

PROJETO E CONTROLE DE UM MÃO ROBÓTICA SERVO CONTROLADA POR TENDÕES

Aluno: Thiago de Sá Earp de Souza Marinho

Orientador: Marco Antonio Meggiolaro

Introdução

A mão humana é um órgão essencial para as tarefas cotidianas e para a autonomia de um indivíduo. Sua versatilidade e destreza permitem desde a manipulação de simples objetos até a realização de tarefas de alta precisão, e.g. em neurocirurgia. Deficientes físicos que não possuem uma ou ambas as mãos podem enfrentar grandes dificuldades para realizar mesmo as tarefas mais simples. Sendo assim, existe uma necessidade de auxiliar essas pessoas através de tecnologias robóticas aplicadas a próteses.

Além disso, existem ferramentas e peças projetadas para serem manipuladas pela mão humana que são usadas em locais insalubres, perigosos e de impossível acesso, como por exemplo, grandes profundidades, lugares radiativos ou até mesmo no espaço (Robonaut, NASA, Fig 1). Uma mão robótica pode realizar tarefas nesses locais, utilizando ferramentas feitas para humanos (Fig 2), sem que se seja necessário desenvolver novas soluções para cada diferente situação.



Fig 1 - Robonaut Hand NASA



Fig 2 - Shadow Robotic Hand

Desde o século XVIII a biomecânica da mão humana vem sendo estudada para ser aplicada como um modelo para dispositivos mecânicos. Com a sofisticação destes dispositivos, impulsionada pelos avanços na robótica e miniaturização de atuadores e sistemas eletrônicos, é possível desenvolver mãos automatizadas para servir de prótese em seres humanos ou ainda substituir a mão humana em qualquer situação. O desenvolvimento de um sistema robótico que seja capaz de replicar os movimentos de mãos humanas envolve uma interdisciplinaridade entre as áreas de mecânica, biomecânica e controle.

Objetivos

O objetivo deste trabalho foi projetar e construir um protótipo de uma mão robótica antropomórfica servo-controlada, acionada por tendões de aço. Assim, o projeto visou iniciar o estudo do desenvolvimento de próteses e também de mãos robóticas antropomórficas para serem utilizadas como substitutas da mão humana.

Para evitar uma demasiada complexidade do sistema, este protótipo possuirá um subconjunto dos movimentos da mão humana que, no entanto, será suficiente para realizar funções básicas como pegar objetos, permitindo segurá-los de formas arbitrárias.

Metodologia

O desenvolvimento do projeto pode ser dividido nas seguintes etapas

- Revisão bibliográfica
- Concepção e design 3D
- Modelagem
- Desenvolvimento do protótipo
- Controle e comunicação

1 Revisão bibliográfica

Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica em que foram estudadas diversas mãos robóticas e a anatomia da mão humana. Primeiramente definiremos os conceitos básicos para o estudo de mãos robóticas; antropomorfismo, capacidade funcional e destreza [1].

1.1.1 Antropomorfismo

O grau de antropomorfismo da mão robótica é a capacidade que ela tem de imitar a mão humana em relação ao seu tamanho, formato, consistência e qualquer outro aspecto físico e visual, mas isso não inclui sua funcionalidade. Um alto grau de antropomorfismo pode não ser necessária para realização de certas tarefas, no entanto, antropomorfismo é um objetivo desejado, por exemplo, pelos seguintes motivos:

- Operar a mão num ambiente feito para humanos onde as tarefas ou até mesmo os objetos e ferramentas foram projetados para o formato e tamanho da mão humana
- O robô pode ser tele-operado por um humano usando-se uma luva (*data-glove*) em que ele reproduz os movimentos feitos com a luva.
- Quando a mão robótica vai ser usada como prótese na substituição da mão humana.
- Para o uso de mãos robóticas para entretenimento ou assistência, como num robô enfermeiro.

1.1.2 Capacidade funcional

A capacidade funcional de uma mão humana pode ser descrita em duas habilidades:

- Preensão: a habilidade da mão de pegar e segurar objetos
- Apreensão: a habilidade de entender através do toque

Isto é, a mão humana pode ser vista como um dispositivo de *Input* e *Output*. Como *Output* a mão aplica forças para manipular e segurar objetos e como *Input* ela pode obter informações sobre o tamanho, peso, temperatura e formato de objetos além de conseguir explorar ambientes desconhecidos. Essas mesmas características devem ser encontradas em mãos robóticas avançadas.

1.1.3 Destreza

Destreza é a capacidade que o sistema robótico tem de realizar tarefas e movimentos com alto grau de complexidade. No campo da robótica podemos dividir destreza em duas áreas; manipulação interna e *grasping* (agarrar, pegar). O *grasping* destina-se a ação de agarrar objetos e segurá-los com uma configuração invariante no tempo (i.e, o objeto se mantém fixo em respeito à mão), enquanto a manipulação interna diz respeito ao movimento controlado do objeto agarrado em que a configuração da mão varia com o tempo. O potencial de destreza diz respeito apenas à forma e a estrutura mecânica da mão, isto é, uma mão robótica com uma estrutura complexa e diversos graus de liberdade, no entanto mal controlada, pode não ter destreza alguma, mas tem um alto potencial de destreza.

1.2 Destreza, capacidade funcional e antropomorfismo da mão robótica

O desafio do projeto foi determinar um grau de complexidade da estrutura que fosse simples o suficiente para realizar as tarefas de prensão e *grasping* de objetos com um fácil controle. No entanto, foi desejado também obter um potencial de destreza mesmo que esse potencial não fosse usado. Assim futuros projetos poderão utilizar a mesma mecânica desta mão com diferentes formas de controle.

Foi desejado também que a mão robótica tivesse um bom grau de antropomorfismo, com cinco dedos, todos nas posições corretas e com dimensões reais. De tal modo o robô se aproxima morfológicamente a mão humana.

