

MARCEL SCARPIM DE OLIVEIRA

RICARDO AKIO KIKKAWA

**DESENVOLVIMENTO DO PROJETO MECÂNICO DE UM ROBÔ DE
CINEMÁTICA PARALELA PARA PICK AND PLACE**

São Paulo
2007

MARCEL SCARPIM DE OLIVEIRA

RICARDO AKIO KIKKAWA

**DESENVOLVIMENTO DO PROJETO MECÂNICO DE UM ROBÔ DE
CINEMÁTICA PARALELA PARA PICK AND PLACE**

Área de concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Tarcísio Antonio Hess Coelho

São Paulo
2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Marcel Scarpim de
Desenvolvimento do projeto mecânico de um robô de cíne-
mática paralela para *pick and place* / M.S. de Oliveira, R.A.
Kikkawa. -- São Paulo, 2007.
52 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.

1. Projeto mecânico 2. Robôs (Protótipo) 3. Arquitetura parale-
la I. Kikkawa, Ricardo Akio II. Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos III.t.

Agradecimentos

Agradecemos a nossos pais pelo apoio e suporte incondicional ao longo desses anos de Escola Politécnica, sem os quais não teríamos a oportunidade e o privilégio de cursar. Agradecemos também ao Professor Dr. Tarcísio Antônio Hess Coelho pela ajuda e orientação ao longo desse trabalho e pelo exemplo de boa conduta e profissionalismo no nosso período juntos.

RESUMO

As aplicações tradicionais de engenharia usam predominantemente robôs com cadeias cinemáticas seriais, suas partes (atuadores e peças) estão dispostas em série, uma após a outra, formando uma única cadeia cinemática aberta. Contudo, em aplicações que demandem precisão, rigidez, alta freqüência natural e baixo tempo de ciclo esses robôs apresentam desempenho insatisfatório. Por esses motivos, tanto a indústria como a comunidade acadêmica tem demonstrado interesse por um outro tipo de estrutura onde existem várias cadeias cinemáticas independentes atuando de forma paralela e simultânea sobre o órgão terminal, denominada paralela. Essa arquitetura apresenta muitas vantagens em potencial, como: alta rigidez, leveza, rapidez, precisão e alta capacidade de carga. Contudo, ainda existe uma série de problemas em aberto que necessitam de uma melhor investigação para garantir que essa mudança de arquitetura seja feita com sucesso.

O objetivo desta pesquisa é desenvolver o projeto mecânico e o controle de um protótipo de arquitetura paralela que apresente maior precisão e rigidez que o protótipo atual. Esse aumento na rigidez e precisão se daria pelas substituições de componentes de baixo custo e precisão por componentes de maior precisão, de forma que a estrutura final não apresente movimentos indesejados devido a estrutura mecânica. O desempenho operacional do protótipo será avaliado mediante a realização de ensaios experimentais.

Palavras-chave: Robô. Cinemática paralela. Precisão. Posicionamento. Controle.

ABSTRACT

The traditional applications of engineering use robots with serial kinematic chains predominantly, its parts (actuators and parts) are made use in series, after to another one, forming an only chain open kinematics. However, in applications that demand precision, rigidity, high natural frequency and low time of cycle these robots present unsatisfactory performance. For these reasons, as much the industry as the academic community has demonstrated interest for one another type of structure where some independent kinematic chains acting of parallel and simultaneous form exist on the terminal object, called parallel. This architecture presents many advantages in potential, as: high the load rigidity, slightness, speed, precision and high capacity. However, still they exist a series of problems in opened that they need one better inquiry to guarantee that this change of architecture is made successfully. The objective of this research is to develop the mechanical project and the control of an archetype of parallel architecture that presents greater precision and rigidity that the current archetype. This increase in the rigidity and precision if would give for the substitutions of components of low cost and precision for components of bigger precision, of form that the structure final does not present undesirable movements due the structure mechanics. The operational performance of the archetype will be evaluated by means of the accomplishment of experimental tests.

Words key: robot, parallel kinematics, precision, positioning. Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Estrutura do robô existente	10
Figura 2 - Nova proposta da estrutura do robô	11
Figura 3 - Proposta de junta universal baseada em articulações	12
Figura 4 - Proposta de junta universal	13
Figura 7 - Juntas esférica propostas	16
Figura 8 - Junta 1 com malha de 138.615 nós e 75.242 elementos	17
Figura 9 - Análise estática	18
Figura 10 - Distribuição de tensão na junta 1	19
Figura 11 - Resultado da analise modal	19
Figura 12 - Freqüência x modo de vibrar junta1	20
Figura 13 - 1º Modo de vibrar	21
Figura 14 - 2º Modo de vibrar	21
Figura 15 - Junta 2 com malha de 11.167 nós e 5.662 elementos	22
Figura 16 - Análise estática	23
Figura 17 - Distribuição de tensão na junta 2	23
Figura 18 - Resultado obtido pelo ANSYS	24
Figura 19 - Freqüência x Modo de vibrar	25
Figura 20 - 1º Modo de vibrar	26
Figura 21 - 2º Modo de vibrar	26
Figura 22 - Modo de operação RT-Linux	30
Figura 23 - LINUX emulado em ambiente WINDOWS	34
Figura 24 - Implementação direta	35
Figura 25 - Implementação adotada	35
Figura 26 - Espaço de Trabalho vista superior	36
Figura 27 - Espaço de Trabalho vista lateral	37
Figura 28 - Espaço de Trabalho vista inferior	37
Figura 29 - Protótipo vista1	39
Figura 30 - Protótipo vista2	40
Figura 31 - Protótipo vista3	40
Figura 32 - Protótipo vista4	41
Figura 33 - Junta Alumínio - Latão	41
Figura 34 - Junta Prismática em Acrílico	42
Figura 35 - Protótipo Final	43
Figura 36 - Tamanho das Hastes	45
Figura 37 - Vista 2-D com cota x=0	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Freqüências naturais junta1	20
Tabela 2 – Freqüências naturais junta2	25
Tabela 3 - Correlação discreta da Cinemática Inversa	38

SUMÁRIO

1. Introdução	9
2. Proposta de Trabalho	10
3. Junta Esférica	12
3.1 Análises das Juntas	16
4. Subsistema de Controle	28
4.1 REAL-TIME LINUX	28
4.2 EMC2	30
4.3 Sistema Operacional para o EMC2	33
4.4 Implementação do Controle	35
5 Construção dos Protótipos	39
5.1 Construção da Junta	39
5.2 Construção do Mecanismo	39
6. Avaliação dos resultados obtidos	44
7. Referências	46
Anexo 1 – Programa para interpolação MATLAB	48
Anexo 2 – Cálculo da cinemática inversa	51

1. Introdução

Na grande maioria das aplicações industriais atualmente predomina a utilização de robôs cujas arquiteturas correspondem a estruturas cinemáticas seriadas. Esses mecanismos possuem desempenho insatisfatório para tarefas que demandem elevada precisão, rigidez, alta freqüência natural e baixo tempo de ciclo. Devido a essas características tanto a indústria como a comunidade acadêmica estão manifestando interesse por outro tipo de estrutura cinemática, denominada paralela, que é caracterizada pela presença de vários “membros” ou “pernas”, atuando de forma paralela sobre o órgão terminal.

Esse tipo de estrutura apresenta uma série de vantagens em potencial quando comparada à serial, entre elas alta rigidez, leveza, rapidez, precisão e uma maior capacidade de carga.

Contudo, ainda existem muitos problemas em aberto que necessitam de investigação mais profunda, de modo a garantir que essa mudança de estrutura seja implementada com eficácia. A seguir, apresenta-se a descrição das atividades realizadas pelos alunos.

2. Proposta de Trabalho

A proposta inicial de trabalho do grupo era melhorar o projeto mecânico de um robô de mecanismo paralelo já construído anteriormente em (KAMODA;HANADA, 2006). A estrutura inicial do robô está ilustrada na Figura 1 abaixo:

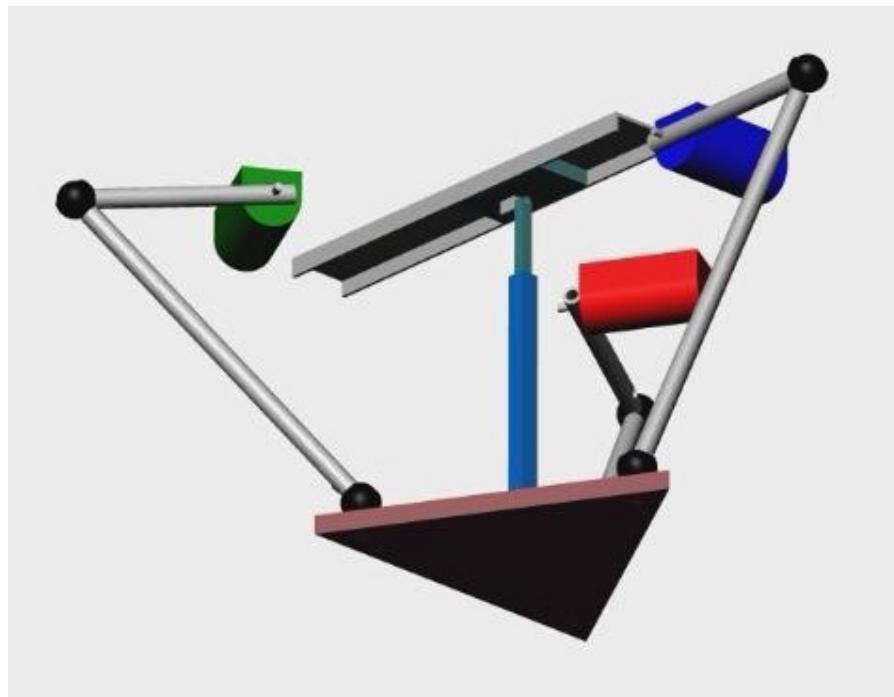


Figura 1 - Estrutura do robô existente

Porém foi proposta uma modificação em sua estrutura conforme ilustra a Figura 2 abaixo. A idéia principal da modificação seria a utilização de um quadrilátero articulado substituindo a cadeia passiva e a eliminação de umas das cadeias ativas.

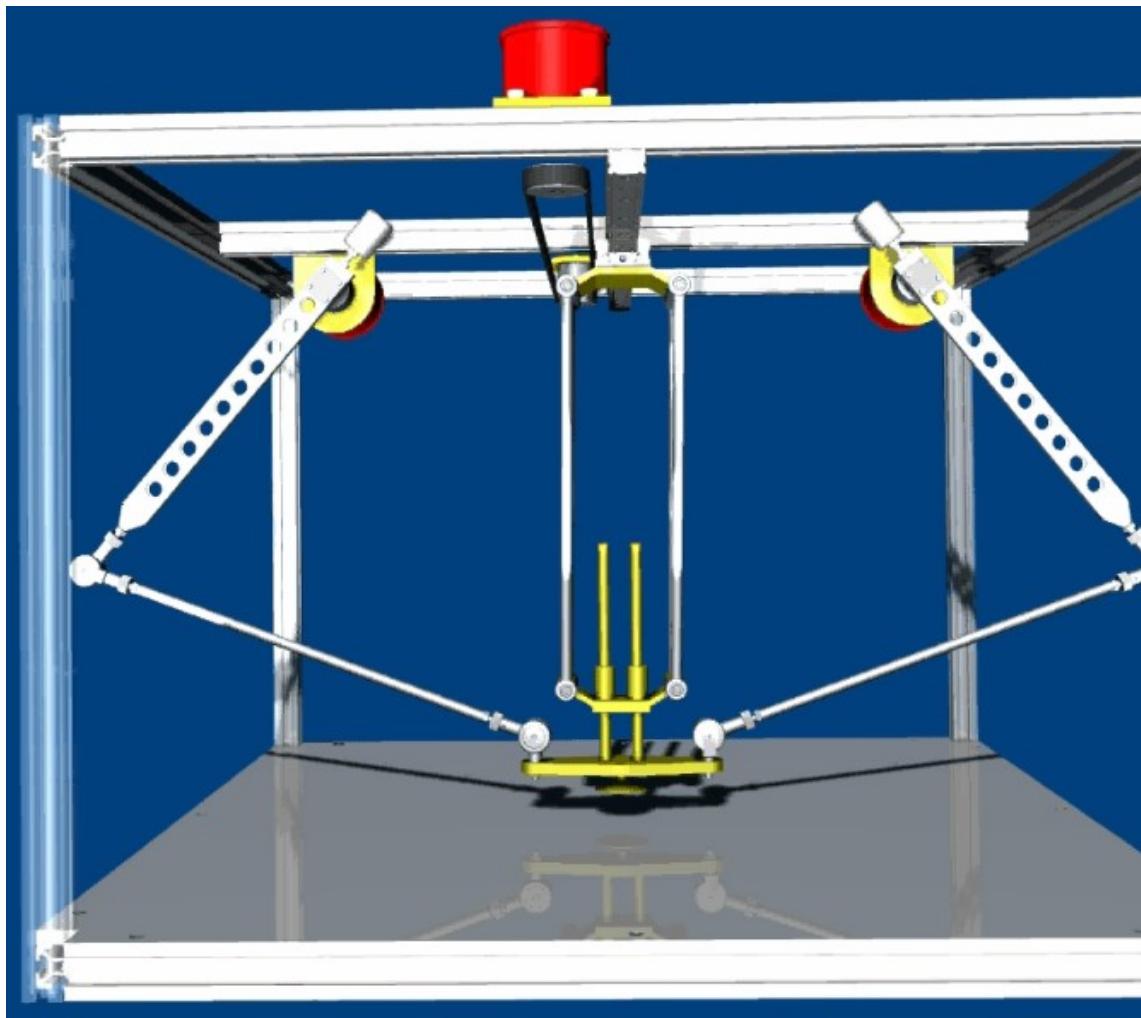


Figura 2 - Nova proposta da estrutura do robô

O foco inicial principal desse estudo é a concepção de uma nova junta esférica que permitisse aumentar o espaço de trabalho quando comparado ao mesmo utilizando-se juntas convencionais, com boa rigidez e alta freqüência natural de modo que o robô como um todo pudesse obter um alto desempenho, juntamente com o desenvolvimento do acionamento e controle do mecanismo como um todo.

3. Junta Esférica

O foco principal dos alunos á a análise do projeto e fabricação de uma nova junta mecânica esférica que permita bom espaço de trabalho e não opere em suas singularidades. Duas alternativas foram propostas.

