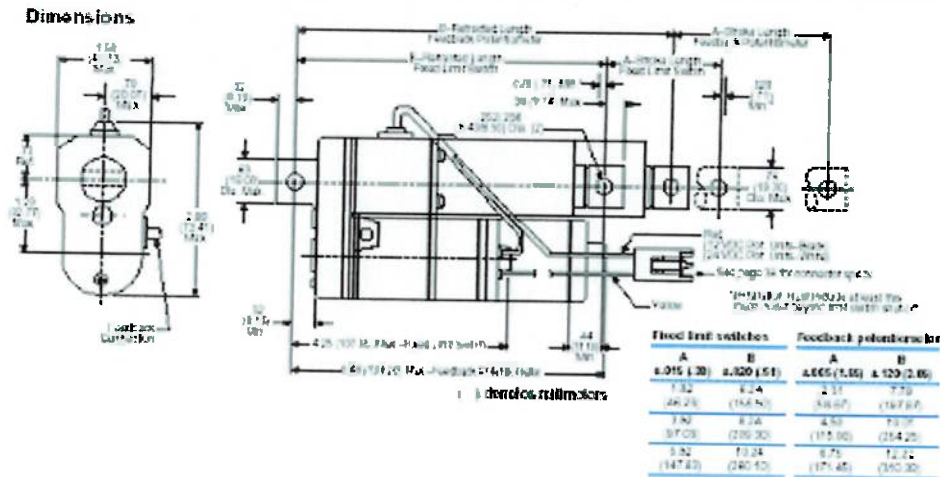


Figura 12: Dimensões dos atuadores

**Specifications**

Input	12 VDC and 24 VDC
Load Capacities	25 or 75 lbs. maximum depending on model
Stroke Length	2, 4 or 6 inches
Current Draw	2.8 amps maximum at 24 VDC at rated load 5.6 amps maximum at 12 VDC at rated load
Duty Cycle	25% "on time" at rated load per cycle (77° F)
Melting Protection	Automatic reset thermal overload
Limit Switches	Limit switch protected for automatic shutoff on either end of stroke—non adjustable
Temperature Range	-15° F to 150° F
Drive	Acme screw
End Play	.006 in. maximum
Housing	Aluminum and zinc for corrosion protection
Environment Protection	95 hr salt spray tested
Lead Wires	18 ga. wires 4' long standard
Connector	Supplied. For replacement see page 95
Mounting	Clevis mounting only
Restraining Torque	20 in. lbs.
Static Load	700 lbs. for all strokes

Tabela 1: Característica elétricas dos atuadores.

Logo abaixo podemos verificar os gráficos característicos do Eletrack 1:

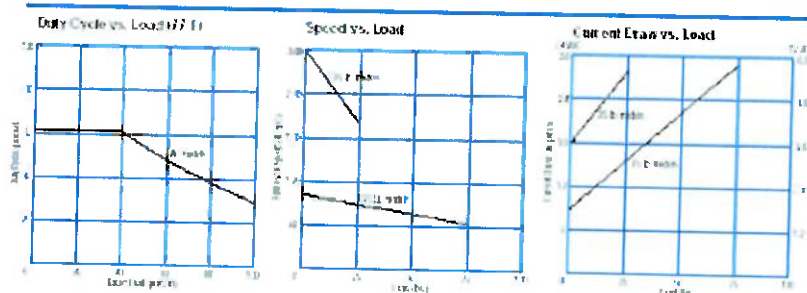


Figura 13: Gráficos de força, velocidade e corrente.

### 2.4.1.2. Base e Mesa

Um robô de cadeia cinemática fechada, como já visto anteriormente, é basicamente composto de uma base e de uma mesa, unidos por atuadores.

Abaixo podemos ver o projeto mecânico da mesa e da base:

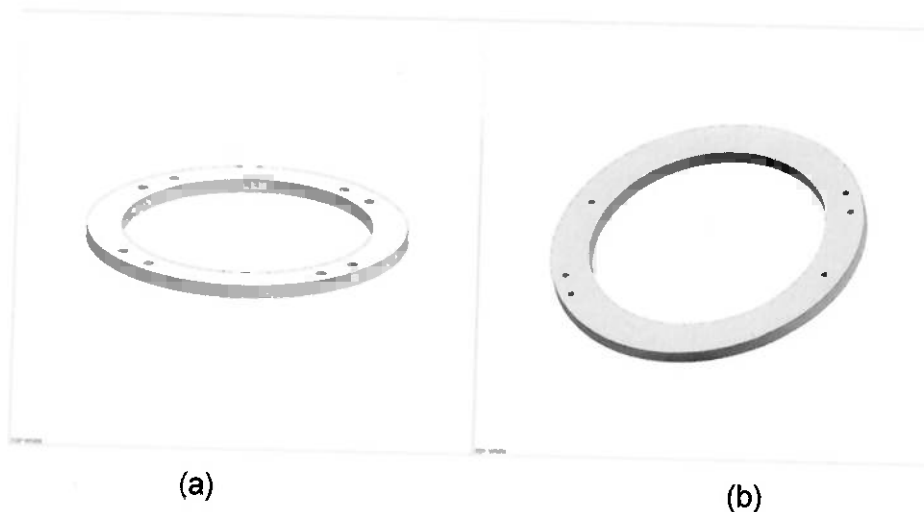


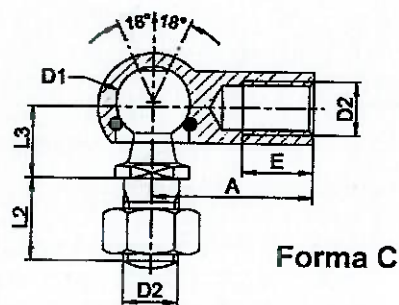
Figura 14: Projeto mecânico da mesa (b) e da base (a) respectivamente.

É importante reparar na angulação dos furos da mesa onde serão parafusadas as juntas esféricas. Esta angulação é importante para que possamos garantir que a movimentação dos atuadores não será limitada pelo curso das juntas esféricas. Podemos verificar as características das juntas utilizadas, de forma mais clara, no próximo item.

### 2.4.1.3. Juntas

#### 2.4.1.3.1. Juntas Esféricas

As juntas esféricas escolhidas para este projeto são da marca Imetex e tem suas características apresentadas na tabela abaixo:

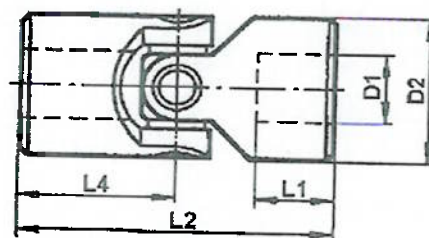
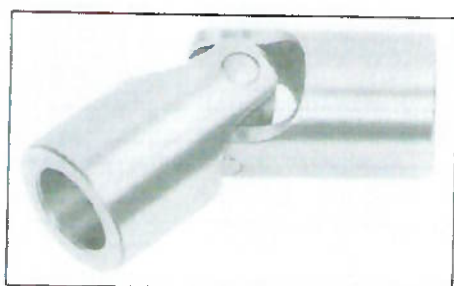


Dimensões						Peso grs.	Designação
D1	D2	E	L2	L3	A		
13	M8	14	16	13	30	53,1	DIN 71802 C 13 M8

Tabela 2: Características das juntas esféricas Imetex

#### 2.4.1.3.2. Juntas Universais

As juntas universais escolhidas para este projeto são da marca Imetex e tem suas características apresentadas na tabela abaixo:



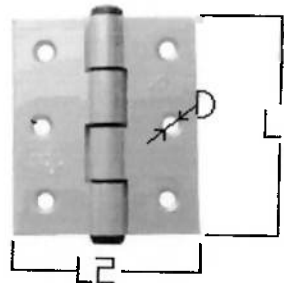
Simple (até 45°)

Dimensões					Designação
D1	D2	L1	L2	L4	
8	16	11	40	20	DIN 808 G 16 B8

Tabela 3: Características das juntas universais Imetex

### 2.4.1.3.3. Juntas Rotativas

As juntas rotativas necessárias do robô foram substituídas por um sistema rotativo formado por duas chapas unidas e por um pino central. Abaixo, pode-se ver o componente:



Dimensões		
D	L1	L2
5	60	40

Tabela 4: Características das juntas rotativas.