1.3 Algumas mãos robóticas

1.3.1 Shadow Hand

A Shadow possui uma das mãos robóticas mais avançadas do mundo com 24 graus de liberdade que reproduz todos os movimentos da mão humana. Um sistema integrado de sensoriamento e de controle de posição possibilita sua delicadeza e super sensibilidade para manipular objetos pequenos e frágeis.

Essa mão possui 40 “*air msucles*”, atuadores pneumáticos, em sua base ligados por fios até a ponta de seus dedos. Esse sistema simula com muita eficácia a biomecânica da mão humana.

1.3.2 Robonaut Nasa

Uma mão robótica com 22 articulações (duas de pulso) e 14 graus de liberdade. Diferente da Shadow Hand a Robonaut Hand tem seus atuadores dentro da estrutura da mão, e servo controlada através de tendões. Além do seu alto grau de destreza essa mão tem o um toque e uma superfície de contato muito realísticas.

1.3.3 DIST - Hand

A universidade italiana de Genova, em 1998, desenvolveu uma mão com três dedos e um polegar com 16 graus de liberdade (quatro para cada dedo), logo com baixo grau de antropomorfismo. O movimento dos dedos são gerados através de seis fios (tendões) passados por polias e tensionados por servo motores de 5V DC com torque de 2Kgcm.

1.3.4 DLR Hand II

Mão robótica do Centro Espacial Alemão, desenvolvida no ano 2000, com intuito de ser utilizado como protótipo para pesquisa. Essa mão possui quatro dedos e um polegar oposto, todos idênticos com 3 graus de liberdade cada. Essa mão é servo controlada através de tendões e foi construída com vários sensores que permitem controle preciso com um sensível *feedback* de forças e posicionamento de dedos.

1.4 A mão humana

Cada dedo da mão humana apresenta 4 graus de liberdade: flexão, extensão, abdução e adução, exceto o polegar que apresenta 5, além dos graus de liberdade do punho. Os movimentos realizados por nossas mãos são acionados por dois tipos de músculos, os que estão dentro da nossa mão (intrínsecos) e os que se encontram no antebraço (extrínsecos). Os músculos extrínsecos se ligam as falanges, os ossos dos dedos, através de tendões, que são bem visíveis na parte de trás das mãos (Figura 3). As falanges podem ser divididas em três grupos: proximais que se encontram mais próximas à palma da mão, as médias que se encontram no meio e as distais que se encontram nas pontas dos dedos. A figura 4 mostra um esqueleto da mão humana incluindo os nomes dos ossos para facilitar a compreensão.



Figura 3

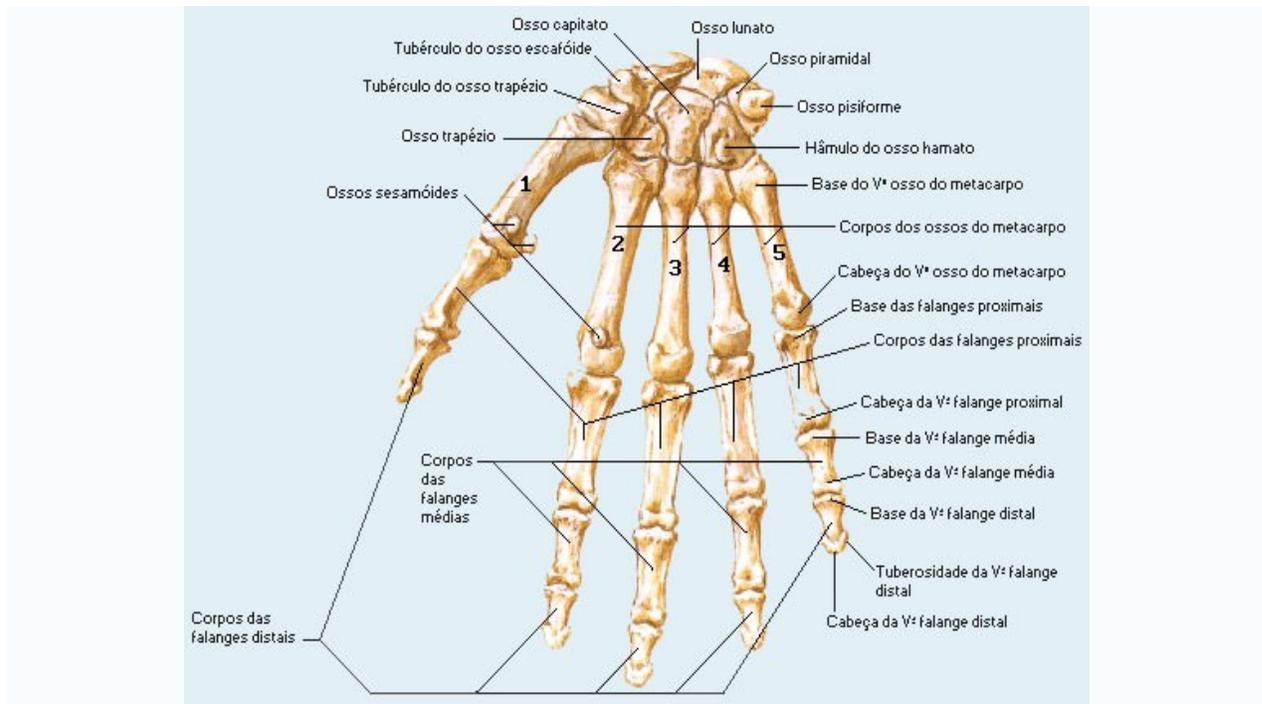


Figura 4

2 Concepção e Design 3D

2.1 Concepção - Definição da estrutura e formato

A estrutura da mão robótica, inspirada na mão humana, possui cinco dedos instalados em posições bem próximas da dos dedos na nossa mão. Todos os dedos foram definidos da mesma maneira mudando se apenas as dimensões e o número de falanges no caso do polegar.

