



Julio Quadrio de Moura Guedes

**Projeto, Simulação e Desenvolvimento de um
Manipulador Robótico Acionado por Tendões**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Marco Antonio Meggiolaro

Rio de Janeiro

Abril de 2010



Julio Quadrio de Moura Guedes

**Projeto, Simulação e Desenvolvimento de um
Manipulador Robótico Acionado por Tendões**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada

Marco Antonio Meggiolaro

Orientador
Depto. de Engenharia Mecânica – PUC-RJ

Mauro Speranza Neto

Depto. de Engenharia Mecânica – PUC-RJ

Marcelo de Andrade Dreux

Depto. de Engenharia Mecânica – PUC-RJ

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do
Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de Abril de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Julio Quadrio de Moura Guedes

Graduou-se em Engenharia de Controle e Automação na PUC-Rio em 2004, juntamente com o curso sequencial de Empreendedorismo pelo CCE, também, na PUC-Rio em 2004 e especialização em Engenharia de Suprimentos em Construção e Montagem com foco na área de Petróleo e Gás na UFF em 2008. Bolsista de Desenvolvimento Tecnológico Industrial do CNPq.

Aos meus pais, Julio e Sandra,
a minha esposa, Domitila e aos meus
irmãos Camila, Joni e Carolina.

Agradecimentos

Ao orientador e amigo, Marco Antonio Meggiolaro, por todo o apoio, incentivo e comprometimento para o desenvolvimento deste e de diversos outros trabalhos.

Aos professores Mauro Speranza Neto e Mauro Schwanke da Silva por toda a orientação acadêmica deste os primeiros períodos da graduação até os dias atuais.

Ao padrinho Pedro Ferreira da Costa Blois de Assis pela amizade, incentivo e suporte, tantos nos momentos pessoais quanto nos acadêmicos.

Aos amigos da RioBotz, alunos da graduação e pós-graduação que frequentam o Laboratório de Engenharia de Controle e Automação da PUC-RJ pelo incentivo.

À minha família, em especial, à minha esposa, por compreender minha ausência durante este período acadêmico e a Geralda Jerônimo de Moura pelo apoio e correções.

Resumo

Guedes, Julio Q. M.; Meggiolaro, Marco Antonio. **Projeto, Simulação e Desenvolvimento de um Manipulador Robótico Acionado por Tendões**. Rio de Janeiro – RJ, 2010. 144p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um novo conceito de manipulador está sendo estudado com o intuito de realizar tarefas inviáveis para manipuladores tradicionais. Este modelo de manipulador se baseia em manipuladores contínuos. Eles apresentam uma estrutura similar a uma coluna vertebral, são altamente modulares, leves, podem ser atuados remotamente e possuem alto índice de adaptabilidade com o ambiente. Este tipo de manipulador apresenta características interessantes para utilização em diversos tipos de tarefas, principalmente em inspeções em locais com muitos obstáculos e ambientes inóspitos para os seres humanos.

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um protótipo de manipulador contínuo atuado remotamente por tendões. Ele possui estrutura modular formada por “vértebras” ligadas serialmente. Inicialmente projetado através de ferramentas computacionais para em seguida ser construído fisicamente.

São apresentados estudos cinemáticos e simulações com comparações entre a parte teórica e experimental. Por fim, é desenvolvida uma situação para simular a atuação do manipulador em uma tarefa real.

Palavras-Chave

Manipulador contínuo; tendões; inspeção; robótica;

Abstract

Guedes, Julio Q. M.: Meggiolaro, Marco Antonio. **Design, Simulation and Development of a Tendon Drive Robotic Manipulator.** Rio de Janeiro – RJ, 2010. 144p. MSc Dissertation – Mechanical Engineering Department, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

A new concept of robotic manipulator is studied to perform tasks not viable for traditional manipulators. This new model is based on a continuum manipulator. It has a structure similar to a backbone, it is highly modular, lightweight, it can be remotely actuated, and it has a high level of adaptability to the environment. This type of manipulator has interesting features for uses in various types of tasks, especially in inspections in places with many obstacles and inhospitable to humans.

This thesis presents the development of a remote tendon drive robotic continuum manipulator prototype. It has a modular structure composed of serially connected vertebrae. It is initially designed by computational tools, and then physically built.

Kinematic studies and simulations are presented with comparisons between theoretical and experimental results. Finally, a situation is presented to simulate the performance of the manipulator in a real task.

Keywords

Continuum manipulator; tendons; inspection; robotic,

Sumário

1. Introdução	14
1.1. Motivação	14
1.2. Objetivos do Trabalho	17
1.3. Revisão Bibliográfica	17
1.4. Organização do Trabalho	22
2. Concepção do Manipulador	23
2.1. Conceitos Básicos	23
2.2. Cálculos de Rigidez por Elementos Finitos	41
2.2.1. Análise da Membrana	42
2.2.2. Cálculo de Rigidez para Vértebra	43
2.2.2.1. Deslocamento no eixo Z	44
2.2.2.2. Deslocamento Rotacional	45
3. Modelagem Teórica	47
3.1. Conceitos Básicos de Cinemática	47
3.1.1. Transformação Homogênea	50
3.2. Notação de Denavit-Hartenberg	52
3.3. Modelagem do Sistema	55
4. Construção e Montagem	69
4.1. Características dos Materiais	69
4.2. Construção e Montagem	71
5. Experimentos e Resultados	82
6. Conclusões e Trabalhos Futuros	102
6.1. Contribuições neste Trabalho	102
6.2. Sugestões para trabalhos futuros	103
7. Bibliografia	105

8. Anexos	108
Anexo I	109
Anexo II	114
Anexo III	118
Anexo IV	122
Anexo V	130
Anexo VI	131
Anexo VII	132
Anexo VIII	143

Lista de Figuras

Figura 1 – Robô Snake-Arm.....	16
Figura 2 – Robô Charlotte	19
Figura 3 – Robô MARS.....	19
Figura 4 – Manipulador Tradicional x Contínuo.....	20
Figura 5 – Estrutura Baseada em Molas.....	27
Figura 6 – Estrutura Baseada em Juntas Pneumáticas.....	27
Figura 7 - Membrana	28
Figura 8 - Coluna.....	29
Figura 9 - Anel.....	29
Figura 10 – Corte Transversal do Tendão	30
Figura 11 – Vértebra.....	30
Figura 12 – Elo	31
Figura 13 – Elo com Parafusos de Fixação	32
Figura 14 – 3 Elos com Parafusos	33
Figura 15 – Servomotor AX-12+	34
Figura 16 – Encoder e Relação de Engrenagens	35
Figura 17 - Polia	36
Figura 18 – Base, Servomotor e Polia	37
Figura 19 – Posicionamento dos Servos.....	37
Figura 20 - Base.....	38
Figura 21 – Manipulador Completo	39
Figura 22 – Passagem de Tendões.....	40
Figura 23 – Malha Gerada para o Cálculo da Membrana.....	42
Figura 24 – Forças e Deformação o Cálculo da Membrana	43
Figura 25 – Malha Gerada para o Cálculo da Vértebra.....	44
Figura 26 - Forças e Deformação do Sub-Item 2.2.2.1	44
Figura 27 - Forças e Deformação do Sub-Item 2.2.2.2	45
Figura 28 – Posição e Orientação do Corpo Rígido	47
Figura 29 – Transformação Rotacional	48
Figura 30 – Notação de Denavit-Hartenberg.....	53

Figura 31 – Definição de s_i , κ_i e ϕ_i .	56
Figura 32 – Adaptação da Vértebra para D-H	57
Figura 33 – Vetores	63
Figura 34 – Montagem do Sistema para Gerar a Seção Corrugada	72
Figura 35 – Membrana Normal (topo) x Corrugada (inferiores)	72
Figura 36 – Anel Antes e Depois da Usinagem	73
Figura 37 – Coluna Antes e Depois da Usinagem	73
Figura 38 – Vértebra Montada	74
Figura 39 – Detalhe da Terminação dos Tendões	74
Figura 40 – Placa Base, Servos, Polias e Tendões	75
Figura 41 - Manipulador Completo	76
Figura 42 – Fiação do Servomotor	77
Figura 43 – Conexão Servomotores e Computador	77
Figura 44 – Comunicação Servos ↔ Controlador	78
Figura 45 – Interface de Calibração	83
Figura 46 – Posição Inicial do Manipulador	84
Figura 47 – Tendões nos Elos Consequentes	85
Figura 48 – Tela Principal do <i>Software</i> de Controle	87
Figura 49 – Medições (Retesado e com $\pm 0,4\text{rad}$ no Elo 01)	89
Figura 50 – Malha de Controle por Torque Computado	93
Figura 51 – Gravidade	94
Figura 52 – Controle por Torque Computado	95
Figura 53 – Resposta Simulação $0,4\text{rad}$	96
Figura 54 – Ilustração do Problema	96
Figura 55 – Ângulo da Etapa 01	98
Figura 56 – Ângulo da Etapa 02	98
Figura 57 – Ângulo da Etapa 03	99
Figura 58 – Etapa 01	100
Figura 59 – Etapa 02	100
Figura 60 – Etapa 03	100
Figura 61 – Ângulos Medidos	101

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 – Relação de Engrenagens.....	35
Tabela 2-2 – Configuração da Malha dos Testes	42
Tabela 3-1 – Parâmetros x Tipo de Juntas.....	54
Tabela 3-2 – Parâmetros de Denavit-Hartenberg	58
Tabela 4-1 – Erros no Pacote Status.....	79
Tabela 4-2 – Taxas de Transmissão	80
Tabela 5-1 – Pré-tensionamento dos Tendões.....	82
Tabela 5-2 – Relação entre IDs e Elos	86
Tabela 5-3 – Variações de θ_1	93
Tabela 5-4 – Variações de θ_2	94
Tabela 5-5 – Entradas para Realização das Etapas.....	103
Tabela 5-6 – Ângulos da Simulação.....	105

Lista de Símbolos e Abreviações

CRIGOS – *Compact Robot for Image Guided Orthopedic Surgery*

D-H – Notação de Denavit-Hartenberg

Delrin AF – *Acetal homopolymer PTFE-filled*

DoF – *Degrees of Freedom*

END – Ensaio Não Destrutivo

FEP – Etil-Propileno Fluorado

ID – Número de Identificação

MARS – *Miniature Robot for Surgical procedures*

PTFE – PoliTetraFluorEtileno

ROV – *Remoted Operated Vehicle*

1. Introdução

Atualmente, com a necessidade do aumento de produtividade, do baixo custo de fabricação, do aumento de produção seriada, a tendência que vem sendo adotada pela indústria é a de automatizar seus processos. Nesse contexto, a Robótica tem assumido um papel primordial em diversas áreas.

A Robótica Industrial é o estudo, desenvolvimento e uso de sistemas robóticos para a fabricação, teste, simulação e inspeção. As aplicações típicas de robôs industriais incluem fundição, pintura, soldagem, montagem, movimentação de cargas, inspeção, e realização de testes, combinando precisão, velocidade, e robustez. Outra característica importante está relacionada à insalubridade em determinados trabalhos, onde se faz necessária a utilização de sistemas e ferramentas especiais para a realização de tarefas. Alguns exemplos desses sistemas se destacam: veículos robóticos para medição e inspeção de falhas em equipamentos, manipuladores para áreas inóspitas e de difícil acesso, e ROVs (Remoted Operated Vehicles) submarinos para altas profundidades marítimas e piscinas radioativas.

1.1. Motivação

As técnicas de inspeções não destrutivas (também conhecidas como END) são utilizadas na verificação de materiais, equipamentos e suprimentos sem lhes causar avarias. São muito utilizados nos setores energéticos (petróleo, petroquímico, nuclear), siderúrgico, naval, aeronáutico, entre outros, podendo fazer parte das etapas de fabricação, construção, montagem e/ou manutenção. Os ENDS têm como finalidade verificar a qualidade dos bens e serviços, redução de custos, aumento da vida útil do equipamento e sua preservação. Porém, devido à

periculosidade e à impossibilidade de determinados locais, se faz necessária a utilização de maquinário especial.

Para aplicações em Ensaios Não Destrutivos (END), ainda existem diversos problemas a serem resolvidos, bem como inúmeras opções de pesquisas. Na área de petróleo, gás e energia, existem diversos métodos qualificados para se realizar uma inspeção. De maneira geral, a primeira inspeção a ser realizada é a visual, que necessita de um local apropriado para que esta ocorra com eficácia. Porém, em muitos casos, este local é de difícil acesso e o pessoal que executa a inspeção acaba não realizando uma inspeção adequada.

A inspeção em grandes tanques de armazenamentos, contendo combustíveis, coque e outros, é um ponto problemático, uma vez que se requer, para tal, a utilização de materiais especiais para que ocorra o trabalho, como andaimes e pessoal técnico qualificado, por exemplo. Outro ponto que também pode ser observado em tanques de armazenamento são as inspeções em seu interior, onde o local é confinado e apresenta maior risco à saúde do inspetor, o que dificulta a realização do trabalho e torna o custo mais elevado para a empresa. Um dos motivos para a necessidade de inspeções no interior dos tanques é devido a fungos e bactérias. A formação de fungos e bactérias surge dentro destes pela umidade relativa do ar e pela má vedação e manuseio. A borra, que é constituída pela aglomeração dos fungos, é transferida dos reservatórios para os caminhões e dutos de transporte e conseqüentemente se instalam em reservatórios de postos de distribuição de combustíveis e, posteriormente nos tanques dos veículos. A borra afeta diretamente o rendimento e vida de peças de veículos abastecidos com este combustível, além de causar corrosão nos reservatórios.

A inspeção em reservatórios deve ser realizada com eles vazios, além de uma logística especial, o que resulta em um procedimento dispendioso e complexo. Desta forma, um manipulador pode solucionar esta questão de forma a realizar uma inspeção visual com o tanque em funcionamento, reduzindo assim custos, otimizando tempo para inspeções, e evitando procedimentos desnecessários. Existe a viabilidade de o manipulador realizar, além da inspeção visual, a coleta de materiais para análises. De forma que, após estudos, possam ser

inseridas substâncias que ataquem diretamente a borra e conseqüentemente reduzam significativamente a possibilidade de ocorrer corrosão nos reservatórios.

No setor nuclear, ocorrem altos índices de radiação em áreas restritas, impossibilitando o trabalho contínuo de funcionários. As penetrações dos elementos combustíveis apresentam espaços reduzidos para realização de inspeções, bem como a impossibilidade de aproximação de seres humanos por motivos de radiação. As inspeções dentro de tubulações de equipamentos também são necessárias. O robô *Snake-Arm* (Figura 1) é capaz de realizar tal tarefa. Desta forma, um manipulador pode solucionar algumas das questões para este setor de forma a realizar a inspeção sem colocar em risco a vida de seres humanos. O manipulador pode ser operado remotamente e, também, possuir estrutura diminuta, conforme a necessidade. Outro aspecto importante, por se tratar de setor nuclear, é a geração de rejeitos. O equipamento pode ter que permanecer em área controlada aguardando um novo serviço, evitando, assim, a formação de novos rejeitos com a entrada e saída de equipamentos e acessórios, o que pode gerar dificuldades em novos testes e manutenção.



Figura 1 – Robô Snake-Arm

1.2. Objetivos do Trabalho

O presente trabalho tem por objetivo o projeto teórico, modelagem, simulação, controle e desenvolvimento de um protótipo de um manipulador contínuo atuado por tendões para realização de inspeções em geral. Por apresentar estrutura modular, pode ser montado com comprimentos diversos. Ferramentas e equipamentos, tais como câmeras ou garras robóticas podem ser acoplados em sua extremidade a fim de realizar tarefas diversas. O sistema pode ser utilizado em áreas inóspitas para seres humanos.

1.3. Revisão Bibliográfica

Os robôs podem ser classificados por vários critérios, segundo o número de graus de liberdade (DoF) – de propósito geral ou redundante; estrutura cinemática – serial, paralelo ou híbrido; tecnologia de atuação – as mais utilizadas são elétrica, pneumática e hidráulica; geometria espacial – robôs cartesianos, cilíndricos, esféricos, articulados e SCARA; e características de movimentação – planar, esférico e espacial (Tsai, 1999). Dentro destas classificações, ainda existem outras formas classificatórias, como robôs analógicos (utilizam circuitos analógicos no lugar de micro-controladores), artrópodes (baseados em seres com exoesqueleto), autônomos (podem tomar decisões), humanóides (possuem características estruturais humanas), hiper-redundantes (podem alcançar o mesmo ponto com infinitas configurações), móveis (conseguem mover sua base), nano robôs (possuem tamanhos na ordem de 10^{-9} m), robôs industriais (sistemas com pelo menos 3 DoF), entre diversos outros tipos.

A utilização de manipuladores na indústria energética é pouco explorada, comparando-se com suas possibilidades. O projeto Amadeus (Davies et al., 1998) que possui como objetivo principal a melhoria da capacidade de amostragem e manipulação de sistemas submarinos, utiliza pinças atuadas através

de deformações elásticas. Este manipulador pode ser comparado a uma mão com três dedos controlados através da deformação elástica dos atuadores o que permite segurar superfícies irregulares. Em inspeções de dutos, (Wakimoto et al., 2003) apresenta um manipulador que se locomove similarmente a uma cobra dentro de tubulações de diversos tamanhos, fazendo a inspeção visual dos dutos. Outro manipulador que pode ser utilizado em diversos fins de inspeção visual é o apresentado pela Carnegie Mellon University (Wolf et al., 2003) que foi desenvolvido com o intuito de procurar itens e, também, poder ser utilizado em locais estreitos em instalações navais e de refinaria.

Com o crescente estudo de manipuladores, surgem diversas possibilidades de novos desenvolvimentos em áreas de risco aos seres humanos. Alguns exemplos clássicos que podem ser apresentados na utilização no setor espacial são o robô Charlotte (Figura 2), manipulador paralelo atuado por tendões, desenvolvido pela Mc-Donnell Douglas com o objetivo de automatizar tarefas da tripulação, voando em 1995 na missão STS-63 (Thompson e Campbell, 1996) ou o manipulador paralelo desenvolvido pela Universidade de Canterbury para posicionamento inteligente de antenas (Dunlop e Jones, 1999), ou ainda manipuladores contínuos para inspeção, furação e vedação (Buckingham et al., 2007; Wakimoto et al., 2003; Wolf et al., 2003). Na área médica, os manipuladores também estão se fixando como o CRIGOS, utilizado para intervenções em cirurgias ortopédicas, levando em consideração os fatores humanos, tornando mais preciso o procedimento cirúrgico (Brandt et al., 1999), e o robô MARS (Figura 3), sendo projetado para fazer um posicionamento preciso para utilização de brocas e agulhas em cirurgias cervicais e outras (Shoham et al., 2003). Os manipuladores paralelos também vêm sendo utilizados como ferramentas simuladoras para o setor aeronáutico – aviões; e militar – tanques (*US Army Center for Tanks Research*, 2008). No setor nuclear, onde existe o perigo iminente em áreas restritas, os manipuladores entram fazendo substituições de tubulações e inspeções visuais (Anscombe et al., 2006).

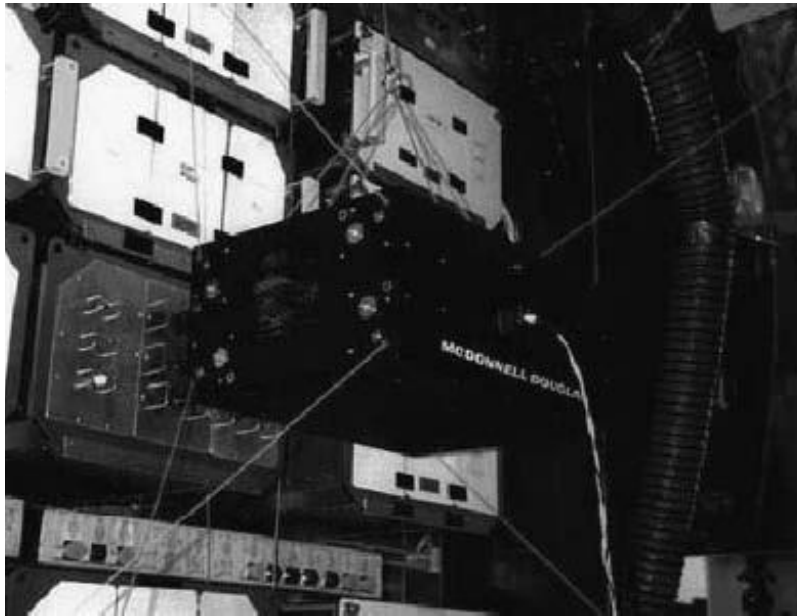


Figura 2 – Robô Charlotte

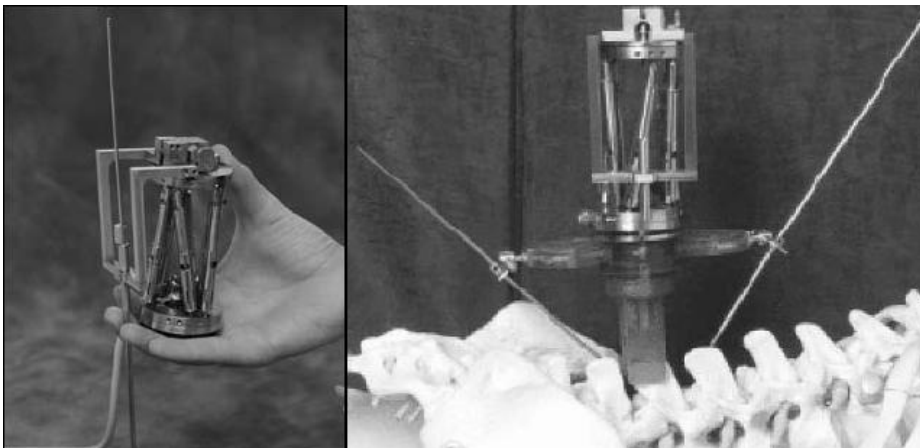


Figura 3 – Robô MARS

Os manipuladores contínuos são caracterizados por sua estrutura segmentada flexível e modular, diferentemente dos manipuladores tradicionais onde sua estrutura é rígida. A Figura 4 ilustra esta diferença, onde o desenho em azul representa o manipulador tradicional e o rosa o manipulador contínuo. Uma analogia pode ser feita onde os manipuladores tradicionais seriam similares aos seres vertebrados, enquanto que os robôs contínuos seriam os seres invertebrados. Os robôs contínuos permitem uma cinemática redundante e hiper-redundante, possuindo diversos graus de liberdade, o que os torna mais manipuláveis que os

robôs convencionais. Os robôs contínuos também apresentam a vantagem de poder se desviar de barreiras em sua trajetória com maior facilidade por serem mais flexíveis, enquanto que os tradicionais poderiam colidir e se danificarem. Este tipo de manipulador apresenta um grande número de trabalhos de pesquisa teórica e alguns trabalhos são aplicados na indústria (Robinson et al., 1999). Apesar das claras vantagens em se utilizarem os manipuladores contínuos, começou-se a verificar que estes possuem certas limitações e singularidades devido à sua curvatura (Jones et al., 2007). Os trabalhos publicados apresentam questões sobre a cinemática destes manipuladores, onde é demonstrado que a cinemática convencional não consegue resolver determinadas situações e requer uma nova modelagem, conforme descrito em (Jones et al., 2006). Já o trabalho apresentado por (Hannan et al., 2003) demonstra algumas vantagens de trajetórias e graus de liberdade de um manipulador contínuo, onde, para se conseguir o mesmo resultado com manipuladores tradicionais, se faz necessário um manipulador específico e com um grande número de DoF. Desta forma, o estudo da cinemática destes tipos de robôs é apresentado, através da transformação de Denavit-Hartenberg (Spong et al., 1989) adaptado para este tipo de manipulador.

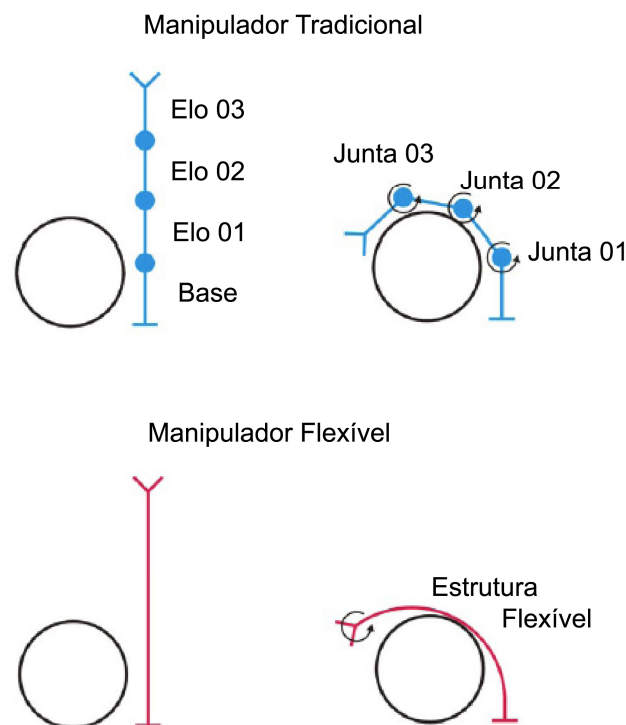


Figura 4 – Manipulador Tradicional x Contínuo

Os primeiros robôs hiper-redundantes datam da década de 60 (Anderson e Horn, 1967). Alguns trabalhos foram e são desenvolvidos há anos, por pesquisadores de diversas universidades (Jones, 2007; Suthakorn, 2004; McMahan et al., 2005). Muitos destes projetos foram desenvolvidos com uma finalidade específica e pré-determinada.

Diversos projetos foram baseados em animais ou características de animais. As cobras foram a base para alguns trabalhos (Hirose, 1993; Migadis e Kyruakopouls, 1997; Liljebäck et al. 2008; Buckingham, 2007). Os três primeiros trabalhos demonstram robôs que realizam tarefas somente no plano, sendo que sua estrutura permite utilização em qualquer terreno. Também apresentam uma característica singular de não suportarem praticamente nenhuma carga em sua extremidade, inviabilizando a utilização de ferramentas para realização de operações. Enquanto que outra linha de pesquisa possui características e aplicações industriais, possuindo bases fixas ou móveis, podendo trabalhar em ambientes diversos. Esta linha de pesquisa segue as características de tentáculos e trombas (Wilson et al., 1993; Walker et al, 1999; Hannan et al, 2000; Hannan et al, 2001). Estes possuem uma característica específica baseada em uma coluna vertebral, possuindo inúmeras vértebras, cada uma com alguns graus de liberdade.

Na robótica, o termo tendão é utilizado para designar cabos, fios, arames, correias e outros meios de transmissão. Desde os primórdios da robótica até os dias atuais, os tendões vêm sendo utilizados para atuar remotamente os manipuladores, onde os motores ficam afastados das juntas atuadas. Uma de suas vantagens é que podem ser pré-tensionados de forma a não gerar folgas na transmissão, adaptando-se muito bem em locais onde não se pode ter muito peso ou volume, pois trabalham remotamente. Existem dois tipos de configurações principais para manipuladores atuados por tendão: $M \leq N$, e $M > N$, onde N é o número de graus de liberdade e M o número de tendões de controle. Se o número de tendões for menor ou igual ao número de DoF, o manipulador é conhecido como manipulador insuficientemente acionado, pois não podem ser controlados de maneira adequada em determinadas situações. Caso o manipulador possua o número de DoF menor que o número de tendões, é classificado como manipulador

suficientemente acionado, permitindo o completo controle de sua movimentação (Tsai, 1999).

1.4. Organização do Trabalho

Visando atingir os objetivos propostos, esta dissertação será apresentada da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta a concepção do manipulador, suas características e desenhos.

O Capítulo 3 resume toda a teoria necessária para o desenvolvimento do manipulador, os conceitos da modelagem cinemática, as transformações de D-H e os cálculos envolvidos para realização do manipulador.

No Capítulo 4 é apresentado o processo de desenvolvimento físico do manipulador. Este capítulo descreve a construção e montagem do manipulador em si.

Já no Capítulo 5, demonstram-se os experimentos realizados e seus resultados, bem como suas comparações entre a parte teórica e prática.

No Capítulo 6, apresentam-se as conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2. Concepção do Manipulador

2.1. Conceitos Básicos

Neste capítulo será descrito o critério de escolha da estrutura mecânica e disposição dos atuadores do manipulador. A escolha das características do *design*, em particular, depende diretamente das necessidades funcionais e operacionais das possíveis aplicações do manipulador. Desta forma, este trabalho apresentará um manipulador de modo generalizado, sem caracterizar uma aplicação em específico e com flexibilidade para inserção de componentes em sua estrutura.

Um manipulador, que apresente 6 DoF, 3 para realização do posicionamento e outros 3 para a orientação de um objeto em sua extremidade, pode realizar qualquer tarefa de posicionamento dentro de seu ambiente de trabalho (desde que dentro do seu volume de trabalho e na ausência de obstáculos). Com um número inferior a seis, ele fica limitado, não alcançando todas as posições no ambiente. Um robô que apresente mais de 6 DoF é considerado redundante. O termo redundante é comumente utilizado em Robótica para indicar que o número de DoF excede ao mínimo para execução de uma tarefa.

Atualmente, os robôs industriais convencionais são inspirados nos braços humanos. Eles trabalham com estrutura serial e com um número relativamente pequeno de elos rígidos conectados por articulações. Logo, assim como o braço humano, sua estrutura é limitada, funcionando de forma adequada em ambientes abertos, conhecidos e/ou preparados. Por outro lado, a resposta a essa limitação pode ser encontrada na própria natureza. Ao se analisar alguns seres invertebrados, tais como, polvos e seus tentáculos, minhocas e lesmas podem ser notados inúmeros DoF redundantes. Não somente os seres invertebrados, mas alguns seres vertebrados também apresentam características

similares, como por exemplo, as cobras e os elefantes, em particular, sua tromba. Apesar de o elefante ser o maior vertebrado terrestre, sua tromba é formada somente por carne e músculos e encurva-se com facilidade. Manipuladores com diversos DoF redundantes são conhecidos como hiper-redundantes. Esta característica acaba com a limitação de manipuladores tradicionais em ambientes confinados e com obstáculos. Por causa de sua estrutura altamente articulável, estes manipuladores são adequados para operação em ambientes altamente restritos e podem ser projetados para ter uma maior robustez em relação à falha mecânica do que manipuladores com baixo grau de redundância. Estruturas hiper-redundantes já foram apresentadas em trabalhos com outros nomes, tais como “*highly articulated*”, “*tentacle*”, “*snake-like*”, “*tensor-arm*”, “*elephant trunk*” “*swan’s neck*” e “*spine*” (Chirikjian, 1992). Pelas vantagens apresentadas, a opção do desenvolvimento de um manipulador hiper-redundante foi definida.

As estruturas de robôs hiper-redundantes podem ser classificadas em dois tipos: contínua flexível ou vertebrada (Walker, 2000).

Para o primeiro tipo, sua curvatura pode ocorrer em qualquer ponto ao longo da estrutura (Wilson et al., 1993). Na teoria, o espaço de articulações destes manipuladores é infinito, mas de ordem prática, o número de atuadores é finito, o que inviabiliza o conceito teórico de articulações infinitas. Hoje em dia, alguns trabalhos que apresentam estes manipuladores trabalham com tubos elásticos ou músculos pneumáticos compostos por seções independentes (Nakamura et al., 2002; Scofano, 2006). Este tipo de robô é comumente chamado de robô contínuo (Robinson e Davies, 1999).

Já para o segundo tipo, a curvatura ocorre em pontos específicos da estrutura. A “*invertebrabilidade*” do manipulador se deve a um grande número de juntas, unidas por pequenos ligamentos rígidos. Este pode ser considerado um caso particular de robôs hiper-redundantes onde o número de juntas tende ao infinito e o comprimento dos elos tende a zero. Este modelo apresenta uma vantagem ao se analisar conceitualmente, que é ser basicamente o projeto tradicional de manipuladores, replicado diversas vezes. Desta forma, é possível utilizar ferramentas de modelagem tradicional. Entretanto, o número elevado de

articulações e pequenos ligamentos podem gerar grandes complexidades durante a análise.

Ao se observar trombas, tentáculos, cobras e alguns seres invertebrados, nota-se que sua estrutura é basicamente composta por músculos. Estes músculos precisam suportar toda a estrutura bem como serem capazes de suportar toda a locomoção do sistema. Um dos desafios para a construção de um robô com estas características é exatamente a necessidade de replicar a atuação dos músculos. Por este motivo, a estrutura dos robôs com estas características deve apresentar uma rigidez estrutural compatível com a tarefa a ser realizada. Tal rigidez pode ser adquirida de forma simples, pela substituição de tubos por músculos, por exemplo, o que pode resultar na inserção de componentes com maior rigidez. Outra maneira de elevar a rigidez do sistema é inserir em cada vértebra um atuador, contudo a complexidade do sistema é proporcional ao número de DoF, o que pode tornar o sistema altamente complexo.

De forma geral, este tipo de manipulador apresenta características de ser altamente manobrável, flexível e leve.

Outro ponto importante no conceito de robôs hiper-redundantes é a forma de atuação. Ela pode apresentar dois modos: local e remoto.

O sistema de atuação local, como notado em alguns trabalhos (Chirikjian, 1992; Paljug et al., 1995), embora sejam conceitualmente simples, apresentam diversas desvantagens. A atuação local é considerada simples pelo fato de os atuadores estarem fixados em cada DoF, simplificando, assim, o entendimento do funcionamento do sistema. Mas, os motores elétricos tradicionais são consideravelmente volumosos e pesados. Com os atuadores distribuídos em cada elo, o sistema todo se torna altamente volumoso, o que pode ser um grande problema para atuações em espaços confinados. O uso de sistemas alternativos aos motores, tais como músculos artificiais (Assis, 2007), pode significar uma solução, porém somente para sistemas que não trabalhem com cargas elevadas, pois a relação força-volume próprio dos músculos artificiais não é elevada.

No sistema de atuação remoto, fica mais simples de se desenvolver um robô com volume reduzido. Podem ser utilizados tendões (cabos), por exemplo, para realizar a transferência do acionamento e potência entre os motores e os elos. Os motores podem ser fixados em locais distantes do manipulador em si, viabilizando assim a realização de tarefas em locais insalubres e com restrições, tais como tanques de armazenamento de combustível. Com a utilização de tendões e com os motores fixados remotamente, a estrutura do manipulador pode se tornar bastante leve. Entretanto, quanto maior o número de tendões impostos ao sistema, maior a complexidade deste. Alguns trabalhos publicados com estas características podem ser observados (Immega e Antonelli, 1995; Sakai et al., 2006).

Pelas razões já citadas acima, foi escolhido o desenvolvimento de um manipulador serial hiper-redundante, vertebrado e com atuação remota.

Outro aspecto também será levado em conta. Como o manipulador tem a intenção de poder atuar em diversos ambientes, será prevista a utilização de materiais que não possibilitem a geração de faíscas. Deste modo, ele poderá trabalhar em locais que apresentem presença de gás inflamável, combustíveis e outros. A escolha da utilização dos materiais será baseada em equipamentos que possam ser utilizados em tanques de armazenamento de combustíveis em geral, e em funcionamento. Assim, o manipulador deve poder trabalhar afogado, ou seja, submerso dentro de líquidos, e também não poderá produzir faíscas, pois o local de atuação pode conter gases.

Diversos trabalhos utilizam outros materiais, com flexibilidade já bastante estudada, tais como, molas (Hannan et al., 2003) e sistemas pneumáticos (Liljebäck et al. 2008), Figuras 5 e 6, respectivamente, como parte flexível do manipulador. Uma característica singular deste trabalho é a utilização de discos de aço como elementos flexíveis.



Figura 5 – Estrutura Baseada em Molas.



Figura 6 – Estrutura Baseada em Juntas Pneumáticas

O disco de aço concebido, também chamado de “membrana”, será de aço inox 304, com espessura de 0,01” e diâmetro de 1,5”, vide Figura 7. O aço inox é uma material que não recebe tempera, porém com uma espessura tão pequena ele

pode ser temperado até uma dureza de 45 Rockwell C. O projeto desta membrana foi baseado para atuar em um manipulador com 3 elos, por isso os 4 grupos de 3 furos, com 0,08'', simétricos. Esta furação tem a finalidade de passagem dos tendões ou de sua fixação ao final de cada elo. Além destes furos, a membrana apresenta mais 8 furos de fixação de 0,12'' e um furo central de 0,39'' para futura passagem de cabeamento para equipamentos diversos, tais como, sensores, câmeras, garras, entre outros. Este material possui Módulo de Elasticidade de 198GPa e o disco possui massa de 1,06 gramas. A Figura 7 ilustra o desenho da membrana e sua furação. O desenho técnico encontra-se no Anexo I.

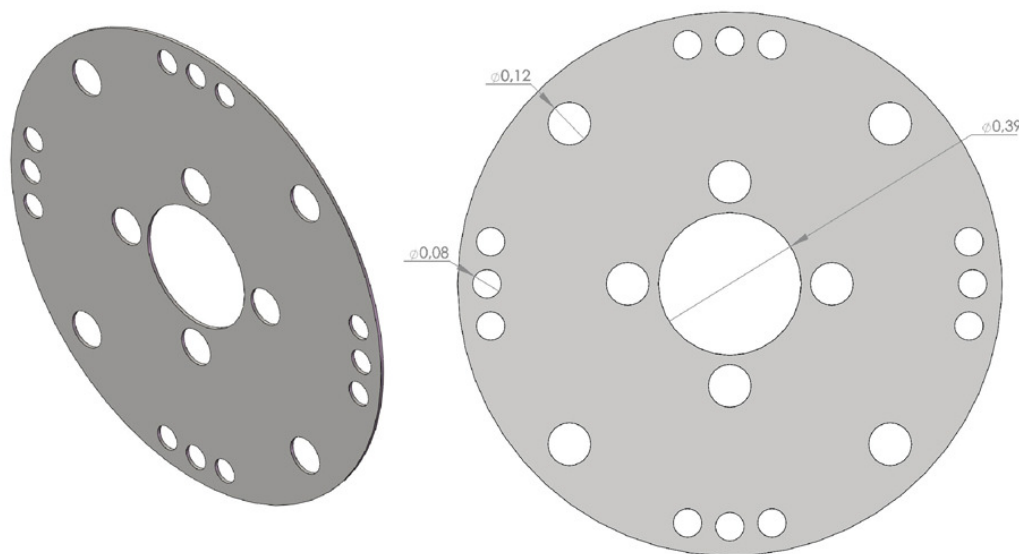


Figura 7 - Membrana

Como a idéia é desenvolver um manipulador com diversas vértebras, foi pensado em inserir uma “coluna” separando as membranas. Este componente foi desenvolvido com *nylon 6*. Foram usinados tubos com diâmetro externo de 3/4'' e interno de 3/8'' com comprimento de 1'' e massa de 7,26 gramas. Estas colunas pertencem à parte rígida do manipulador, trabalhando como parte da fixação das membranas. As colunas apresentam 4 furos de 0,098'' que servem para colocação de parafusos roscados de 3 mm. O furo central serve como possível passagem de cabeamento para algum sensor a ser fixado na extremidade do sistema, conforme ilustra a Figura 8.

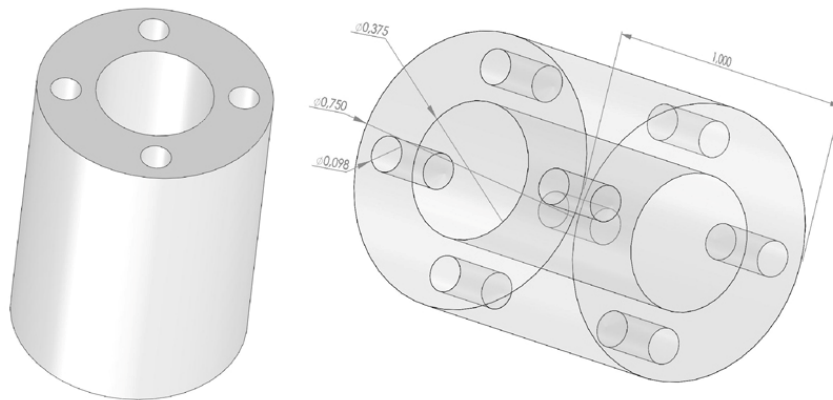


Figura 8 - Coluna

Foi necessário utilizar um espaçador entre as membranas por questões físicas, de forma que fosse possível fixar as membranas nas colunas e nos espaçadores, sem que as deformações ocorridas nas membranas afetassem o sistema rígido. Estes espaçadores ou anéis foram produzidos a partir de *AcetalDelrin AF* com PTFE. Os anéis possuem diâmetro externo de 1,5'', interno de 1'' e comprimento de 1/2''. Os anéis também possuem uma furação específica, sendo 4 furos com diâmetro de 0,1'' para fixação e 12 furos de 0,06'' para passagem dos tendões. A massa do anel é estimada em 1,97 gramas. O furo central, como nos outros componentes, também existe para uma futura passagem de cabeamento. A Figura 9 ilustra a peça.

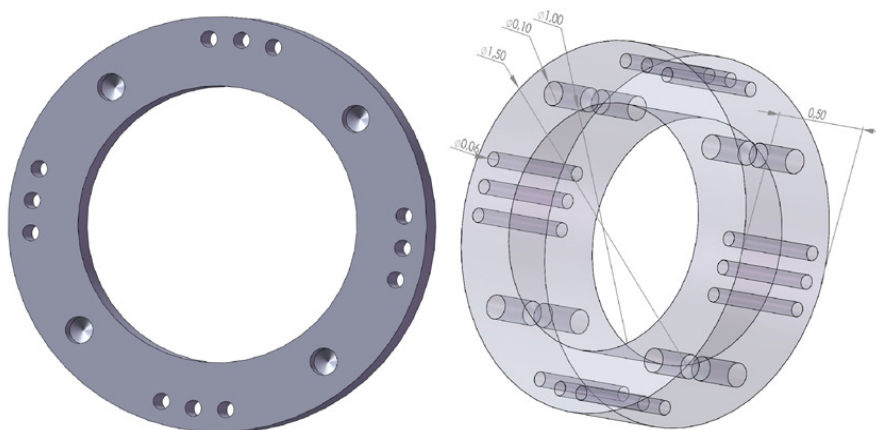


Figura 9 - Anel

Por fim, os tendões escolhidos para a realização da transmissão da força dos motores para o manipulador foram de aço inox 304 com revestimento do polímero FEP. O cabo de aço possui diâmetro de 0,032'' e com o revestimento o diâmetro chega a 0,04''. Apresenta construção 7x19 (7 grupos de 19 fios cada), conforme Figura 10, e resistência de aproximadamente 54,5Kg.

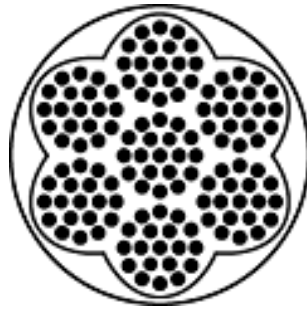


Figura 10 – Corte Transversal do Tendão

A partir dos componentes acima, foi iniciado o trabalho de desenho do manipulador. Inicialmente foi definida a criação da chamada “vértebra”, que é composta de uma membrana seguida de uma coluna que se liga a outra membrana e por fim um anel, conforme Figura 11.

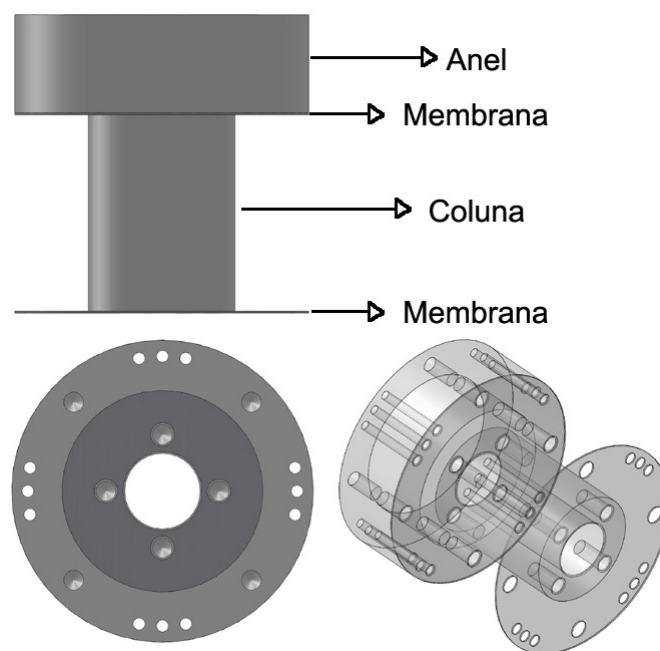


Figura 11 – Vértebra

Este é o padrão de montagem para cada elo do manipulador. Para que o manipulador possua uma característica de longo alcance, foi definido que, a princípio, o manipulador teria 3 elos, como já previsto anteriormente. Cada elo é composto por 4 conjuntos de vértebras (membrana + coluna + membrana + anel). A única variação deste conjunto é na extremidade, onde é inserida uma última membrana. O desenho de 1 elo é apresentado na Figura 12.