### 2.4.1.4. Conexões

A conexão ilustrada abaixo tem a função de unir os atuadores à base e à mesa.



Figura 15: Conexão

## 2.4.2. Estrutura Elétrica e Eletrônica

O acionamento elétrico/eletrônico do robô será feito através do posicionamento de cada atuador independentemente. Esse posicionamento será feito através de um conjunto de potenciômetros (joystick) que definirão o set-point para cada atuador.

O sistema de controle consiste em um gerador de PWM que aciona o sistema de potência. O gerador de PWM escolhido foi o LM3524 por sua simplicidade e custo. Com ele, pode-se controlar tanto a frequência dos pulsos (que no nosso caso será fixa em 2,1 kHz) quanto o chamado "duty cycle", que é a proporção da duração dos sinais alto e baixo em cada período. Através do duty cycle será feito o controle de potência fornecida ao atuador e, conseqüentemente, o controle da velocidade dos atuadores, garantindo que eles atuem de forma síncrona.

Já o controle de posição será totalmente analógico, feito através dos potenciômetros internos dos atuadores. O valor lido nesses potenciômetros será comparado com o set-point definido pelo usuário no joystick e a diferença será realimentada no gerador de PWM.

O sistema de potência consiste simplesmente em uma ponte H que suporte a corrente necessária para o atuador. Desse modo, temos o seguinte diagrama elétrico:

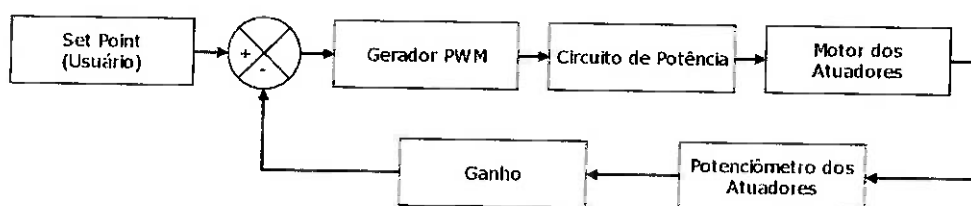


Figura 16: Diagrama de bloco do subsistema elétrico

### 2.4.2.1. Divisor de Tensão e Gerador PWM

O circuito esquematizado abaixo é responsável pelo controle do robô.

O potenciômetro de referência é regulado com o valor informado pelo algoritmo de cinemática gerado pelo *MatLab*.

O divisor de tensão é montado de forma a fornecer uma tensão de 2,5 V ao LM 3524, enquanto os potenciômetros forem iguais, ou seja, sempre que o valor resistivo dos potenciômetros forem iguais, o pulso PWM será gerado de forma a manter o tempo de alto e de baixo iguais, fazendo com que o motor fique parado.

Quando houver uma variação do potenciômetro de referência, o motor irá girar (se o tempo de alto do PWM for maior que o de baixo o motor irá girar no sentido horário, se for o contrário o motor irá girar no sentido anti-horário) fazendo com que a resistência do atuador varie, até que as resistências se igualem, parando assim a movimentação.

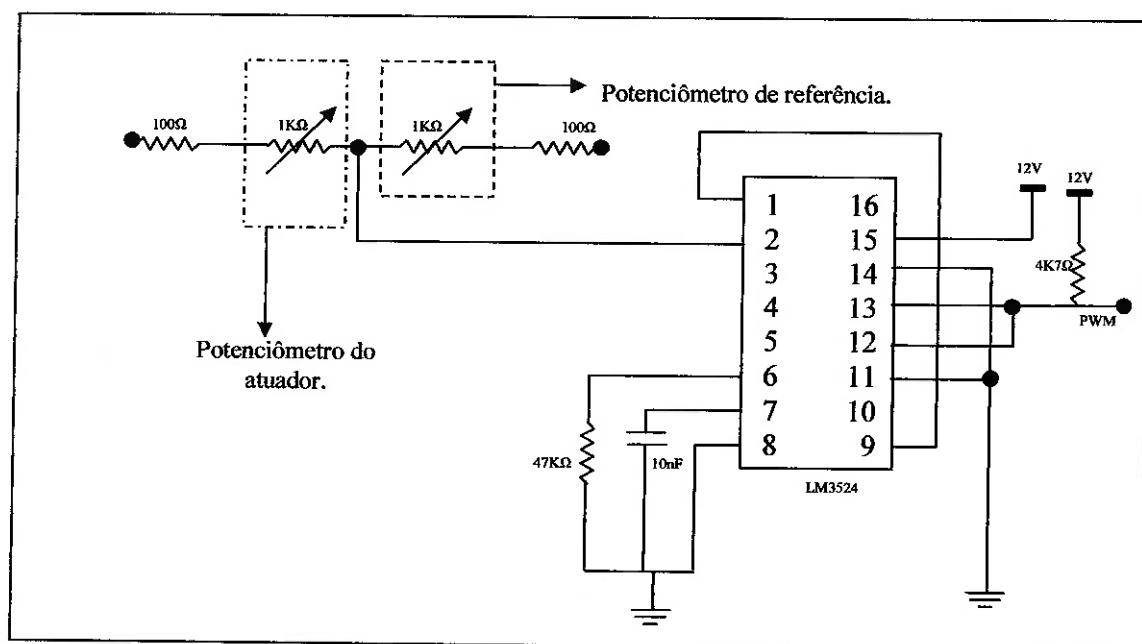


Figura 17: Esquema elétrico do divisor de tensão e do gerador PWM

### 2.4.2.2. Circuito de Potência

O esquema abaixo consiste no circuito de potência do acionador dos atuadores.

O sistema é constituído basicamente de transistores de potência, formando uma ponte H, para garantir que o motor possa girar tanto no sentido horário, quanto no sentido anti-horário.

Como dito anteriormente, todas as vezes que o sinal de entrada recebido pelo circuito de potência tiver seu tempo de alto igual ao seu tempo de baixo, o motor permanecerá parado.

Sempre que houver uma diferença entre o sinal de baixo e o sinal de alto, o motor girará no sentido horário ou anti-horário, seguindo sempre a parcela do sinal que permanece mais tempo num estado específico.

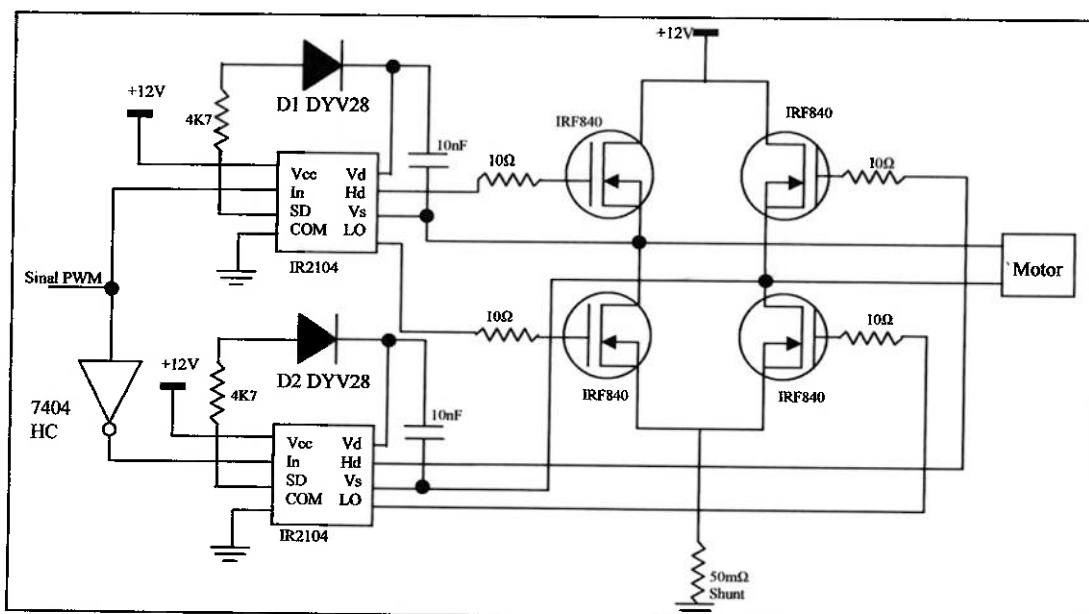
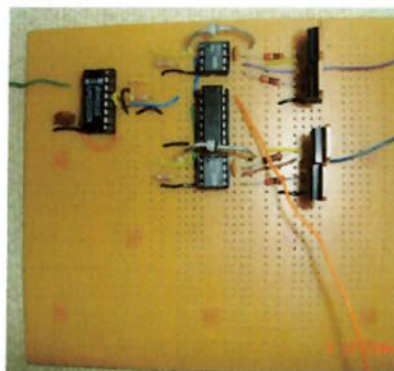