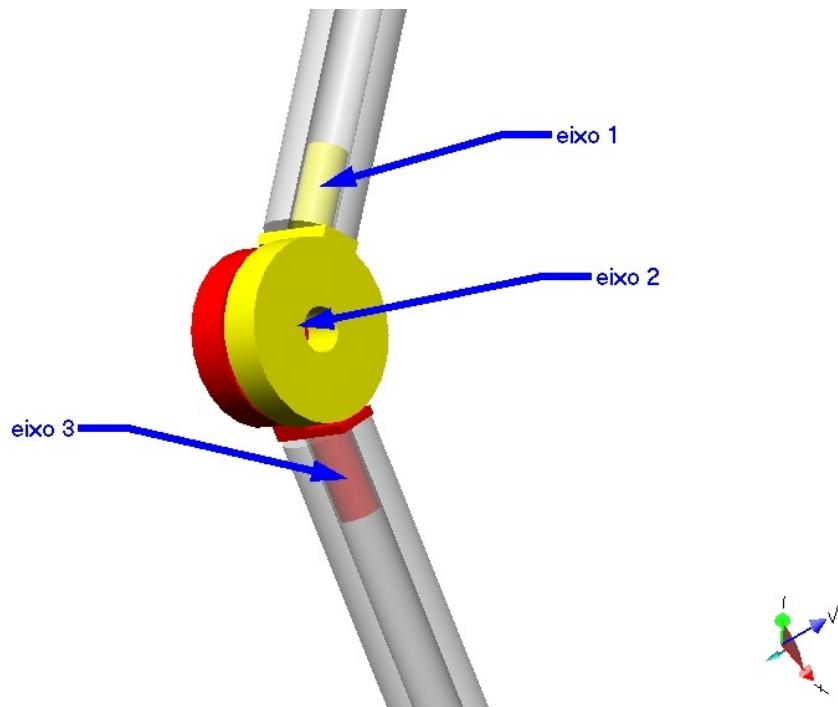


Figura 3 - Proposta de junta universal baseada em articulações

Esta junta (Figura 3) foi baseada em articulações de bonecos de brinquedo, sua arquitetura tem dois dos três eixos das juntas rotativas concorrentes em um ponto (eixos 1 e 3), e um terceiro (eixo 2) coincidente neste mesmo ponto e perpendicular ao plano formado pelos dois eixos, sendo que os eixos 1 e 3 se movem pelo plano ao redor do eixo 3.

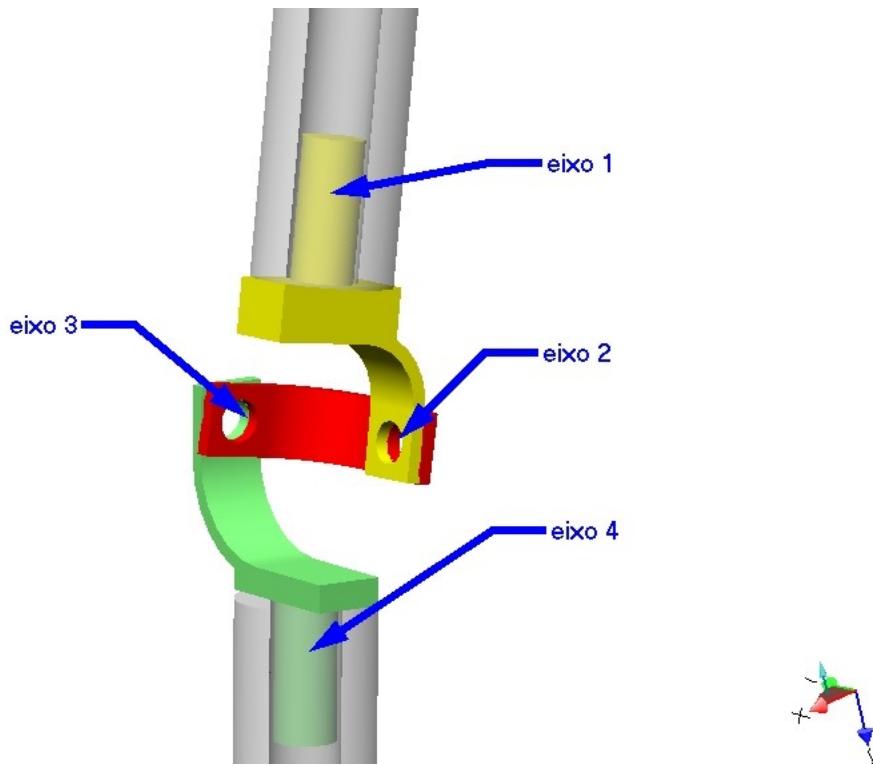


Figura 4 - Proposta de junta universal

A segunda junta, acima (Figura 4), foi baseada em uma junta universal. A sua arquitetura contém os três eixos das três juntas de rotação coincidentes em um ponto e perpendiculares entre si, sendo dois sempre perpendiculares em qualquer movimento (eixo 2 e 3) e outro (eixo 1) se mantendo coincidente, porém percorrendo um espaço esférico. Há ainda uma quarta junta rotativa, mas esta, apenas deixaria a junta esférica redundante, uma vez que pelo cálculo de mobilidade, podemos provar que ela deixaria a junta com mobilidade igual a 4.

Ainda para a primeira junta, sua singularidade (extremamente não desejável) ocorre quando há o alinhamento do eixo 1 com o eixo 3, podendo causar um movimento que leve à quebra da junta, como mostrado na Figura 5 a seguir.

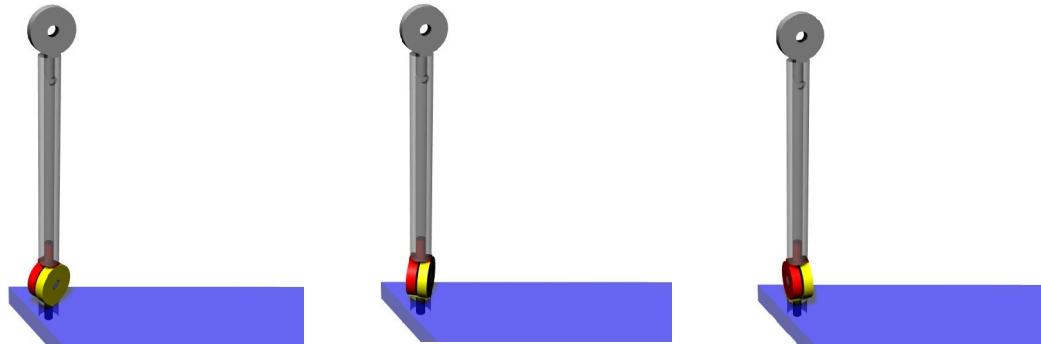
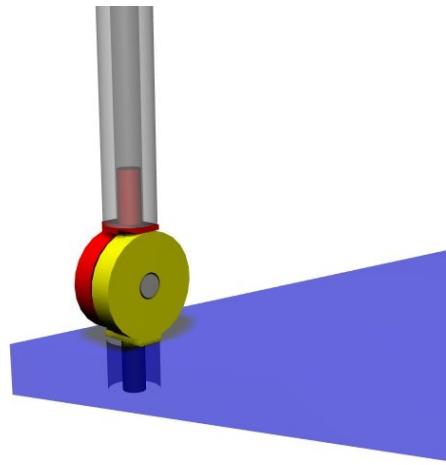


Figura 5 - Singularidade da junta 1

Para a segunda junta, sua singularidade se dá quando há o alinhamento entre o eixo 2 e 1, ou 3 e 1, como mostrado na Figura 6 a seguir.

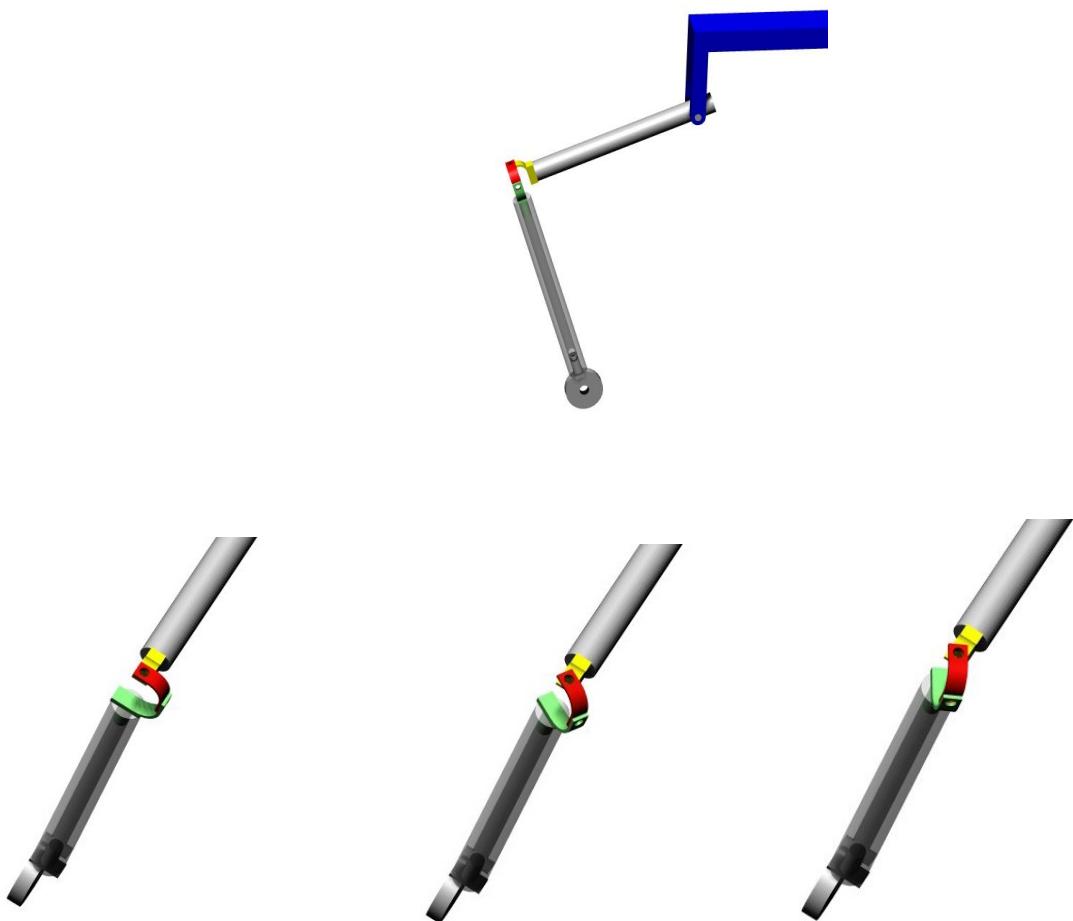


Figura 6 - Singularidade da junta 2

Após esse estudo prévio, podemos concluir que as juntas 1 e 2 mostraram-se bastante antagônicas (com suas singularidades ocorrendo em configurações complementares).

Com o seu estudo de mobilidade e singularidade feito, os alunos se concentraram em sua análise e fabricação mecânica. Primeiramente se fazia necessário um estudo de freqüências naturais com seus modos de vibrar e rigidez. Para isso foi utilizado o software ANSYS. Para essa análise utilizamos o software SOLIDWORKS para o desenho em CAD da junta como um sólido. A Figura 7 abaixo ilustra os desenhos.

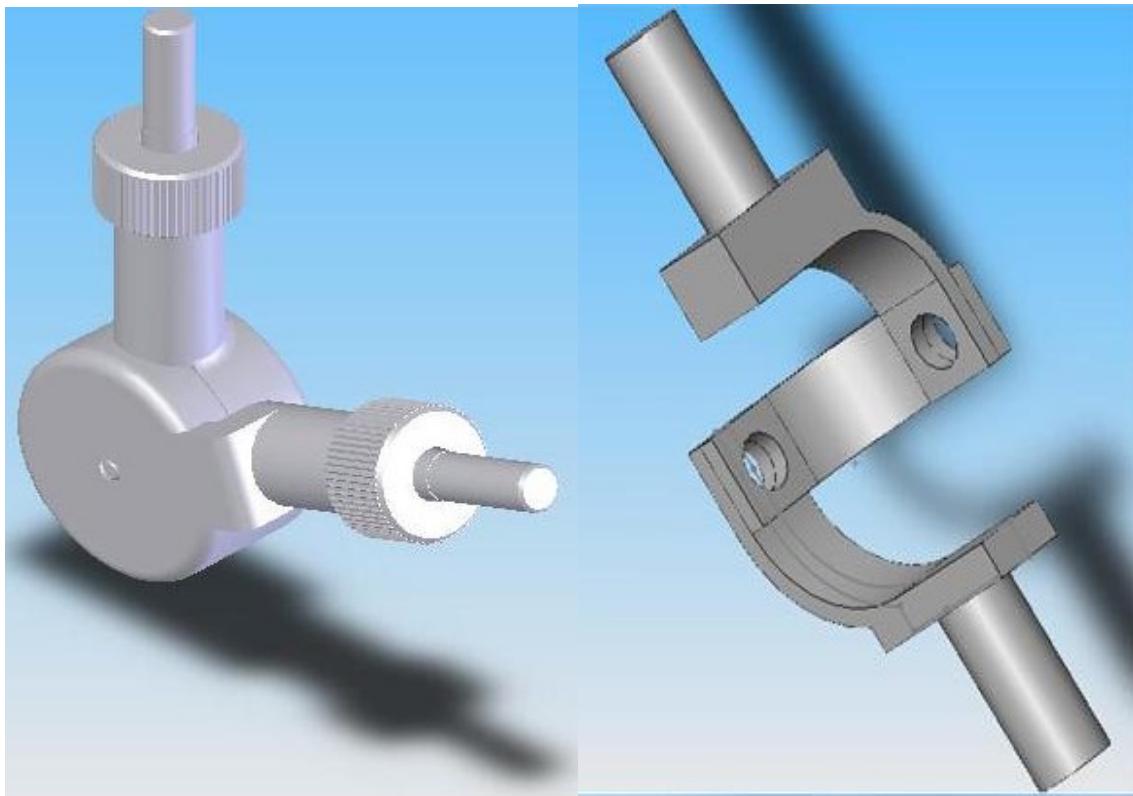


Figura 7 - Juntas esférica propostas

3.1 Análises das Juntas

A seguir serão mostrados os resultados obtidos segundo análises feitas pelo software ANSYS Workbench. Para a junta 1 será feita uma malha com 138.615 nós e 75.242 elementos tetraédricos como mostrado na figura 8.

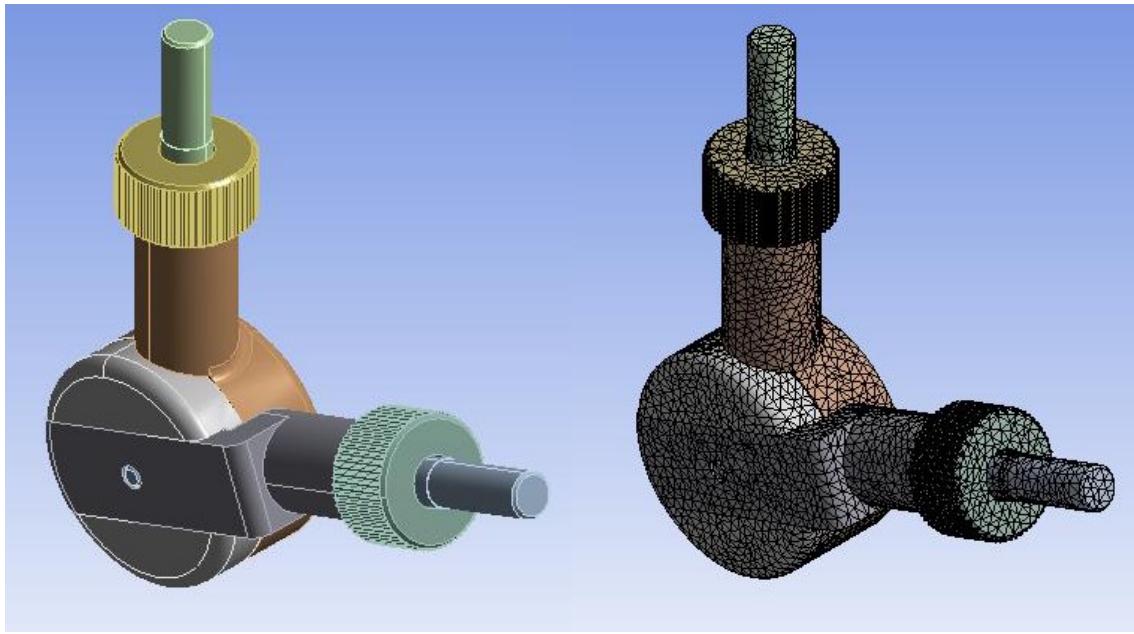


Figura 8 - Junta 1 com malha de 138.615 nós e 75.242 elementos

Para a análise estática consideramos o eixo superior fixo e uma força de 20 N aplicada na direção do segundo eixo, como resultado a junta se deforma atingindo um pico máximo de 0,01772 mm, como mostrado na figura 9.