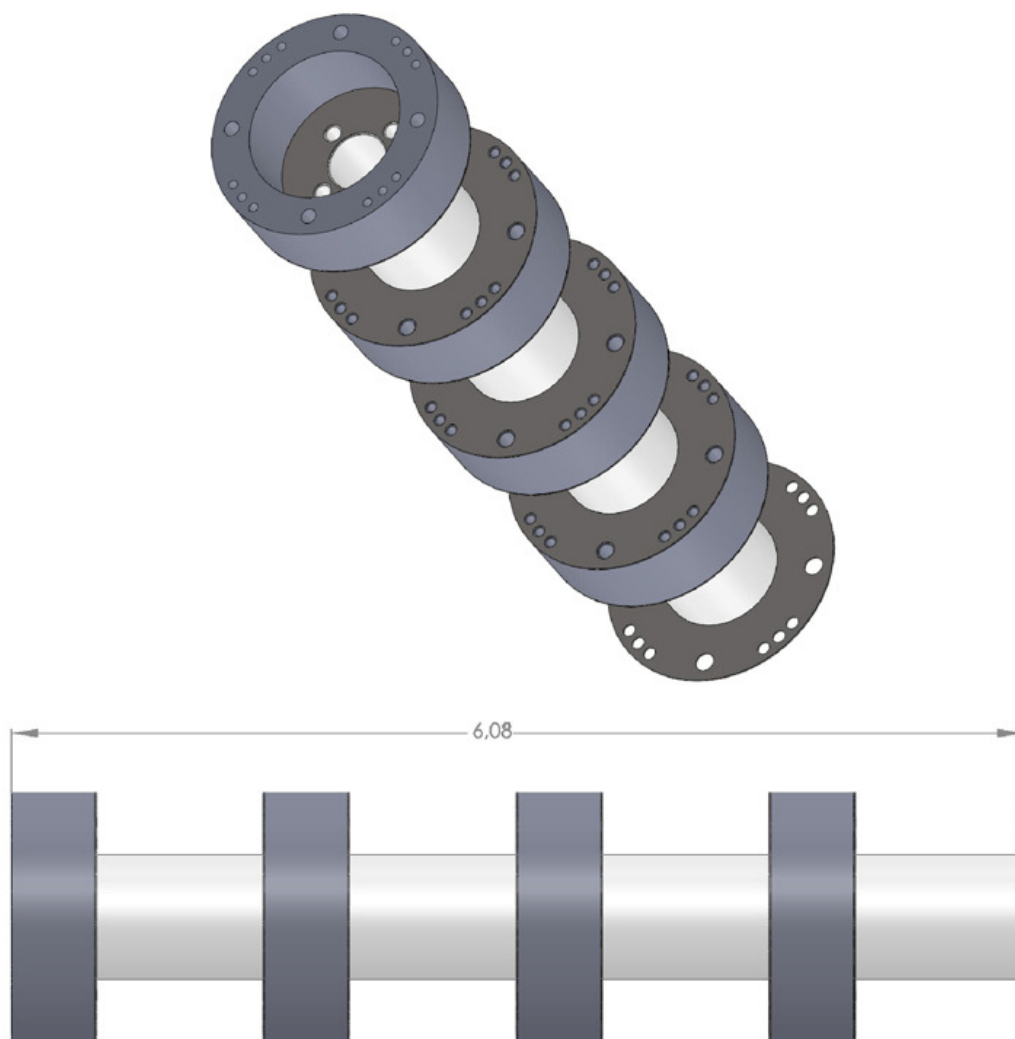


Figura 12 – Elo

A fixação dos componentes é feita através de parafusos auto-atarraxantes de diâmetro 3 mm por 6,5 mm de comprimento (maiores detalhes no Anexo II). O desejado é que os parafusos sejam de alumínio para evitar a possível geração de faíscas com o atrito entre o parafuso e a membrana. A Figura 13 ilustra o elo com os parafusos em suas respectivas posições.

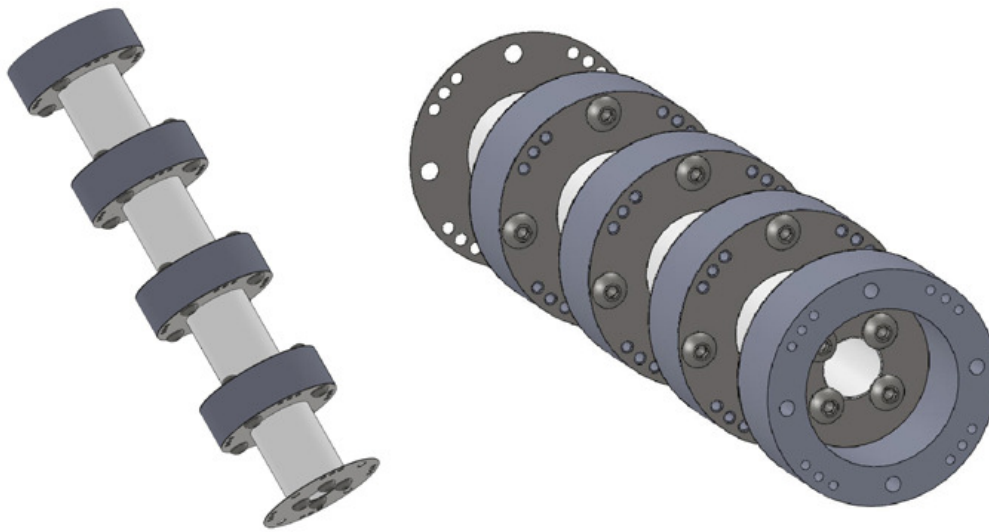


Figura 13 – Elo com Parafusos de Fixação

O desenho final dos elos do manipulador mostra a junção de três elos, além da inserção de uma membrana na extremidade do manipulador. A Figura 14 ilustra os elos, cada um em uma tonalidade distinta. O mais escuro é o elo base ou elo 1, o segundo mais escuro é o elo 2 ou intermediário e, finalmente, o elo mais claro é o elo extremidade ou elo 3. Pode-se perceber que o tamanho do elo 3 é 0,01” maior, o que resulta da inserção da membrana na extremidade.

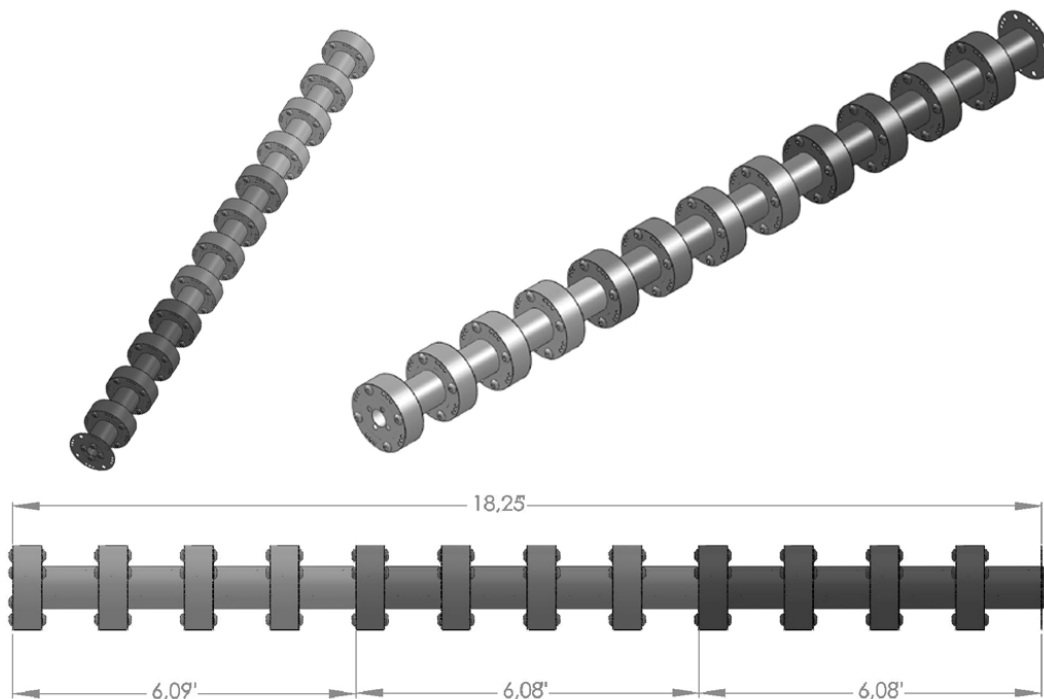


Figura 14 – 3 Elos com Parafusos

Como o intuito é desenvolver um protótipo de baixo custo, a escolha dos motores foi dimensionada para tal. Ao invés da utilização de motores elétricos para acionamento dos tendões, foi escolhida a opção de servomotores. Algumas características importantes precisavam ser observadas tais como alto torque (para que se consiga realizar a atuação de todo os elos), existência de um sensor de posição digital do tipo *encoder* (para facilitar a leitura, controle e a programação), velocidade controlável (para um melhor controle) e opção por giro livre (caso necessário dar mais de uma volta para o enrolamento dos tendões). Após algumas pesquisas, chegou-se ao servomotor AX-12+ da Dynamixel. Este modelo de servo possui algumas características interessantes. Ele trabalha na faixa de 7 a 10 volts, com uma corrente máxima de 900mA e velocidade final de 114RPM. Com uma redução de 1:254, produz um torque máximo de 1,617Nm a 10V e 1,176Nm a 7V. Ele possui sensores internos, podendo gerar um *feedback* de temperatura, velocidade, posição, carga aplicada e tensão elétrica (voltagem) recebida, o que só é encontrado em servomotores de alto desempenho. Ele possui duas formas de funcionamento, modo contínuo (giro livre com velocidade constante) ou modo de única volta (trabalha com o eixo girando entre $\pm 150^\circ$). Ao trabalhar em modo

contínuo, não se tem o controle de posição, de forma que o único controle possível é o de velocidade, enquanto que, ao se utilizar em modo única volta pode-se controlar a posição dentro de 300° com uma resolução de 0,31°. Com estas características e com a aquisição de uma placa de conversão denominada USB2Dynamixel, onde se pode realizar a programação dos servomotores através de linguagens tradicionais de programação, estes foram usados como atuadores. Com o intuito de desenvolver um posicionamento adequado dos motores no manipulador, eles foram desenhados em CAD, conforme ilustra a Figura 15.



Figura 15 – Servomotor AX-12+

Foi observada uma incoerência no cálculo da resolução do servo junto ao manual. No manual, é dito que o número de posições possíveis dentro do ângulo de atuação de 300° é de 1024. Ele também cita que a resolução do servo é de 0,35°, o que gerou a incoerência. Ao se calcular a resolução do servo com os dados de 300° e 1024, chega-se a outro resultado.

$$\text{Resolução} = \frac{300^\circ}{1024 - 1} = 0,29^\circ \quad (2.1)$$

O valor citado no manual é referente a uma rotação completa de 360°, porém como as 1024 posições são configuráveis dentro dos 300°, o valor real é de 0,29°. Assim, para cálculos futuros, será utilizado o valor de 0,29° como resolução do servomotor.

Com o intuito de verificar a veracidade dos dados e a rigidez da redução e, também, o tipo de *encoder* utilizado, o servomotor foi aberto, conforme ilustra a Figura 16, sendo verificado que a relação de engrenagens acontece conforme a Tabela 1, resultando na seguinte relação $\frac{48}{11} \times \frac{38}{15} \times \frac{31}{10} \times \frac{23}{9} \times \frac{29}{10} = 253,972$, o que corresponde ao fator de redução previsto. O *encoder* que é utilizado no servo é o modelo muRata SV01 (*Datasheet* no Anexo III).

Tabela 2-1 – Relação de Engrenagens

Engrenagem	Coroa Maior	Coroa Menor
1	Motor	11
2	48	15
3	38	10
4	31	9
5	23	10
6	29	Eixo

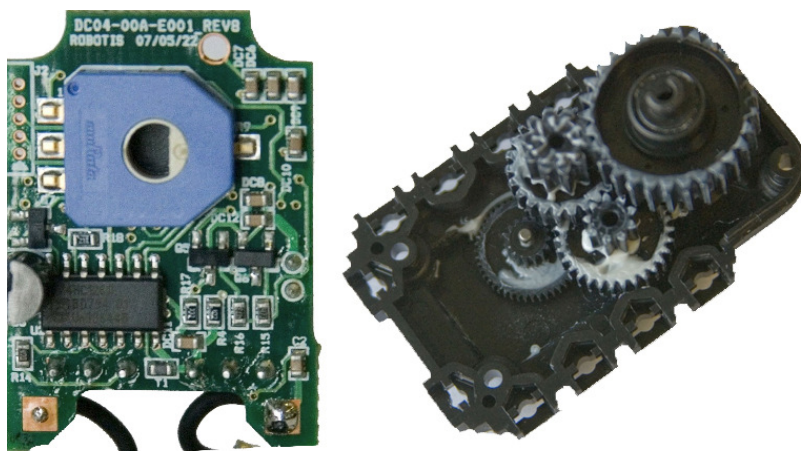


Figura 16 – Encoder e Relação de Engrenagens

Na tentativa de otimização do torque do servomotor, foi criada uma nova peça para servir como uma polia acoplada ao eixo do servomotor. Esta polia foi usinada em alumínio e possui as características mostradas na Figura 17. Os tendões ficam presos junto ao eixo central da polia. E furo para fixação dos tendões pode ser visualizado na Figura 17. A polia possui uma furação específica e fixa-se, assim, ao eixo do motor. Ela possui um segmento para enrolamento dos tendões com diâmetro de 10mm. Dessa forma, todo o torque gerado pelo motor, que é de 1,617Nm ou 16,49Kg.cm a 10V, é transferido sem perdas diretas para os tendões. Em outras palavras, cada servomotor consegue gerar nos tendões atuados por ele 16,49Kg, ou seja, 161,77Kgf. Esta força, apropriada para gerar as deflexões nas vértebras construídas, foi usada no projeto da polia na escolha de seu diâmetro.

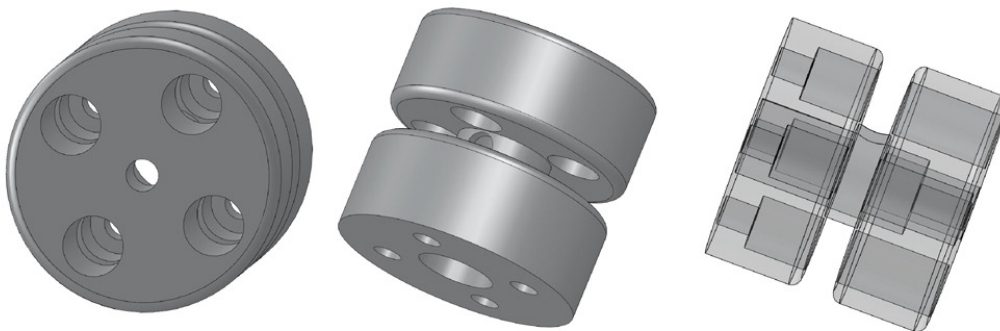


Figura 17 - Polia

O posicionamento dos motores é outro ponto que foi analisado de forma a facilitar a montagem e o entendimento do funcionamento do manipulador, além de se evitar a geração de atrito desnecessário, bem como evitar a criação de uma base volumosa para o manipulador. Dessa forma, a disposição dos servomotores foi realizada em formato circular em uma placa de alumínio, com espessura de 2mm. A fixação dos servomotores foi realizada utilizando peças de fixação

utilizados no kit do robô *Bioid*¹. A Figura 18 ilustra esta peça e o servomotor com sua base e a polia já inserida. Já o posicionamento dos servomotores na placa base é apresentado na Figura 19.

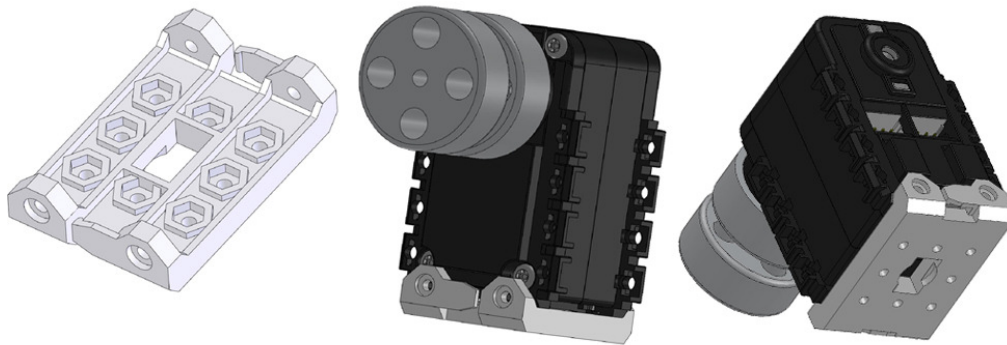


Figura 18 – Base, Servomotor e Polia

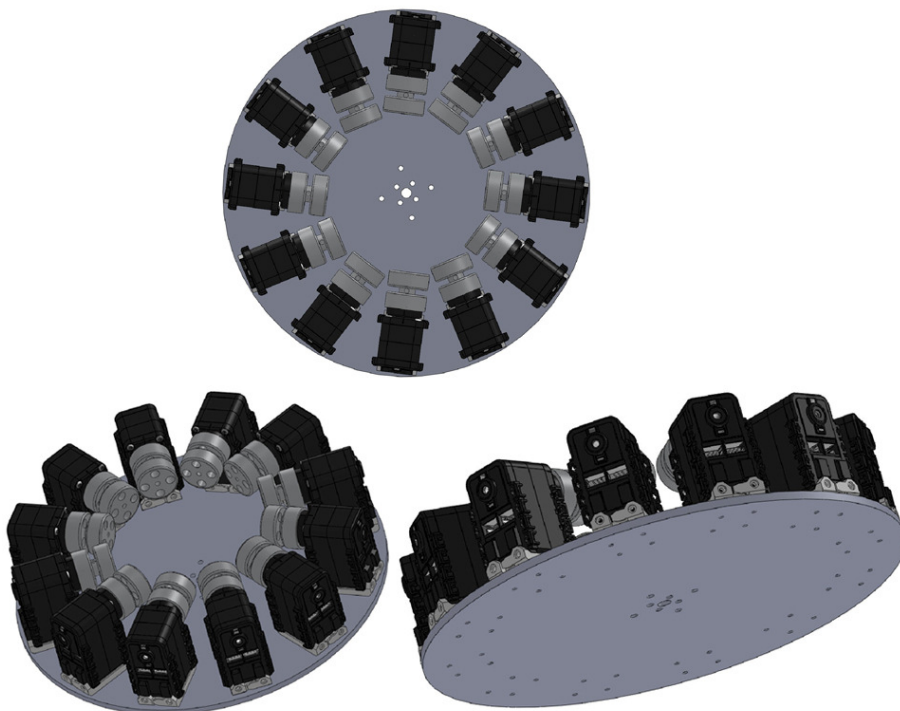


Figura 19 – Posicionamento dos Servos

¹ Fabricante Robotis - <http://www.robotis.com/zbxe/intro> (visitado em 10/12/2009)

Além dessa montagem, também foi usinada uma base fixa para o manipulador com o intuito de deixá-lo em um plano mais elevado em relação às polias, diminuindo o ângulo de entrada dos tendões no manipulador, e reduzindo assim o atrito gerado pelos tendões nos elos. Esta base possui diâmetro e furações similares à membrana em seu topo, descontando o furo central. Em sua base, as furações são para sua fixação na placa de alumínio. A base fixa possui comprimento de 6,10'' (Figura 20) e permite que os tendões saiam das polias, realizando uma curva suave até a entrada na base.

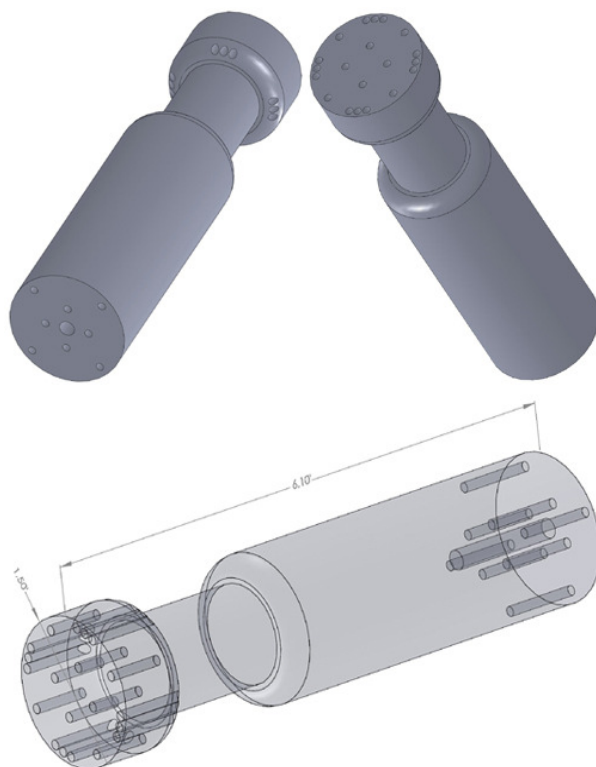


Figura 20 - Base

A Figura 21 apresenta a montagem completa do manipulador e ilustra a passagem de cabos que saem das polias e entram na base, e se findam em seus respectivos elos.

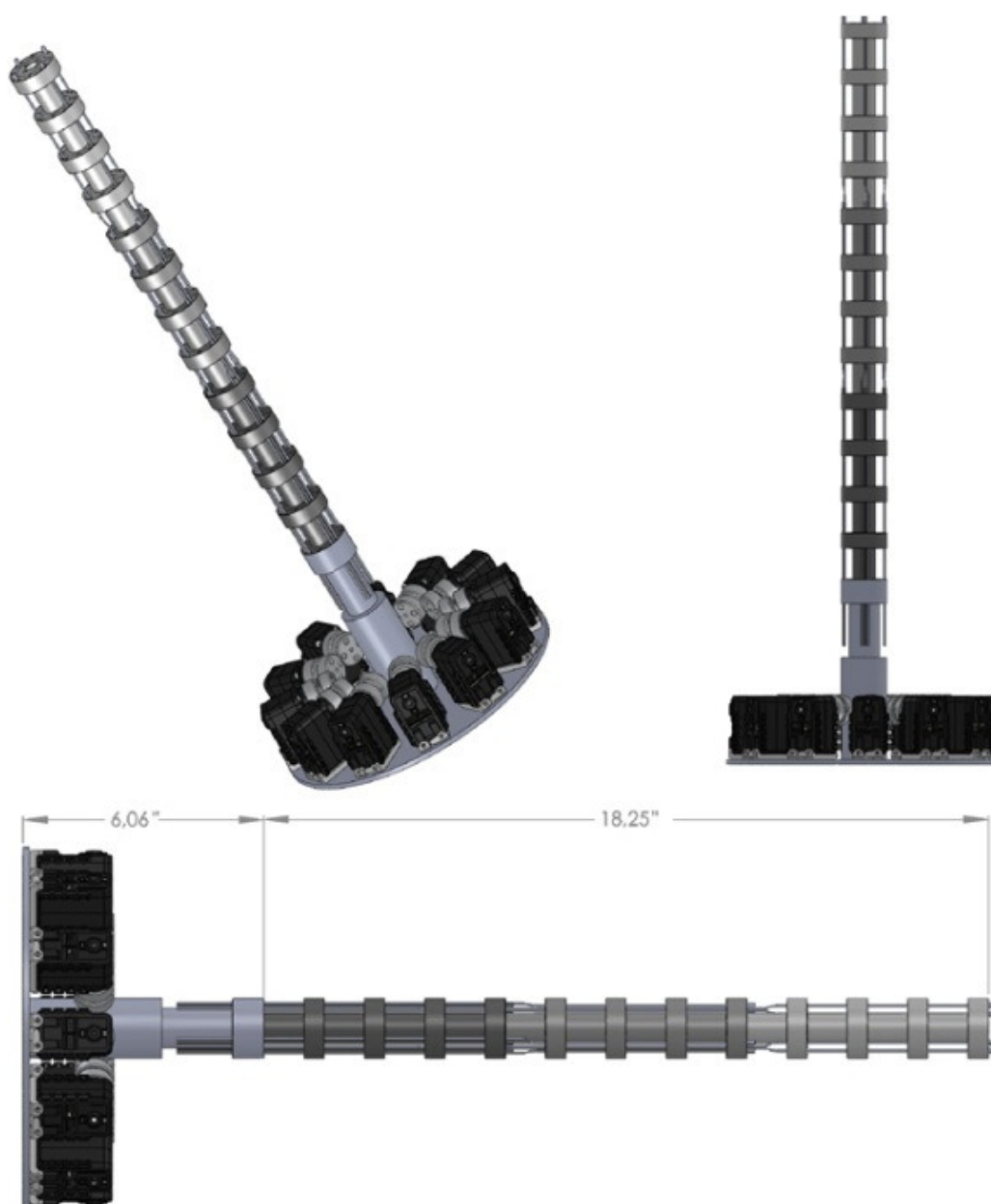


Figura 21 – Manipulador Completo

Os detalhes das trocas de posições nos canais de passagem dos tendões são apresentados na Figura 22. A primeira imagem mostra a passagem dos tendões no final do primeiro elo. Um conjunto de tendões está fixo no final do elo base através dos batentes; outro conjunto está trocando de canal de passagem, saindo do canal mais a esquerda e entrando no canal central, sendo referente ao tendão que atua no elo intermediário; e o que se mantém no canal de passagem, que é o que apresenta sua fixação no elo extremidade. A segunda imagem ilustra o final

do elo intermediário, onde existe um tendão final e outro trocando de canal de passagem do canal mais à direita para o canal central, alcançando o elo extremidade em sua posição de fixação final. Podem ser notados os *stop sleeves* (batentes) utilizados no final de cada elo para fixação dos tendões. Estes mesmos batentes são utilizados nas polias conectadas aos motores, com o mesmo intuito de fixação. Após a inserção do cabo no batente, este é pressionado com um alicate até ocorrer deformação, de modo que o cabo de aço fique fixo nele.

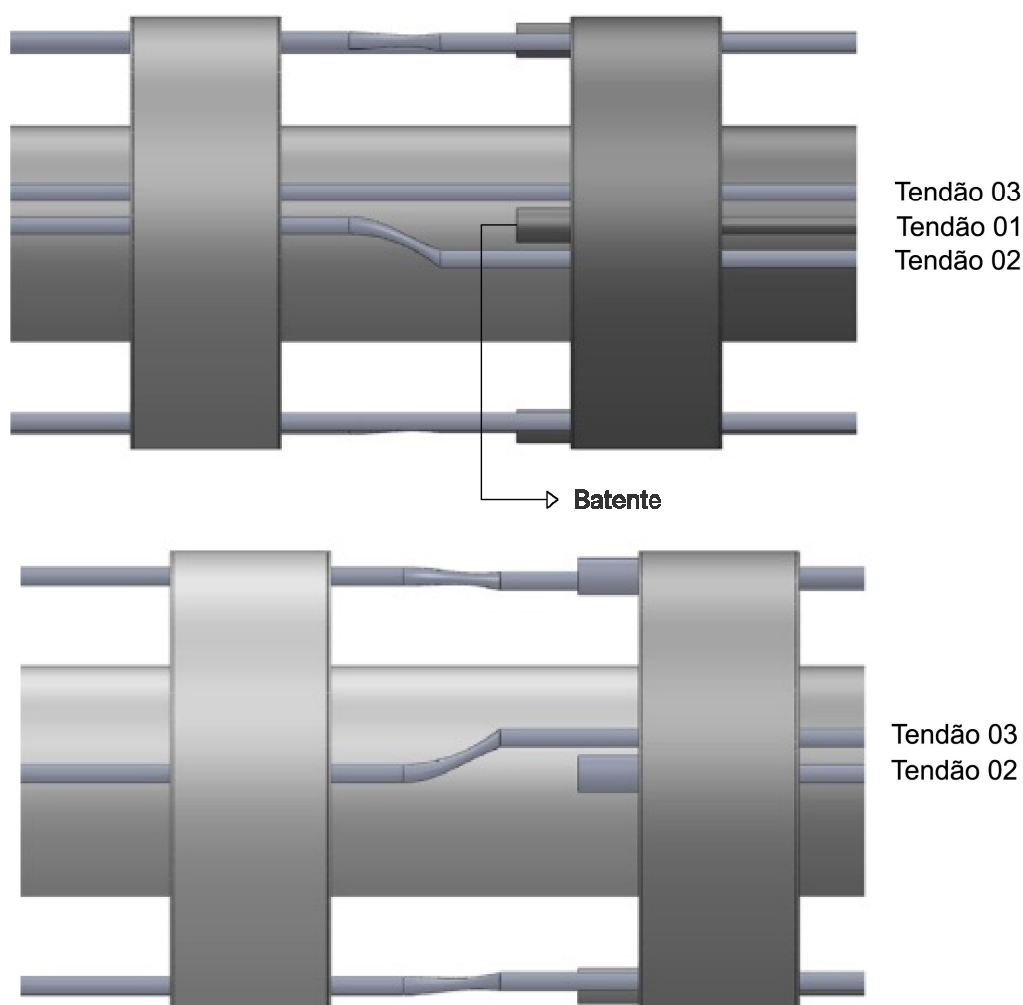


Figura 22 – Passagem de Tendões

Em resumo, o manipulador completo é composto por:

- Base de montagem dos servomotores;
- Suporte do manipulador;
- 12 servomotores;
- 12 suportes de fixação dos motores;
- 12 polias;
- 24 membranas;
- 12 colunas;
- 12 anéis;
- 96 parafusos 3 mm x 6,5 mm;
- 96 parafusos M2 x 6mm;
- 96 porcas para parafusos M2;
- Aproximadamente 4,3 metros de cabo de aço;
- 24 batentes.

2.2. Cálculos de Rigidez por Elementos Finitos

Com todo o sistema projetado e desenhado e com o auxílio da ferramenta *Simulation* do *software SolidWorks*², utilizada para a realização de análises com Elementos Finitos, que é uma técnica numérica para resolução de sistemas por aproximação através equações diferenciais parciais, foram realizadas algumas simulações para visualizar a configuração descrita. Os cálculos das rigidezes foram realizados através da aplicação de forças e verificação dos deslocamentos gerados na análise. Inicialmente, foi simulada uma força atuando na membrana fixada em um anel. Em seguida foi realizada a simulação com a vértebra completa. A simulação com o manipulador completo não foi possível devido à necessidade de maiores recursos computacionais. Com os computadores testados,

² Desenvolvedor – <http://www.3ds.com/> (visitado em 10/05/2010)

conseguiu-se realizar os testes para até três vértebras. Ao inserir uma quarta vértebra, ou seja, um elo completo os cálculos se iniciavam, porém após algum tempo decorrido, o computador retornava o erro indicando falta de memória para execução dos cálculos. Assim, os cálculos se limitaram a análise de uma membrana e uma vértebra.

2.2.1. Análise da Membrana

Para o cálculo inicial, foi criada uma malha com as características contidas na Tabela 2. As escolhas desses valores foram relativas ao padrão do programa utilizado, *SolidWorks*, sendo a malha formada pelo sistema apresentada na Figura 23.

Tabela 2-2 – Configuração da Malha dos Testes

Configuração da Malha			
Tipo	Tamanho Global (mm)	Tolerância	Pontos Jacobianos
Padrão	1,98351	0,0991754	16

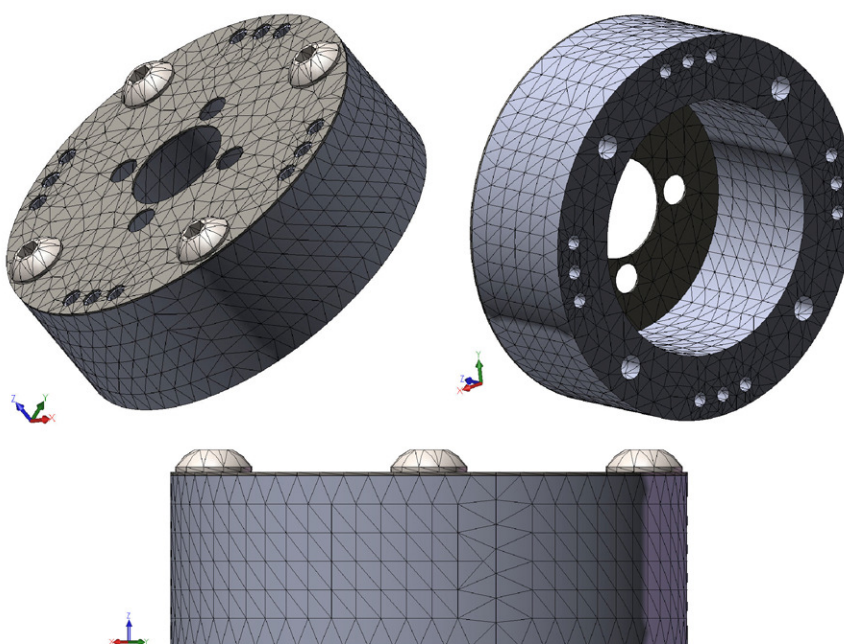


Figura 23 – Malha Gerada para o Cálculo da Membrana

A força aplicada na membrana foi de 100N com direção no eixo z e sentido em -z. Os furos de fixação da membrana, bem como toda a estrutura do anel foram definidos como fixos, conforme ilustra a Figura 24, uma vez que a rigidez do anel é muito maior que a da membrana.

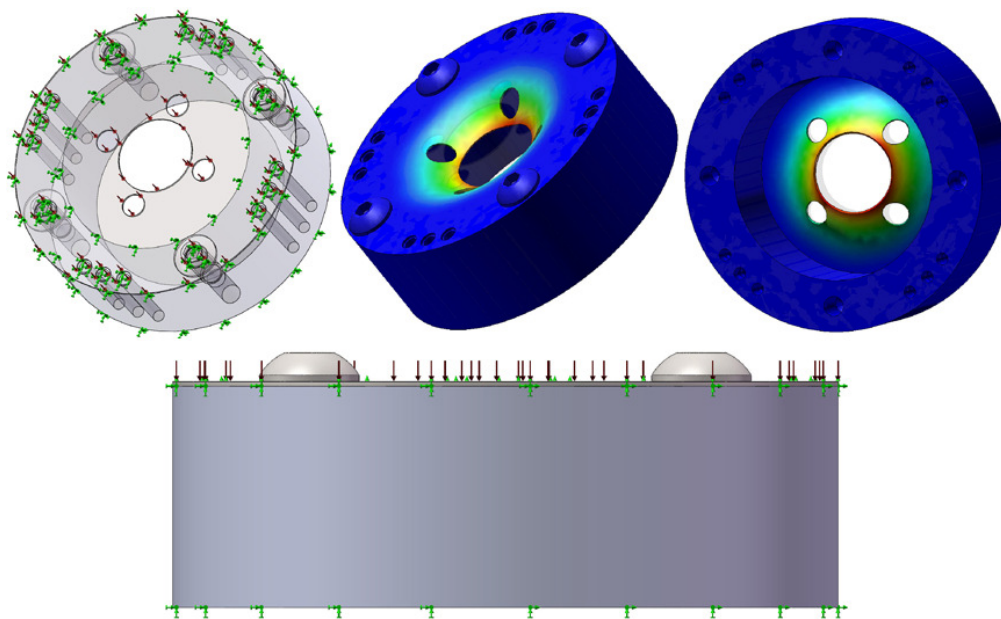


Figura 24 – Forças e Deformação o Cálculo da Membrana

Este estudo apresentou o resultado relacionado à aplicação de uma força distribuída de 100N ao longo da membrana fixada em um anel, a qual realiza um deslocamento máximo aproximado de 0,2506mm na direção de aplicação da força. Como existem 24 membranas, suas deformações são acumuladas e geram deslocamentos significativos.

2.2.2. Cálculo de Rigidez para Vértebra

Para o cálculo com a vértebra, foi criada uma malha com as características contidas na Tabela 2. A malha formada pelo sistema é apresentada na Figura 25. Pode ser percebida a inclusão de 4 pinos na extremidade da vértebra. Estes batentes são as representações dos *stop sleeves* para terminações dos tendões.

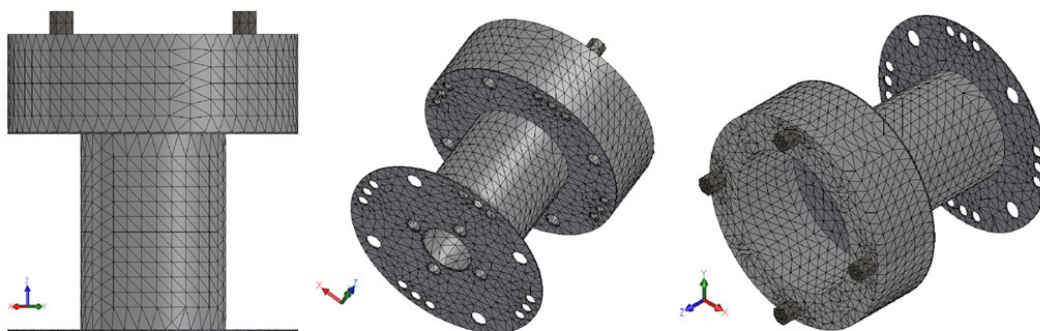


Figura 25 – Malha Gerada para o Cálculo da Vértebra

Como as forças aplicadas nas vértebras são provenientes dos tendões, as análises das forças seguiram este preceito na modelagem. Os resultados são descritos a seguir.

2.2.2.1. Deslocamento no eixo Z

Igualmente ao teste anterior, foi aplicada uma força de 100N distribuída nos 4 batentes na direção do eixo $-z$. As laterais da membrana inferior e seus pontos de fixação foram definidos como fixos para análise. Os resultados referentes ao deslocamento podem ser encontrados na Figura 26. Os parâmetros da malha seguiram os valores da Tabela 2.

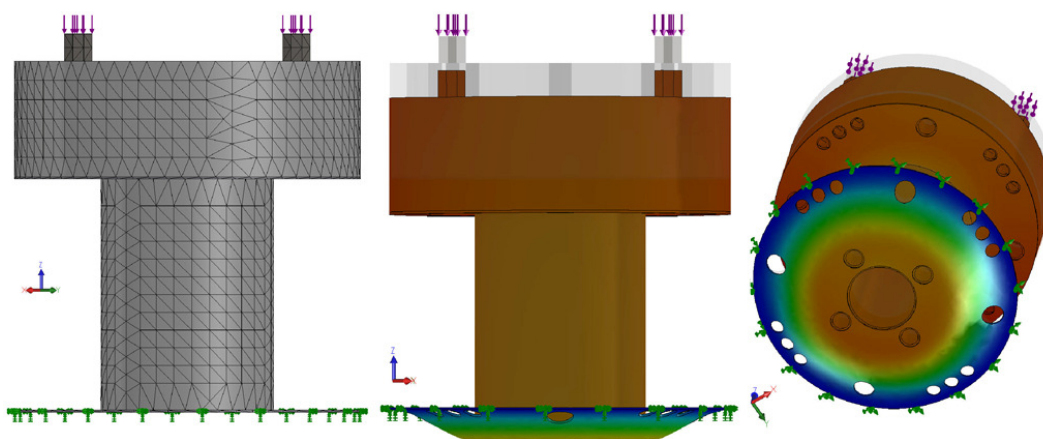


Figura 26 - Forças e Deformação do Sub-Item 2.2.2.1

O deslocamento para este caso foi de 0,3483 mm. A rigidez encontrada para este cálculo foi de $2,39 \cdot 10^6$ N/m. A rigidez é elevada, mas condiz com o esperado onde o deslocamento na direção de z é pequeno. Entretanto, por ser uma análise linear, quanto maior a força aplicada, maior o deslocamento e conseqüentemente, ao se analisar o elo completo ou mesmo o manipulador completo os deslocamentos se somam, gerando um deslocamento total satisfatório.

2.2.2.2. Deslocamento Rotacional

Como o sistema é axi-simétrico, para este cálculo, as análises feitas para o eixo x foram assumidas idênticas para o eixo y. Igualmente ao teste anterior, foi aplicada uma força de 100N, porém agora aplicada em um batente na direção perpendicular ao eixo x. Os pontos de fixação foram os mesmos do sub-item anterior. Os resultados do deslocamento são apresentados na Figura 27. Os parâmetros da malha foram os valores da Tabela 2.

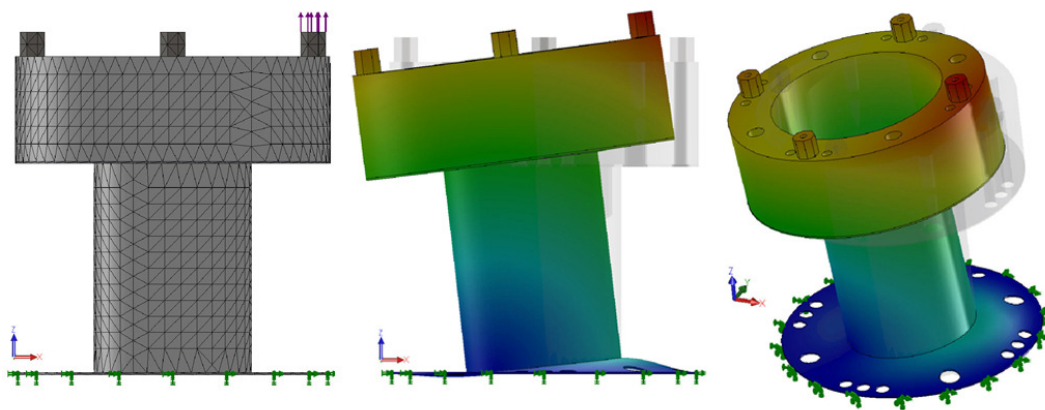


Figura 27 - Forças e Deformação do Sub-Item 2.2.2.2

O deslocamento resultante para este caso foi de 0,1449 mm, com componente x de 0,1175 mm, erro residual em y de $2,467 \cdot 10^{-4}$ mm e com componente z de 0,0808 mm. A rigidez encontrada para este cálculo foi de

$1,38 \cdot 10^4$ N/(m.rad). A rigidez é mais baixa (comparando com a do sub-item 2.2.2.1), o que já era esperado e desejado, uma vez que os maiores deslocamentos serão realizados nas direção x e y. Com esta deformação e com as forças e as restrições aplicadas, pode-se encontrar um ângulo aproximado de $34,51^\circ$ para a curvatura da vértebra, sob 100N em apenas um dos tendões.

No capítulo seguinte o manipulador proposto é modelado cinematicamente, e os parâmetros de rigidez obtidos por Elementos Finitos são usados no cálculo de seu equilíbrio estático.

3. Modelagem Teórica

3.1. Conceitos Básicos de Cinemática

Para se estudar o comportamento de manipuladores, é necessário que se tenha um conhecimento de técnicas de obtenção de posição e de orientação de corpos rígidos. Para realizar este estudo, faz-se necessário o conhecimento sobre transformações de coordenadas.

Um manipulador genérico qualquer pode ser representado como um sistema de corpos rígidos. Sendo O_{xyz} um sistema de coordenadas fixo no espaço e O_a um ponto arbitrário no manipulador, a posição de O_a é representada pelo vetor X_0 , conforme Figura 28. A orientação do corpo rígido é dada pela direção dos eixos x_1, y_1 e z_1 .

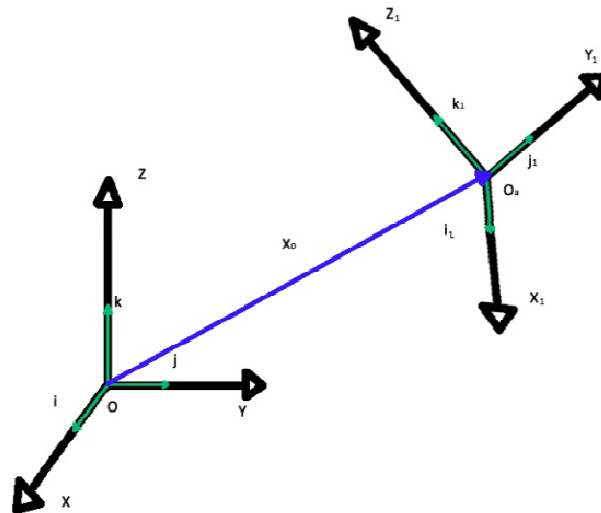


Figura 28 – Posição e Orientação do Corpo Rígido

$$X_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Assumindo i_1 , j_1 e k_1 como vetores unitários em relação aos eixos x_1 , y_1 e z_1 , as componentes de cada vetor unitário podem ser consideradas como sendo o cosseno diretor de cada eixo projetado no sistema fixo.