Foi concebido que cada dedo seria controlado por somente um atuador, um servo através de cabos de aço. Assim, o dedo terá uma trajetória única quando não tiver nenhum contato com objetos externos. No entanto, ao ter contato com objetos o dedo terá seu percurso alterado para envolvê-los, devido às forças de contato do objeto sobre o dedo.

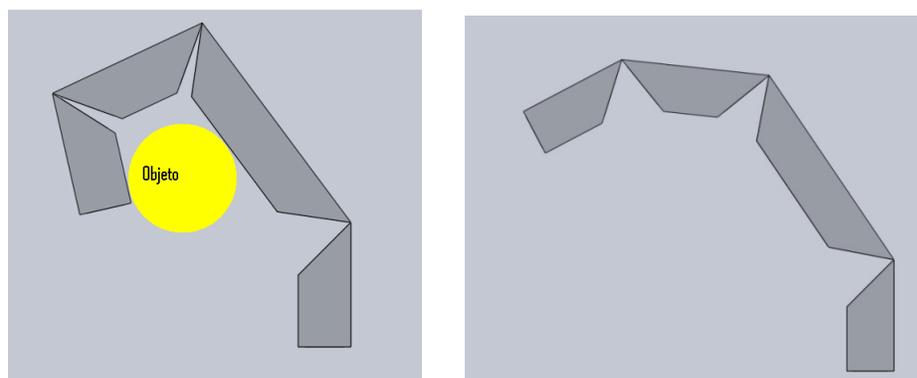


Figura 5

Isso mostra que essa simplificação não altera o *grasping* (Fig6). Portanto, o protótipo estará apto a pegar objetos que uma mão humana pegaria, mas não estará preparado para realizar manobras de manipulação interna.

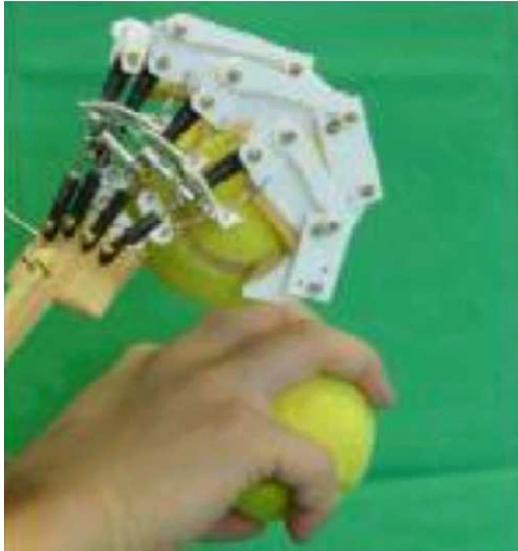


Fig 6 - Grasping

Diferente da mão humana, o protótipo terá um posicionamento fixo dos dedos. Isto é, os dedos estarão munidos apenas dos movimentos de flexão e extensão, mas não realizarão a abdução nem a adução. Sendo assim, os dedos do protótipo terão suas posições definidas da mesma forma que quando a mão humana está preparada pra realizar o *grasping*.

O protótipo terá o movimento dos dedos acionado por servos-motores acoplados no antebraço do robô. Esses servos representarão os músculos extrínsecos da mão humana e para simular os nossos tendões serão usados finos cabos de aço chamados de tendões de aço.

2.2 Design 3D

Para fazer o desenho CAD 3D do protótipo foi utilizado o programa SolidWorks. Esse programa foi escolhido pois ele nos permite fazer desenhos em três dimensões de forma fácil e intuitiva. O *design* 3D da mão robótica foi importante pelos seguintes motivos:

- Permitiu visualizar e corrigir o aspecto antropomórfico do protótipo
- Ilustrou a visão geral do projeto
- Permitiu visualizar a amplitude do movimento
- Auxiliou na escolha das dimensões
- Permitiu a definição da montagem e localização das peças
- Permitiu corrigir erros de concepção

