

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE ROBÔ PARALELO

Victor Danilo Kumazawa

São Paulo
2008

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DESENVOLVIMENTO DE ROBÔ PARALELO

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Graduação em Engenharia

Victor Danilo Kumazawa

Orientador: Prof. Dr. Tarcísio Antônio Hess Coelho

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Kumazawa, Victor Danilo.

Desenvolvimento de um Robô Paralelo, por V. D. Kumazawa. São Paulo: EPUSP, 2008. 74 pp.

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Arquiteturas paralelas 2.Cinemática 3.Robôs (Modelos Matemáticos)
4.Softwares (Simulação) 5.Manipuladores mecânicos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao prof. Dr. Tarcísio Antônio Hess Coelho pela realização deste projeto, da concepção a sua finalização. Sua dedicação ao projeto, seu esforço em querer sempre ensinar da melhor maneira possível, sua preocupação constante com sua didática e seu caráter foram inspiradores e fundamentais para a realização deste projeto.

Agradeço a Juliana Harumi Iwahashi por seu carinho nas horas de dificuldade, sua paciência em situações difíceis, companheirismo e todo o tempo que não hesitou em abrir mão para ajudar este projeto a se tornar possível.

Agradeço a minha família que sempre me apoiou de todas as maneiras possíveis.

Agradeço também a todos os meus amigos que conquistei ao longo do curso. As noites em claro que passamos estudando, fazendo trabalhos, e claro, se divertindo muito ficaram eternamente marcadas nas lembranças destes anos de faculdade.

E por final agradeço a Deus, que esteve olhando por mim todos esses anos, me guardando e me guiando pelos seus, nem sempre fáceis, caminhos

RESUMO

A comunidade acadêmica e a industrial têm manifestado um interesse crescente pela utilização de uma estrutura cinemática denominada paralela, que se caracteriza pela presença de vários “membros” ou “pernas”, atuando de forma paralela ou simultânea sobre o órgão terminal. Esta arquitetura não-convencional apresenta potencialmente uma série de vantagens se comparada à tradicional serial. Neste trabalho, desenvolveu-se um robô paralelo do tipo “pega-e-põe” e que é capaz de realizar três translações: o R3T. O desenvolvimento deste se deu por meio da determinação de seu modelo matemático através do método da cinemática inversa, do estudo de sua rigidez e da otimização de seu espaço de trabalho. Também houve envolvimento com a fabricação das peças que compõe o protótipo real. As simulações foram desenvolvidas nos softwares Scilab 4.2.1 e os modelos virtuais no MSC-Visual Nastran 4D.

ABSTRACT

The industrial and the academic community have expressed a growing interest by the use of a kinematic structure called parallel, which is characterized by the presence of several "members" or "legs", acting in parallel or simultaneous on the terminal part. This non-conventional architecture presents a number of potential advantages when compared to the traditional serial. In this study, a model of virtual parallel robot "pick-and-place" that can perform three translations is developed: The R3T. The math model based on the inverse kinematics method, the robot rigidity analysis and the work space volume optimization were made for the robot. The simulations were developed in the software Scilab 4.1.2. and the virtual model on MSC-Visual Nastran 4D.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama cinemático de um mecanismo paralelo.	3
Figura 2 – Foto do IRB 340 fabricado pela empresa ABB	8
Figura 3 – Especificações do espaço de trabalho do IRB 340.....	9
Figura 4 – (a) R3T original (b) R3T modificado.....	10
Figura 5 – Terceira versão do R3T	11
Figura 6 – Configuração adotada para o trabalho.	12
Figura 7 – Dimensões iniciais	13
Figura 8 – Dimensões iniciais – outro ângulo	13
Figura 9 – Diagrama de blocos do modelo matemático.....	15
Figura 10 – Esquema do robô	16
Figura 11 – Modelo adotado para o estudo de rigidez.....	22
Figura 12 – Modelo de barra engastada	23
Figura 13 – Seção transversal de um tubo de perfil retangular	24
Figura 14 – Representação do paralelepípedo B	26
Figura 15 - Ilustração do funcionamento da $Cte1$	27
Figura 16 - Diagrama de blocos da otimização.....	28
Figura 17 – Placas de controle	30
Figura 18 – Placa de controle em detalhe	30
Figura 19 – Esquema da junta esférica	31
Figura 20 – Base do robô, real e modelado.....	32
Figura 21 – Perfil modular de alumínio	32
Figura 22 – Guia linear	32
Figura 23 – Desenho da guia linear-NSK	33
Figura 24 – Guia linear-NSK.....	33
Figura 25 – Rolamentos de deslocamento linear.....	33
Figura 26 – Rolamentos utilizados.....	34
Figura 27 – 1FK7042	34
Figura 28 – θ_1 em função do tempo (gráfico no <i>Visual Nastran 4D</i>)	39
Figura 29 – θ_2 em função do tempo (gráfico no <i>Visual Nastran 4D</i>)	39
Figura 30 – θ_1 em função do tempo (gráfico no <i>Scilab</i>)	40
Figura 31 – θ_2 em função do tempo (gráfico no <i>Scilab</i>)	40

Figura 32 – Torque do motor esquerdo	41
Figura 33 – Torque do motor direito.....	41
Figura 34 – Volume do espaço de trabalho por <i>Coef1</i> e <i>Coef2</i>	43
Figura 35 – Volume do espaço de trabalho em função de <i>Coef1</i>	44
Figura 36 – Volume do espaço de trabalho em função de <i>Coef2</i>	44
Figura 37 – Volume do espaço de trabalho por <i>Coef1</i> e <i>Coef2</i> (1).....	46
Figura 38 – Volume do espaço de trabalho por <i>Coef1</i> e <i>Coef2</i> (2).....	46
Figura 39 – Vista frontal do protótipo, posição neutra.....	47
Figura 40 – Outra vista, deslocada em X.....	47
Figura 41 – Vista inferior, deslocada em X e Y	48
Figura 42 – vista lateral, deslocado em X e Y.....	48
Figura 43 – Destaque para a junta esférica, vista frontal.....	49
Figura 44 – Destaque para a junta esférica, vista frontal.....	49
Figura 45 – Guia responsável pelo deslocamento em Z.....	50
Figura 46 – Guia responsável pelo deslocamento em Y.....	50
Figura 47 – Motor acoplado a guia	51
Figura 48 – Motor acoplado ao braço	51
Figura 49 – Bloco de alumínio e fresa	52
Figura 50 – Usinagem das laterais do bloco.....	52
Figura 51 – Usinagem da face superior	53
Figura 52 – Fabricação do canal	53
Figura 53 – Modelo de robô como hexágono regular	54
Figura 54 – Efeito da variação do <i>Coef2</i>	56
Figura 55 - Volume do espaço de trabalho para <i>Coef2</i> =1	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coordenadas desejadas do ponto P.....	36
Tabela 2 – Relação de Coef1 e Coef2 com seus índice.....	45
Tabela 3 – Relação de Coef1 e Coef2 com seus índices.....	45

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos	2
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Estrutura Cinemática Paralela.....	3
2.2. IRB 340	7
2.3 R3T	9
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
3.1. Configuração adotada	12
3.2. Modelo virtual	14
3.3. Modelo matemático do robô – cinemática inversa	15
3.3.1. Equação de posição	16
3.3.2. Equação de velocidade.....	18
3.3.3. Equação de torque.....	20
3.4. Estudo de Rigidez do Robô.....	21
3.4.1. Rigidez.....	21
3.4.2. Aplicação da rigidez no robô.....	22
3.4.3. Determinação da matriz $\mathcal{X}$	22
3.5. Otimização das dimensões do robô	25
3.5.1. Volume do espaço de trabalho	25
3.5.2. Otimização.....	26
3.6. Protótipo real	28
3.7. Robô Real	31
4. RESULTADOS	35
4.1. Programa em Scilab - Modelo matemático.....	35
4.3. Programa em Scilab - Otimização das dimensões do robô.....	42
4.3. Protótipo	47
4.4. Fabricação das peças – Robô real.....	52
5. DISCUSSÃO.....	54
5.1. Modelo matemático	54
5.2. Estudo de rigidez do modelo	55
5.3. Otimização das dimensões do robô	55

5.4. Protótipo real	57
6. CONCLUSÃO	59
7. ANEXOS.....	60
Anexo A - Desenhos de fabricação e conjunto e motor	60
Anexo B – Programa do modelo matemático	65
Anexo C – Programa de Rigidez	69
Anexo D – Programa de Otimização	73
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

1.INTRODUÇÃO

Em geral, nas aplicações industriais predominam robôs cujas arquiteturas correspondem a estruturas cinemáticas seriais, ou seja, seus atuadores e peças movidas são dispostos em série, um após o outro, formando um único “membro” móvel, de modo a posicionar o órgão terminal, a parte do robô que comumente contém uma garra ou um eletrodo de solda. Segundo Brochard (2002), há uma tendência mundial no sentido de expandir as aplicações atuais dos robôs industriais para tarefas envolvendo corte e solda a laser, montagem de alta precisão, retificação, fresamento, etc. Entretanto, estes robôs apresentam desempenho insatisfatório para tais tarefas porque demandam elevada precisão, rigidez, alta frequência natural e baixo tempo de ciclo.

Devido a estes fatores, tanto a comunidade acadêmica como industrial têm manifestado um interesse crescente pela utilização de um outro tipo de estrutura cinemática, denominada paralela, que se caracteriza pela presença de vários “membros” ou “pernas”, atuando de forma paralela ou simultânea sobre o órgão terminal. Esta arquitetura não-convencional apresenta, potencialmente, uma série de vantagens se comparada à tradicional serial. Dentre elas podem ser citadas: alta rigidez, leveza, rapidez, precisão e alta capacidade de carga. No entanto, apesar dos avanços conseguidos nesta direção, existe uma série de problemas abertos que necessitam de uma investigação mais profunda, de modo a garantir que esta mudança de tendência venha a ser implantada com eficácia.

Existem modelos de robôs que utilizam a estrutura cinemática paralela, como o *IRB 340 Flex Picker (ABB Ltd, Suíça)*.

Este trabalho insere-se em um grupo de pesquisa que visa desenvolver um robô paralelo, tendo como base as mudanças propostas em trabalhos anteriores, e novas diretrizes de melhorias a serem propostas no decorrer do tempo. O objetivo do grupo será desenvolver a parte dos motores e controladores das cadeias, a arquitetura do robô e as juntas esféricas presentes no robô. Ao final pretende-se construir um protótipo real deste, de forma que funcione efetivamente, e assim analisar sua rigidez, movimentação e propor possíveis melhorias a serem realizadas no projeto.

Neste trabalho foi desenvolvida a arquitetura do robô, por meio de cálculos, rotinas em programas computacionais, modelos virtuais em CAD e simulações,

sendo que o objetivo final foi encontrar melhores proporções, assim como tamanhos para os braços da cadeia ativa do robô. Este processo se mostra importante ao trabalho do grupo como um todo e principalmente à elaboração do modelo real, pois assim será possível definir melhores características cinemáticas e obter um melhor espaço de trabalho. O trabalho também tem como objetivo simular seu movimento através de modelo virtual e fazer uma análise da rigidez do conjunto. Como ferramentas, serão utilizados os softwares Solid Works, Visual Nastran 4D e Scilab.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos:

- Desenvolver um robô de arquitetura paralela.
- Definir uma configuração específica para a arquitetura do robô, baseado em trabalhos anteriores
- Desenvolver um protótipo virtual do robô através do software Visual Nastran 4D 2002.
- Criar o modelo matemático do robô utilizando o método da cinemática inversa;
- Analisar a rigidez obtida para o robô.
- Criar método de otimização das proporções de suas dimensões de forma a maximizar o volume do espaço de trabalho.
- Construir a parte mecânica do protótipo real do robô.
- Iniciar o desenvolvimento do robô real

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estrutura Cinemática Paralela

Uma estrutura cinemática paralela pode ser definida como um mecanismo de cadeia fechada em que o órgão terminal (plataforma móvel) esteja conectado a uma base fixa por meio de pelo menos duas cadeias cinemáticas independentes (Merlet, 2000), como pode ser visto na figura 1. Alguns autores costumam atribuir a estas cadeias cinemáticas a denominação de membros (“limbs”) como Tsai (1999) ou pernas (“legs”) como Di Gregorio & Parenti-Castelli (2001).

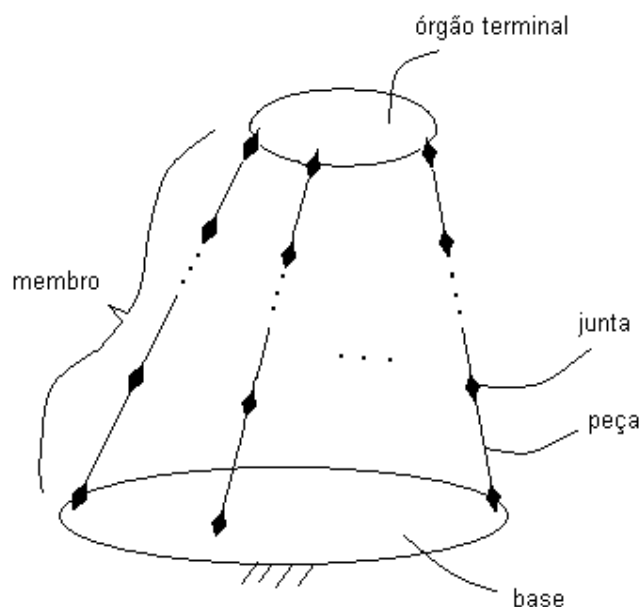


Figura 1 – Diagrama cinemático de um mecanismo paralelo.

Diante da definição anterior, fazem-se necessários alguns esclarecimentos quanto aos termos empregados. Entende-se por cadeia cinemática o sistema mecânico composto de peças ou segmentos (“links”) conectados por juntas ou pares cinemáticos. Uma junta é responsável pela definição do movimento relativo entre duas peças por ela vinculadas. Desta forma, a caracterização de um determinado tipo de junta está intimamente associada ao número de graus de liberdade que ela permite ou restringe. Uma cadeia é dita fechada se as suas duas extremidades encontram-se unidas. Quando as duas extremidades da cadeia estão separadas, a cadeia é denominada aberta. Duas cadeias são dependentes quando o movimento de uma cadeia é determinado pelo da outra. Por outro lado, consideram-se duas cadeias como

independentes, no caso em que o movimento de uma cadeia não é afetado pelo movimento da outra.

O adjetivo paralelo refere-se à forma de atuação ou acionamento do mecanismo. Tal qualificativo existe em contraposição ao termo serial, que corresponde à arquitetura predominante de robôs e máquinas-ferramenta industriais.

Tradicionalmente, os mecanismos ditos paralelos são empregados como simuladores de vôo para treinamento de pilotos ou entretenimento em centros de **lazer. Recentemente, estes sistemas mecânicos têm despertado grande interesse das** comunidades acadêmica e industrial devido às suas potenciais aplicações como manipuladores robóticos e máquinas-ferramenta.

Os mecanismos paralelos demonstram um desempenho superior aos seriais em uma comparação envolvendo vários requisitos importantes. Diferentemente dos mecanismos seriais em que suas partes móveis apóiam-se umas sobre as outras, os mecanismos paralelos são constituídos por membros que atuam sobre a plataforma móvel simultaneamente, proporcionando-lhes uma alta relação carga/peso (Merlet, 2000). Como seus atuadores localizam-se na base ou junto a esta, são muito mais leves, demonstrando também um melhor desempenho dinâmico. Além disto, os seus atuadores podem ser idênticos (Weck, Schumacher, 1998), o que resulta numa repetição de peças e também na diminuição de seu custo total. Devido à sua topologia típica, minimiza-se o acúmulo de erros dos atuadores, fator que contribui para sua alta precisão de posicionamento/orientação (Souza, 1997). Contudo, os mecanismos paralelos apresentam algumas desvantagens. Necessita-se de um controle complexo envolvendo até seis atuadores (no caso mais geral) mesmo para realizar uma simples trajetória retilínea. Existe ainda a possibilidade de colisão entre suas cadeias ativas. Além disto, apresentam uma relação desfavorável entre o seu espaço de trabalho e o volume ocupado pelo sistema.

De maneira geral, o estudo de um mecanismo paralelo inicia-se com a definição de sua estrutura cinemática, ou seja, quantas peças e juntas a compõe e a seqüência que estes elementos se apresentam na sua arquitetura. Assim, pode-se imaginar a infinidade de estruturas cinemáticas possíveis resultantes da combinação de diferentes cadeias cinemáticas. De modo a se realizar a síntese topológica de uma dada arquitetura tendo em vista uma determinada aplicação, comumente emprega-se

o critério de Kutzbach-Gruebler (Tsai, 1999). Hunt (1983) propôs um método para enumeração de arquiteturas possíveis frente a um número de graus de liberdade especificado para o órgão terminal. Hervé (1999) empregou a teoria dos grupos de Lie para descrever conjuntos de deslocamentos de corpos rígidos e suas conexões, sendo que Karouia; Hervé (2002) aplicaram este método para sintetizar arquiteturas paralelas. Um outro método alternativo baseia-se na teoria das helicóides (Kong; Gosselin, 2004). Uma outra abordagem para a síntese consiste na adição de uma cadeia cinemática passiva (Zhang; Gosselin, 2001). Tal cadeia impõe uma restrição ao movimento do órgão terminal, permitindo que este execute apenas os movimentos independentes especificados.

Uma vez que o mecanismo esteja definido, procede-se à avaliação de seu espaço de trabalho, que é um indicador fundamental de desempenho do mecanismo e que corresponde à capacidade de movimentação do seu órgão terminal. De modo a avaliar este espaço, deve-se elaborar o modelo cinemático de posição, onde são relacionadas as coordenadas do órgão terminal com as coordenadas das juntas, em função dos parâmetros do mecanismo. A seguir, procede-se ao levantamento das possíveis configurações singulares presentes no tipo de arquitetura considerada. Nos parágrafos a seguir, serão caracterizados em maior detalhe, os tipos de cinemática de posição, as singularidades, além do próprio espaço de trabalho.

Costuma-se subdividir a cinemática de posição em dois tipos: inversa e direta.

A cinemática inversa tem como objetivo encontrar os deslocamentos a serem impostos pelos atuadores, sejam eles lineares ou angulares, para uma dada posição/orientação (postura) da plataforma. A cinemática direta (Sreenivasan et al., 1994) tem por finalidade o problema contrário da cinemática inversa, ou seja, determinar qual a postura real da plataforma num dado momento, sendo conhecidos os deslocamentos dos atuadores. A dificuldade desta análise está em selecionar, dentre as inúmeras soluções matematicamente possíveis de posturas da plataforma, uma particular (real) obtida sem ambigüidade. Além disto, o processo de seleção desta solução deve ocorrer num tempo relativamente curto (Parenti-Castelli; Gregorio, 1999), de modo a facilitar a sua implementação em tempo real, tendo em vista o controle da máquina durante a sua operação ("online control"). De fato, quando os deslocamentos dos atuadores são conhecidos e invariáveis, o mecanismo

torna-se uma estrutura que pode ser montada em diferentes configurações. Uma boa motivação para a determinação da configuração real do mecanismo, dentre todas as configurações possíveis, é a necessidade de se conhecer a localização real da plataforma tanto ao se ligar a máquina como durante a execução de um determinado movimento. Resolver a cinemática direta de posição para um mecanismo paralelo permite ainda avaliar os efeitos dos erros dos atuadores sobre a localização da plataforma.

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

Devido às conseqüências mencionadas, tornam-se evidentemente necessárias tanto o levantamento das singularidades de um mecanismo paralelo, dentro e na fronteira de seu espaço de trabalho, como a definição de estratégias para evitar que o mecanismo ocupe estas configurações. Para determinação das condições de ocorrência de singularidades, emprega-se um procedimento análogo ao adotado para os mecanismos seriais, ou seja, o cálculo do determinante da matriz jacobiana ou simplesmente jacobiano.

Com relação às estratégias para evitar que o mecanismo ocupe tais configurações, podem ser mencionadas: emprego de mecanismos redundantes (Kurtz; Rayward, 1992), aqueles que possuem um número maior de graus de liberdade em relação ao necessário para posicionamento e orientação do órgão terminal; diminuição do espaço de trabalho, ou seja, a movimentação do órgão terminal estará restrita a um espaço de trabalho inferior ao possível, porém isento de singularidades; seleção de trajetórias alternativas para o órgão terminal dentro do espaço de trabalho possível (Bhattacharya et al., 1998).

O espaço de trabalho de orientação constante ou de translação refere-se ao conjunto de posições que o órgão terminal pode ocupar quando sua orientação for fixa. Define-se o espaço de trabalho de orientação (Bonev; Ryu, 2001b) como o

conjunto de possíveis rotações do órgão terminal em torno de um ponto de referência fixo pertencente a este órgão.