A matriz de rotação do corpo rígido é a representação de uma transformação de coordenadas que relaciona as coordenadas de um ponto P qualquer em dois sistemas com mesma origem. Ela também apresenta a orientação do corpo rígido em relação à origem. A Figura 29 apresenta dois sistemas com orientações distintas, mas com origens idênticas.

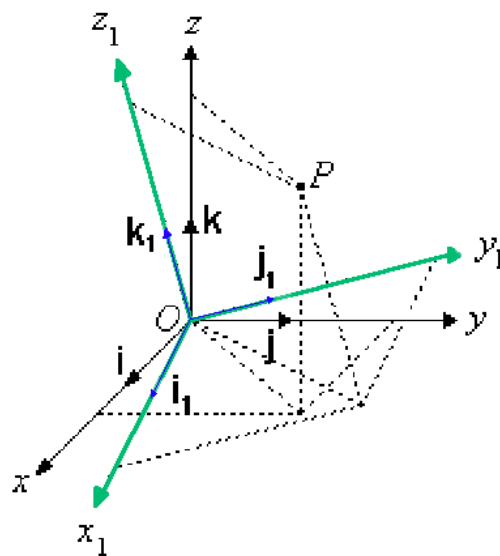


Figura 29 – Transformação Rotacional

As coordenadas de um ponto no sistema O_{xyz} podem ser representadas pela Eq. (3), enquanto que as coordenadas no sistema $O_{1-x_1y_1z_1}$ são descritas pela Eq. (4).

$$p = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$p_1 = \begin{bmatrix} p_{x1} \\ p_{y1} \\ p_{z1} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

O ponto P pode ser descrito em formato vetorial em relação ao sistema O_1 -
x₁y₁z₁ por:

$$p_1 = p_{x_1} \cdot i_1 + p_{y_1} \cdot j_1 + p_{z_1} \cdot k_1 \quad (3.4)$$

Assumindo que o ponto P está localizado em um ponto fixo, porém com posicionamento distinto entre os dois sistemas, podem-se escrever as relações:

$$\begin{aligned} p_x = p \cdot i = p_1 \cdot i &= p_{x_1} \cdot i_1 \cdot i + p_{y_1} \cdot j_1 \cdot i + p_{z_1} \cdot k_1 \cdot i \\ p_y = p \cdot j = p_1 \cdot j &= p_{x_1} \cdot i_1 \cdot j + p_{y_1} \cdot j_1 \cdot j + p_{z_1} \cdot k_1 \cdot j \\ p_z = p \cdot k = p_1 \cdot k &= p_{x_1} \cdot i_1 \cdot k + p_{y_1} \cdot j_1 \cdot k + p_{z_1} \cdot k_1 \cdot k \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \cdot i & j_1 \cdot i & k_1 \cdot i \\ i_1 \cdot j & j_1 \cdot j & k_1 \cdot j \\ i_1 \cdot k & j_1 \cdot k & k_1 \cdot k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{x_1} \\ p_{y_1} \\ p_{z_1} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Ou ainda, pode-se escrever de forma compacta como:

$$p = Rot_0^1 \cdot p_1 \quad (3.7)$$

onde Rot_0^1 é a matriz de rotação.

$$Rot_0^1 = \begin{bmatrix} i_1 \cdot i & j_1 \cdot i & k_1 \cdot i \\ i_1 \cdot j & j_1 \cdot j & k_1 \cdot j \\ i_1 \cdot k & j_1 \cdot k & k_1 \cdot k \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Analogamente, pode-se achar a matriz que realiza a transformação de O_1 -
x₁y₁z₁ para O_{xyz} :

$$\begin{aligned} p_{x_1} = p_1 \cdot i_1 = p \cdot i_1 &= p_x \cdot i \cdot i_1 + p_y \cdot j \cdot i_1 + p_z \cdot k \cdot i_1 \\ p_{y_1} = p_1 \cdot j_1 = p \cdot j_1 &= p_x \cdot i \cdot j_1 + p_y \cdot j \cdot j_1 + p_z \cdot k \cdot j_1 \\ p_{z_1} = p_1 \cdot k_1 = p \cdot k_1 &= p_x \cdot i \cdot k_1 + p_y \cdot j \cdot k_1 + p_z \cdot k \cdot k_1 \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{bmatrix} p_{x_1} \\ p_{y_1} \\ p_{z_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i.i_1 & j.i_1 & k.i_1 \\ i.j_1 & j.j_1 & k.j_1 \\ i.k_1 & j.k_1 & k.k_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = Rot_1^0 \cdot p \quad (3.10)$$

Vale notar que, ao se comparar as matrizes de rotação, é percebido que $Rot_0^1 = Rot_1^{0T}$.

As rotações em torno dos eixos x, y e z estão apresentadas nas Eqs. (3.11-3.13). Utilizando a Figura 29 como base, as rotações são calculadas em função de ângulos θ_x , θ_y e θ_z , resultando no sistema de coordenadas $O_{1-x_1y_1z_1}$.

$$Rot_{x,\theta_x} = \begin{bmatrix} i.i & j.i & k.i \\ i.j & j.j & k.j \\ i.k & j.k & k.k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$Rot_{y,\theta_y} = \begin{bmatrix} i.i & j.i & k.i \\ i.j & j.j & k.j \\ i.k & j.k & k.k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$Rot_{z,\theta_z} = \begin{bmatrix} i.i & j.i & k.i \\ i.j & j.j & k.j \\ i.k & j.k & k.k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

3.1.1. Transformação Homogênea

Uma transformação homogênea pode ser definida pela junção da matriz de translação e da matriz de rotação em uma única matriz A:

$$P = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} p_{x_1} \\ p_{y_1} \\ p_{z_1} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$A = \begin{bmatrix} R & X_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1.i & j_1.i & k_1.i & x_0 \\ i_1.j & j_1.j & k_1.j & y_0 \\ i_1.k & j_1.k & k_1.k & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

A matriz A é composta por uma sub-matriz de rotação combinada ao vetor X_0 e de uma quarta linha preenchida com zeros e um. A transformação de coordenadas para este sistema pode ser compactada através da Eq. (3.17), também conhecida como transformação homogênea:

$$P = A.P_1 \Rightarrow P = \begin{bmatrix} p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & X_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Uma das vantagens na utilização da técnica de transformação homogênea é a compactação das formulações em transformações consecutivas. Em um caso geral, consideram-se n transformações consecutivas de um sistema n para um sistema 0, e assumindo A_{i-1}^i como a matriz relacionada com a transformação homogênea do sistema $i-1$ para o sistema i . A Eq. (3.17) que relaciona o sistema n com o sistema 0 é a Eq. (3.18).

$$P_0 = \begin{bmatrix} P_0 \\ 1 \end{bmatrix} = A_1^0 A_2^1 A_3^2 \dots A_{n-1}^{n-2} A_n^{n-1} P_n = A_n^0 P_n \quad (3.18)$$

Note que na ausência de rotações, a matriz A é simplificada e resulta na matriz de translação sobre os eixos x , y e z por distâncias x_0 , y_0 e z_0 :

$$Transl_{a,b,c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & 0 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

3.2. Notação de Denavit-Hartenberg

Em termos gerais, a notação de Denavit-Hartenberg (D-H) facilita a obtenção do conjunto de equações da cinemática de um elo em relação ao elo anterior de um manipulador.

A Figura 30 apresenta um par de elos adjacentes, Elo_{i-1} e Elo_i, e suas respectivas articulações, junta_{i-1}, junta_i e junta_{i+1}. Na notação de D-H, o sistema de coordenadas do i-ésimo elo está localizado na interseção da normal comum entre os eixos das juntas i e i+1, cujas direções são definidas pelos eixos z_{i-1} e z_i. A normal comum é representada pela distância mínima entre os eixos z_{i-1} e z_i, segundo o desenho a reta H_iO_i. O eixo x_i deve seguir a direção relativa à extensão da normal comum, no sentido de z_{i-1} para z_i. Já o eixo z_i mantém a direção do eixo da junta i+1, enquanto que o eixo y_i é definido de forma que o sistema resultante O_i-x_iy_iz_i seja um sistema de coordenadas que siga a regra da mão direita.

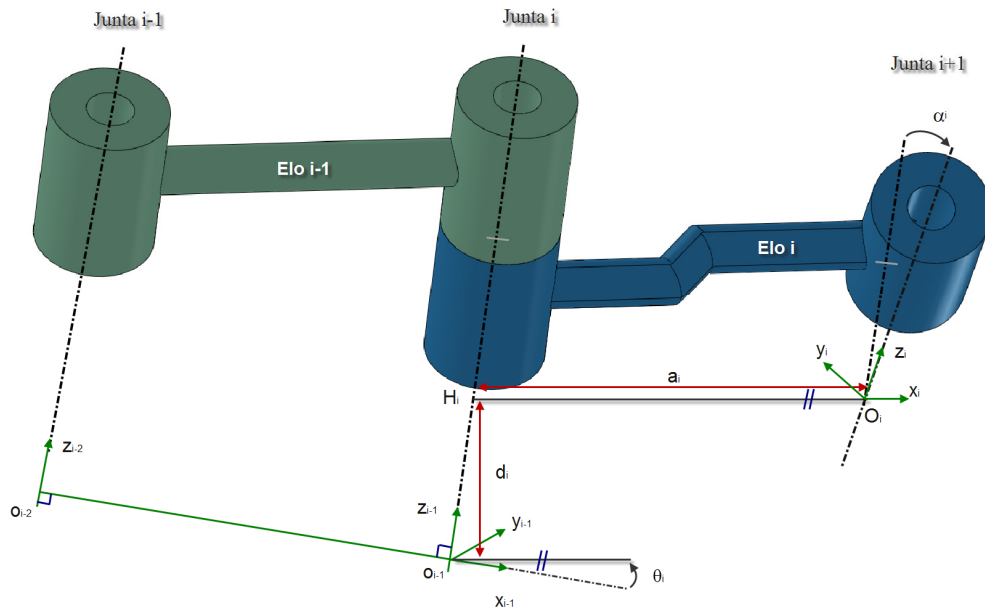


Figura 30 – Notação de Denavit-Hartenberg

A posição relativa entre os dois sistemas de coordenadas apresentados, na Figura 30, $O_{i-1}-x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ e $O_i-x_iy_iz_i$, é completamente definida pelas posições relativas aos eixos x_{i-1} e x_i , y_{i-1} e y_i e z_{i-1} e z_i . Os parâmetros que definem tais posições são: o comprimento da normal comum (a), o ângulo de torção da junta (α), o deslocamento da junta (d) e o ângulo da rotação da junta (θ), onde:

a – é o afastamento linear entre eixos. É a distância medida ao longo da normal comum entre os eixos analisados. Isto é, é a distância entre z_{i-1} e z_i ao longo do eixo x_i ou, ainda, a distância H_iO_i ;

α – é o ângulo de torção que o elo sofre a partir da junta anterior, ou seja, é o ângulo de rotação que ocorre na direção x_i entre o eixo z_{i-1} e o eixo z_i ;

d – é a distância entre os elos, medido ao longo da junta anterior, isto é, é a distância entre os eixos x_{i-1} e x_i medida ao longo do eixo z_{i-1} , partindo de O_{i-1} em direção a H_i . De fato, ela é a normal comum entre x_{i-1} e x_i . Este parâmetro apresenta sinal positivo caso siga na direção de O_{i-1} para H_i e negativo na direção oposta;

θ – é o ângulo formado entre a normal comum de elos sucessivos, ou seja, é o ângulo de rotação na direção z_{i-1} entre o eixo x_{i-1} e o eixo x_i .

A Tabela 3 apresenta outras informações referentes aos parâmetros e aos tipos de juntas, rotativa ou prismática.

Tabela 3-1 – Parâmetros x Tipo de Juntas

Parâmetro	Símbolo	Junta Rotativa	Junta Prismática
Comprimento do Elo	a	Fixo	Fixo
Ângulo de torção	α	Fixo	Fixo
Deslocamento da Junta	d	Fixo	Variável
Ângulo da Junta	θ	Variável	Fixo

Através dos 4 parâmetros, a posição e a orientação relativa aos dois elos podem ser descritas pelas transformações de translação e de rotação entre os dois sistemas de coordenadas fixos. Estas transformações apresentam 4 etapas:

- 1 – Rotação no eixo z_{i-1} de um ângulo θ e alinhado com x_{i-1} , segundo a regra da mão direita;
- 2 – Translação no eixo z_{i-1} de uma distância d_i , partindo do ponto O_{i-1} até o ponto H_i ;
- 3 – Translação ao longo do eixo x_i de uma distância a_i , partindo do ponto H_i até o ponto O_i ;
- 4 – Rotação em torno do eixo x_i de um ângulo α e alinhado com z_{i-1} , segundo a regra da mão direita.

Assim,

$$A_i^{i-1} = Rot_{z, \theta_i} \cdot Transl_{z, d_i} \cdot Transl_{x, a_i} \cdot Rot_{x, \alpha_i} \quad (3.20)$$

Substituindo pelas matrizes de rotação e translação em z e x, conforme Eqs. (3.11), (3.13) e (3.19), tem-se que:

$$\begin{aligned}
A_i^{i-1} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
&\quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \\
A_i^{i-1} &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i)\sin(\alpha_i) & a_i \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)
\end{aligned}$$

O estabelecimento do sistema de coordenadas da extremidade pode ser definido de forma mais conveniente, se a orientação de z_n for escolhida paralela à orientação de z_{n-1} . Já o sistema de coordenadas da base, em manipuladores comerciais, costuma ser definido pelo próprio fabricante, porém, em casos que ele não esteja definido, a escolha do sistema de coordenadas deve ser feita em qualquer ponto do eixo z_0 . Os eixos x_0 e y_0 podem ser escolhidos de forma geral, contudo devem seguir a regra da mão direita.

3.3. Modelagem do Sistema

A metodologia utilizada para a modelagem cinemática deste trabalho foi baseada na notação de D-H. A formulação do manipulador é obtida por uma série de substituições aplicadas nas matrizes de transformação homogênea, usando D-H. Outro ponto importante é que foi assumido que cada elo adquire uma forma circular com curvatura constante, similar às hipóteses em trabalhos anteriores sobre manipuladores simulando trombas de elefantes (Hannan, et al., 2003). Esta hipótese é satisfatória quando as forças gravitacionais são pequenas em relação às forças nos tendões.

Em manipuladores tradicionais, a cinemática direta utiliza um padrão para a transformação homogênea, através da matriz A , proveniente da notação de D-H. A notação de D-H, conforme explicado no sub-tópico 3.2, cria uma relação entre as coordenadas locais das juntas θ_i ou d_i e a posição e orientação da extremidade do manipulador. Essa relação é baseada em rotações e translações independentes segundo a Eq. (21), realizadas para cada junta i . No entanto, os manipuladores contínuos não possuem juntas explícitas com equivalências em rotações em θ_i e translações em d_i . Um manipulador contínuo utiliza outras variáveis s_i , κ_i e ϕ_i , onde s_i indica o comprimento do elo i medido ao longo de seu eixo, κ_i é a curvatura do elo i (inverso do raio de curvatura) e ϕ_i é o ângulo da curvatura, conforme ilustra a Figura 31.

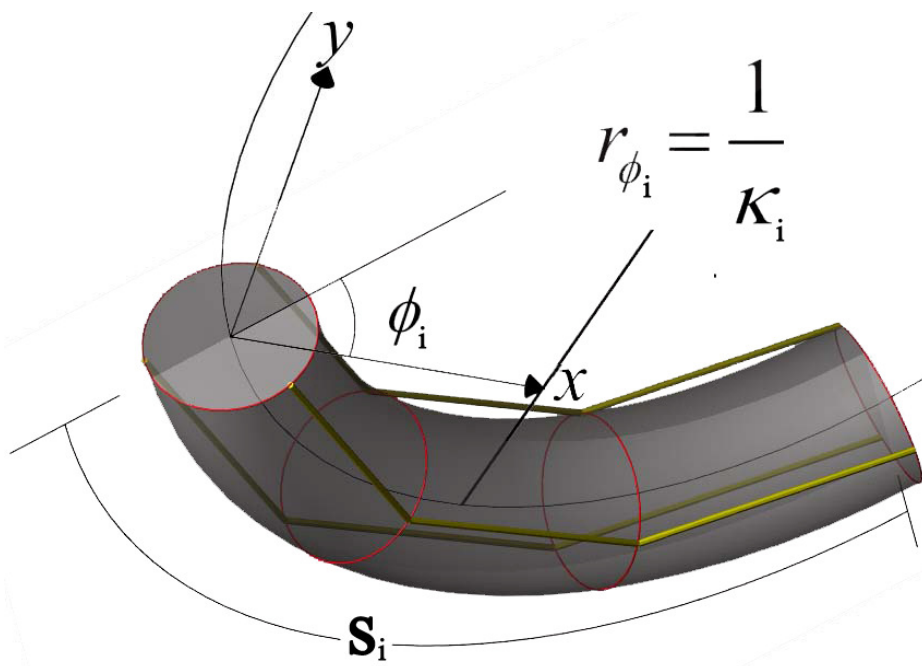


Figura 31 – Definição de s_i , κ_i e ϕ_i .

Dessa maneira, faz-se uma equivalência entre θ_i e d_i e s_i , κ_i e ϕ_i . Usando algumas técnicas geométricas simples pode-se chegar em $[\theta \ d]^T = f_1(s_i, \kappa_i, \phi_i)$ relativas aos parâmetros do D-H (Hannan, et al., 2003). Outra confirmação retirada de (Hannan et al., 2003) é que $A(f_1(s_i, \kappa_i, \phi_i)) = A(s_i, \kappa_i, \phi_i)$, o que torna

possível relacionar os procedimentos de D-H para se chegar às coordenadas da extremidade do manipulador.

O modelo deste manipulador é baseado em vértebras, onde será realizada a modelagem para cada seção de vértebra. Para se obter o modelo completo, basta multiplicar as matrizes de cada número de vértebras do manipulador por elo. Assim, a modelagem serve para um manipulador com números de elos arbitrários.

Basicamente, a modelagem do manipulador será baseada em uma conversão de um sistema invertebrado (contínuo) para um vertebrado (com parâmetros concentrados). A Figura 32 apresenta um desenho esquemático de cada vértebra (da Fig. 11), para a utilização da notação de D-H, onde θ_1 e θ_2 são juntas rotativas, relacionadas com as deformações rotacionais da membrana inferior da vértebra, enquanto que d_3 é uma junta prismática que está associada aos deslocamentos na coluna da vértebra, devido principalmente às membranas, e θ_4 e θ_5 são juntas rotativas associadas à segunda membrana da vértebra, entre a coluna e o anel. Os eixos z , são referentes aos eixos z supracitados no item 3.2. Também é representada na figura a curvatura do manipulador em uma vértebra.

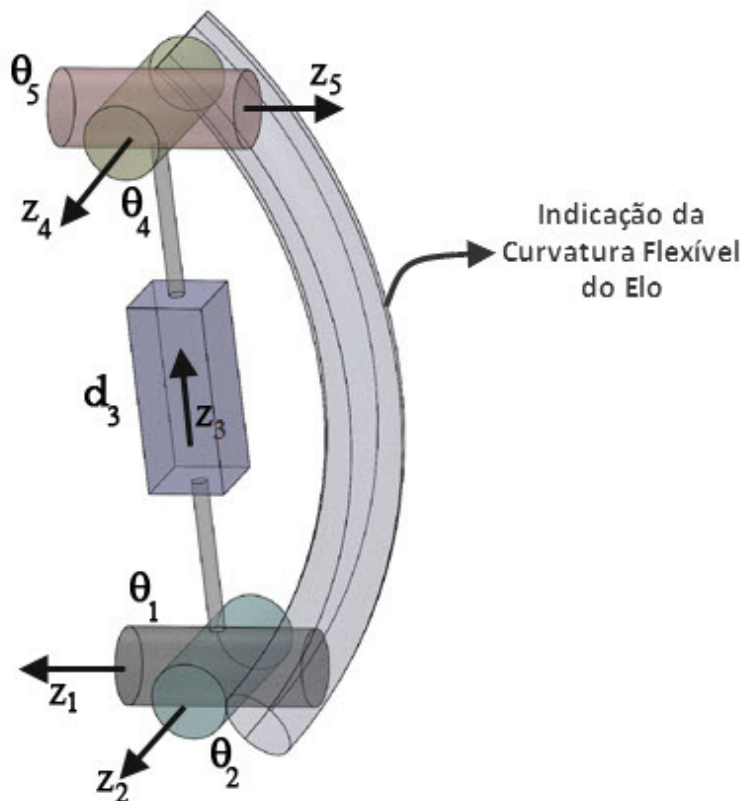


Figura 32 – Adaptação da Vértebra para D-H

Foi assumido que cada membrana possui dois graus de liberdade e que a coluna passaria a ter um grau de liberdade. Logo, θ_1 e θ_2 são juntas rotativas, relacionadas com as deformações rotacionais da membrana inferior da vértebra, enquanto que d_3 é uma junta prismática que está associada aos deslocamentos na coluna da vértebra, devido principalmente às membranas, e θ_4 e θ_5 são juntas rotativas associadas à segunda membrana da vértebra, entre a coluna e o anel.

Outro ponto que é assumido é a relação entre as juntas rotativas da primeira e da segunda membrana. θ_1 está acoplado a θ_5 enquanto que o θ_2 está acoplado ao θ_4 . Este acoplamento no modelo é necessário para que exista a curvatura constante assumida no manipulador real. Assumindo-se que não há forças externas atuando na vértebra, e desprezando o efeito da gravidade, pelo equilíbrio estático tem-se que $\theta_1 = \theta_5 + \pi$ e $\theta_2 = \theta_4$. O deslocamento d_3 se deve ao deslocamento das membranas no eixo z, onde não ocorre rotação e, sim, somente a translação. A membrana da base, com os dois primeiros DoF (θ_1 e θ_2), tem como finalidade gerar a direção e o sentido do conjunto coluna, vértebra e anel, enquanto que o d_3 é o atuador referente à compressão ou alongamento da vértebra. Já para θ_4 e θ_5 , que são acoplados a θ_1 e θ_2 , representando a direção e o sentido do anel, que é a base de fixação da próxima vértebra, ou seja, o par final dos DoF são os responsáveis por direcionar as vértebras futuras do manipulador. Como o $\theta_1 = \theta_5 + \pi$ e $\theta_2 = \theta_4$, o modelo pode assumir apenas 3 variáveis: θ_1 , θ_2 e d_3 .

A Tabela 4 apresenta o resultado da notação de D-H aplicado em uma vértebra unitária.

Tabela 3-2 – Parâmetros de Denavit-Hartenberg

Elo	α	A	θ	d	Tipo de Junta
1	$-\pi/2$	0	θ_1	0	Rotativa
2	$\pi/2$	0	$\theta_2 + \pi/2$	Altura da Membrana	Rotativa
3	$-\pi/2$	0	0	$d_3 +$ Altura da Coluna	Prismática
4	$-\pi/2$	0	$\theta_4 + \pi/2$	0	Rotativa
5	0	Altura do Anel	$\theta_5 + \pi$	0	Rotativa

Com os parâmetros da notação de D-H definidos, pode-se utilizar a Eq. 3.21 para se determinarem os valores da transformação homogênea, isto é, da matriz A da base para a extremidade.

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & -\sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$A_2^0 = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_1).\sin(\theta_2) & -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1).\cos(\theta_2) & -h_m.\sin(\theta_1) \\ -\sin(\theta_1).\sin(\theta_2) & \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1).\cos(\theta_2) & h_m.\cos(\theta_1) \\ -\cos(\theta_2) & 0 & -\sin(\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$A_3^0 = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_1).\sin(\theta_2) & \cos(\theta_1).\cos(\theta_2) & -\sin(\theta_1) & \dots \\ -\sin(\theta_1).\sin(\theta_2) & \sin(\theta_1).\cos(\theta_2) & -\cos(\theta_1) & \dots \\ -\cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \\ \cos(\theta_1).\sin(\theta_2 + \pi/2)(d_3 + h_c) - h_m.\sin(\theta_1) \\ h_m.\cos(\theta_1) + \sin(\theta_1).\sin(\theta_2 + \pi/2)(d_3 + h_c) \\ -\sin(\theta_2).(d_3 + h_c) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$A_4^0 = \begin{bmatrix} -\cos(\theta_1).\cos(\theta_2 - \theta_4) & -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1).\sin(\theta_2 - \theta_4) & \dots \\ \sin(\theta_1).\cos(\theta_2 - \theta_4) & \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1).\sin(\theta_2 - \theta_4) & \dots \\ -\sin(\theta_2 - \theta_4) & 0 & \cos(\theta_2 - \theta_4) & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots \\ \cos(\theta_1).\sin(\theta_2 + \pi/2)(d_3 + h_c) - h_m.\sin(\theta_1) \\ h_m.\cos(\theta_1) + \sin(\theta_1).\sin(\theta_2 + \pi/2)(d_3 + h_c) \\ -\sin(\theta_2).(d_3 + h_c) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$A_5^0 = \begin{bmatrix} s_1 \cdot s_5 - c_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot c_5 - c_1 \cdot s_2 \cdot s_4 \cdot c_5 & s_1 \cdot c_5 + c_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot s_5 + c_1 \cdot s_2 \cdot s_4 \cdot s_5 & c_1 \cdot s_{2-4} & \cdots \\ -c_1 \cdot s_5 - s_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot c_5 - s_1 \cdot s_2 \cdot s_4 \cdot c_5 & s_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot s_5 - c_1 \cdot c_5 + s_1 \cdot s_2 \cdot s_4 \cdot s_5 & s_1 \cdot s_{2-4} & \cdots \\ s_{2-4} \cdot c_5 & -s_{2-4} \cdot s_5 & c_{2-4} \cdot c_4 & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\left[\begin{array}{l} d_3 \cdot c_1 \cdot c_2 - h_m \cdot s_1 + h_c \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot c_5 + h_a \cdot (s_1 \cdot s_5 - c_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot c_5 - c_1 \cdot s_2 \cdot s_4 \cdot c_5) \\ d_3 \cdot s_1 \cdot c_2 - h_m \cdot c_1 + h_c \cdot s_1 \cdot c_2 - h_a \cdot (c_1 \cdot s_5 + s_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot c_5 + s_1 \cdot s_2 \cdot s_4 \cdot c_5) \\ (d_3 + h_c) \cdot c_{2+\pi/2} + h_a \cdot s_{2-4} \cdot c_5 \\ 1 \end{array} \right]$$

onde:

- h_m é a altura da membrana;
- h_c é a altura da coluna;
- h_a é a altura do anel;
- s_1, s_2, s_4, s_5 são $\sin(\theta_1), \sin(\theta_2), \sin(\theta_4)$ e $\sin(\theta_5)$, respectivamente;
- c_1, c_2, c_4, c_5 são $\cos(\theta_1), \cos(\theta_2), \cos(\theta_4)$ e $\cos(\theta_5)$, respectivamente;
- d_3 é o deslocamento da junta 3;
- s_{2-4} é $\sin(\theta_2 - \theta_4)$;
- c_{2-4} é $\cos(\theta_2 - \theta_4)$;
- $c_{2+\pi/2}$ é $\cos(\theta_2 + \pi/2) = -\sin(\theta_2) = -s_2$.

As direções de cada junta da vértebra são dadas pelo vetor unitário b_i , obtido da terceira coluna das matrizes A_i^0 , ou seja, para as juntas:

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} n_i & t_i & b_i & X_e \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \quad (3.27)$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} -s_1 \\ c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow b_2 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 \\ s_1 c_2 \\ -s_2 \end{bmatrix} \Rightarrow b_3 = \begin{bmatrix} -s_1 \\ -c_1 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow b_4 = \begin{bmatrix} c_1 s_{2-4} \\ s_1 s_{2-4} \\ c_{2-4} \end{bmatrix} \Rightarrow b_5 = \begin{bmatrix} c_1 s_{2-4} \\ s_1 s_{2-4} \\ c_{2-4} c_4 \end{bmatrix}$$

Substituindo os valores do protótipo desenvolvido, chega-se à coordenada da extremidade de uma vértebra, Eq. 3.28, sendo $h_m = 0,254\text{mm}$, $h_c = 25,40\text{mm}$ e, $h_a = 12,67\text{mm}$, conforme definido anteriormente na seção 2.1.

$$X_e = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \Rightarrow \quad (3.28)$$

$$\begin{bmatrix} d_3 \cdot c_1 \cdot c_2 - h_m \cdot s_1 + h_c \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot c_5 + h_a \cdot (s_1 \cdot s_5 - c_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot c_5 - c_1 \cdot s_2 \cdot s_4 \cdot c_5) \\ d_3 \cdot s_1 \cdot c_2 - h_m \cdot c_1 + h_c \cdot s_1 \cdot c_2 - h_a \cdot (c_1 \cdot s_5 + s_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot c_5 + s_1 \cdot s_2 \cdot s_4 \cdot c_5) \\ (d_3 + h_c) \cdot c_{2+\pi/2} + h_a \cdot s_{2-4} c_5 \end{bmatrix} \Rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} d_3 \cdot c_1 \cdot c_2 - 2,54 \cdot 10^{-4} \cdot s_1 + 2,54 \cdot 10^{-2} \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot c_5 + 1,267 \cdot 10^{-2} \cdot (s_1 \cdot s_5 - c_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot c_5 - c_1 \cdot s_2 \cdot s_4 \cdot c_5) \\ d_3 \cdot s_1 \cdot c_2 - 2,54 \cdot 10^{-4} \cdot c_1 + 2,54 \cdot 10^{-2} \cdot s_1 \cdot c_2 - 1,267 \cdot 10^{-2} \cdot (c_1 \cdot s_5 + s_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot c_5 + s_1 \cdot s_2 \cdot s_4 \cdot c_5) \\ (d_3 + 2,54 \cdot 10^{-2}) \cdot c_{2+\pi/2} + 1,267 \cdot 10^{-2} \cdot s_{2-4} \cdot c_5 \end{bmatrix}$$

Assumindo as dimensões citadas, encontra-se a matriz Jacobiana J para uma vértebra:

$$J = \begin{bmatrix} J_L \\ J_A \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

onde as sub - matrizes de translação J_L e de rotação J_A são :

$$J_L = \begin{bmatrix} \frac{\delta x}{\delta \theta_1} & \frac{\delta x}{\delta \theta_2} & \frac{\delta x}{\delta d_3} & \frac{\delta x}{\delta \theta_4} & \frac{\delta x}{\delta \theta_5} \\ \frac{\delta y}{\delta \theta_1} & \frac{\delta y}{\delta \theta_2} & \frac{\delta y}{\delta d_3} & \frac{\delta y}{\delta \theta_4} & \frac{\delta y}{\delta \theta_5} \\ \frac{\delta z}{\delta \theta_1} & \frac{\delta z}{\delta \theta_2} & \frac{\delta z}{\delta d_3} & \frac{\delta z}{\delta \theta_4} & \frac{\delta z}{\delta \theta_5} \end{bmatrix} \quad J_A = [b_1 \quad b_2 \quad b_3 \quad b_4 \quad b_5]$$

$$\begin{aligned}
J_L = & \\
& \left[\begin{array}{ccc}
h_a^*(s_1 \cdot s_2 \cdot s_4 \cdot c_5 - c_1 \cdot s_5 - s_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot c_5) - d_3 \cdot s_1 c_2 - h_c \cdot s_1 c_2 - h_m \cdot c_1 & \cdots & \\
h_a^*(c_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot c_5 - s_1 \cdot s_5 - c_1 \cdot s_2 \cdot s_4 \cdot c_5) + d_3 \cdot c_1 c_2 + h_c \cdot c_1 c_2 - h_m \cdot s_1 & \cdots & \\
0 & \cdots & \\
\cdots & -h_a \cdot (c_1 \cdot c_2 \cdot s_4 \cdot c_5 + c_1 \cdot s_2 \cdot c_4 \cdot c_5) - d_3 \cdot c_1 \cdot s_2 - h_c \cdot c_1 \cdot s_2 & c_1 \cdot c_2 & \cdots \\
\cdots & -h_a \cdot (s_1 \cdot c_2 \cdot s_4 \cdot c_5 + s_1 \cdot s_2 \cdot c_4 \cdot c_5) - d_3 \cdot s_1 \cdot s_2 - h_c \cdot s_1 \cdot s_2 & s_1 \cdot c_2 & \cdots \\
\cdots & -h_a \cdot (c_{2+4} \cdot c_5) \cdot (d_3 + h_c) \cdot s_{2+\pi/2} & c_{2+\pi/2} & \cdots \\
\cdots & -h_a \cdot (c_1 \cdot c_2 \cdot s_4 \cdot c_5 + c_1 \cdot s_2 \cdot c_4 \cdot c_5) & h_a \cdot (c_1 \cdot s_2 \cdot s_4 \cdot s_5 - c_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot c_5 - s_1 \cdot c_5) & \\
\cdots & -h_a \cdot (s_1 \cdot c_2 \cdot s_4 \cdot c_5 + s_1 \cdot s_2 \cdot c_4 \cdot c_5) & h_a \cdot (c_1 \cdot c_5 - s_1 \cdot c_2 \cdot c_4 \cdot s_5 - s_1 \cdot s_2 \cdot s_4 \cdot s_5) & \\
\cdots & -h_a \cdot (c_{2+4} \cdot c_5) & -h_a \cdot (s_{2+4} \cdot s_5) &
\end{array} \right] \quad (3.30)
\end{aligned}$$

onde h_a é $1,267 \cdot 10^{-2}$ m, h_m é $2,54 \cdot 10^{-4}$ m e o valor de h_c é de $2,54 \cdot 10^{-2}$ m.

$$J_A = \begin{bmatrix} -s_1 & c_1 \cdot c_2 & -s_1 & c_1 \cdot s_{2-4} & c_1 \cdot s_{2-4} \\ c_1 & s_1 \cdot c_2 & -c_1 & s_1 \cdot s_{2-4} & s_1 \cdot s_{2-4} \\ 0 & -s_2 & 0 & c_{2-4} & c_{2-4} c_4 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Os pontos de singularidade da vértebra são calculados quando o determinante de J_L é igual a zero, assim:

$$\begin{aligned}
Det(J_L) = & -(c_1^2 + s_1^2)(c_2^2 + s_2^2)(d_3 + h_c + h_a \cdot c_4 \cdot c_5) \cdot \\
& (d_3 \cdot c_2 + h_c \cdot c_2 + h_a \cdot (c_2 \cdot c_4 \cdot c_5 - s_2 \cdot s_4 \cdot c_5)) = 0 \quad (3.32)
\end{aligned}$$

Para satisfazer a igualdade acima, lembrando que $\theta_2 = \theta_4$ e $\theta_1 = \theta_5 + \pi$, tem-se que:

$$\begin{aligned}
\theta_4 &= \pi/2 \pm \pi \quad \text{e} \quad \theta_5 = \pi/2 \pm \pi \\
d_3 &= -h_c \quad \text{e} \quad \theta_4 = \pi/2 \pm \pi \\
d_3 &= -h_c \quad \text{e} \quad \theta_5 = \pi/2 \pm \pi \\
d_3 + h_c &= h_a \cdot c_4 \cdot c_5
\end{aligned} \quad (3.33)$$

Para calcular o deslocamento do tendão, ao serem inseridos valores na entrada dos servomotores, foi realizada uma análise geométrica para que em seguida fosse implementado em um código através da ferramenta *LabView*. A Fig. 33 ilustra a origem dos vetores e os vetores utilizados para o cálculo. Com base na Fig. 33, é assumida uma base ortonormal, com os vetores (n_0 , t_0 e b_0), relacionada a uma base x , y e z . Pode-se fazer a análise do comprimento do tendão através de cálculos vetoriais, onde o deslocamento resultante do tendão é o resultado da subtração vetorial entre o vetor $r.n_0$ e a soma vetorial entre os vetores $b_{Colu} + r.n_1$. Analogamente a este cálculo, os cálculos de todos os outros tendões podem ser realizados.

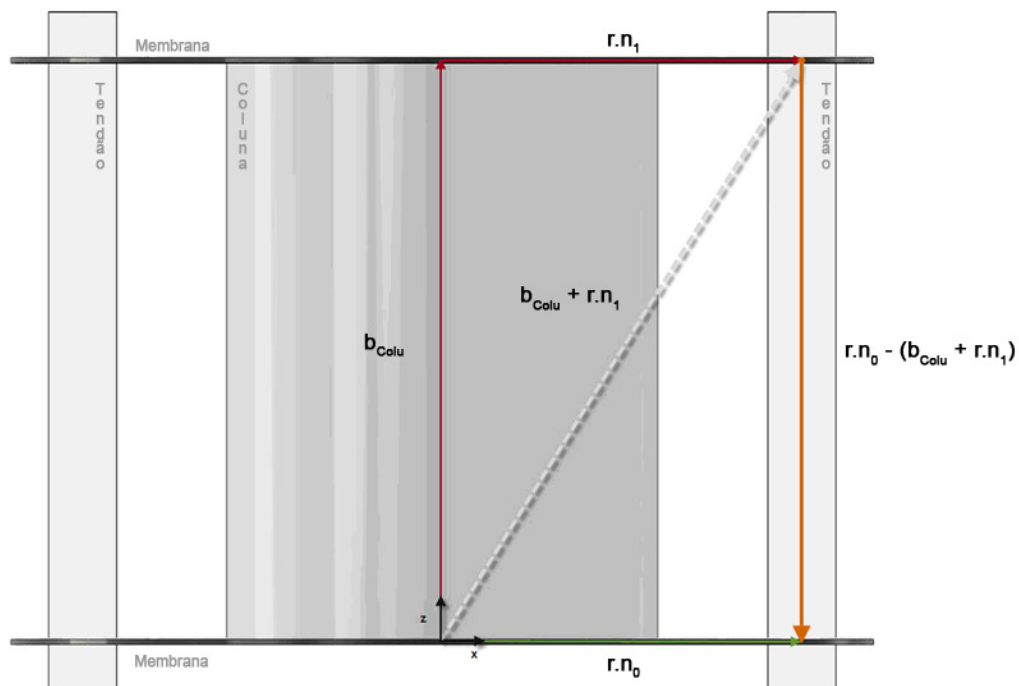


Figura 33 – Vetores

Através do cálculo vetorial, consegue-se chegar ao comprimento total dos tendões na extremidade do manipulador (para cada tendão), somando os deslocamentos calculados para cada vértebra.

O comprimento do tendão para um elo é a soma do comprimento dos tendões de cada vértebra do elo em questão. Como foi assumido que todas as vértebras de um elo possuem os mesmos valores para os DoFs (para que todas as

vértebras de um elo possuam a mesma curvatura), o comprimento total dos tendões de um elo será, o comprimento calculado para uma vértebra, com suas respectivas alterações devido aos valores dos DoFs desejados, multiplicado pelo número de vértebras. Com isso, se a posição final desejada do elo for a posição $[\alpha, \beta, h]^T$, o comprimento dos tendões de uma vértebra pode ser calculado:

$$\frac{[\alpha, \beta, h]^T}{n_{\text{vert}}} \quad (3.34)$$

onde α é o ângulo final do elo na direção do eixo x (θ_1), β é o ângulo final do elo na direção do eixo y (θ_2), h é o deslocamento do manipulador na direção do eixo z (d_3), e n_{vert} é o número de vértebras do elo em questão.

Portanto, o comprimento total individual de cada tendão é dado por:

$$h_{ns} = n_{\text{vert}} c_s \quad (3.35)$$

onde o sub-índice n é o elo analisado, o sub-índice s é o número indicativo do tendão (variando de 1 até 4) atuado, h_{ns} é o comprimento do tendão s do elo n e c_s é o comprimento do tendão s de uma vértebra.

Logo, pode-se calcular o vetor H , que é composto pelas equações encontradas para h_{ns} , contendo os comprimentos de cada tendão por elo:

$$H = [h_1 \quad h_2 \quad h_3]^T \quad (3.36)$$

onde,

$$h_n = [h_{n1} \quad h_{n2} \quad h_{n3} \quad h_{n4}]^T \quad (3.37)$$

com n variando entre 1 e 3, representando o elo analisado.

Também, foi calculado um vetor Q , composto por θ_{ns} e d_{ns} , que indica os DoFs de cada elo, modelado segundo D-H. Para o manipulador em estudo, que possui 3 elos, têm-se que:

$$Q = [\theta_{11} \quad \theta_{12} \quad d_{13} \quad \theta_{21} \quad \theta_{22} \quad d_{23} \quad \theta_{31} \quad \theta_{32} \quad d_{33}]^T \quad (3.38)$$

Para calcular o Jacobiano de uma única vértebra foi utilizada a igualdade:

$$\dot{H} = J \dot{Q} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \dot{h}_3 \\ \dot{h}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{21} & J_{31} \\ J_{12} & J_{22} & J_{32} \\ J_{13} & J_{23} & J_{33} \\ J_{14} & J_{24} & J_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{d}_3 \end{bmatrix} \Rightarrow \quad (3.39)$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial q_1} & \frac{\partial h_1}{\partial q_2} & \frac{\partial h_1}{\partial q_3} \\ \frac{\partial h_2}{\partial q_1} & \frac{\partial h_2}{\partial q_2} & \frac{\partial h_2}{\partial q_3} \\ \frac{\partial h_3}{\partial q_1} & \frac{\partial h_3}{\partial q_2} & \frac{\partial h_3}{\partial q_3} \\ \frac{\partial h_4}{\partial q_1} & \frac{\partial h_4}{\partial q_2} & \frac{\partial h_4}{\partial q_3} \end{bmatrix}$$

onde $h_n = [h_{n1} \quad h_{n2} \quad h_{n3} \quad h_{n4}]^T$ e $q_n = [\theta_{n1} \quad \theta_{n2} \quad d_{n3}]^T$

Dessa forma, foi calculado o Jacobiano, relacionando os deslocamentos dos tendões e os DoFs para uma única vértebra, onde:

$$J_{1,1} = 0; \quad (3.40)$$

$$\begin{aligned} J_{1,2} = & 2/(4.h_m.(h_m + h_a + h_c + d_3) + d_3.(d_3 + 2.(h_c + h_a)) + h_c.(h_c + 2.h_a) + h_a^2 - \dots \\ & \dots 4.r^2.c_2^2.(1 - c_1^2) - 4.r.s_1.c_2.(h_a + h_c + d_3 + 2.h_m))^{1/2}.(-4).r.c_1.c_2.(h_a + h_c + d_3 + \dots \\ & \dots 2.h_m - 2.r.s_1.c_2); \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$J_{1,3} = 0; \quad (3.42)$$

$$\begin{aligned} J_{1,4} = & 2/(4.h_m.(h_m + h_a + h_c + d_3) + d_3.(d_3 + 2.(h_c + h_a)) + h_c.(h_c + 2.h_a) + h_a^2 + \dots \\ & \dots 4.r^2.c_2^2.(1 - c_1^2) + 4.r.s_1.c_2.(h_a + h_c + d_3 + 2.h_m))^{1/2}.(4.r.c_1.c_2.(h_a + h_c + d_3 + \dots \\ & \dots 2.h_m + 2.r.s_1.c_2)); \end{aligned} \quad (3.43)$$

$$\begin{aligned}
J_{2,1} = & 2/(4.h_m.(h_m + h_a + h_c + d_3) + d_3.(d_3 + 2.(h_c + h_a)) + h_c.(h_c + 2.h_a) + h_a^2 + \dots \\
& \dots 4.r^2.(1 - c_2^2) - 4.r.s_2.(h_a + h_c + d_3 + 2.h_m))^{\frac{1}{2}}.4.r.c_2.(h_a + h_c + d_3 + \dots \\
& \dots 2.h_m + 2.r.s_2); \tag{3.44}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{2,2} = & 2/(4.h_m.(h_m + h_a + h_c + d_3) + d_3.(d_3 + 2.(h_c + h_a)) + h_c.(h_c + 2.h_a) + h_a^2 + \dots \\
& \dots 4.r^2.c_2^2.(1 - c_1^2) - 4.r.s_1.c_2.(h_a + h_c + d_3 + 2.h_m))^{\frac{1}{2}}.(8.r^2.c_2.s_2.(c_1^2 - 1) + \dots \\
& \dots 4.r.s_1.s_2.(h_a + h_c + d_3 + 2.h_m)); \tag{3.45}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{2,3} = & 2/(4.h_m.(h_m + h_a + h_c + d_3) + d_3.(d_3 + 2.(h_c + h_a)) + h_c.(h_c + 2.h_a) + h_a^2 + \dots \\
& \dots 4.r^2.(1 - c_2^2) - 4.r.s_2.(h_a + h_c + d_3 + 2.h_m))^{\frac{1}{2}}.(-4.r.c_2.(h_a + h_c + d_3 + 2.h_m - \dots \\
& \dots 2.r.s_2)); \tag{3.46}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{2,4} = & 2/(4.h_m.(h_m + h_a + h_c + d_3) + d_3.(d_3 + 2.(h_c + h_a)) + h_c.(h_c + 2.h_a) + h_a^2 + \dots \\
& \dots 4.r^2.c_2^2.(1 - c_1^2) + 4.r.s_1.c_2.(h_a + h_c + d_3 + 2.h_m))^{\frac{1}{2}}.(-4.r.s_1.s_2.(h_a + h_c + d_3 + \dots \\
& \dots + 2.h_m - 2.r.s_2) + 8.r^2.s_2.c_2.(c_1^2 - 1)); \tag{3.47}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{3,1} = & 2/(4.h_m.(h_m + h_a + h_c + d_3) + d_3.(d_3 + 2.(h_c + h_a)) + h_c.(h_c + 2.h_a) + h_a^2 + \dots \\
& \dots 4.r^2.(1 - c_2^2) - 4.r.s_2.(h_a + h_c + d_3 + 2.h_m))^{\frac{1}{2}}.2.(h_a + h_c + d_3 + 2.(h_m + r.s_2)); \tag{3.48}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{3,2} = & 2/(4.h_m.(h_m + h_a + h_c + d_3) + d_3.(d_3 + 2.(h_c + h_a)) + h_c.(h_c + 2.h_a) + h_a^2 + \dots \\
& \dots 4.r^2.c_2^2.(1 - c_1^2) - 4.r.s_1.c_2.(h_a + h_c + d_3 + 2.h_m))^{\frac{1}{2}}.2.(h_a + h_c + d_3 + 2.(h_m - \dots \\
& \dots r.s_1.c_2)); \tag{3.49}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{3,3} = & 2/(4.h_m.(h_m + h_a + h_c + d_3) + d_3.(d_3 + 2.(h_c + h_a)) + h_c.(h_c + 2.h_a) + h_a^2 + \dots \\
& \dots 4.r^2.(1 - c_2^2) - 4.r.s_2.(h_a + h_c + d_3 + 2.h_m))^{\frac{1}{2}}.2.(h_a + h_c + d_3 + 2.(h_m - r.s_2)); \tag{3.50}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
J_{3,4} = & 2/(4.h_m.(h_m + h_a + h_c + d_3) + d_3.(d_3 + 2.(h_c + h_a)) + h_c.(h_c + 2.h_a) + h_a^2 + \dots \\
& \dots 4.r^2.c_2^2(1 - c_1^2) + 4.r.s_1.c_2.(h_a + h_c + d_3 + 2.h_m))^{1/2}.2.(h_a + h_c + d_3 + 2.(h_m + \dots \\
& \dots r.s_1.c_2)).
\end{aligned} \tag{3.51}$$

Com $J = \frac{\partial h_i}{\partial q_j}$, onde i varia de 1 até 4 (indicando o tendão) e j , de 1 até 3

(indicando o DoF), sabe-se que para valores onde $j > i$, as derivadas ∂h_i e ∂q_j , são nulas, pois o modelo adotado leva em consideração apenas a geometria do problema. Assim, tem-se que, o comprimento dos tendões depende dos valores desejados para cada um dos DoFs dos elos.