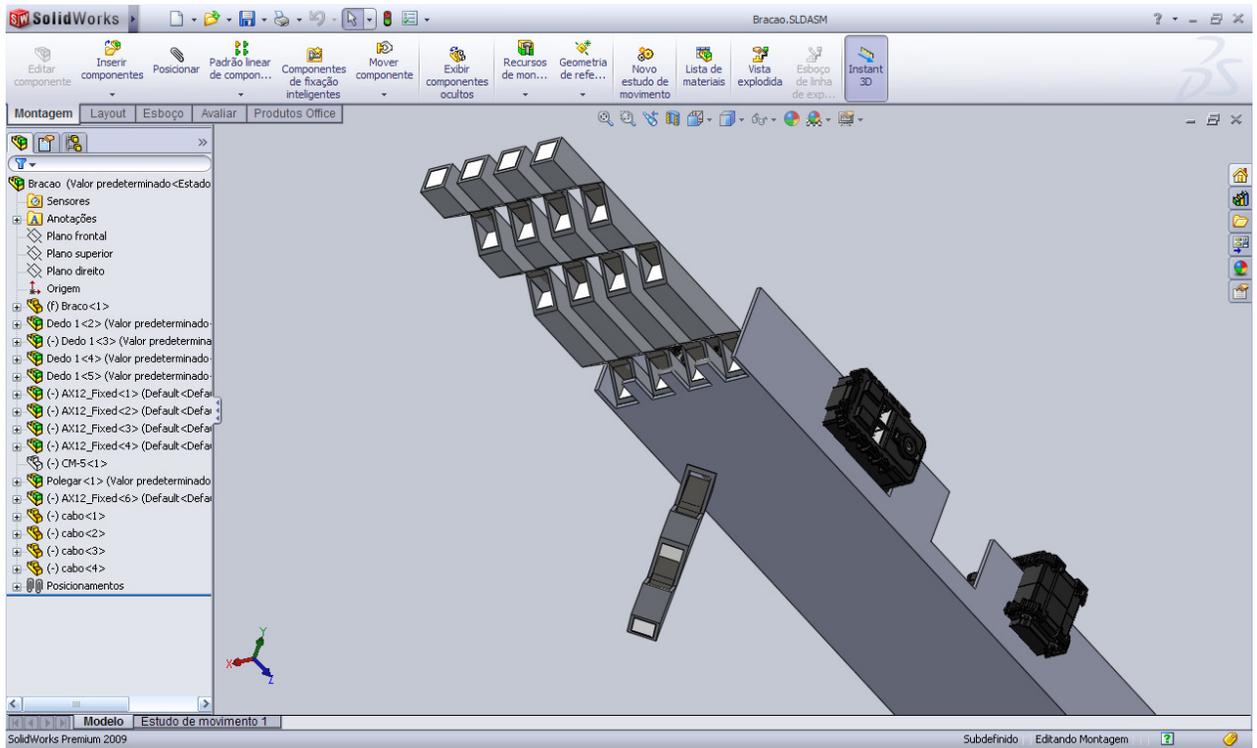


Figura 7

3 Modelagem Matemática

A modelagem do protótipo foi feita para cada dedo separadamente. Foram desenvolvidas as equações de posição da ponta do dedo dado os ângulos θ_1 , θ_2 e θ_3 respectivamente os ângulos entre as falanges 1₁, 1₂ e 1₃ (ângulos da notação de Denavit-Hartenberg [4]). Chegamos também às equações da variação do comprimento do cabo de aço de acordo com a posição do dedo.

As figuras abaixo mostram duas configurações de dedos diferentes. A figura 7 apresenta uma representação do dedo levando em conta que as falanges estão unidas por juntas.

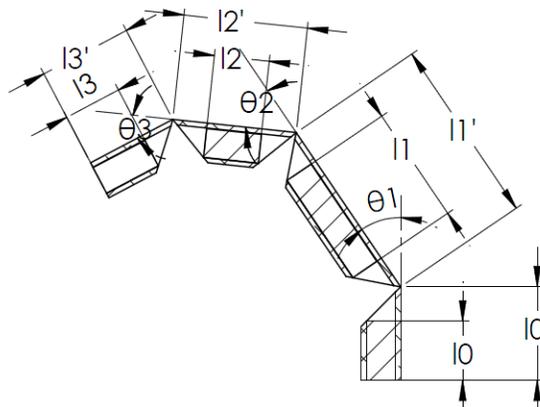


Figura 8

De fato, o protótipo não possui juntas, mas finas fitas de aço mola que ao serem dobradas substituem uma junta (Fig10). O tracejado vermelho representa o trajeto dos tendões de aço ao longo do dedo. Logo, usaremos as variáveis da figura anterior com as modificações das juntas como representadas no esquema abaixo:

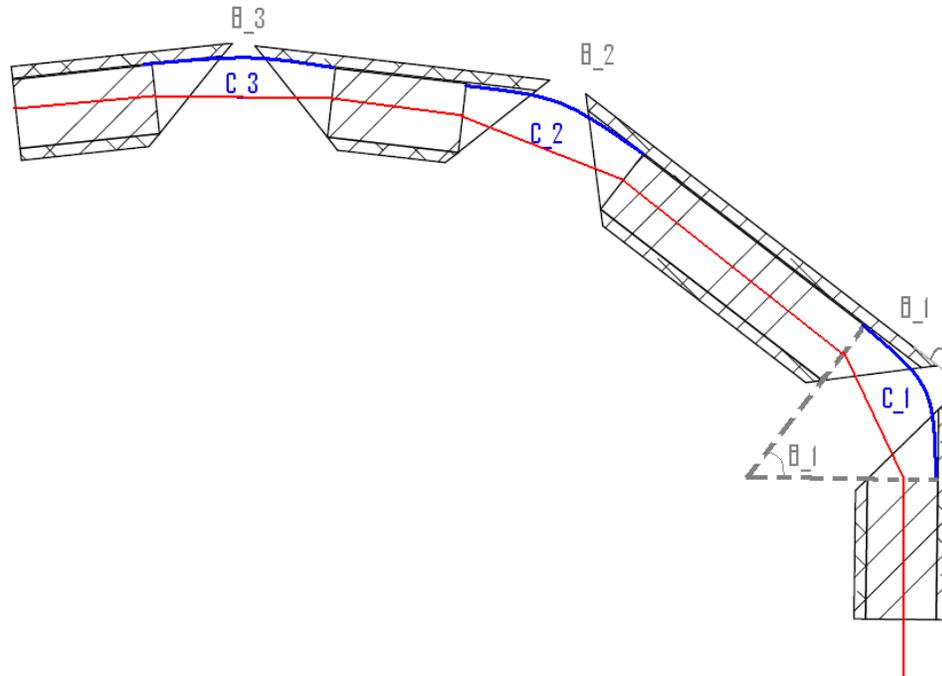


Figura 9

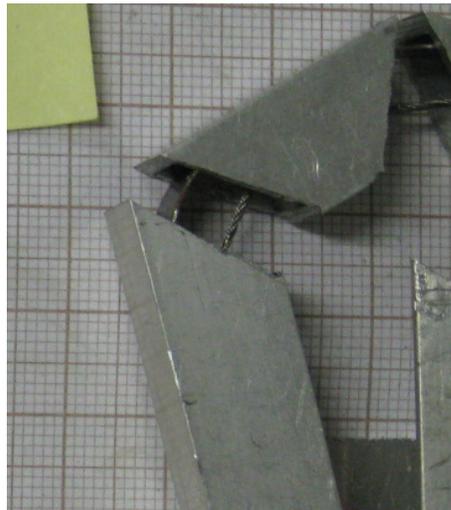


Figura 10

Para evitar demasiada complexidade as medidas C_1 , C_2 e C_3 das fitas de aço mola foram aproximadas por arcos de curva de comprimento fixo com os ângulos de curvatura θ_1 , θ_2 e θ_3 variáveis.

