

FELIPE DORO LABATE  
RAFAEL BELLINI DE FARIA GAZI

PROJETO MECATRÔNICO DOS OLHOS E PÁLPÉBRAS DE UMA  
FACE ROBÓTICA HUMANÓIDE PARA REPRESENTAR EMOÇÕES

Monografia apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para a obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Mecatrônica

São Paulo  
2011



FELIPE DORO LABATE  
RAFAEL BELLINI DE FARIA GAZI

**PROJETO MECATRÔNICO DOS OLHOS E PÁLPÉBRAS DE UMA  
FACE ROBÓTICA HUMANÓIDE PARA REPRESENTAR EMOÇÕES**

Monografia apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para a obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Mecatrônica

Área de concentração:  
Engenharia Mecatrônica

Orientador:  
Prof. Dr. Marcos Ribeiro Pereira Barretto

São Paulo  
2011

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Labate, Felipe Doro**

**Projeto mecatrônico dos olhos e pálpebras de uma face robótica humanóide para representar emoções / F.D. Labate, R.B.F. Gazi. -- São Paulo, 2011.**

**72 p.**

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

**1. Mecatrônica 2. Face robótica 3. Emoções Humanas 4. Pálpebras 5. Olhos 6. Mecanismo ; I. Gazi, Rafael Bellini de Faria II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos III. t.**

## Agradecimentos

Eu gostaria de reconhecer as duas faculdades que frequentei, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e o *Polytechnic di Torino*, e por elas oferecerem o programa de Duplo Diploma, e agradecê-las pela sua contribuição em minha formação.

Eu gostaria de agradecer ao Professor Marcos Barreto do departamento de Engenharia Mecatrônica da Poli-USP, ao Professor Titular Reinaldo Brito e dias, à Professora Neide Coto e ao técnicos Carlos de Falco Junior da Faculdade de Odontologia, ao técnico Wagner Kowalhi e a Dionéia Barbosa Heluany que nos ajudaram, pela sua sabedoria e bondade, e por todo o tempo que eles dedicaram a nós e a este projeto.

Gostaria de agradecer à minha família e aos meus amigos por todo o apoio que eles me deram em todo o meu período de estudos e em toda a minha vida.

Também pelos amigos que eu fiz na Itália, os quais eu terei comigo por toda a minha vida, em particular Felipe e Marina, que, mesmo já nos conhecendo antes, no período que estudamos juntos eles viraram parte da minha família.

Eu gostaria de agradecer especialmente minha mãe Miriam e meu pai Marcelo pela sua infinita fé em mim e por sempre estarem ao meu lado quando eu precisei. Eu não poderia ter feito nada que fiz sem seu apoio incondicional. E eu gostaria de agradecer a Deus por estar sempre ao meu lado em minha vida e fazer tudo transcorrer tão clara e perfeitamente.

Rafael Gazi



## Agradecimentos

Gostaria de agradecer à Universidade de São Paulo pela excelente formação acadêmica que me foi proporcionada e pela oportunidade de participar de um programa de duplo-diploma com o *Politecnico di Torino*

Gostaria de agradecer o suporte dado pelo Prof. Dr. Marcos Ribeiro Pereira Barreto do departamento de Engenharia Mecatrônica da POLI, pelo Prof. Titular Reinaldo Brito e Dias, Prof. Dr. Neide Pena Coto e pelo técnico Carlos de Falco Junior, da Faculdade de Odontologia da USP, por Vagner Kowalhi e por Dionéia Barbosa Heluany durante este projeto. Grande parte do resultado deste projeto não existiria sem a ajuda deles.

Gostaria de agradecer dos meus pais Elaine e Paulo pelo suporte dado durante todo o curso de engenharia. O fato deles acreditarem no meu potencial fez toda a diferença para mim. Muito obrigado

Gostaria de agradecer ao meu amigo e companheiro de projeto Rafael, pelas horas passadas para gerar todo este projeto e pela amizade conquistada durante o curso de engenharia.