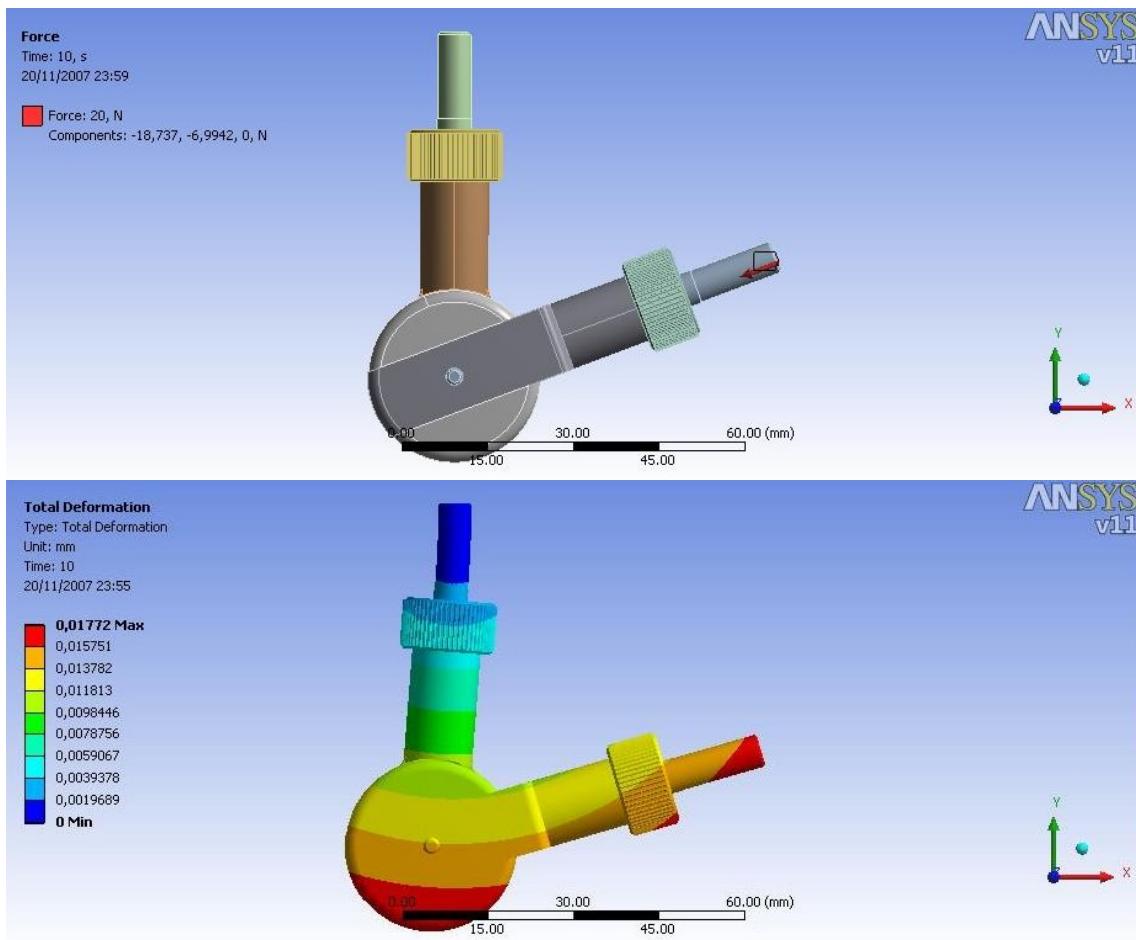


Figura 9 - Análise estática

A distribuição de tensão na junta 1 se concentra no eixo fixo e atinge um pico de 103 MPa, duas vezes menor do que na junta 2, e abaixo da tensão escoamento, como mostrado na figura 10.

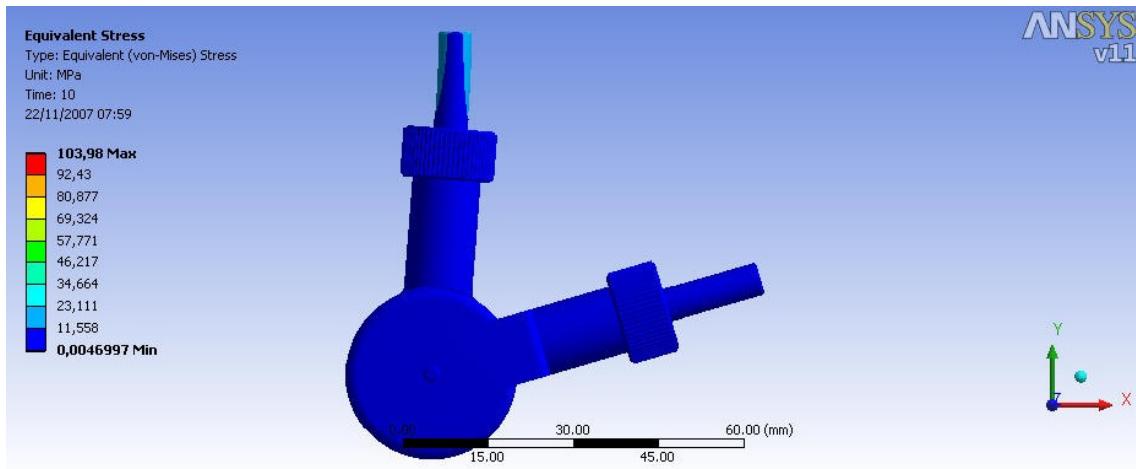


Figura 10 - Distribuição de tensão na junta 1

Para a análise modal da junta 1, fixamos novamente a extremidade superior e deixamos a outra livre. As figuras 11 e 12 mostram o resultado obtido.

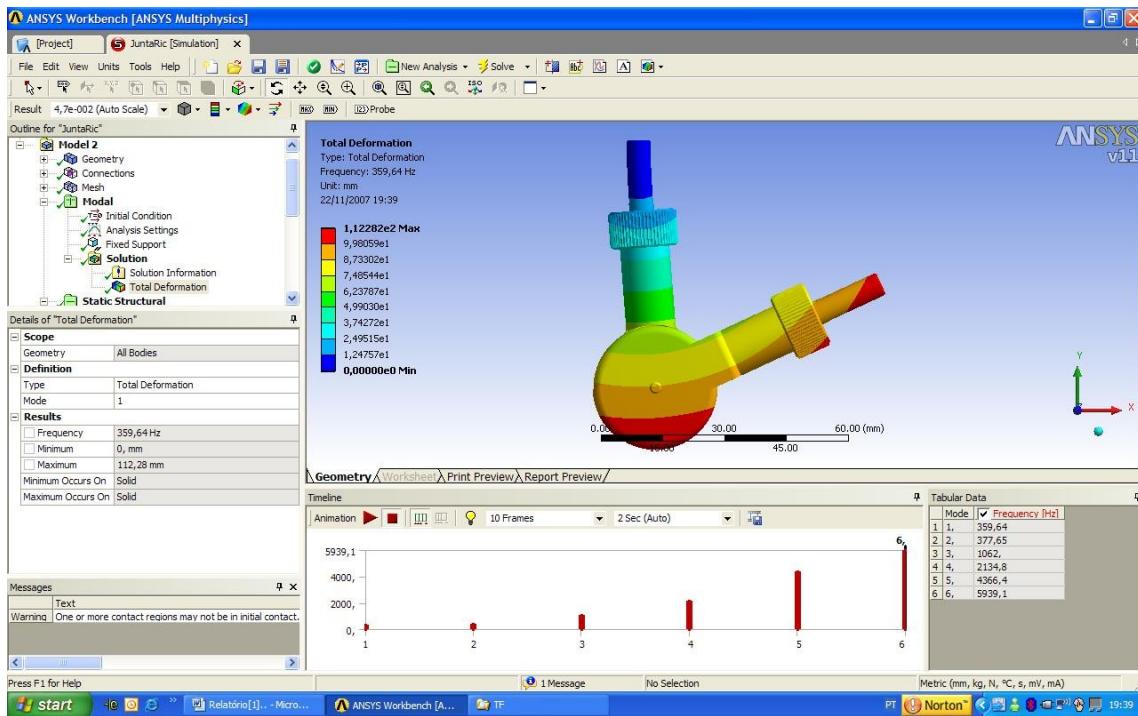


Figura 11 - Resultado da analise modal

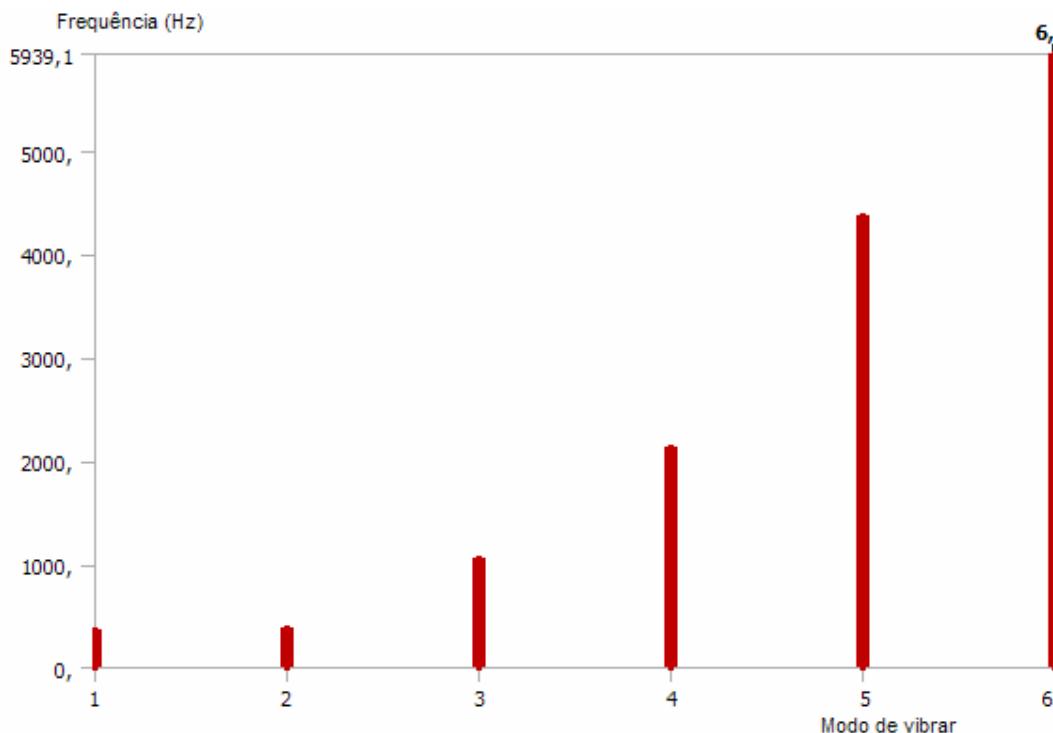


Figura 12 - Freqüência x modo de vibrar junta1

Tabela 1 – Freqüências naturais junta1

Mode	Frequency [Hz]
1,	359,64
2,	377,65
3,	1062,
4,	2134,8
5,	4366,4
6,	5939,1

Como pode ser observado, a freqüência natural do 1º modo de vibrar esta na faixa de 360Hz e para o robô isto não será limitante.

O primeiro modo de vibrar esta no plano dos eixos concorrentes da junta como mostrado na figura 13.

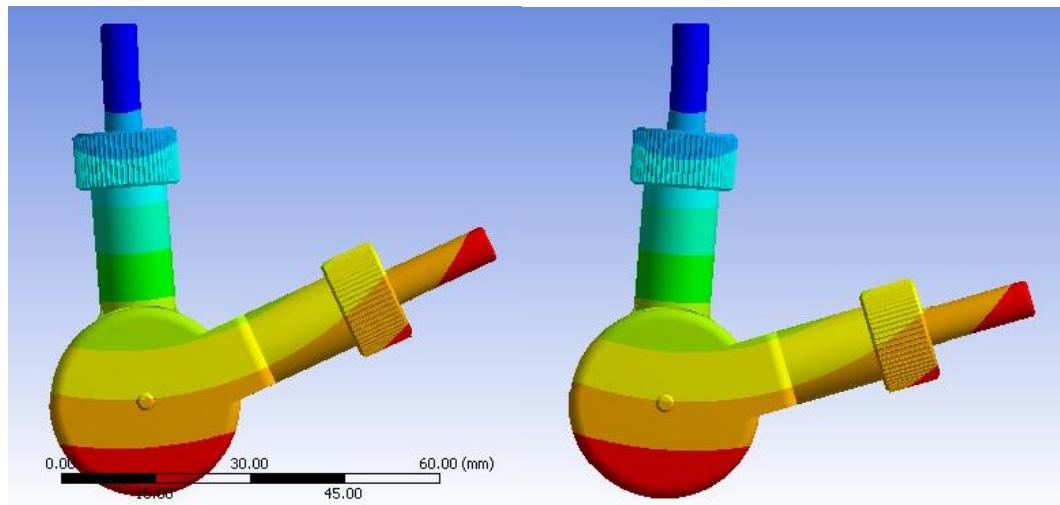


Figura 13 - 1º Modo de vibrar

O segundo modo de vibrar esta no plano perpendicular ao 1º modo de vibrar como pode ser observado na figura 14.