Sob um ponto de vista prático, a avaliação do espaço de trabalho de um mecanismo paralelo deve considerar que os seus movimentos estão sujeitos a restrições devidas basicamente a três fatores: limites mecânicos em suas juntas passivas, interferência entre seus membros e limitações de curso inerentes aos atuadores (Merlet, 2000).

Há três tipos de abordagens seguidas para avaliação do espaço de trabalho: a geométrica, a baseada na discretização, e a baseada na otimização. A abordagem geométrica (Bonev; Ryu, 2001a), normalmente empregada em estruturas cinemáticas planas ou tridimensionais simples, consiste no emprego de operações booleanas sobre volumes de entidades primitivas (cilindros, esferas, etc). Por outro lado, o método de discretização considera que o espaço de trabalho seja determinado a partir de um reticulado (“grid”) regular, seja cartesiano ou polar, de nós. Verifica-se para cada um dos nós do reticulado a sua relação de pertinência ao espaço de trabalho. A fronteira do espaço de trabalho é constituída por um conjunto de nós que tenham pelo menos um vizinho que não pertença a este espaço. A abordagem baseada no emprego de métodos de otimização compreende a definição de funções que devam ser maximizadas ou minimizadas, além da satisfação de restrições de igualdade e/ou desigualdade. Ainda dentro desta abordagem, pode-se mencionar o procedimento sugerido por Boudreau; Gosselin (2001) que baseia-se na seleção dos parâmetros de um mecanismo paralelo de modo a este se movimentar dentro de um espaço de trabalho especificado, utilizando algoritmo genético.

2.2. IRB 340

O IRB 340 Flex Picker (ABB Ltd, Suíça) é um robô com arquitetura paralela, 3RSS, capaz de realizar três translações, tendo no meio de seus atuadores um eixo que permite que o objeto que este segura tenha uma rotação, dando um grau de liberdade a mais à arquitetura original (ver figura 2).



Figura 2 – Foto do IRB 340 fabricado pela empresa ABB

O IRB 340 costuma ser vendido e usado comercialmente por indústrias farmacêuticas e de alimentos, sendo ideal em aplicações que demandem precisão e velocidade. É bastante leve, sendo seu peso total de 140 kg, somando-se a ele os três motores e a carcaça superior. Boa parte desse peso diminuto se deve ao fato de os atuadores serem extremamente finos e as juntas pequenas, diminuindo bastante o peso da parte do robô que efetivamente se mexe.

No entanto, tem contra si o fato de não conseguir carregar uma grande quantidade de peso, tendo com isso apenas versões que agüentam 1kg e 2 kg como carregamento máximo, justificando seu fim para empresas de alimentos, farmacêuticas e quaisquer outras que usem pouco peso.

Nota-se pelo modelo, que a configuração das juntas propiciou maior agilidade ao robô, além de ocupar menor espaço, porém, devido as suas características e como pode ser visto nas simulações, esta se mostrou limitada quanto ao espaço de trabalho, pois, é um de seus principais limitantes. Sua área de trabalho é a intersecção de um cilindro, de 1132 mm de diâmetro e 300 mm de raio com uma esfera de raio 1014 mm como pode ser vista na figura 3.

WORKING RANGE

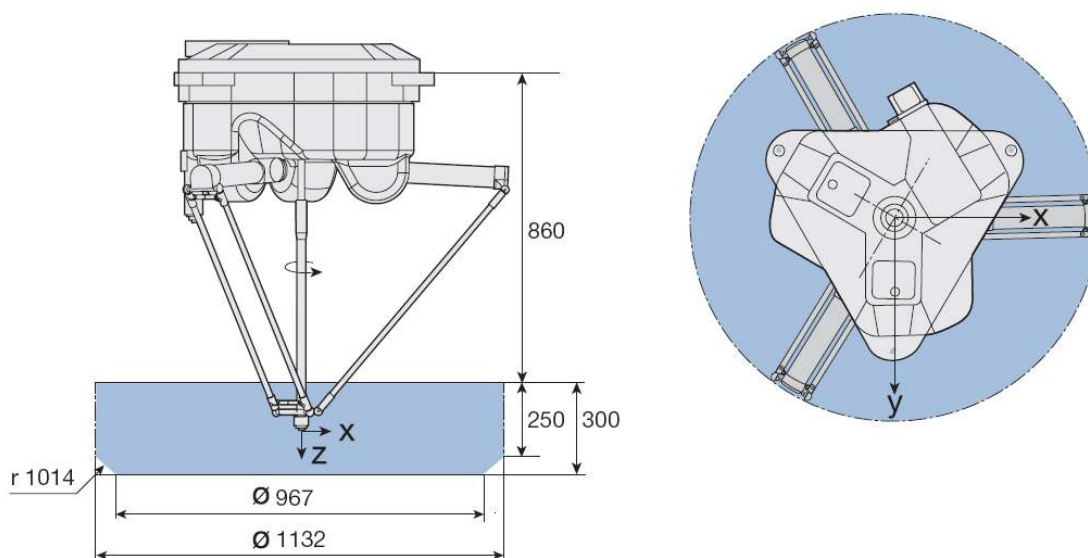


Figura 3 – Especificações do espaço de trabalho do IRB 340

2.3 R3T

O R3T é um robô paralelo com cadeia passiva de três graus de liberdade. Sua configuração é $3\underline{R}US + PP_LP$ sendo seus três graus de liberdade, portanto, destinado a três translações.

O robô teve origem em um estudo que verificou suas proporções, medidas e configurações, e a partir disso criou um protótipo real deste robô (Branchini, 2004). Originalmente, a configuração deste robô não era $3\underline{R}US + PP_LP$, e sim $3\underline{R}US + PRP$. Isto mantinha os três graus de liberdade, entretanto, ao invés de três translações, realizava duas translações e uma rotação, como pode ser visto na figura 4(a). A cadeia antiga anterior continha uma junta prismática, seguida de uma junta rotativa, terminando com uma junta prismática de novo. A cadeia nova era formada por uma junta prismática acoplada a um quadrilátero articulado, que era preso em outra junta prismática, como pode ser visto na figura 4 (b). Como se pode observar, a única diferença entre eles é a cadeia passiva, pois as cadeias ativas dos dois são iguais.

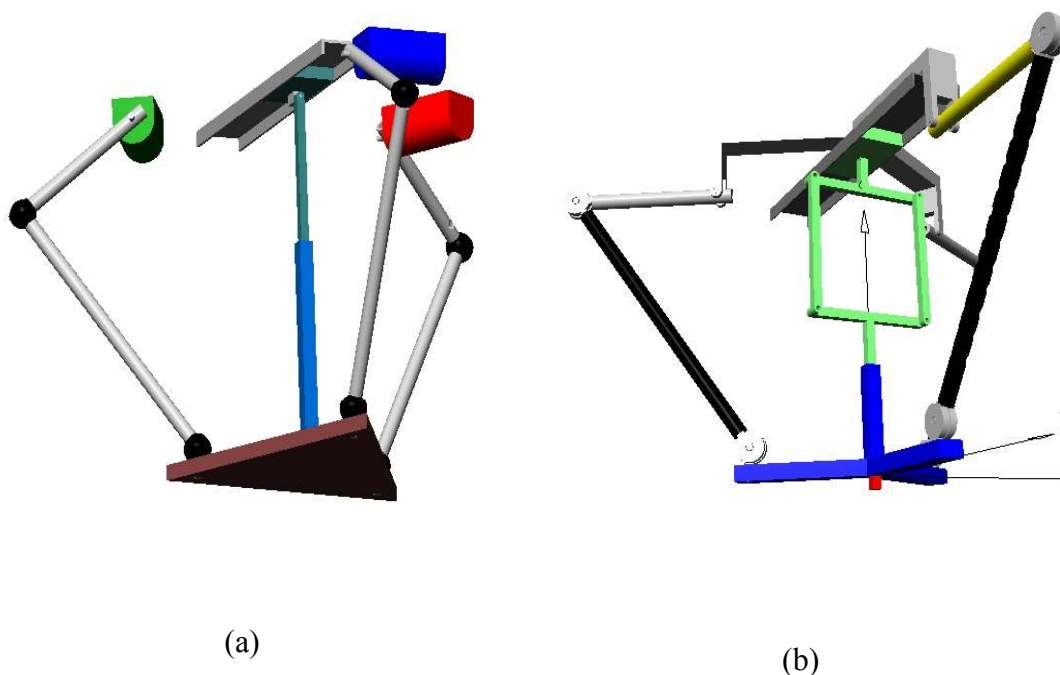


Figura 4 – (a) R3T original (b) R3T modificado

Tal mudança foi realizada no estudo, pois havia o intuito de comparar-se o R3T ao IRB 340 sob diferentes aspectos, e para tal, optou-se por esta configuração, uma vez que o IRB 340 contém três translações, sendo, portanto, incoerente comparar um modelo de três translações com um de duas translações e uma rotação.

Apesar de o $3RUS + PPLP$ não possuir protótipo, sua cadeia ativa é igual ao do $3RUS + PRP$, portanto, suas dimensões são iguais, cerca de 40 cm de altura.

Com relação a sua estrutura, a cadeia ativa do R3T possui seis juntas esféricas. Tendo menor necessidade de juntas com pouco volume e peso, uma vez que não são necessárias em número, assim, após um estudo e desenvolvimento de dois tipos de juntas, optou-se pela configuração atual, que possui maiores ângulos de movimentação do que a do modelo original, embora seja mais robusta.

Apesar de o $3RUS + PPLP$ não possuir protótipo físico, foi definido que sua cadeia ativa é igual ao do $3RUS + PRP$, portanto, suas dimensões são iguais, tendo cerca de 400 mm de altura.

O trabalho previa também uma otimização desta segunda versão. Ao término das análises e comparações, chegou-se a uma terceira versão do R3T. Esta versão teve além de melhorias quanto as proporções uma expressiva mudança quanto a sua

configuração. Uma das cadeias ativas foi retirada do modelo, e a cadeia passiva tornou-se ativa (figura 5).

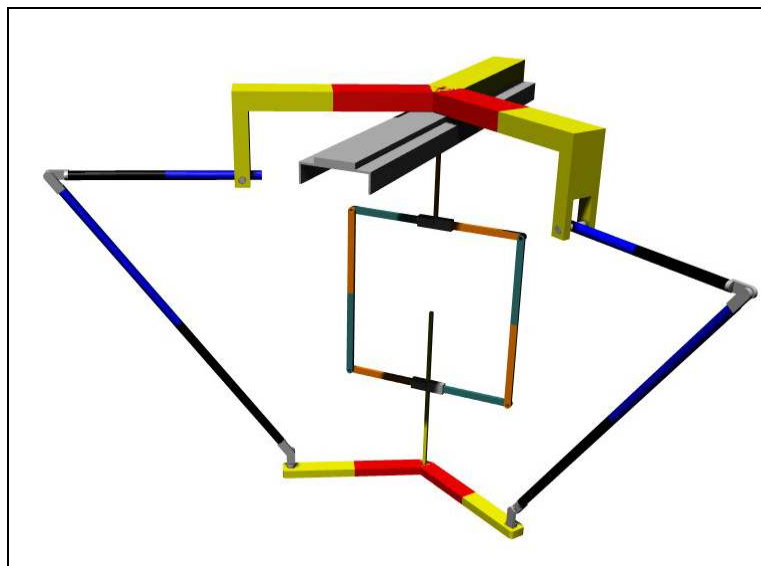


Figura 5 – Terceira versão do R3T

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Configuração adotada

A partir da terceira versão do robô R3T, se propôs uma mudança quanto ao ângulo entre as cadeias ativas, de tal forma que estas formem um ângulo de 180 graus (Figura 6). Isto permitiu que o robô ganhasse uma arquitetura inédita dentro dos mecanismos paralelos, gerando algumas propriedades inéditas, porém sem mudanças drásticas quanto aos cálculos, dimensionamento e comportamento do robô.

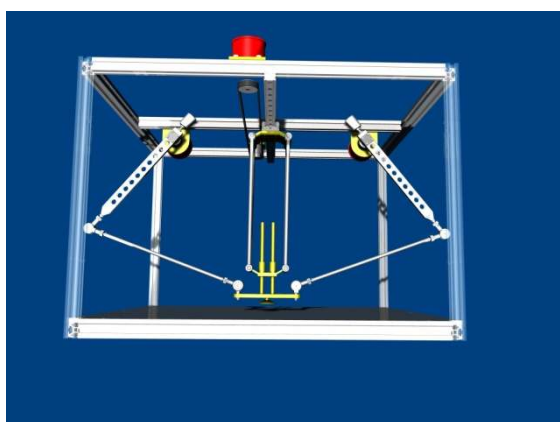


Figura 6 – Configuração adotada para o trabalho.

Como características únicas desta configuração, podem-se citar uma grande simplificação do cálculo do espaço de trabalho, uma vez que antes este era simétrico em relação a apenas um eixo, agora este é simétrico a dois eixos. Sua movimentação também se tornou simétrica quanto ao plano que corta a antiga cadeia passiva, o que se traduz em um controle mais simples. O padrão de movimentação dos ângulos dos motores para um dado movimento do órgão terminal também se tornou mais simples, o que permite diversas simplificações quanto aos seus cálculos. De maneira geral, a arquitetura adotada é bem didática.

Estimaram-se inicialmente as dimensões do robô (figuras 7 e 8), tomando como base as seguintes condições: percorrer uma largura de 700 mm e uma altura de 100 mm. Com isto, variou-se as dimensões de suas cadeias de forma a percorrer tal área. Tal dimensionamento inicial, embora superficial, se mostra necessário para criar um primeiro modelo virtual e servirá de base para a criação da primeira configuração do protótipo real, que terá flexibilidade para ajustes sendo que

posteriormente este será alinhado aos resultados obtidos na otimização. Cálculos de dimensionamento mais criteriosos serão feitos posteriormente.

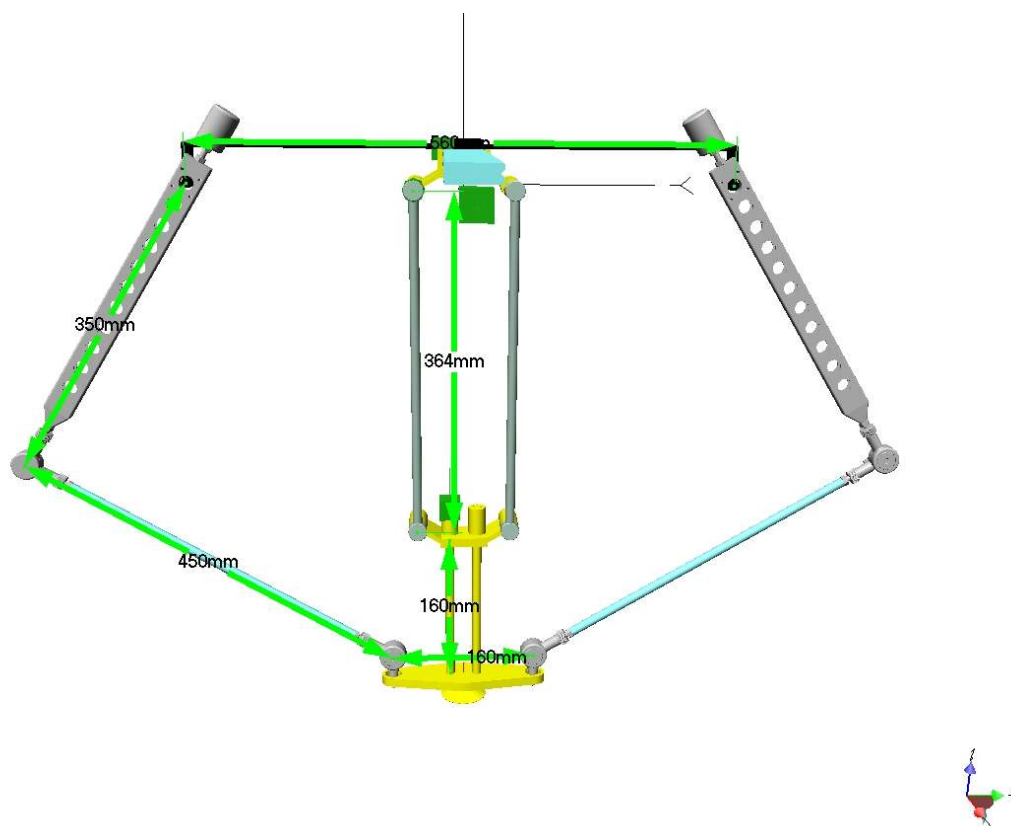


Figura 7 – Dimensões iniciais

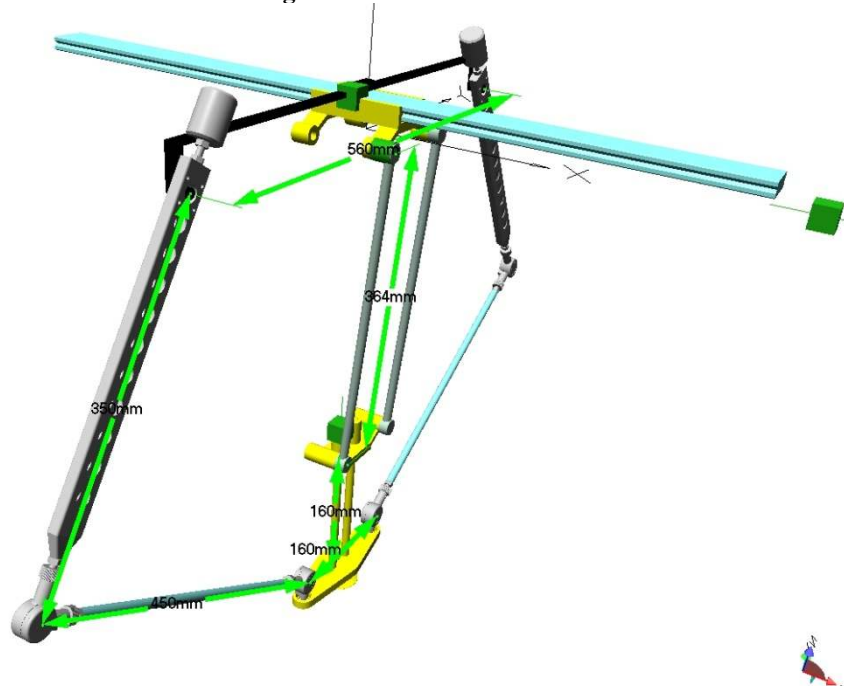


Figura 8 – Dimensões iniciais – outro ângulo

3.2. Modelo virtual

Para diversos fins, criou-se um primeiro modelo virtual do R3T a partir de desenhos computacionais de seus componentes nos softwares Visual Nastran 4D 2002 e Solid Works 2006 (figuras 6, 7 e 8). As dimensões preliminares foram utilizadas, desta maneira, há a possibilidade de mudanças nas dimensões do modelo.

Antes de utilizar os modelos criados para fazer simulações, é necessário fazer ponderações acerca da acurácia e da fidelidade de um modelo virtual para um real.

Uma das primeiras limitações dos modelos é o fato deles não detectarem quando as juntas esféricas têm suas partes adjacentes colidindo. Por exemplo, se duas peças estão conectadas diretamente através de uma junta esférica e durante algum movimento, elas eventualmente fossem de encontro uma com outra, o software não seria capaz de mostrar que elas colidiriam. Ao invés disso, as peças seriam mostradas ocupando o mesmo espaço e posteriormente se atravessando. Por essas limitações, é difícil inferir nos modelos computacionais, quando o movimento do robô é impossível devido a alguma limitação das juntas.

Porém, a par desses detalhes, os modelos tornam-se extremamente úteis, pois conseguem, com precisão, simular todos os movimentos reais do robô, sendo possível conseguir gráficos de trajetórias e de padrões de funcionamento dos motores atuadores em função de algum movimento específico. Em posse de todas essas informações, se é possível estudar de forma completa a arquitetura e cinemática do robô.

A parte dinâmica também é fortemente simulada nos modelos, porém com limitações também, pois o programa tem limitações em não conseguir simular elementos que influem bastante, deflexão das juntas, encaixes com folgas (pois as juntas que são criadas, são virtualmente perfeitas), além de a empresa não fornecer o material que é constituído cada parte do robô, no caso do IRB 340, desta maneira, não é possível, por exemplo, verificar vibrações que determinados movimentos venham a causar no modelo, assim como desvios de precisão após longas repetições de ciclos e esforços extras que venham a ser causados por qualquer um destes fenômenos.

O torque medido pelo programa também tem algumas peculiaridades. Para movimentos com algum padrão bem definido, como uma rotação com velocidade

constante de um braço, uma velocidade angular senoidal, ou algum outro movimento que seja descrito por apenas uma curva, o torque medido é apresentado como um gráfico contínuo e bem definido, coerente com o movimento, porém, ao solicitar-se ao braço algum movimento que seja uma combinação de duas ou mais curvas, como no caso dos ciclos adotados na análise, o gráfico de torque também gera uma descontinuidade.