As equações seguem:

3.1 Equação da posição dados os ângulos

As equações abaixo nos dão as coordenadas x e y da ponta dos dedos sendo a origem a base da falange proximal.

$$x = \frac{C_1}{\theta_1} (1 - \cos(\theta_1)) + l_1 \sin(\theta_1) + \frac{C_2}{\theta_2} [1 - \cos(\theta_1 + \theta_2)] + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + \frac{C_3}{\theta_3} [1 - \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)] + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

$$y = \frac{C_1}{\theta_1} \sin(\theta_1) + l_1 \cos(\theta_1) + \frac{C_2}{\theta_2} \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + \frac{C_3}{\theta_3} \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$$

3.2 Equação da variação do comprimento do tendão de aço

A equação que nos permite saber o quanto o comprimento do fio de aço foi variado para se atingir certa posição definida por θ_1 , θ_2 e θ_3 foi desenvolvida da seguinte forma:

Com o dedo esticado o comprimento do fio L_i é:

$$L_i = L_0 + l_0 + \lim_{\theta_1 \rightarrow 0} \frac{2C_1}{\theta_1} \sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) + l_1 + \lim_{\theta_2 \rightarrow 0} \frac{2C_2}{\theta_2} \sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) + l_2 + \lim_{\theta_3 \rightarrow 0} \frac{2C_3}{\theta_3} \sin\left(\frac{\theta_3}{2}\right) + l_3$$
$$\Rightarrow L_i = L_0 + l_0 + C_1 + l_1 + C_2 + l_2 + C_3 + l_3$$

A equação que nos dá o comprimento do fio para uma determinada posição é:

$$L = L_0 + l_0 + \frac{2C_1}{\theta_1} \sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) + l_1 + \frac{2C_2}{\theta_2} \sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) + l_2 + \frac{2C_3}{\theta_3} \sin\left(\frac{\theta_3}{2}\right) + l_3$$

Sendo L o comprimento total do fio.

Logo a variação de comprimento do fio é dada por:

$$\Delta L = L_i - L = L_1 + L_2 + L_3 - \left[\frac{2C_1}{\theta_1} \sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) + \frac{2C_2}{\theta_2} \sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) + \frac{2C_3}{\theta_3} \sin\left(\frac{\theta_3}{2}\right) \right]$$

4 Desenvolvimento do protótipo

O protótipo foi concebido a partir da construção dos cinco dedos que depois foram montados de forma a constituírem uma mão.

4.1 Desenvolvimento do Dedo

As falanges do dedo humano foram representadas no protótipo por tubos de alumínio com seções quadradas de diâmetro interno de $\frac{1}{2}$ polegada e com diâmetro externo de $\frac{3}{8}$ polegadas. Cortes de 45 graus foram feitos no tubo para que a amplitude do movimento fosse plenamente desenvolvida. Fitas de aço mola foram usadas no local de juntas dada a sua capacidade de deformação elástica, o que significa que a energia potencial do material dobrada vai agir com músculo extensor fazendo o dedo voltar para a posição inicial. Então, as fitas de aço possuem uma dupla função já que agem como juntas e também como molas.

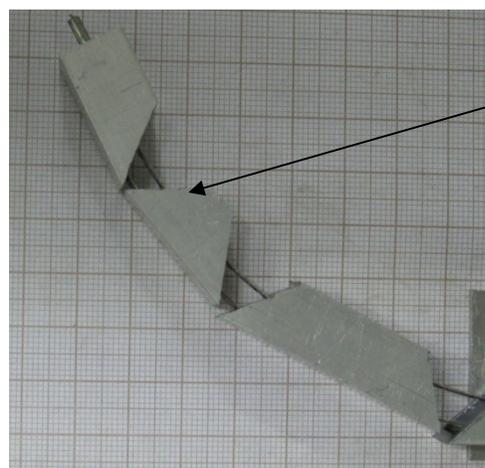


Figura 11

Barras quadradas de acetal, com furos de 1,5mm de diâmetro ao longo do comprimento, foram introduzidas dentro dos tubos de alumínio para prender as fitas de aço mola e ao mesmo tempo servirem de guia para os tendões de aço.

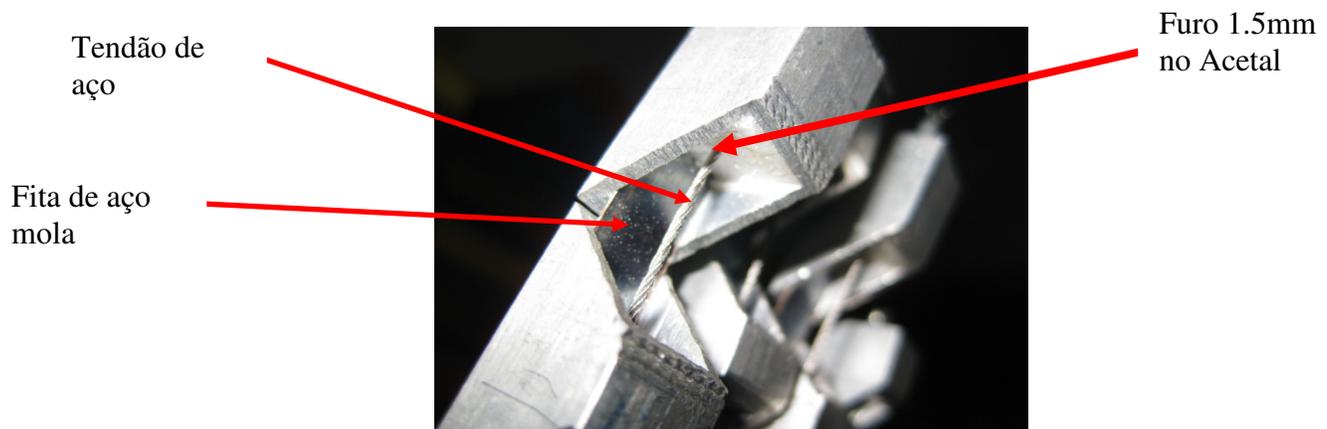


Figura 12

Logo, ao serem tensionados, os tendões de aço fazem que o dedo dobre sobre as fitas de aço mola e feche de uma forma bem parecida ao dedo da mão humana. As figuras abaixo ilustram esse movimento.