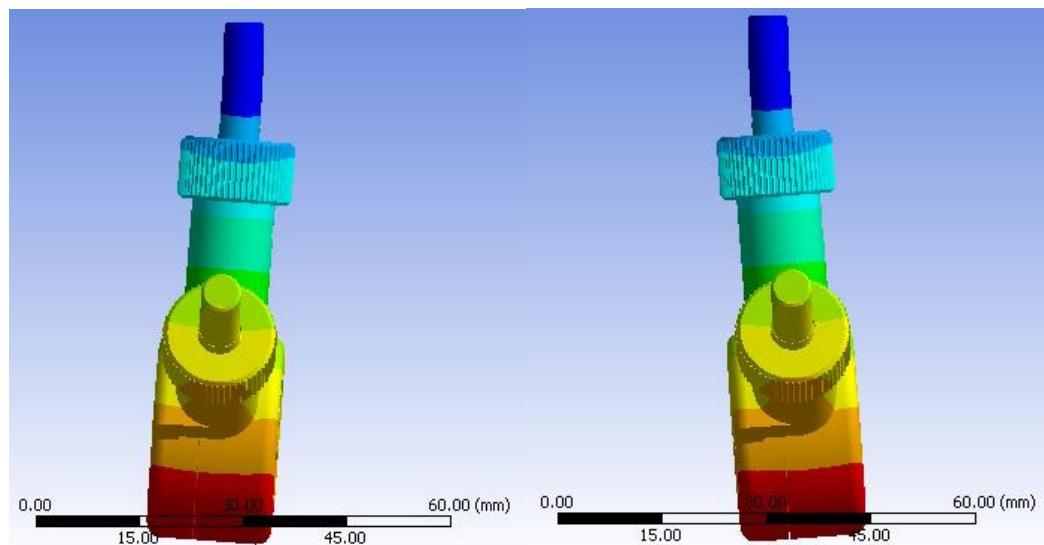


Figura 14 - 2º Modo de vibrar

Análise modal da junta 2, com 11.167 nós e 5.662 elementos tetraédricos, novamente fixamos uma das extremidades e deixamos a outra extremidade livre.

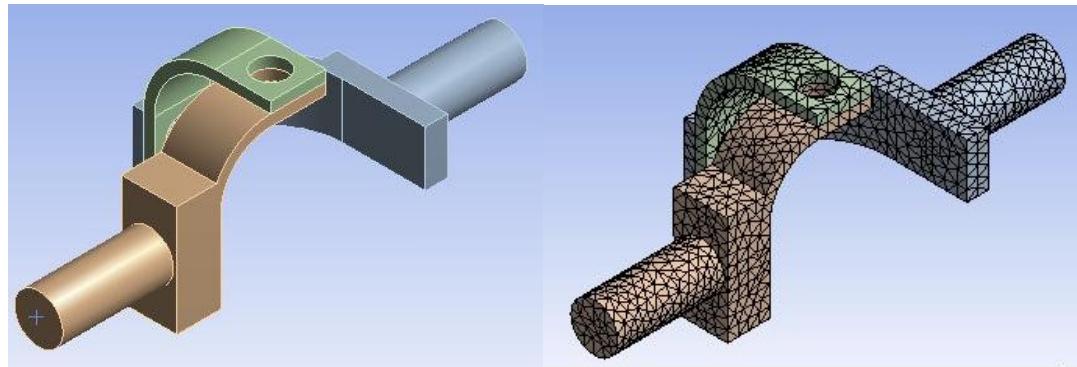


Figura 15 - Junta 2 com malha de 11.167 nós e 5.662 elementos

Para a análise estática restringimos um eixo da junta e aplicamos uma força de 20N. O deslocamento foi de 0,79362mm como mostrado na figura 16, esse deslocamento é bem maior que o 0,01772mm de deslocamento da outra junta. Esse deslocamento de 0,79mm irá provocar um desalinhamento dos eixos da junta, essa é mais uma razão para não utilizar a junta 2 no robô.

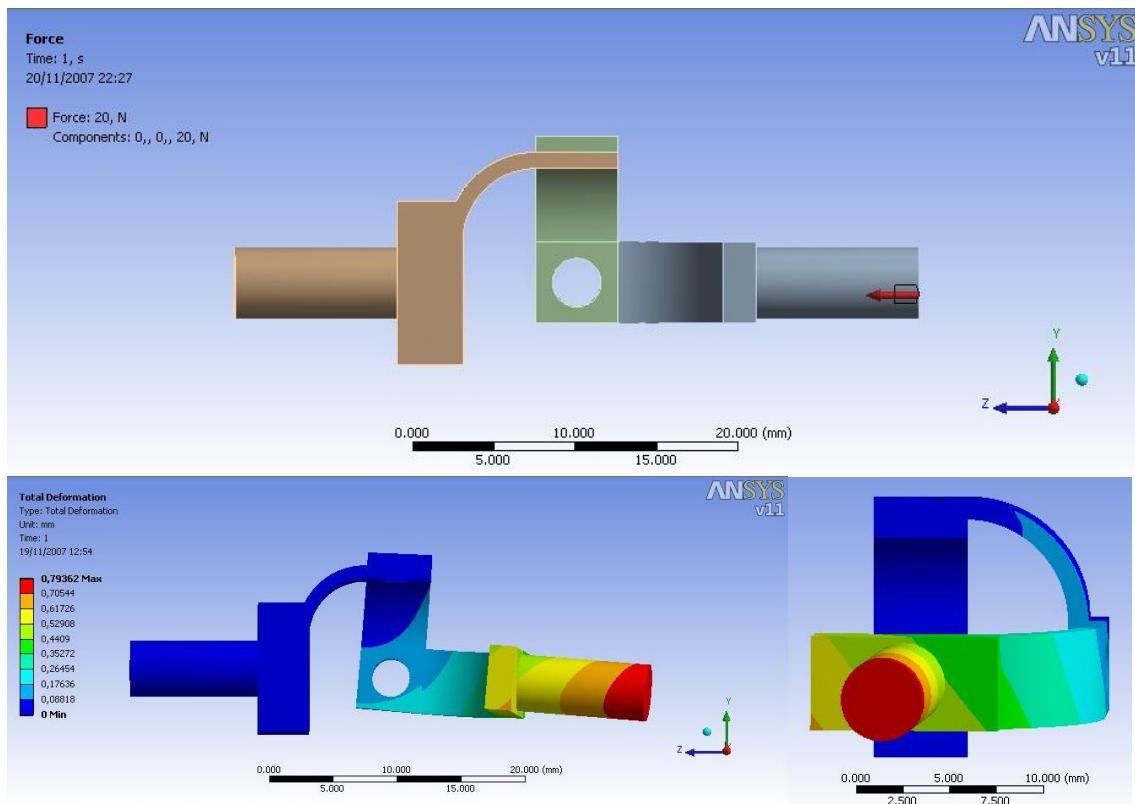


Figura 16 - Análise estática

A tensão máxima na junta foi de 259,97 MPa, bem acima dos 103 Mpa da junta 1, e próxima de tensão de escoamento do aço.

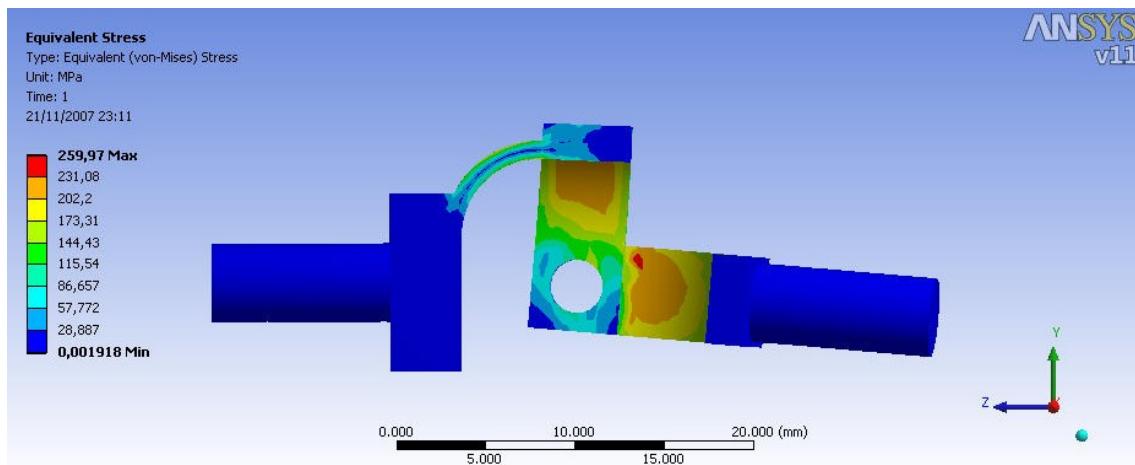


Figura 17 - Distribuição de tensão na junta 2

Para a analise modal da junta 2 fixamos uma extremidade e deixamos a outra livre. Como pode ser observado a seguir nas figuras 18 e 19 as freqüências naturais desta junta são ainda maiores do que da junta 1, e portanto a freqüência natural não será limitante para escolha da junta já que ambas possuem freqüências naturais altas.

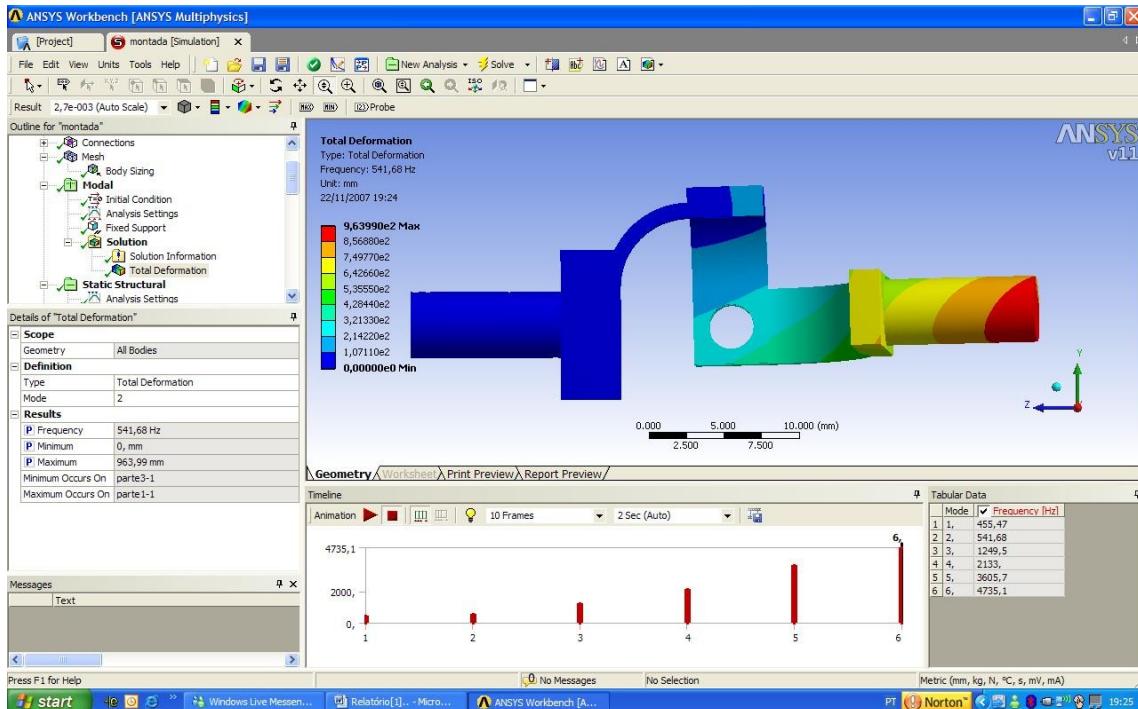


Figura 18 - Resultado obtido pelo ANSYS

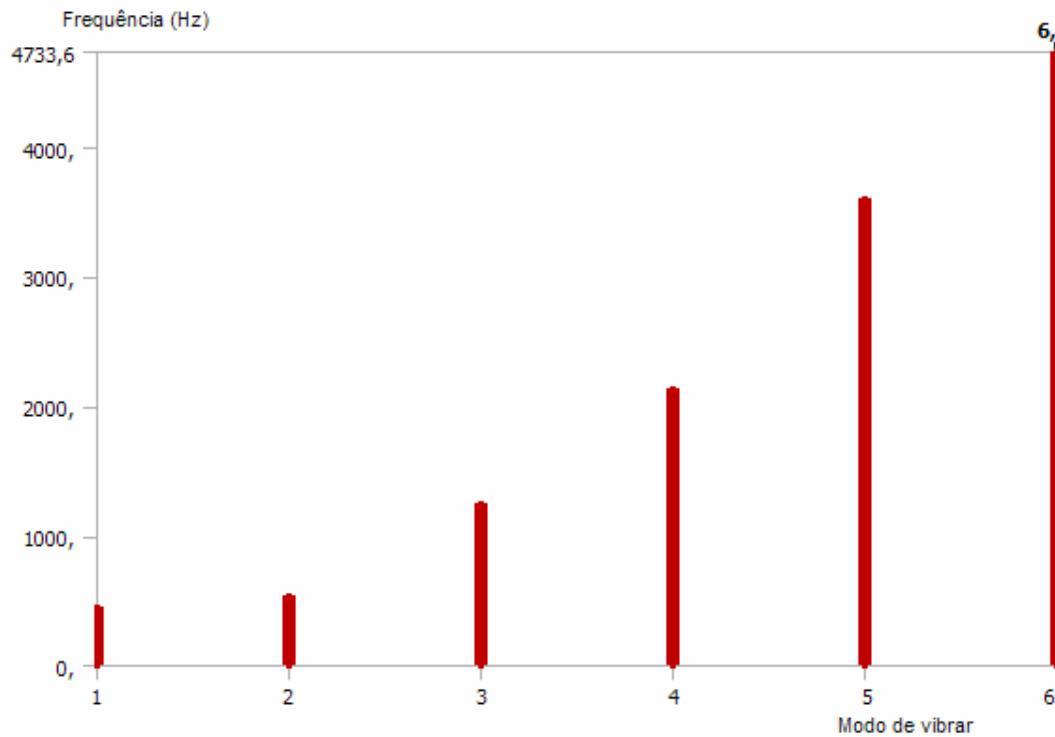


Figura 19 - Freqüência x Modo de vibrar
Tabela 2 – Freqüências naturais junta2

Mode	Frequency [Hz]
1,	455,46
2,	541,64
3,	1249,4
4,	2133,1
5,	3605,6
6,	4733,6

O 1º modo de vibrar da junta será mostrado a seguir na figura 20, e como poderá ser observado na figura 21 o 2º modo de vibrar é perpendicular ao 1º.