Gostaria de agradecer à minha namorada Marina por estar do meu lado em todos os momentos, dentro e fora deste projeto.

Finalmente, gostaria de agradecer à minha família e amigos, tanto brasileiros quanto italianos, que através de pequenos gestos fizeram com que minha jornada pela faculdade foi muito mais agradável. São estes momentos que vão ficar guardados para sempre na memória. Obrigado

Felipe Doro Labate



## **Resumo**

Ao longo dos últimos anos, o número de pesquisas na área da robótica humanoíde para representar emoções humanas tem crescido demasiadamente. Muitos pesquisadores procuram o melhor jeito de transferir as emoções que um ser humano produz ao movimentar seus músculos faciais para mecanismos que movimentam peças e componentes. Muitos limitantes são impostos no caso de um trabalho deste tipo, como pouco espaço de trabalho e necessidade de utilizar matérias leves mas ao mesmo tempo resistentes. Com isso, é gerada a necessidade de se criar mecanismos finos e de grande precisão para atuar com movimentos suaves e naturais. Além disso, é necessário também procurar materiais que servirão para representar a pele, por exemplo, que seja elástico o suficiente para ser esticada ou contraída como a pele humana. Desse modo, este trabalho visa criar e implementar um mecanismo para a movimentação dos olhos e pálpebras, mecanismo tal que será posteriormente implementado em uma face robótica humanoíde.

**Palavras-chave:** Mecatrônica, face robótica, emoções humanas, olhos, pálpebras, mecanismo



## **Abstract**

In the last few years, the number of researches in the Field of humanoid robotics to represent human emotions has increased drastically. Many researchers look for the best way to transfer the emotions that a human being can produce by moving his facial muscles to mechanisms that moves work pieces and components. Many limits are imposed in the case of a project like this such as little workspace and the need to use light yet resistant materials. Thus it is generated the need to create mechanisms of high precision to operate with smooth and natural movements. Besides that, it is needed to look for materials that will work as skin, that must be elastic enough to be stretched or contracted like the human skin. Consequently, this project looks forward to create and implement a mechanism to move the eyes and eyelids, such mechanism that will be further implemented in a robotic humanoid face.

**Keywords:** Mechatronic, robotic face, human emotions, eyes, eyelids, mechanism



# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos do projeto</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>7</b>
3.1	O <i>Uncanny Valley</i> . . . . .	7
3.2	Emoções humanas . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Projeto do Sistema Mecânico</b>	<b>13</b>
4.1	Especificações do projeto . . . . .	13
4.2	Sistema de movimentação dos olhos . . . . .	16
4.3	Sistema de movimentação das pálpebras . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>27</b>
5.1	Peças em alumínio . . . . .	27
5.2	Próteses oculares . . . . .	29
5.3	Hastes para movimentação dos olhos e pálpebras . . . . .	31
5.4	Montagem do Mecanismo . . . . .	34
5.5	Programação e Controle dos Movimentos . . . . .	39
5.5.1	Controle dos servos motores . . . . .	39
5.5.2	Programação dos movimentos . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>47</b>
6.1	Projetos futuros . . . . .	49
<b>Referências</b>		<b>50</b>
<b>A</b>	<b>Desenhos de Fabricação</b>	<b>53</b>
<b>B</b>	<b>Códigos fonte usados no projeto</b>	<b>63</b>
<b>C</b>	<b>Diagrama Elétrico da Placa de Circuito com Microprocessador PIC16f876A</b>	<b>71</b>