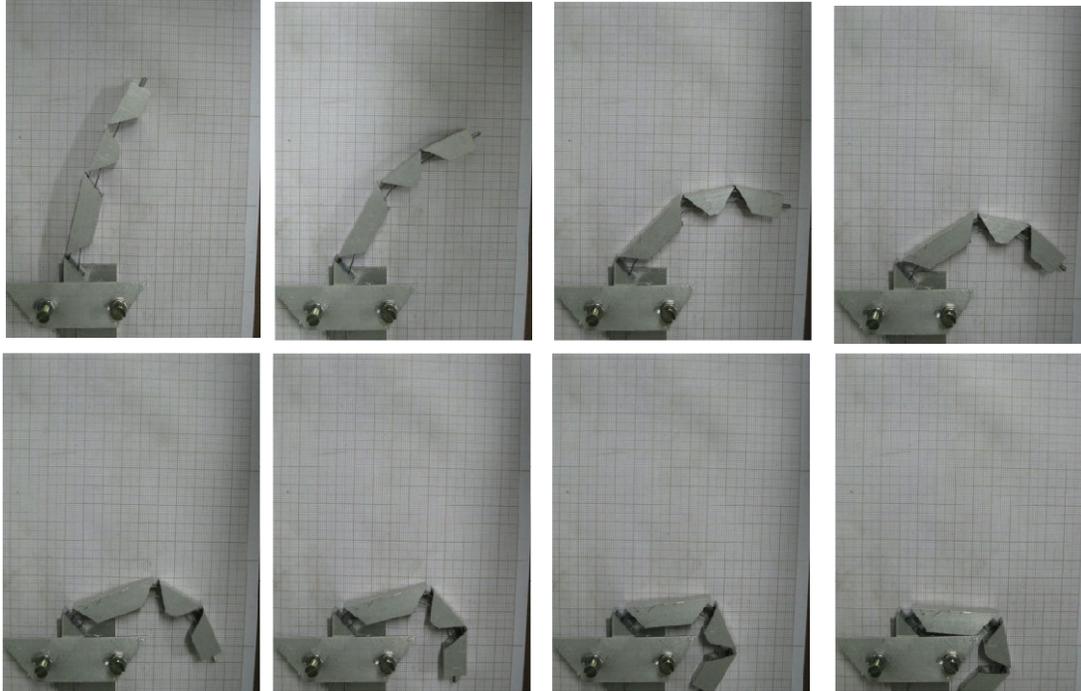


Figura 13

4.2 Montagem

Após terem sido construídos os cinco dedos a mão foi montada num perfil de alumínio em U de 3 polegadas. Esse perfil serviu ao mesmo tempo como palma da mão e com antebraço, onde foram acoplados os servos-motores. Os dedos foram presos na mão com parafusos na palma do protótipo como pode ser visto na figura 14.

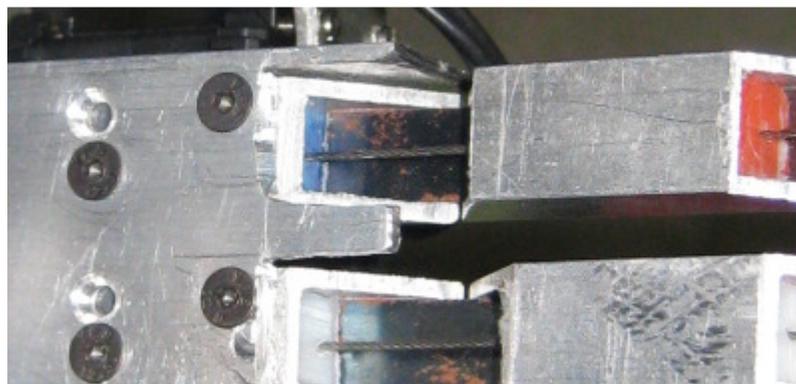


Figura 14

O polegar humano é dotado de movimento rotatório e, portanto, tem uma grande gama de posições em relação a palma da mão. Sendo de demasiada dificuldade tal implementação foi atribuído ao polegar uma posição fixa em que ele pudesse pegar objetos com facilidade. Essa posição é perpendicular ao plano da palma da mão em que o dedo feche em direção ao dedo anelar, como ilustrado na figura abaixo.



Figura 15

Os servos-motores usados foram os AX-12+ da Dynamixel que faziam parte do kit humanoid Bioloid. Eles foram aparafusados também ao perfil de alumínio que serviu de antebraço ao protótipo. Assim, os tendões de aço foram presos aos servos em pequenas polias acopladas a eles fazendo que com o giro deles o tendão de aço fosse puxado.