Figura 18: Esquema elétrico do circuito de potência.

### 2.4.2.3. Configuração final da placa de acionamento

Abaixo se pode ver uma foto do circuito de acionamento:



**Figura 19: Foto do circuito de acionamento.**

### **2.4.3. Configuração Final do Protótipo**

Todas as peças do robô foram modeladas com base nos estudos feitos anteriormente levando-se em conta os resultados obtidos no estudo da cinemática e nos dados obtidos através das maquetes.

Na figura abaixo é possível verificar o conceito do robô:



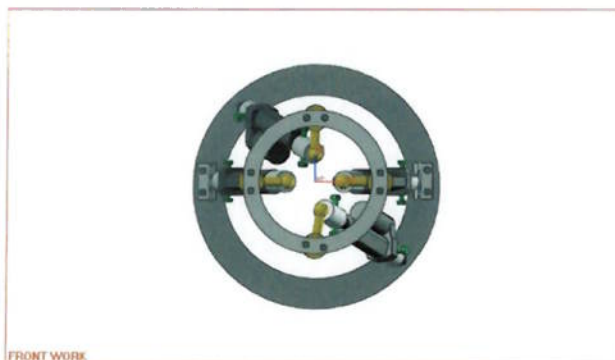
**Figura 20: Robô Conceito**

Com base nos dados obtidos através da execução das maquetes, foram definidas as posições e inclinações dos atuadores. O correto posicionamento dos mesmos é de suma importância para a estabilidade do robô.



Por exemplo, se os atuadores fossem instalados perpendicularmente à base e à mesa, o mesmo se tornaria instável por estar num ponto de singularidade ou próximo a este ponto.

Na figura 9.11. pode-se verificar o posicionamento correto dos atuadores com relação à base e à mesa.



(a)

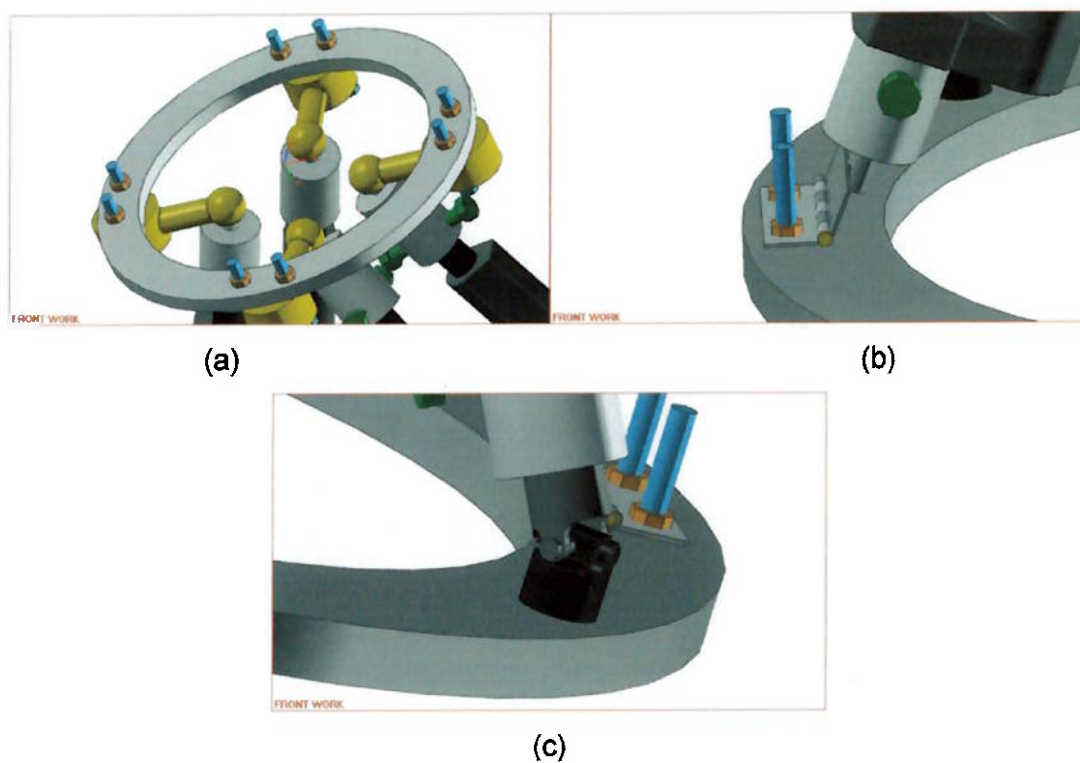


(b)

**Figura 21: Robô Conceito: (a) vista superior e (b) vista frontal.**

O estudo realizado através dos critérios de Gruebler possibilitou a definição das juntas a serem utilizadas no protótipo.

As juntas podem ser vistas nas figuras abaixo:

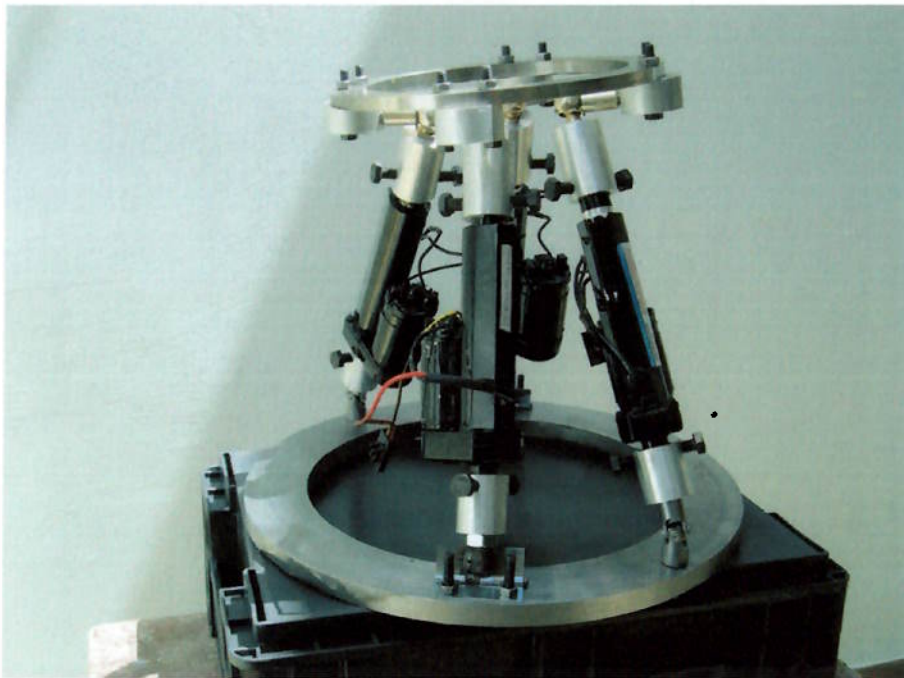


**Figura 22: Desenho Conceito: detalhe das junta esféricas (a), rotativas (b) e universais (c).**

#### **2.4.4. Montagem final**

Após a modelagem em CAD dos componentes, desenvolveram-se os desenhos de fabricação, que podem ser vistos em anexo a este trabalho.