# **Lista de Figuras**

1.1	Projeto Albert-HUBO da Hanson Robotics em parceria com o KAIST [1]	3
3.1	Gráfico que relaciona o grau de aparência humana de uma máquina e a familiaridade provocada por esta em uma pessoa [2] . . . . .	7
3.2	Principais músculos da face [3] . . . . .	9
3.3	Emoções representadas com o cenho franzido . . . . .	10
3.4	Acionamentos em face robótica [1] . . . . .	10
4.1	Crânio antes da usinagem . . . . .	14
4.2	Crânio após usinagem . . . . .	15
4.3	Conceitos iniciais do mecanismo . . . . .	16
4.4	Esquema da geometria dos olhos do mecanismo . . . . .	17
4.5	Junta universal utilizada no mecanismo . . . . .	17
4.6	Vista isometrica da base do mecanismo . . . . .	18
4.7	Vista isometrica do apoio da base . . . . .	19
4.8	Motor Hextronik (imagem retirada de [4]) . . . . .	20
4.9	Suporte para os motores que acionarão os olhos . . . . .	21
4.10	Esquema das hastes de acionamento dos olhos . . . . .	21
4.11	Esquema de acionamento do olho por argolas . . . . .	22
4.12	Esquema da peça de acionamento das pálpebras . . . . .	23
4.13	Mancal para a peça da pálpebra . . . . .	23
4.14	Bloco para fixação do motor da pálpebra . . . . .	24
4.15	Suporte em 'U' para o motor da pálpebra . . . . .	24
4.16	Quadrilátero articulado para movimentar as pálpebras . . . . .	25
4.17	Vista de conjunto do mecanismo . . . . .	25
5.1	Resultado das peças em alumínio fabricadas . . . . .	28
5.2	Próteses oculares . . . . .	30
5.3	Detalhe do suporte em resina para o encaixe do olho . . . . .	30
5.4	Detalhe das argolas de acionamento dos olhos . . . . .	31
5.5	Alicates ortodônticos . . . . .	32

5.6 Haste da pálpebra . . . . .	32
5.7 Mecanismo de acionamento da palpebra . . . . .	33
5.8 . . . . .	34
5.9 Passos 1 e 2 da montagem . . . . .	35
5.9 Passos 3 e 4 da montagem . . . . .	35
5.10 Passos 5 e 6 da montagem . . . . .	36
5.11 Passos 7 e 8 da montagem . . . . .	37
5.12 Passo 9 da montagem . . . . .	38
5.12 Vistas do conjunto montado . . . . .	39
5.13 Placa com o microprocessador PIC16F876A . . . . .	40
5.14 Olhos do protótipo em todas as posições descritas . . . . .	45
A.1 Desenho de fabricação do apoio da base . . . . .	54
A.2 Desenho de fabricação do cilindro anterior de apoio da base . . . . .	55
A.3 Desenho de fabricação do cilindro posterior de apoio da base . . . . .	56
A.4 Desenho de fabricação da base . . . . .	57
A.5 Desenho de fabricação do mancal . . . . .	58
A.6 Desenho de fabricação do apoio dos motores superiores . . . . .	59
A.7 Desenho de fabricação do apoio do motor da pálpebra . . . . .	60
A.8 Desenho de fabricação do segundo apoio do motor da pálpebra . . . . .	61
C.1 Esquema elétrico da placa com Microprocessador . . . . .	72

# **Lista de Tabelas**

5.1 Relação entre as posições dos olhos e das pálpebras e a posição dos motores . . . . .	42
5.2 Codificação das funções disponíveis . . . . .	44



# Capítulo 1

## Introdução

O presente trabalho de formatura propõe a criação de um mecanismo de movimentação de olhos e pálpebras para ser implementado em uma face robótica humanoíde capaz de representar emoções. Este tema tem chamado a atenção de muitos pesquisadores nos últimos tempos pois trata-se de uma aplicação de alto nível de tecnologia e envolve diversas áreas do conhecimento. Este projeto, como qualquer outro trabalho multidisciplinar, trafega por vários campos da ciência.

Na parte de engenharia, podem ser citados os avanços na criação de sistemas compactos para o controle preciso dos graus de liberdade presentes na face, a fim de representar realisticamente as feições naturais do ser humano. Isso envolve o uso de motores cada vez menores, com os quais é possível acionar diversos pontos da face, simulando assim o comportamento dos músculos faciais. Além disso, por possuirem dimensões reduzidas, é possível utilizar um número elevado destes motores e colocá-los dentro do espaço delimitado por um crânio humano.