Os tendões que acionam os elos estão fixados em motores na base, portanto, o comprimento de um tendão com terminação no segundo elo, será o comprimento necessário para atuá-lo da maneira desejada somado ao comprimento do tendão, correspondente, no primeiro elo. Ou seja, para se atuar o elo intermediário, os tendões do elo base também devem ser atuados, e conseqüentemente, o mesmo ocorre para o terceiro elo. Para se chegar ao comprimento total final dos tendões somam-se os comprimentos dos tendões correspondentes aos elos atuados.

Portanto, o Jacobiano para o manipulador completo pode ser encontrado:

$$\begin{aligned}
J_T = \frac{dH}{dQ} = & \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial q_1} & 0 & 0 \\ \frac{\partial h_2}{\partial q_1} & \frac{\partial h_2}{\partial q_2} & 0 \\ \frac{\partial h_3}{\partial q_1} & \frac{\partial h_3}{\partial q_2} & \frac{\partial h_3}{\partial d_3} \end{bmatrix} = \\
& \begin{bmatrix} f(\theta_{11}, \theta_{12}, d_{13}) & 0 & 0 \\ f(\theta_{11}, \theta_{12}, d_{13}) & f(\theta_{21}, \theta_{22}, d_{23}) & 0 \\ f(\theta_{11}, \theta_{12}, d_{13}) & f(\theta_{21}, \theta_{22}, d_{23}) & f(\theta_{31}, \theta_{32}, d_{33}) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.52}$$

onde, assumindo $l = [l_1 \quad l_2 \quad l_3 \quad l_4]^T$ (com l_i sendo o comprimento do tendão i), tem-se que:

$$f(\theta_1, \theta_2, d_3) = \frac{\partial l}{\partial q_n} = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_1}{\partial q_{n1}} & \frac{\partial l_1}{\partial q_{n2}} & \frac{\partial l_1}{\partial q_{n3}} \\ \frac{\partial l_2}{\partial q_{n1}} & \frac{\partial l_2}{\partial q_{n2}} & \frac{\partial l_2}{\partial q_{n3}} \\ \frac{\partial l_3}{\partial q_{n1}} & \frac{\partial l_3}{\partial q_{n2}} & \frac{\partial l_3}{\partial q_{n3}} \\ \frac{\partial l_4}{\partial q_{n1}} & \frac{\partial l_4}{\partial q_{n2}} & \frac{\partial l_4}{\partial q_{n3}} \\ \frac{\partial q_{n1}}{\partial q_{n1}} & \frac{\partial q_{n2}}{\partial q_{n2}} & \frac{\partial q_{n3}}{\partial q_{n3}} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Resumidamente, o que as Eqs. 35-41 demonstram é que, como foi realizada uma análise estática do manipulador, os elos são assumidos como independentes. Ou seja, ao atuar o último elo, somente este elo receberá os valores dos DoFs desejados. Entretanto, ao atuar o elo intermediário, tanto o elo intermediário quanto o último elo receberão os valores desejados e, analogamente, para o elo base, onde ao atuar o elo base, todos os elos seguintes receberão os valores entrados para o elo desejado. Isto ocorre pois ao se atuar os tendões de um elo, os tendões dos elos seguintes também devem ser atuados, para que se evitem folgas ou tensionamentos indesejados. Por este motivo, a matriz J_T possui termos nulos. Pode-se perceber que as colunas se referem às atuações dos elos onde, o primeiro elo influencia em todos os elos seguintes, assim como, o segundo elo (que influencia no elo 3), enquanto que o terceiro elo só atua nele mesmo.

Após os cálculos cinemáticos terem sido realizados, foi iniciada a fase de construção e montagem do manipulador. O Capítulo 4 explica os detalhes desta etapa.

4. Construção e Montagem

Após a modelagem teórica desenvolvida, iniciou-se a fase de construção e montagem.

4.1. Características dos Materiais

Alguns critérios foram seguidos para a escolha dos materiais. Conforme já citado, a concepção deste manipulador é para utilização geral. Porém o foco deste trabalho é o desenvolvimento para aplicações em ENDS no setor energético de óleo, gás e derivados. Desta forma, os componentes não podem ser emissores de faíscas e calor para que sua utilização não seja limitada em locais com combustíveis em geral. Outra característica que o manipulador possui é a possibilidade de trabalhar submerso em combustível, água ou outras substâncias na fase líquida, estando apto a trabalhar com temperaturas de até 80°C conforme as características dos materiais utilizados (Anexo II).

Outro ponto importante é a minimização do atrito. Os tendões são revestidos com uma camada de FEP que, em contato com o *nylon 6* consegue realizar uma movimentação com baixa geração de atrito. Dessa forma, ocorre a redução das forças paralelas à movimentação do cabo e, conseqüentemente, exigindo menos torque dos servomotores.

O servomotor utilizado consegue gerar forças de aproximadamente 162kgf, o que é suficiente para realizar deformações no protótipo deste manipulador.

Por se tratar de um sistema remoto, os servomotores podem estar situados a uma distância segura da extremidade do manipulador, tanto para o operador quanto para o funcionamento de uma inspeção, por exemplo.

Na aplicação em tanques, os servomotores não entrariam em contato direto com o combustível. O contato do manipulador com o combustível será necessário, nesse caso, e por este motivo, as colunas e os anéis foram idealizados com *delrin* e

nylon. Ambos possuem boa estabilidade química e são largamente utilizados em contato com combustíveis de veículos em geral, tais como automóveis e aviões. Outra característica importante para o manipulador é que estes materiais possuem baixa taxa de absorção de água, o que evita sobrepeso no manipulador, bem como desperdício e retirada indesejada do combustível de dentro de um reservatório, por exemplo.

A escolha dos materiais leva em conta o peso do sistema. A estrutura do manipulador possui massa de 0,177kg, enquanto que a base possui 0,256kg e a placa de suporte incluindo os motores, polias e suportes para motores, 0,535kg. Logo, o peso total do manipulador (sem os tendões) é de, aproximadamente, 0,968kg. Este peso final demonstra que ele é relativamente leve ao se comparar com um manipulador com características similares, atuado por sistemas pneumáticos ou hidráulicos.

Outra característica pré-definida é que não há necessidade de uma estrutura adicional para servir como guia, dar sustentação ou mesmo aumentar a fluabilidade do manipulador. Não há necessidade de auxílio para a fluabilidade pela baixa relação entre o peso do manipulador e a potência dos servomotores. O manipulador não necessita de sustentação adicional por ser atuado por tendões pré-tensionados.

Como todo o sistema possui relativa proteção ao contato com combustível, ele pode ficar imerso sem a necessidade de uma proteção externa (luva) para os componentes. De qualquer maneira, é interessante a realização de manutenção pós-utilização, com uma lavagem do manipulador com o intuito de retirar excessos de combustível e evitar deterioração dos materiais. Além disso, a longo prazo, é necessário uma manutenção completa do sistema para verificação de alterações nos materiais.

A furação central de todas as partes do manipulador foi desenvolvida para a inserção de cabeamento de novos componentes. Vale ressaltar que, com a inserção de um cabo no sistema, este deve apresentar características similares às do manipulador. Ou seja, deve possuir proteção contra o contato com combustível, poder trabalhar em temperaturas de até 80°C, bem como ser flexível para poder trabalhar juntamente com as deformações existentes, durante uma tarefa, na estrutura do manipulador. Um exemplo de uma possível utilização do furo central

é a inserção de uma mangueira de vácuo. Esta mangueira pode servir para coleta de material para análises, realizar limpeza do local inspecionado ou mesmo fazer a captura de algum material indesejado no local, tal como uma ferramenta ou acessório que tenha se desprendido.

A base do manipulador e o suporte foram feitos em alumínio 2024 pelas suas características de fácil usinabilidade e baixa densidade. Estas peças não são previstas para estar em contato direto com combustível, portanto suas restrições se limitam a não gerar faíscas, calor excessivo, e sustentação do manipulador.

O Anexo II apresenta as propriedades dos materiais utilizados na concepção do manipulador.

4.2. Construção e Montagem

Toda a usinagem do manipulador foi realizada seguindo os desenhos técnicos desenvolvidos (Anexo I).

A furação de todos os componentes precisou ter alta precisão, por serem diversos furos de tamanhos reduzidos (1,5mm, 2mm e 2,5mm). A membrana é uma peça considerada como crucial, pois é a peça que mais sofre deformações, além de possuir diâmetros de furos pequenos e a necessidade de gerar deformações com boa repetibilidade. Por este motivo, ficou decidido realizar a furação e corte da membrana por corte a laser.

As membranas são de aço 304, que possui módulo elevado de elasticidade, o que dificulta sua deformação. Para solucionar este problema, foi desenvolvido um sistema para criar um leve corrugado na membrana. Com o acoplamento de duas arruelas, com algumas furações idênticas às da membrana, conseguiu-se fixar a membrana. Com o auxílio de um parafuso de tamanho M10 x 30mm, juntamente com uma arruela de diâmetro externo de 22mm, foi aplicada uma força de, aproximadamente 140kgf, através de uma prensa. O desenho do sistema esta representado na Figura 34, enquanto que, na Figura 35, é apresentada a foto da membrana normal e da membrana corrugada.

Com o intuito de aproveitar melhor a flexibilidade do sistema, a parte da membrana que possui o corrugado elevado está sempre colocada na direção e sentido da próxima peça a ser encaixada.

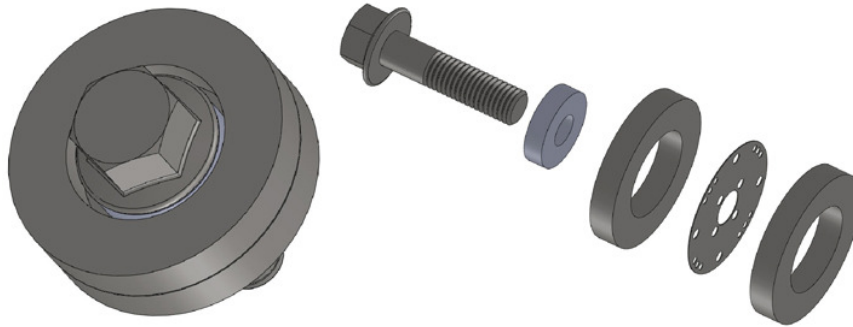


Figura 34 – Montagem do Sistema para Gerar a Seção Corrugada

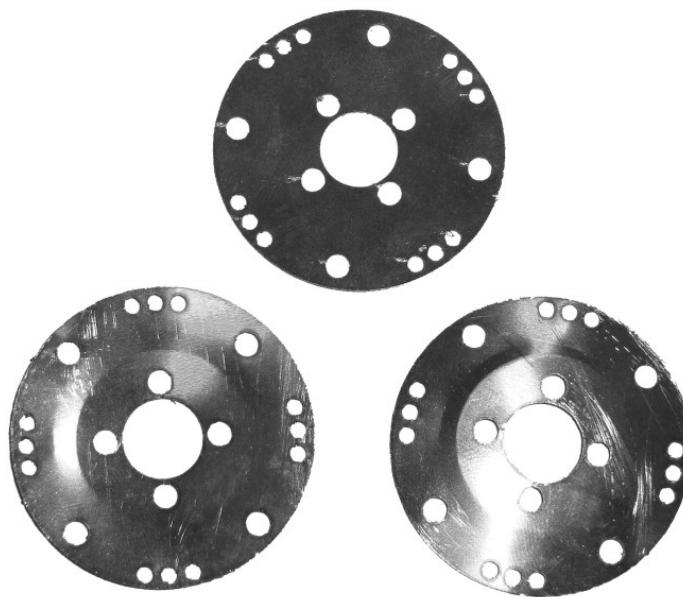


Figura 35 – Membrana Normal (topo) x Corrugada (inferiores)

Para o restante dos cortes e furações mais críticas, nos anéis e nas colunas, foi desenvolvido um código para utilização na fresadora *Sherline* para realização da tarefa (Anexo IV). As Figuras 36 e 37 apresentam fotos dos anéis e das colunas antes e depois da usinagem.

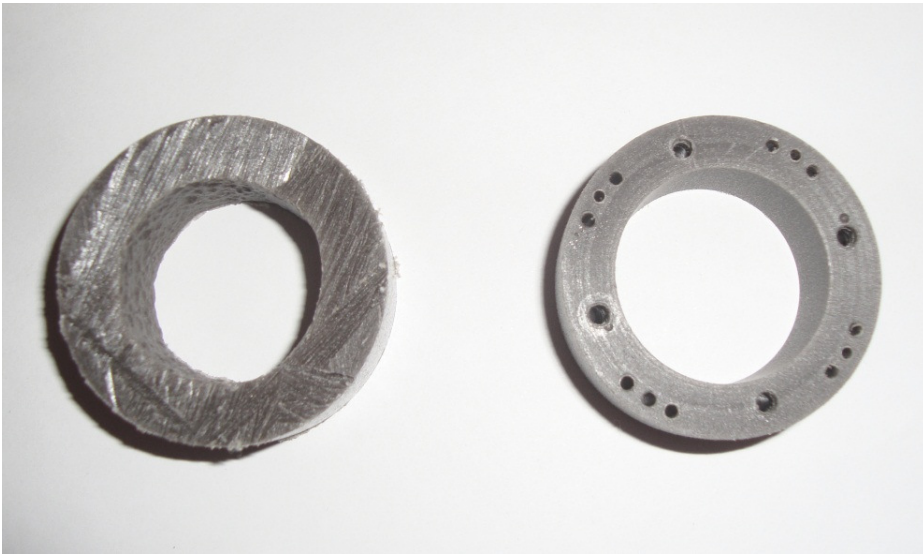


Figura 36 – Anel Antes e Depois da Usinagem



Figura 37 – Coluna Antes e Depois da Usinagem

Com o conjunto já descrito no Capítulo 2 (membrana + coluna + membrana + anel), é formada cada vértebra, Figura 38.



Figura 38 – Vértebra Montada

Os tendões foram fixados no final de cada elo e, também, na polia, através da utilização de batentes de fixação (*stop sleeves*). O cabo foi inserido dentro do batente que sofreu uma deformação de forma a pressionar o cabo, não o deixando deslizar, conforme o detalhe apresentado na Figura 39.

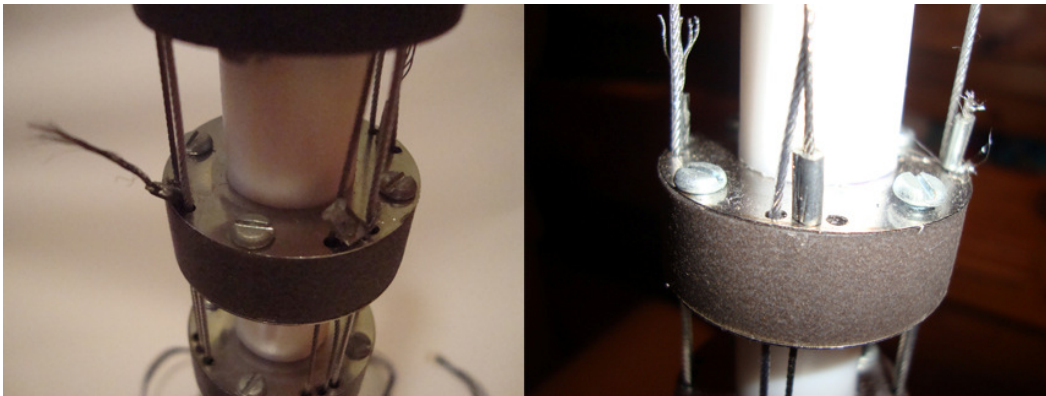


Figura 39 – Detalhe da Terminação dos Tendões

A fixação dos motores da placa base foi realizada inserindo o conjunto, base do motor, motor e polia, com o tendão já fixado na polia. A placa base também suporta a base do manipulador, que é fixada através de parafusos. A Figura 40 ilustra a placa base já com os motores e a base do manipulador inseridos.



Figura 40 – Placa Base, Servos, Polias e Tendões

O manipulador completo, montado em sua configuração final, é apresentado na Figura 41.



Figura 41 - Manipulador Completo

Cada servomotor possui duas entradas/saídas para um plugue padrão da empresa Molex com código 00550375033 com três terminais, onde dois são para alimentação e um para transferência de dados. A Figura 42 apresenta a forma de colocação dos conectores.

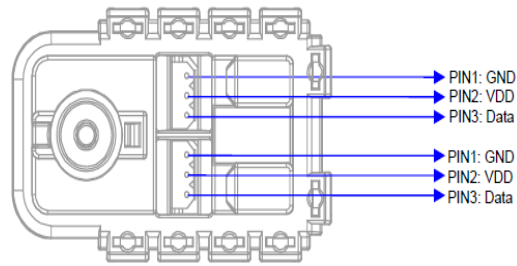


Figura 42 – Fiação do Servomotor

Tanto na Figura 40, quanto na 41, é possível visualizar a fiação de ligação dos motores. Pode-se perceber que os servomotores trabalham em série. Assim, todos os servomotores estão interligados através de cabos idênticos, sendo que no primeiro motor a entrada está ligada ao acessório USB2Dynamixel, e o último motor tem uma de suas entradas ligada a uma fonte de alimentação. Medindo a voltagem nos servomotores, é notada uma perda de aproximadamente 5% entre o primeiro servomotor alimentado e o último. O USB2Dynamixel é então ligado a um computador para que se possa realizar a comunicação, conforme ilustra a Figura 43.

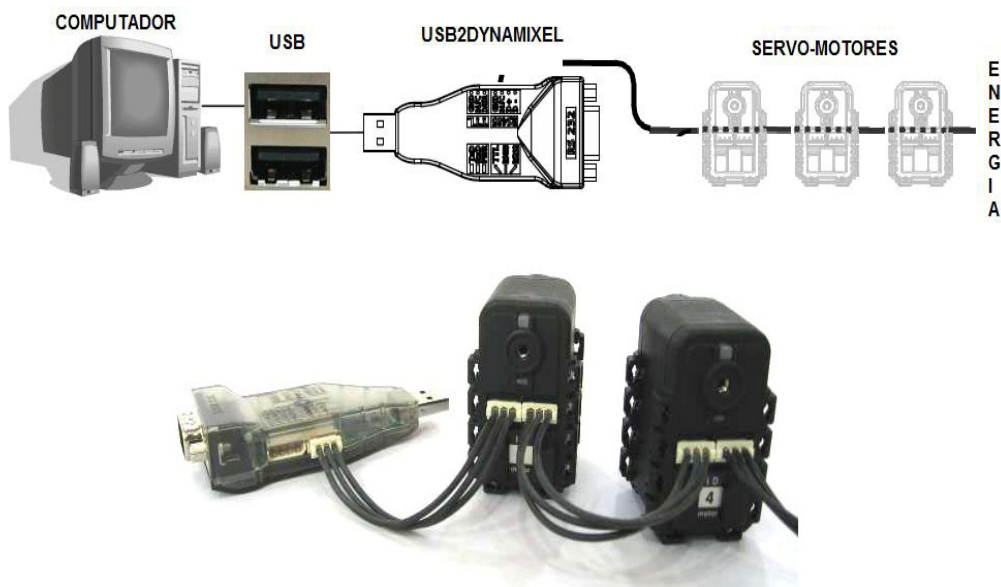


Figura 43 – Conexão Servomotores e Computador

O USB2Dynamixel possui algumas características interessantes. Ele pode trabalhar como um conversor USB2RS232 ou USB2RS485 ou USB2TTL. Assim, é possível realizar uma programação de controle dos servomotores através do *software LabView*, utilizando o protocolo de comunicação dos servomotores. O protocolo de comunicação dos servos é *half-duplex* bidirecional, ou seja, ambos os lados da conexão podem transmitir e receber dados, porém não simultaneamente. Ele trabalha com dois tipos de pacotes de dados: Instrução e Status. O pacote Instrução é enviado do PC (via USB2Dynamixel para o sistema utilizado neste trabalho) para os servomotores, enquanto que o pacote Status faz o sentido inverso, dos atuadores para o PC. O protocolo trabalha com 8 bits e 1 bit de parada. A comunicação é serial, e cada atuador possui um número de identificação (ID). Em casos onde as IDs possuam o mesmo valor, é gerado um erro de comunicação no envio dos pacotes, conforme ilustra a Figura 44.

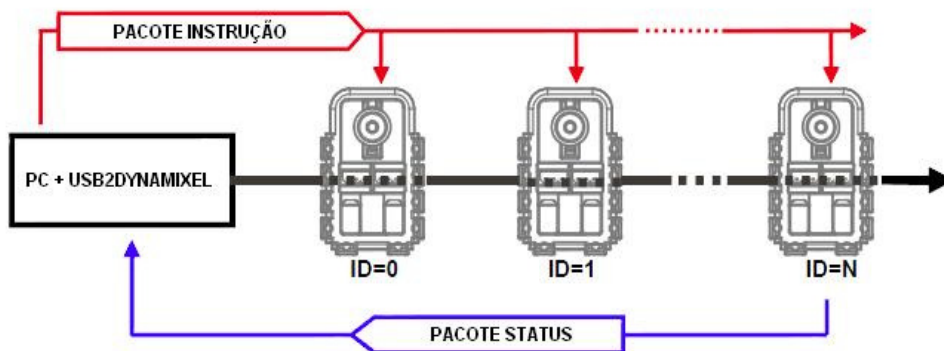


Figura 44 – Comunicação Servos ↔ Controlador

O pacote Instrução é o pacote de envio de comandos para os atuadores. Ele possui a seguinte estrutura:

0xFF	0xFF	ID	COMPRIMENTO	INSTRUÇÃO	PARAMETRO_1	...	PARAMETRO_N	CHECK SUM
------	------	----	-------------	-----------	-------------	-----	-------------	-----------

onde, 0xFF 0xFF corresponde ao início da instrução, ID é o número de identificação do servo; COMPRIMENTO é o tamanho da instrução; INSTRUÇÃO é a instrução a ser executada; PARAMETRO_1..._N são os

possíveis parâmetros para a instrução inserida, e o CHECK SUM é o bit da soma de verificação da comunicação, usado para verificar a integridade de dados transmitidos.

Já o pacote Status é o pacote de envio de comandos dos atuadores para o processamento. Ele possui a seguinte estrutura:

0XFF	0XFF	ID	COMPRIMENTO	ERRO	PARAMETRO_1	...	PARAMENTRO_N	CHECK SUM
------	------	----	-------------	------	-------------	-----	--------------	-----------

onde todos os itens possuem as mesmas características do pacote Instrução, porém, neste caso, no lugar da instrução ele comunica um ERRO. Este byte representa algum erro ocorrido seja, na transmissão/recepção ou algum erro pré-definido no próprio servomotor. A Tabela 5 apresenta os possíveis erros e seus significados.

Tabela 4-1 – Erros no Pacote Status

Bit	Nome	Descrição
7	0	
6	Erro de Instrução	1 se for enviado uma instrução desconhecida.
5	Erro de Carga	1 se o torque máximo não puder alcançar a carga aplicada.
4	Erro de CHECK SUM	1 se houver erro na soma da verificação.
3	Erro de Distância	1 se a instrução enviada percorrer mais do que o limite.
2	Erro de Temperatura	1 se a temperatura interna do atuador for maior que o limite.
1	Erro de Ângulo Limite	1 se a posição desejada estiver fora do alcance dos limites dos ângulos (horário ou anti-horário).
0	Erro de Voltagem	1 se a voltagem for superior ou inferior aos limites pré-definidos.

Os códigos de instrução podem ser encontrados no Anexo V, retirado do manual do servomotor AX-12+.

Com a possibilidade de utilização do software *LabView*, através da placa USB2Dynamixel, foram desenvolvidas funções para utilização na programação. Ao total foram desenvolvidas 23 funções específicas para a comunicação entre o programa e os servomotores. Os cabeçalhos delas podem ser visualizados no Anexo VI. As funções geradas atendem todos os códigos de instruções do Anexo V, sendo que algumas dessas funções merecem uma atenção especial por sua funcionalidade. A função denominada “dxl initialize” é responsável pela inicialização do código. Ela possibilita a verificação da conexão entre o código e os servomotores. Ela retorna um inteiro indicando se houve erro na inicialização ou não. De forma similar a “dxl terminate” é responsável pela correta finalização do programa. A “dxl write word” é uma função que foi criada com o intuito de escrever as instruções na memória dos servomotores, seja na EEPROM ou na RAM. Esta função recebe como dados a identificação do servo e as instruções a serem executadas com seus respectivos parâmetros. A “dxl read word” é capaz de realizar a leitura dos dados vindos dos servos para o código. Esta função retorna um inteiro indicando o recebimento dos dados do pacote Status. As entradas são referentes ao ID do servo e às instruções passadas. Já a função “dxl set baud” define qual a taxa de transmissão na comunicação. As entradas dessa função são relativas às entradas e taxas apresentadas na Tabela 6.

Tabela 4-2 – Taxas de Transmissão

Endereço	Hex	Velocidade (BPS)
1	0X01	1000000.0
3	0X03	500000.0
4	0X04	400000.0
7	0X07	250000.0
9	0X09	200000.0
16	0X10	117647.1
34	0X22	57142.9
103	0X67	19230.8
207	0XCF	9615.4

Após a conexão do sistema mecânico descrito anteriormente ao PC, é possível controlar as posições do manipulador. O próximo capítulo apresenta os experimentos e resultados obtidos.

5. Experimentos e Resultados

Inicialmente, utilizando a sequência de montagem dos servomotores na placa base, foi criada uma tabela fazendo a relação entre os servomotores e os elos que cada um aciona. Após esta relação criada, foi criado um programa para a realização da calibração dos tendões, com a finalidade de deixá-los pré-tensionados. Como a fixação dos tendões foi realizada de forma desigual, a variação angular para o pré-tensionamento dos tendões é individual e singular, conforme ilustra a Tabela 7. Isto significa que a montagem dos tendões nas polias dos servos não precisa ser feita com alta acurácia, uma vez que o sistema será calibrado. A escolha das IDs dos servos utilizados pode ser aleatória pois é possível determinar a configuração das IDs através do *software* e por este motivo, as IDs contidas na Tabela 7 não seguem uma sequência lógica definida.

Tabela 5-1 – Pré-tensionamento dos Tendões

Servo ID	Elo ID	Grau (°)	Rotação (0-1023)
1	3	58	400
2	2	41	630
4	1	64	320
8	3	44	400
9	2	63	315
10	1	67	330
11	3	58	590
12	2	60	305
13	1	58	300
14	3	88	530
17	2	66	470
18	1	64	320

A escolha dos valores de tensionamento foi baseada no posicionamento dos três elos na vertical, de forma que eles atingissem uma rigidez final desejada, suficiente para que o sistema pudesse ser disposto na vertical sem possibilidade de flambagem. Já para a velocidade de movimentação dos servomotores, foi criada uma opção de controle de trajetórias a taxas ajustáveis, pois a velocidade padrão dos servos é alta. A taxa de transmissão escolhida como *default* foi a de endereço 0X01, ou seja, 1000000 BPS. Uma interface foi desenvolvida em LabView (Fig. 45) que realiza a calibração e pré-tensionamento dos tendões.



Figura 45 – Interface de Calibração

Na Figura 45 pode se notar que os valores da Tabela 7, referentes à posição inicial do tensionamento dos cabos, podem ser alterados e redefinidos. Após o pré-tensionamento realizado, o manipulador passa a ter um posicionamento inicial definido. O “raioPolia” está em metros, o “Baud Rate” segue a relação apresentada na Tabela 6, a “Posição Inicial” é relativa à posição desejada de cada servo motor (variando de 0 até 1023) e a “Velocidade dos Motores” segue a relação de 1:0,12 em rpm, ou seja, a velocidade máxima de 1023 corresponde a, aproximadamente, 122 rpm. A Figura 46 ilustra o manipulador pré-tensionado, onde pode ser observado que o manipulador possui uma configuração inicial na vertical, sem erros significativos.

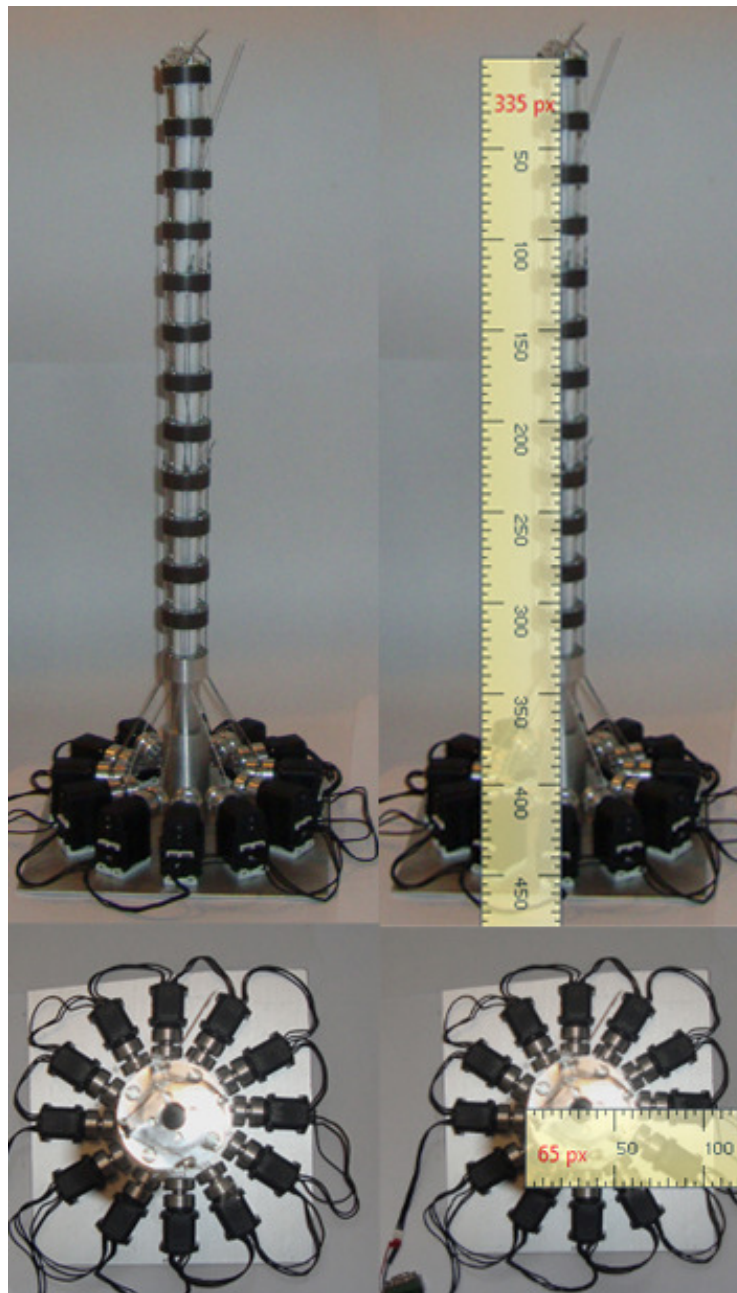


Figura 46 – Posição Inicial do Manipulador

Em seguida, foi desenvolvido um software para realizar o controle de movimentação para os DoF do manipulador na ferramenta *LabView*. O *software* em questão foi desenvolvido utilizando um recurso do *LabView*, chamado *MatLab Script*, onde é possível inserir linhas de código do *MatLab* no *LabView*. Dessa forma, foi possível inserir o Jacobiano encontrado para um elo com 4 vértebras no *LabView*. Com o intuito de reduzir o custo computacional, ao invés de calcular

o Jacobiano no *LabView*, este foi calculado no *MatLab* e em seguida inserido no *software* na mesma forma que é apresentado na Eq. 3.35. O valor de r é de $1,905 \times 10^{-2} \text{m}$, h_a é $1,267 \times 10^{-2} \text{m}$, h_m é $2,54 \times 10^{-4} \text{m}$, e o valor de h_c é de $2,54 \times 10^{-2} \text{m}$. Após a criação de uma função de cálculo do Jacobiano de 4 vértebras, foi criada outra função para compor o Jacobiano do manipulador, o qual é composto por 3 elos de 4 vértebras cada. Um ponto que deve ser notado é que ao se atuar o elo 1, os tendões dos elos seguintes também devem ser atuados de forma a não serem relaxados ou tensionados excessivamente por motivos de movimentação do manipulador. Isso ocorre pois o sistema é acoplado, e a movimentação de um elo requer que os tendões dos elos seguintes sejam acionados.

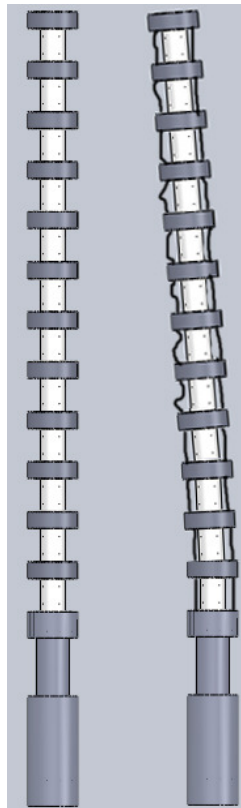


Figura 47 – Tendões nos Elos Consequentes

A Figura 47 ilustra o que ocorreria se apenas os tendões de 1 elo fossem movimentados. Note que os demais tendões em um dos lados ficariam relaxados, e do outro lado sobre-tensionados, inviabilizando o controle ou danificando a estrutura. Para evitar isso, foi criada uma função que calcula o Jacobiano


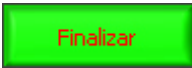
completo do manipulador, considerando que cada entrada dos DoFs (θ_1 , θ_2 ou d_3) em um elo afetam os DoFs dos seguintes. A função em questão foi desenvolvida para o caso em estudo, ou seja, um manipulador com 3 elos e cada elo contendo 4 vértebras. Entretanto, ela é de simples entendimento e pode ser expandida para qualquer quantidade de elos e vértebras necessária.

Foi desenvolvida uma função (GetID) para selecionar a ID do servo a ser atuado através dos nomes dos elos e dos servos. Dessa forma, foi criada uma tabela com as IDs originais de cada servomotor que relaciona o servomotor com sua posição de atuação no manipulador. A Tabela 8 ilustra as IDs e suas relações. Após ser criada a matriz de IDs, foi definida a nomenclatura utilizada para fazer a distinção dos servomotores. Inicialmente, é descrito o elo e, em seguida, o servo, ou seja, Elo0X – Servo0Y, onde X varia entre 1 e 3 e Y entre 1 e 4.

Tabela 5-2 – Relação entre IDs e Elos


	Servo 01	Servo 02	Servo 03	Servo 04
Elo 01	4	10	13	18
Elo 02	2	9	12	17
Elo 03	8	11	14	1

Após a seleção dos servomotores, foi elaborado um programa que define a posição inicial de pré-tensionamento. Dessa forma, pode-se definir a posição de tensionamento na inicialização do *software* e, em seguida, com um apertar de botão, todos os servomotores são atuados até a posição estabelecida.

Para iniciar o programa foi criado um botão . Com este botão, é ativada a função `dxl_initialize`, onde se verificam se as conexões entre os servomotores e o USB2Dynamixel estão corretas e verifica se existe tensão elétrica em todos os servomotores. Ao pressionar este botão, ele muda seu aspecto para , o qual ao ser clicado, gera a finalização do

programa. A finalização do *software* consiste em levar todos os servomotores à posição zero, sem pré-tensionamento.

No programa também é apresentada a posição atual dos servomotores, bem como a angulação e os deslocamentos aplicados em cada um dos DoFs.

O botão  tem como finalidade ativar as alterações realizadas nas angulações e velocidade. É apresentada uma barra de progressão com o intuito de aguardar todas as instruções a serem enviadas e recebidas entre o sistema. Enquanto ocorre a progressão, o sistema impossibilita a utilização da interface com o intuito de evitar perda de dados ou entradas indevidas durante a comunicação.

O programa apresenta três opções de variação de DoF para cada elo. Os comandos D_theta1 e D_theta2 alteram a angulação dos DoF θ_1 e θ_2 , enquanto que o comando D_prism altera a variação em d_3 .

A Figura 48 apresenta a tela principal do programa, ilustrando os textos explicativos anteriores. O Anexo VII apresenta a programação principal realizada para o desenvolvimento do *software*.

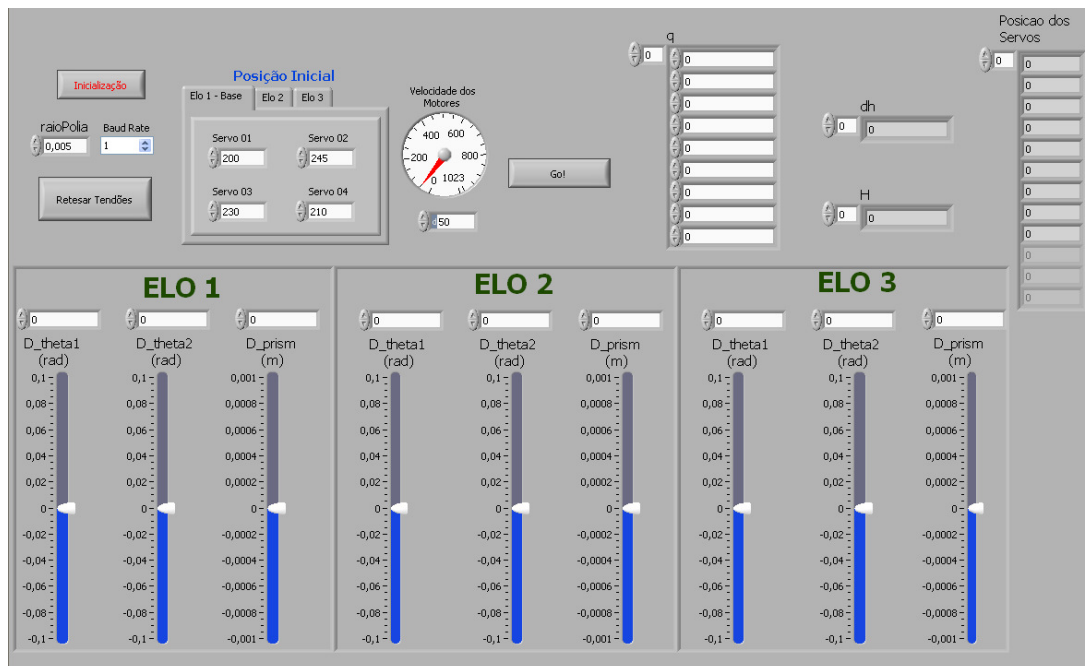


Figura 48 – Tela Principal do *Software* de Controle

Após o desenvolvimento deste programa, o manipulador foi testado para realizar uma comparação entre os DoFs desejados e os obtidos. Foram realizados diversos testes de forma a verificar a repetibilidade do sistema, bem como sua precisão. Para a realização dos testes, foi desenvolvida uma base para suporte de 2 câmeras fotográficas para verificação do posicionamento em 3D. Este procedimento pode ser adotado por ser uma análise estática, e não se fazendo, por isso necessário a utilização de medições em tempo real da extremidade usando câmeras de vídeo. Para uma melhor análise dos resultados, foi inserido um alvo alongado na extremidade do manipulador com o intuito de apresentar uma superfície retilínea e, assim, poder calcular o ângulo gerado pela extremidade do manipulador e conseqüentemente realizar a comparação com o ângulo desejado. Também foi calculado o erro percentual $E_{\%}$ (Eq. 4.1) onde E_{exp} é o valor experimental encontrado e E_{des} é o valor teórico desejado, para cada medida.

$$E_{\%} = \frac{(E_{exp} - E_{des})}{E_{des}} \quad (4.1)$$

As rotações desejadas em cada (D_Theta1 e D_Theta2) foram definidas pelos valores discretos $\pm 0,2rad$, $\pm 0,3rad$ e $\pm 0,4rad$, o que gera um ângulo em cada vértebra por elo de $\pm 0,05 rad$, $\pm 0,075rad$ e $\pm 0,1 rad$, respectivamente. As entradas no manipulador divergem da variação em θ_1 e θ_2 pelo fato de o elo possuir 4 vértebras. Desta forma, o valor de entrada é dividido pelo número de vértebras do elo, fazendo assim com que o ângulo também o seja.

Para realizar a medição dos ângulos gerados, foi utilizado um recurso computacional que simula um transferidor. É um *software* livre chamado Scale2.0³, que permite que o usuário insira uma régua ou transferidor digital na tela do computador, possibilitando o cálculo de medidas e ângulos, vide Figura 49. A régua pode ser utilizada em diversas escalas pré-definidas, tais como pixels, cm, polegadas, e outras. Esta ferramenta também possui uma lupa eletrônica, o

³ Desenvolvido pelo PhD. Ricardo Sgrillo. <http://www.sgrillo.net/scale.htm>

que facilita o correto posicionamento. Com o auxílio do transferidor digital, foi possível calcular as angulações geradas a cada variação de entrada descrita. O erro máximo de medição é 1° , ou seja, $0,01\text{rad}$. Após a realização de 7 testes individuais para as três entradas e para os dois DoFs (D_Theta1 e D_Theta2), conseguiu-se chegar a uma comparação entre os valores desejados e os medidos.