O modelo, através das simulações ajudará a confrontar os resultados dos modelos matemáticos.

3.3. Modelo matemático do robô – cinemática inversa

O modelo matemático desenvolvido visou determinar a posição dos atuadores, a velocidade destes e o torque que estes transmitem para gerar uma força F no ponto P . Para tal, utilizou-se o método da cinemática inversa, equações de posição, de velocidade e de torque. O modelo tem como entrada uma dada posição, velocidade nesta posição e forças desejadas no ponto P . O ponto P foi definido em função das coordenadas X , Y e Z , fixas e globais, tem sua velocidade expressa por $\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}$, e forças desejadas F_x, F_y e F_z e é fixo ao órgão terminal. Nos atuadores, os ângulos dos motores são expressos por θ_1, θ_2 , e a disposição da junta prismática por q_3 . Suas velocidades são expressas por $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{q}_3$ e seus torques, por T_1, T_2 e T_3 . A matriz Jacobiana, é expressa por J . O diagrama de blocos a seguir visa ilustrar melhor o exposto (figura 9).

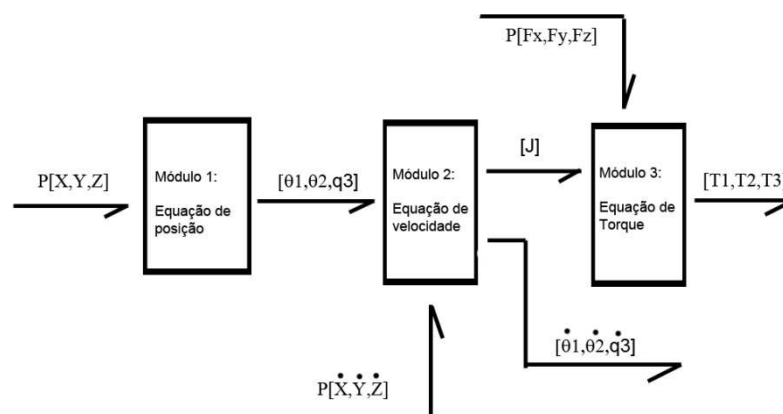


Figura 9 – Diagrama de blocos do modelo matemático

O robô foi modelado da seguinte maneira: para esta etapa, considerou-se todas as barras e juntas rígidas e indeformáveis e peso nulo (figura 10). As dimensões $K1$, $L1$, D , $D1$ e L são constantes e conhecidas, e necessárias para se determinar a configuração do robô.

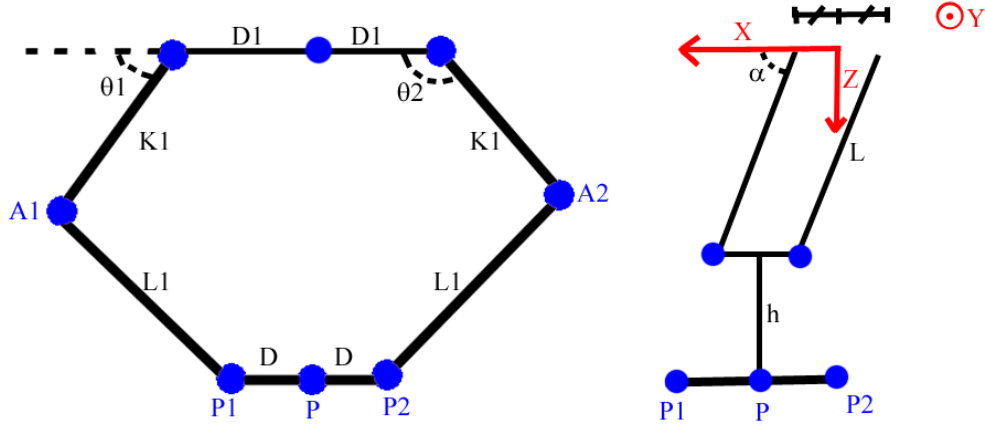


Figura 10 – Esquema do robô

3.3.1. Equação de posição

Temos que as coordenadas dos pontos P , $P1$, $P2$, $A1$ e $A2$ são:

$$P = [X, Y, Z]^T$$

$$P1 = [X + D, Y, Z]^T$$

$$P2 = [X - D, Y, Z]^T$$

$$A1 = [K1 \cdot \cos \theta1 + D1, 0, K1 \cdot \sin \theta1]^T$$

$$A2 = [K2 \cdot \cos \theta2 - D1, 0, K1 \cdot \sin \theta2]^T$$

Ainda, $L1$ e $L2$ podem ser expressos como:

$$|P1 - A1| = L1 \rightarrow (P1 - A1)^T \cdot (P1 - A1) = L1^2$$

$$|P2 - A2| = L2 \rightarrow (P2 - A2)^T \cdot (P2 - A2) = L2^2$$

Cadeia central

Devido à configuração do robô, a posição deste em Y , torna-se a própria posição Y da cadeia prismática central.

Lado esquerdo

Para o lado esquerdo (que contém o ponto P1 e A1), temos:

$$(P1 - A1)^T \cdot (P1 - A1) - L1^2 = 0$$

Desenvolvendo a equação, obtém-se:

$$E1 \cdot \cos \theta1 + F1 \cdot \sin \theta1 + G1 = 0$$

$$E1 = -2 \cdot K1 \cdot [X + (D - D1)]$$

$$F1 = -2 \cdot K1 \cdot Z$$

$$G1 = X^2 + Y^2 + Z^2 + K1^2 - L1^2 + (D - D1)^2 + 2 \cdot (D - D1) \cdot X$$

Para resolver a equação, utiliza-se a seguinte transformação:

$$\cos \theta1 = \frac{1 - u^2}{1 + u^2}$$

$$\sin \theta1 = \frac{2 \cdot u}{1 + u^2}$$

Resultando na equação final de posição:

$$E1 \cdot \left(\frac{1 - u^2}{1 + u^2} \right) + F1 \cdot \left(\frac{2 \cdot u}{1 + u^2} \right) + G = 0 \rightarrow (G1 - E1) \cdot u^2 + (2 \cdot F1) \cdot u + (G1 + E1) = 0$$

Lado direito

De modo análogo, obtém-se para o lado direito (que contém o ponto P2 e A2):

$$(G2 - E2) \cdot u^2 + (2 \cdot F2) \cdot u + (G2 + E2) = 0$$

Com:

$$E2 = -2.K1.[X + (-D + D1)]$$

$$F2 = -2.K1.Z$$

$$G2 = X^2 + Y^2 + Z^2 + K1^2 - L1^2 + (-D + D1)^2 + 2.(-D + D1).X^2$$

$$\cos \theta 2 = \frac{1 - u^2}{1 + u^2}$$

$$\sin \theta 2 = \frac{2.u}{1 + u^2}$$

Desta maneira, dado um ponto P conhecido, basta resolver as equações para obter-se os ângulos relacionados.

3.3.2. Equação de velocidade

Para determinar-se a equação de velocidade, é necessário derivar a equação de posição:

$$\dot{P} = \frac{d(P)}{dt} = [\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}]^T$$

Cadeia central

Devido à configuração do robô, a velocidade deste em Y, torna-se a própria velocidade Y ponto da cadeia prismática central.

Lado esquerdo

Tem-se que:

$$\frac{d(E1.\cos \theta 1 + F1.\sin \theta 1 + G1)}{dt} = 0$$

$$\dot{E}1.\cos \theta 1 + \dot{F}1.\sin \theta 1 + \dot{G}1 = (E1.\sin \theta 1 + F1.\cos \theta 1).\dot{\theta}1$$

Onde:

$$\dot{E}1 = 2.K1.\dot{X}.\cos \theta 1$$

$$\dot{F}1 = -2.K1.\dot{Z}.\sin \theta 1$$

$$\dot{G}1 = 2.Y.\dot{Y} + 2.Z.\dot{Z} + 2.X.\dot{X} - [2.(D - D1).\dot{X}]$$

Lado direito

De maneira análoga, temos:

$$\dot{E}2.\cos \theta 2 + \dot{F}2.\sin \theta 2 + \dot{G}2 = (E2.\sin \theta 2 + F2.\cos \theta 2).\dot{\theta}2$$

Em que:

$$\dot{E}2 = 2.K1.\dot{X}.\cos \theta 1$$

$$\dot{F}2 = -2.K1.\dot{Z}.\sin \theta 1$$

$$\dot{G}2 = 2.Y.\dot{Y} + 2.Z.\dot{Z} + 2.X.\dot{X} - [2.(-D + D1).\dot{X}]$$

Com estas equações, pode-se montar as equações de velocidades na forma matricial, da seguinte maneira:

$$[Jx].\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} = [Jq].\begin{bmatrix} \dot{\theta}1 \\ \dot{\theta}2 \\ q3 \end{bmatrix}$$

Onde:

$$Jx = \begin{bmatrix} Jx(1,1) & Jx(1,2) & Jx(1,3) \\ Jx(2,1) & Jx(2,2) & Jx(2,3) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Jx(1,1) = -2.K1.\cos \theta 1 + 2.(D - D1) + 2.X$$

$$Jx(1,2) = 2Y$$

$$Jx(1,3) = -2.K1.\sin \theta 1 + 2.Z$$

$$Jx(2,1) = -2.K1.\cos \theta 2 + 2.(-D + D1) + 2.X$$

$$Jx(2,2) = 2.Y$$

$$Jx(2,3) = -2.K1.\sin \theta 2 + 2.Z$$

$$Jq = \begin{bmatrix} E1.\sin\theta1 - F1.\cos\theta1 & 0 & 0 \\ 0 & E2.\sin\theta2 - F2.\cos\theta2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Desta maneira, para se determinar as velocidades no atuador, basta, para uma dada velocidade no ponto P, resolver a equação matricial apresentada.

3.3.3. Equação de torque

Princípio do trabalho virtual

Seja T , o vetor de torques dos atuadores, expressa por $T=[T1,T2,T3....Tn]^t$, $\delta q = [\delta q1, \delta q2, \delta q3....\delta qn]^t$ o vetor de deslocamento virtual dos mesmos atuadores, F o vetor que expressa as forças atuantes no ponto P do órgão terminal, $F = [Fx1, Fx2, Fx3....Fxn]^t$ e $\delta x = [\delta x1, \delta x2, \delta x3....\delta xn]^t$ o vetor de deslocamento virtual do ponto P na garra, o trabalho virtual causado pelas forças externas, pode ser escrito como:

$$T^t . \delta q = F^t . \delta x$$

Mas:

$$\delta q = J . \delta x$$

Onde a matriz Jacobiana J é definida como:

$$J = [Jq]^{-1} . [Jx]$$

Assim, chega-se a relação:

$$F = J^t . T$$

Aplicação do princípio do trabalho virtual

Para o robô, $F = [Fx, Fy, Fz]^t$ e $T=[T1,T2,T3]^t$, desta maneira, a relação entre a força atuante no órgão terminal e o torque nos órgãos terminais se dá por:

$$\begin{bmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \end{bmatrix} = [J]^t \cdot \begin{bmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \end{bmatrix}$$

Através do vetor de força dado, e da matriz jacobiana determinada na equação de velocidade, determina-se os torques nos atuadores.

3.4. Estudo de Rigidez do Robô

3.4.1. Rigidez

O estudo de rigidez de um manipulador paralelo tem sido objeto de recente estudo de diferentes autores (Gosselin, 1990; Kerr, 1989; Lebret et al., 1993; Tahmasebi and Tsai, 1995). Na abordagem inicial do estudo de rigidez, se considera que o robô tem todas as suas juntas perfeitamente rígidas e a única fonte de deformação se dá nos atuadores, na transmissão mecânica, nos servo motores e outros. Desta maneira, seja $T=[T1,T2,T3....Tn]^t$ o vetor de torque exercido pelos atuadores, $\Delta q=[\Delta q1,\Delta q2,\Delta q3....\Delta qn]^t$ o vetor de deformação nos mesmos e $\Delta x=[\Delta x1,\Delta x2,\Delta q3....\Delta xn]^t$ o vetor deformação no órgão terminal, existe a relação:

$$T = \chi . \Delta q$$

Onde χ é uma matriz diagonal, que contém os coeficientes de rigidez $k1,k2....kn$, onde cada um está associado a um atuador. Substituindo na equação a relação $\Delta q = J . \Delta x$ e $F = J^t . T$, chega-se a:

$$F = J^t . \chi . J . \Delta x$$

Desta maneira, dado uma força atuante no órgão terminal, através da matriz Jacobiana e da matriz χ , acha-se o deslocamento no órgão terminal devido a não rigidez do acoplamento mecânico.

3.4.2. Aplicação da rigidez no robô

No projeto do robô, se prevê o uso de motores de passo nos seus 3 atuadores e em 2 deles, a cadeia está acoplada direto no eixo. A obtenção dos coeficientes da matriz χ para tais motores é difícil, e demandaria muitos testes, o que não necessariamente geraria resultados satisfatórios. Assim, decidiu-se fazer as seguintes considerações para o robô:

- A barra da cadeia (dimensão K1) ativa é rigidamente fixa ao motor;
- O motor de passo é rígido;
- As constantes $k1$, e $k2$, referentes aos motores esquerdo e direito, passaram-se a se referir a flexão da barra da cadeia ativa, e o vetor Δq refere-se agora ao ângulo que as barras rotacionam devido as forças F aplicadas no órgão terminal.

Para a cadeia central, pretende-se usar uma correia presa ao motor de passo para a transmissão do movimento, sendo que para este, a aplicação da definição de rigidez é direta, sendo possível usar um coeficiente $k3$ para a correia, que é de borracha e geralmente tem um coeficiente k conhecido.

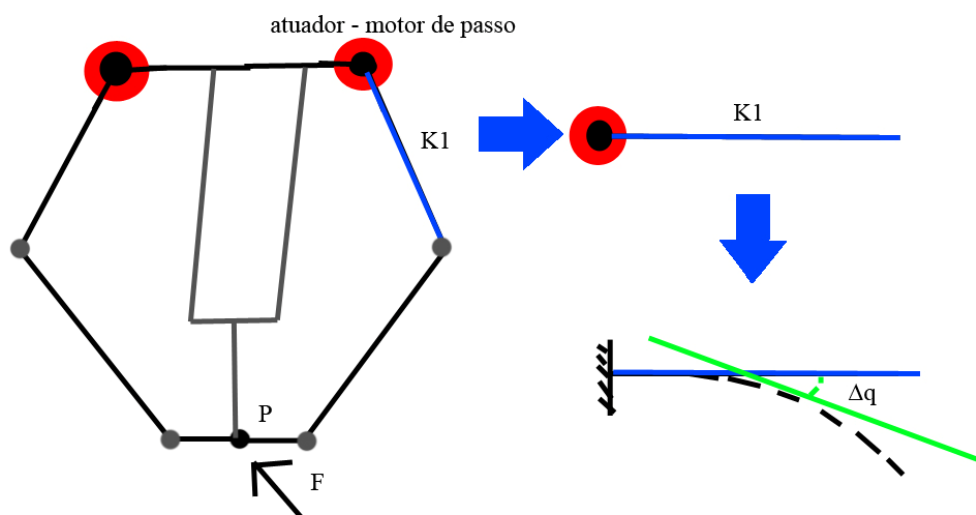


Figura 11 – Modelo adotado para o estudo de rigidez

3.4.3. Determinação da matriz χ

Na nova abordagem da deformação Δq , o braço de dimensão K1 foi modelado como uma barra engastada, de momento de inércia I e módulo de elasticidade E (figura 12).

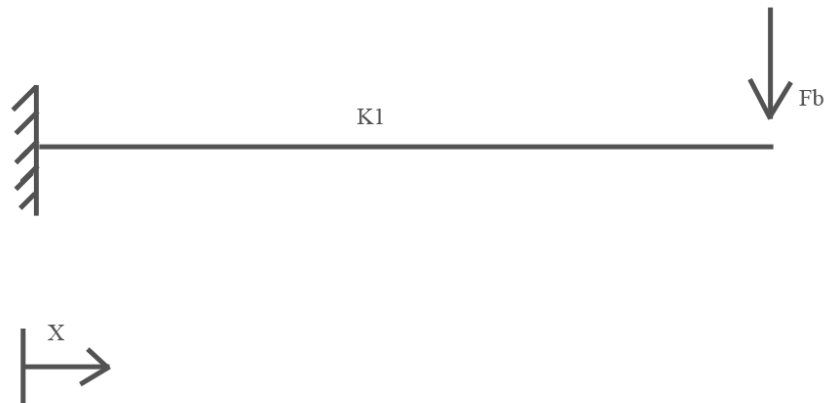


Figura 12 – Modelo de barra engastada

Sua equação de momento se dá por:

$$M(x) = K1.Fb$$

Sabe-se que:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI}$$

$$\theta(x) = \int \frac{M}{EI} dx$$

Desta maneira:

$$\theta(x) = \frac{M}{EI} x = \frac{Fb.K1.x}{EI}$$

Tomando o ângulo, no meio da barra em que $x=L/2$:

$$\theta\left(\frac{L}{2}\right) = \Delta q = \frac{K1}{2.EI} . Fb.K1$$

$$\Delta q = k.T$$

$$k = k1 = k2 = \frac{K1}{2EI}$$

$$\chi = \begin{bmatrix} \frac{K1}{2EI} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K1}{2EI} & 0 \\ 0 & 0 & k3 \end{bmatrix}$$

Para uma barra de perfil retangular (figura 13), o momento de inércia I se dá por:

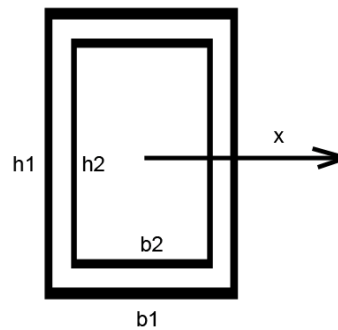


Figura 13 – Seção transversal de um tubo de perfil retangular

$$I = I_x = \frac{b1.h1^3}{12} - \frac{b2.h2^3}{12}$$

Uma vez conhecida a matriz χ e a matriz jacobiana, para um dado vetor de força aplicada no ponto P, obtém-se a deformação neste.

3.5. Otimização das dimensões do robô

Para o algoritmo de otimização das dimensões do robô, é necessário alguns dados que podem ser obtidos por meio dos diversos módulos do modelo matemático do robô já definidos anteriormente e um módulo capaz de calcular o volume do espaço de trabalho.

3.5.1. Volume do espaço de trabalho

O espaço de trabalho compreende os pontos possíveis de serem alcançados pelo órgão terminal do robô.

Dado um ponto qualquer nas coordenadas X , Y e Z , o módulo das equações de posição, por meio da cinemática inversa, retorna uma solução que é a disposição dos atuadores que permite ao robô estar nesta posição. Entretanto, caso esta posição seja impossível de ser alcançada, ou seja, não está compreendida pelo volume do espaço de trabalho do robô, a equação da cinemática inversa, que é uma equação de segundo grau, devolve duas raízes complexas.

Através destas constatações, criou-se um algoritmo que age da seguinte forma:

Define-se número de pontos A_x , A_y e A_z e um passo f , de tal forma que:

$$A_x.f = X_{\max}$$

$$A_y.f = Y_{\max}$$

$$A_z.f = Z_{\max}$$

Isto gera um paralelepípedo B de volume $=X_{\max}.Y_{\max}.Z_{\max}$ que tem como único requisito precisar ser maior que o volume de trabalho.

Através de rotinas computacionais, aplica-se a equação da cinemática inversa a cada um dos pontos do paralelepípedo B , gerando um vetor solução da posição dos atuadores para cada um dos pontos. Eventualmente alguma destas soluções será complexa, mostrando que o ponto não pertence ao espaço de trabalho.

Considerando que existam M pontos complexos ao final da varredura do paralelepípedo B , o volume do espaço de trabalho Vol pode ser definido como:

$$Vol = X_{\max}.Y_{\max}.Z_{\max} - M.f^3$$

ou

$$Vol = (A_x.A_y.A_z - M).f^3$$

Por se tratar de uma aproximação numérica, quanto maiores os valores de A_x , A_y e A_z e menor o valor de f , mais refinado é o resultado.

Vale ressaltar que especificamente para o caso do R3T, o paralelepípedo B representa apenas $\frac{1}{4}$ do volume total de trabalho, uma vez que o método prevê para o R3T a varredura dos eixos X , Y e Z da origem até o valor de X_{max} , Y_{max} e Z_{max} . Porém, graças a simetria do modelo, basta multiplicar o valor obtido por 4 para se obter o volume de trabalho total (figura 14).