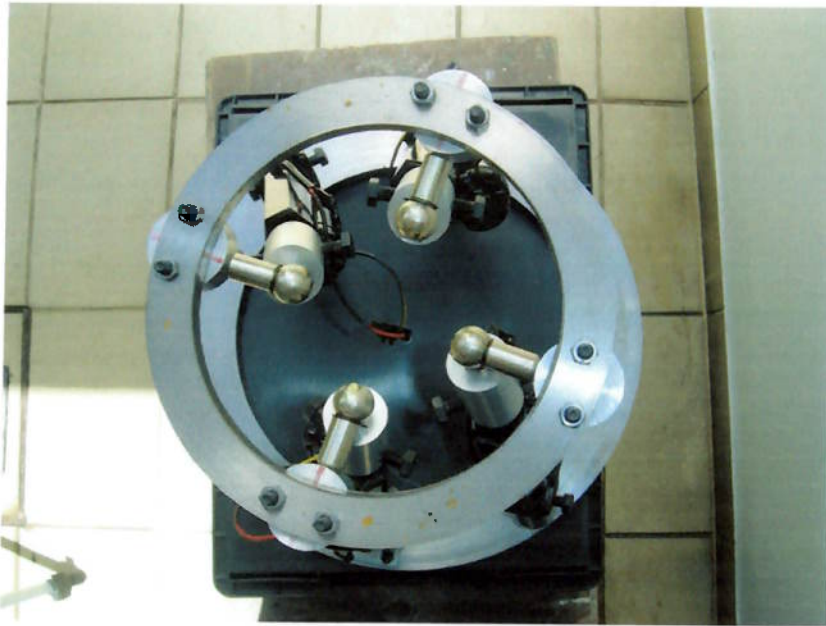
Iniciou-se a fabricação dos componentes e subsequente montagem do robô. O resultado obtido pode ser visto nas fotos abaixo:



**Figura 23: Foto do protótipo (vista frontal).**

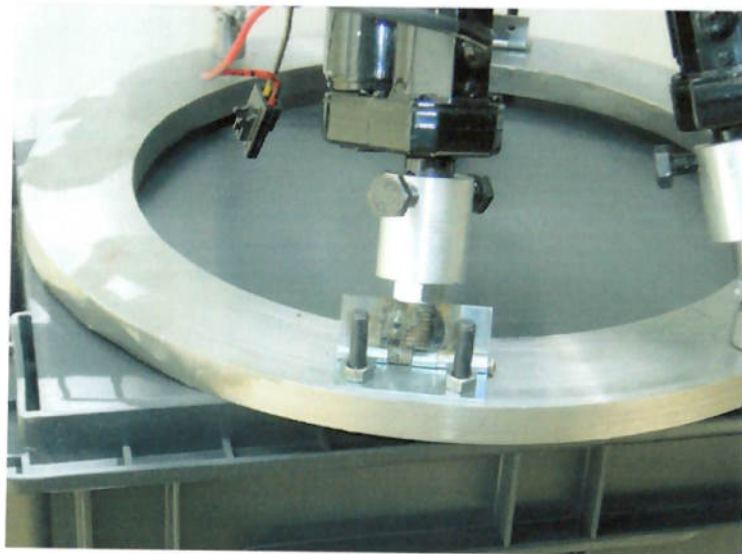


**Figura 24: Foto do protótipo (vista lateral).**



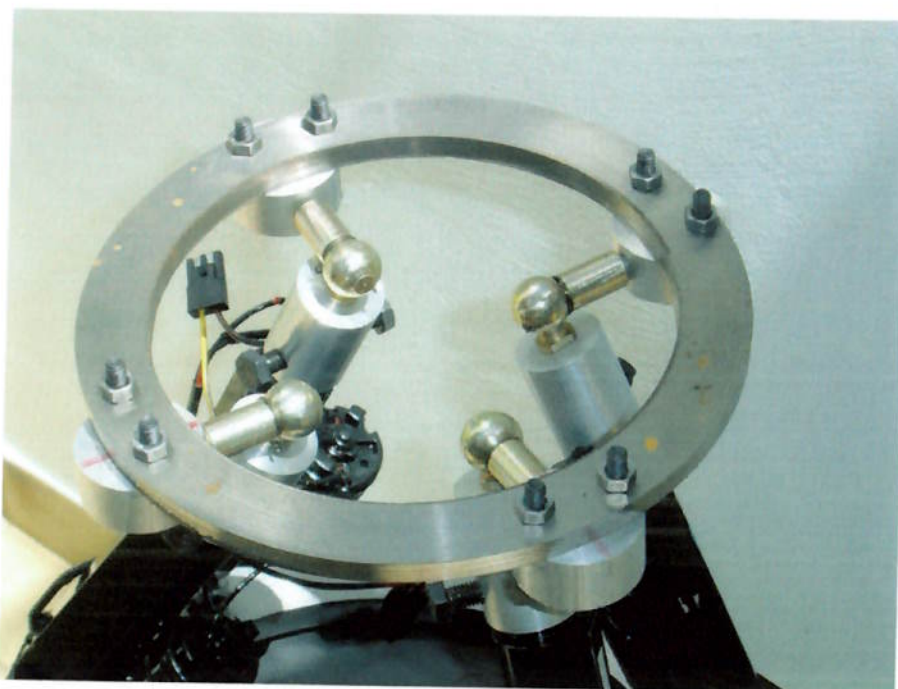
**Figura 25: Foto do protótipo (vista superior).**

Abaixo temos uma visão mais próxima das juntas e das conexões entre os atuadores e as juntas:

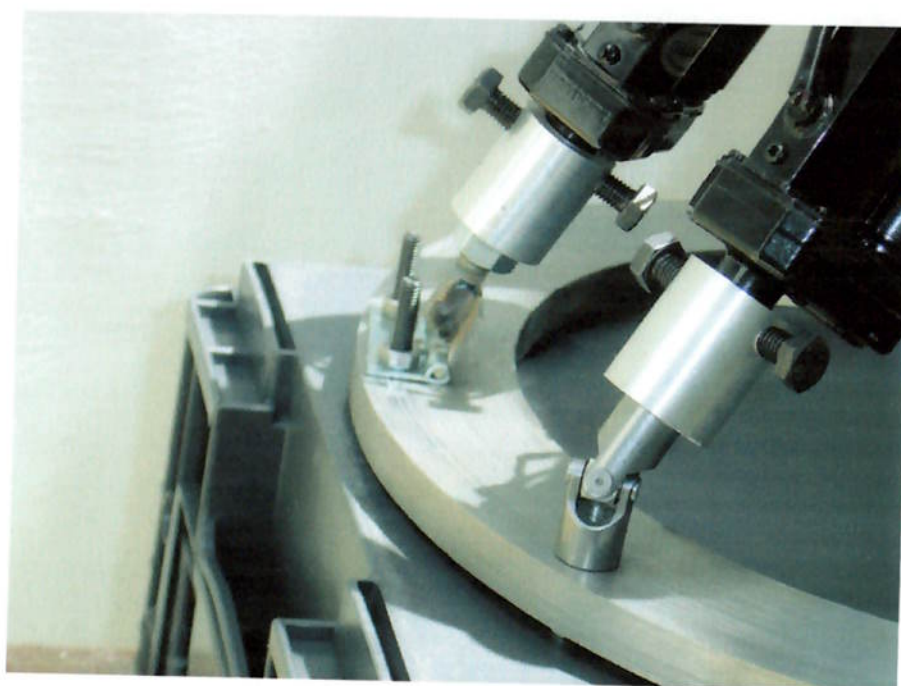


**Figura 26: Foto do protótipo (junta rotativa).**





**Figura 27: Foto do protótipo (junta esférica).**



**Figura 28: Foto do protótipo (junta universal).**

### 3. SIMULAÇÕES

Foi desenvolvido um algoritmo em MatLab para a simulação do volume de trabalho do robô.