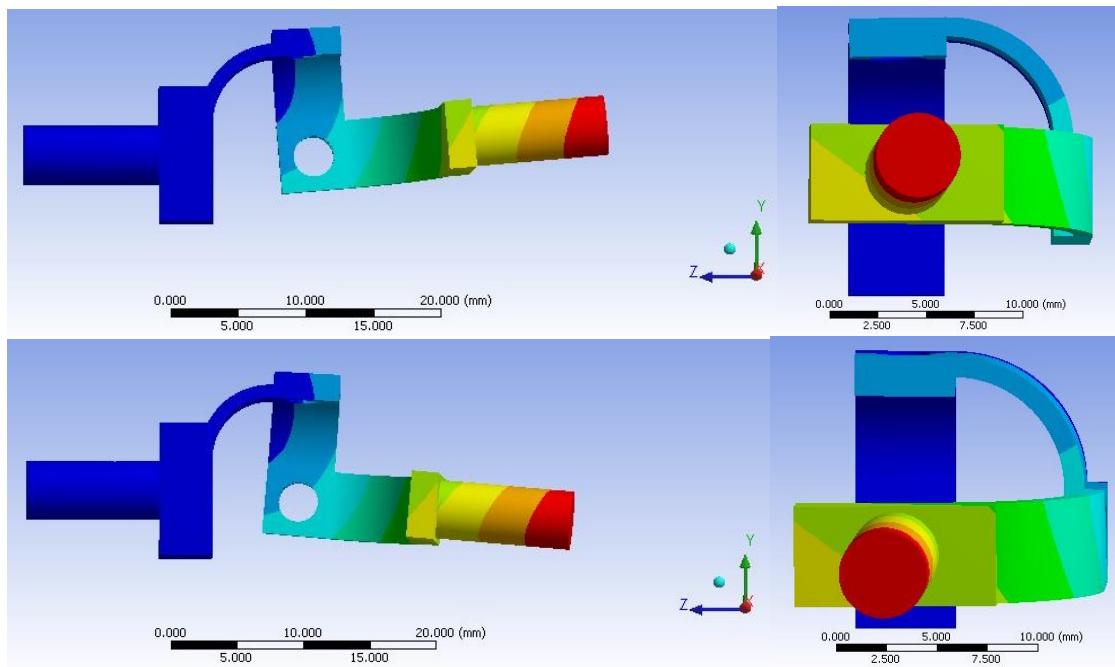


Figura 20 - 1º Modo de vibrar

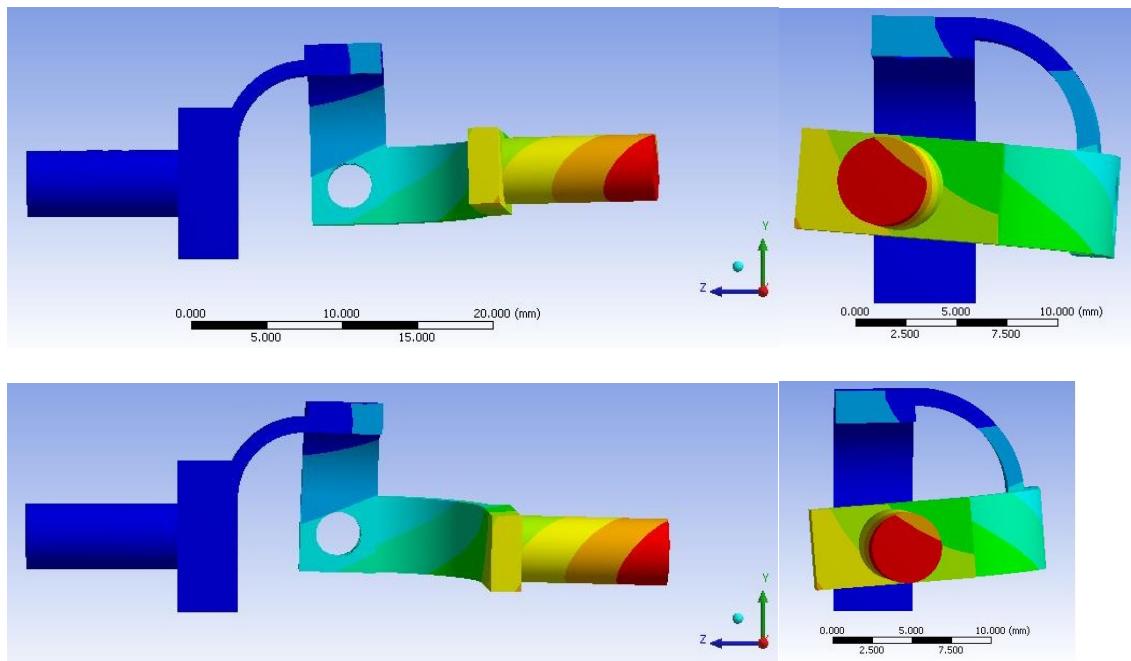


Figura 21 - 2º Modo de vibrar

Portanto as simulações mostraram que a junta 1 é melhor por apresentar menor deformação e tensões, e mesmo apresentando uma freqüência natural um pouco menor do que a junta 2 ela ainda está alta se compararmos aos outros elementos do robô. A junta 2 além de apresentar todos esses problemas também poderia desalinear facilmente os eixos, causando erros de precisão do efetuador final.

4. Subsistema de Controle

Esse tópico não constava no cronograma dos alunos. Contudo, conforme o projeto do robô era discutido entre os alunos e o orientador, viu-se que havia interesse dos alunos em sua implementação. Para a realização do controle, escolheu-se o software LINUX por operar efetivamente em tempo real por possuir a extensão *RT Linux (Real Time Linux)*, que efetivamente opera o controle em tempo real. Contudo, o software não era de conhecimento dos alunos. Foi necessário um estudo sobre sua instalação, configuração e utilização para podermos implementar essa alternativa. Abaixo segue uma explicação mais detalhada sobre os softwares utilizados para o controle.

4.1 REAL-TIME LINUX

O RT-Linux é uma extensão do Linux proposto para dar suporte às tarefas com restrições temporais críticas. O escalonador do RT-Linux trata o sistema operacional Linux como uma tarefa comum. O kernel do Linux é executado apenas quando não existe nenhuma tarefa de tempo real para ser executada e o microkernel de tempo real está inativo. O Linux nunca pode bloquear interrupções ou proteger-se de requisições de interrupções emitidas pelo escalonador do RT-Linux.

Todas as interrupções são inicialmente tratadas pelo microkernel de tempo real, e são passadas para a tarefa Linux somente quando não existem tarefas de tempo real para serem executadas. Para minimizar mudanças no kernel convencional, o hardware que controla interrupções é emulado utilizando-se macros. Assim, quando o kernel convencional desabilita interrupções, este evento é

registrado pelo software que emula o controlador de interrupções, mas estas não são realmente desabilitadas. Desta forma, o kernel convencional não possui controle direto sobre as interrupções, sendo todas tratadas pelo microkernel de tempo real.

RT-Linux foi projetado para que nunca espere a liberação de recursos alocados pelo Linux. O microkernel de tempo real não requisita spinlocks compartilhados, ou estruturas de dados sincronizadas, exceto em situações muito controladas. Por exemplo, tarefas de tempo real e tarefas convencionais podem comunicar-se através de filas sem bloqueio e memória compartilhada. As filas, chamadas de RT-FIFO, são buffers utilizados para a troca de mensagens, projetadas de tal forma que tarefas de tempo real nunca são bloqueadas.

Os serviços oferecidos pelo microkernel de tempo real são mínimos: tarefas com escalonamento baseado em prioridades fixas e alocação estática de memória. A comunicação entre tarefas de tempo real utiliza memória compartilhada e a sincronização pode ser realizada desabilitando as interrupções de hardware. Existem módulos de kernel opcionais que implementam outros serviços, tais como um escalonador EDF e implementação de semáforos. O mecanismo de módulos de kernel do Linux permite que novos serviços sejam disponibilizados para as tarefas de tempo real. Entretanto, quanto mais complexos estes serviços mais difícil será prever o comportamento das tarefas de tempo real.

Seu modo de operação é exemplificado na Figura 22 abaixo:

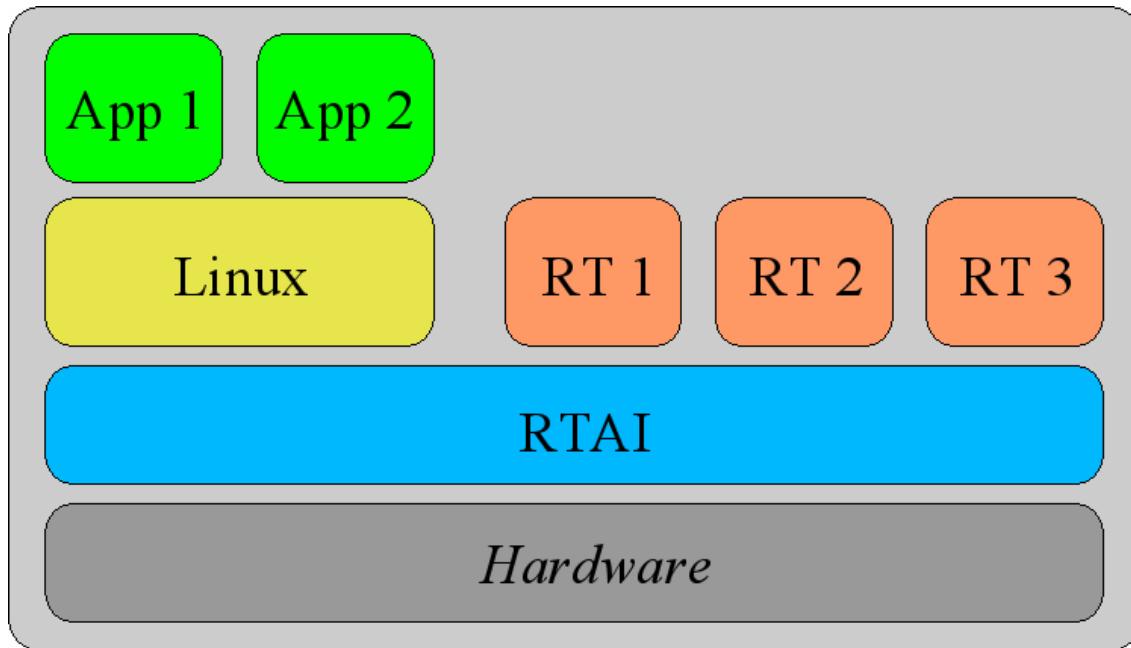


Figura 22 - Modo de operação RT-Linux

Devido às características descritas e por apresentar licença free, o RT-Linux se torna ideal para o controle de projetos mecatrônicos como é o caso desse projeto.

4.2 EMC2

Para o controle dos motores do mecanismo escolheu-se utilizar o software EMC2 (Enhanced Machine Controller 2) por ser um software livre que permite o controle de até seis motores, o que inclui desde máquinas fresadoras, tornos, a robôs hexapod.

Para a configuração do EMC2 utiliza-se o *Hardware Abstract Layer (HAL)*. Simplificadamente, o HAL é uma maneira de carregar e interconectar “blocos” de hardware no sistema. No caso do nosso mecanismo, seus motores de passo.

Ele é baseado nos mesmos princípios do design de circuitos e sistemas, ou seja, para um sistema CNC suas partes devem estar conectadas (motores, servos, encoders) e ligadas a um controle central.

Para o nosso caso, interligamos os motores de passo e a saída da porta paralela com sua pinagem no EMC2 utilizando o HAL.

Por default, o EMC2 vem configurado para controlar uma máquina de 3 eixos com cinemática inversa trivial como, por exemplo, uma fresadora. No caso de um robô paralelo, porém, a cinemática inversa é bem mais complexa e exigirá uma configuração específica do software.

O manual do usuário explica detalhadamente cada parâmetro utilizado em seu arquivo de inicialização (stepper_mm.ini). Nele, todos os parâmetros da máquina estão agrupados por seções, totalizando nove seções como ilustrado abaixo.

[EMC]

Seção utilizada para definir as ligações do HAL, como já foram definidos os motores de passo como constituintes da máquina anteriormente, essa seção não será editada.

[DISPLAY]

DISPLAY = axis

Nessa seção são definidos o tempo de ciclo da visualização, e a interface com o usuário. Existem cinco no total: keysick, tkemc, mini, xemc e axis. Escolheu-se “axis” por ser a mais amigável e se poder carregar programas CNC e também mover manualmente cada motor individualmente.

[TASK]

TASK = milltask

Essa seção define o interpretador de código G.

[EMCMOT]

EMCMOT = motmod.o

Define o modulo de controle de movimento. Para motores de passo, há três opções: steppermod.o, freqmod.o e motmod.o, que é o mais abrangente.

[HAL]

HALFILE = core_stepper.hal

HALFILE = standard_pinout.hal

Define os arquivos .hal que serão utilizados. No nosso caso, um bloco para motores de passo e outro para a porta paralela.

[TRAJ]

COORDINATES = X Y (define o número de eixos da máquina)

HOME = 0 0 (define o HOME da máquina)

LINEAR_UNITS = mm (sistema métrico utilizado, milímetros ou polegadas)

ANGULAR_UNITS = degree (sistema angular, ângulos ou radianos)

CYCLE_TIME = 0.010 (freqüência de clock do sistema)

DEFAULT_VELOCITY = 0.424 (Velocidade padrão do motor)

MAX_VELOCITY = 0.5 (velocidade máxima do motor)

DEFAULT_ACCELERATION = 5.0 (Aceleração padrão do motor)

MAX_ACCELERATION = 8.0 (aceleração máxima do motor)

Seção que contém os parâmetros gerais para o cálculo da trajetória.

[AXIS_0]

TYPE = ANGULAR (Tipo do eixo, angular ou linear)
UNITS = 1 (Unidades em graus para uma unidade)
INPUT_SCALE = 200 (Número de pulsos que deve ser dado ao motor para que o eixo se desloque uma UNIT)

Seção que contém os parâmetros gerais para cada eixo individualmente.

[EMCIO]

EMCIO = io (Nome do controlador de IO)

Seção dos parâmetros gerais do controle de IO

4.3 Sistema Operacional para o EMC2

Para sua utilização é necessário que seja instalada uma versão de distribuição do LINUX, a priori qualquer.

Seguindo sugestões do próprio site do EMC, a distribuição escolhida foi o UBUNTU 6.0.LTS, considerada uma versão estável desse Sistema Operacional.

Essa versão encontra-se em www.ubuntu.com. A versão escolhida é própria do EMC e já vem com o software pré-instalado, pronto para o uso.

Para facilitar a utilização do LINUX, optou-se por emulá-lo sob o WINDOWS utilizando o software chamado VMware, que pode ser encontrado em www.vmware.com. A emulação

A Figura 23 abaixo ilustra o emulador.



Figura 23 - LINUX emulado em ambiente WINDOWS

A vantagem de se usar o emulador é a agilidade e praticidade de troca de sistema operacional LINUX – WINDOWS, WINDOWS - LINUX em poucos segundos.

Dessa maneira, perdeu-se a característica desejada de tempo real. Contudo seu uso foi limitado apenas para familiarização e configuração do software.

Para testarmos o protótipo, foi necessária a efetiva instalação e configuração do LINUX e RT-LINUX. Os desenvolvedores do EMC disponibilizaram uma versão do UBUNTU para o EMC (“emc2-ubuntu6.06-desktop-i386”). Nessa versão, os pacotes do RT_LINUX já vêm pré-instalados juntamente com o EMC. É a maneira mais fácil de se configurar essas interfaces visto que seus scripts de instalação já vêm em um único pacote.

Sua instalação é feita padrão e ao seu término o sistema operacional já está configurado com o RT-LINUX e o EMC instalado. Essa versão poupa o trabalho de configurar uma extensão tempo-real sob o LINUX que pode ser trabalhosa.

4.4 Implementação do Controle

O objetivo inicial era configurar o EMC diretamente com a cinemática inversa do robô, o que tornaria possível controlá-lo como ilustra a Figura 24 abaixo. Contudo, essa tarefa mostrou-se muito trabalhosa e foi adotada a alternativa descrita na Figura 25, na qual se utiliza um programa auxiliar que efetua os cálculos da cinemática inversa, feito em MATLAB (ANEXO1), e fornece as posições angulares dos atuadores em função da posição do efetuador no espaço.