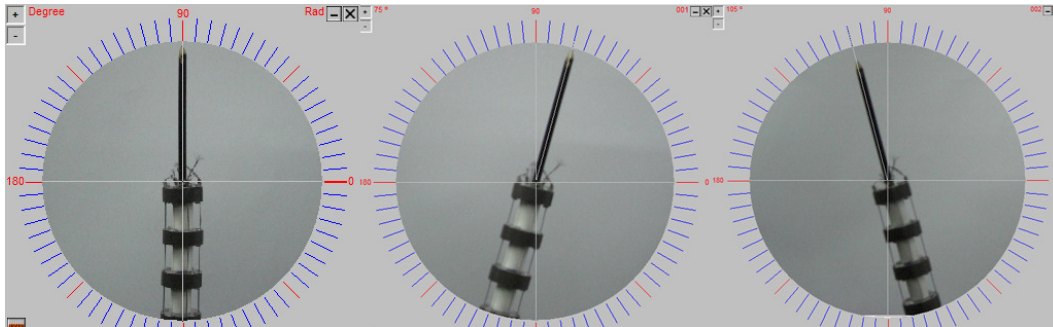


Figura 49 – Medições (Retesado e com $\pm 0,4\text{rad}$ no Elo 01)

As tabelas 5.3 e 5.4 apresentamos resultados encontrados para D_Theta1 e D_Theta2 nos testes realizados. Os valores encontrados para variações de θ_1 são apresentados na tabela 5.3 e os valores para θ_2 , na Tabela 5.4. Os valores das colunas “Posição Desejada” e “Posição Medida” estão em radianos. Pode ser observado que os resultados encontrados para os elos 01 e 02 estão dentro de uma margem de erro aceitável variando entre 1% e 3%, os erros quadráticos médios, enquanto que o para o elo 03 o erro médio fica entre 5% a 11%. Este fato se deve a condição do efeito da gravidade. Uma forma de corrigir este problema é a inserção de um controle de malha fechada no sistema. À frente, será apresentada uma simulação assumindo um controle por torque computado deste manipulador que executa a correção deste erro.

Tabela 5-3 – Variações de θ_1

Elos	Posição Desajada	Teste 01				Teste 02				Teste 03				Teste 04		Erro Absoluto
		Posição Medida	Erro Percentual	Erro Absoluto	Posição Medida	Erro Percentual	Erro Absoluto	Posição Medida	Erro Percentual	Erro Absoluto	Posição Medida	Erro Percentual				
1	0,2	0,1920	-0,0417	0,0040	0,1920	-0,0417	0,0040	0,2094	0,0451	0,0047	0,1920	0,0451	0,0047	0,1920	-0,0417	0,0040
	0,3	0,2967	-0,0111	0,0016	0,3142	0,0451	0,0071	0,4363	0,0451	0,0071	0,2967	-0,0111	0,0016	0,2967	-0,0111	0,0001
	0,4	0,3840	-0,0417	0,0080	0,4189	0,0451	0,0094	0,4363	0,0833	0,0182	0,3840	-0,0417	0,0080	0,4014	0,0036	0,0007
	-0,2	-0,2094	0,0451	0,0047	-0,1920	-0,0417	0,0040	-0,1920	-0,0417	0,0040	-0,2094	0,0451	0,0047	-0,2094	0,0451	0,0047
2	-0,3	-0,2967	-0,0111	0,0016	-0,3142	0,0451	0,0071	-0,3142	0,0451	0,0071	-0,2967	-0,0111	0,0016	-0,2967	-0,0111	0,0016
	-0,4	-0,3665	-0,0913	0,0167	-0,4189	0,0451	0,0094	-0,4363	0,0833	0,0182	-0,3665	-0,0913	0,0167	-0,3840	-0,0417	0,0080
	0,2	0,1920	-0,0417	0,0040	0,2094	0,0451	0,0047	0,1920	-0,0417	0,0040	0,2094	0,0451	0,0047	0,2094	0,0451	0,0047
	0,3	0,2967	-0,0111	0,0016	0,2967	-0,0111	0,0016	0,2793	-0,0743	0,0104	0,2443	-0,2278	0,0278	0,2443	-0,2278	0,0278
3	0,4	0,2967	-0,3481	0,0516	0,3142	-0,2732	0,0429	0,3142	-0,2062	0,0342	0,3142	-0,2062	0,0342	0,3142	-0,2732	0,0429
	-0,2	-0,1745	-0,1459	0,0127	-0,1571	-0,2732	0,0215	-0,1571	-0,2732	0,0215	-0,1571	-0,2732	0,0215	-0,1571	-0,2732	0,0215
	-0,3	-0,2443	-0,2278	0,0278	-0,2269	-0,3222	0,0366	-0,2443	-0,2278	0,0278	-0,2443	-0,2278	0,0278	-0,2094	-0,4324	0,0453
	-0,4	-0,3316	-0,2062	0,0342	-0,2793	-0,4324	0,0604	-0,2967	-0,3481	0,0516	-0,2793	-0,3481	0,0516	-0,2793	-0,4324	0,0604
Elos	Posição Desajada	Teste 05				Teste 06				Teste 07				Análises		Erro Absoluto
		Posição Medida	Erro Percentual	Erro Absoluto	Posição Medida	Erro Percentual	Erro Absoluto	Posição Medida	Erro Percentual	Erro Absoluto	Desvio Padrão	Variação				
		0,2	0,2094	0,0451	0,0047	0,1920	-0,0417	0,0040	0,1920	-0,0417	0,0040	0,0085	0,0001			
		0,3	0,3142	0,0451	0,0071	0,2967	-0,0111	0,0016	0,2793	-0,0743	0,0104	0,0132	0,0002			
		0,4	0,3840	-0,0417	0,0080	0,3840	-0,0417	0,0080	0,3840	-0,0417	0,0080	0,0212	0,0004			
		-0,2	-0,1920	-0,0417	0,0040	-0,1920	-0,0417	0,0040	-0,2094	0,0451	0,0047	0,0093	0,0001			
		-0,3	-0,2793	-0,0743	0,0104	-0,2793	-0,0743	0,0104	-0,2967	-0,0111	0,0016	0,0143	0,0002			
-0,4	-0,3665	-0,0913	0,0167	-0,3665	-0,0913	0,0167	-0,4014	0,0036	0,0007	0,0282	0,0008					
0,2	0,1920	-0,0417	0,0040	0,2094	0,0451	0,0047	0,1920	-0,0417	0,0040	0,0093	0,0001					
0,3	0,2967	-0,0111	0,0016	0,2967	-0,0111	0,0016	0,2967	-0,0111	0,0016	0,0101	0,0001					
0,4	0,4189	0,0451	0,0094	0,3840	-0,0417	0,0080	0,3840	-0,0417	0,0080	0,0225	0,0005					
-0,2	-0,1920	-0,0417	0,0040	-0,1920	-0,0417	0,0040	-0,2094	0,0451	0,0047	0,0085	0,0001					
-0,3	-0,2967	-0,0111	0,0016	-0,2967	-0,0111	0,0016	-0,2967	-0,0111	0,0016	0,0166	0,0003					
-0,4	-0,3840	-0,0417	0,0080	-0,4189	0,0451	0,0094	-0,4014	0,0036	0,0007	0,0194	0,0004					
0,2	0,1745	-0,1459	0,0127	0,1745	-0,1459	0,0127	0,1745	-0,1459	0,0127	0,0066	0,0000					
0,3	0,2443	-0,2278	0,0278	0,2618	-0,1459	0,0191	0,2443	-0,2278	0,0278	0,0101	0,0001					
0,4	0,3142	-0,2732	0,0249	0,3316	-0,2062	0,0342	0,3316	-0,2062	0,0342	0,0132	0,0001					
-0,2	-0,1745	-0,1459	0,0127	-0,1571	-0,2732	0,0215	-0,1745	-0,1459	0,0127	0,0093	0,0001					
-0,3	-0,2443	-0,2278	0,0278	-0,2269	-0,3222	0,0366	-0,2269	-0,3222	0,0366	0,0132	0,0002					
-0,4	-0,3316	-0,2062	0,0342	-0,2967	-0,3481	0,0516	-0,3142	-0,2732	0,0429	0,0222	0,0005					

Tabela 5-4 – Variações de θ_2

Elos	Posição Desejada	Teste 01				Teste 02				Teste 03				Teste 04			
		Posição Medida	Erro Percentual	Erro Absoluto	Erro Absoluto	Posição Medida	Erro Percentual	Erro Absoluto	Erro Absoluto	Posição Medida	Erro Percentual	Erro Absoluto	Erro Absoluto	Posição Medida	Erro Percentual	Erro Absoluto	
1	0,2	0,2094	0,0451	0,0047	0,0047	0,2094	0,0451	0,0047	0,0047	0,2094	0,0451	0,0047	0,0047	0,1920	-0,0417	0,0040	
	0,3	0,2967	-0,0111	0,0016	0,0071	0,3142	0,0451	0,0071	0,0071	0,3142	0,0451	0,0071	0,0071	0,2967	-0,0111	0,0016	
	0,4	0,4189	0,0451	0,0094	0,0094	0,4189	0,0451	0,0094	0,0094	0,3840	-0,0417	0,0080	0,0080	0,4014	0,0036	0,0007	
	-0,2	-0,2094	0,0451	0,0047	0,0047	-0,2094	0,0451	0,0047	0,0047	-0,1920	-0,0417	0,0040	0,0040	-0,2094	0,0451	0,0047	
2	-0,3	-0,2967	-0,0111	0,0016	0,0071	-0,3142	0,0451	0,0071	0,0071	-0,3142	0,0451	0,0071	0,0071	-0,2967	-0,0111	0,0016	
	-0,4	-0,3665	-0,0913	0,0167	0,0094	-0,4189	0,0451	0,0094	0,0094	-0,4189	0,0451	0,0094	0,0094	-0,3840	-0,0417	0,0080	
	0,2	0,1920	-0,0417	0,0040	0,0040	0,2094	0,0451	0,0047	0,0047	0,2094	0,0451	0,0047	0,0047	0,2094	0,0451	0,0047	
	0,3	0,2967	-0,0111	0,0016	0,0071	0,3142	0,0451	0,0071	0,0071	0,3142	0,0451	0,0071	0,0071	0,2967	-0,0111	0,0016	
3	0,4	0,3840	-0,0417	0,0080	0,0080	0,4189	0,0451	0,0094	0,0094	0,4363	0,0833	0,0182	0,0182	0,4363	0,0833	0,0182	
	-0,2	-0,1920	-0,0417	0,0040	0,0040	-0,1920	-0,0417	0,0040	0,0040	-0,1920	-0,0417	0,0040	0,0040	-0,2094	0,0451	0,0047	
	-0,3	-0,3316	0,0953	0,0158	0,0158	-0,2793	-0,0743	0,0104	0,0158	-0,3316	0,0953	0,0158	0,0158	-0,2967	-0,0111	0,0016	
	-0,4	-0,4189	0,0451	0,0094	0,0094	-0,3665	-0,0913	0,0167	0,0094	-0,4189	0,0451	0,0094	0,0094	-0,3840	-0,0417	0,0080	
1	0,2	0,1745	-0,1459	0,0127	0,0215	0,1571	-0,2732	0,0215	0,0127	0,1745	-0,1459	0,0127	0,0127	0,1571	-0,2732	0,0215	
	0,3	0,2269	-0,3222	0,0366	0,0366	0,2618	-0,1459	0,0191	0,0278	0,2443	-0,2278	0,0278	0,0278	0,2443	-0,2278	0,0278	
	0,4	0,2967	-0,3481	0,0516	0,0429	0,3142	-0,2732	0,0429	0,0342	0,3316	-0,2062	0,0342	0,0342	0,3142	-0,2732	0,0429	
	-0,2	-0,1745	-0,1459	0,0127	0,0215	-0,1571	-0,2732	0,0215	0,0127	-0,1571	-0,2732	0,0215	0,0215	-0,1571	-0,2732	0,0215	
2	-0,3	-0,2094	-0,4324	0,0453	0,0366	-0,2269	-0,3222	0,0366	0,0278	-0,2443	-0,2278	0,0278	0,0278	-0,2094	-0,4324	0,0453	
	-0,4	-0,2967	-0,3481	0,0516	0,0604	-0,2793	-0,4324	0,0604	0,0516	-0,2967	-0,3481	0,0516	0,0516	-0,2793	-0,4324	0,0604	
	0,2	0,1745	-0,1459	0,0127	0,0215	0,1571	-0,2732	0,0215	0,0127	0,1745	-0,1459	0,0127	0,0127	0,1571	-0,2732	0,0215	
	0,3	0,2269	-0,3222	0,0366	0,0366	0,2618	-0,1459	0,0191	0,0278	0,2443	-0,2278	0,0278	0,0278	0,2443	-0,2278	0,0278	
3	0,4	0,2967	-0,3481	0,0516	0,0429	0,3142	-0,2732	0,0429	0,0342	0,3316	-0,2062	0,0342	0,0342	0,3142	-0,2732	0,0429	
	-0,2	-0,1745	-0,1459	0,0127	0,0215	-0,1571	-0,2732	0,0215	0,0127	-0,1571	-0,2732	0,0215	0,0215	-0,1571	-0,2732	0,0215	
	-0,3	-0,2094	-0,4324	0,0453	0,0366	-0,2269	-0,3222	0,0366	0,0278	-0,2443	-0,2278	0,0278	0,0278	-0,2094	-0,4324	0,0453	
	-0,4	-0,2967	-0,3481	0,0516	0,0604	-0,2793	-0,4324	0,0604	0,0516	-0,2967	-0,3481	0,0516	0,0516	-0,2793	-0,4324	0,0604	
Elos	Posição Desejada	Posição Medida	Erro Percentual	Erro Absoluto	Erro Absoluto	Posição Medida	Erro Percentual	Erro Absoluto	Erro Absoluto	Posição Medida	Erro Percentual	Erro Absoluto	Erro Absoluto	Desvio Padrão	Variação	Erro Absoluto	

Após as verificações do posicionamento estático terem sido executadas, foi desenvolvida uma simulação de controle para o manipulador. O intuito inicial seria realizar alguns testes aplicando a gravidade para o manipulador na horizontal e a execução simulada de uma determinada tarefa demonstrando suas características. Inicialmente, foi desenvolvido um programa no *MatLab* com o intuito de simular o efeito da gravidade. Utilizando a *toolbox Robot*⁴, foi possível desenvolver todas as análises necessárias para simular o manipulador. A *toolbox* permite a criação de um manipulador a partir de uma matriz contendo o D-H ou de uma forma mais completa, onde se define elo por elo, indicando se o mesmo é prismático ou rotativo, incluindo, também, valores tais como, peso de cada elo, centro de massa, matriz de inércia, redução utilizada entre elos, inércia dos atuadores, atrito viscoso e atrito de Coulomb, entre outros. Além disso, é possível calcular a cinemática direta e/ou inversa com apenas um comando (*fkine* e *ikine*, respectivamente), bem como o Jacobiano em relação à base, a dinâmica direta, a dinâmica inversa, matriz de inércia, força de Coriolis, inserir o efeito da gravidade, entre diversas outras opções – conforme ilustra o Anexo IX.

Para a criação da simulação no *Simulink*, foi utilizado o controle de torque computado. O controle de torque computado é baseado na compensação dinâmica do manipulador e tem como objetivo, descobrir a dinâmica linear e desacoplada em um sistema de malha fechada para compensar as variações não levadas em conta pelo modelo dinâmico, devidas aos erros de estimação, atrito, variações na carga, entre outras. Assim, é possível controlar cada junta independentemente. Além da implementação da linearização e do desacoplamento dinâmico, é inserido um controlador linear com realimentação Proporcional-Derivativa, com o intuito de filtrar perturbações e corrigir desvios nas trajetórias escolhidas. A Figura 50 exemplifica a lei de controle por torque computado, onde o símbolo de * tem o significado de “desejado”.

⁴ Desenvolvida por Peter Corke. http://www.petercorke.com/Robotics_Toolbox.html

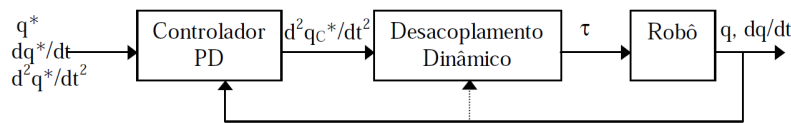


Figura 50 – Malha de Controle por Torque Computado

Para o desenvolvimento de uma simulação do manipulador no *MatLab*, foi utilizada a *toolbox Robot* e, a partir dela, pode-se construir um robô desenvolvido através dos parâmetros de D-H apresentados na Tabela 4, onde cada elo indica um DoF da vértebra. Foram atribuídas as respectivas massas relativas a cada componente (vide capítulo 2), de forma que para θ_1 , θ_2 e θ_4 foram assumidas metade da massa de uma membrana e para θ_5 , foi atribuído o valor de metade da membrana mais a massa do anel, enquanto que para o d_3 , foi atribuído o valor da massa da coluna. O valor de metade da massa da membrana é inserido devido aos DoFs, θ_1 e θ_5 , pertencerem a apenas uma membrana e possuírem a massa distribuída uniformemente. Da mesma forma para os θ_2 e θ_4 . O centro de massa e a matriz de inércia, para cada DoF, foram inseridos na construção do manipulador. Seus respectivos valores foram obtidos, através de análises realizadas no *SolidWorks*. A transmissão, bem como a inércia dos servomotores, também, foram adotadas. Também foi inserida uma pequena taxa de atrito seco para indicar o atrito entre os tendões e os componentes do manipulador. Além da criação do manipulador, foi criada outra função que gera a matriz de rigidez do sistema. Como a rigidez em d_3 é muito superior à encontrada para os outros DoFs, na ordem de 2 casas acima, ela será assumida como tendendo a infinito, para que seja possível realizar uma simulação coerente.

Logo, foi possível desenvolver um programa para realizar a simulação do sistema atuado apenas com a força da gravidade. Para que as respostas possuíssem uma melhor visualização, foram feitos testes com o manipulador na direção de z e, também, com ele na direção de x. A Figura 51 ilustra o manipulador sobre efeito da gravidade com a base rotacionada em 90° , em direção ao eixo x (realizada no *MatLab*) e, uma análise de deslocamento realizada no *Simulation*.

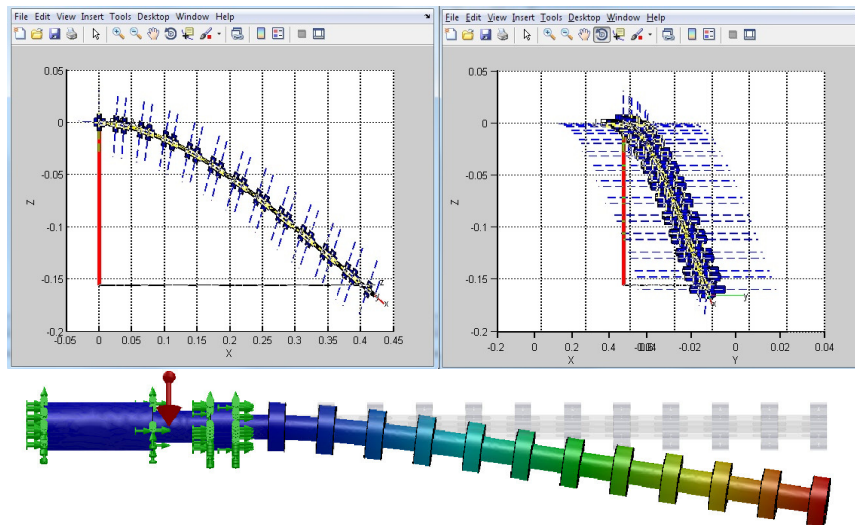


Figura 51 – Gravidade

Esta análise pode ser comparada com o manipulador real. A base do manipulador real foi colocada na direção do eixo x. Assim, foi possível fazer uma comparação entre a angulação da simulação e a angulação do experimento. A simulação apresentou uma curvatura de aproximadamente 29° , enquanto que, para o experimento, a curvatura encontrada foi de 25° . O erro é considerado dentro do admissível, pois o erro da resposta gerada pelo programa Scale2.0 é de 1° .

Para o controle de torque computado, foi utilizado o *Simulink* com as funções da *toolbox Robot* e o programa desenvolvido para a criação do modelo do manipulador no *MatLab*. A Figura 52 apresenta o diagrama de blocos utilizado para a geração da simulação.

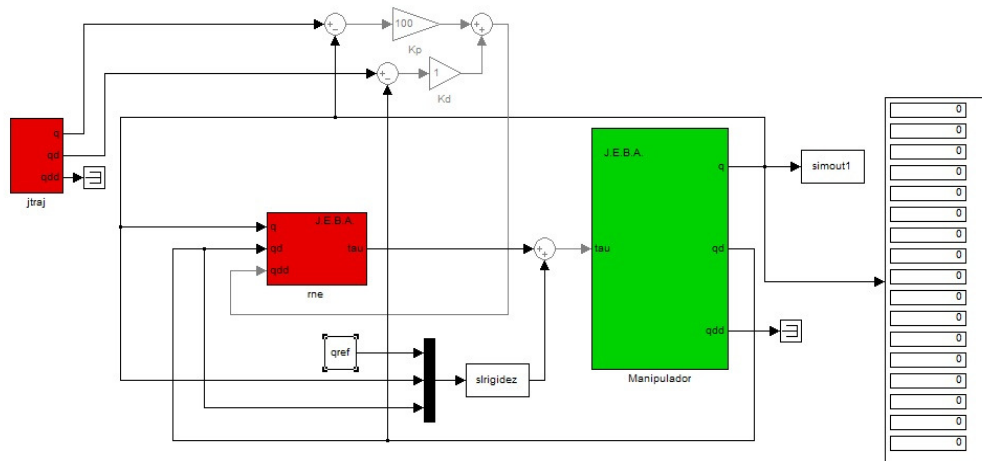


Figura 52 – Controle por Torque Computado

A função “jtraj” possui parâmetros que incluem os valores iniciais e finais de cada elemento, no caso, os DoFs e o tempo de movimentação. As velocidades inicial e final são determinadas como zero. A função “rne” – *Recursive Newton-Euler* – computa a dinâmica inversa do manipulador via algoritmo recursivo de Newton-Euler. A função “s/rigidez” foi uma função desenvolvida para inserir a matriz de rigidez no sistema, enquanto a função “manipulador” é o robô criado no *MatLab*, com suas respectivas características. Também são apresentados dois blocos, onde podem ser observados em tempo real, os valores que o programa atribui aos DoFs e, também, uma saída com todos os dados da simulação (simout1).

Uma primeira simulação foi realizada de forma a conferir as medidas obtidas pelo experimento prático. Inicialmente, foi simulada uma aplicação com entrada de θ_1 de 0,4rad no elo 01, segundo a Figura 53, que ilustra a resposta encontrada.

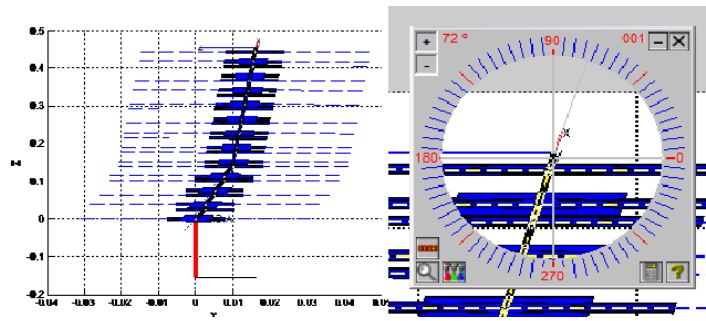


Figura 53 – Resposta Simulação 0,4rad

Pode ser observado que a angulação gerada pela simulação (18°) esta dentro da faixa encontrada experimentalmente (variando entre 21° e 23°) – Anexo VIII.

Uma segunda análise foi realizada ao aplicar $0,4\text{rad}$ em θ_2 e pode-se observar que a resposta é similar ao teste anterior, porém, no sentido do eixo $-x$, o que verifica que os DoFs de θ_1 e θ_2 estão desacoplados.

Com o intuito de apresentar uma funcionalidade prática, foi pensada uma tarefa em que a utilização de um manipulador tradicional fosse limitada, devido a sua estrutura. Imaginou-se uma caixa fechada, com alguns objetos a serem retirados, em seu interior, dentro de uma piscina de rejeitos radioativos, o que inviabiliza a entrada de seres humanos no local. Existem outros objetos sobre a caixa, impossibilitando uma retirada da caixa do ambiente radioativo. A caixa apresenta uma abertura em uma de suas extremidades e, no seu interior, existem algumas porcas que precisam ser retiradas, por algum motivo qualquer. A Figura 54 ilustra a caixa, objetos e porcas.

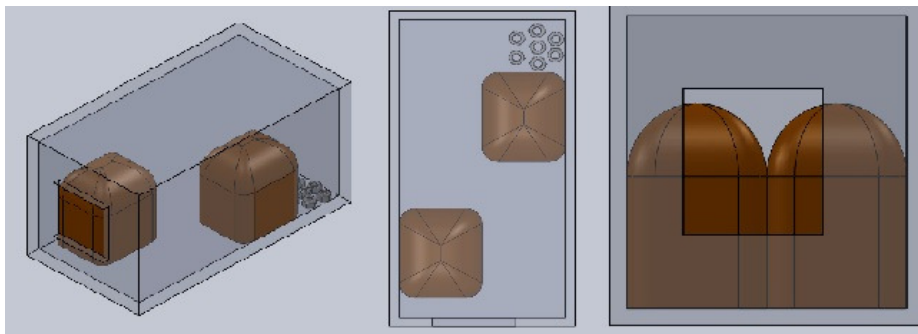


Figura 54 – Ilustração do Problema

Assumindo que as dimensões e posicionamentos dos objetos são idênticos aos da Figura 54, pode-se traçar uma trajetória para que um manipulador possa capturar as porcas. Um manipulador tradicional não consegue executar a tarefa devido ao pequeno espaço de trabalho, e, também, não consegue obter as angulações necessárias para realização das curvas para que se chegue até as porcas. Assim, um manipulador contínuo pode ser utilizado no lugar de um manipulador tradicional. Para a realização da tarefa, pode-se utilizar um ROV submarino com um manipulador contínuo remoto, atuado por tendões, acoplado em sua estrutura. Todo o sistema de controle e os atuadores do manipulador contínuo, podem estar afastados da piscina radioativa, gerando menos trabalho na fase de descontaminação e, também, menor número de possíveis rejeitos.

Como o objetivo é exemplificar o trabalho do manipulador desenvolvido em uma tarefa prática, serão simulados os passos do manipulador até que se chegue aos objetos desejados. Inicialmente, somente o elo 3 será atuado positivamente de forma a evitar a colisão com o primeiro objeto. Em seguida, o elo 2 será atuado com a mesma angulação que o elo 3 utilizou na primeira etapa, enquanto que o elo 3 passa a receber uma atuação negativa, com o intuito de evitar colidir tanto com a parede da caixa quanto com o novo objeto a sua frente. A última etapa é a atuação do elo 1, que recebe a mesma angulação utilizada pelo elo 3 na etapa 01, o elo 2 recebe a angulação que o elo 3 estava utilizando na etapa 02 e, finalmente, o elo 3 recebe uma angulação positiva, chegando até as porcas. Nesta terceira etapa, o elo 1, também, recebe uma pequena inclinação negativa, perpendicular às angulações anteriores, para que o manipulador possa chegar na altura das porcas. Para realizar a retirada das porcas do local, basta realizar o procedimento inverso. Foi utilizado, para calcular os ângulos necessários para executar cada etapa, o programa Scale2.0. As Figuras 55 a 57 ilustram os ângulos necessários.

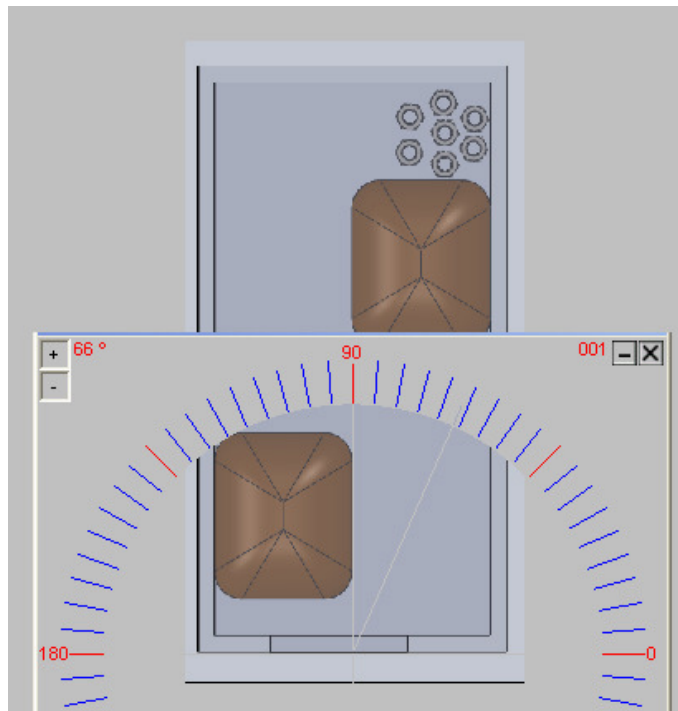


Figura 55 – Ângulo da Etapa 01

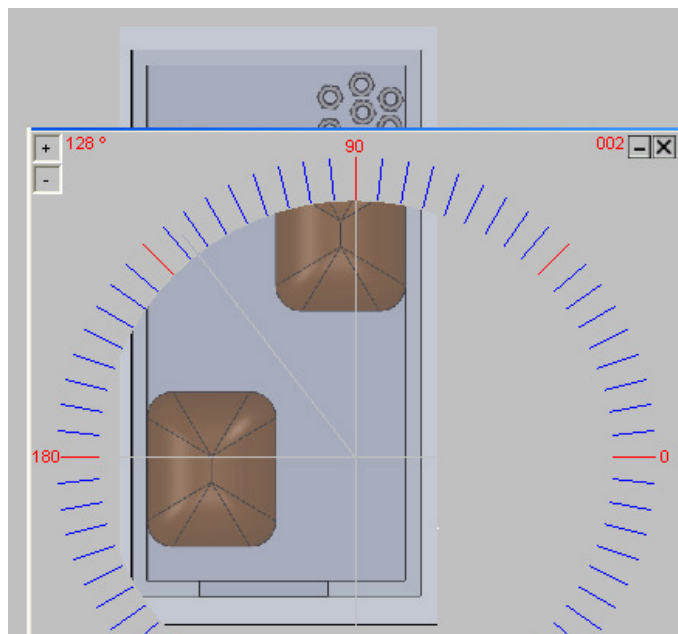


Figura 56 – Ângulo da Etapa 02

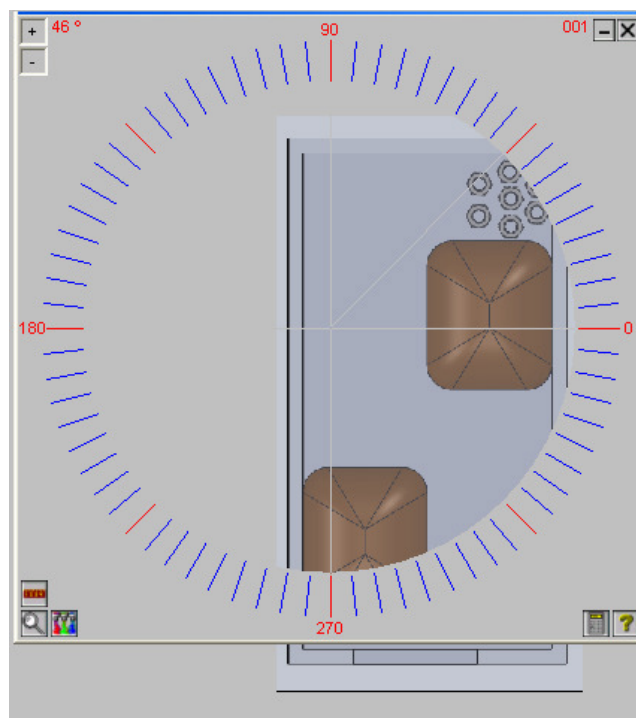


Figura 57 – Ângulo da Etapa 03

Logo, foram realizadas as conversões necessárias de graus para radianos e, de acordo os dados da Tabela 9, que apresenta as angulações das entradas para cada DoF, cada etapa foi simulada no programa desenvolvido no *MatLab*.

Tabela 5-5 – Entradas para Realização das Etapas

	Etapa 01			Etapa 02			Etapa 03		
	Elo03	Elo02	Elo 01	Elo03	Elo02	Elo 01	Elo03	Elo02	Elo 01
θ_1	0,95993	-	-	-0,66323	0,97738	-	-0,78540	-0,66323	0,97738
θ_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,08726
d_3	-	-	-	-	-	-	-	-	-

As Figuras 58, 59 e 60 apresentam os resultados obtidos pelas simulações.

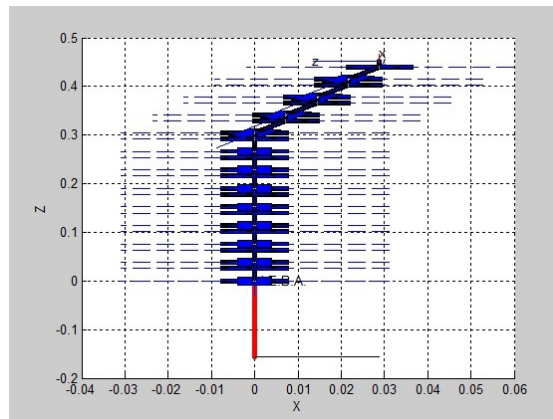


Figura 58 – Etapa 01

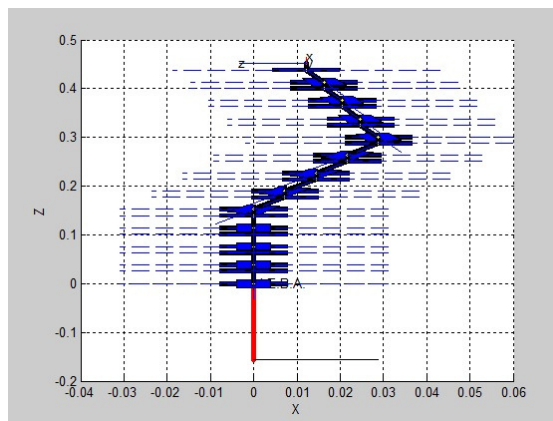


Figura 59 – Etapa 02

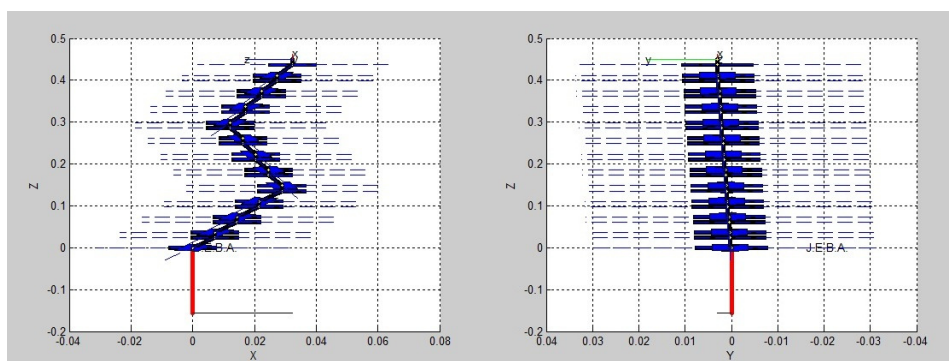


Figura 60 – Etapa 03

A Figura 61 ilustra as angulações geradas em cada etapa da simulação. A primeira imagem (esquerda superior) é relativa à etapa I, enquanto que, ao seu lado, a etapa II e as duas imagens na parte inferior, ilustram os ângulos apresentados na Figura 60.

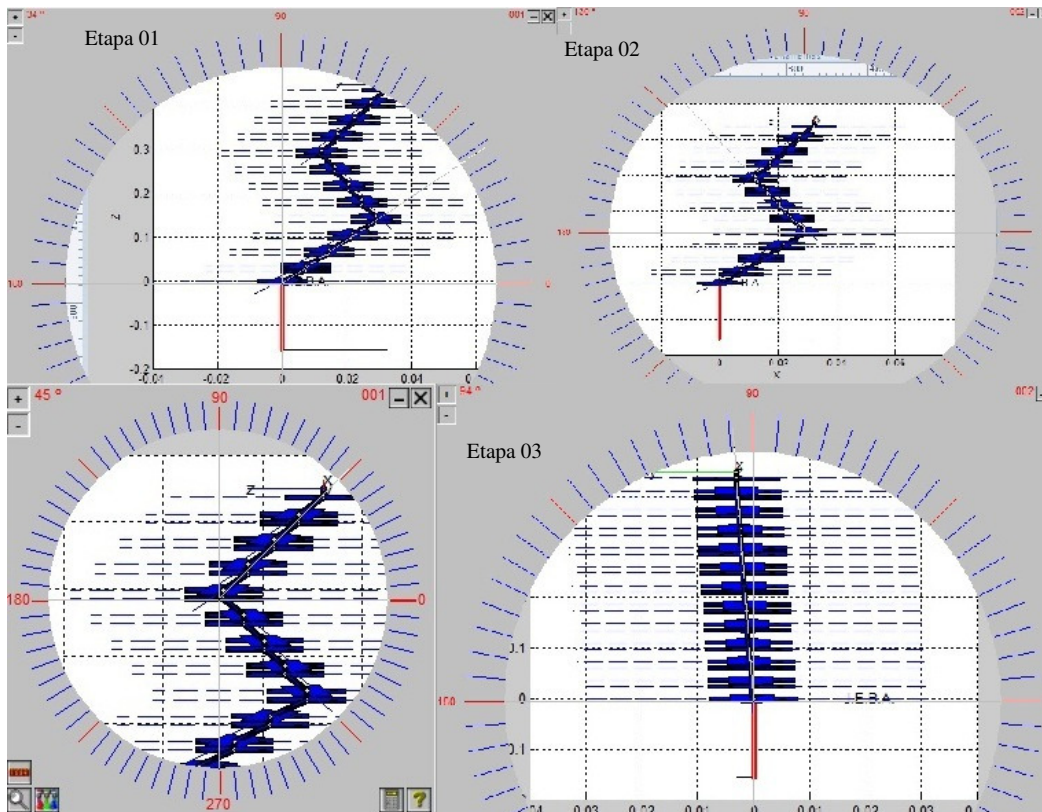


Figura 61 – Ângulos Medidos

Os ângulos medidos na simulação foram os apresentados na Tabela 10.

Tabela 5-6 – Ângulos da Simulação

	Etapa 01			Etapa 02			Etapa 03		
	Elo03	Elo02	Elo01	Elo03	Elo02	Elo01	Elo03	Elo02	Elo01
θ_1	0,9774	-	-	-0,6981	0,9774	-	0,7854	-0,6981	0,9774
θ_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,0698
d_3	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Pode-se observar que com as angulações escolhidas anteriormente (Tab. 9), estão bem próximas das angulações encontradas na simulação (Tab. 10), logo a tarefa, teoricamente, pode ser executada. Vale salientar que este procedimento é uma simulação e que no procedimento experimental, o resultado pode ser diferente devido as forças externas que não foram analisadas nesta simulação.

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1. Contribuições neste Trabalho

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um protótipo para um manipulador contínuo, atuado por tendões, que pode realizar diversos tipos de tarefas, inclusive em locais de difícil acesso e de risco à vida humana, tais como áreas radioativas e com temperaturas elevadas.

Apresentou-se a caracterização de alguns tipos de sistemas robóticos, com ênfase nos sistemas que trabalham nas áreas relacionadas a energia e a áreas inóspitas ao seres humanos; o conceito de manipuladores contínuos, apontando suas vantagens e desvantagens sobre manipuladores tradicionais; a explicação dos sistemas redundantes e hiper-redundantes relacionados a manipuladores. A partir daí, foram comentados alguns manipuladores que pertencem ao grupo de estudo deste trabalho e que possuem características de animais como referência de funcionamento.

Através de análises e estudos, foi desenvolvido um modelo do sistema proposto no *software SolidWorks*, onde puderam ser verificadas diversas características do manipulador antes de sua construção. Foi possível criar uma malha de Elementos Finitos e realizar alguns testes envolvendo rigidez de componentes e realizar estimativas de massa, inércia, dimensionamento do manipulador e posicionamento de componentes no sistema completo. Para a usinagem das peças e construção do protótipo, foram desenvolvidos desenhos técnicos específicos.

Explicaram-se conceitos básicos de cinemática e transformações homogêneas, bem como, os conceitos da notação de Denavit-Hartenberg. Realizou-se através da utilização desta notação, a modelagem do sistema. Desenvolveu-se uma técnica de análise onde, ao se analisar um conjunto de componentes, que são replicados ao longo do manipulador, pode-se chegar a uma análise do manipulador completo. Dessa maneira, o protótipo não fica limitado ao

número de elos atuais e pode possuir quantos elos forem necessários, bem como o tamanho de cada elo pode ser escolhido conforme a necessidade.

Após a modelagem, foi iniciada a fase de construção física do sistema, cujos componentes foram desenvolvidos nas oficinas da PUC-Rio, sendo criados de forma que pudessem ser replicados com facilidade para manter o objetivo de fornecer modularidade ao manipulador.

Detalharam-se as informações do protocolo de comunicação, onde foram desenvolvidas funções para realizar a comunicação entre os atuadores e o computador, cujas funções permitem que um usuário leia e controle os estados dos atuadores em tempo real, o que viabiliza a tomada de decisões para a realização de movimentos. Desenvolveu-se, também, um programa que realiza o pré-tensionamento dos tendões no manipulador, e o controle dos atuadores, através das entradas de ângulos. Alguns experimentos foram realizados com o intuito de verificar as simulações. Realizou-se, também, uma simulação com a utilização da técnica de controle por torque computado, onde pode-se corrigir os erros de posicionamento encontrados nos experimentos.

Por fim, foi idealizada uma aplicação do sistema em uma piscina de rejeitos radioativos e uma simulação de posicionamento do manipulador. Pelo fato de o protótipo desenvolvido ser versátil, modular, leve e podendo ser atuado remotamente, ele pode ser aplicado em diversas tarefas, não se limitando somente ao setor energético.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Alguns aspectos com o intuito de melhorias no desenvolvimento do manipulador podem ser sugeridos.

O posicionamento dos atuadores atualmente gera um ângulo entre as polias e a base do manipulador que pode ser reduzido, com o intuito de redução do atrito entre estes. A polia pode possuir um ângulo de desgaste, em sua extremidade, maior, pois o atual também gera atrito desnecessário entre a polia e os tendões. Pode ser desenvolvida uma técnica para a criação do corrugado nas membranas

que seja automatizada e que gere corrugados quase idênticos. Além disso, note que a última vértebra pode possuir um desenho especial para o acoplamento de acessórios para a execução de tarefas, o que poderia ser estudado posteriormente.

Este trabalho apresentou resposta satisfatória para a análise cinemática tanto simulada quanto experimental. Trabalhos futuros podem incluir análises dinâmicas, tanto simuladas quanto experimentais.

Os atuadores utilizados, apesar de informarem que possuem sensores de torque, de fato não possuem, sendo portanto, interessante a inclusão de sensores de posição ao longo do manipulador para a realização de um controle experimental (de posição) que não dependa de uma modelagem estática do sistema.

7. Bibliografia

Anderson, V.V., Horn, R.C. **Tensor-arm Manipulator design**, ASME Trans., Vol. 67-DE-57, pp. 1–12, 1967.

Anscombe, Rosalind, et al. **Snake-arm Robots Conduct Nuclear Maintenance**. International Youth Nuclear Congress. 2006.

Assis, Pedro F. C. B. **Caracterização de Atuadores Baseados em Músculos Artificiais Poliméricos por Efeito Capacitivo**. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica. pp. 13–15, 2007.

Blessing, Marshal e Walker, Ian D. **Novel Continuum Robots with Variable Length Sections**. IFAC Symposium on Mechatronic Systems. 2004.

Brandt, G., et al. **CRIGOS: a compact robot for image-guided orthopedic surgery**. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine. pp. 252–260, 1999.

Briones, Leoncio, Bustamante, Paul e Serna, Miguel A. **Wall-climbing robot for inspection in nuclear power plants**. IEEE International Conference on Robotics and Automation. pp. 1409–1414, 1994.