Outro avanço está na utilização de peças mecânicas de materiais mais leves, reduzindo o peso total do protótipo. Isso permite que os movimentos sejam mais suaves, pois com uma inércia menor, o crânio é mais facilmente comandado pelos motores. Também podem ser destacadas as descobertas em novos materiais com propriedades semelhantes à da pele humana, sempre visando aproximar o modelo da realidade. No âmbito matemático, pode-se citar os algoritmos de detecção de emoções a partir de imagens fazendo com que seja possível para o robô distinguir entre raiva, felicidade, tristeza, espanto, entre outras. Grandes avanços no campo de tratamento de imagens tem permitido chegar cada vez mais próximo deste tipo de conhecimento.

Este assunto, no entanto, se estende além do campo das ciências exatas. Existem muitas pesquisas sendo conduzidas por psicólogos, que tentam entender o que há por trás das emoções humanas e como fazer com que uma máquina seja capaz de expressá-las também. Deseja-se chegar ao ponto no qual um robô seja capaz de convencer uma pessoa de que está triste ou feliz, sem que isso pareça artificial. Ainda podem ser incluídos neste projeto o trabalho de artistas plásticos. São eles os responsáveis por esconder toda a complexidade mecatrônica desta máquina por trás de um rosto amigável.

Atualmente, existem projetos no campo da robótica humanóide que representam o estado da arte deste tema. É o caso dos robôs produzidos pela *Hanson Robotics*. Esta empresa, fundada em 2003, fabrica protótipos de robôs humanóides e também desenvolve os programas adequados para controlá-los. Hoje, fornece robôs para diversas entidades pelo mundo, sendo elas universidades e centros de pesquisa. Seus produtos são usados em uma grande variedade de pesquisas em ciência e tecnologia no campo de terapias para pessoas com autismo, problemas de inteligência artificial e percepção, neurociência e ciência cognitiva e pesquisa de atuadores para músculos artificiais.

Eles foram os responsáveis por desenvolver o *Frubber™*, material que imita características da pele humana. Com isso, os robôs ganham uma expressividade muito maior e a representação de emoções torna-se muito mais real. Um dos grandes sucessos da *Hanson Robotics* foi a criação de um crânio robótico igual ao cientista Albert Einstein. Este protótipo possui 31 graus de liberdade, sendo que dentre eles 28 são movimentos faciais, comandados por servo-motores e os outros 3 são movimentos do pescoço. Com isso, este robô consegue rir, se espantar e ainda expressar raiva e tristeza. Posteriormente, este trabalho foi integrado ao protótipo de robô humanóide bípede *HUBO*, desenvolvido pelo *Korea Advanced Institute of Science and Technology* (KAIST). Este robô possui 35 graus de liberdade para movimentação corporal e o resultado final foi chamado de Albert-HUBO [5] e é o primeiro robô que incorpora a caminhada bípede a uma face capaz de expressar emoções, como mostrado no artigo publicado por Ill-Woo Park, et al. [1]. As figuras 1.1 (a), (b) e (c) mostram o robô Albert Einstein e o robô bípede humanóide Albert-HUBO.