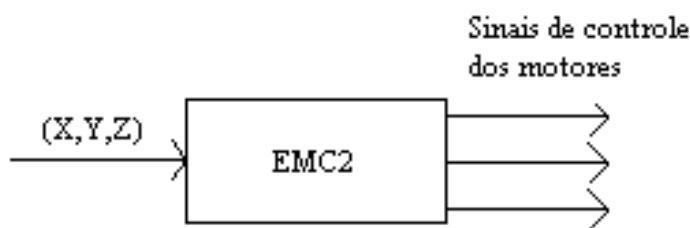


Figura 24 - Implementação direta

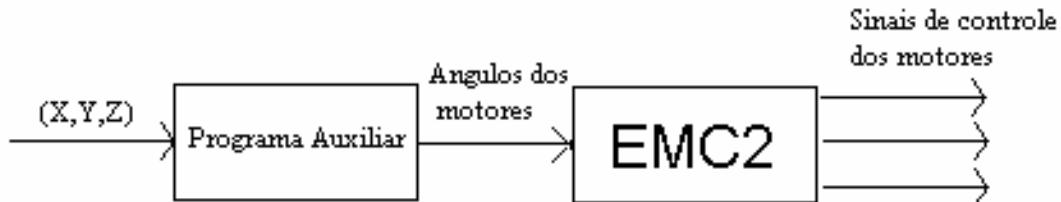


Figura 25 - Implementação adotada

Para tal, necessita-se da cinemática inversa do robô. Podemos obtê-la de forma contínua teoricamente (ANEXO2) ou de forma discreta gerando um conjunto de pontos correlacionando o espaço de trabalho (x,y,z) com os ângulos dos motores utilizando o software Visual Nastran. Optamos pelas duas alternativas para podermos comparar seus resultados.

Para gerarmos seu controle discretamente primeiramente foi necessário desenhar o protótipo no software Visual Nastran e posteriormente gerar seu espaço de trabalho para depois ser possível gerar a correlação posição-ângulo dos motores. As Figuras 26, 27 e 28 apresentam o espaço de trabalho gerado.

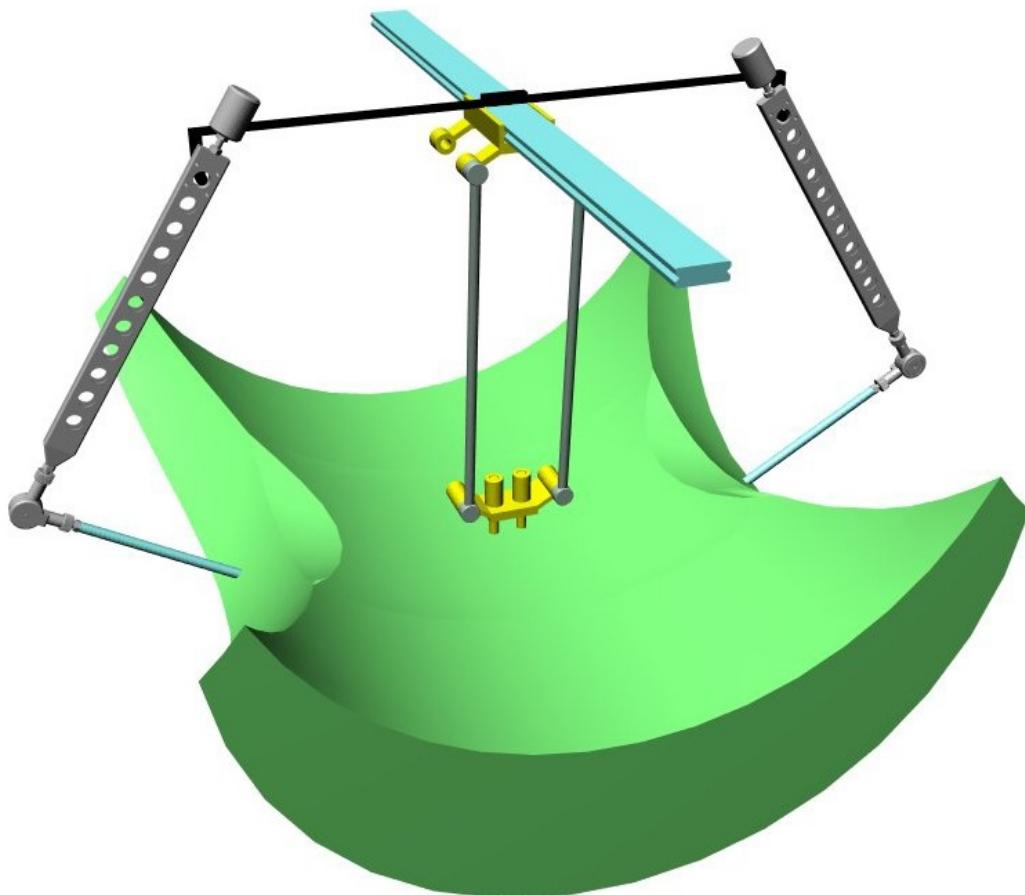


Figura 26 - Espaço de Trabalho vista superior

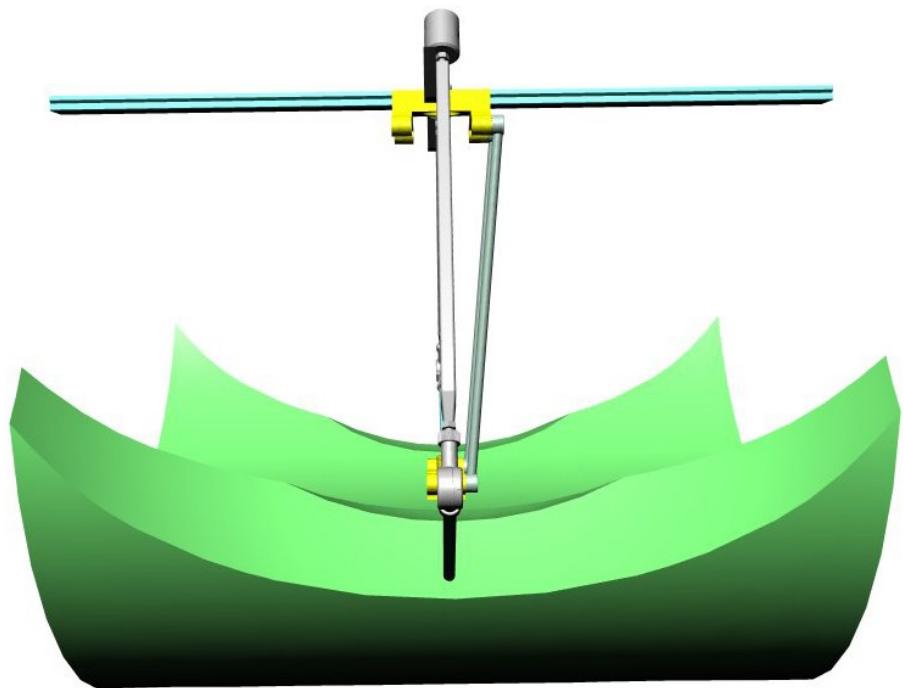


Figura 27 - Espaço de Trabalho vista lateral

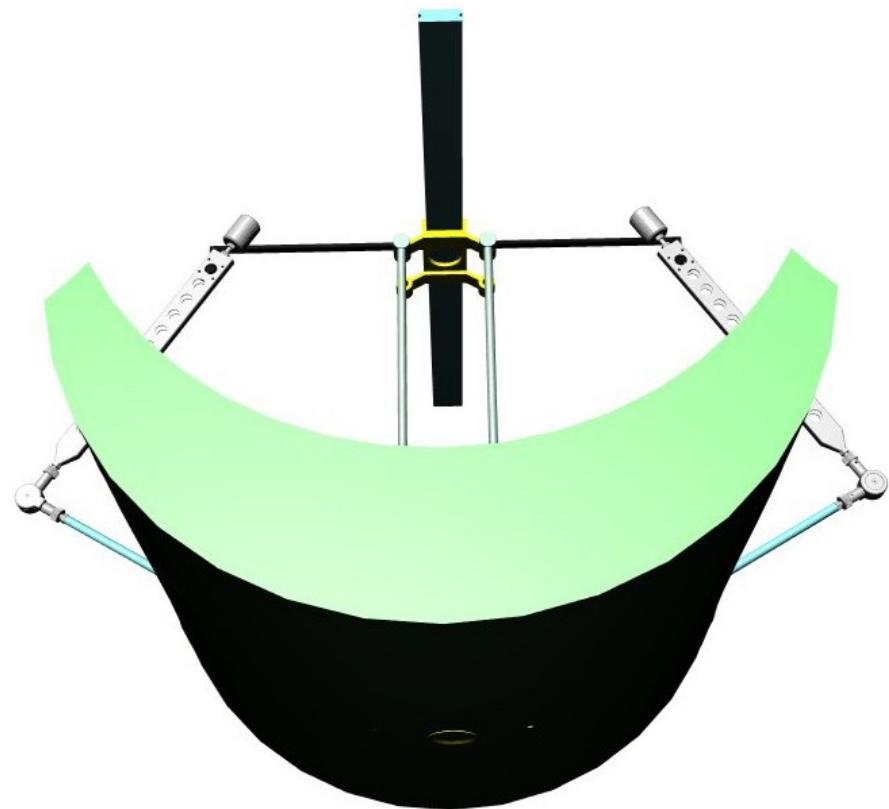


Figura 28 - Espaço de Trabalho vista inferior

Com seu modelo desenhado e seu espaço de trabalho gerado foi possível obter uma tabela com a correlação posição do efetuador - ângulo dos motores.

A Tabela 3 abaixo exemplifica a tabela gerada.

Tabela 3 - Correlação discreta da Cinemática Inversa

x(mm)	y(mm)	z(mm)	motor esq	tempo(s)	ângulo (graus)	motor dir	tempo(s)	ângulo (graus)	junta esq	tempo(s)	ângulo da junta (não pode ser menor que 45 graus)
0	0	-557,477		0	32,37154589		0	32,37154589		0	88,24670549
35	18,90201	-556,983		0,1	29,50566496		0,1	29,50566496		0,1	89,78808784
70	34,87388	-555,795		0,2	26,63209505		0,2	26,63209505		0,2	91,54904808
105	47,63544	-554,333		0,3	23,75483312		0,3	23,75483312		0,3	93,50903061
140	56,87241	-552,987		0,4	20,87579838		0,4	20,87579838		0,4	95,66984159
175	62,19474	-552,101		0,5	17,99591239		0,5	17,99591239		0,5	98,02814332
210	63,081	-551,946		0,6	15,11561766		0,6	15,11561766		0,6	100,5686449
245	58,79261	-552,678		0,7	12,23512665		0,7	12,23512665		0,7	103,254719
280	48,22703	-554,255		0,8	9,354541406		0,8	9,354541406		0,8	106,0108038
315	29,63609	-556,264		0,9	6,473910906		0,9	6,473910906		0,9	108,6860021
350	-0,00553	-557,478		1	3,593254383		1	3,593254383		1	110,9689771
350	-0,0038	-557,477		1,1	3,593261813		1,1	3,593261813		1,1	110,9688936
350	-0,00226	-557,477		1,2	3,593268512		1,2	3,593268512		1,2	110,9688109
350	-0,00122	-557,477		1,3	3,593273021		1,3	3,593273021		1,3	110,9687552
350	-0,00073	-557,477		1,4	3,59327521		1,4	3,59327521		1,4	110,9687284
350	-0,00049	-557,477		1,5	3,593276286		1,5	3,593276286		1,5	110,9687155
350	-0,00037	-557,477		1,6	3,593276828		1,6	3,593276828		1,6	110,9687093
350	-0,00032	-557,477		1,7	3,593277112		1,7	3,593277112		1,7	110,9687063
350	-0,00029	-557,477		1,8	3,593277273		1,8	3,593277273		1,8	110,9687049
350	-0,00028	-557,477		1,9	3,593277375		1,9	3,593277375		1,9	110,9687042
350	-0,00027	-557,477		2	3,593277445		2	3,593277445		2	110,9687039
350	-27,5242	-556,43		2,1	7,913613352		2,1	7,913613352		2,1	108,7764478
350	-54,7195	-553,322		2,2	12,23394923		2,2	12,23394923		2,2	106,5104882
350	-81,4564	-548,205		2,3	16,55428523		2,3	16,55428523		2,3	104,1829157
350	-107,605	-541,136		2,4	20,8746213		2,4	20,8746213		2,4	101,8051007
350	-133,036	-532,18		2,5	25,1949574		2,5	25,1949574		2,5	99,38780126
350	-157,623	-521,411		2,6	29,51529351		2,6	29,51529351		2,6	96,94126688
350	-181,245	-508,911		2,7	33,83562963		2,7	33,83562963		2,7	94,47534363
350	-203,785	-494,77		2,8	38,15596575		2,8	38,15596575		2,8	91,99957953

O espaço de trabalho foi discretizado com mais de 6100 pontos, garantindo uma boa discretização.

5 Construção dos Protótipos

5.1 Construção da Junta

Para exemplificar o funcionamento da junta escolhida, construimos um protótipo simplificado em alumínio e zinco.

5.2 Construção do Mecanismo

Devido à maior abrangência do trabalho e às dificuldades de construção optou-se pela construção do mecanismo apenas no plano XY. Essa opção não diminui o escopo desse estudo, testar o controle para um mecanismo paralelo. O protótipo foi construído na escala 1:2 em madeira do tipo MDF e acrílico conforme pode ser visto nas Figuras 29 a 32 abaixo.