Buckingham, Rob, et al. **Snake-arm robots: a new approach to aircraft assembly**. SAE AeroTech Congress, 2007.

Chirikjian, G.S. **Theory and Applications of Hyper-Redundant Robotic Manipulators**, Ph.D Dissertation, Department of Applied Mechanics, Division of Engineering and Applied Science, California Institute of Technology, 1992.

Chirikjian, G.S. e Burdick, J.W. **Design and Experiments with a 30 DOF Robot**. IEEE Conference on Robotics and Automation, pages 113–119, 1993.

Davies, J. B. C., et al. **Subsea Applications of Continuum Robots**. International Symposium on Underwater Technology. Vol. 15, 17, 1998.

Dunlop, G. R. e Jones, T. P. **Position analysis of a two DOF parallel mechanism-the Canterbury tracker**. Mechanism and Machine Theory, pp. 599–614, 1999.

Hannan, Michael W., Walker, Ian D. **Novel Kinematics for Continuum Robots**, 7th International Symposium on Advances in Robot Kinematics, Slovenia, pp. 227-238, 2000.

Hannan, Michael W., Walker, Ian D. **The 'elephant trunk' manipulator, design and implementation**. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pg 14-19, 2001.

- Hannan, Michael W., Walker, Ian D. **Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum style robots.** Journal of Robotic Systems. pp. 45-63, 2003.
- Hiller, Manfred, et al. **Design Analysis and Realization of Parallel Tendon-based Manipulators.** Mechanism and Machine Theory, pp. 429-445, 2005.
- Hirose, S., Umetani, Y. **Kinematic Control of Active Cord Mechanism with Tactile Sensors.** Proceedings of Second International CISM-IFT Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. pp. 241-252, 1976.
- Hirose, S., Yokoshima, K., Ma, S. **2 DOF Moray Drive for Hyper Redundant Manipulator.** Proceedings, IROS'92, pp. 1735-1740B, 1992.
- Hirose, S. **Biologically Inspired Robots.** Oxford University Press. 1993.
- Immega, G. and Antonelli, K. **The KSI Tentacle Manipulator.** International Conference on Robotics and Automation. pp.3149-3154. 1995.
- Jones, Bryan A. e Walker, Ian D. **Kinematics for multisection continuum robots.** IEEE Transactions on Robotics and Automation. Vol. 22, 2006.
- Jones, Bryan A. e Walker, Ian D. **Limiting-case Analysis of Continuum Trunk Kinematics.** IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007.
- Kobayashi, H., Shimemura, E., Suzuki, K. **A Distributed Control for Hyper Redundant Manipulator.** Proceedings, IROS'92, pp. 1958-1963, 1992.
- Liljebäck, Pål; Stavadahl, Øyvind; Pettersen, Kristin Y. **Modular Pneumatic Snake Robot: 3D Modelling, Implementation And Control.** Modeling, Identification and Control. Volume 29, pp. 21-28, 2008.
- McMahan, William, Jones, Bryan, Walker, Ian D, Chitrakaran, Vilas, Seshadri, Arjun e Dawson, Darren. **Robotic Manipulators Inspired by Cephalopod Limbs.** CDEN Design Conference, Montreal, 2004.
- McMahan, William, Jones, Bryan, Walker, Ian D. **Design and Implementation of a Multi-Section Continuum Robot: Air-Octor,** IEEE/RSJ International Conference – IROS, pg 2578 – 2585, 2005.
- Merlet, J. P. **Parallel Robots.** Springer, 2006.
- Migadis, G. e Kyriakopoulos, Konstantinos. J. **Design and Forward Kinematic – Analysis of a Robot Snake.** In proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. pg 3493-3498, 1997.
- Nakamura, N.; Sekiguchi, M.; Kawashima, K.; Fujita, T.; Kagawa, T. **Developing a robot arm using pneumatic artificial rubber muscles.** Bath Workshop on Power Transmission & Motion Control. 2002.
- Paljug, E., Ohm, T., e Hayati, S. **The JPL Serpentine Robot: a 12 DOF System for Inspection.** IEEE Conference on Robotics and Automation, 3143–3148, 1995.

Robinson, Graham e Davies, John B. C. **Continuum Robos - A State of the Art.** IEEE International Conference on Robotics and Automation. pp. 2849-2854, 1999.

Sakai, N. Sawae, Y. Murakami, T. **A Development of Joint Mechanism of Robot Arm Based on Human Shoulder Mechanism.** IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. pg 982-987, 2006.

Scofano, Felipe, S. **Desenvolvimento de um Elo Pneumático de 3 Graus de Liberdade para Manipuladores Flexíveis.** Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica. 2006.

Shadow Robot Company. **Design of a Dextrous Hand for advanced CLAWAR.** Professional Engineering Publications. 2003.

Shoham, M., et al. **Bone-mounted miniature robot for surgical procedures: Concept and clinical applications.** IEEE Transactions on Robotics and Automation, pp. 893- 901, 2003.

Spong, Mark W., Hutchinson, Seth e Vidyasagar, M. **Robot Dynamics and Control.** Robot Dynamics and Control. s.l. : John Wiley & Sons, 1989.

Suthakorn, Jackrit. **Binary Hyper-Redundant Robotic Manipulator Concept.** IEEE Region 10 Conference, pg. 625- 628 Vol. 4, 2004.

Thompson, C. J. e Campbell, P. D. **Tendon suspended platform robot.** US Patent 5585707 United States, 1996.

Tsai, Lung-Wen. 1999. **Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators.** John Wiley & Sons, 1999.

US Army Center for Tanks Research. 2008. <http://www.fas.org/>. *Federation of American Scientists*. [Online] 2008. [Citado em: 20 de Junho de 2008.] http://www.fas.org/man/dod-101/army/docs/astmp98/sec6d1_3.htm.

Walker, I.D., Hannan, M.W. **A Novel Elephant's Trunk Robot.** IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 410-415, 1999.

Walker, I.D. **Some issues in creating “invertebrate” robots.** International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machine. Canada. 2000.

Wakimoto, Shuichi, et al. **A Micro Snake-like Robot for Small Pipe Inspection.** International Symposium on Micromechatronics and Human Science. 2003.

Wilson, J.F. Li, D., Chen, Z. George, R.T. **Flexible Robot Manipulators and Grippers: Relatives of Elephant Trunks and Squid Tentacles.** Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics? pp. 474-494. 1993.

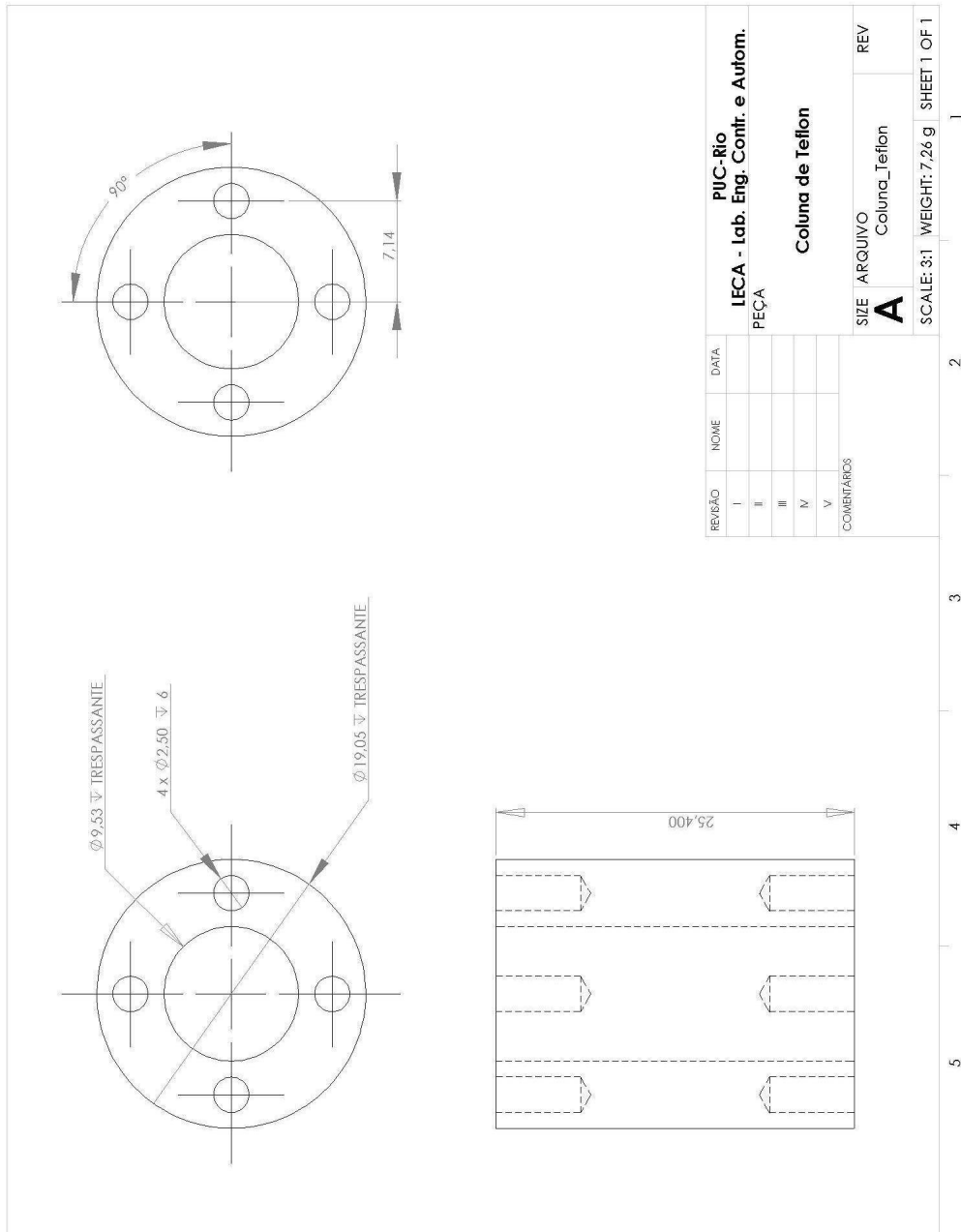
Wolf, A., et al. **A Mobile Hyper Redundant Mechanism for Search and Rescue Tasks.** Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems. 2003.

Yamamoto, Shinji. **Development of Inspection Robot for Nuclear Pover Plant.** International Conference on Robotics and Automation. 1992.

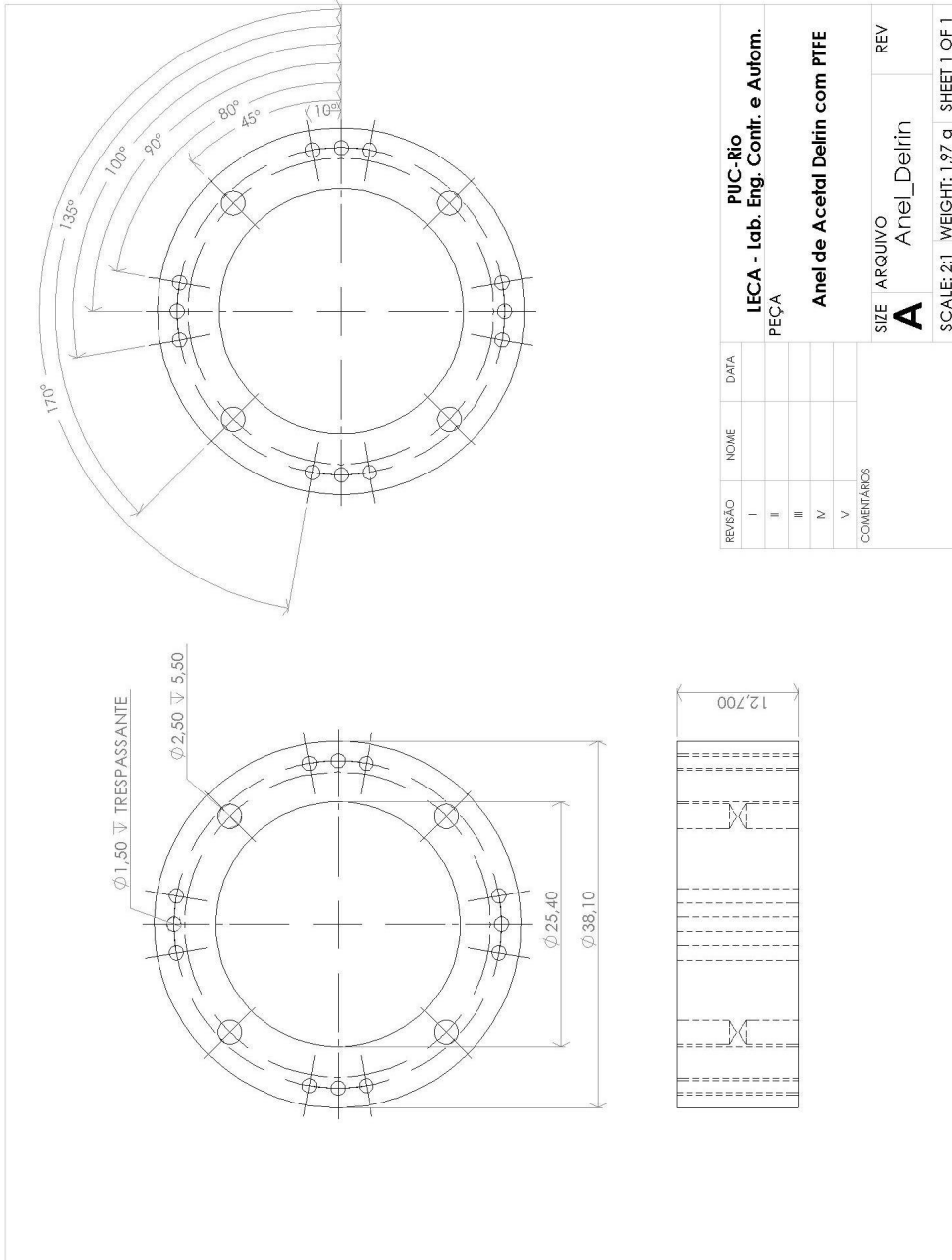
8. Anexos

- I. Desenhos Técnicos das Peças do Manipulador.
- II. Propriedades Mecânicas das Peças do Manipulador.
- III. *Datasheet* muRata SV01.
- IV. Códigos CNC.
- V. Código do Protocolo de Transmissão.
- VI. Cabeçalhos de Funções
- VII. Programação no *LabView*
- VIII. Tabelas de Resultados
- IX. Funções *Toolbox Robot*

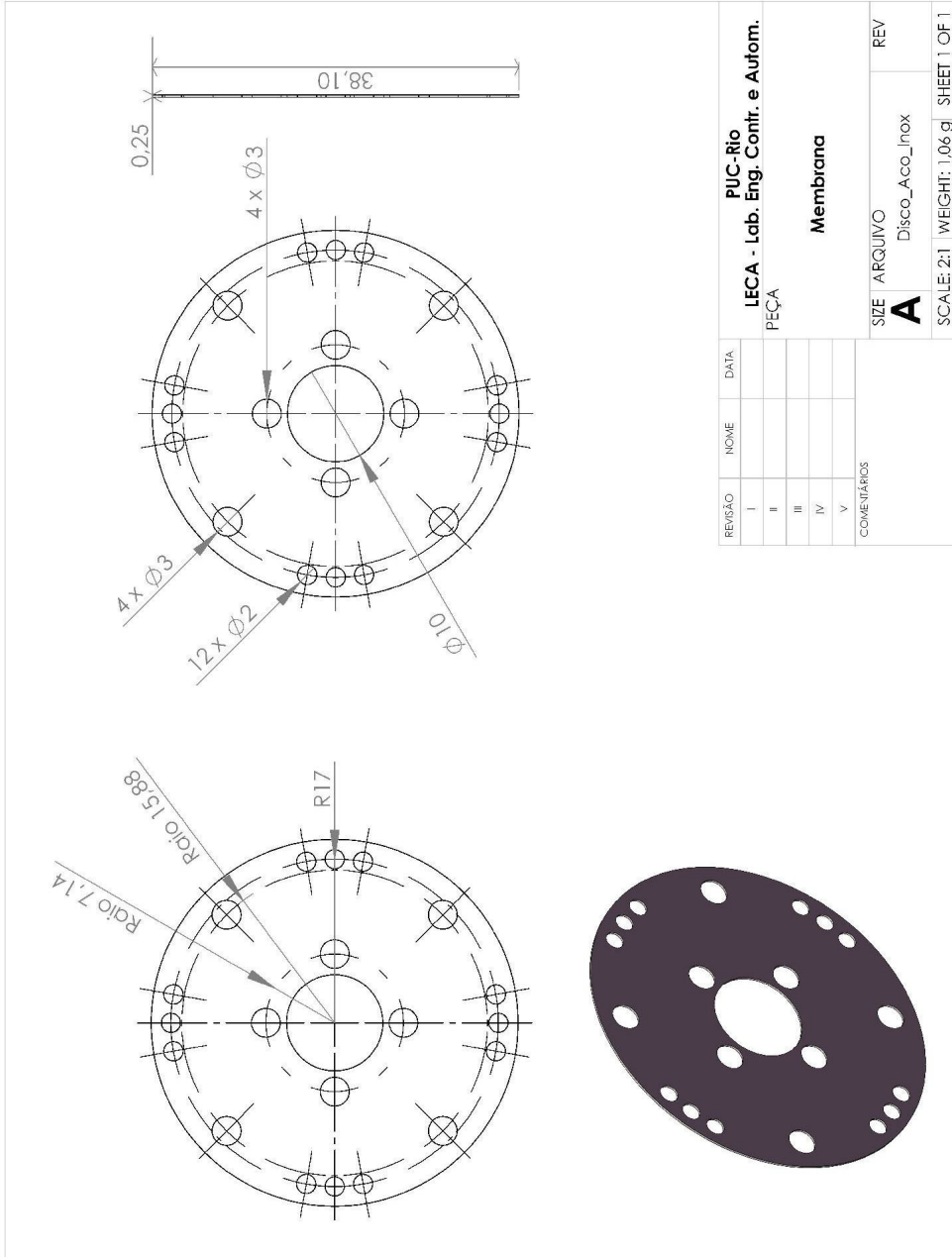
Anexo I
Desenhos Técnicos das Peças do Manipulador.
Desenho Técnico da Coluna



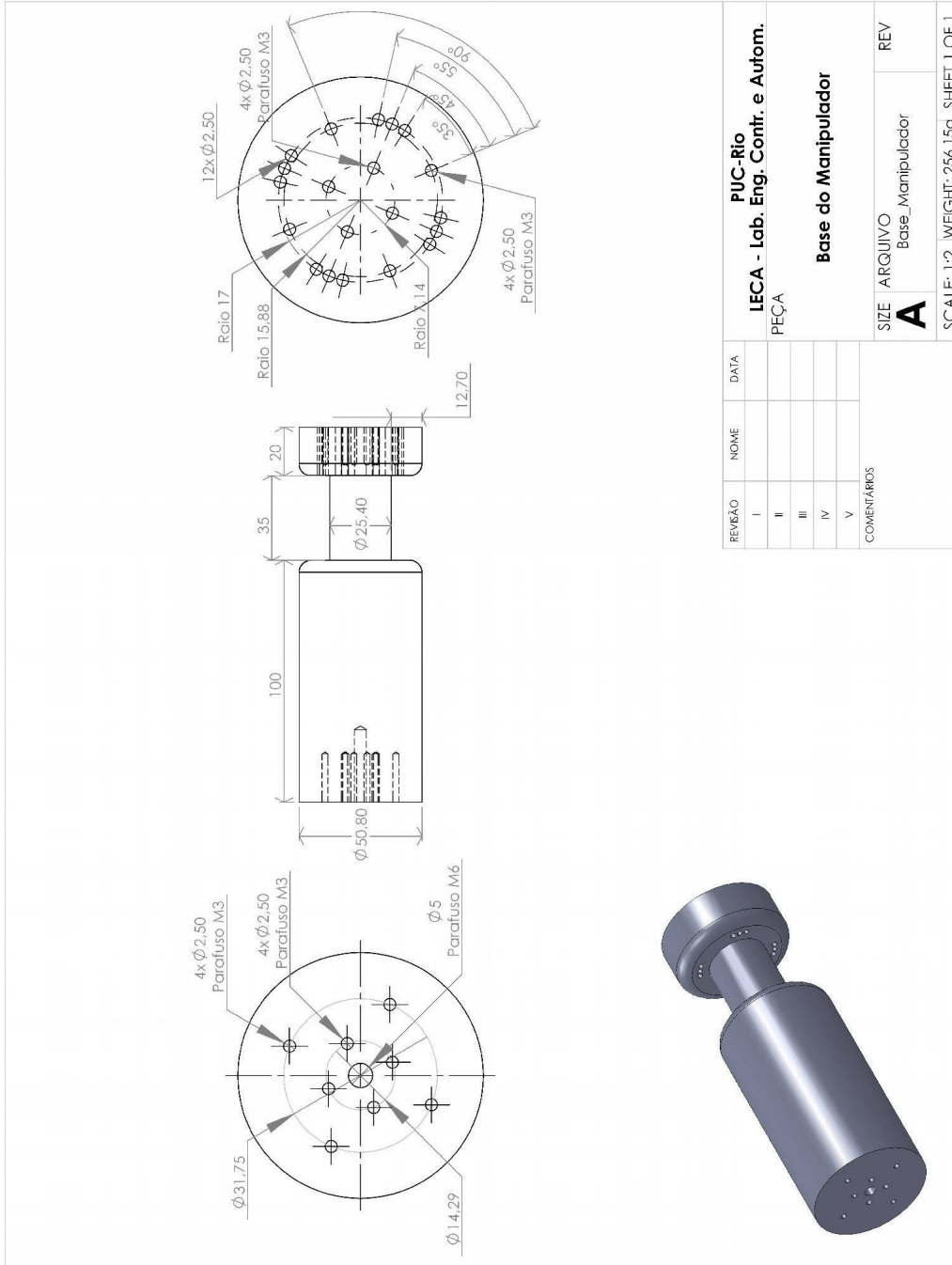
Desenho Técnico do Anel



Desenho Técnico da Membrana



Desenho Técnico da Base do Manipulador



REVISOÃO	NOME	DATA
I		
II		
III		
IV		
V		

COMENTÁRIOS

PUC-Rio
IECA - Lab. Eng. Contr. e Autom.
 PEÇA

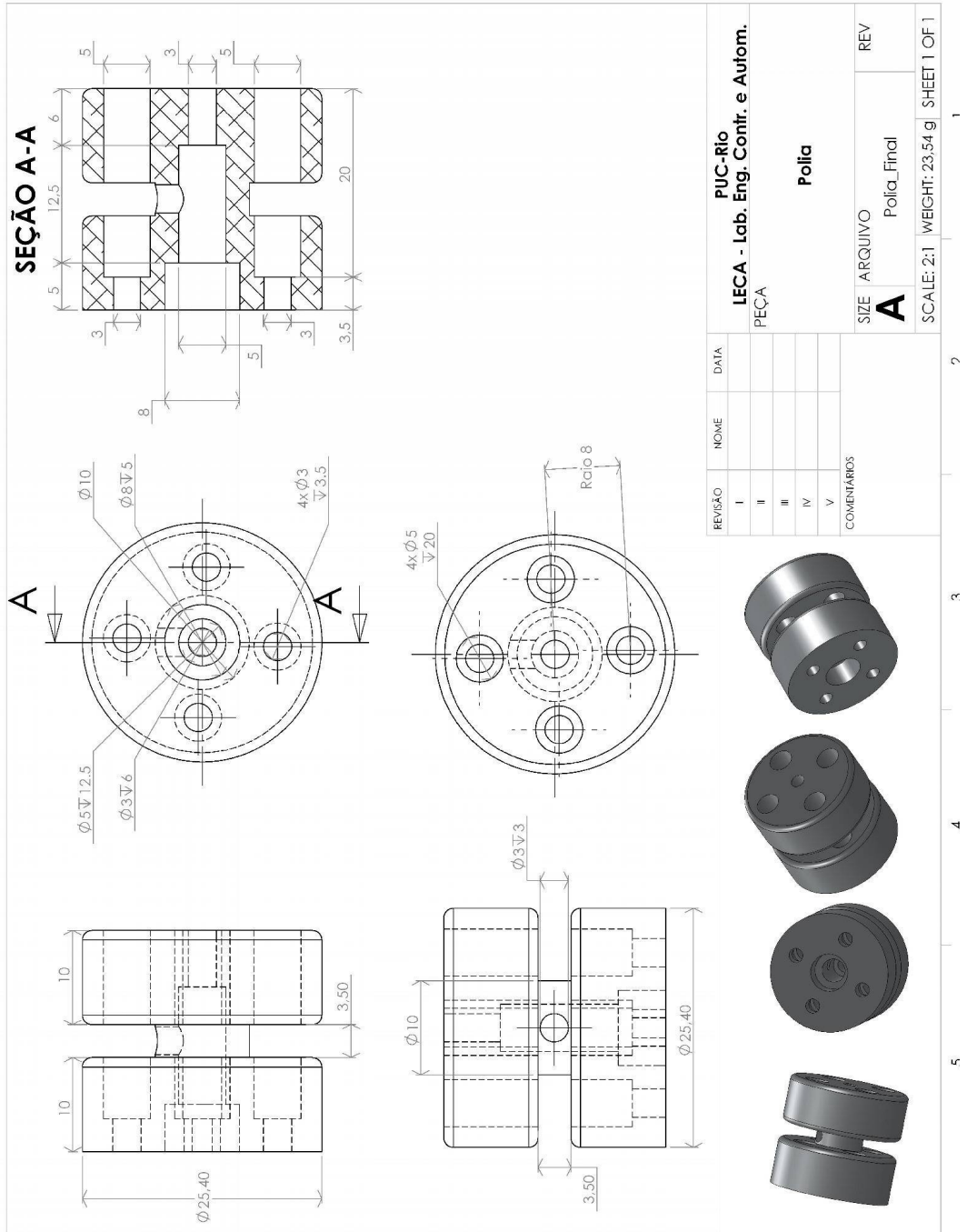
Base do Manipulador

SIZE ARQUIVO
A Base_Manipulador
 REV

SCALE: 1:2 WEIGHT: 256,15g SHEET 1 OF 1

1 2 3 4 5

Desenho Técnico da Polia



Anexo II

Propriedades Mecânicas das Peças Utilizadas no Manipulador.

304 Stainless Steel

Categories: [Metal](#); [Ferrous Metal](#); [Heat Resisting](#); [Stainless Steel](#); [T 300 Series Stainless Steel](#)

Material Notes: Austenitic Cr-Ni stainless steel. Better corrosion resistance than Type 302. High ductility, excellent drawing, forming, and spinning properties. Essentially non-magnetic, becomes slightly magnetic when cold worked. Low carbon content means less carbide precipitation in the heat-affected zone during welding and a lower susceptibility to intergranular corrosion.

Applications: beer kegs, bellows, chemical equipment, coal hopper linings, cooking equipment, cooling coils, cryogenic vessels, dairy equipment, evaporators, flatware utensils, feedwater tubing, flexible metal hose, food processing equipment, hospital surgical equipment, hypodermic needles, kitchen sinks, marine equipment and fasteners, nuclear vessels, oil well filter screens, refrigeration equipment, paper industry, pots and pans, pressure vessels, sanitary fittings, valves, shipping drums, spinning, still tubes, textile dyeing equipment, tubing.




Corrosion Resistance: resists most oxidizing acids and salt spray.

UNS S30400; AMS 5501, 5513, 5560, 5565; ASME SA182, SA194 (B), SA213, SA240; ASTM A167, A182, A193, A194

Key Words: aisi304, aisi 304, T304, T 304, SUS304, SS304, 304SS, 304 SS, UNS S30400, AMS 5501, AMS 5513, AMS 5560, AMS 5565, AMS 5566, AMS 5567, AMS 5639, AMS 5697, ASME SA182, ASME SA194 (B), ASME SA213, ASME SA240, ASME SA249, ASME SA312, ASME SA320 (B8), ASME SA358, ASME SA376, ASME SA403, ASME SA409, ASME SA430, ASME SA479, ASME SA688, ASTM A167, ASTM A182, ASTM A193, ASTM A194, ASTM A666, FED QQ-S-763, MILSPEC ML-S-5059, SAE 30304, DIN 1.4301, X5CrNi189, B.S. 304 S 15, EN 58E, PN 86020 (Poland), OH18N9, ISO 4954 X5CrNi189E, ISO 683/13 11, 18-8

Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	8.00 g/cc	0.289 lb/in ³	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	123	123	Converted from Rockwell B hardness.
Hardness, Knoop	138	138	Converted from Rockwell B hardness.
Hardness, Rockwell B	70	70	
Hardness, Vickers	129	129	Converted from Rockwell B hardness.
Tensile Strength, Ultimate	505 MPa	73200 psi	
Tensile Strength, Yield	215 MPa	31200 psi	at 0.2% offset
Elongation at Break	70.0 %	70.0 %	in 50 mm
Modulus of Elasticity	193 - 200 GPa	28000 - 29000 ksi	
Poissons Ratio	0.290	0.290	
Charpy Impact	325 J	240 ft-lb	
Shear Modulus	86.0 GPa	12500 ksi	
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity 	0.0000720 ohm-cm @Temperature 20.0 °C	0.0000720 ohm-cm @Temperature 68.0 °F	
	0.000116 ohm-cm @Temperature 650 °C	0.000116 ohm-cm @Temperature 1200 °F	
Magnetic Permeability	1.008	1.008	at RT
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear 	17.3 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 100 °C	9.61 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 212 °F	
	17.8 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 315 °C	9.89 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 599 °F	
	18.7 µm/m-°C @Temperature 0.000 - 650 °C	10.4 µin/in-°F @Temperature 32.0 - 1200 °F	
Specific Heat Capacity	0.500 J/g-°C @Temperature 0.000 - 100 °C	0.120 BTU/lb-°F @Temperature 32.0 - 212 °F	
Thermal Conductivity 	16.2 W/m-K @Temperature 0.000 - 100 °C	112 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 32.0 - 212 °F	
	21.5 W/m-K @Temperature 500 °C	149 BTU-in/hr-ft ² -°F @Temperature 932 °F	
Melting Point	1400 - 1455 °C	2550 - 2651 °F	
Solidus	1400 °C	2550 °F	
Liquidus	1455 °C	2651 °F	
Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	<= 0.080 %	<= 0.080 %	
Chromium, Cr	18.0 - 20.0 %	18.0 - 20.0 %	
Iron, Fe	66.345 - 74.0 %	66.345 - 74.0 %	
Manganese, Mn	<= 2.0 %	<= 2.0 %	
Nickel, Ni	8.0 - 10.5 %	8.0 - 10.5 %	
Phosphorous, P	<= 0.045 %	<= 0.045 %	
Silicon, Si	<= 1.0 %	<= 1.0 %	
Sulfur, S	<= 0.030 %	<= 0.030 %	











Overview of materials for Nylon 6, Heat Stabilized


Categories: [Polymer](#); [Thermoplastic](#); [Nylon](#); [Nylon 6](#); [Nylon 6, Heat Stabilized](#)

Material Notes: This property data is a summary of similar materials in the MatWeb database for the category "Nylon 6, Heat Stabilized". Each property range of values reported is minimum and maximum values of appropriate MatWeb entries. The comments report the average value, and number of data points used to calculate the average. The values are not necessarily typical of any specific grade, especially less common values and those that can be most affected by additives or processing methods.

Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Bulk Density	0.700 g/cc	0.0253 lb/in ³	Average value: 0.700 g/cc Grade Count:4
Density	1.06 - 1.58 g/cc	0.0383 - 0.0571 lb/in ³	Average value: 1.19 g/cc Grade Count:96
Filler Content	13.0 - 40.0 %	13.0 - 40.0 %	Average value: 27.2 % Grade Count:10
Water Absorption	0.450 - 10.0 %	0.450 - 10.0 %	Average value: 2.22 % Grade Count:47
Moisture Absorption at Equilibrium	0.250 - 3.00 %	0.250 - 3.00 %	Average value: 2.40 % Grade Count:21
Water Absorption at Saturation	6.00 - 9.50 %	6.00 - 9.50 %	Average value: 7.74 % Grade Count:17
Viscosity Measurement	2.60 - 200	2.60 - 200	Average value: 60.0 Grade Count:7
Viscosity Test	142 - 220 cm ² /g	142 - 220 cm ² /g	Average value: 194 cm ² /g Grade Count:3
Linear Mold Shrinkage	0.00200 - 0.0200 cm/cm	0.00200 - 0.0200 in/in	Average value: 0.00964 cm/cm Grade Count:60
	0.00500 - 0.00960 cm/cm @Temperature 280 - 280 °C	0.00500 - 0.00960 in/in @Temperature 538 - 554 °F	Average value: 0.00777 cm/cm Grade Count:4
	0.00500 - 0.00960 cm/cm @Pressure 50.0 - 60.0 MPa	0.00500 - 0.00960 in/in @Pressure 7250 - 8700 psi	Average value: 0.00777 cm/cm Grade Count:4
Linear Mold Shrinkage, Transverse	0.00500 - 0.0160 cm/cm	0.00500 - 0.0160 in/in	Average value: 0.0116 cm/cm Grade Count:9
	0.00500 - 0.00960 cm/cm @Temperature 280 - 280 °C	0.00500 - 0.00960 in/in @Temperature 538 - 554 °F	Average value: 0.00673 cm/cm Grade Count:4
	0.00500 - 0.00960 cm/cm @Pressure 50.0 - 60.0 MPa	0.00500 - 0.00960 in/in @Pressure 7250 - 8700 psi	Average value: 0.00673 cm/cm Grade Count:4
Melt Flow	3.60 - 30.0 g/10 min	3.60 - 30.0 g/10 min	Average value: 16.8 g/10 min Grade Count:4
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell R	78.0 - 121	78.0 - 121	Average value: 109 Grade Count:20
Ball Indentation Hardness	60.0 - 230 MPa	8700 - 33400 psi	Average value: 146 MPa Grade Count:14
Tensile Strength, Ultimate	37.9 - 107 MPa	5500 - 15500 psi	Average value: 71.2 MPa Grade Count:25
	21.0 - 60.0 MPa @Temperature 60.0 - 130 °C	3050 - 8700 psi @Temperature 140 - 240 °F	Average value: 40.2 MPa Grade Count:2
Tensile Strength, Yield	29.0 - 221 MPa	4200 - 32000 psi	Average value: 85.6 MPa Grade Count:79
Elongation at Break	1.50 - 300 %	1.50 - 300 %	Average value: 65.4 % Grade Count:66
Elongation at Yield	3.00 - 25.0 %	3.00 - 25.0 %	Average value: 6.53 % Grade Count:25
Creep Strength	4.00 - 20.0 MPa	580 - 2900 psi	Average value: 11.9 MPa Grade Count:10
Modulus of Elasticity	0.600 - 8.50 GPa	87.0 - 1230 ksi	Average value: 3.15 GPa Grade Count:26
Flexural Modulus	0.614 - 13.1 GPa	89.0 - 1900 ksi	Average value: 3.65 GPa Grade Count:86
	0.450 - 3.70 GPa @Temperature 60.0 - 130 °C	65.3 - 537 ksi @Temperature 140 - 240 °F	Average value: 1.54 GPa Grade Count:2
Flexural Yield Strength	28.0 - 317 MPa	4060 - 46000 psi	Average value: 115 MPa Grade Count:80
Compressive Yield Strength	29.0 - 147 MPa	4210 - 21300 psi	Average value: 66.6 MPa Grade Count:12
Poissons Ratio	0.350	0.350	Average value: 0.350 Grade Count:4
Izod Impact, Unnotched (ISO)	35.0 - 90.0 kJ/m ²	16.7 - 42.8 ft-lb/in ²	Average value: 53.8 kJ/m ² Grade Count:4
	60.0 - 60.0 kJ/m ² @Temperature -30.0 - -30.0 °C	28.6 - 28.6 ft-lb/in ² @Temperature -22.0 - -22.0 °F	Average value: 60.0 kJ/m ² Grade Count:2
Charpy Impact Unnotched	2.10 J/cm ² - NB	9.99 ft-lb/in ² - NB	Average value: 6.77 J/cm ² Grade Count:13
	1.70 J/cm ² - NB @Temperature -40.0 - -20.0 °C	8.09 ft-lb/in ² - NB @Temperature -40.0 - -4.00 °F	Average value: 5.10 J/cm ² Grade Count:7
Charpy Impact, Notched	0.430 J/cm ² - NB	2.05 ft-lb/in ² - NB	Average value: 2.38 J/cm ² Grade Count:10
	0.380 - 1.00 J/cm ² @Temperature -30.0 - -30.0 °C	1.81 - 4.76 ft-lb/in ² @Temperature -22.0 - -22.0 °F	Average value: 0.603 J/cm ² Grade Count:7
Coefficient of Friction	0.0400 - 0.390	0.0400 - 0.390	Average value: 0.200 Grade Count:13
Tear Strength Test	0.150 - 0.250	0.150 - 0.250	Average value: 0.190 Grade Count:10
K Factor (Wear Factor)	9.00e-11 - 0.440	9.00e-11 - 0.440	Average value: 0.0400 Grade Count:11
Izod Impact, Notched	0.300 - 5340 J/cm	0.562 - 10000 ft-lb/in	Average value: 1.39 J/cm Grade Count:66
Izod Impact, Notched (ISO)	2.50 - 100000 kJ/m ²	1.19 - 47600 ft-lb/in ²	Average value: 9.41 kJ/m ² Grade Count:17
	7.00 - 8.00 kJ/m ² @Temperature -30.0 - -30.0 °C	3.33 - 3.81 ft-lb/in ² @Temperature -22.0 - -22.0 °F	Average value: 7.50 kJ/m ² Grade Count:2
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Electrical Resistivity	1.00e+11 - 1.00e+15 ohm-cm	1.00e+11 - 1.00e+15 ohm-cm	Average value: 2.86e+14 ohm-cm Grade Count:26
Surface Resistance	1.00e+10 - 1.00e+15 ohm	1.00e+10 - 1.00e+15 ohm	Average value: 6.11e+13 ohm Grade Count:17
Dielectric Constant	2.00 - 7.00	2.00 - 7.00	Average value: 3.60 Grade Count:17
Dielectric Strength	16.5 - 80.0 kV/mm	420 - 2030 kV/in	Average value: 30.2 kV/mm Grade Count:27
Dielectric Loss Index	0.0300	0.0300	Average value: 0.0300 Grade Count:10
Comparative Tracking Index	375 - 600 V	375 - 600 V	Average value: 542 V Grade Count:12
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	30.6 - 130 μm/m-°C	17.0 - 72.2 μin/in-°F	Average value: 70.6 μm/m-°C Grade Count:38
CTE, linear, Transverse to Flow	60.0 - 140 μm/m-°C	33.3 - 77.8 μin/in-°F	Average value: 110 μm/m-°C Grade Count:7
Specific Heat Capacity	1.67 J/g-°C	0.399 BTU/lb-°F	Average value: 1.67 J/g-°C Grade Count:10
Thermal Conductivity	0.250 W/m-K	1.74 BTU-in/hr-ft ² -°F	Average value: 0.250 W/m-K Grade Count:10
Melting Point	215 - 224 °C	419 - 434 °F	Average value: 220 °C Grade Count:45
Maximum Service Temperature, Air	80.0 - 190 °C	176 - 374 °F	Average value: 146 °C Grade Count:15
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	105 - 216 °C	221 - 420 °F	Average value: 187 °C Grade Count:50
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	45.0 - 221 °C	113 - 430 °F	Average value: 100 °C Grade Count:75
Vicat Softening Point	166 - 205 °C	331 - 401 °F	Average value: 186 °C Grade Count:5
	205 - 210 °C @Temperature 120 - 130 °C	401 - 410 °F @Temperature 248 - 248 °F	Average value: 208 °C Grade Count:1
	205 - 210 °C @Load 0.999 - 9.00 kg	401 - 410 °F @Load 2.20 - 11.0 lb	Average value: 208 °C Grade Count:1
Minimum Service Temperature, Air	-100 - -40.0 °C	-148 - -40.0 °F	Average value: -45.0 °C Grade Count:11
Flammability, UL94	HB - 5VB	HB - 5VB	Grade Count:31
Oxygen Index	26.0 - 30.0 %	26.0 - 30.0 %	Average value: 28.3 % Grade Count:3
Glow Wire Test	775 - 960 °C	1430 - 1760 °F	Average value: 905 °C Grade Count:43
Shrinkage 	0.0500 - 0.250 %	0.0500 - 0.250 %	Average value: 0.112 % Grade Count:4
	0.0500 - 0.250 % @Temperature 120 - 120 °C	0.0500 - 0.250 % @Temperature 248 - 248 °F	Average value: 0.112 % Grade Count:4
	0.0500 - 0.250 % @Time 4:00 - 4:00 hour	0.0500 - 0.250 % @Time 4:00 - 4:00 hour	Average value: 0.112 % Grade Count:4

Processing Properties	Metric	English	Comments
Processing Temperature	40.0 - 293 °C	104 - 560 °F	Average value: 251 °C Grade Count:66
Rear Barrel Temperature	138 - 282 °C	280 - 540 °F	Average value: 235 °C Grade Count:15
Middle Barrel Temperature	227 - 277 °C	440 - 530 °F	Average value: 244 °C Grade Count:15
Front Barrel Temperature	227 - 271 °C	440 - 520 °F	Average value: 251 °C Grade Count:15
Nozzle Temperature	227 - 293 °C	440 - 560 °F	Average value: 249 °C Grade Count:15
Head Temperature	230 - 250 °C	446 - 482 °F	Average value: 244 °C Grade Count:4
Mold Temperature	21.1 - 121 °C	70.0 - 250 °F	Average value: 80.0 °C Grade Count:53
Drying Temperature	73.9 - 100 °C	165 - 212 °F	Average value: 78.8 °C Grade Count:45
Dry Time	2.00 - 12.0 hour	2.00 - 12.0 hour	Average value: 3.69 hour Grade Count:33
	2.00 - 4.00 hour	2.00 - 4.00 hour	Average value: 3.00 hour Grade Count:11
	@Temperature 79.4 - 79.4 °C	@Temperature 175 - 175 °F	
Moisture Content	0.0500 - 0.200 %	0.0500 - 0.200 %	Average value: 0.174 % Grade Count:25
Injection Pressure	3.45 - 172 MPa	500 - 25000 psi	Average value: 17.5 MPa Grade Count:18
Back Pressure	0.000 - 1.72 MPa	0.000 - 250 psi	Average value: 0.450 MPa Grade Count:37
Shot Size	30.0 - 80.0 µm	30.0 - 80.0 µm	Average value: 55.0 µm Grade Count:13
Screw Speed	20.0 - 120 rpm	20.0 - 120 rpm	Average value: 73.9 rpm Grade Count:37

DuPont™ Delrin® AF Blend, Acetal homopolymer, PTFE-filled, extruded

Categories: [Polymer](#); [Thermoplastic](#); [Acetal](#); [Acetal Homopolymer, PTFE-Filled](#); [Filled/Reinforced Thermoplastic](#)

Material Notes: Delrin® AF Blend acetal is a unique thermoplastic material for use in moving parts in which low friction and long wear are important. It is a combination of Teflon® fibers uniformly dispersed in Delrin acetal resin. This combination produces a material that has strength, toughness, dimensional stability and good machinability, plus improved wear characteristics over unfilled Delrin. Delrin AF Blend, most commonly supplied as a 2:1 blend of Delrin AF100 and Delrin 150 resins, has excellent sliding/friction properties. Bearings made of Delrin AF Blend sustain high loads when operating at high speeds and show reduced wear. These bearings are also essentially free of slip-stick behavior because the static and dynamic coefficient of friction are closer than with most plastics. Delrin AF Blend retains much of the strength that is inherent in unmodified Delrin acetal. Some properties are changed due to the addition of the softer Teflon fiber. The natural color of Delrin AF Blend is dark brown.

Data provided by Quadrant Engineering Plastic Products from tests on stock shapes and parts produced by Quadrant EPP.