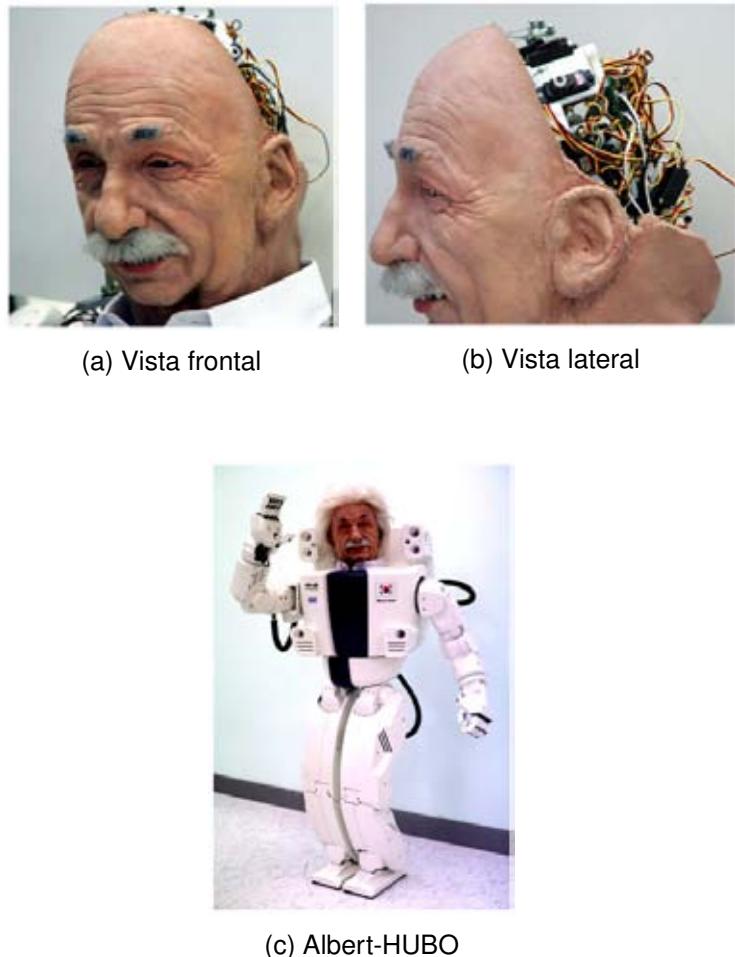


Figura 1.1: Projeto Albert-HUBO da Hanson Robotics em parceria com o KAIST [1]

Através destas figuras é possível ver o nível de detalhes feito na pele do robô usando o material *Frubber*™ [6]. Além disso, outros detalhes como sobrancelhas e bigode também ajudam a tornar o robô mais natural.

Analisando a velocidade com que estas tecnologias tem se desenvolvido, estima-se que em um futuro não muito distante, esse tipo de produto poderá estar presente com muito mais freqüência na vida das pessoas. Cada lar possuirá o seu próprio robô doméstico e este servirá para executar diversas tarefas como ser babá de crianças ou até mesmo um autômato de companhia para pessoas idosas. Além disso, outra aplicação possível seria o uso destes protótipos em manequins. Isso promoveria uma interação entre o cliente e a loja, por meio dos manequins automatizados, que não somente estariam exibindo as peças da última coleção como também conversariam com os clientes e serviriam de anfitriões para os que entrarem na loja.



## Capítulo 2

### Objetivos do projeto

Dentro do campo da robótica humanóide, este trabalho propõe a construção de um mecanismo de comando dos olhos e pálpebras para ser posteriormente colocado em uma face robótica. Ao final deste projeto, deseja-se poder controlar o movimento das partes citadas com auxílio de um computador ou microprocessador e, com isso, poder realizar alguns movimentos característicos do ser-humano, como piscar e movimentar os olhos dentre as cinco posições básicas: centro, cima, baixo, direita e esquerda.

Antes de entrar nos detalhes deste projeto, é necessário ressaltar que parte do protótipo será construído em parceria com a Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo. Eles serão responsáveis por fabricarem as próteses oculares que serão usadas neste robô, já que está dentro do campo de trabalho desta instituição a fabricação e aplicação de próteses oculares em pessoas com parcial ou total perda do sistema ocular.

Em vista disso, uma possível ramificação deste projeto seria o desenvolvimento de uma prótese ocular capaz de se movimentar. As atuais próteses disponíveis no mercado, por mais reais que possam parecer, são estáticas. Criando-se um mecanismo de acionamento para este tipo de prótese que não cause danos ao usuário poderia trazer benefícios para estas pessoas, pois seria um tipo de prótese mais próximo do real.