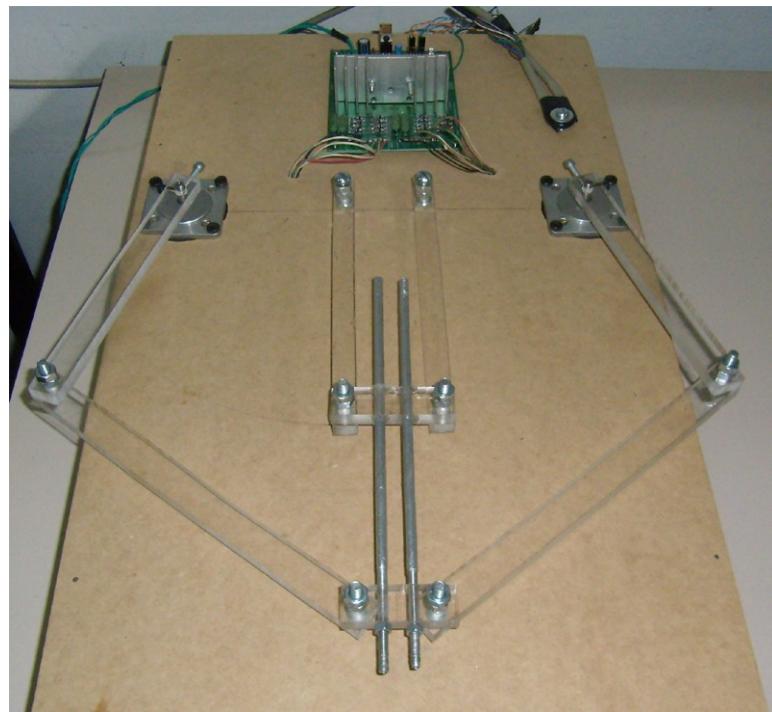


Figura 29 – Protótipo vista1

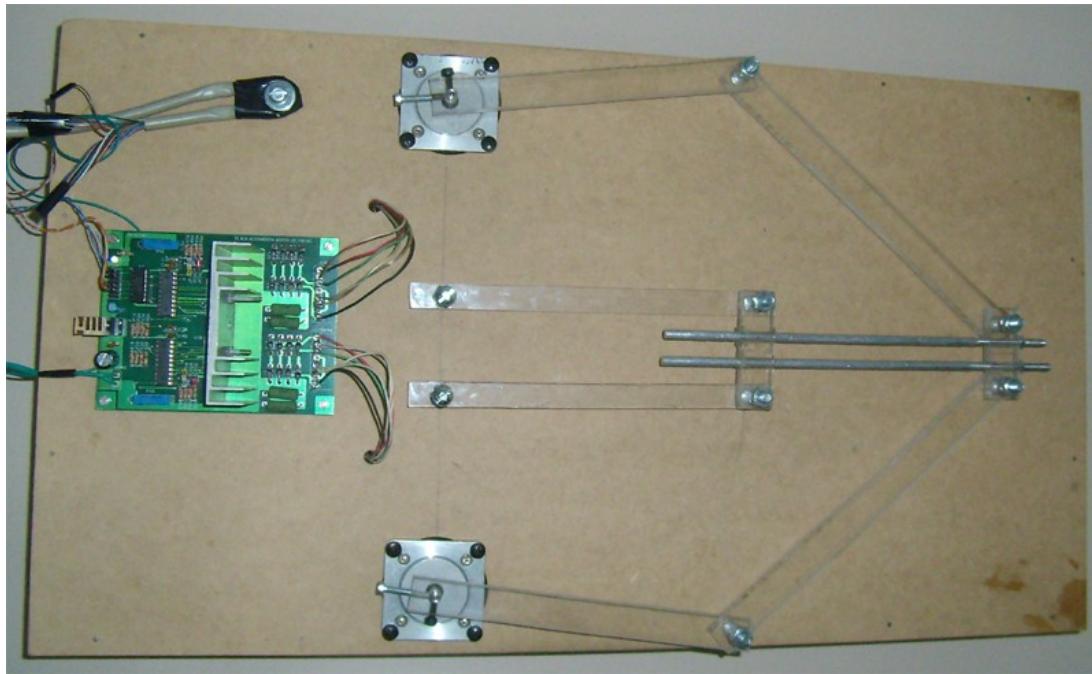


Figura 30 – Protótipo vista2

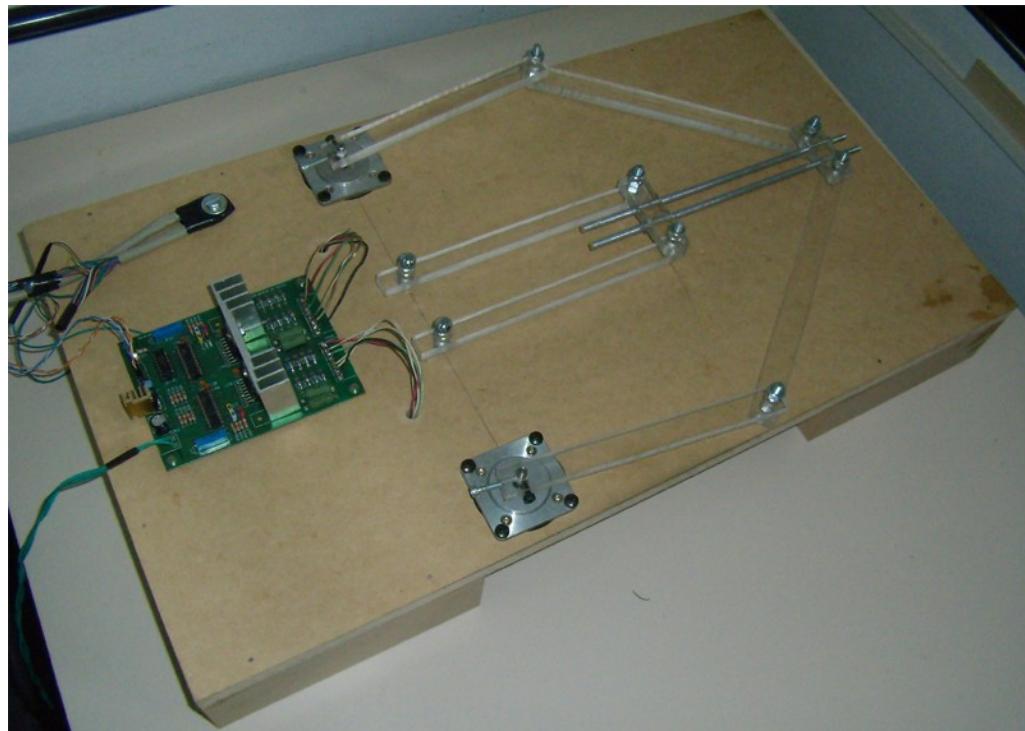


Figura 31 – Protótipo vista3

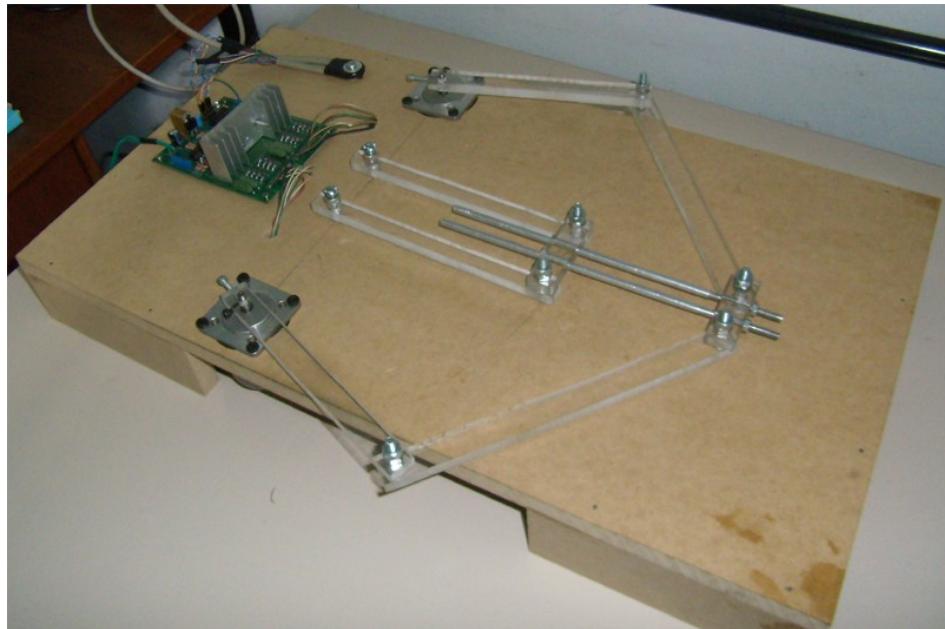


Figura 32 – Protótipo vista4

Contudo, a guia de acrílico em contato com o alumínio causou grande atrito devido ao desalinhamento dos furos. Optou-se, então pela construção mais apurada de uma guia de latão, que apresenta baixo atrito quando em contato com o alumínio, como na figura 33 abaixo.

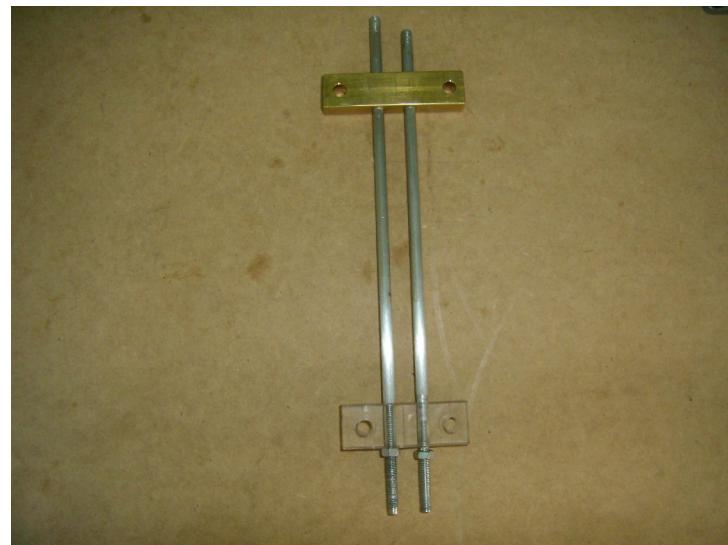


Figura 33 - Junta Alumínio - Latão

Apesar de haver melhorias consideráveis no seu desempenho, o mecanismo ainda apresentava o mesmo problema da junta anterior. Decidiu-se, então, pela utilização de uma junta prismática que eliminaria o problema de desalinhamento e, conseqüentemente, o atrito. Construiu-se a junta ilustrada na figura 34 abaixo. O mecanismo final pode ser observado na figura 35 seguir.



Figura 34 - Junta Prismática em Acrílico

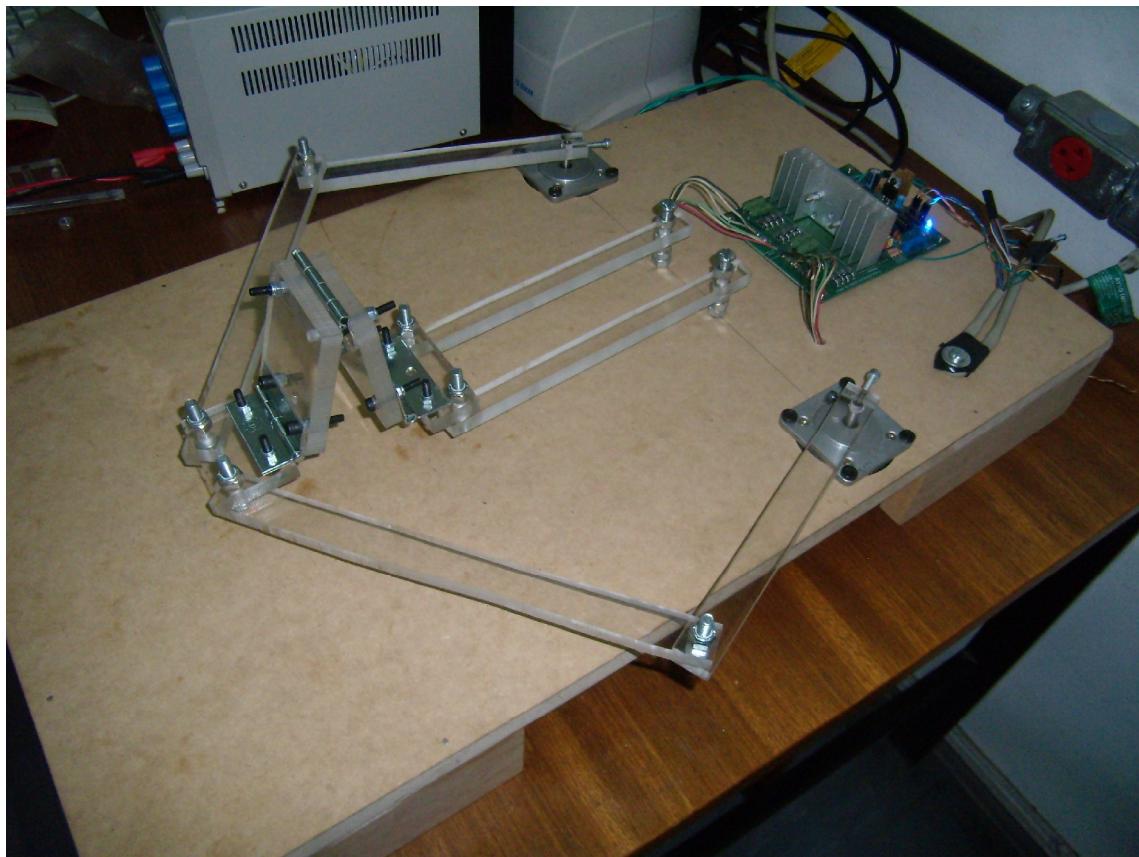


Figura 35 - Protótipo Final

Essa solução eliminou totalmente o problema construcional anterior. Cabe observar que em um protótipo mais refinado esse problema não existiria e poder-se-ia utilizar o mecanismo original.

6. Avaliação dos resultados obtidos

As simulações das juntas nos indicaram que a junta 1 é mais apropriada, pois sua singularidade nunca será atingida, sua deformação é baixa, e sua freqüência natural é alta. Já a junta 2 apresenta altas deformações quando aplicado carga, altas tensões de von Misses, e pode desalinear os eixos perdendo precisão na posição final do braço robótico.

O controle do mecanismo pode ser efetuado tanto da forma analítica, quanto da forma computacional, bastando para tal uma boa discretização do seu espaço de trabalho. Com o programa de interpolação e cálculo de trajetória foi possível uma implementação satisfatória de movimentos.

O software EMC2 rodado sob a extensão RT-LINUX constitui uma ferramenta poderosa para o controle de sistemas e devido à sua grande variedade de parâmetros, possibilidade de montar diversas máquinas para controle e vasta documentação disponível é recomendado para diversas aplicações em engenharia.

A construção do protótipo apresentou algumas dificuldades devido à precisão exigida por algumas partes. Também, cabe observar que a proporção entre as hastas do mecanismo podem ser melhoradas. Qualitativamente falando, se diminuirmos o tamanho da haste1 (figura 36) e aumentarmos ou mantermos o tamanho da haste2, teremos um maior espaço de trabalho e serão necessários menores torques para a movimentação do mecanismo.