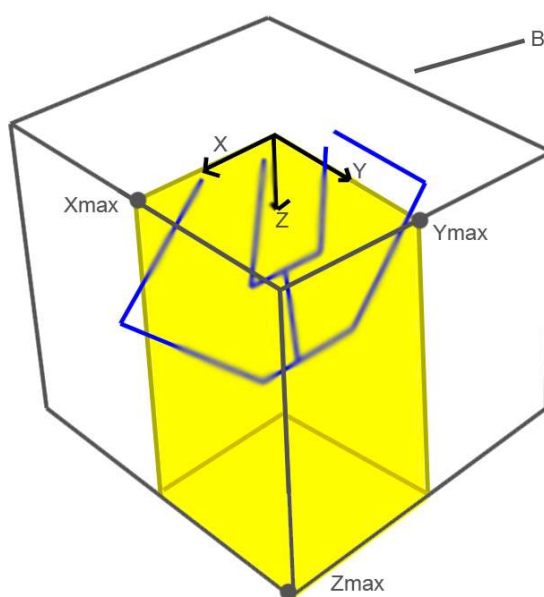


Figura 14 – Representação do paralelepípedo B

3.5.2. Otimização

Numa primeira etapa, a otimização se deu apenas no quesito do espaço de trabalho, não levando em conta o torque, que será levado em conta posteriormente.

A otimização se deu da seguinte forma:

Escolheu-se duas variáveis representativas para as dimensões do robô. A partir destas variáveis, plotou-se um gráfico do volume de espaço de trabalho em função destas. A combinação de variáveis que apresentou maior volume de espaço de trabalho foi a escolhida.

Para o R3T escolheu-se como variáveis dois dimensionais, o $coef1=K1/L1$ e $coef2=D1/D$. Assim, dado um valor fixo e conhecido de $L1$ e D , tem-se os valores de $K1$ e $D1$ e, portanto, define-se o robô.

Fixando $L1$ em, por exemplo, 10, teríamos para um $Coef1$ de 1 a 10, valores de $K1$ compreendidos entre 10 e 100. É importante ressaltar que esta faixa, embora coerente com $Coef1$, geraria comparações imprecisas de espaço de trabalho, pois uma configuração do R3T teria a cadeia ativa curta, com $K1+L1=20$ e outra comprida, com $K1+L1=120$. Isto faria com que a cadeia cuja soma das barras é 120 gerasse um espaço de trabalho de volume maior do que a combinação $K1+L1+20$, embora eventualmente este fosse proporcionalmente menor. Para contornar este problema, criou-se um método para tal:

Definiu-se uma constante $Cte1$ e $Cte2$ de tal forma que:

$$K1 + L1 = Cte1$$

$$D1 + D = Cte2$$

$$coef1 = \frac{K1}{L1} = \frac{Cte1 - L1}{L1}$$

$$coef2 = \frac{D1}{D} = \frac{Cte2 - D}{D}$$

Fixando a soma $K1+L1$ e $D1+D$, pode-se variar $L1$ e D sem preocupação, pois se garante que $K1$ e $D1$ serão proporcionais, garantia essa que é assegurada pelas $Cte1$ e $Cte2$ (figura 15).

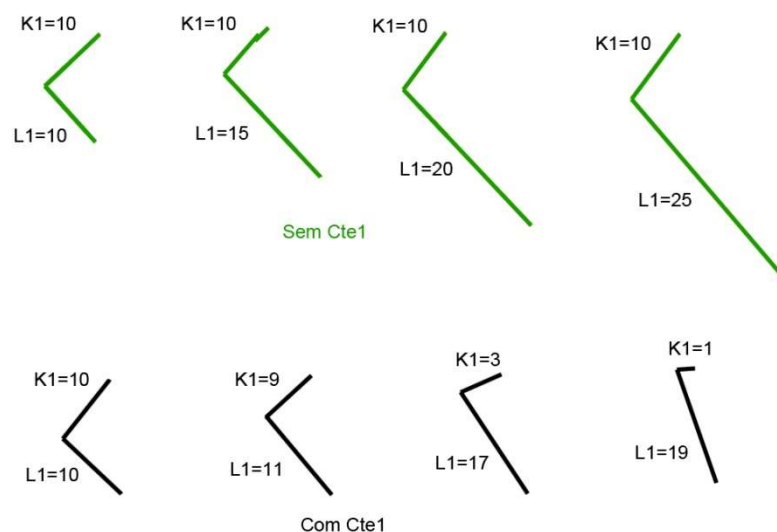


Figura 15 - Ilustração do funcionamento da $Cte1$

Assim, o algoritmo de otimização encontra o espaço de trabalho para cada combinação *Coef1* e *Coef2*, e arquiva este valor em uma matriz, que posteriormente será plotada, gerando uma curva de superfície.

O diagrama de blocos a seguir ilustra melhor o processo (figura 16):

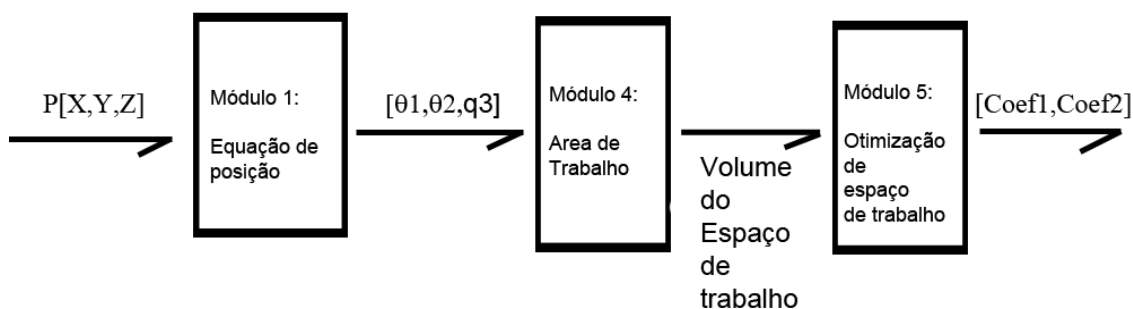


Figura 16 - Diagrama de blocos da otimização

3.6. Protótipo real

Antes da construção do robô, foi construído um protótipo com dimensões menores que terá motores em seus atuadores e poderá ser controlado. As medidas utilizadas, já respeitam as proporções encontradas no estudo de otimização do espaço de trabalho do robô.

Como vantagens de se construir um protótipo, podemos citar o melhor entendimento do funcionamento do robô, a detecção de problemas mecânicos, de ordem construtiva e funcional, o que trará uma rica experiência para a fabricação do robô real.

Para sua fabricação, as seguintes medidas foram escolhidas:

$D=100$ mm

$D1=100$ mm

$K1=100$ mm

$L1=200$ mm

$L=160$ mm

$h=90$ mm

Para o deslocamento no eixo Y, foi utilizado um sistema de fuso, rosca M10 SAE 1020, onde em sua extremidade foi utilizado um rolamento de apoio miniatura

697 da empresa HCH. A porca utilizada neste fuso foi usinada em bronze. Os dois eixos guias foram usinados em aço prata com diâmetro de 10 mm. Para o deslocamento sobre estes eixos, utilizou-se um bloco deslizante utiliza dois rolamentos lineares KH1026 da empresa PPK.

Para o deslocamento no eixo Z, foram utilizados dois rolamentos lineares KH0824 da empresa PPK. O eixo na qual o rolamento corre foi feito em aço prata.

As demais peças foram usinadas em alumínio AL6061 devido à leveza deste material, e utilizaram processos comuns de usinagem, como fresa, torneamento entre outros.

Os parafusos utilizados foram:

Parafuso Allen com cabeça M4X10 - 12 unidades

Arruela lisa M4 - 14 unidades

Parafuso Allen com cabeça M5X30 - 2 unidades

Parafuso Allen com cabeça M5X25 - 10 unidades

Porca sextavada M5 – 14 unidades

Arruela lisa M5 – 20 unidades

Parafuso Allen com cabeça M5X10 – 4 unidades

Parafuso Allen sem cabeça M8X10 – 2 unidades

Parafuso Allen sem cabeça M3X5 – 3 unidades

Parafuso Allen com cabeça M5X55 – 2 unidades

Parafuso Allen com cabeça M5X60 – 4 unidades

As placas responsáveis pelo controle do robô (*drivers*) foram construídas (figura 17 e 18). A programação do controle de movimentação que resolverá as equações da cinemática inversa será via software LINUX CNC. Existem três placas, uma responsável pelo controle de cada grau de liberdade do robô, ou seja, uma placa será responsável pelo movimento no eixo Y, movimentando o trilho e outras duas serão responsáveis em movimentar os motores de passo acoplados aos braços do robô.

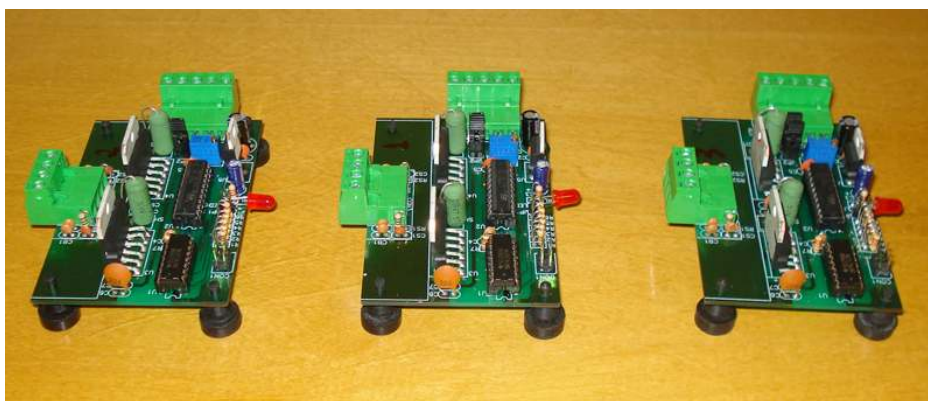


Figura 17 – Placas de controle

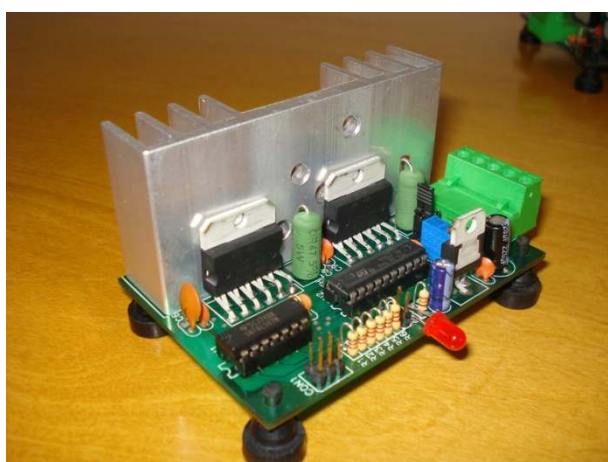


Figura 18 – Placa de controle em detalhe

A junta esférica utilizada no modelo foi concebida de tal forma que esta tem uma configuração inédita entre os robôs paralelos comerciais (figura 19), que usualmente usam juntas em forma de rótula que por sua característica construtiva alcançam ângulos de espaço de trabalho baixos. Esta junta 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. No eixo 2, por motivos construtivos, a junta abrange um ângulo de cerca de 130 graus. No eixo 1 e 3 entretanto, sua rotação é livre, chegando a 360 graus, algo difícil de se conseguir em uma junta com uma configuração de rótula por exemplo.

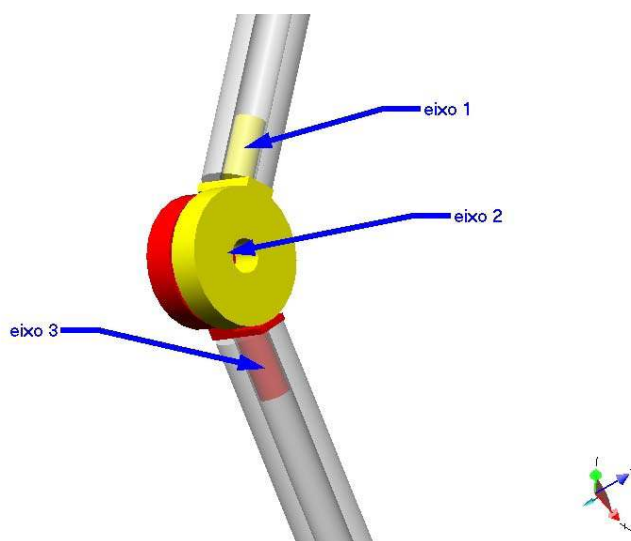


Figura 19 – Esquema da junta esférica

3.7. Robô Real

O robô real será iniciado neste trabalho. A otimização poderá ser implantada neste modelo, entretanto, este será projetado de forma a ter mais possibilidades de ajustes, para futuras mudanças ou otimizações do robô, podendo ser tema de trabalhos posteriores. Para tal, o projeto do robô prevê esta implantação, sendo este modular: as juntas, as bases, a posição do motor, podem ser movidas e utilizadas para diversas configurações de K1, L1, D e D1.

- O projeto do robô prevê que este será construído sobre uma base, semelhante a uma gaiola (figura 20). Esta base será construída com perfis modulares de alumínio base 30 (figura 21) de forma a facilitar a montagem, desmontagem e possíveis ajustes que deverão ser feitos na montagem do robô. Os perfis terão 355mm de profundidade. Para a fixação dos perfis serão parafuso Allen M8X20:16. Os perfis de alumínio foram obtidos através da escola, e estão mostrados a seguir.



Figura 20 – Base do robô, real e modelado

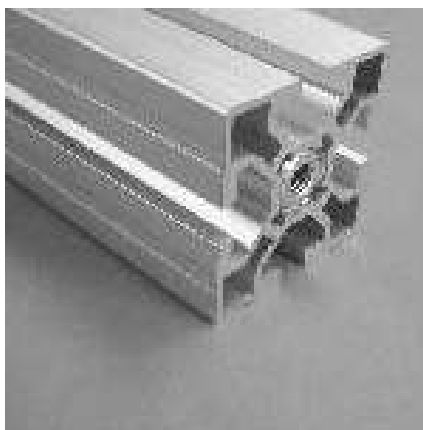


Figura 21 – Perfil modular de alumínio

- O trilho da guia linear (figura 22), responsável pelo deslocamento da garra no eixo Y e que será movimentada por um dos atuadores do robô, será um trilho cedido pela NSK (figura 23 e 24) do seguinte modelo:

Especificação do trilho: L1S15600TZ

Especificação do patim: LAH20EMZ



Figura 22 – Guia linear

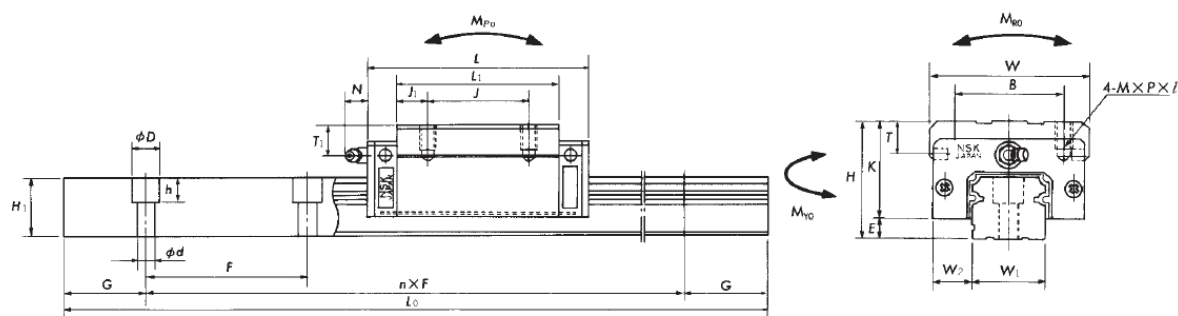


Figura 23 – Desenho da guia linear-NSK



Figura 24 – Guia linear-NSK

- O deslocamento no eixo Z executado pela garra terá o auxílio de rolamentos de deslocamento linear, modelo LB10NYDD também cedido pela NSK (figura 25). Este rolamento será responsável em garantir que a guia se desloque no sentido Z sem nenhum desvio e com esforços contrários mínimos.



Figura 25 – Rolamentos de deslocamento linear

- Os rolamentos utilizados foram todos cedidos pela NSK, e serão utilizados nas juntas esféricas e no robô em geral (figura 26), têm a seguinte especificação: 6902DD, 6803ZZ e 689ZZ1MC3.



Figura 26 – Rolamentos utilizados

-A empresa Siemens se disponibilizou a doar os motores para o funcionamento do robô. Desta maneira, para se determinar a capacidade do motor a ser pedido, determinou-se a seguinte utilização do modelo: peso suportado 400g (0,4Kg) e aceleração de 1g (10m/s²). Com estes dados, escolheu-se o motor 1FK7042, mostrado na figura a seguir. O desenho técnico encontra-se no anexo A

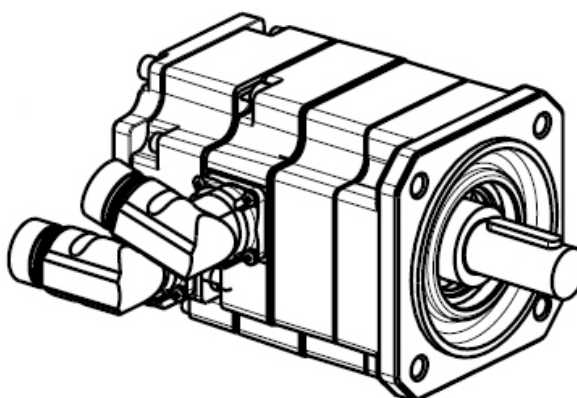


Figura 27 – 1FK7042

4. RESULTADOS

4.1. Programa em Scilab - Modelo matemático

Para implementar as equações obtidas, criou-se uma rotina no programa *Scilab* 4.1.2. Decidiu-se, como exemplo, aplicar a rotina a uma configuração simples. A configuração adotada foi:

$$L1=10$$

$$K1=10$$

$$D1=5$$

$$D=5$$

$$L = 10.\sqrt{3} - 1$$

As coordenadas do ponto P foram:

$$P[X, Y, Z] = [0, 0, 10.\sqrt{3}]; [5\sqrt{2}, 0, 5\sqrt{2} + 10]; [0, 0, 19.99999999]; [0, 9.99999999, 10]$$

$$P[\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z}] = [0, 0, 0]; [0, 0, 0]; [19.99999999, 0, 0]; [0, 0, 0]$$

$$P[Fx, Fy, Fz] = [0, 0, -10]; [0, 0, 0]; [10, 0, 0]; [0, 5, 0]$$

Os resultados da simulação foram:

$$[\theta 1, \theta 2, q 3] = [60, 120, 0]; [45, 90, 0]; [89.99, 89.99, 0]; [90.02, 90.02, 10]$$

$$[\dot{\theta} 1, \dot{\theta} 2, \dot{q} 3] = [0, 0, 0]; [0, 0, 0]; [-1, -1, 0]; [0, 0, 0]$$

$$[T1, T2, F3] = [-50, 50, 0]; [0, 0, 0]; [-100, -100, 0]; [0, 0, 5]$$

Outra simulação realizada visou comparar os resultados obtidos no modelo matemático com os resultados obtidos em simulações no modelo inicial, construído no *Visual Nastran*. Configurou-se o modelo matemático para ter as mesmas dimensões do modelo virtual. Dado diferentes coordenadas do ponto P , foram plotados os gráficos referentes aos ângulos dos atuadores das duas simulações. As dimensões utilizadas foram:

$$K1=0.35\text{m}$$

$$L1=0.45\text{m}$$

$$D1=0.28\text{m}$$

$$D=0.08\text{m}$$

Abaixo segue a tabela das coordenadas desejadas do ponto P :

Tabela 1 - Coordenadas desejadas do ponto P

tempo(s)	y(mm)	x(mm)	z(mm)
0	0	0	-590,377
0,1	0	25,89264	-561,246
0,2	0	38,07734	-545,639
0,3	0	43,57866	-536,544
0,4	0	45,77098	-530,601
0,5	0	46,27635	-526,203
0,6	0	45,87581	-522,584
0,7	0	44,94692	-519,383
0,8	0	43,67387	-516,431
0,9	0	42,14839	-513,654
1	0	40,41812	-511,021
1,1	0	38,50987	-508,522
1,2	0	36,44078	-506,158
1,3	0	34,22362	-503,933
1,4	0	31,86934	-501,853
1,5	0	29,38831	-499,927
1,6	0	26,79083	-498,161
1,7	0	24,08739	-496,562
1,8	0	21,28878	-495,136
1,9	0	18,4061	-493,889
2	0	15,45076	-492,825
2,1	0	12,43443	-491,948
2,2	0	9,369013	-491,263
2,3	0	6,266622	-490,772
2,4	0	3,139499	-490,476
2,5	0	-1,6E-05	-490,377
2,6	0	-3,13953	-490,476
2,7	0	-6,26665	-490,772
2,8	0	-9,36905	-491,263
2,9	0	-12,4345	-491,948
3	0	-15,4508	-492,825