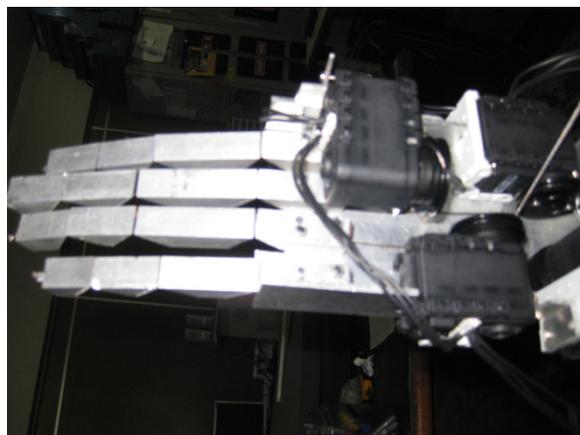


Figura 16

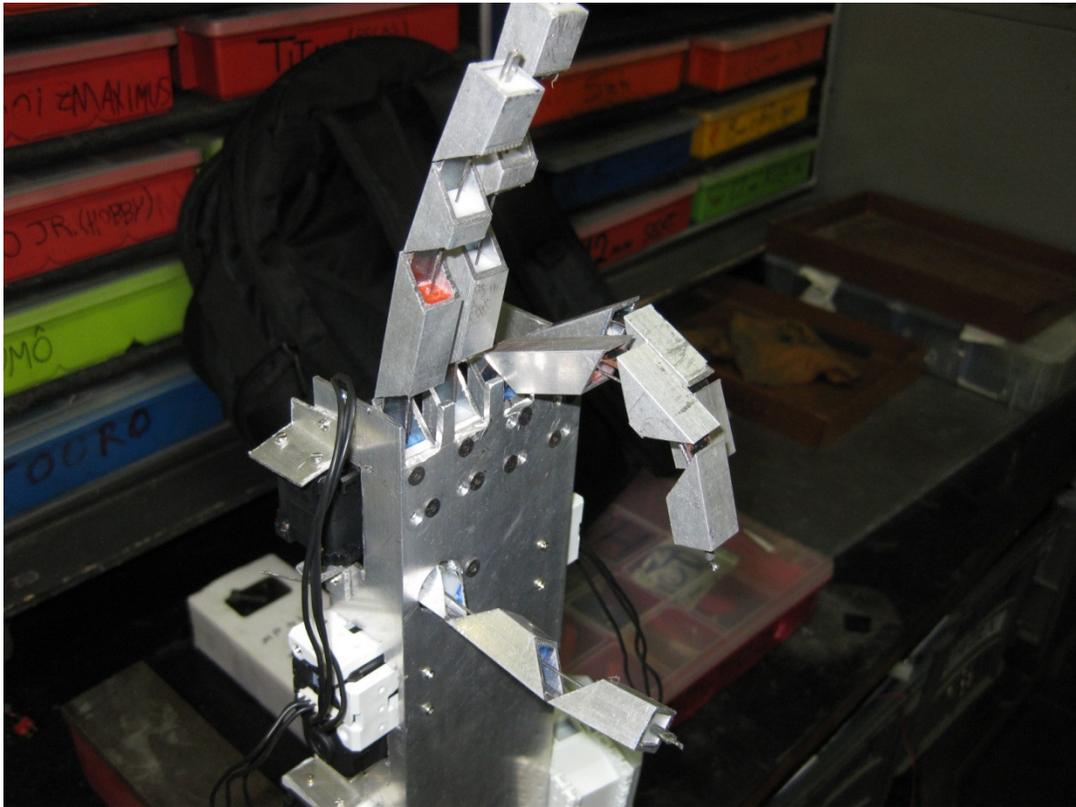


Figura 17

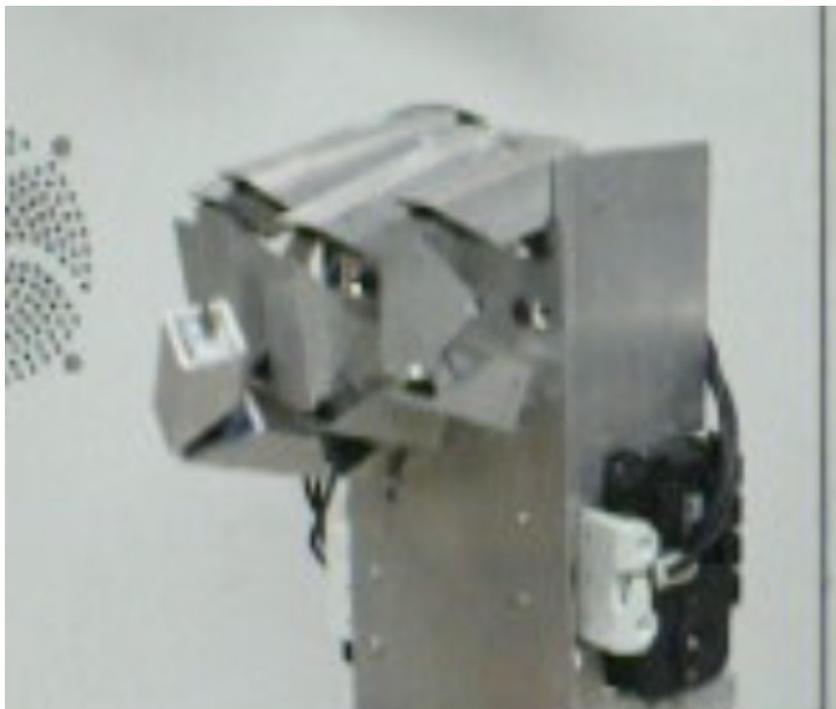


Figura 18

5 Controle e Comunicação

Por serem servos-motores de fácil utilização mas com diversos atributos (controle de posição, velocidade e torque interno) os AX-12+ da Dynamixel foram escolhidos para o projeto. Eles foram usados com a placa CM-5 do kit humanoid Bioloid.



Figura 19



Figura 20

O *software* usado para escrever o programa de controle do protótipo foi o Behavior Control Programmer (Bioid). Esse *software* possui uma linguagem de programação simples, porém de baixo nível, o que torna a implementação do controle limitada, dificultando a implementação direta de equações matemáticas.