# Capítulo 3

## Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão considerados alguns conceitos importantes adquiridos a partir da revisão da literatura das referências deste trabalho.

### 3.1 O *Uncanny Valley*

Este tópico trata de um conceito relacionado com a familiaridade que as pessoas sentem ao ver um robô. Este fenômeno é descrito pela hipótese do *Uncanny Valley*, proposta por Masahiro Mori [2], que trata a respeito do efeito provocado no ser humano pela aparência de máquinas e robôs. Em seu estudo, Mori descreve a relação entre o grau de aparência humanóide das máquinas e o grau de familiaridade que uma pessoa possui na presença de uma dessas máquinas. Sua teoria é exemplificada pelo gráfico abaixo:

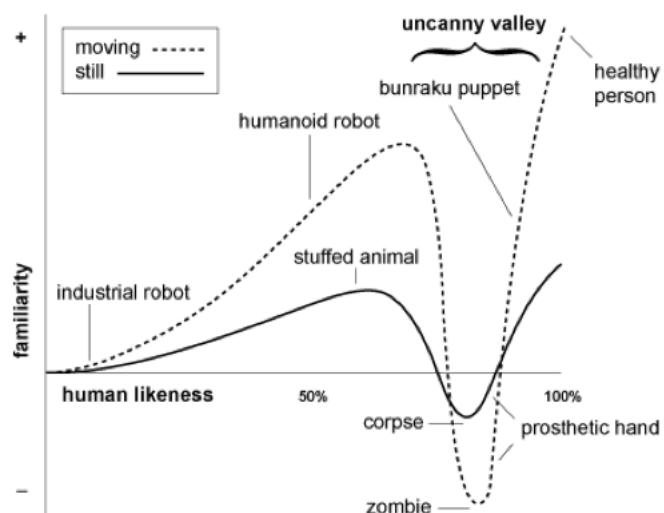


Figura 3.1: Gráfico que relaciona o grau de aparência humana de uma máquina e a familiaridade provocada por esta em uma pessoa [2]

Ao se analisar o gráfico, vê-se que perto da origem estão as máquinas industriais. Isto deve-se ao fato de não possuírem nenhuma semelhança com uma pessoa e portanto, quando projetadas, o aspecto externo é estritamente ligada à funcionalidade e, como consequência, não provocam familiaridade às pessoas que as observam. Porém, à medida que se aumenta o grau de semelhança humana de uma máquina, também cresce a familiaridade provocada por esta. No gráfico existem duas linhas: a tracejada representa máquinas ou objetos que se movimentam, enquanto que a contínua está ligada a objetos imóveis. Um boneco de brinquedo é um exemplo de objeto que transmite certa familiaridade às pessoas, pois possui já uma semelhança mais próxima da humana.

À medida que se tenta aumentar o grau de semelhança humana de um objeto, por exemplo, construindo um robô humanóide, pode ser que este caia dentro do chamado *Uncanny Valley*. Isto significa que a máquina deixou de transmitir familiaridade e conforto as pessoas, mas sim uma sensação de espanto, repúdio e desconforto. E se este robô ainda possui movimentos, estas sensações são ainda mais intensas [7]. Um exemplo disso são as próteses para braços. Atualmente, com os avanços da tecnologia, estas próteses estão cada vez mais próximas do real. Hoje existem modelos mais avançados que simulam as veias, músculos e até unhas. Possuem um tom de pele muito semelhante ao de uma pessoa normal. Isso faz com que estas sejam frequentemente tratadas como se fossem de verdade. No entanto, quando uma pessoa cumprimenta, com um aperto de mãos, outra que possui uma prótese no lugar do braço isso pode provocar uma sensação de desconforto. É esta sensação que as pessoas sentem quando assistem, por exemplo, a filmes de terror com monstros e robôs, como *Frankenstein*. Em vista disso, Mori propõe que os artistas concebam a aparência dos robôs para que fiquem antes do vale. Isso garante uma certa segurança na reação que as pessoas terão quando virem o robô final. Muitas vezes, uma semelhança muito grande com o ser-humano pode ser fatal para o sucesso do projeto.