3,1	0	-18,4062	-493,889
3,2	0	-21,2889	-495,136
3,3	0	-24,0876	-496,562
3,4	0	-26,7913	-498,161
3,5	0	-29,3892	-499,927
3,6	0	-31,8711	-501,852
3,7	0	-34,2272	-503,929
3,8	0	-36,4483	-506,15
3,9	0	-38,5255	-508,506
4	0	-40,4507	-510,988
4,1	0	-42,2163	-513,586
4,2	0	-43,8152	-516,29
4,3	0	-45,2412	-519,088
4,4	0	-46,4887	-521,971
4,5	0	-47,5527	-524,926
4,6	0	-48,429	-527,943
4,7	0	-49,1142	-531,008
4,8	0	-49,6056	-534,111
4,9	0	-49,9012	-537,238
5	0	-49,9998	-540,377
5,1	0	-49,9012	-543,517
5,2	0	-49,6056	-546,644
5,3	0	-49,1142	-549,746
5,4	0	-48,429	-552,812
5,5	0	-47,5527	-555,828
5,6	0	-46,4887	-558,783
5,7	0	-45,2412	-561,666
5,8	0	-43,8152	-564,465
5,9	0	-42,2162	-567,169
6	0	-40,4507	-569,766
6,1	0	-38,5255	-572,248
6,3	0	-34,2272	-576,826
6,4	0	-31,8711	-578,903
6,5	0	-29,3891	-580,828
6,6	0	-26,7912	-582,594
6,7	0	-24,0876	-584,192
6,8	0	-21,2889	-585,618

6,9	0	-18,4061	-586,866
7	0	-15,4508	-587,93
7,1	0	-12,4344	-588,806
7,2	0	-9,36902	-589,491
7,3	0	-6,26662	-589,983
7,4	0	-3,1395	-590,278
7,5	0	1,51E-05	-590,377
7,6	0	3,13953	-590,278
7,7	0	6,266654	-589,983
7,8	0	9,369047	-589,491
7,9	0	12,43446	-588,806
8	0	15,45081	-587,93
8,1	0	18,40618	-586,866
8,2	0	21,2889	-585,618
8,3	0	24,08761	-584,192
8,4	0	26,79126	-582,593
8,5	0	29,38917	-580,828
8,6	0	31,8711	-578,903
8,7	0	34,22725	-576,826
8,8	0	36,44831	-574,604
8,9	0	38,52554	-572,248
9	0	40,45072	-569,766

Os resultados para esta simulação no Visual Nastran 4D foram (figuras 28 e 29):

Figura 28 – θ_1 em função do tempo (gráfico no *Visual Nastran 4D*)

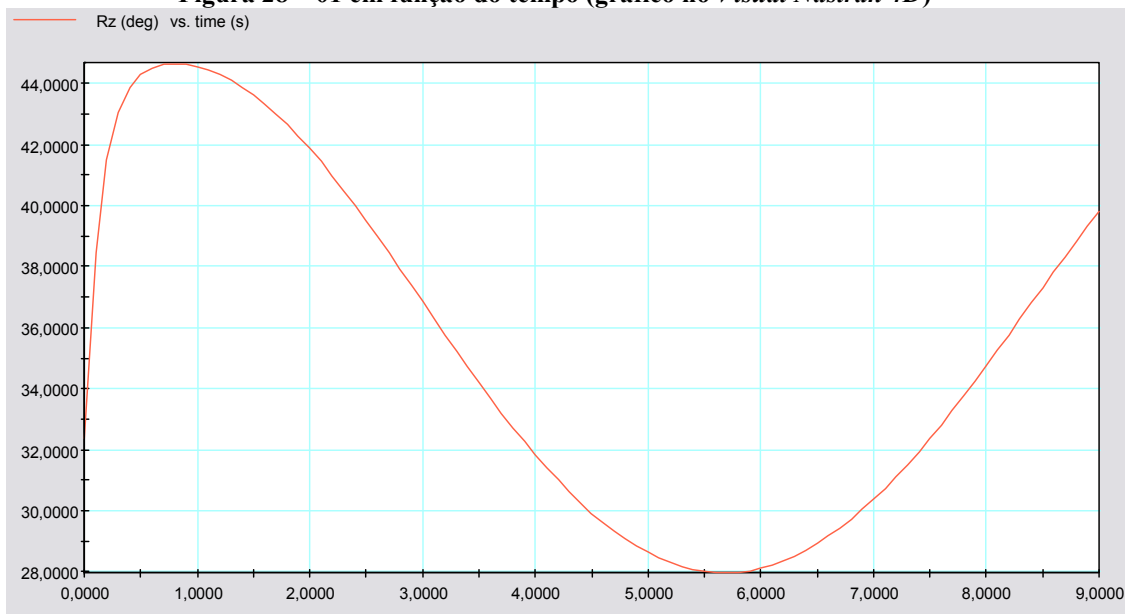
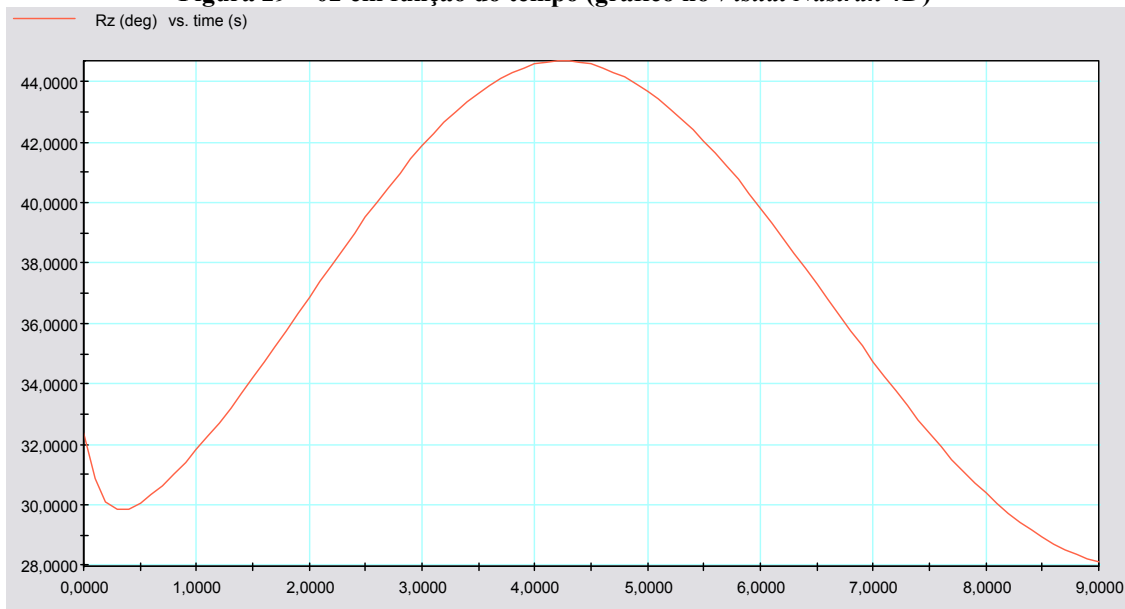


Figura 29 – θ_2 em função do tempo (gráfico no *Visual Nastran 4D*)



A seguir, os gráficos no *Scilab* (figuras 30 e 31):

Figura 30 – θ_1 em função do tempo (gráfico no *Scilab*)

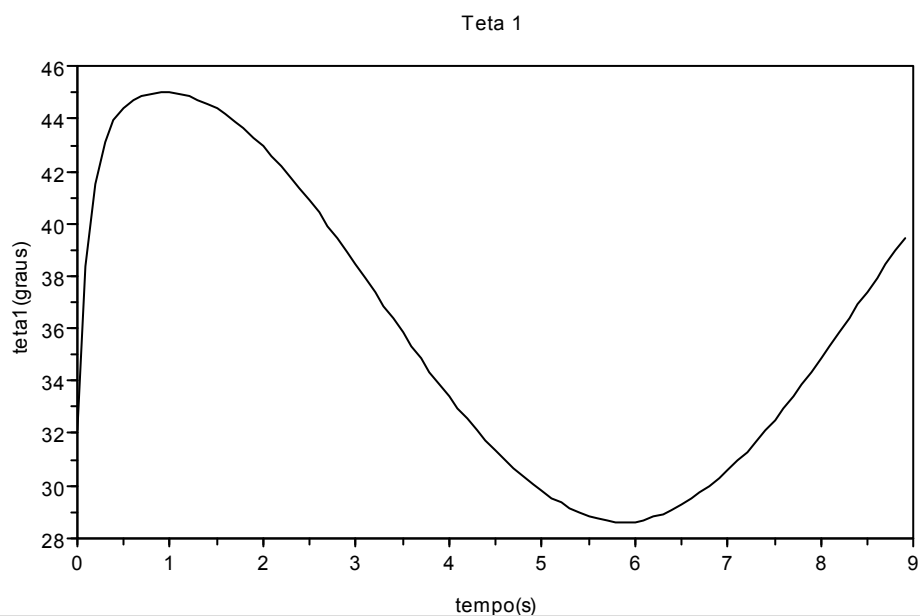
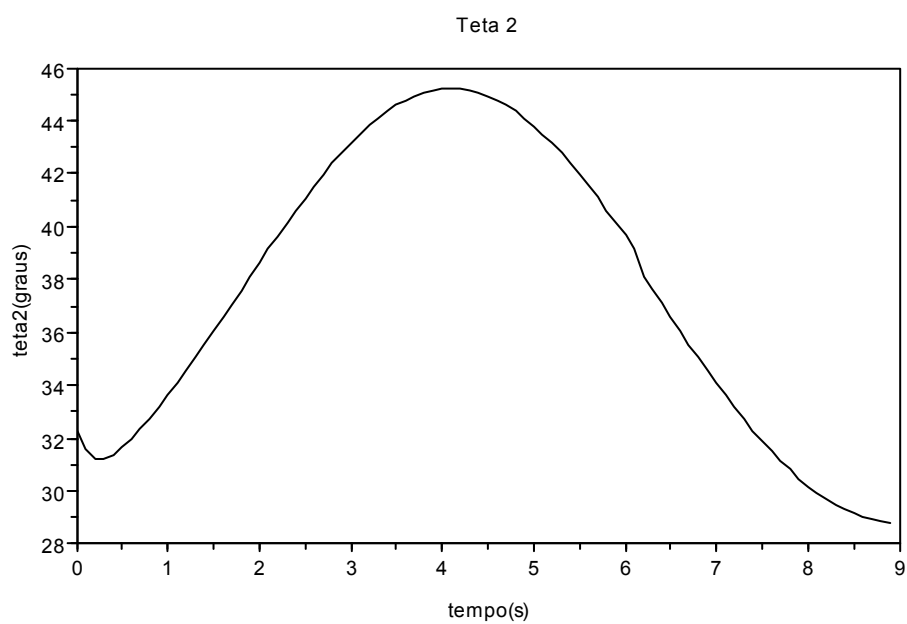


Figura 31 – θ_2 em função do tempo (gráfico no *Scilab*)



Para os motores, utilizou-se o gráfico de torque do motor estático com os dados referentes ao protótipo. O gráfico se dá para um deslocamento linear no eixo X de 0 a 150 mm, em Y=0 mm e Z=100 mm com um peso total de 1 kg.

Figura 32 – Torque do motor esquerdo

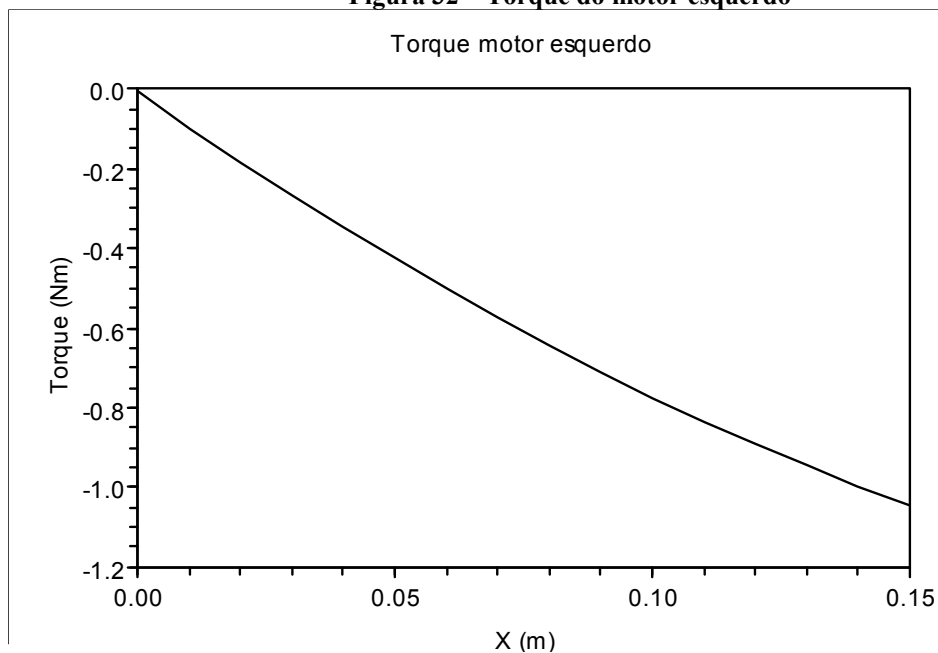
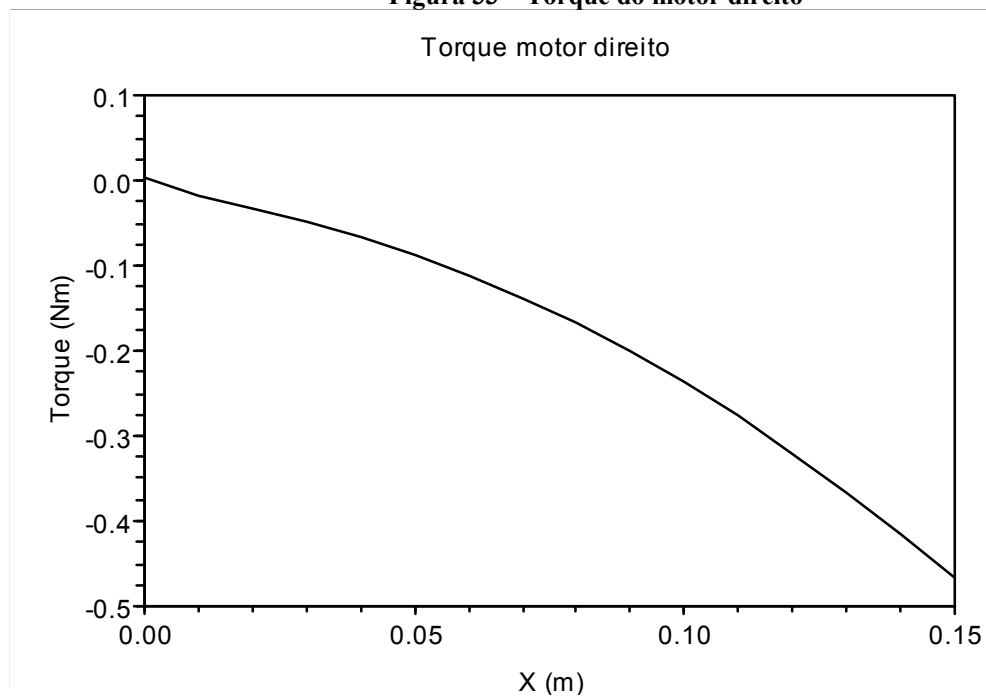


Figura 33 – Torque do motor direito



As linhas de comando executadas no programa *Scilab 4.1.2* encontram-se no Anexo B.

4.2. Programa em Scilab - Estudo sobre a rigidez

Pode-se fazer o estudo sobre a rigidez do robô considerando as dimensões dos desenhos de fabricação. Desta maneira:

$$K1=0.35\text{m}$$

$$L1=0.45\text{m}$$

$$D1=0.28\text{m}$$

$$D=0.08\text{m}$$

$$P[X,Y,Z]=[0,0,0.524]$$

$$P [F_x,F_y,F_z] = [0,0,50\text{N}]$$

Para a barra de dimensão $K1$, o momento de inércia I e o módulo de elasticidade podem ser dados por:

$$\text{AL6061- } E=70 \text{ Gpa}$$

$$I = 8.286 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

O componente $k3$ da matriz χ , por ser relacionado à correia, a qual não foi definida, terá o mesmo valor de $k1$ e $k2$. A deformação para uma força aplicada de 50N é:

$$[\Delta X, \Delta Y, \Delta Z] = [0,0,0.0035782]$$

O programa no *Scilab* é um módulo pertencente ao anexo C.

4.3. Programa em Scilab - Otimização das dimensões do robô

Para a primeira varredura do espaço de trabalho, considerou-se os seguintes valores:

$$Cte1=20$$

$$Cte2=10$$

$$L1 = [1.0, 1.5, 2.0, 2.5, \dots, 18.5, 19.0]$$

$$D = [1.0, 1.5, 2.0, 2.5, \dots, 8.5, 9.0]$$

$$M=92 \text{ pontos}$$

$$f=0.5$$

$$X_{max}= 46$$

$$Y_{max}= 23$$

$$Z_{max}=23$$

O programa encontra-se no Anexo D. Os gráficos a seguir representam o volume do espaço de trabalho em função do *Coef1* e *Coef2* (figuras 34, 35 e 36):