Para as simulações foram adotados os parâmetros dimensionais dos atuadores que haviam sido primeiramente escolhidos, ou seja, os atuadores com curso de 6 polegadas e potenciômetros.

Abaixo, podemos ver os gráficos obtidos através desta simulação.:

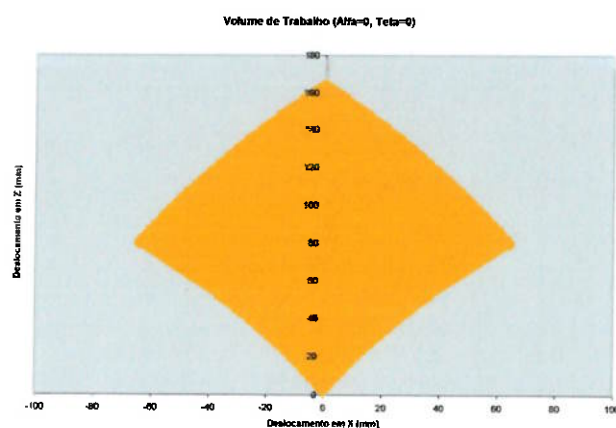


Figura 29: Gráfico simulação do volume de trabalho (translação:  $\theta=0$  e  $\alpha=0$ ).

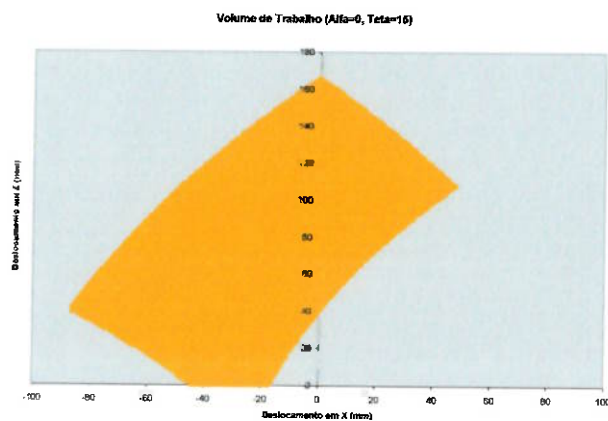


Figura 30: Gráfico simulação do volume de trabalho (translação:  $\theta=15$  e  $\alpha=0$ ).

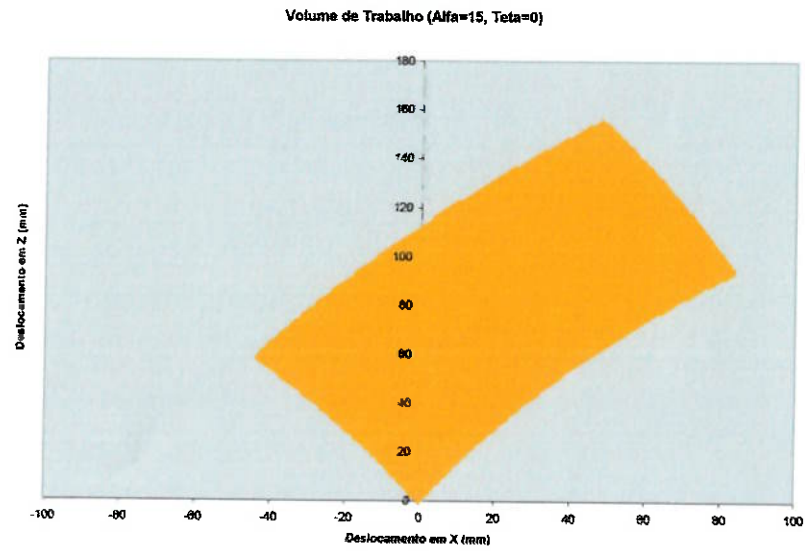


Figura 31: Gráfico simulação do volume de trabalho (translação:  $\theta=0$  e  $\alpha=15$ ).

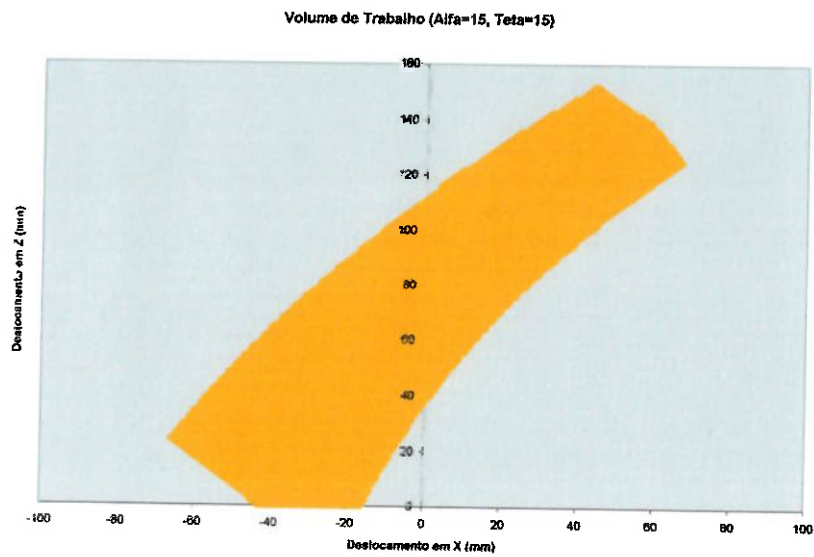


Figura 32: Gráfico simulação do volume de trabalho (translação:  $\theta=15$  e  $\alpha=15$ ).

#### 4. RESULTADOS

O projeto inicial, como visto anteriormente, seria desenvolvido com atuadores de 6 polegadas com potenciômetros, porém, por problemas na importação do equipamento, não foi possível a realização do experimento conforme o programado.

Frente ao ocorrido, optou-se pela utilização de atuadores sem potenciômetros, com curso de 2 polegadas.

Embora o projeto não tenha sido desenvolvido conforme o planejado, a solução encontrada para resolução do problema se mostrou bastante satisfatória.

Com relação aos problemas apresentados na parte mecânica podemos citar:

- posicionamento das juntas esféricas: a forma em que as juntas foram montadas no protótipo criou um grau de liberdade espúrio (rotação em torno do eixo z), devido à criação de um braço entre as juntas rotativas e a mesa, causando instabilidade no posicionamento. Este problema pode ser sanado com a colocação das juntas rotativas alinhadas ao atuador;
- qualidade das juntas esféricas: para uma melhora na rigidez do sistema e uma ampliação do volume de trabalho, deve-se utilizar juntas mais precisas e com ângulos de atuação maiores;
- conexões: o processo de fabricação das mesmas deve ser melhorado para garantir um encaixe mais preciso entre os atuadores e as juntas. Uma sugestão para a melhoria no encaixe é o brochamento das pontas dos atuadores e das conexões;
- atuadores: embora para a confecção de um protótipo os atuadores utilizados sejam satisfatórios, para uma aplicação real em cirurgias, os mesmos devem ser substituídos por atuadores projetados com maior rigor, além de possuírem um sistema de posicionamento preciso;
- juntas rotativas: a adaptação feita com o uso de dobradiças se mostrou bastante satisfatória, porém para que o robô possa atuar



numa situação real, as mesmas devem ser substituídas por juntas rotativas com rolamentos.

Sobre o sistema elétrico e eletrônico adotado pode-se concluir que o circuito de potência se mostrou insuficiente para lidar com os picos de corrente envolvidos, uma vez que em pontos de limitação de movimento, a corrente se eleva de forma a danificar os componentes eletrônicos. Um circuito de proteção deve ser projetado para se evitar este problema.