## 3.2 Emoções humanas

Aqui será apresentado um breve resumo sobre as emoções básicas, como o ser humano as transmite através de suas expressões faciais e como representá-las em um protótipo mecânico.

As emoções humanas são divididas em emoções básicas e emoções avançadas.

das. A princípio, serão levadas em consideração somente as seis emoções básicas, que são raiva, nojo, medo, felicidade, tristeza e surpresa. As emoções avançadas são composições dessas emoções duas a duas, que são, amor, otimismo, desapontamento, entre outras.

Uma pessoa, ao transmitir uma emoção, movimenta uma série de músculos na face que fazem com que uma ou mais partes do rosto se mexam. Pode ser simplesmente um feixe de músculos de uma só parte da face como também conjuntos de feixes para movimentar diversas regiões e representar uma emoção mais complexa. Na figura 3.2, pode-se observar os diversos feixes de músculos presentes na face humana.

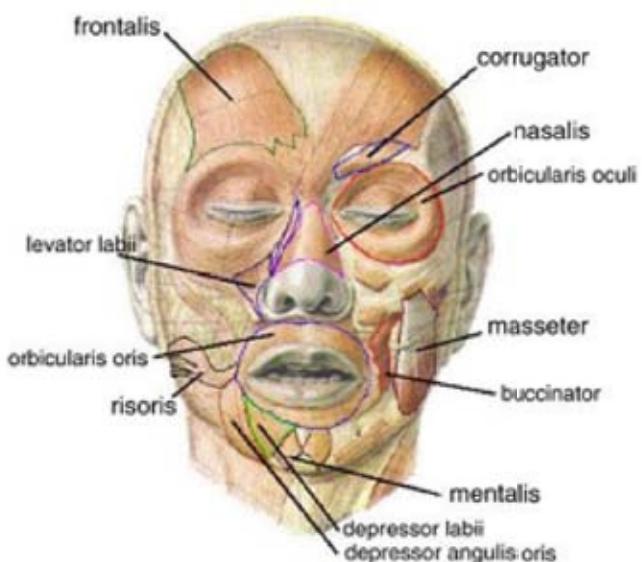


Figura 3.2: Principais músculos da face [3]

Um exemplo, dos mais interessantes, é com relação ao cenho da face. Quando uma pessoa o franze, uma série de músculos são ativados e mais de uma emoção pode ser representada. Nas figuras 3.3 (a) e (b), são mostrados dois tipos de emoções diferentes que derivam do cenho franzido por si só no caso da raiva e também do cenho franzido juntamente com músculos da região bucal e nasal para representar o desgosto [8].



Figura 3.3: Emoções representadas com o cenho franzido

Assim, pensou-se em como passar essa representação para um protótipo mecânico. O jeito mais consolidado até hoje neste campo é pela utilização de fios que puxam a pele. Diversos fios puxam diferentes partes da pele para que as emoções sejam representadas. Um exemplo de acionamento é como o proposto por [1], no qual foram identificados 28 pontos de atuação, os quais podem ser observados na figura 3.4.

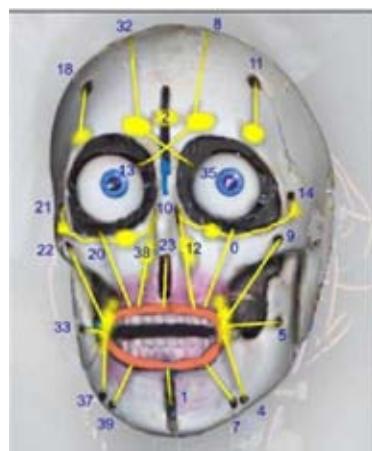


Figura 3.4: Acionamentos em face robótica [1]

Além da utilização de fios que puxam a pele, pensou-se em maneiras diferentes para realizar esses movimentos. Desde a atuação direta do motor na pele, utilização dos motores para moverem hastes em canaletas, ou até ventosas que por meio de vácuo se fixam à pele são algumas das diversas soluções que podem ser

implementadas. Existem ainda uma outra solução bem interessante que usa pequenas bolsas de ar que, ao inflarem e desinflarem, permite representar a região das bochechas e dos seios da face. As pálpebras são outro ponto fundamental para a representação de emoções, como por exemplo surpresa ou medo, ou emoções mais complexas como preguiça ou cansaço.