Figura 34 – Volume do espaço de trabalho por *Coef1* e *Coef2*

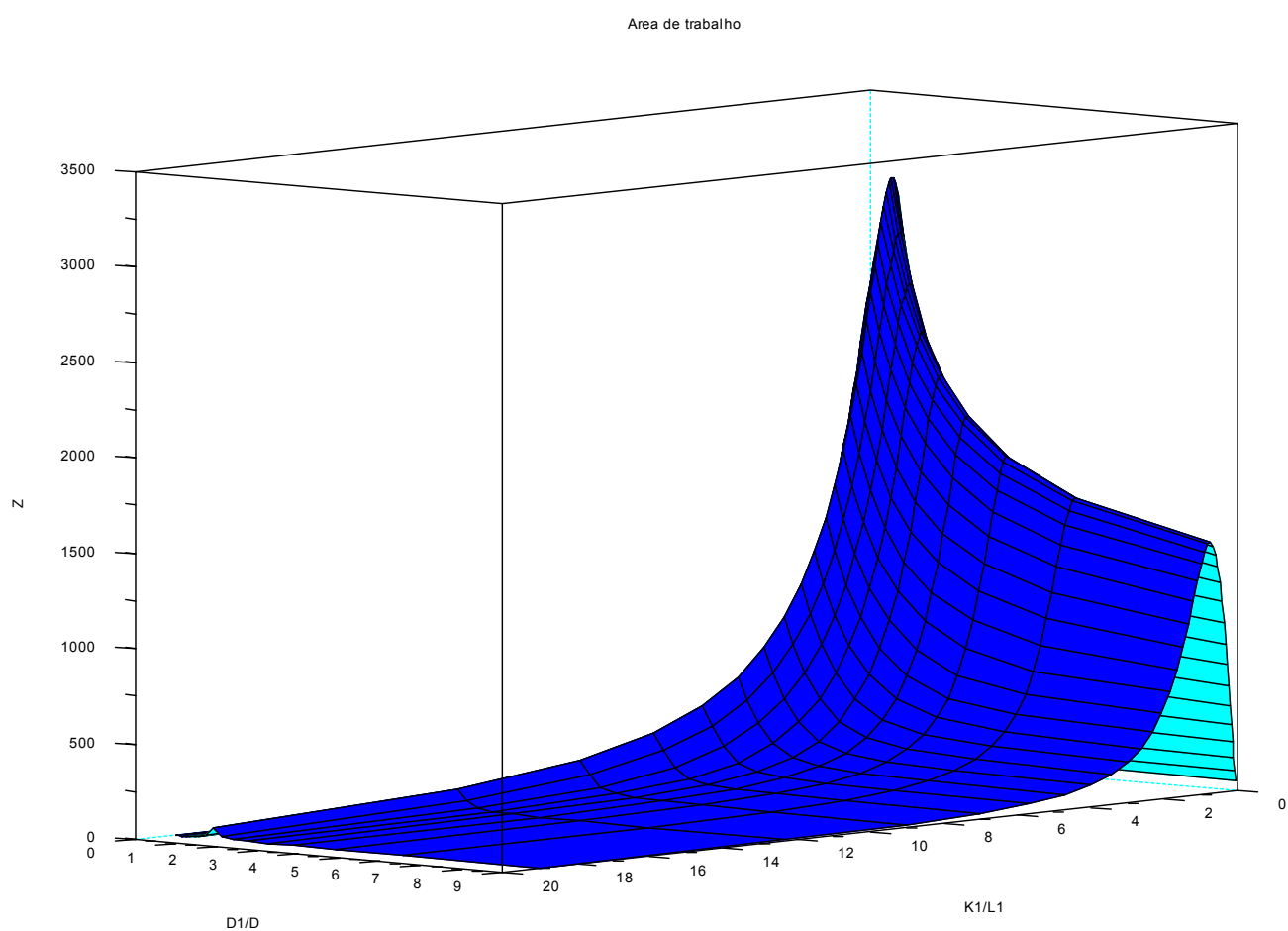


Figura 35 – Volume do espaço de trabalho em função de *Coef1*

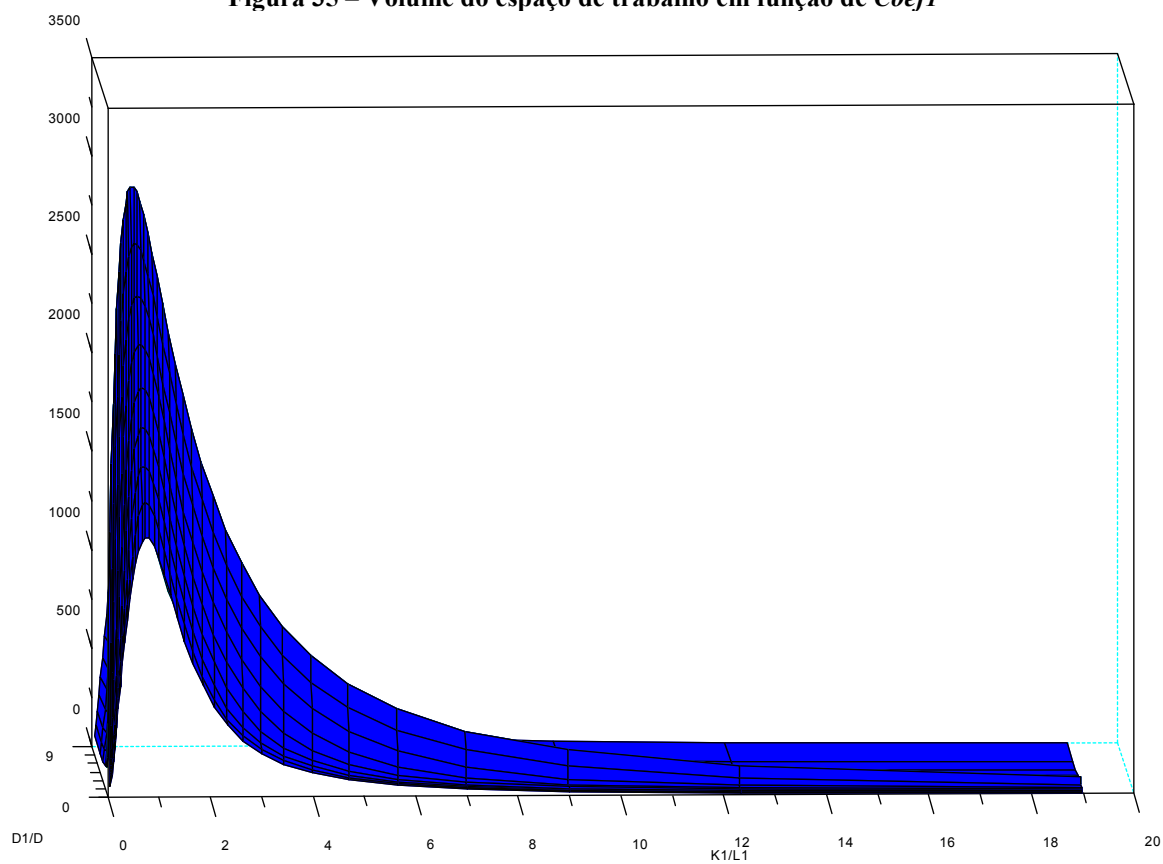
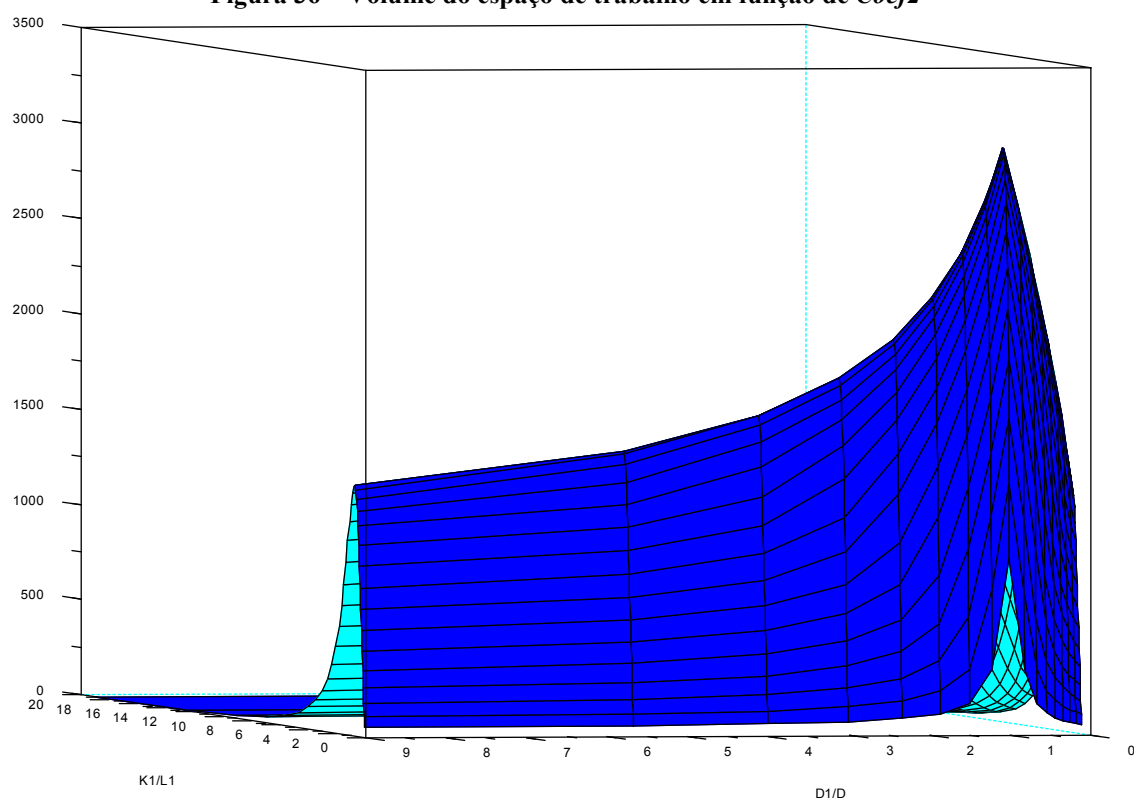


Figura 36 – Volume do espaço de trabalho em função de *Coef2*



Para melhor visualização, plotou-se a área de trabalho em função do índice do vetor *Coef1* e *Coef2* (ver tabelas 2 e 3 e figuras 37 e 38):

Tabelas 2 e 3 – Relação de *Coef1* e *Coef2* com seus índices

índice	<i>Coef1</i> = $K1/L1$
1	19
2	12.33
3	9
4	7
5	5.67
6	4.71
7	4
8	3.44
9	3
10	2.64
11	2.33
12	2.08
13	1.86
14	1.67
15	1.5
16	1.35
17	1.22
18	1.11
19	1
20	0.9
21	0.82
22	0.74
23	0.67
24	0.6
25	0.54
26	0.48
27	0.43
28	0.38
29	0.33
30	0.29
31	0.25
32	0.21
33	0.18
34	0.14
35	0.11
36	0.08
37	0.05

índice	<i>Coef1</i> = $D1/D$
1	9
2	5.67
3	4
4	3
5	2.33
6	1.86
7	1.5
8	1.22
9	1
10	0.82
11	0.67
12	0.54
13	0.43
14	0.33
15	0.25
16	0.18
17	0.11

Figura 37 – Volume do espaço de trabalho por *Coef1* e *Coef2(1)*

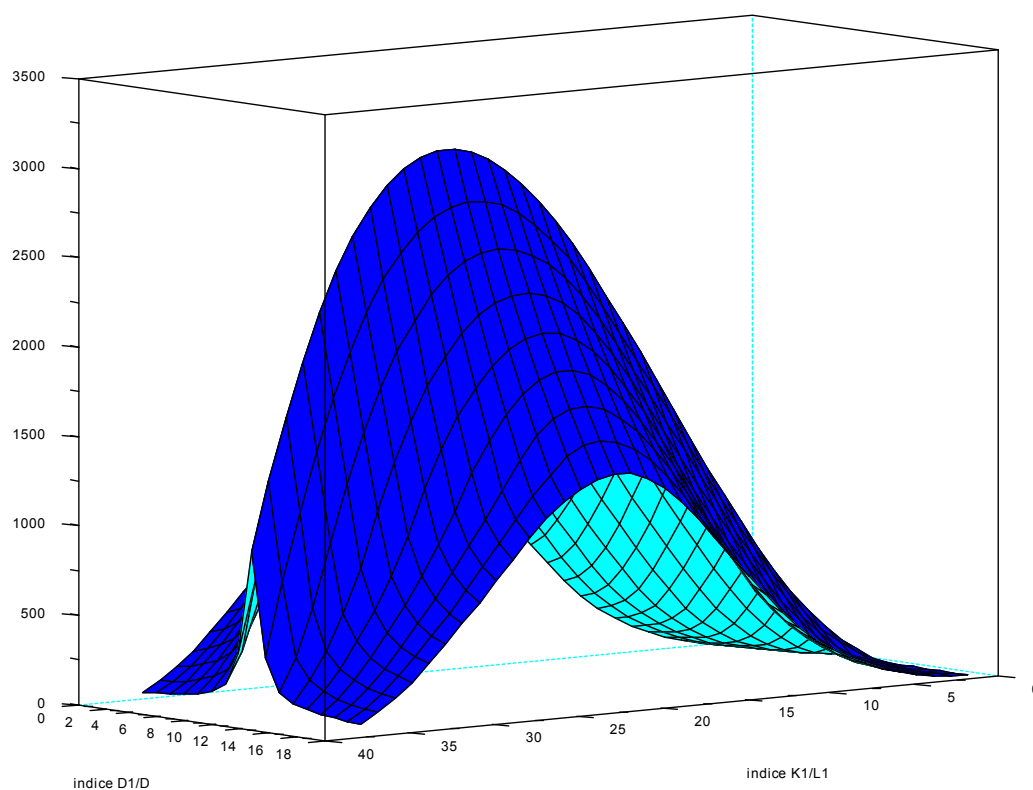
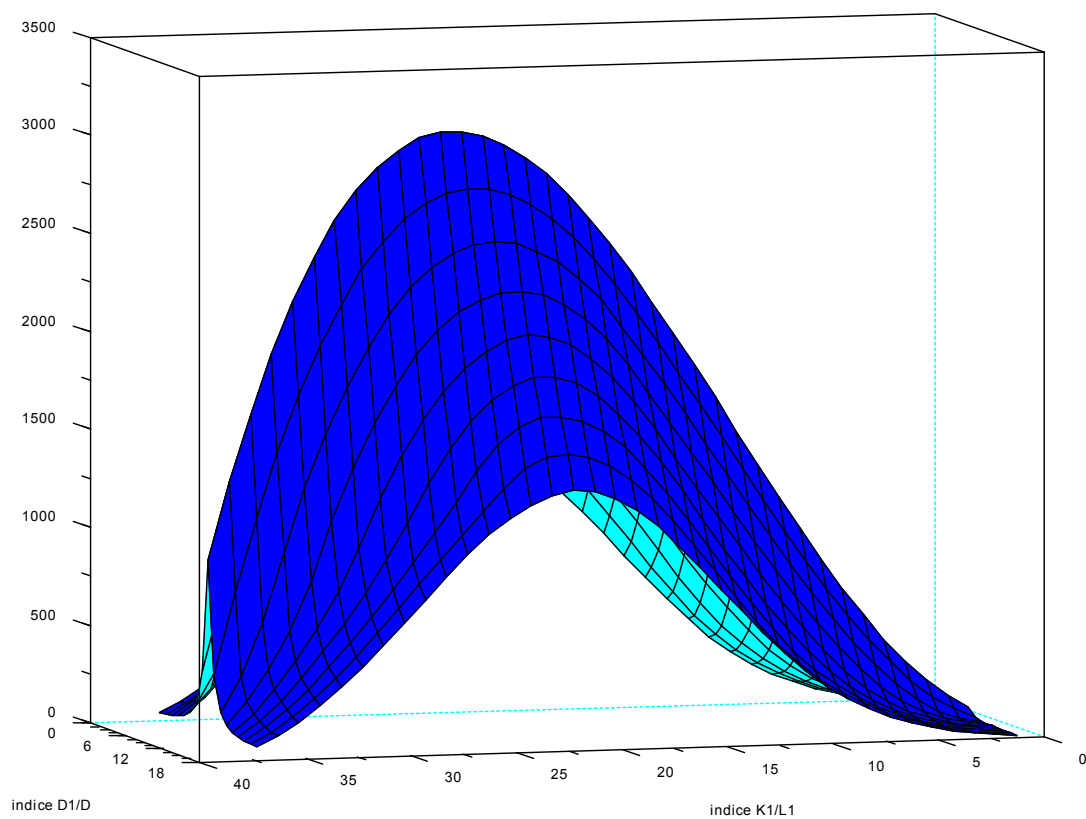


Figura 38 – Volume do espaço de trabalho por *Coef1* e *Coef2 (2)*



4.3. Protótipo

O protótipo real foi construído e usinado. As figuras 39 a 42 mostram o protótipo em diferentes posições e ângulos. Sua fixação se deu em uma base de madeira.

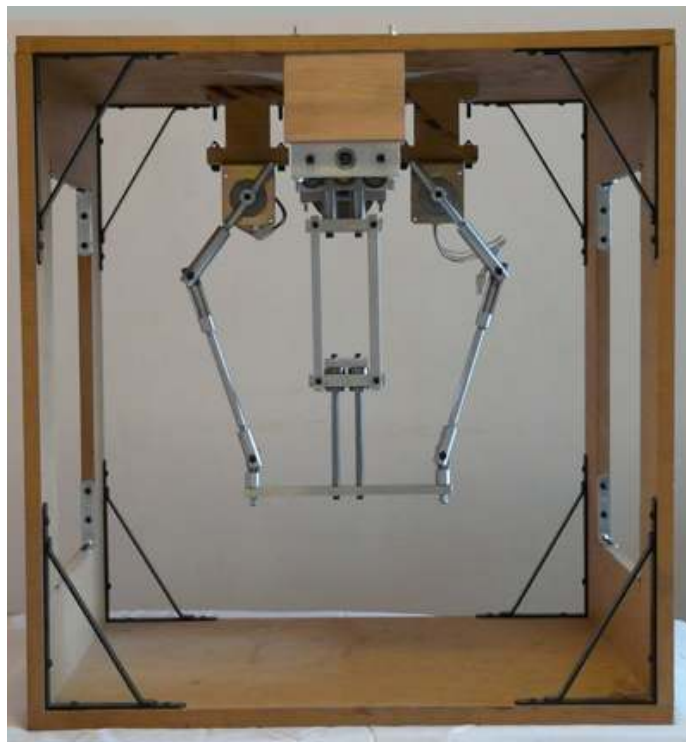


Figura 39 – Vista frontal do protótipo, posição neutra

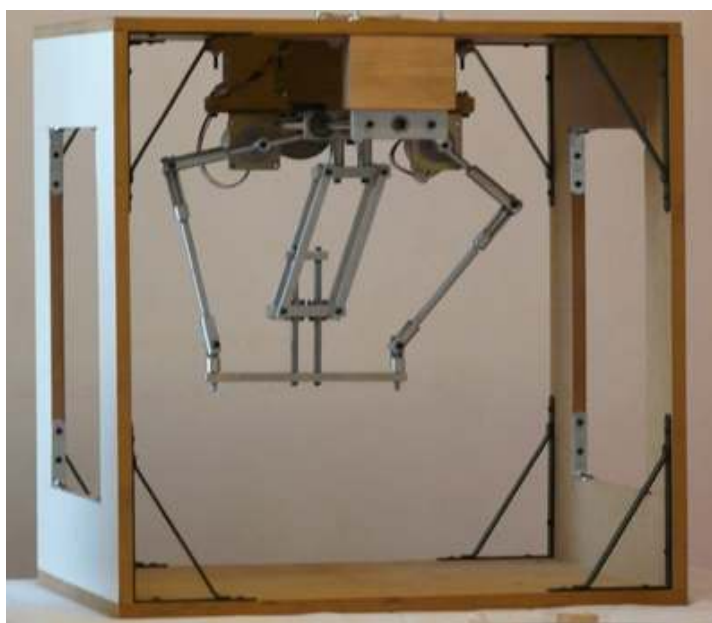


Figura 40 – Outra vista, deslocada em X



Figura 41 – Vista inferior, deslocada em X e Y



Figura 42 – vista lateral, deslocado em X e Y

As figuras 43 e 44 referem-se a junta esférica, e mostram a solução construtiva para sua fabricação



Figura 43 – Destaque para a junta esférica, vista frontal



Figura 44 – Destaque para a junta esférica, vista frontal

A figura 45 mostra a solução construtiva para a guia responsável pelo deslocamento no eixo Z do protótipo. A figura 46 mostra a guia responsável pelo movimento no ao longo do eixo Y



Figura 45 – Guia responsável pelo deslocamento em Z



Figura 46 – Guia responsável pelo deslocamento em Y

As figuras 47 e 48 mostram em detalhes a fixação dos motores ao protótipo.



Figura 47 – Motor acoplado a guia



Figura 48 – Motor acoplado ao braço

4.4. Fabricação das peças – Robô real

Os desenhos de fabricação e de conjunto referentes aos braços fixos ao motor (cujas dimensões são K1) se encontram no Anexo A.

O processo de fabricação do braço se deu nas seguintes etapas:

- Usinou-se um bloco de alumínio estrudado de seção retangular de 1 ½” por ½” em uma fresa como mostra a figura 49.

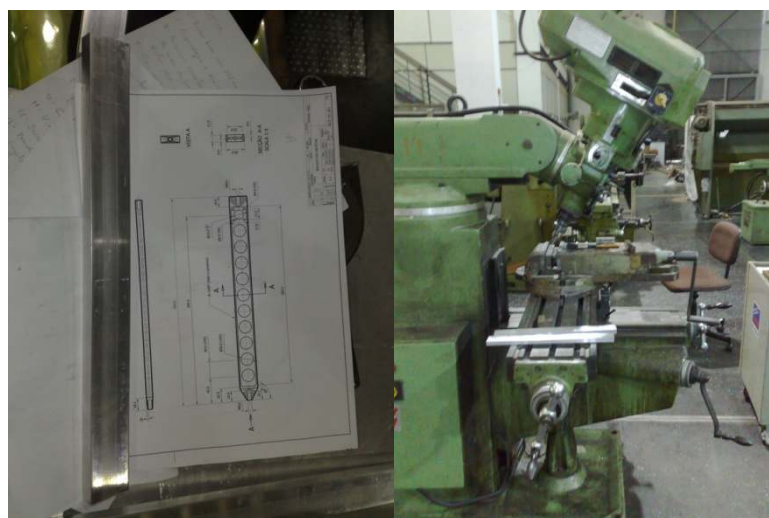


Figura 49 – Bloco de alumínio e fresa

-Fixou-se a barra com cola na mesa, com o objetivo de se usinar as laterais da barra e garantir perpendicularidade (figura 50).



Figura 50 – Usinagem das laterais do bloco

- Uma vez que as laterais estão perpendiculares e paralelas e com as espessuras corretas, usinou-se a face superior (figura 51), de forma a aplainá-la e definir a medida especificada.



Figura 51 – Usinagem da face superior

- Abriu-se o canal na face recém aplainada, com a profundidade especificada. O processo consistiu em sucessivos passes da fresam de forma a aprofundar cada vez mais o canal. Posteriormente fizeram-se os furos de alívio de peso (figura 52).



Figura 52 – Fabricação do canal

- Repetiram-se os processos para a outra face da peça, as dimensões do braço, portanto foram definidas.

5. DISCUSSÃO

5.1. Modelo matemático

Os resultados obtidos no *Scilab* são coerentes com o modelo exemplo proposto. O exemplo, devido as suas dimensões, formava um hexágono regular. Para os pontos, velocidades e forças definidas, os resultados retornados pela rotina foram os mesmos resultados obtidos com a resolução manual das equações, o que valida a rotina. A figura 53 ilustra o modelo.