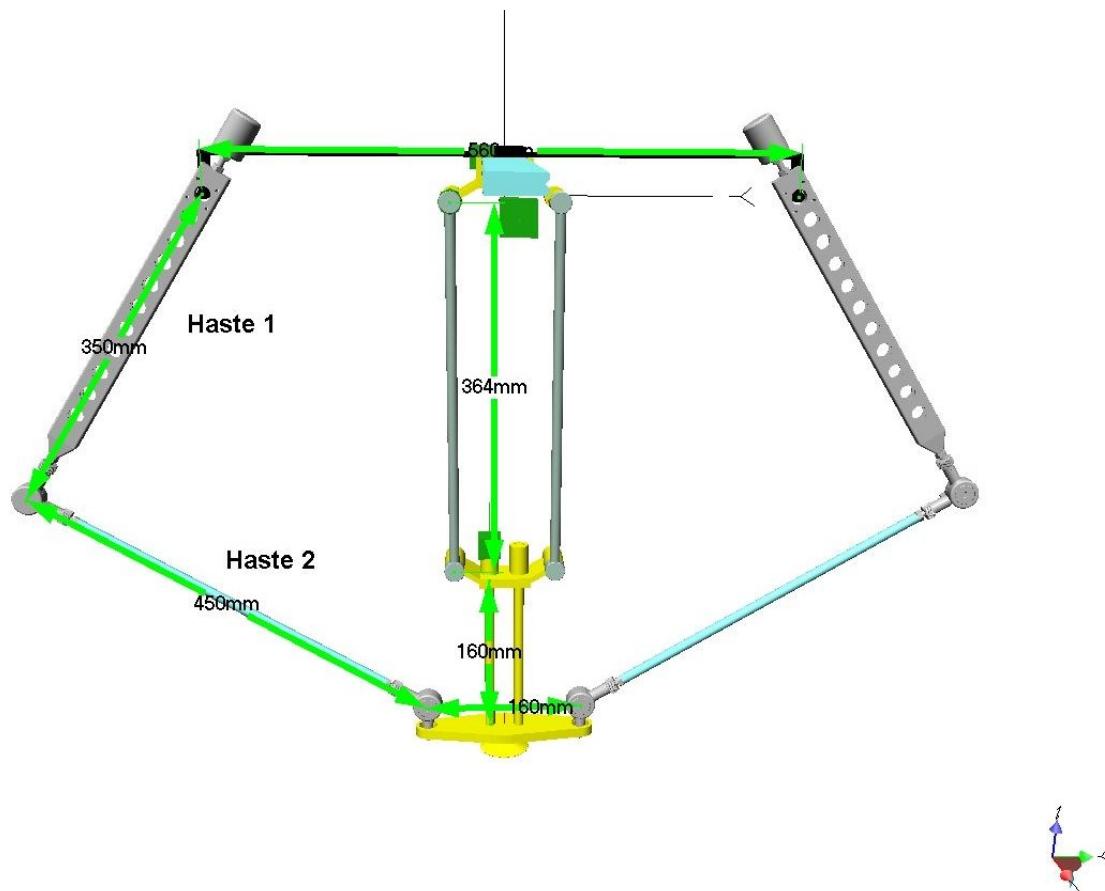


Figura 36 - Tamanho das Hastes

7. Referências

- ABB (Asea Brown Boveri Ltd) In: Parallel arm robots: IRB 340, FlexPicker, 2003, disponível em <http://www.abb.com>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB 86**: Norma de Sistema de Tolerâncias e Ajustes. Porto Alegre, Globo, 1977.
- Bhattacharya, S.; Hatwal, H.; Gosh, A. Comparison of an exact and an approximate method of singularity avoidance in platform type parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, 33(7): 965-974, 1998.
- Bonev, I.; Ryu, J., A new approach to orientation workspace analysis of 6-DOF parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, 36: 15-28, 2001a.
- Bonev, I.; Ryu, J. A geometrical method for computing the constant-orientation workspace of 6-PRRS parallel manipulators. *Mechanism and Machine Theory*, 36: 1-13, 2001b.
- Boudreau, R.; Gosselin, C. L., La synthèse d'une plate-forme de Gough-Stewart pour un espace atteignable prescrit. *Mechanism and Machine Theory*, 36: 327-342, 2001.
- Broghard, 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, pp 68-82, Quebec, October 3-4, 2002.
- Clavel, R. Device for the Movement and Positioning of an Element in Space. US Patent No. 4,976,582, December 11, 1990.
- Company O. ; Pierrot F. A new 3T-1R parallel robot, ICAR '99, Tokyo, Japan, October 25-27, pp. 557-562, 1999.
- Di Gregorio, R.; Parenti-Castelli, V. Position analysis in analytical form of the 3-PSP mechanism. *Journal of Mechanical Design*, 123: 51-57, 2001
- EMC2 Manual. Apresenta a última versão concebida do manual de instalação e operação do programa EMC2 para Linux. Disponível em: <http://www.linuxcnc.org/docs/EMC2_User_Manual.pdf>. Acesso em: 25/02/2007.
- Hervé, J. M. The Lie group of rigid body displacements, a fundamental tool for mechanism design *Mechanism and Machine Theory*, 34: 719-730, 1999.
- Hess-Coelho, T. A. ; Branchini, D.; Malvezzi, F. A new family of 3-dof parallel robot manipulators for pick-and-place operations. In: Proc. of 18th International Congress of Mechanical Engineering, Nov 6-11, Ouro Preto, 2005.
- Hunt, K. H., Structural kinematics of in-parallel-actuated robot arms. *Journal of Mechanisms, Transmission and Automation in Design*, 105: 705-712, 1983.
- Karouia, M. ; Hervé, J. M. A Family of Novel Orientational 3-Dof Parallel Robots. In Proceedings of RomanSy'2002, Udine, Italy, July 1-4, pp. 359-368, 2002.

- Khol, R. A machine tool built from mathematics, *American Machinist*, pp 53-55, October 1994.
- Kong X. ; Gosselin, C. M. Type Synthesis of Three-Degree-of-Freedom Spherical Parallel Manipulators. *International Journal of Robotics Research*, 23(3): 237-245, 2004.
- Kurtz, R.; Hayward, V. Multiple-goal kinematic optimization of a parallel spherical mechanism with actuator redundancy. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8(5): 644-651, 1992.
- LinuxCNC. Apresenta informações sobre o sistema operacional Linux Ubuntu, assim como manuais de referências e dúvidas freqüentes. Disponível em: <<http://www.linuxcnc.org/>>. Acesso em: 25/02/2007.
- Malvezzi, F. Avaliação do comportamento cinemático de um mecanismo paralelo tridimensional, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- Merlet, J. P., *Parallel robots*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2000
- Parenti-Castelli, V. and Di Gregorio, R. Determination of the actual configuration of the general Stewart platform using only one additional sensor, *Journal of Mechanical Design*, 121: 21-25, 1999.
- 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.
- Sreenivasan, S. V., Waldron, K. J., and, Nanua, P. Closed-form direct displacement analysis of a 6-6 Stewart platform, *Mechanism and machine theory*, 29(6): 855-864, 1994.
- Tsai, L.-W. , *Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators*, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- Weck, M., Schumacher, A., "Machine tools for high speed machining", Laboratory for Machine tools and production engineering (WZL) at Aachen University of Technology, 1998.
- Zhang, D.; Gosselin, C. L. Kinetostatic modeling of n-dof parallel mechanisms with a passive constraining leg and prismatic actuators. *Journal of Mechanical Design*, 123: 375-381, 2001.

Anexo 1 – Programa para interpolação MATLAB

```

% yi é a posição "y" inicial
% zi é a posição "z" inicial
% yf é a posição "y" final
% zf é a posição "z" final
% n é a discretização
function [resultid_2] = InterLin(yi,zi,yf,zf,n)

%cria o arquivo interpola.ngc
fid = fopen('interpola.ngc','w');

%calcula os angulos iniciais
%Resolve a equação do motor esquerdo
a = ((350*yi+35000)^2+(350*zi)^2);
b = (2*(1000-200*yi-yi^2-zi^2)*(350*yi+35000));
c = ((1000-200*yi-yi^2-zi^2)^2-(350*zi)^2);
delta = b^2 - 4*a*c;
resultie_1 = acos((-b + sqrt(delta))/(2*a)); %resultie_i é o theta1
resultie_2 = acos((-b - sqrt(delta))/(2*a));
%Escolhe o ângulo para a configuração "aberta" do robo
if (resultie_1 > resultie_2) ang_ei = resultie_1;
else ang_ei = resultie_2;
end

%Resolve a equação do motor direito
a = ((-350*yi+35000)^2+(350*zi)^2);
b = (2*(1000+200*yi-yi^2-zi^2)*(-350*yi+35000));
c = ((1000+200*yi-yi^2-zi^2)^2-(350*zi)^2);

```

```

delta = b^2 - 4*a*c;

resultid_1 = acos((-b + (delta)^0.5)/(2*a)); %resultid_i é o teta2
resultid_2 = acos((-b - (delta)^0.5)/(2*a));

%Escolhe o ângulo para a configuração "aberta" do robo

if (resultid_1 > resultid_2) ang_di = resultid_1;
else ang_di = resultid_2;
end

```

%calcula os angulos finais

```

%Resolve a equação do motor esquerdo

a = ((350*yf+35000)^2+(350*zf)^2);
b = (2*(1000-200*yf-yf^2-zf^2)*(350*yf+35000));
c = ((1000-200*yf-yf^2-zf^2)^2-(350*zf)^2);
delta = b^2 - 4*a*c;
resultfe_1 = acos((-b + sqrt(delta))/(2*a)); %resultfe_i é o teta1
resultfe_2 = acos((-b - sqrt(delta))/(2*a));

%Escolhe o ângulo para a configuração "aberta" do robo

if (resultfe_1 > resultfe_2) ang_ef = resultfe_1;
else ang_ef = resultfe_2;
end

```

%Resolve a equação do motor direito

```

a = ((-350*yf+35000)^2+(350*zf)^2);
b = (2*(1000+200*yf-yf^2-zf^2)*(-350*yf+35000));
c = ((1000+200*yf-yf^2-zf^2)^2-(350*zf)^2);
delta = b^2 - 4*a*c;

```

```

resultfd_1 = acos((-b + (delta)^0.5)/(2*a)); %resultfd_i é o teta2
resultfd_2 = acos((-b - (delta)^0.5)/(2*a));
%Escolhe o ângulo para a configuração "aberta" do robo
if (resultfd_1 > resultfd_2) ang_df = resultfd_1;
else ang_df = resultfd_2;
end

%Gera n angulos entre os angulos iniciais e ângulos finais
Y=linspace(ang_ei,ang_ef,n);
Z=linspace(ang_di,ang_df,n);

q=Y(1);
r=Z(1);
fprintf(fid,'G1 X%4.5f Y%4.5f F2000 \n',q,r);

for i=2:n
    %escreve os angulos intermediários entre yi,zi e yf,zf
    fprintf(fid,'X%4.5f Y%4.5f \n',Y(i),Z(i));
    i = i+1;
end

fprintf(fid,'M2\n');
fprintf(fid,'%4.5f %4.5f %4.5f %4.5f',ang_ei, ang_ef, ang_di, ang_df);

%fecha o arquivo
fclose(fid);

```

ANEXO 2 – Cálculo da cinemática inversa

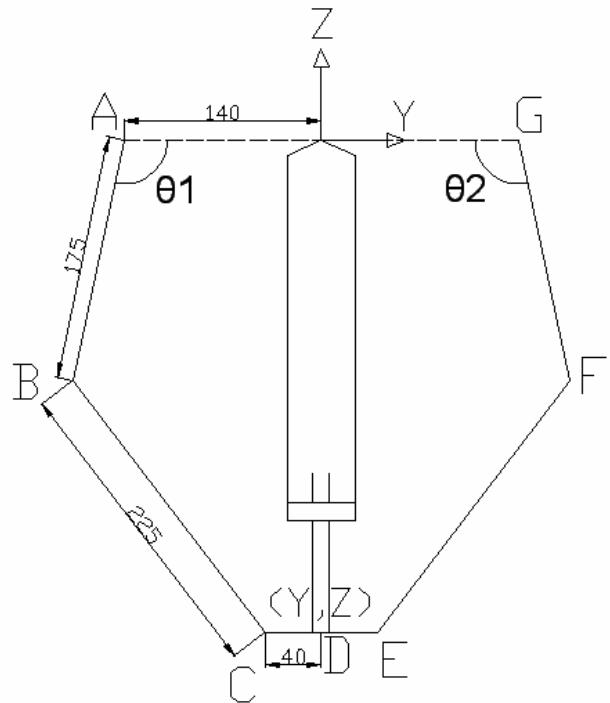


Figura 37 – Vista 2-D com cota x=0

$$B = (-140 + 175 \cdot C\theta_1 ; -175 \cdot S\theta_1)$$

$$C = (Y-40 ; Z)$$

$$F = (140 - 175 \cdot C\theta_2 ; -175 \cdot S\theta_2)$$

$$E = (Y+40 ; Z)$$

$$B-C = (-140 + 175 \cdot C\theta_1 - Y + 40 ; -175 \cdot C\theta_1 - Z) = (Y'; Z')$$

$$F-E = (140 - 175 \cdot C\theta_2 - Y - 40 ; -175 \cdot S\theta_2 - Z) = (Y''; Z'')$$

$$Y'^2 + Z'^2 = 225^2 \Rightarrow (-100 + 175 \cdot C\theta_1 - Y)^2 + (-175 \cdot C\theta_1 - Z)^2 = 225^2 \Rightarrow$$

$$\begin{aligned}
 50625 &= (-100 + 175\cos\theta_1)^2 - 2Y(-100 + 175\cos\theta_1) + Y^2 + 30625\sin^2\theta_1 + 350Z\sin\theta_1 + Z^2 \\
 \Rightarrow 50625 &= 10000 - 350000\cos^2\theta_1 + 30625\cos^2\theta_1 + 200Y - 350Y\cos\theta_1 + Y^2 + 30625\sin^2\theta_1 + 350Z\sin\theta_1 + Z^2 \\
 \Rightarrow 50625 - 10000 - 200Y - Y^2 - Z^2 &= -35000\cos^2\theta_1 + 30625\cos^2\theta_1 - 350Y\cos\theta_1 + 30625\sin^2\theta_1 + 350Z\sin\theta_1 \\
 \Rightarrow 40625 - 200Y - Y^2 - Z^2 &= 30625(\cos^2\theta_1 + \sin^2\theta_1) - 350Y\cos\theta_1 + 350Z\sin\theta_1 - 35000\cos^2\theta_1 \Rightarrow
 \end{aligned}$$

$10000 - 200Y - Y^2 - Z^2 = (-350Y - 35000)\cos\theta_1 + 350Z\sin\theta_1$

$$\begin{aligned}
 Y''^2 + Z''^2 = 225^2 &\Rightarrow (100 - 175\cos\theta_2 - Y)^2 + (-175\sin\theta_2 - Z)^2 = 225^2 \Rightarrow \\
 50625 &= (100 - 175\cos\theta_2)^2 - 2Y(100 - 175\cos\theta_2) + Y^2 + 30625\sin^2\theta_2 + 350Z\sin\theta_2 + Z^2 \\
 \Rightarrow 50625 &= 10000 - 350000\cos^2\theta_2 + 30625\cos^2\theta_2 - 200Y + 350Y\cos\theta_2 + Y^2 + 30625\sin^2\theta_2 + 350Z\sin\theta_2 + Z^2 \\
 \Rightarrow 50625 - 10000 + 200Y - Y^2 - Z^2 &= -35000\cos^2\theta_2 + 30625\cos^2\theta_2 + 350Y\cos\theta_2 + 30625\sin^2\theta_2 + 350Z\sin\theta_2 \\
 \Rightarrow 40625 + 200Y - Y^2 - Z^2 &= 30625(\cos^2\theta_2 + \sin^2\theta_2) + 350Y\cos\theta_2 + 350Z\sin\theta_2 - 35000\cos^2\theta_2 \Rightarrow
 \end{aligned}$$

$10000 + 200Y - Y^2 - Z^2 = (350Y - 35000)\cos\theta_2 + 350Z\sin\theta_2$

Escolheu-se um ponto aleatório do espaço de trabalho $(X ; Y ; Z) = (0 ; -133,927 ; -203,165)$ e foram obtidos os ângulos $\theta_1 = 171,3557$ e $\theta_2 = 86,5$ pela formulação. Para a verificação da Cinemática Inversa, fez-se um desenho no CAD com essas coordenadas e medimos os ângulos θ_1 e θ_2 que foram coerentes com os obtidos pela formulação.