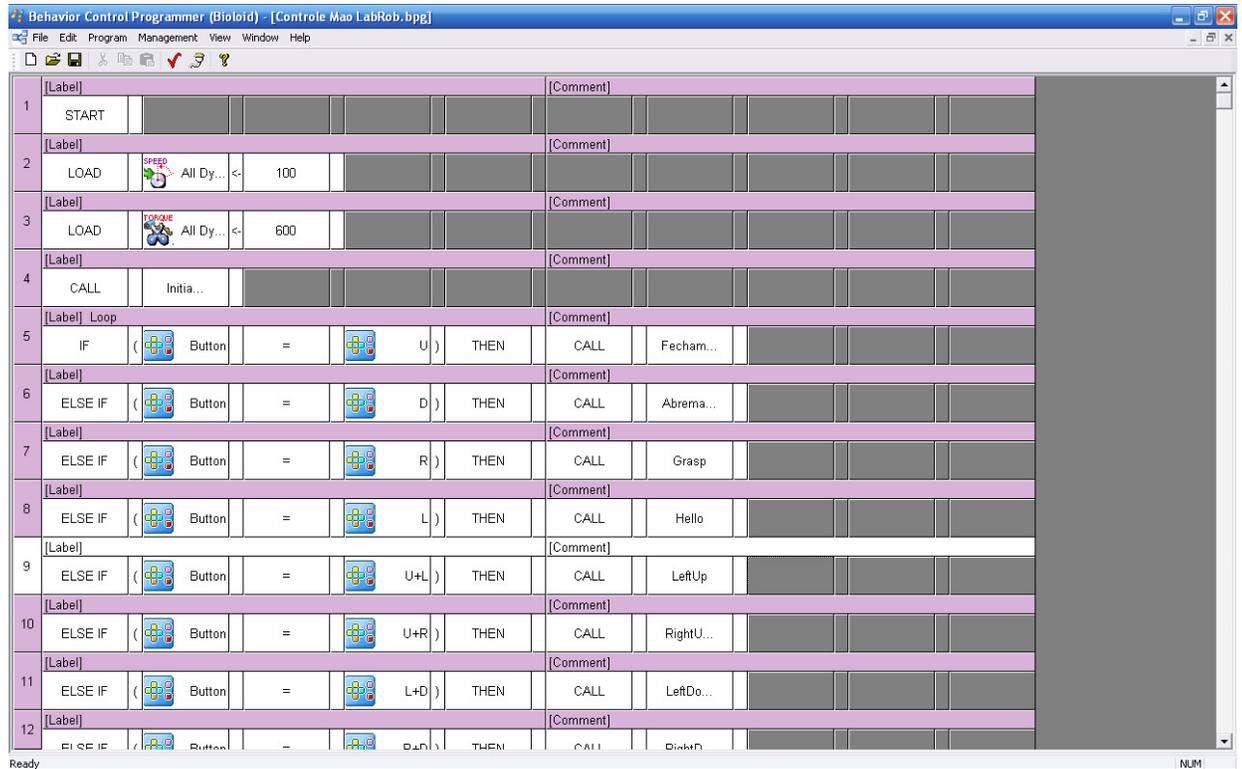


Figura 21

Com esse *software* programas foram feitos e enviados para a placa CM-5 através da porta serial do computador. Os servos-motores AX-12+ possuem controle de posição em que os seus 300 graus de amplitude eram relacionados com 1024 pontos de posição (10 bits).

Através de uma posição desejada para os dedos, as equações foram usadas para se determinar o deslocamento do tendão de aço. Usando a relação $\frac{\Delta L}{R} = \Delta \alpha$ onde L é o comprimento do tendão, R o raio da polia do servo-motor e α o ângulo de rotação do servo, foram determinadas tarefas para os servos chegarem às posições desejadas. Deste modo, ações como abrir e fechar a mão e realizar rotinas pré-programadas puderam ser feitas com sucesso pelo protótipo.

6 Conclusão

Neste projeto um protótipo de uma mão robótica antropomórfica foi desenvolvido com sucesso além do seu programa para controle. O protótipo realiza com eficácia movimentos básicos e consegue pegar objetos leves com formatos simples, como por exemplo bolas de tênis e latas de refrigerante. Além disso, foram coletados dados experimentais, usando-se uma célula de carga LCEB-5 da Omega através do programa LabView. Esses dados relacionam o deslocamento do cabo de aço com a resistência feita pela fita de aço mola e a posição dos dedos.

Para a finalização do projeto deverão ser feitas comparações entre as equações teóricas e as equações obtidas pela interpolação polinomial dos dados experimentais coletados com a célula de carga. Com essas informações, um novo controle, usando-se a placa USB2Dynamixel, deverá ser implementado, o que permitirá a utilização de linguagens de mais alto nível como MATLAB, C++ ou LabView para se controlar os servos-motores AX-12+.

Com o objetivo de melhorar a destreza do protótipo, mais servos-motores podem ser introduzidos, o que permitiria o controle independente de cada falange, assemelhando-se ao funcionamento da mão humana. Isso pode ser realizado com este protótipo já que sua estrutura mecânica permite esse tipo de implementação. Isto é, o protótipo tem um potencial de destreza suficiente para essa configuração o que permitiria a manipulação interna de objetos.

Adicionar mecanismo de sensoriamento também pode um aperfeiçoamento importante, já que o protótipo ainda não possui *feedback*, isto é, está em malha aberta. Assim, poderemos calibrá-lo com maior eficiência.

O protótipo se encontra no Laboratório de Engenharia de Controle e Automação da PUC-Rio (LECA) onde está disponível para outros estudos acadêmicos envolvendo o desenvolvimento de próteses e de mãos antropomórficas tele-operadas.

7 Referências Bibliográficas

- [1] L. Biagiotti, F. Lotti, C. Melchiorri, G. Vassura, How Far Is the Human Hand? A Review on Anthropomorphic Robotic, DEIS - DIEM, **University of Bologna**, 40136 Bologna, Italy
- [2] TSAI, Lung-Wen Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators, **Wiley-Interscience**, (Hardcover), v.1., p. 333-369.
- [3] B. Massa, S. Roccella, M. C. Carrozza, P. Dario Design and Development of an Underactuated Prosthetic Hand **ARTS / Mitech Labs**
- [4] CRAIG, J.J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**. Addison-Wesley, 1986.
- [5] J. K. Salisbury and J. J. Craig, "Articulated hands: Force control and kinematics issues," *Int. J. Robotics Res.*, vol. 1, no. 1, 1982.
- [6] G. Stellan, G. Cappiello, S. Roccella, M. Carrozza, P. D. G. Metta, G. Becchi **Preliminary Design of an Anthropomorphic Dexterous Hand for a 2-Years-Old Humanoid: towards Cognition**