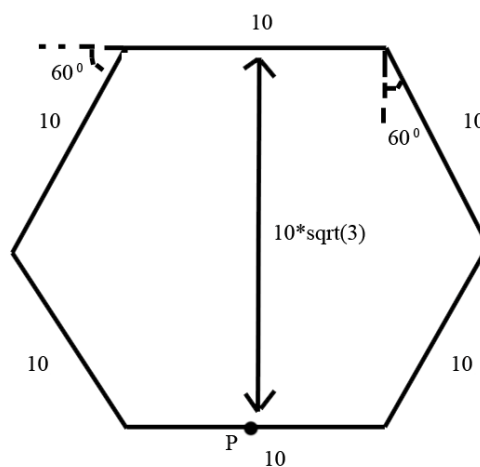


Figura 53 – Modelo de robô como hexágono regular

Os gráficos do *Scilab* ficaram iguais aos da rotina executada no *Visual Nastran 4D*, o que reforça a coerência do modelo matemático.

Uma vez que a rotina esteja correta, pode-se usá-la para simular mais pontos desejados do robô, revelando sua real utilidade: uma prática ferramenta de visualização do comportamento do robô e sua importância no sistema de controle. Com a rotina, será possível verificar as condições do robô para um dado caminho com determinados pontos e confrontá-las com os resultados medidos, sendo os resultados computacionais passíveis de serem usados como referência para verificação de rendimento do robô.

5.2. Estudo de rigidez do modelo

Neste estudo, tomou-se como base o modelo inicial desenvolvido em CAD, que foi referência para a criação dos desenhos de fabricação e conjunto. As dimensões deste modelo são proporcionais às dimensões do robô *IRB 340* da empresa *ABB*. Partindo deste ponto, fica claro que a deformação de 3.58 mm para uma força externa aplicada de 50 N (que equivale a um carregamento no órgão terminal de 5 kg) é aceitável.

Na simulação, o órgão terminal do modelo encontrava-se em $Z=524$ mm. Para estes 524 mm, houve um deslocamento de 3.58 mm no eixo Z. Este valor em porcentagem equivale a uma imprecisão de 0.68% na coordenada Z, mostrando que este é um erro aceitável.

Comparativamente, o IRB 340 é vendido em duas versões, uma que aceita 1 kg, e outra que é projetada para carregar até 2 kg, ou seja, pesos com valores bem abaixo do utilizado para a simulação, que foi de 5 kg.

5.3. Otimização das dimensões do robô

Em primeiro lugar, deve-se fazer observações quanto aos valores utilizados na simulação. O número de pontos utilizados para a determinação do espaço de trabalho não foi o ideal. Poderiam ter sido usados mais pontos, entretanto, tal aproximação demandaria muito tempo de processamento. Desta maneira, optou-se por fazer inicialmente uma aproximação um pouco mais grosseira quanto ao valor do volume do espaço de trabalho, para posteriormente, identificado uma região onde este é maior, utilizar mais pontos. O valor $Cte1$ influi no valor do volume do espaço de trabalho, porém essa influência se dá de maneira uniforme sobre todos os valores de volume, desta maneira, não haveria muita importância se outro valor fosse escolhido, pois a comparação entre as áreas seria válida ainda. Também não houve uma preocupação em definir sua unidade, pois o gráfico é plotado em função de um adimensional. A mesma constatação poderia ser feita na $Cte2$, porém com uma diferença: a $Cte2$ não influi no volume do espaço de trabalho. Aumentar D e D1, apenas faz com que o robô ocupe mais espaço, pois o ponto P não muda de lugar com este aumento.

O gráfico gerado, em relação ao eixo do *Coef2* apresenta uma característica peculiar: tem seu ponto máximo quando *Coef2* vale 1, ou seja, quando $D=D1$. Tal constatação se mostra clara se observamos o modelo da seguinte forma:

Se o valor de D diminui enquanto $D1$ permanece fixo, a distância do ponto P para o braço da cadeia ativa diminui, o que faz com que o ponto P chegue a menores cotas no eixo X . Se o valor de D permanece o mesmo, e o valor de $D1$ diminui, a cadeia que já estava em seu limite de tamanho, se vê obrigada a se alongar mais ainda, o que gera uma mudança de configuração, o que se traduz em diminuição da cota X também. A figura 54 ilustra melhor o explicado.

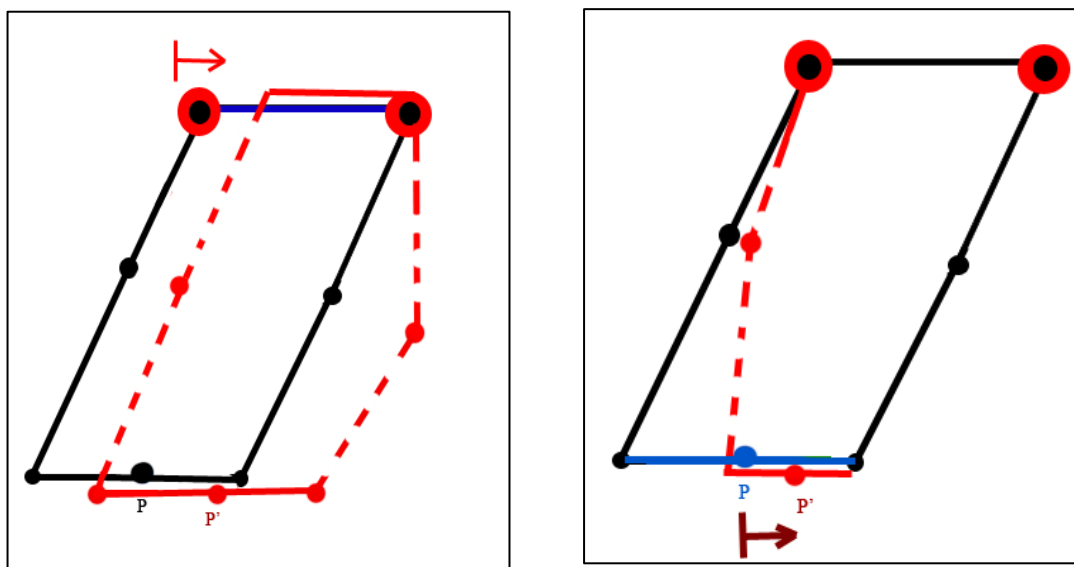
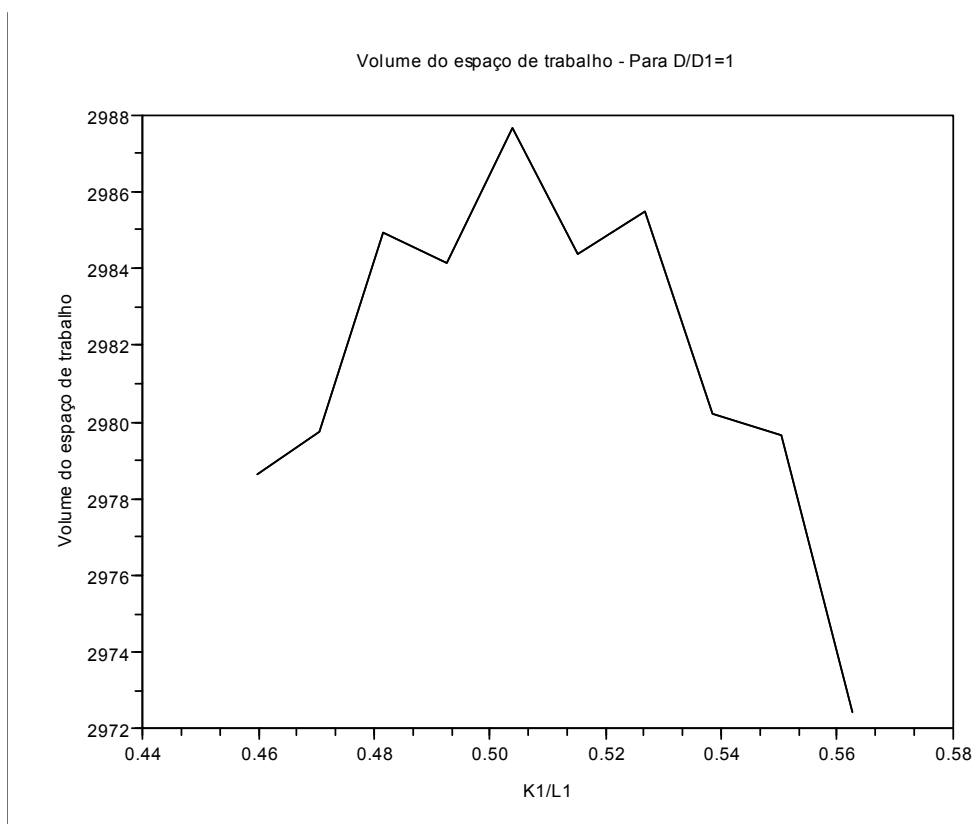


Figura 54 – Efeito da variação do *Coef2*

Quanto à variação do volume pelo *Coef1*, nota-se que há um máximo para uma faixa que varia entre 0.6 a 0.4. Devido a precisão não tão alta da verificação do espaço de trabalho, decidiu-se, verificar essa região mais precisão, agora com 230 pontos, e com um fator $f=0.2$. O resultado gerou a figura 55, mostrado a seguir.

Figura 55 - Volume do espaço de trabalho para $Coef2=1$



A partir deste novo gráfico, nota-se que há um pico no valor para $K1/L1 = 0.5037594$, sendo este a relação de barras que gera o maior espaço de trabalho. É curioso notar que esta proporção assemelha-se a vista no *IRB 340* da ABB, e na proporção utilizada na primeira versão do R3T, quando este ainda não possuía as três translações.

Outro ponto a ser comentado é a irregularidade neste ponto do gráfico, que mostra que para esta região, há flutuações no valor do espaço de trabalho, o que pode significar que nesta região, há uma tênue relação com máximo que o modelo pode ir em cada um dos três eixos, ou seja, o aumento de área no eixo X é compensado por uma diminuição no eixo Y e assim por diante.

5.4. Protótipo real

A construção do protótipo real se mostrou proveitosa, pois notaram-se alguns problemas que não ficaram tão evidentes no projeto.

O problema mais evidente que ocorreu no projeto foram alguns problemas quanto a aspectos construtivos. A junta esférica, embora tenha vantagens quanto a movimentação do robô, apresenta difícil processo de fabricação, devido aos seus vários eixos e ao seu tamanho, que deve ser diminuto. A guia responsável pela movimentação no eixo Z, também apresenta algumas dificuldades. Por não poder permitir a rotação sobre o eixo Z, sua solução construtiva passa pelo uso de dois eixos paralelos, o que dificulta bastante a usinagem. O fato da movimentação do robô torcer a garra, torna obrigatório também o uso de rolamentos nesta. A guia responsável pela movimentação em Y também tem uma montagem complexa, pois possui um longo curso (400 mm), o que dificulta na fixação, na construção das peças que apóiam o fuso. Entretanto, esse problema no robô real não será visto, pois este utilizara a guia da NSK.

A cadeia central adotada, com a configuração de um quadrilátero articulado com uma guia, mostrou-se ineficiente por diversos aspectos. A sua configuração faz com que durante a movimentação do robô, seus braços se choquem com algumas partes do quadrilátero, o que dificulta a determinação da trajetória, uma vez que esta deve levar em conta tais pontos. A sua configuração também, limita consideravelmente a área de trabalho real do protótipo, pois quanto maior o tamanho da dimensão L, maiores cotas em Y o robô consegue alcançar, mas ao mesmo tempo o deslocamento no eixo Z fica limitado também. Para uma próxima etapa, o desenvolvimento de uma nova arquitetura da cadeia que não passasse por esses problemas traria melhorias ao robô.

A adoção de uma guia linear no eixo Y se mostrou uma boa solução, pois neste eixo, o espaço de trabalho ficou beneficiado por grandes cotas e uma grande amplitude, principalmente se comparada a amplitude em X. Sua movimentação também não mostrou grandes dificuldades.

6. CONCLUSÃO

O resultado obtido foi satisfatório. A nova arquitetura proposta para o R3T se mostrou interessante em diversos aspectos. Sua simetria foi conveniente em diversas situações, como no cálculo do volume de trabalho. A relação direta que a cadeia prismática central possui com a cota no eixo Y do órgão terminal também torna a modelagem mais simples. Houve um progresso gradual entre o primeiro R3T e este modelo.

O modelo criado em CAD, embora não tenha sido muito comentado no trabalho, ajudou a se ter uma boa percepção do comportamento do R3T. Comparando suas medidas com as obtidas no processo de otimização, pode-se perceber que estas não estavam perto do considerado ótimo. Houve uma análise realizada além das expostas, que compara ciclos de movimentação deste modelo virtual e ciclos do IRB 340. Entretanto, viu-se que os ciclos de ambos os modelos estavam sendo interpretados de maneira errada, gerando resultados irreais, sendo necessário revisá-los futuramente.

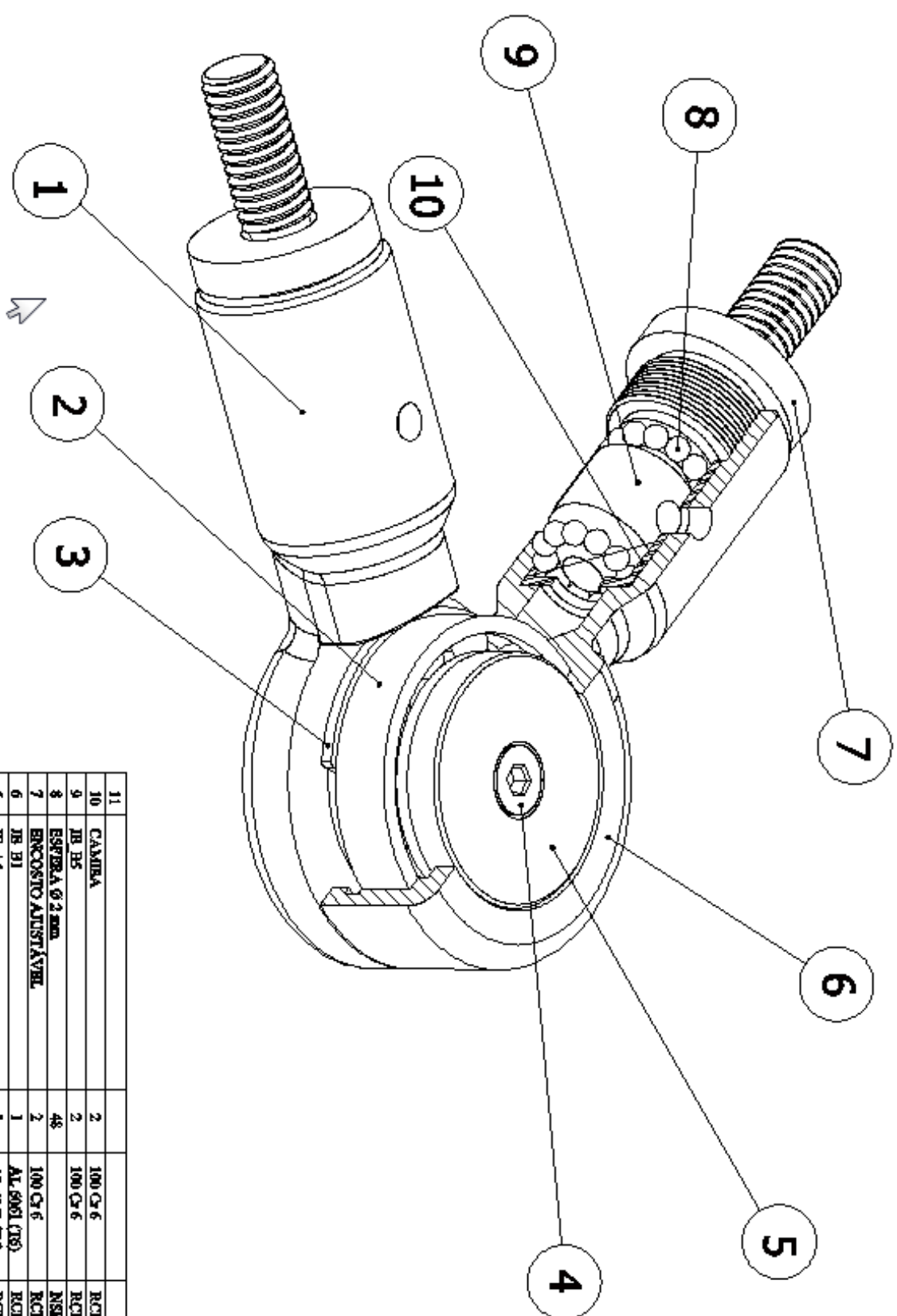
O modelo matemático do robô proposto neste trabalho mostrou-se robusto e preciso. O estudo sobre a rigidez mostrou-se uma ferramenta interessante para se verificar a acurácia do modelo, além de ter confirmado a consistência da hipótese de barra rígida adotada. O estudo de otimização do R3T obteve bons resultados e com respaldo em outros já obtidos anteriormente, como o robô IRB 340.

O protótipo real ajudou a se ter uma visão do geral do robô, ajudando a localizar aspectos que na prática funcionaram bem, dificuldades construtivas e pontos a serem melhorados. Poderá ser de grande utilidade se usado como referência para a construção, ajuste e calibração do robô.

Para a construção do robô, podemos citar como pontos positivos a obtenção de vários materiais e a experiência adquirida pelo protótipo, e como sugestão fica a mudança da arquitetura da cadeia central que se mostrou a grande limitante do espaço de trabalho do robô. Uma cadeia que contenha um quadrilátero extensível poderá ser uma alternativa interessante.

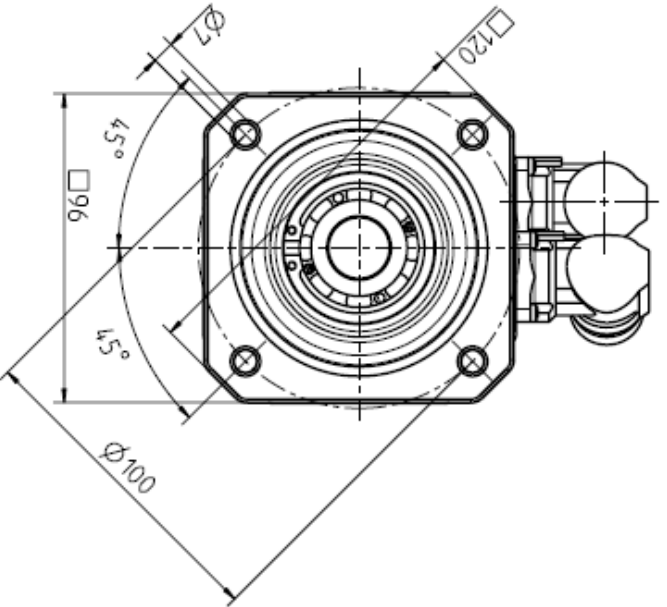
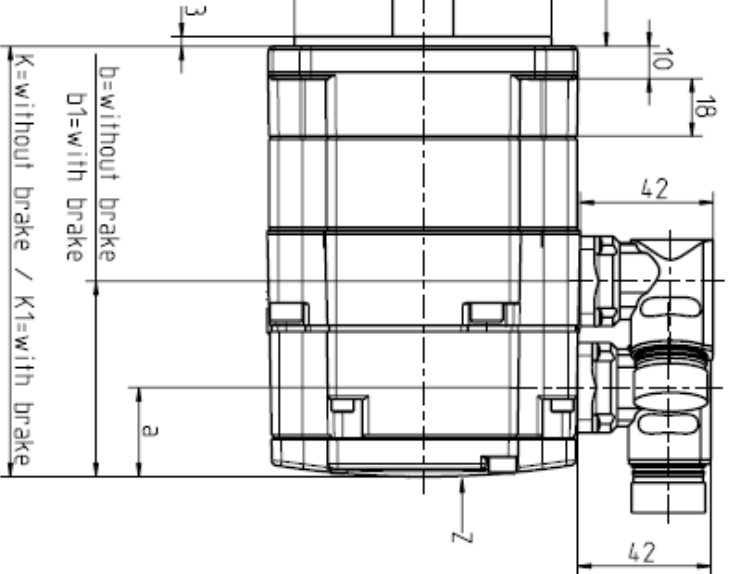
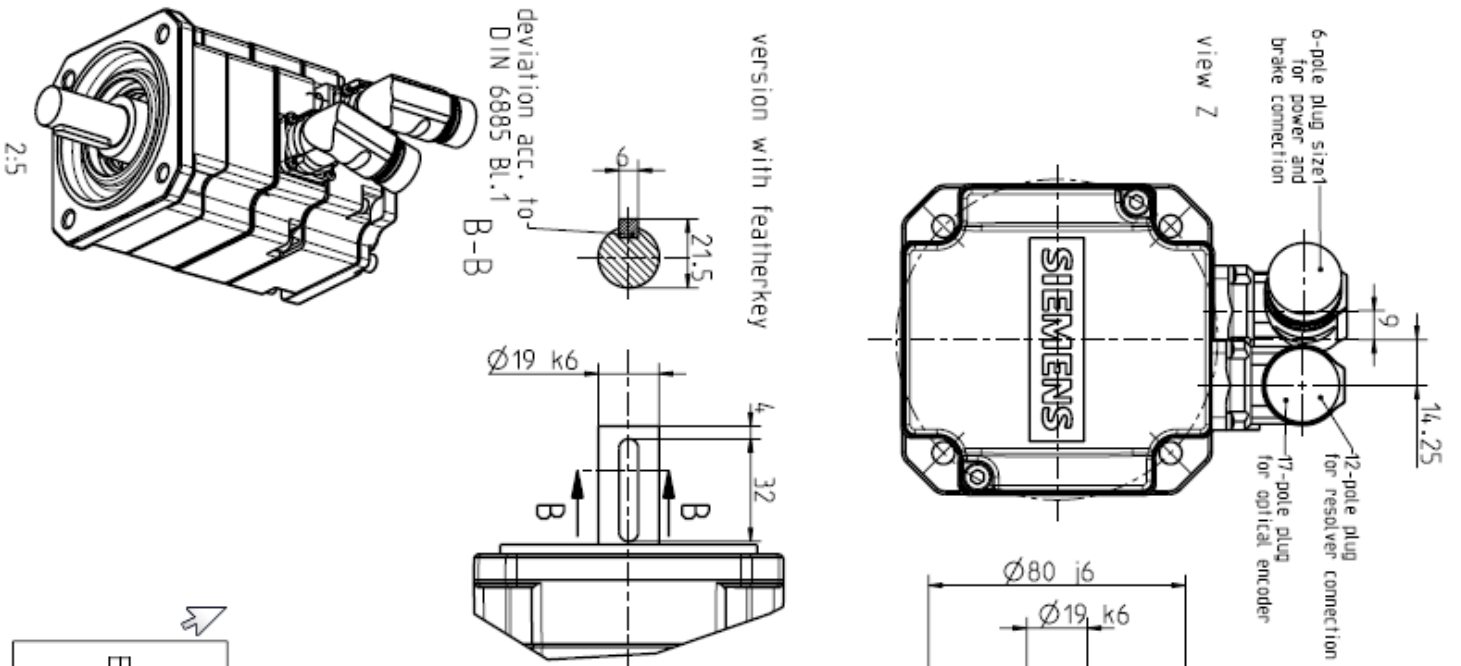
7. ANEXOS