Os testes de posicionamento e movimentação do robô foram executados manualmente, ligando-se os atuadores em fontes individuais com controle de voltagem. Esses ensaios permitiram verificar a importância do sistema de controle, mostrando que um único atuador não pode ser movimentado individualmente. O menor movimento possível do robô é gerado pelo acionamento sincronizado de dois atuadores, sendo exigido um controle de velocidade e posição. Para movimentos mais complexos é exigida a movimentação de todos os atuadores, mantendo-se a exigência de um controle de velocidade e posição. A sugestão para implementação desse controle é a criação de um circuito microcontrolado, tornando o sistema não dependente apenas de um controle por hardware, mas também por software.

Com relação ao volume de trabalho, comparando-se os resultados obtidos através da simulação com as variações geométricas do protótipo, foi possível apenas verificar que um robô montado com os atuadores de duas polegadas apresenta proporcionalidade do volume de trabalho.

## 5. CONCLUSÕES

O protótipo apresentou um bom desempenho de funcionamento e confirmou que a topologia obtida através dos critérios de Gruebler estava correta. É importante salientar a necessidade de um posicionamento correto dos atuadores, com uma inclinação maior ou igual a  $30^\circ$  em relação a vertical, além da necessidade de reduzir as folgas nas juntas, evitando-se assim pontos de singularidade e instabilidades no robô.

As equações de cinemática inversa mostram que uma vez estabelecido o tipo de acionamento dos atuadores, a rotina de controle se torna relativamente simples (custo computacional baixo), bem como sua simulação. É importante ressaltar que o acionamento dos atuadores deve ser realizado de modo síncrono.

As forças envolvidas são de baixa magnitude (até 100N), de modo que os esforços mecânicos e as deflexões por eles causadas não geraram problemas.

Como todo projeto de engenharia, o custo financeiro foi um fator bastante restritivo, obrigando a compra de atuadores com uma precisão baixa para atender as necessidades profissionais de um manipulador cirúrgico. Além disso, as juntas utilizadas também não possuem a precisão desejada, uma vez que as mesmas, com as características necessárias, se tornaram inviáveis pelo fato de serem importadas e terem alto custo.

Trabalhos futuros devem almejar uma melhor construção mecânica, bem como a adaptação do sistema de acionamento para que ele atinja a potência necessária. Além disso, é de primordial importância que se desenvolva e implemente o sistema de controle (preferencialmente microcontrolado). O desenvolvimento de um atuador específico para fins médicos também deve ser explorado.

## 6. BIBLIOGRAFIA

APLEY, A.GRAHAM, Ortopedia e Fraturas em Medicina de Reabilitação. São Paulo, SP: Atheneu,1998.

BOUAZZA-MAROUF, K.;BROWBANK e I.;HEWIT, J. R., Robot-assisted invasive orthopaedic surgery, Mechatronics Vol. 6, No. 4, pp. 381-397, 1996.

BRANCHINI, D. M., Desenvolvimento de um manipulador robótico baseado em um mecanismo de cinemática paralela, EPUSP, 2004.

COELHO, T. A. H., Parallel kinematic structures: a review, não publicado.

CRIGOS - Compact Robot for Image Guided Orthopedic Surgery. Disponível em <http://www.ame.hia.rwth-aachen.de/research/cht/Crigos1.html> (último acesso em 09/04/2005).

FU, K.S. et alli, Robotics: control, sensing, vision and intelligence. McGraw-Hill, 1987.

LAZAREVIC, Z., Motorized Manipulator for Coronary Artery Bypass Graft Surgery. Disponível em <http://www1.cs.columbia.edu/~laza/Stewart/> (último acesso em 09/04/2005).

M-850 HEXAPOD Six-Axis Parallel-Kinematics MicroMotion Robot. Disponível em <http://www.physikinstrumente.de/products/prdetail.php?secid=7-16> (último acesso em 09/04/2005).

MALVINO, P. A., Eletrônica. Makron Books, 1995.

MicroDex Robot. Disponível em <http://www.microdexsys.com/page6.html> (último acesso em 09/04/2005).

Parallemic. Disponível em <http://www.parallemic.org/> (último acesso em 09/04/2005).

RAMOS, A. B. M. e CORDEIRO, I. B., Desenvolvimento de um robô com arquitetura paralela e espaço de trabalho tridimensional, EPUSP, 2004.

Robots for spine surgery. Disponível em [http://www.fraunhofer.de/fhg/archiv/magazin/pflege.zv.fhg.de/english/publications/df/df2001/magazine2\\_2001\\_46.pdf](http://www.fraunhofer.de/fhg/archiv/magazin/pflege.zv.fhg.de/english/publications/df/df2001/magazine2_2001_46.pdf) (último acesso em 09/04/2005).

RODRIGUES, H. L. P. e SCHOLTZ, M.A., Projeto e construção de um robô manipulador de endoscópio cirúrgico, EPUSP, 2001.

RODRIGUES, S. S., Modelagem Dinâmica para Controle de uma Serra Automática utilizada em Cirurgias Ortopédicas, ITA, 2005.

TAPIA, B. C. e MÉNDEZ, S. J. T., Robot paralelo planar para ensamble. Disponível em <http://www.monografias.com/trabajos16/robot-paralelo/robot-paralelo.shtml> (último acesso em 09/04/2005).

TARTARI FILHO, S. C. e MARCHIORI, R., Projeto de um robô de arquitetura paralela do tipo hexaglide para usinagem, EPUSP, 2003.

VIDAL FILHO, W. B., Projeto de um robô para auxílio em cirurgias minimamente invasivas, Abcm, 2002.

VIDAL FILHO, W. B., Desenvolvimento de uma estação robótica para cirurgias minimamente invasivas, EPUSP, 2003.

Why Hexapod Robots and Parallel Kinematics (PKM)? Disponível em <http://www.hexapods.net/hexapod.htm> (último acesso em 09/04/2005).

## ANEXO A

Algoritmo MatLab: Cinemática Inversa.