Key Words: Quadrant Engineering Plastics Products; POM, Polyoxymethylene; Polyformaldehyde; Polyacetal

Vendors: [Click here to view all available suppliers for this material.](#)

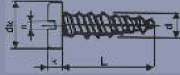
Please [click here](#) if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Specific Gravity	1.50 g/cc	1.50 g/cc	ASTM D792
Water Absorption	0.200 %	0.200 %	Immersion, 24hr; ASTM D570(2)
Water Absorption at Saturation	1.00 %	1.00 %	Immersion; ASTM D570(2)
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell M	85	85	ASTM D785
Hardness, Rockwell R	115	115	ASTM D785
Hardness, Shore D	83	83	ASTM D2240
Tensile Strength, Ultimate	55.2 MPa	8000 psi	ASTM D638
Elongation at Break	15.0 %	15.0 %	ASTM D638
Tensile Modulus	3.00 GPa	435 ksi	ASTM D638
Flexural Modulus	3.07 GPa	445 ksi	ASTM D790
Flexural Yield Strength	82.7 MPa	12000 psi	ASTM D790
Compressive Strength	110 MPa	16000 psi	10% Def.; ASTM D695
Compressive Modulus	2.41 GPa	350 ksi	ASTM D695
Shear Strength	52.4 MPa	7600 psi	ASTM D732
Coefficient of Friction	0.190	0.190	Dry vs. Steel; QTM55007
K (wear) Factor	121 x 10 ⁻⁹ mm ³ /N·m	60.0 x 10 ⁻¹⁰ in ³ -min/ft-lb-hr	QTM 55010
Limiting Pressure Velocity	0.291 MPa-m/sec	8300 psi-ft/min	4:1 safety factor; QTM 55007
Izod Impact, Notched	0.374 J/cm	0.700 ft-lb/in	ASTM D256 Type A
Electrical Properties	Metric	English	Comments
Surface Resistivity per Square	>= 1.00e+13 ohm	>= 1.00e+13 ohm	EOS/ESD S11.11
Dielectric Constant	3.10	3.10	ASTM D150
	@Frequency 1e+6 Hz	@Frequency 1e+6 Hz	
Dielectric Strength	15.7 kV/mm	400 kV/in	Short Term; ASTM D149
Dissipation Factor	0.0100	0.0100	ASTM D150
	@Frequency 1e+6 Hz	@Frequency 1e+6 Hz	
Thermal Properties	Metric	English	Comments
CTE, linear	90.0 µm/m-°C	50.0 µin/in-°F	ASTM E831
	@Temperature -40.0 - 149 °C	@Temperature -40.0 - 300 °F	
Melting Point	175 °C	347 °F	Crystalline, Peak; ASTM D3418
Maximum Service Temperature, Air	82.2 °C	180 °F	Long Term
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	118 °C	244 °F	ASTM D648
Flammability, UL94	HB	HB	1/8 Inch (Estimated Rating)
Descriptive Properties			
Compliance - FDA		Not Compliant	
Machinability		1	1-10, 1=Easier to Machine
Service in Alcohols		Acceptable	
Service in Aliphatic Hydrocarbons		Acceptable	
Service in Aromatic Hydrocarbons		Acceptable	
Service in Chlorinated Solvents		Limited	
Service in Ethers		Acceptable	
Service in Ketones		Acceptable	
Service in Strong Acids		Unacceptable	
Service in Strong Alkalis		Unacceptable	
Service in Sunlight		Limited	
Service in Weak Acids		Limited	

Parafuso Auto-Atarraxante

Cabeça Panela com Fenda

Aço Baixo Carbono Cimentado



Acabamento - Zincado Branco
Dimensões - DIN 7971
Rosca - DIN 7970



Tabela de Dimensões

(d) diâmetro	2,2	2,9	3,5	3,9	4,2	4,8	5,5	6,3
p (rosca/passo)	0,8	1,1	1,3	1,3	1,4	1,6	1,8	1,8
k (altura cabeça)	1,35	1,75	2,1	2,25	2,45	2,8	3,2	3,65
dk (diâmetro cabeça)	4,2	5,6	6,9	7,5	8,2	9,5	10,8	12,5
n (fenda)	0,6	0,8	1	1	1,2	1,2	1,6	1,6

DIÂMETRO COMPRIMENTO	2,2	2,9	3,5	3,9	4,2	4,8	5,5	6,3
	6,5	⁵⁰⁰ 02294	⁵⁰⁰ 02297	⁵⁰⁰ 02302				
9,5	⁵⁰⁰ 02295	⁵⁰⁰ 02298	⁵⁰⁰ 02303	⁵⁰⁰ 02309	⁵⁰⁰ 02316	⁵⁰⁰ 02324		
13	⁵⁰⁰ 02296	⁵⁰⁰ 02299	⁵⁰⁰ 02304	⁵⁰⁰ 02310	⁵⁰⁰ 02317	⁵⁰⁰ 02325	⁵⁰⁰ 02334	²⁰⁰ 02343
16		⁵⁰⁰ 02300	⁵⁰⁰ 02305	⁵⁰⁰ 02311	⁵⁰⁰ 02318	⁵⁰⁰ 02326	⁵⁰⁰ 02335	²⁰⁰ 02344
19		⁵⁰⁰ 02301	⁵⁰⁰ 02306	⁵⁰⁰ 02312	⁵⁰⁰ 02319	⁵⁰⁰ 02327	²⁰⁰ 02336	²⁰⁰ 02345
22			⁵⁰⁰ 02307	⁵⁰⁰ 02313	⁵⁰⁰ 02320	⁵⁰⁰ 02328	⁵⁰⁰ 02337	²⁰⁰ 02346
25			⁵⁰⁰ 02308	⁵⁰⁰ 02314	⁵⁰⁰ 02321	⁵⁰⁰ 02329	⁵⁰⁰ 02338	²⁰⁰ 02347
32				⁵⁰⁰ 02315	⁵⁰⁰ 02322	⁵⁰⁰ 02330	⁵⁰⁰ 02339	²⁰⁰ 02348
38					⁵⁰⁰ 02323	⁵⁰⁰ 02331	⁵⁰⁰ 02340	²⁰⁰ 02349
45						²⁰⁰ 02332	²⁰⁰ 02341	²⁰⁰ 02350
50						²⁰⁰ 02333	²⁰⁰ 02342	²⁰⁰ 02351

Anexo III

Datasheet muRata SV01.

1) Note • This PDF catalog is downloaded from the website of Murata Manufacturing Co., Ltd. Therefore, it's specifications are subject to change or our products in it may be discontinued without advance notice. Please check with our sales representatives or product engineers before ordering.
 • This PDF catalog has only typical specifications because there is no space for detailed specifications. Therefore, please approve our product specifications or transmit the approval sheet for product specifications before ordering.

R50E.pdf
05.9.9

Rotary Position Sensors



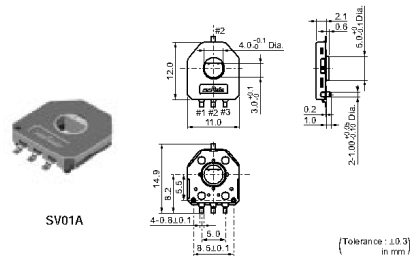
SMD/Lead Dust-proof Type 12mm Size SV01 Series

■ Features

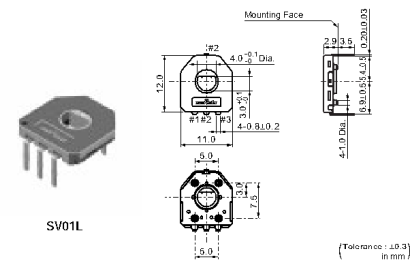
1. Dust-proof construction protects the interior from dust, which maintains stable characteristics.
2. Compliant to high peak temperature lead free soldering.
3. Excellent resistance materials and high reliability wiper achieves 1M cycles.
4. D formation thru-hole rotor enables selection of any kind of gear shape.
5. Both D formation thru-hole rotor and T formation thru-hole rotor are available.
6. Leaded terminal type is available.
7. Ultra-thin size (2.1mm height)
8. Au plated terminals without Lead.

■ Applications

1. Animal robot
2. Switch for automotive
3. Motor drive unit
4. Radio control equipment
5. Electric motor-driven bicycle

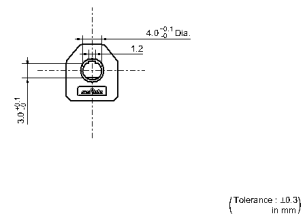


SV01A



SV01L

■ T formation Thru-hole rotor



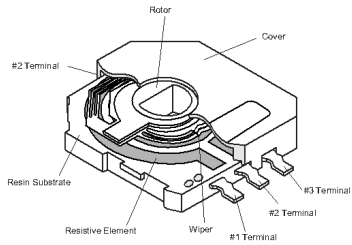
Part Number	Total Resistance Value (k ohm)	Linearity (%)	Effective Rotational Angle	TCR	Rotational Life
SV01A103□EA01	10 ±30%	±2	333.3° (Ref.)	±500ppm/°C	1M cycles
SV01L103□EA11	10 ±30%	±2	333.3° (Ref.)	±500ppm/°C	1M cycles

A blank column is filled with Rotor Formation Codes. (A: D formation thru-hole rotor C: T formation thru-hole rotor)

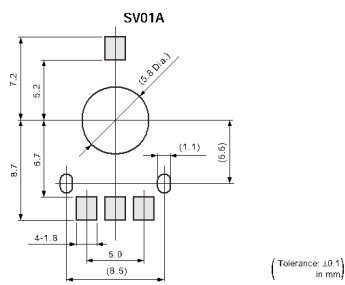
Note • This PDF catalog is downloaded from the website of Murata Manufacturing Co., Ltd. Therefore, its specifications are subject to change or our products in it may be discontinued without advance notice. Please check with our sales representatives or product engineers before ordering.
 • This PDF catalog has only typical specifications because there is no space for detailed specifications. Therefore, please approve our product specifications or transact the approval sheet for product specifications before ordering.

R50E.pdf
05.9.9

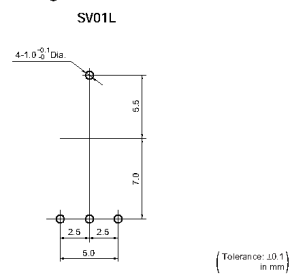
■ Construction



■ Standard Land Pattern



■ Standard Mounting Holes



■ Characteristics

Temperature Cycle (Thermal Shock)	ΔTR	±20%
	Linearity	±3%
Humidity	ΔTR	±20%
	Linearity	±3%
Vibration	ΔTR	±10%
	Linearity	±3%
Shock (20G)	ΔTR	±10%
	Linearity	±3%
Humidity Load Life	ΔTR	±20%
	Linearity	±3%
High Temperature Exposure	ΔTR	+5/-30%
	Linearity	±3%
Low Temperature Exposure	ΔTR	±20%
	Linearity	±3%
Rotational Life (1M cycles)	ΔTR	±20%
	Linearity	±3%

ΔTR: Total Resistance Change

SV01 Series Notice

■ Notice (Operating and Storage Conditions)

1. Store in temperatures of -10 to +40deg. C and relative humidity of 30-85%RH.
2. Do not store in or near corrosive gases.
3. Use within six months after delivery.
4. Open the package just before using.
5. Do not store under direct sunlight.
6. Do not use the rotary position sensor under the following environmental conditions. If you use the rotary position sensor in an environment other than these listed below, please consult with Murata factory representative prior to using.
 - (1) Corrosive gasses atmosphere
(Ex. Chlorine gas, Hydrogen sulfide gas, Ammonia gas, Sulfuric acid gas, Nitric oxide gas, etc.)
 - (2) In liquid
(Ex. Water, Oil, Medical liquid, Organic solvent, etc.)
 - (3) Dusty / dirty atmosphere
 - (4) Direct sunlight
 - (5) Static voltage nor electric/magnetic fields
 - (6) Direct sea breeze
 - (7) Other variations of the above

■ Notice (Soldering and Mounting)

1. Soldering
 - (1) SV01 series can be soldered by reflow soldering method and soldering iron. Do not use flow soldering method (dipping).
 - (2) The dimension of land pattern used should be Murata's standard land pattern at reflow soldering. Excessive land area may cause displacement due to the effect of the surface tension of the solder. Insufficient land area may cause insufficient soldering strength on PCB. (SMD Type)
 - (3) Soldering condition
Refer to the temperature profile.
If the soldering conditions are not suitable, e.g., excessive time and/or excessive temperature, the rotary position sensor may deviate from the specified characteristics.
 - (4) The amount of solder is critical. Insufficient amounts of solder can lead to insufficient soldering strength on PCB. Excessive amounts of solder may cause bridging between the terminals.
 - (5) The soldering iron should not come in contact with the cover of the rotary position sensor. If such contact does occur, the rotary position sensor may be damaged.
2. Mounting
 - (1) Use PCB hole to meet the pin of the rotary position sensor. If the rotary position sensor is inserted into insufficient PCB hole, the rotary position sensor may be damaged by mechanical stress. (Lead type)
 - (2) Do not apply excessive force (preferable 9.8N (Ref.; 1kgf max.), when the rotary position sensor is mounted to the PCB.
 - (3) Do not warp and/or bend PCB to prevent the rotary position sensor from breakage.
3. Cleaning
Cannot be cleaned because of open construction.

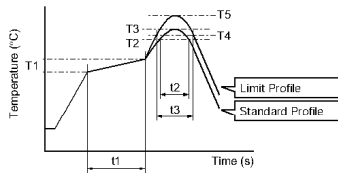
※Note • This PDF catalog is downloaded from the website of Murata Manufacturing Co., Ltd. Therefore, its specifications are subject to change or our products in it may be discontinued without advance notice. Please check with our sales representatives or product engineers before ordering. R50E.pdf
 • This PDF catalog has only typical specifications because there is no space for detailed specifications. Therefore, please approve our product specifications or transact the approval sheet for product specifications before ordering. 05.9.9

SV01 Series Notice

■ Soldering Profile

● Reflow Soldering Profile

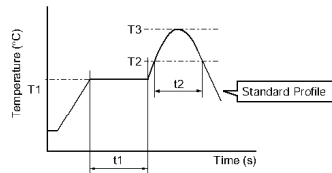
1. Soldering profile for Lead-free solder (96.5Sn/3.0Ag/0.5Cu)



Standard Profile					
Pre-heating		Heating		Peak Temperature (T3)	Cycle of Reflow
Temp. (T1)	Time (t1)	Temp. (T2)	Time (t2)		
°C	sec.	°C	sec.	°C	Time
150 to 180	60 to 120	220	30 to 60	245±3	2

Limit Profile					
Pre-heating		Heating		Peak Temperature (T5)	Cycle of Reflow
Temp. (T1)	Time (t1)	Temp. (T4)	Time (t3)		
°C	sec.	°C	sec.	°C	Time
150 to 180	60 to 120	230	30 to 50	260 +5/-0	2

2. Soldering profile for Eutectic solder (63Sn/37Pb)
 (Limit profile: refer to 1)



Standard Profile					
Pre-heating		Heating		Peak Temperature (T3)	Cycle of Reflow
Temp. (T1)	Time (t1)	Temp. (T2)	Time (t2)		
°C	sec.	°C	sec.	°C	Time
150	60 to 120	183	30	230	1

● Soldering Iron

Standard Condition			
Temperature of Soldering Iron Tip	Soldering Time	Soldering Iron Power Output	Cycle of Soldering Iron
°C	sec.	W	Time
350±10	3 max.	30 max.	1

■ Notice (Handling)

Uncontrolled mechanical force except usual rotation on the hollow rotor of product, may cause big change of electrical characteristic, big increase of rotational torque or mechanical damage of product. Therefore, please pay your attention on the following points for your design.

1. The fixing method of product must be soldering by the terminals of product. And please don't fix by screw cramping of supporting board which might cause mechanical deformation of product.
2. Your connecting shaft must be sustained by your bearing and any uncontrolled force should not apply on the hollow rotor of product.

■ Notice (Other)

1. Please make sure the connecting impedance is not to be less than 10M ohm. The rotary position sensor is designed to connect the output terminal and A/D port of the microprocessor directly. Therefore, connecting impedance presupposes certain M ohm and the contact resistance is set high.
2. To minimize the processing error and noise influence which occur in rare cases, when data is installed through the product, please note the following items and program your software.

- (1) Data install should be done plural times and applied the mean value.
- (2) Data considered as error should be invalid.
- (3) If suspicious data is found, the data should be re-installed.
3. Before using rotary position sensor, please test after assembly in your particular mass production system.
4. MURATA cannot guarantee rotary position sensor integrity when used under conditions other than those specified in this document.

9

Anexo IV

Códigos CNC.

As colunas descritas a seguir foram geradas com o intuito de simplificar a programação para a usinagem. A coluna “Linha” corresponde ao número da linha que esta sendo atribuído um comando e o posicionamento, a coluna “Comando” insere o comando a ser executado pela máquina operatriz CNC, as colunas “X”, “Y” e “Z” referem-se ao posicionamento desejado que será executado pelo comando inserido na mesma linha e, a coluna “Comentários” é um local para acrescentar comentários no código (deve estar sempre entre parênteses, para que o programa assuma que for inserido um comentário e não uma instrução). Todo o código foi desenvolvido em G-Code para utilização na CNC da marca Sherline.

Furação da Coluna

Linha	Comando	X	Y	Z	Comentários
(Coluna 01)					
N10	T17				(Broca de 2.5mm)
N20	G01	X0	Y0	Z1	
N30	G01	X14	Y6.86	Z1	
N40	G01	X14	Y6.86	Z-6	
N50	G01	X14	Y6.86	Z1	
N60	G01	X14	Y21.14	Z1	
N70	G01	X14	Y21.14	Z-6	
N80	G01	X14	Y21.14	Z1	
N90	G01	X6.86	Y14	Z1	
N100	G01	X6.86	Y14	Z-6	
N110	G01	X6.86	Y14	Z1	
N120	G01	X21.14	Y14	Z1	
N130	G01	X21.14	Y14	Z-6	
N140	G01	X21.14	Y14	Z1	
(Coluna 02)					
N150	G01	X0	Y0	Z1	
N160	G01	X45	Y6.86	Z1	
N170	G01	X45	Y6.86	Z-6	
N180	G01	X45	Y6.86	Z1	
N190	G01	X45	Y21.14	Z1	
N200	G01	X45	Y21.14	Z-6	

N210	G01	X45	Y21.14	Z1
N220	G01	X37.86	Y14	Z1
N230	G01	X37.86	Y14	Z-6
N240	G01	X37.86	Y14	Z1
N250	G01	X52.14	Y14	Z1
N260	G01	X52.14	Y14	Z-6
N270	G01	X52.14	Y14	Z1

(Coluna 03)

N280	G01	X0	Y0	Z1
N290	G01	X76	Y6.86	Z1
N300	G01	X76	Y6.86	Z-6
N310	G01	X76	Y6.86	Z1
N320	G01	X76	Y21.14	Z1
N330	G01	X76	Y21.14	Z-6
N340	G01	X76	Y21.14	Z1
N350	G01	X68.86	Y14	Z1
N360	G01	X68.86	Y14	Z-6
N370	G01	X68.86	Y14	Z1
N380	G01	X83.14	Y14	Z1
N390	G01	X83.14	Y14	Z-6
N400	G01	X83.14	Y14	Z1

(Coluna 04)

N410	G01	X0	Y0	Z1
N420	G01	X14	Y37.86	Z1
N430	G01	X14	Y37.86	Z-6
N440	G01	X14	Y37.86	Z1
N450	G01	X14	Y52.14	Z1
N460	G01	X14	Y52.14	Z-6
N470	G01	X14	Y52.14	Z1
N480	G01	X6.86	Y45	Z1
N490	G01	X6.86	Y45	Z-6
N500	G01	X6.86	Y45	Z1
N510	G01	X21.14	Y45	Z1
N520	G01	X21.14	Y45	Z-6
N530	G01	X21.14	Y45	Z1

(Coluna 05)

N540	G01	X0	Y0	Z1
N550	G01	X45	Y37.86	Z1
N560	G01	X45	Y37.86	Z-6
N570	G01	X45	Y37.86	Z1
N580	G01	X45	Y52.14	Z1
N590	G01	X45	Y52.14	Z-6
N600	G01	X45	Y52.14	Z1
N610	G01	X37.86	Y45	Z1

N620	G01	X37.86	Y45	Z-6
N630	G01	X37.86	Y45	Z1
N640	G01	X52.14	Y45	Z1
N650	G01	X52.14	Y45	Z-6
N660	G01	X52.14	Y45	Z1

(Coluna 06)

N670	G01	X0	Y0	Z1
N680	G01	X76	Y37.86	Z1
N690	G01	X76	Y37.86	Z-6
N700	G01	X76	Y37.86	Z1
N710	G01	X76	Y52.14	Z1
N720	G01	X76	Y52.14	Z-6
N730	G01	X76	Y52.14	Z1
N740	G01	X68.86	Y45	Z1
N750	G01	X68.86	Y45	Z-6
N760	G01	X68.86	Y45	Z1
N770	G01	X83.14	Y45	Z1
N780	G01	X83.14	Y45	Z-6
N790	G01	X83.14	Y45	Z1

(Coluna 07)

N800	G01	X0	Y0	Z1
N810	G01	X14	Y68.86	Z1
N820	G01	X14	Y68.86	Z-6
N830	G01	X14	Y68.86	Z1
N840	G01	X14	Y83.14	Z1
N850	G01	X14	Y83.14	Z-6
N860	G01	X14	Y83.14	Z1
N870	G01	X6.86	Y76	Z1
N880	G01	X6.86	Y76	Z-6
N890	G01	X6.86	Y76	Z1
N900	G01	X21.14	Y76	Z1
N910	G01	X21.14	Y76	Z-6
N920	G01	X21.14	Y76	Z1

(Coluna 08)

N930	G01	X0	Y0	Z1
N940	G01	X45	Y68.86	Z1
N950	G01	X45	Y68.86	Z-6
N960	G01	X45	Y68.86	Z1
N970	G01	X45	Y83.14	Z1
N980	G01	X45	Y83.14	Z-6
N990	G01	X45	Y83.14	Z1
N1000	G01	X37.86	Y76	Z1
N1010	G01	X37.86	Y76	Z-6
N1020	G01	X37.86	Y76	Z1
N1030	G01	X52.14	Y76	Z1
N1040	G01	X52.14	Y76	Z-6
N1050	G01	X52.14	Y76	Z1

(Coluna 09)

N1060	G01	X0	Y0	Z1
N1070	G01	X76	Y68.86	Z1
N1080	G01	X76	Y68.86	Z-6
N1090	G01	X76	Y68.86	Z1
N1100	G01	X76	Y83.14	Z1
N1110	G01	X76	Y83.14	Z-6
N1120	G01	X76	Y83.14	Z1
N1130	G01	X68.86	Y76	Z1
N1140	G01	X68.86	Y76	Z-6
N1150	G01	X68.86	Y76	Z1
N1160	G01	X83.14	Y76	Z1
N1170	G01	X83.14	Y76	Z-6
N1180	G01	X83.14	Y76	Z1

Furação do Anel

Linha	Comando	X	Y	Z	Comentários
			(Coluna 01)		
N10	T17				(Broca de 4mm)
N20	G01	X0	Y0	Z1	
N30	G01	X25	Y9.13	Z1	
N40	G01	X25	Y9.13	Z-5.5	
N50	G01	X25	Y9.13	Z1	
N60	G01	X25	Y40.88	Z1	
N70	G01	X25	Y40.88	Z-5.5	
N80	G01	X25	Y40.88	Z1	
N90	G01	X9.13	Y25	Z1	
N100	G01	X9.13	Y25	Z-5.5	
N110	G01	X9.13	Y25	Z1	
N120	G01	X40.88	Y25	Z1	
N130	G01	X40.88	Y25	Z-5.5	
N140	G01	X40.88	Y25	Z1	
N150	T18				(Broca de 1.5mm)
N160	G01	X15.25	Y11.07	Z1	
N170	G01	X15.25	Y11.07	Z-12.75	
N180	G01	X15.25	Y11.07	Z1	
N190	G01	X12.98	Y12.98	Z1	
N200	G01	X12.98	Y12.98	Z-12.75	
N210	G01	X12.98	Y12.98	Z1	
N220	G01	X11.07	Y15.25	Z1	
N230	G01	X11.07	Y15.25	Z-12.75	
N240	G01	X11.07	Y15.25	Z1	

N250	G01	X34.75	Y11.07	Z1
N260	G01	X34.75	Y11.07	Z-12.75
N270	G01	X34.75	Y11.07	Z1
N280	G01	X37.02	Y12.98	Z1
N290	G01	X37.02	Y12.98	Z-12.75
N300	G01	X37.02	Y12.98	Z1
N310	G01	X38.93	Y15.25	Z1
N320	G01	X38.93	Y15.25	Z-12.75
N330	G01	X38.93	Y15.25	Z1
N340	G01	X34.75	Y38.93	Z1
N350	G01	X34.75	Y38.93	Z-12.75
N360	G01	X34.75	Y38.93	Z1
N370	G01	X37.02	Y37.02	Z1
N380	G01	X37.02	Y37.02	Z-12.75
N390	G01	X37.02	Y37.02	Z1
N400	G01	X38.93	Y34.75	Z1
N410	G01	X38.93	Y34.75	Z-12.75
N420	G01	X38.93	Y34.75	Z1
N430	G01	X15.25	Y38.93	Z1
N440	G01	X15.25	Y38.93	Z-12.75
N450	G01	X15.25	Y38.93	Z1
N460	G01	X12.98	Y37.02	Z1
N470	G01	X12.98	Y37.02	Z-12.75
N480	G01	X12.98	Y37.02	Z1
N490	G01	X11.07	Y34.75	Z1
N500	G01	X11.07	Y34.75	Z-12.75
N510	G01	X11.07	Y34.75	Z1

(Coluna 02)

N520	T17				(Broca de 4mm)
N530	G01	X0	Y0	Z1	
N540	G01	X25	Y51.13	Z1	
N550	G01	X25	Y51.13	Z-5.5	
N560	G01	X25	Y51.13	Z1	
N570	G01	X25	Y82.87	Z1	
N580	G01	X25	Y82.87	Z-5.5	
N590	G01	X25	Y82.87	Z1	
N600	G01	X9.13	Y67.03	Z1	
N610	G01	X9.13	Y67.03	Z-5.5	
N620	G01	X9.13	Y67.03	Z1	
N630	G01	X40.88	Y67.03	Z1	
N640	G01	X40.88	Y67.03	Z-5.5	
N650	G01	X40.88	Y67.03	Z1	
N660	T18				(Broca de 1.5mm)
N670	G01	X15.25	Y53.09	Z1	
N680	G01	X15.25	Y53.09	Z-12.75	
N690	G01	X15.25	Y53.09	Z1	

N700	G01	X12.98	Y55	Z1
N710	G01	X12.98	Y55	Z-12.75
N720	G01	X12.98	Y55	Z1
N730	G01	X11.07	Y57.28	Z1
N740	G01	X11.07	Y57.28	Z-12.75
N750	G01	X11.07	Y57.28	Z1
N760	G01	X34.75	Y53.09	Z1
N770	G01	X34.75	Y53.09	Z-12.75
N780	G01	X34.75	Y53.09	Z1
N790	G01	X37.02	Y55	Z1
N800	G01	X37.02	Y55	Z-12.75
N810	G01	X37.02	Y55	Z1
N820	G01	X38.93	Y57.28	Z1
N830	G01	X38.93	Y57.28	Z-12.75
N840	G01	X38.93	Y57.28	Z1
N850	G01	X34.75	Y80.94	Z1
N860	G01	X34.75	Y80.94	Z-12.75
N870	G01	X34.75	Y80.94	Z1
N880	G01	X37.02	Y79.04	Z1
N890	G01	X37.02	Y79.04	Z-12.75
N900	G01	X37.02	Y79.04	Z1
N910	G01	X38.93	Y76.78	Z1
N920	G01	X38.93	Y76.78	Z-12.75
N930	G01	X38.93	Y76.78	Z1
N940	G01	X15.25	Y80.94	Z1
N950	G01	X15.25	Y80.94	Z-12.75
N960	G01	X15.25	Y80.94	Z1
N970	G01	X12.98	Y79.04	Z1
N980	G01	X12.98	Y79.04	Z-12.75
N990	G01	X12.98	Y79.04	Z1
N1000	G01	X11.07	Y76.78	Z1
N1010	G01	X11.07	Y76.78	Z-12.75
N1020	G01	X11.07	Y76.78	Z1

(Coluna 03)

N1030	T17				(Broca de 4mm)
N1040	G01	X0	Y0	Z1	
N1050	G01	X67	Y51.13	Z1	
N1060	G01	X67	Y51.13	Z-5.5	
N1070	G01	X67	Y51.13	Z1	
N1080	G01	X67	Y82.87	Z1	
N1090	G01	X67	Y82.87	Z-5.5	
N1100	G01	X67	Y82.87	Z1	
N1110	G01	X51.13	Y67.03	Z1	
N1120	G01	X51.13	Y67.03	Z-5.5	
N1130	G01	X51.13	Y67.03	Z1	
N630	G01	X82.88	Y67.03	Z1	

N640	G01	X82.88	Y67.03	Z-5.5	
N650	G01	X82.88	Y67.03	Z1	
N660	T18				(Broca de 1.5mm)
N670	G01	X57.25	Y53.09	Z1	
N680	G01	X57.25	Y53.09	Z-12.75	
N690	G01	X57.25	Y53.09	Z1	
N700	G01	X54.98	Y55	Z1	
N710	G01	X54.98	Y55	Z-12.75	
N720	G01	X54.98	Y55	Z1	
N730	G01	X53.07	Y57.28	Z1	
N740	G01	X53.07	Y57.28	Z-12.75	
N750	G01	X53.07	Y57.28	Z1	
N760	G01	X76.75	Y53.09	Z1	
N770	G01	X76.75	Y53.09	Z-12.75	
N780	G01	X76.75	Y53.09	Z1	
N790	G01	X79.02	Y55	Z1	
N800	G01	X79.02	Y55	Z-12.75	
N810	G01	X79.02	Y55	Z1	
N820	G01	X80.93	Y57.28	Z1	
N830	G01	X80.93	Y57.28	Z-12.75	
N840	G01	X80.93	Y57.28	Z1	
N850	G01	X76.75	Y80.94	Z1	
N860	G01	X76.75	Y80.94	Z-12.75	
N870	G01	X76.75	Y80.94	Z1	
N880	G01	X79.02	Y79.04	Z1	
N890	G01	X79.02	Y79.04	Z-12.75	
N900	G01	X79.02	Y79.04	Z1	
N910	G01	X80.93	Y76.78	Z1	
N920	G01	X80.93	Y76.78	Z-12.75	
N930	G01	X80.93	Y76.78	Z1	
N940	G01	X57.25	Y80.94	Z1	
N950	G01	X57.25	Y80.94	Z-12.75	
N960	G01	X57.25	Y80.94	Z1	
N970	G01	X54.98	Y79.04	Z1	
N980	G01	X54.98	Y79.04	Z-12.75	
N990	G01	X54.98	Y79.04	Z1	
N1000	G01	X53.07	Y76.78	Z1	
N1010	G01	X53.07	Y76.78	Z-12.75	
N1020	G01	X53.07	Y76.78	Z1	
			(Coluna 04)		
N10	T17				(Broca de 4mm)
N20	G01	X0	Y0	Z1	
N30	G01	X67	Y9.13	Z1	
N40	G01	X67	Y9.13	Z-5.5	
N50	G01	X67	Y9.13	Z1	
N60	G01	X67	Y40.88	Z1	
N70	G01	X67	Y40.88	Z-5.5	

N80	G01	X67	Y40.88	Z1	
N90	G01	X51.13	Y25	Z1	
N100	G01	X51.13	Y25	Z-5.5	
N110	G01	X51.13	Y25	Z1	
N120	G01	X82.88	Y25	Z1	
N130	G01	X82.88	Y25	Z-5.5	
N140	G01	X82.88	Y25	Z1	
N150	T18				(Broca de 1.5mm)
N160	G01	X57.25	Y11.07	Z1	
N170	G01	X57.25	Y11.07	Z-12.75	
N180	G01	X57.25	Y11.07	Z1	
N190	G01	X54.98	Y12.98	Z1	
N200	G01	X54.98	Y12.98	Z-12.75	
N210	G01	X54.98	Y12.98	Z1	
N220	G01	X53.07	Y15.25	Z1	
N230	G01	X53.07	Y15.25	Z-12.75	
N240	G01	X53.07	Y15.25	Z1	
N250	G01	X76.75	Y11.07	Z1	
N260	G01	X76.75	Y11.07	Z-12.75	
N270	G01	X76.75	Y11.07	Z1	
N280	G01	X79.02	Y12.98	Z1	
N290	G01	X79.02	Y12.98	Z-12.75	
N300	G01	X79.02	Y12.98	Z1	
N310	G01	X80.93	Y15.25	Z1	
N320	G01	X80.93	Y15.25	Z-12.75	
N330	G01	X80.93	Y15.25	Z1	
N340	G01	X76.75	Y38.93	Z1	
N350	G01	X76.75	Y38.93	Z-12.75	
N360	G01	X76.75	Y38.93	Z1	
N370	G01	X79.02	Y37.02	Z1	
N380	G01	X79.02	Y37.02	Z-12.75	
N390	G01	X79.02	Y37.02	Z1	
N400	G01	X80.93	Y34.75	Z1	
N410	G01	X80.93	Y34.75	Z-12.75	
N420	G01	X80.93	Y34.75	Z1	
N430	G01	X57.25	Y38.93	Z1	
N440	G01	X57.25	Y38.93	Z-12.75	
N450	G01	X57.25	Y38.93	Z1	
N460	G01	X54.98	Y37.02	Z1	
N470	G01	X54.98	Y37.02	Z-12.75	
N480	G01	X54.98	Y37.02	Z1	
N490	G01	X53.07	Y34.75	Z1	
N500	G01	X53.07	Y34.75	Z-12.75	
N510	G01	X53.07	Y34.75	Z1	

Anexo V

Código do Protocolo de Transmissão.

Tabela de códigos de comunicação do servomotor AX-12+, retirado de seu manual.

Address	Item	Access	Initial Value
0(0X00)	Model Number(L)	RD	12(0x0C)
1(0X01)	Model Number(H)	RD	0(0x00)
2(0X02)	Version of Firmware	RD	?
3(0X03)	ID	RD,WR	1(0x01)
4(0X04)	Baud Rate	RD,WR	1(0x01)
5(0X05)	Return Delay Time	RD,WR	250(0xFA)
6(0X06)	CW Angle Limit(L)	RD,WR	0(0x00)
7(0X07)	CW Angle Limit(H)	RD,WR	0(0x00)
8(0X08)	CCW Angle Limit(L)	RD,WR	255(0xFF)
9(0X09)	CCW Angle Limit(H)	RD,WR	3(0x03)
10(0x0A)	(Reserved)	-	0(0x00)
11(0X0B)	the Highest Limit Temperature	RD,WR	85(0x55)
12(0X0C)	the Lowest Limit Voltage	RD,WR	60(0X3C)
13(0X0D)	the Highest Limit Voltage	RD,WR	190(0xBE)
14(0X0E)	Max Torque(L)	RD,WR	255(0xFF)
15(0X0F)	Max Torque(H)	RD,WR	3(0x03)
16(0X10)	Status Return Level	RD,WR	2(0x02)
17(0X11)	Alarm LED	RD,WR	4(0x04)
18(0X12)	Alarm Shutdown	RD,WR	4(0x04)
19(0X13)	(Reserved)	RD,WR	0(0x00)
20(0X14)	Down Calibration(L)	RD	?
21(0X15)	Down Calibration(H)	RD	?
22(0X16)	Up Calibration(L)	RD	?
23(0X17)	Up Calibration(H)	RD	?
24(0X18)	Torque Enable	RD,WR	0(0x00)
25(0X19)	LED	RD,WR	0(0x00)
26(0X1A)	CW Compliance Margin	RD,WR	0(0x00)
27(0X1B)	CCW Compliance Margin	RD,WR	0(0x00)
28(0X1C)	CW Compliance Slope	RD,WR	32(0x20)
29(0X1D)	CCW Compliance Slope	RD,WR	32(0x20)
30(0X1E)	Goal Position(L)	RD,WR	[Addr36]value
31(0X1F)	Goal Position(H)	RD,WR	[Addr37]value
32(0X20)	Moving Speed(L)	RD,WR	0
33(0X21)	Moving Speed(H)	RD,WR	0
34(0X22)	Torque Limit(L)	RD,WR	[Addr14] value
35(0X23)	Torque Limit(H)	RD,WR	[Addr15] value
36(0X24)	Present Position(L)	RD	?
37(0X25)	Present Position(H)	RD	?
38(0X26)	Present Speed(L)	RD	?
39(0X27)	Present Speed(H)	RD	?
40(0X28)	Present Load(L)	RD	?
41(0X29)	Present Load(H)	RD	?
42(0X2A)	Present Voltage	RD	?
43(0X2B)	Present Temperature	RD	?
44(0X2C)	Registered Instruction	RD,WR	0(0x00)
45(0X2D)	(Reserved)	-	0(0x00)
46(0x2E)	Moving	RD	0(0x00)
47(0x2F)	Lock	RD,WR	0(0x00)
48(0x30)	Punch(L)	RD,WR	32(0x20)
49(0x31)	Punch(H)	RD,WR	0(0x00)

Anexo VI

Cabeçalhos de Funções.

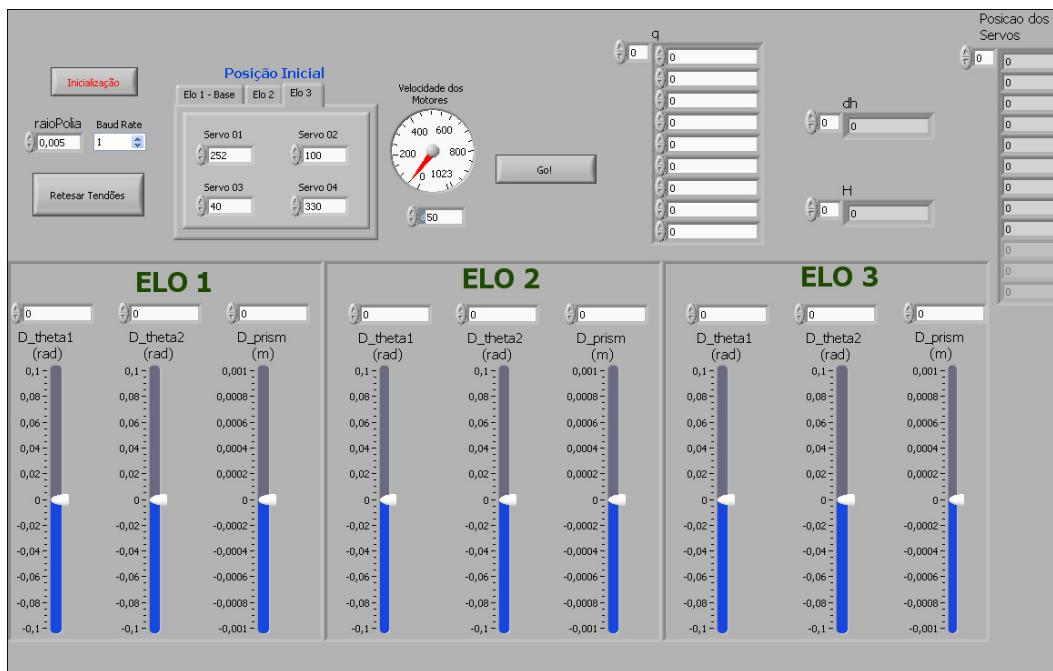
Neste anexo, são apresentados os cabeçalhos das funções criadas para a comunicação entre os servos e o computador.