Anexo A - Desenhos de fabricação e conjunto e motor

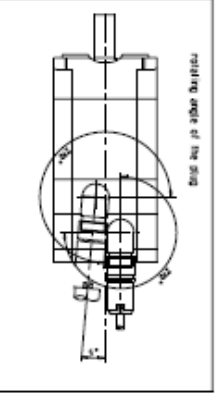


11	CAMERA	2	100 Cr 6	RCP 02 006	
10	JB B5	2	100 Cr 6	RCP 02 005	
9	ESFERA Ø 2 mm	48		NSEK	
8	ENCOSTO AJUSTAVEL	2	100 Cr 6	RCP 02 004	
7	JB B1	1	AL 6061 (T6)	RCP 02 002	
6	JB A4	1	AL 6061 (T6)	RCP 02 003	
5	PARAF. ALLEN MEX10 CAB. BAIXA	1			
4	ANEL ELASTICO Ø206 mm	1			
3	ROLAMENTO 61803	1			
2	JB A1	1	AL 6061 (T6)	RCP 02 001	
1					

Nome:		Descrição:		Quant.	Material	Desenho/Revisão
JUNTA ESFERICA						
Ø	0.5	Desenho:	Tol.	Data:	Revisão:	Substituído
~		~		Desa.	Desa.	Desa.
±	0.1	±	0.1	Conf.	Conf.	Conf.
±	0.05	±	0.05	Agrov.	Agrov.	Agrov.
SE		A3		RCP_02		Rev. 0



version	type	mm	kg	weight	without brake	with brake	K	K1	a	b	b1	K	K1	a	b	b1	K	K1	a	b	b1
02	IFK70A2-5	4.8	4.9	5.4	162	191	28	61	90	183	212	4.9	91	111	191	220	57	99	119		
01	IFK70A0-5	4.8	3.5	4.0	135	164	28	61	90	155	184	4.9	91	111	164	193	57	99	119		



not tolerated dimensions ±1 mm	flange and shaft acc. to DIN 62955	resolver	simple absolute encoder	incremental encoder	sin/cos	WPP	absolute encoder
Massblatt	Massblatt	Massblatt	Massblatt	Massblatt	Massblatt	Massblatt	Massblatt
dimension sheet	dimension sheet	dimension sheet	dimension sheet	dimension sheet	dimension sheet	dimension sheet	dimension sheet
IFK70A-5	IFK70A-5	IFK70A-5	IFK70A-5	IFK70A-5	IFK70A-5	IFK70A-5	IFK70A-5

Anexo B – Programa do modelo matemático

```
clc  
clear  
  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
  
//coordenadas  
  
disp('Coordenadas desejadas')  
  
xyz=[  
0,0,10*sqrt(3)  
5*sqrt(2),0,10+5*sqrt(2)  
0,0,19.99999999  
0,9.99999999,10  
]  
  
halt()  
  
disp('Velocidades desejadas')  
  
xyzponto=[  
0,0,0  
0,0,0  
19.99999999,0,0  
0,0,0  
]  
  
halt()  
  
disp('Forcas Desejadas')  
  
Fxyz=[  
0,0,-10  
0,0,0  
10,0,0  
0,5,0  
]  
  
halt()  
  
disp('Forcas Aplicadas')  
  
Fxyzaplicado=[  
0,0,10  
0,0,10  
0,0,0  
0,0,0  
]  
  
halt()
```

```

tamanho=size(xyz);
final=tamanho(1,1);
Jx=zeros(3,3,final);
Jq=zeros(3,3,final);
J=zeros(3,3,final);
Jtransposto=zeros(3,3,final);
matrizK=zeros(3,3,final);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Dados
disp('Dimensoes do robo')
D1=5
K1=10
L1=10
D=5
L=10*sqrt(3)-1
configu=zeros(final,3);
R=0.1
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Dados rigidez
E=70;
Momento=8.286;
k3=10;
halt()
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ALFA e y e h em funcao de xyz
for indice=1:final,
    A(indice,:)=acos(xyz(indice,1)/L),xyz(indice,2),xyz(indice,3)-L*sin(acos(xyz(indice,1)/L));
end
LE=(-2*K1*xyz(:,1)-2*K1*(D-D1));
LF=(-2*K1*xyz(:,3));
LG=-L1^2+xyz(:,1)^2+xyz(:,2)^2+xyz(:,3)^2+K1^2+(D-D1)^2+2*xyz(:,1)*(D-D1);
RE=(-2*K1*xyz(:,1)-2*K1*(-D+D1));
RF=(-2*K1*xyz(:,3));
RG=-L1^2+xyz(:,1)^2+xyz(:,2)^2+xyz(:,3)^2+K1^2+(-D+D1)^2+2*xyz(:,1)*(-D+D1);
u=poly(0,"u");
eqleft=LG+LE+2*LF*u+(LG-LE)*u^2;
eqright=RG+RE+2*RF*u+(RG-RE)*u^2;
for indice=1:final,
    uleft(indice,:)=roots(eqleft(indice));
    uright(indice,:)=roots(eqright(indice));
    ababa=(1+uleft(indice,1)^2);
    babab=(1+uright(indice,2)^2);
    ///
    ///

```

```

                                                                    ///
if ababa==0 then                                                                    ///
    uleft(indice,1)=1.00001*%i;                                                                    ///
end                                                                    ///
                                                                    ///
if babab==0 then                                                                    ///
    uring(indice,2)=1.00001*%i;                                                                    ///
end
end

costeta1=(1-uleft(:,1)^2)./(1+uleft(:,1)^2);
sinteta1=(2*uleft(:,1))./(1+uleft(:,1)^2);
costeta2=(1-uring(:,2)^2)./(1+uring(:,2)^2);
sinteta2=(2*uring(:,2))./(1+uring(:,2)^2);
for indice=1:final,
    //////////////////////////////////////////Alfa ponto e y ponto e h ponto em funcao de
    xyzponto
    B(indice,:)= [xyzponto(indice,1)/(-L*sin(A(indice,1))),xyzponto(indice,2),xyzponto(indice,3)-
    (L*cos(A(indice,1))*(xyzponto(indice,1)/(-L*sin(A(indice,1))))]);

    JX11(indice)=-2*K1*costeta1(indice)+2*(D-D1)+2*xyz(indice,1);
    JX12(indice)=2*xyz(indice,2);
    JX13(indice)=-2*K1*sinteta1(indice)+2*xyz(indice,3);

    JX21(indice)=-2*K1*costeta2(indice)+2*(-D+D1)+2*xyz(indice,1);
    JX22(indice)=2*xyz(indice,2);
    JX23(indice)=-2*K1*sinteta2(indice)+2*xyz(indice,3);
    velocidade1(indice)=(JX11(indice)*xyzponto(indice,1)+JX12(indice)*xyzponto(indice,2)+JX13(indice)
    e)*xyzponto(indice,3))/(LE(indice)*sinteta1(indice)-LF(indice)*costeta1(indice));
    velocidade2(indice)=(JX21(indice)*xyzponto(indice,1)+JX22(indice)*xyzponto(indice,2)+JX23(indice)
    e)*xyzponto(indice,3))/(RE(indice)*sinteta2(indice)-RF(indice)*costeta2(indice));
    q(indice)=xyzponto(indice,2);
    //////////////////////////////////////////Torque vs angulo = Forca vs
    deslocamento(alfa,h,y) Achando MAtriz Forca
    Jx(:,,indice)= [JX11(indice) JX12(indice) JX13(indice)
    JX21(indice) JX22(indice) JX23(indice)
    0 1 0];
    Jq(:,,indice)= [(LE(indice)*sinteta1(indice)-LF(indice)*costeta1(indice)) 0 0
    0 (RE(indice)*sinteta2(indice)-RF(indice)*costeta2(indice)) 0
    0 0 1];

```

```

J(:, :, indice) = inv(Jq(:, :, indice)) * Jx(:, :, indice);
Jtransposto(:, :, indice) = J(:, :, indice)';

Torque(:, indice) = inv(Jtransposto(:, :, indice)) * Fxyz(indice, :)' ;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Rigidez
xis = [(2 * E * Momento / K1) 0 0
0 (2 * E * Momento / K1) 0
0 0 k3];
matrizK(:, :, indice) = Jtransposto(:, :, indice) * xis * J(:, :, indice);
deltaxyz(:, indice) = inv(matrizK(:, :, indice)) * Fxyzaplicado(indice, :)' ;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Angulos
TETAesquerdo = acos(costeta1) * (180 / %pi)
TETAdireito = acos(costeta2) * (180 / %pi)
q3 = xyz(:, 2)
halt()
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Velocidads
velocidade1
velocidade2
q
halt()
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Torque
TorqueE = Torque(1, :)'
TorqueD = Torque(2, :)'
TorqueCentral = Torque(3, :)'
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%deformações
delta1 = deltaxyz(1, :)'
delta2 = deltaxyz(2, :)'
delta3 = deltaxyz(3, :)'
halt()

```

Anexo C – Programa de Rigidez

```

/////////////////////////////////////////////////////////////////
//coordenadas
disp('Coordenadas desejadas')
xyz=[
0,0,0.524
]
halt()
disp('Velocidades desejadas')
xyzponto=[
0,0,0
]
halt()
disp('Forcas Desejadas')
Fxyz=[
0,0,-20
]
halt()

disp('Forcas Aplicadas')
Fxyzaplicado=[
0,0,50
]
halt()
/////////////////////////////////////////////////////////////////
tamanho=size(xyz);
final=tamanho(1,1);
Jx=zeros(3,3,final);
Jq=zeros(3,3,final);
J=zeros(3,3,final);
Jtransposto=zeros(3,3,final);
matrizK=zeros(3,3,final);
/////////////////////////////////////////////////////////////////Dados
disp('Dimensoes do robo')
D1=0.28
K1=0.35
L1=0.45
D=0.08

```

```

L=10*sqrt(3)-1
configu=zeros(final,3);
R=0.1
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Dados rigidez
E=70;
Momento=8.286;
k3=10
halt()
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ALFA e y e h em funcao de xyz
for indice=1:final,
    A(indice,:)=acos(xyz(indice,1)/L),xyz(indice,2),xyz(indice,3)-L*sin(acos(xyz(indice,1)/L));
end

LE=(-2*K1*xyz(:,1)-2*K1*(D-D1));
LF=(-2*K1*xyz(:,3));
LG=-L1^2+xyz(:,1)^2+xyz(:,2)^2+xyz(:,3)^2+K1^2+(D-D1)^2+2*xyz(:,1)*(D-D1);

RE=(-2*K1*xyz(:,1)-2*K1*(-D+D1));
RF=(-2*K1*xyz(:,3));
RG=-L1^2+xyz(:,1)^2+xyz(:,2)^2+xyz(:,3)^2+K1^2+(-D+D1)^2+2*xyz(:,1)*(-D+D1);

u=poly(0,"u");
eqleft=LG+LE+2*LF*u+(LG-LE)*u^2;
eqright=RG+RE+2*RF*u+(RG-RE)*u^2;
for indice=1:final,
    uleft(indice,:)=roots(eqleft(indice));
    uright(indice,:)=roots(eqright(indice));
    ababa=(1+uleft(indice,1)^2);
    babab=(1+uright(indice,2)^2);

    if ababa==0 then
        uleft(indice,1)=1.00001*%i;
    end

    if babab==0 then
        uright(indice,2)=1.00001*%i;
    end

    costeta1=(1-uleft(:,1)^2)./(1+uleft(:,1)^2);

```

```

sinteta1=(2*uleft(:,1))./(1+uleft(:,1)^2);
costeta2=(1-uright(:,2)^2)./(1+uright(:,2)^2);
sinteta2=(2*uright(:,2))./(1+uright(:,2)^2);
for indice=1:final,
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Alfa ponto e y ponto e h ponto em funcao de
xyzponto
B(indice,:)= [xyzponto(indice,1)/(-L*sin(A(indice,1))),xyzponto(indice,2),xyzponto(indice,3)-
(L*cos(A(indice,1))*(xyzponto(indice,1)/(-L*sin(A(indice,1)))));
JX11(indice)=-2*K1*costeta1(indice)+2*(D-D1)+2*xyz(indice,1);
JX12(indice)=2*xyz(indice,2);
JX13(indice)=-2*K1*sinteta1(indice)+2*xyz(indice,3);
JX21(indice)=-2*K1*costeta2(indice)+2*(-D+D1)+2*xyz(indice,1);
JX22(indice)=2*xyz(indice,2);
JX23(indice)=-2*K1*sinteta2(indice)+2*xyz(indice,3);
velocidade1(indice)=(JX11(indice)*xyzponto(indice,1)+JX12(indice)*xyzponto(indice,2)+JX13(indice)
)*xyzponto(indice,3))/(LE(indice)*sinteta1(indice)-LF(indice)*costeta1(indice));
velocidade2(indice)=(JX21(indice)*xyzponto(indice,1)+JX22(indice)*xyzponto(indice,2)+JX23(indice)
)*xyzponto(indice,3))/(RE(indice)*sinteta2(indice)-RF(indice)*costeta2(indice));
q(indice)=xyzponto(indice,2);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Torque vs angulo = Forca vs
deslocamento(alfa,h,y) Achando MATriz Forca
Jx(:, :, indice)=[JX11(indice) JX12(indice) JX13(indice)
JX21(indice) JX22(indice) JX23(indice)
0 1 0];
Jq(:, :, indice)=[(LE(indice)*sinteta1(indice)-LF(indice)*costeta1(indice)) 0 0
0 (RE(indice)*sinteta2(indice)-RF(indice)*costeta2(indice)) 0
0 0 1];
J(:, :, indice)=inv(Jq(:, :, indice))*Jx(:, :, indice);
Jtransposto(:, :, indice)=J(:, :, indice)';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Rigidez
xis=[(2*E*Momento/K1) 0 0
0 (2*E*Momento/K1) 0
0 0 k3];
matrizK(:, :, indice)=Jtransposto(:, :, indice)*xis*J(:, :, indice)
deltaxyz(:, indice)=inv(matrizK(:, :, indice))*Fxyzaplicado(indice,:);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Angulos
TETAesquerdo=acos(costeta1)*(180/%pi)
TETAdireito=acos(costeta2)*(180/%pi)

```

```
q3=xyz(:,2)
halt()
////////////////////////////////////deformações
delta1=deltaxyz(1,:)
delta2=deltaxyz(2,:)
delta3=deltaxyz(3,:)
halt()
```

Anexo D – Programa de Otimização

```

clc
clear

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%coeficientes          area          de
trabalho%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

//numero de pontos
passo=230
//multiplicado pelo passo= xmax
fator=0.2
areadetrabalho=0
//xmax=zeros(passo+1,passo+1,passo+1);
buracos=0
k111=20;
dd1=10;
D=5;
D1=5;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Coeficientes dimencoes%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
iniciocoef=12.5;
passocoef=0.5;
ele1=12.8:0.1:13.7;
de=4.8:0.1:5.2;
coef1=(k111-ele1)./ele1;
coef2=(dd1-de)./de;
c111=size(coef1);
c222=size(coef2);
for c1=1:c111(1,2)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%rotina começa aqui
K1=coef1(c1).*ele1(c1);
L1=ele1(c1);
for passoy=0:passo/2
for passo2=0:passo/2
for passox=0:passo
    xyz(passox+1,.)=[passox*fator,passoy*fator,passo2*fator];
indice=passox+1;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%resolucao cinematica inversa%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
LE=(-2*K1*xyz(indice,1)-2*K1*(D-D1));
LF=(-2*K1*xyz(indice,3));

```

```

LG=-L1^2+xyz(indice,1)^2+xyz(indice,2)^2+xyz(indice,3)^2+K1^2+(D-D1)^2+2*xyz(indice,1)*(D-
D1);      ///

RE=(-2*K1*xyz(indice,1)-2*K1*(-D+D1));          ///
RF=(-2*K1*xyz(indice,3));                      ///
RG=-L1^2+xyz(indice,1)^2+xyz(indice,2)^2+xyz(indice,3)^2+K1^2+(-D+D1)^2+2*xyz(indice,1)*(-
D+D1);      ///

u=poly(0,"u");                                ///
eqleft=LG+LE+2*LF*u+(LG-LE)*u^2;              ///
eqright=RG+RE+2*RF*u+(RG-RE)*u^2;             ///

uleft(indice,:)=roots(eqleft)';               ///
uright(indice,:)=roots(eqright)';             ///

ababa=(1+uleft(indice,1)^2);                  ///
babab=(1+uright(indice,2)^2);                 ///

if ababa==0 then                              ///
    uleft(indice,1)=1.00001*%i;                ///
end                                             ///
if babab==0 then                              ///
    uright(indice,2)=1.00001*%i;               ///
end                                             ///
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
costeta1=(1-uleft(indice,1)^2)/(1+uleft(indice,1)^2);
costeta2=(1-uright(indice,2)^2)/(1+uright(indice,2)^2);
TETAesquerdo=acos(costeta1)*(180/%pi);
TETAdireito=acos(costeta2)*(180/%pi);
testeseecomplexo1=isreal(TETAesquerdo,0.00000001);
testeseecomplexo2=isreal(TETAdireito,0.00000001);
if testeseecomplexo1==%f|testeseecomplexo2==%f then
    buracos=buracos+1;
end
end
end
end
//areadetrabalho(c1,c2)=(((passo+1)*fator)^3)-((buracos*fator^3))
areadetrabalho(c1,1)=((((passo/2)+1)^2)*(passo+1)*(fator^3))-((buracos*fator^3))

```

```

buracos=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Angulos
////////areadetrabalho=areadetrabalho+0.01*0.01*
end
end
xset("window",0);
plot2d(coefl,areadetrabalho)
xtitle("Area de trabalho","K1/L1","D1/D")
c1=1:c111(1,2)
c2=1:c222(1,2)
xset("window",1);
plot3d(c1,areadetrabalho)
xtitle("Area de trabalho","indice K1/L1","indice D1/D")
fprintfMat('D:\Mat',areadetrabalho,'%5.2f');
fprintfMat('D:\C1',coefl,'%5.2f');

```

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB (Asea Brown Boveri Ltd) In: Parallel arm robots: IRB 340, FlexPicker, 2003, disponível em <http://www.abb.com> .

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

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.

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.

http://www.engelegho.com.br/cat_pdfengle/eng_legho_pags61a70.pdf

http://www.nsk.com.br/pdf/NSK_Ca_B13_Guias_Linea.pdf