Simulação do Espaço de Trabalho

\*\*\*\*\*CINEMATICA INVERSA\*\*\*\*\*

```

H0=155;

a=200;
b=470;

i=1;

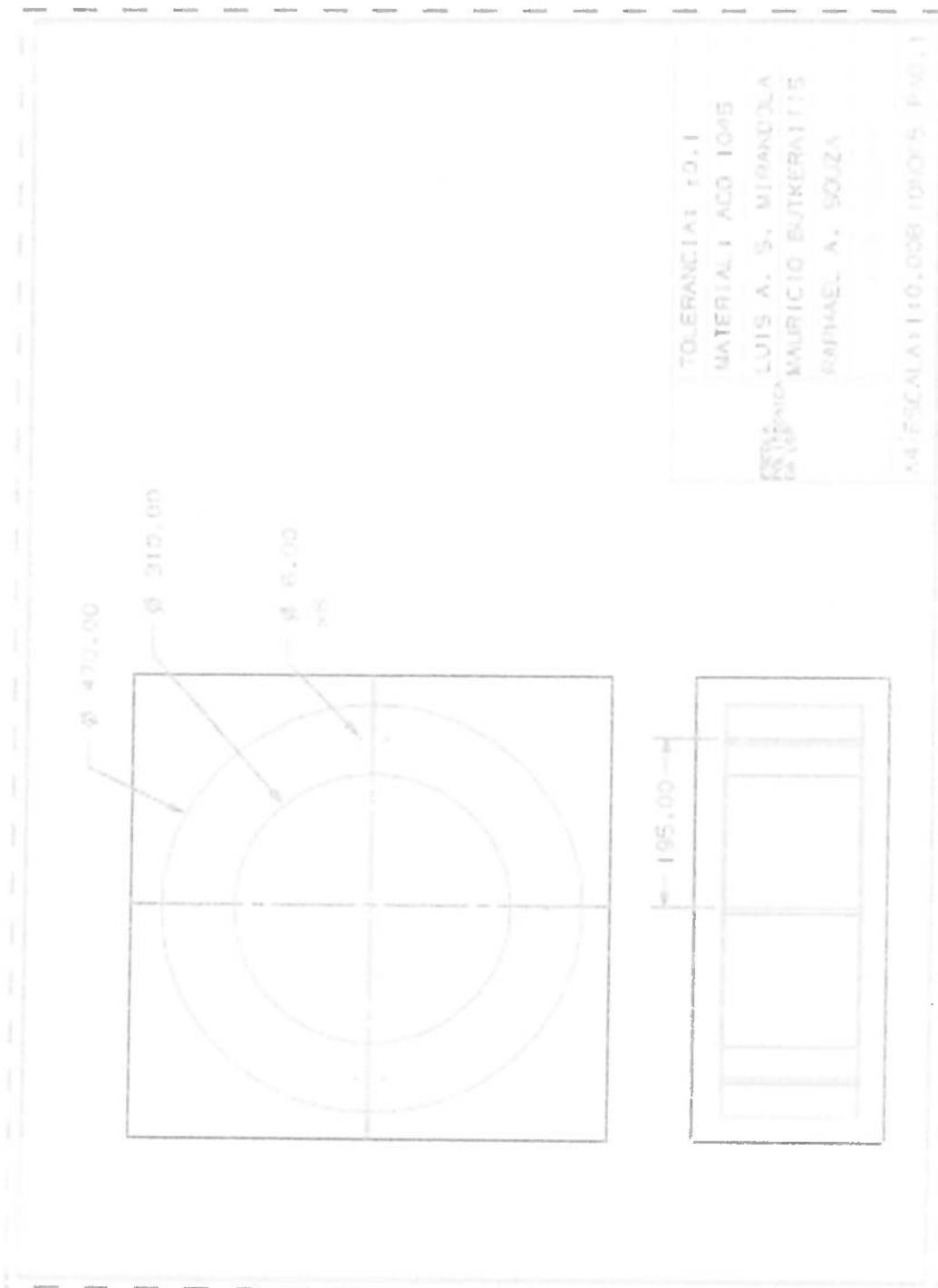
for(Alpha=15:15)
    Alfa=Alpha*pi/180;
    for(Theta=15:15)
        Teta=Theta*pi/180;
        for(X=-100:1:100)
            for(H=0:1:200)
                H12=[    cos(Teta)      0    sin(Teta)    X;
                    sin(Teta)*sin(Alfa) cos(Alfa) -cos(Teta)*sin(Alfa) 0;
                    -sin(Teta)*cos(Alfa) sin(Alfa) cos(Teta)*cos(Alfa) H0+H;
                    0      0      0      1];
                L1=norm([b 0 0 1]' - H12*[a 0 0 1]')-1;
                L2=norm([b*sqrt(2)/2 b*sqrt(2)/2 0 1]' - H12*[0 a 0 1]')-1;
                L3=norm([-b 0 0 1]' - H12*[-a 0 0 1]')-1;
                L4=norm([-b*sqrt(2)/2 -b*sqrt(2)/2 0 1]' - H12*[0 -a 0 1]')-1;
                if L1 < 310 || L2 < 310 || L3 < 310 || L4 < 310
                    sprintf('%d, %d, %d, %d Lower Bound', Alfa,Teta, X, H)
                elseif L1 > 480 || L2 > 480 || L3 > 480 || L4 > 480
                    sprintf('%d, %d, %d, %d Upper Bound', Alfa,Teta, X, H)
                end

                if L1 > 310 && L2 > 310 && L3 > 310 && L4 > 310 && L1 < 480 &&
L2 < 480 && L3 < 480 && L4 < 480
                    Simul(i, 1)=Alfa;
                    Simul(i, 2)=Teta;
                    Simul(i, 3)=X;
                    Simul(i, 4)=H;
                    Simul(i, 5)=L1;
                    Simul(i, 6)=L2;
                    Simul(i, 7)=L3;
                    Simul(i, 8)=L4;
                    i=i+1;
                end
            end
        end
    end
end

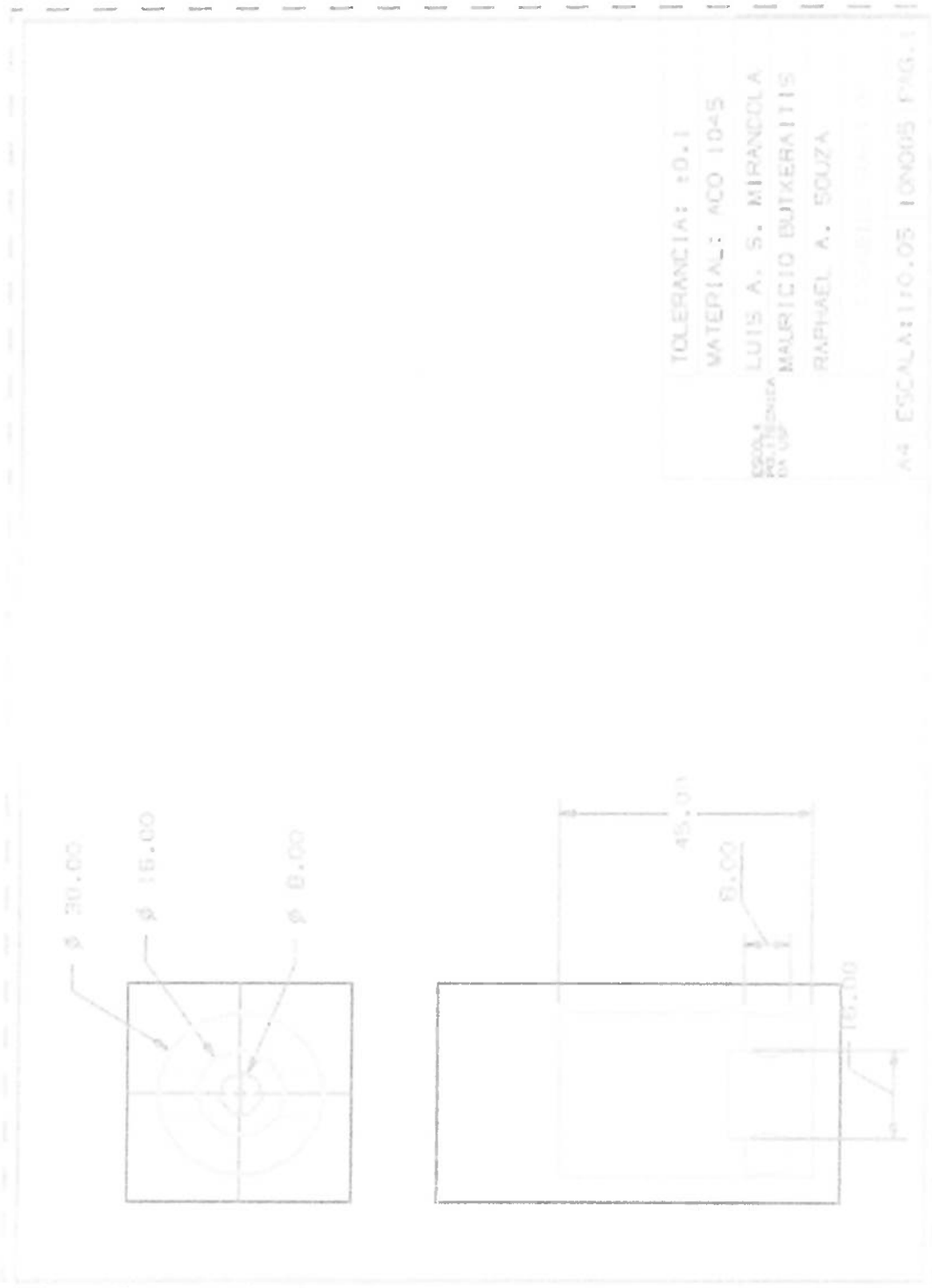
```

```
end
    sprintf('%d: %d, %d', i, Alfa,Teta)
end
end
%dlmwrite('Alfa15Teta15.txt',Simul, '\t');
```