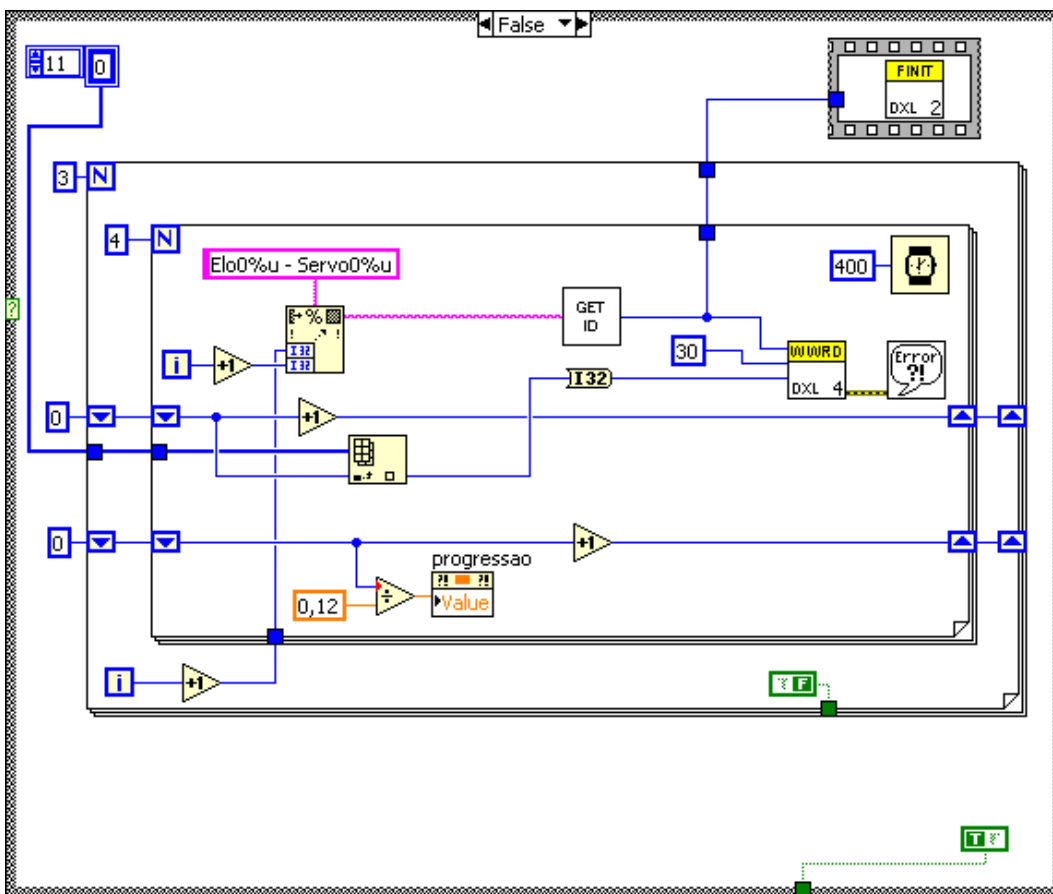
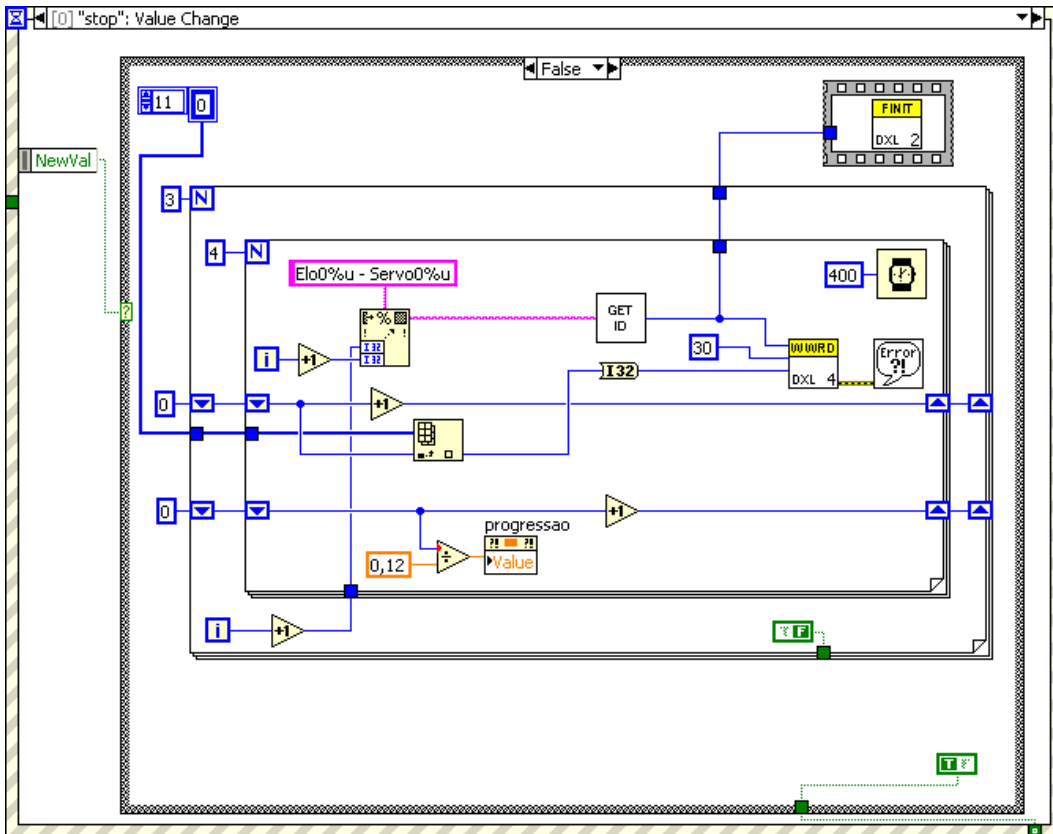
```
int dxl_initialize( );
void dxl_terminate( );
int dxl_get_baud( );
void dxl_set_baud(int baudnum);
void dxl_set_txpacket_id(int id);
void dxl_set_txpacket_instruction(int instruction);
void dxl_set_txpacket_parameter(int índice, int value);
void dxl_set_txpacket_length(int length);
int dxl_get_rxpacket_error(int errbit);
int dxl_get_rxpacket_length( );
int dxl_get_rxpacket_parameter(int index);
int dxl_makeword(int lowbyte, int highbyte);
int dxl_get_lowbyte(int word);
int dxl_get_highbyte(int word);
void dxl_tx_packet( );
void dxl_rx_packet( );
void dxl_ttrx_packet( );
void dxl_get_result( );
void dxl_ping(int id);
int dxl_read_byte(int id, int address);
void dxl_write_byte(int id, int address, int value);
int dxl_read_word(int id, int address);
void dxl_write_word(int id, int address, int value);
```

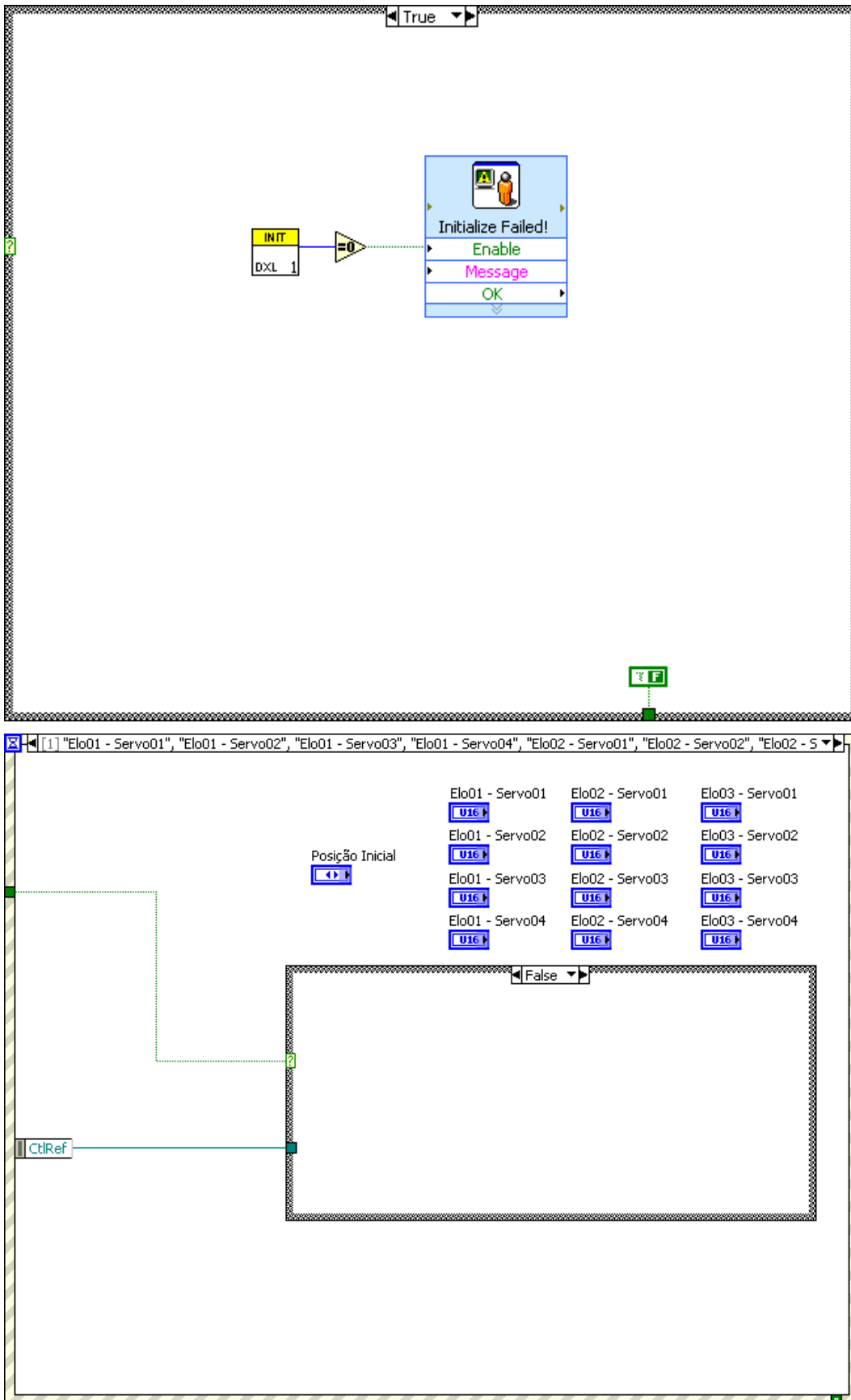
Anexo VII

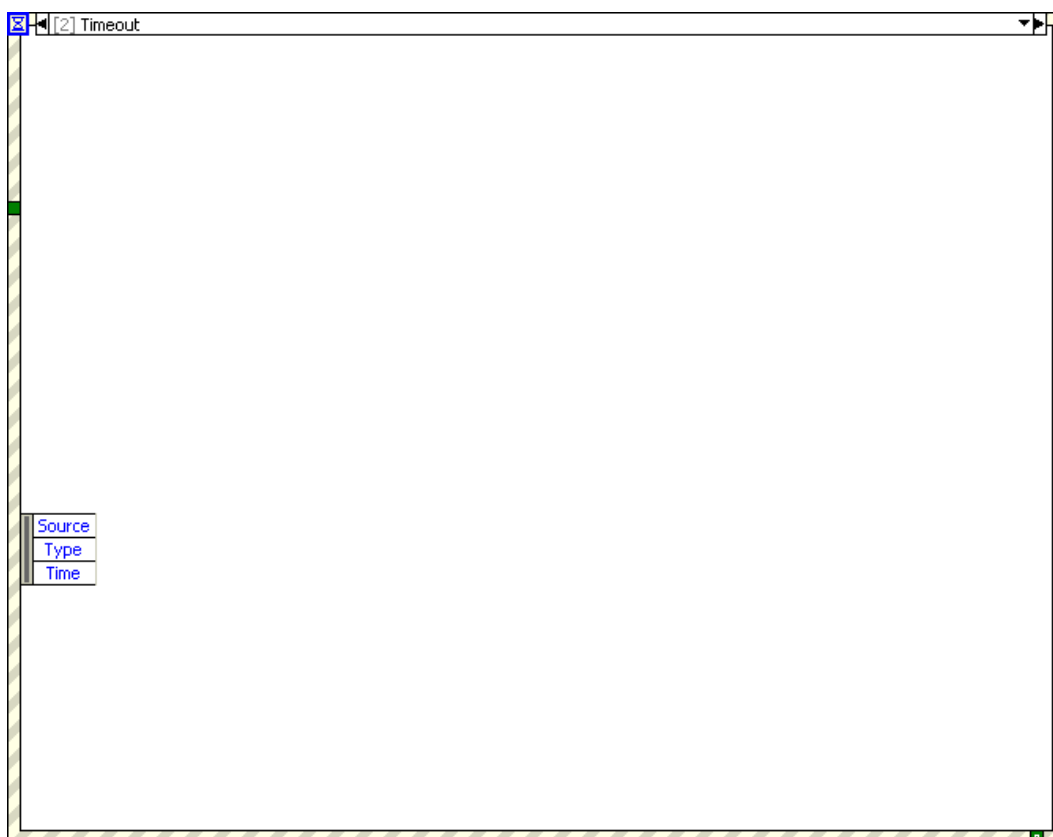
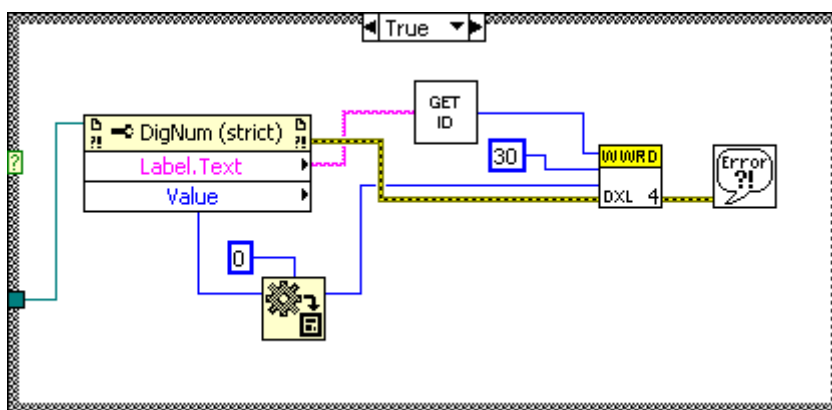
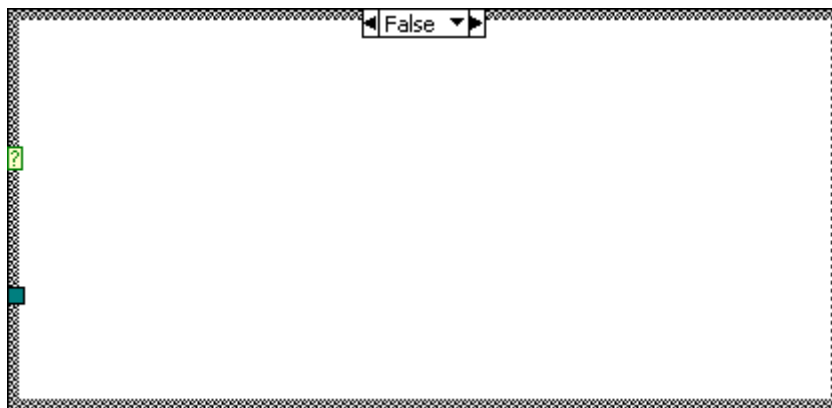
Programação no LabView.

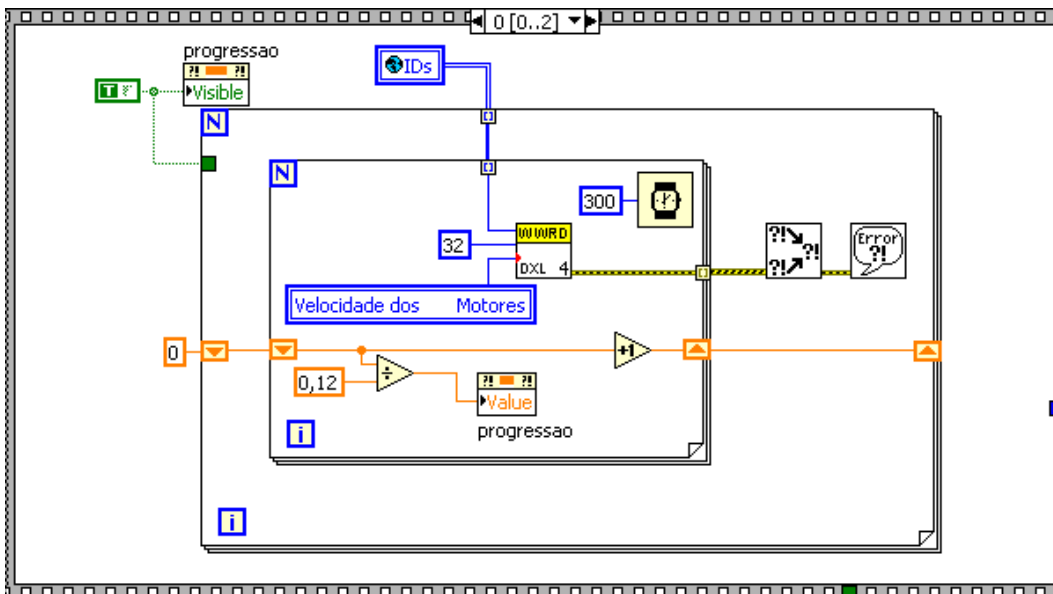
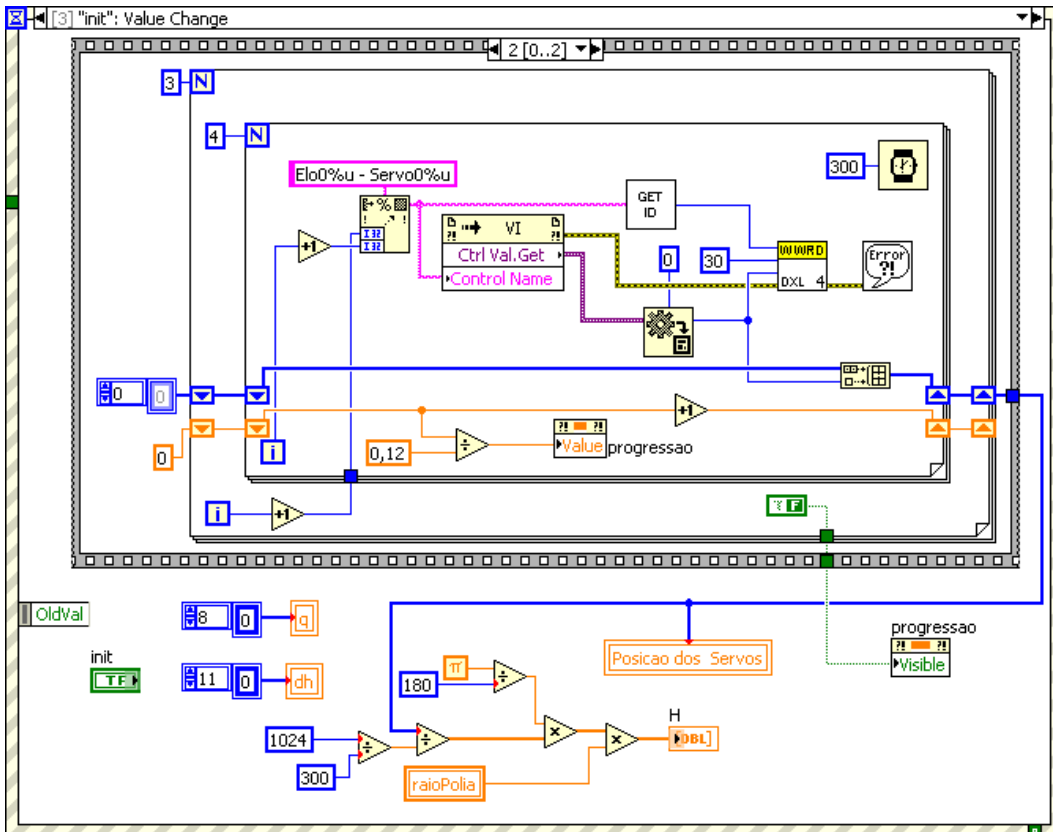
Neste anexo, é apresentada a programação principal do *software* desenvolvido para o controle das variações das entradas dos DoFs. A ordem das imagens é relacionada à presença dos *loops* na programação.

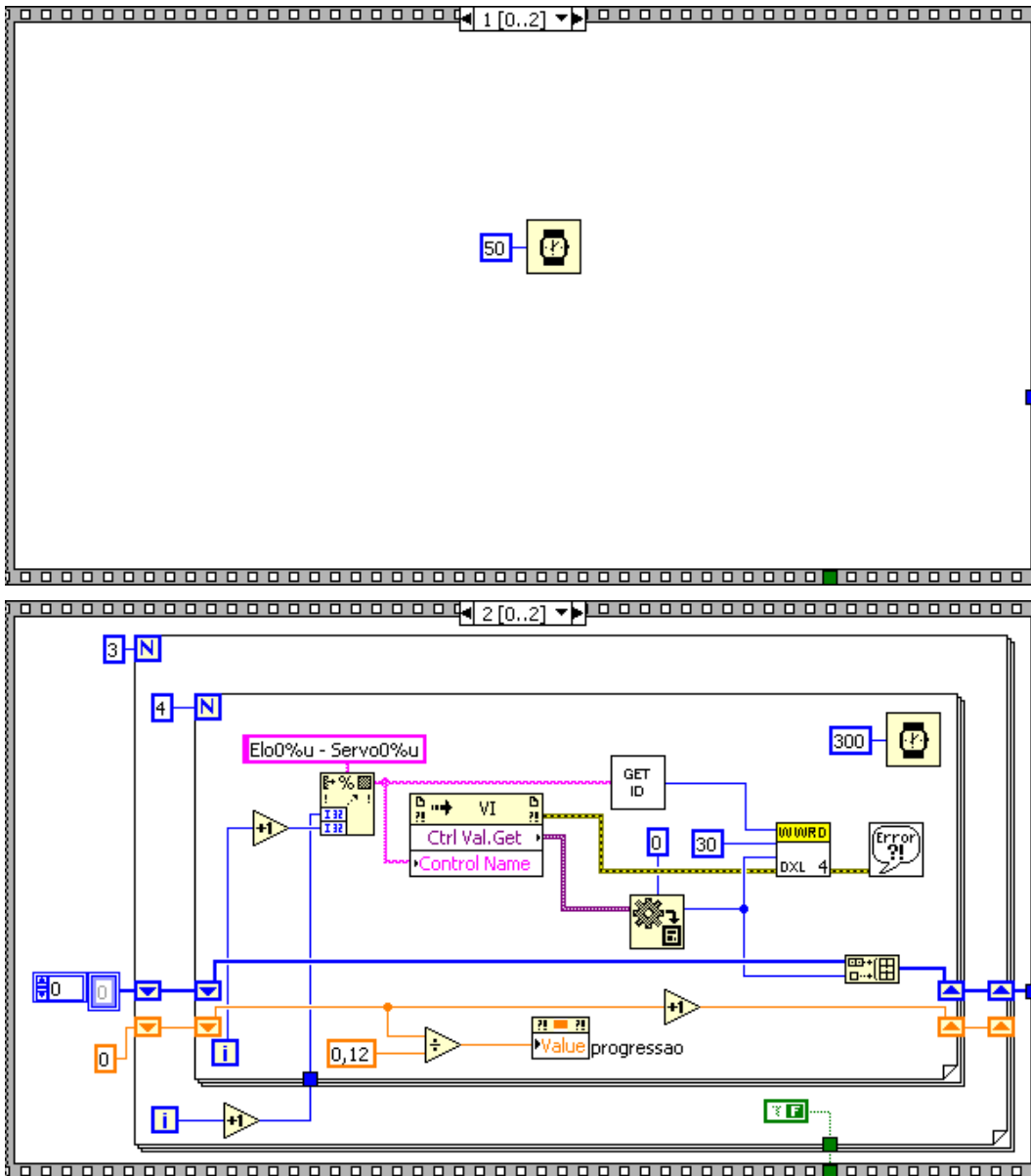


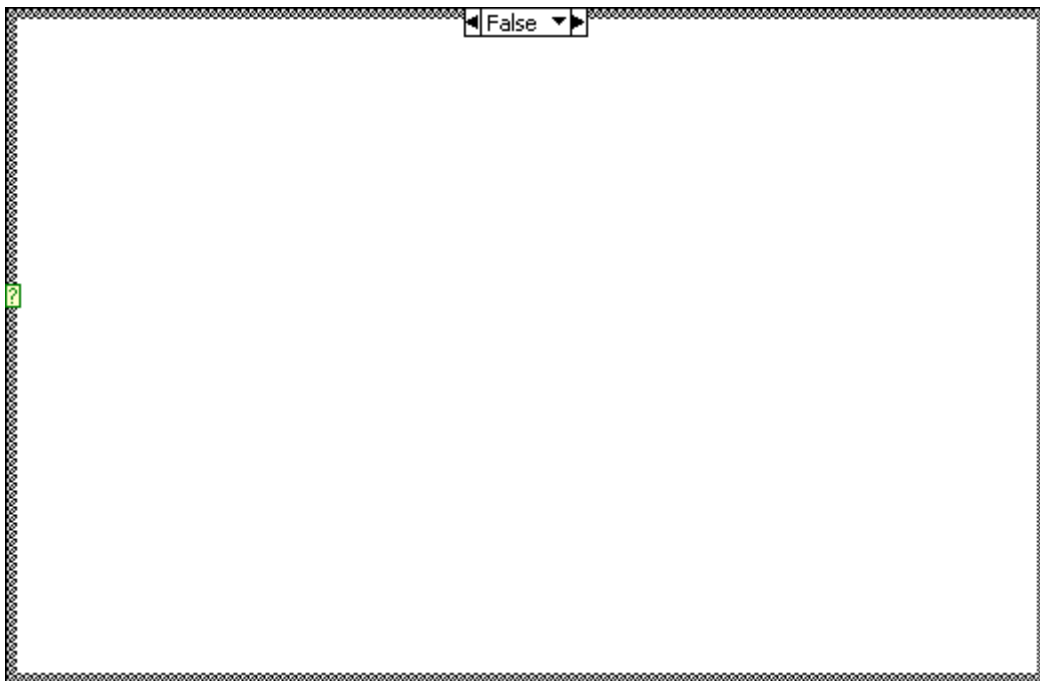
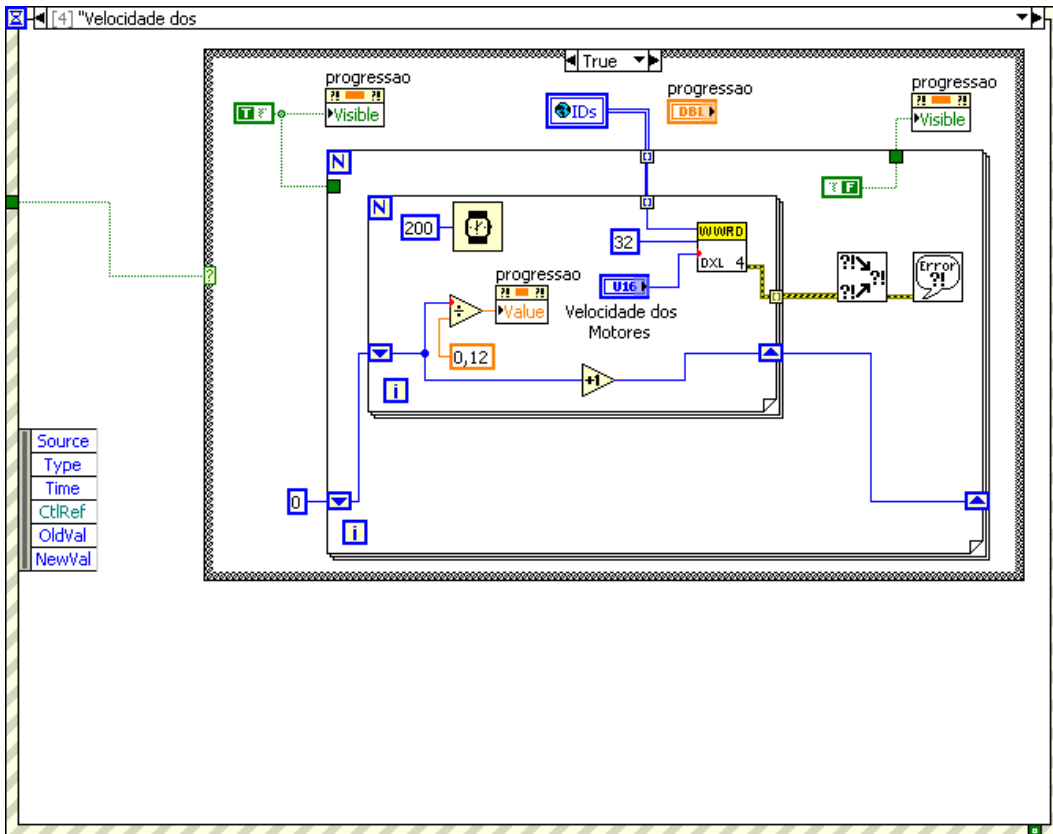


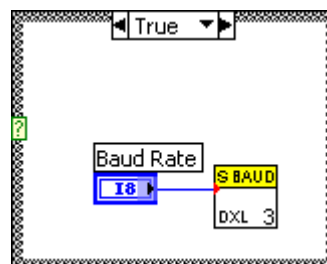
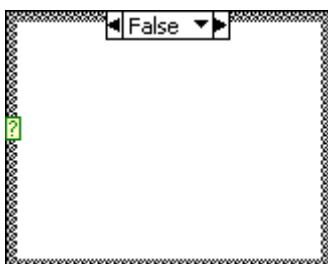
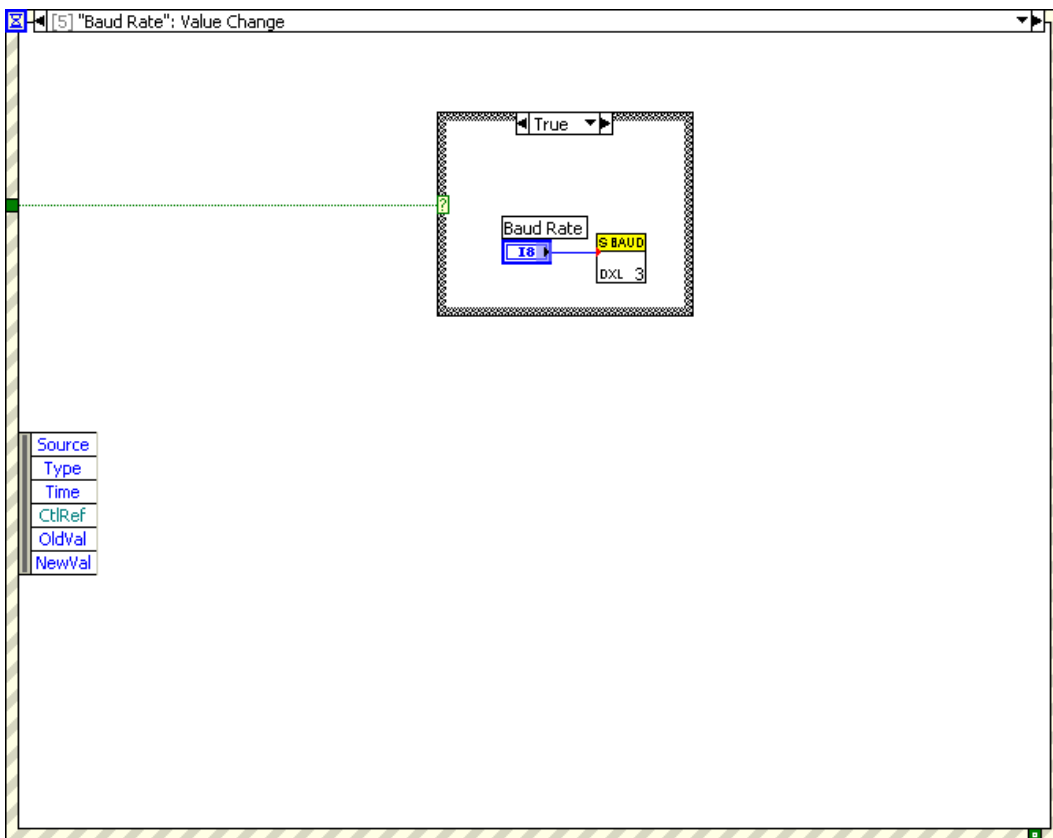
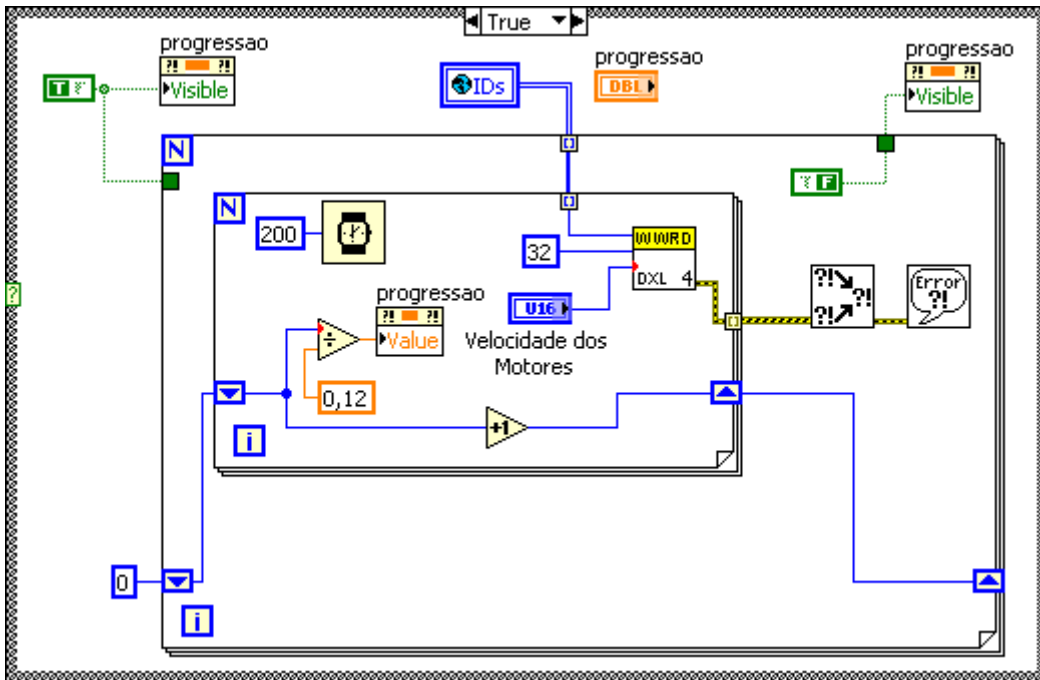


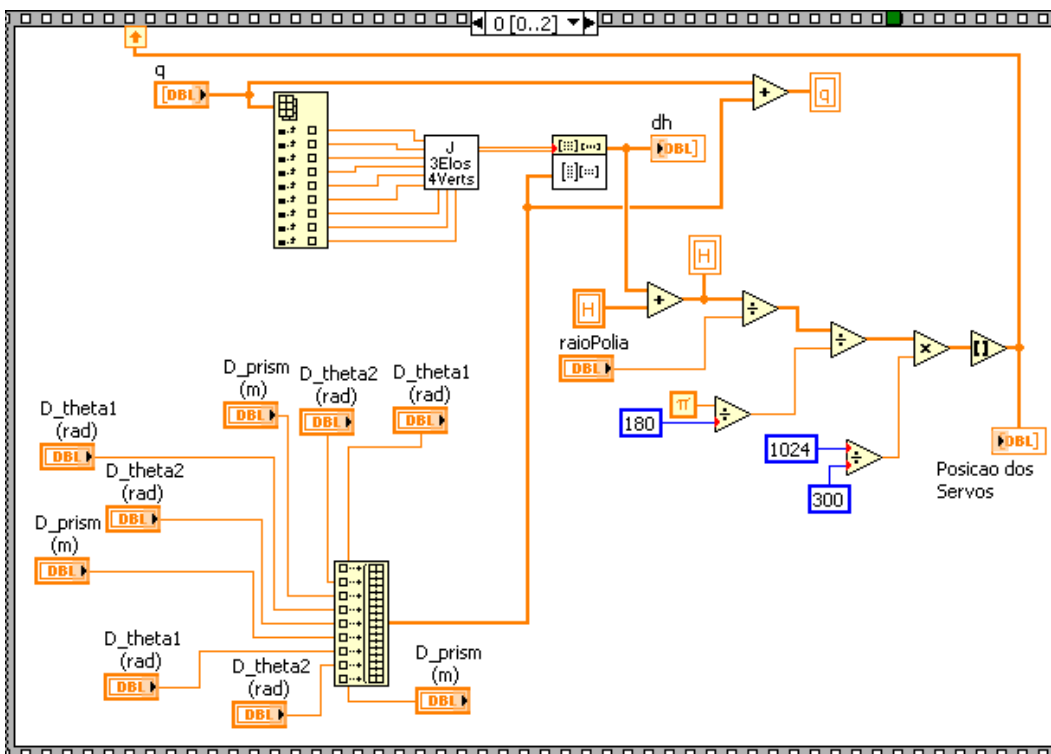
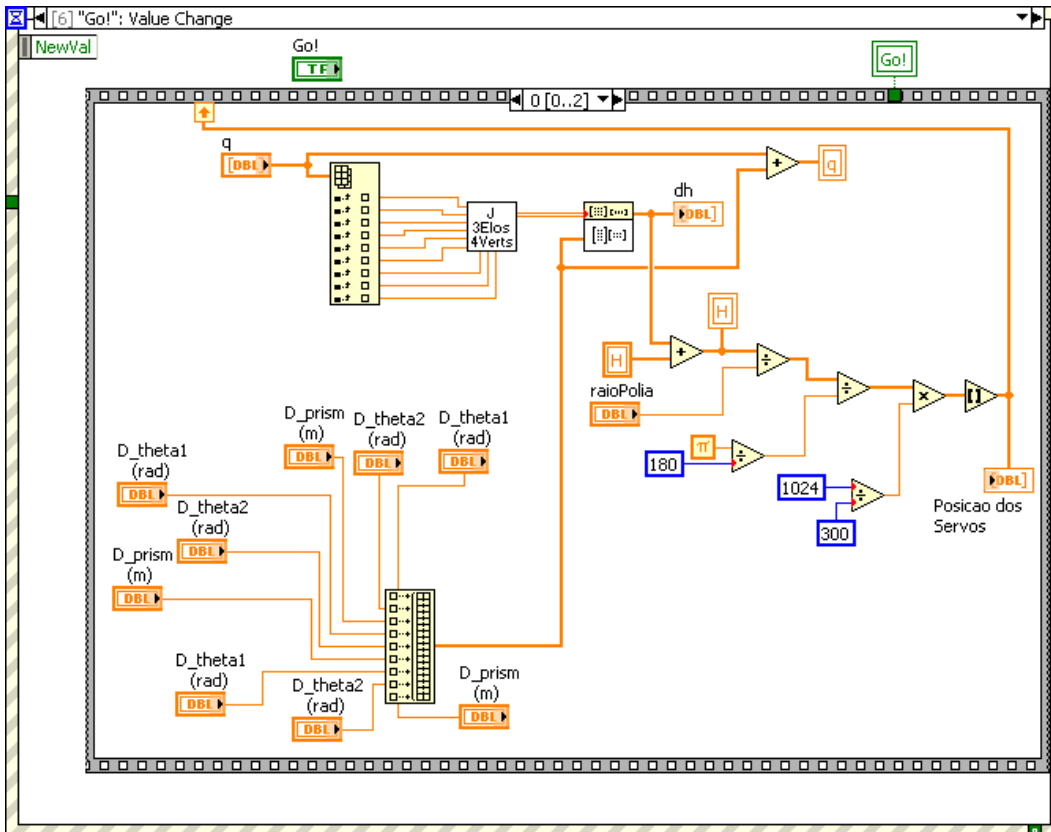


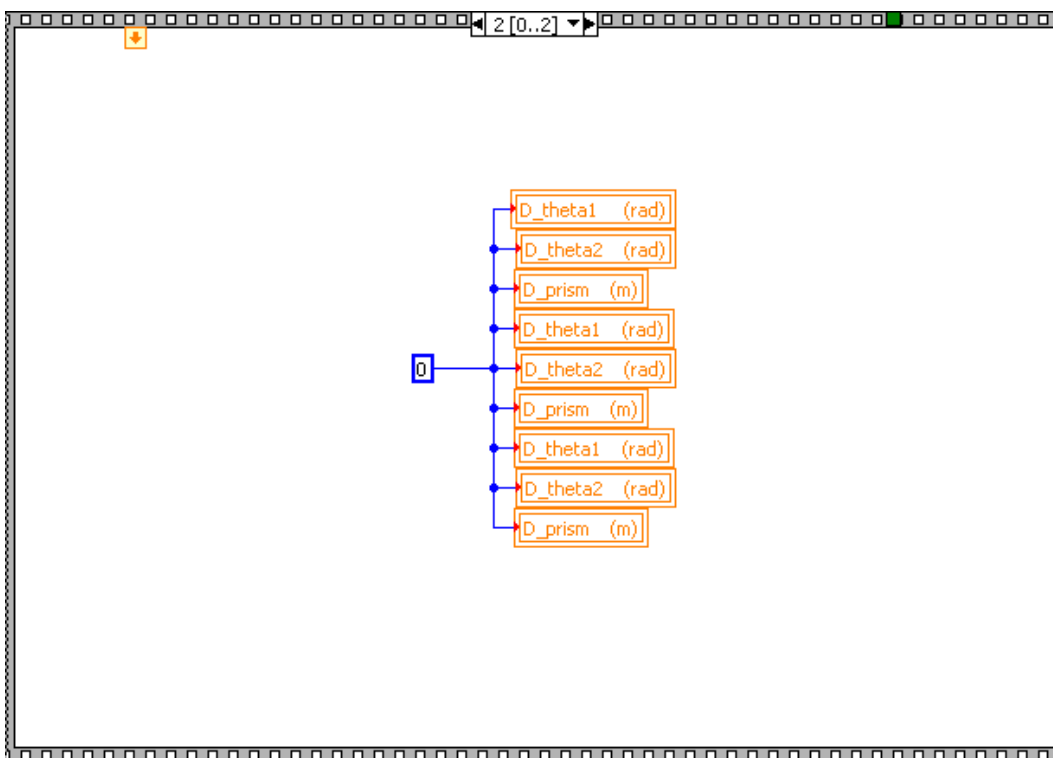
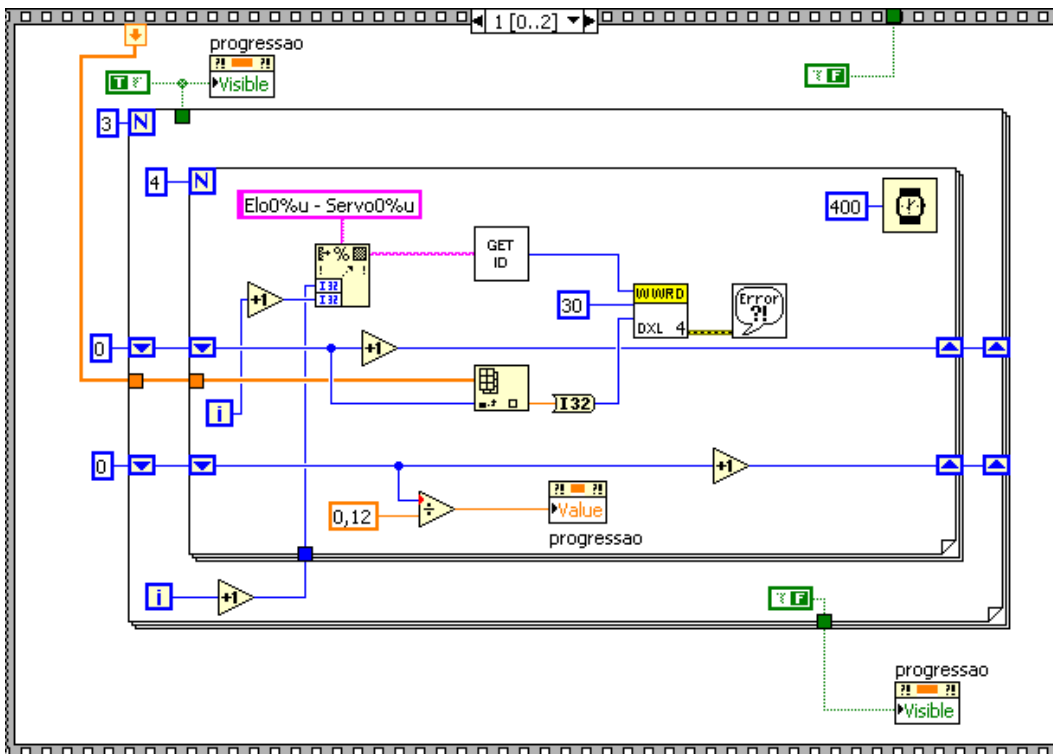












Anexo VIII

Funções *Toolbox Robot*

For an n-axis manipulator the following matrix naming and dimensional conventions apply.

Symbol	Dimensions	Description
l	link	manipulator link object
q	$1 \times n$	joint coordinate vector
q	$m \times n$	m -point joint coordinate trajectory
qd	$1 \times n$	joint velocity vector
qd	$m \times n$	m -point joint velocity trajectory
qdd	$1 \times n$	joint acceleration vector
qdd	$m \times n$	m -point joint acceleration trajectory
robot	robot	robot object
T	4×4	homogeneous transform
T	$4 \times 4 \times m$	m -point homogeneous transform trajectory
Q	quaternion	unit-quaternion object
M	1×6	vector with elements of 0 or 1 corresponding to Cartesian DOF along X, Y, Z and around X, Y, Z. 1 if that Cartesian DOF belongs to the task space, else 0.
v	3×1	Cartesian vector
t	$m \times 1$	time vector
d	6×1	differential motion vector

Object names are shown in bold typeface.

A trajectory is represented by a matrix in which each row corresponds to one of m time steps. For a joint coordinate, velocity or acceleration trajectory the columns correspond to the robot axes. For homogeneous transform trajectories we use 3-dimensional matrices where the last index corresponds to the time step.

Units

All angles are in radians. The choice of all other units is up to the user, and this choice will flow on to the units in which homogeneous transforms, Jacobians, inertias and torques are represented.

Homogeneous Transforms	
angvec2tr	angle/vector form to homogeneous transform
eul2tr	Euler angle to homogeneous transform
oa2tr	orientation and approach vector to homogeneous transform
rpy2tr	Roll/pitch/yaw angles to homogeneous transform
tr2angvec	homogeneous transform or rotation matrix to angle/vector form
tr2eul	homogeneous transform or rotation matrix to Euler angles
t2r	homogeneous transform to rotation submatrix
tr2rpy	homogeneous transform or rotation matrix to roll/pitch/yaw angles
trotx	homogeneous transform for rotation about X-axis
troty	homogeneous transform for rotation about Y-axis
trotz	homogeneous transform for rotation about Z-axis
transl	set or extract the translational component of a homogeneous transform
trnorm	normalize a homogeneous transform
trplot	plot a homogeneous transform as a coordinate frame

Note that functions of the form `tr2X` will also accept a rotation matrix as the argument.

Rotation matrices	
angvecr	angle/vector form to rotation matrix
eul2r	Euler angle to rotation matrix
oa2r	orientation and approach vector to homogeneous transform
rotx	rotation matrix for rotation about X-axis
roty	rotation matrix for rotation about Y-axis
rotz	rotation matrix for rotation about Z-axis
rpy2r	Roll/pitch/yaw angles to rotation matrix
r2t	rotation matrix to homogeneous transform

Trajectory Generation	
ctrj	Cartesian trajectory
jtj	joint space trajectory
trinterp	interpolate homogeneous transforms

Quaternions	
+	elementwise addition
-	elementwise addition
/	divide quaternion by quaternion or scalar
*	multiply quaternion by a quaternion or vector
inv	invert a quaternion
norm	norm of a quaternion
plot	display a quaternion as a 3D rotation
q2tr	quaternion to homogeneous transform
quaternion	construct a quaternion
qinterp	interpolate quaternions
unit	unitize a quaternion

General serial link manipulators	
link	construct a robot link object
nofriction	remove friction from a robot object
perturb	randomly modify some dynamic parameters
robot	construct a robot object
showlink	show link/robot data in detail

Manipulator Models	
Fanuc10L	Fanuc 10L arm data (DH, kine)
MotomanHP6	Motoman HP6 arm data (DH, kine)
puma560	Puma 560 data (DH, kine, dyn)
puma560akb	Puma 560 data (MDH, kine, dyn)
S4ABB2p8	ABB S4 2.8 arm data (DH, kine)
stanford	Stanford arm data (DH, kine, dyn)
twolink	simple 2-link example (DH, kine)

Kinematics	
diff2tr	differential motion vector to transform
fkine	compute forward kinematics
ftrans	transform force/moment
ikine	compute inverse kinematics
ikine560	compute inverse kinematics for Puma 560 like arm
jacob0	compute Jacobian in base coordinate frame
jacobn	compute Jacobian in end-effector coordinate frame
tr2diff	homogeneous transform to differential motion vector
tr2jac	homogeneous transform to Jacobian

Graphics	
drivebot	drive a graphical robot
plot	plot/animate robot

Dynamics	
accel	compute forward dynamics
cinertia	compute Cartesian manipulator inertia matrix
coriolis	compute centripetal/coriolis torque
fdyn	forward dynamics (motion given forces)
friction	joint friction
gravload	compute gravity loading
inertia	compute manipulator inertia matrix
itorque	compute inertia torque
rne	inverse dynamics (forces given motion)

Other	
ishomog	test if argument is 4×4
isrot	test if argument is 3×3
isvec	test if argument is a 3-vector
maniplty	compute manipulability
rtdemo	toolbox demonstration
unit	unitize a vector