## ANEXO B



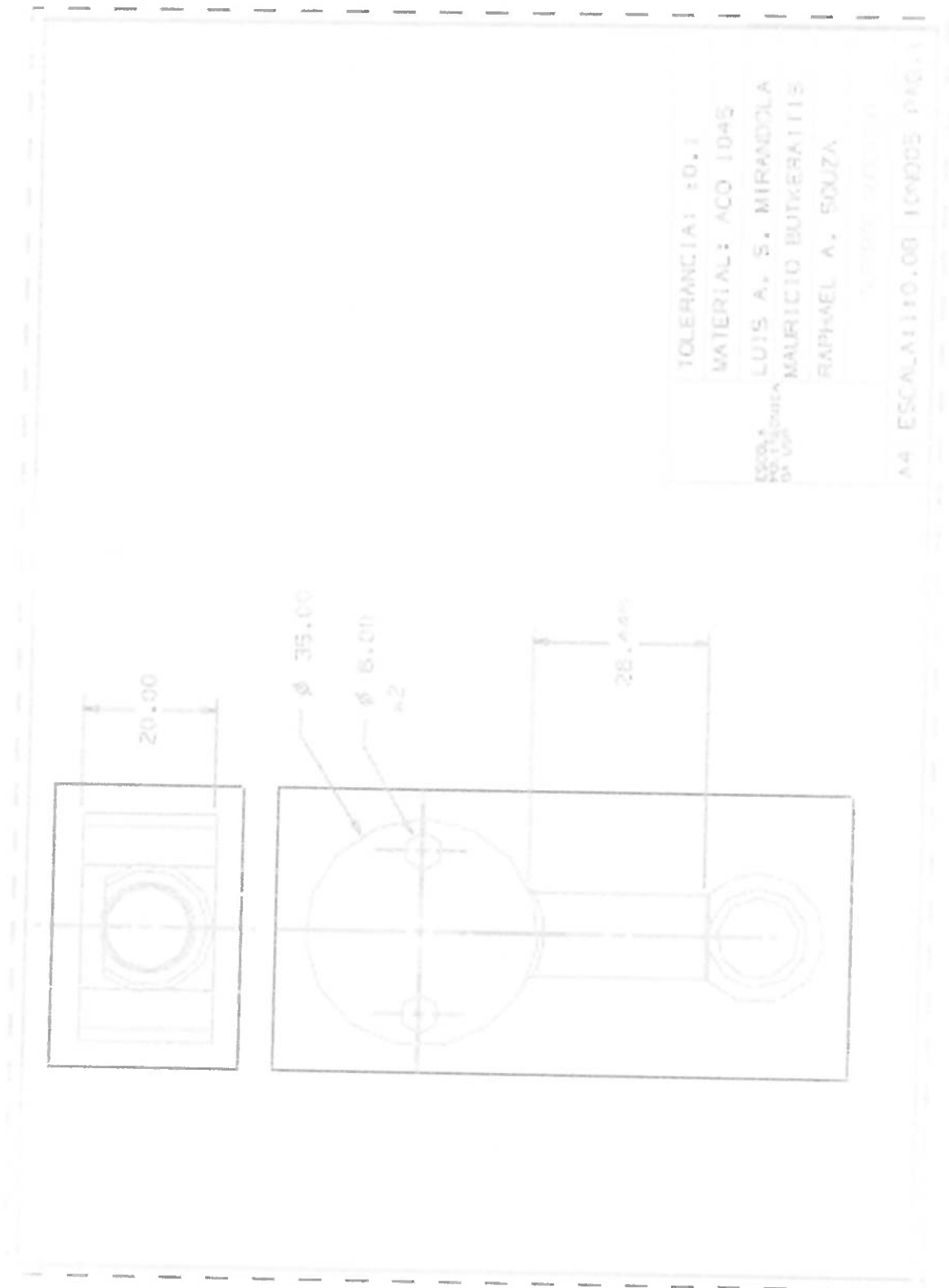
## ANEXO C



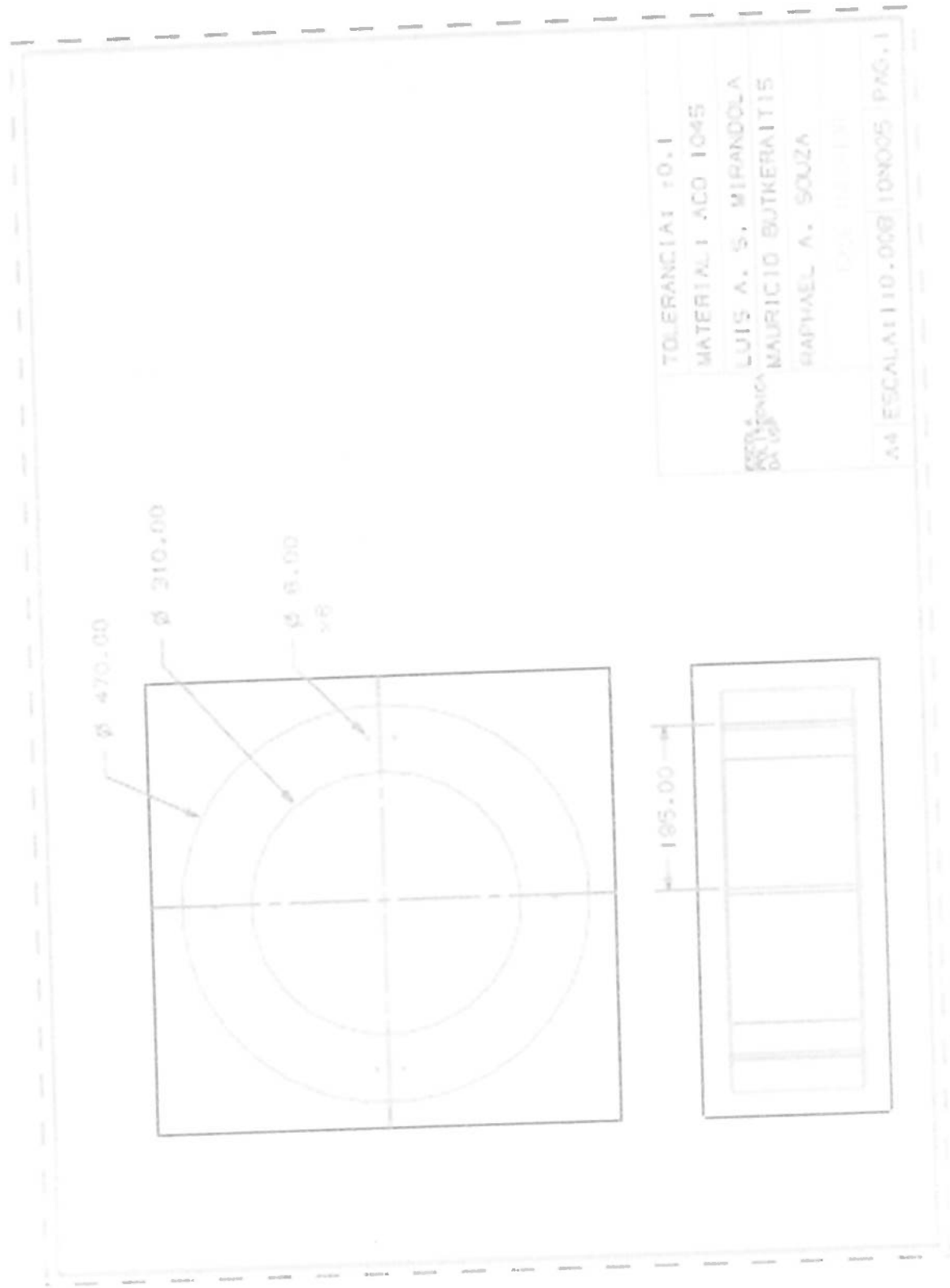




## ANEXO E



### ANEXO F



TOLERANCIAS ±0.1
MATERIAL: Aço 1045
LUIS A. S. MIRANDA
MAURICIO BUTKRAITIS
RAPHAEL A. SOUZA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
A4 ESCALA: 1:10.000 10/0005 PAG. 1