## Capítulo 4

# Projeto do Sistema Mecânico

Este capítulo tratará de descrever a parte inicial do trabalho, ou seja, o projeto do sistema mecânico. Como passo inicial serão apresentadas as especificações de projeto que devem ser satisfeitas assim como as limitações existentes. Será apresentada a solução adotada para a resolução do problema proposto, a partir de um mecanismo conceito idealizado. Segue-se então com os desenhos em CAD das peças do mecanismo. Posteriormente, serão destacados os materiais escolhidos para as peças e também os outros componentes que fazem parte de mecanismo, como juntas e motores. Durante este capítulo serão descritos os mecanismos de movimentação dos olhos e pálpebras.

### 4.1 Especificações do projeto

O objetivo final deste trabalho é construir um protótipo que se apresente um comportamento o mais próximo possível dos olhos de um ser-humano. Para tanto, os seguinte pontos básicos tem de ser satisfeitos:

- movimento lateral e vertical dos olhos e combinação destes movimentos;
- movimento das pálpebras;

Além de tem satisfazer às especificações apresentadas acima, o protótipo tem de se adequar às limitações impostas pelo próprio sistema físico, tais como:

- peso total da cabeça;
- espaço limitado para o mecanismo;
- geometria do crânio não regular.

O peso total do sistema mecânico é um parâmetro fundamental a ser considerado para que não haja sobrecarga dos motores responsáveis pelo movimento do pescoço. Além disso, um sistema com menor inércia facilita o controle dos motores e garante um movimento mais suave e natural das peças. Isso implica em um resultado mais próximo do movimento real do ser-humano. Para tanto, deve-se projetar mecanismos compactos e de materiais leves. Em vista disso, optou-se por fabricar as peças em alumínio, pois este material, além de leve, também é resistentes mecanicamente, fornecendo maior rigidez ao sistema.

O espaço limitado de trabalho também introduz uma dificuldade, pois exige o projeto de um sistema funcional compacto. Este espaço é delimitado pela região interna do crânio. Dentro deste devem estar todos os motores, acionamentos e outras peças de sustentação do mecanismo. Neste trabalho, será usado como referência para o projeto um modelo de crânio humano feito em resina, mostrado nas figuras 4.1 (a) e (b), usado para estudo em cursos de medicina.



(a) Crânio em resina - Vista Frontal



(b) Vista superior do crânio [9]

Figura 4.1: Crânio antes da usinagem

Por conta de ser um instrumento didático, apresenta grande número de detalhes, tanto externos quanto internos, da anatomia do crânio humano. Porém, para este projeto, tais detalhes não exercem nenhuma função prática, já que, posteriormente, este crânio será coberto por um protótipo de pele em silicone. Sendo assim,

para garantir mais espaço de trabalho para o projeto do sistema mecânico, foi necessário usinar o crânio internamente de forma a remover a maior quantidade possível de material sem danificar sua parte estrutural. Um exemplo do que teve de ser feito foi abrir as cavidades oculares presentes neste modelo. Na figura acima, nota-se que não há comunicação entre as cavidades oculares e o interior da cabeça, impossibilitando o acionamento dos olhos por dentro da cabeça. Além disso, tentou-se obter uma geometria o mais regular possível para facilitar o projeto do sistema de suporte do mecanismo. As figuras 4.2 (a) e (b) mostram o resultado do processo de usinagem.

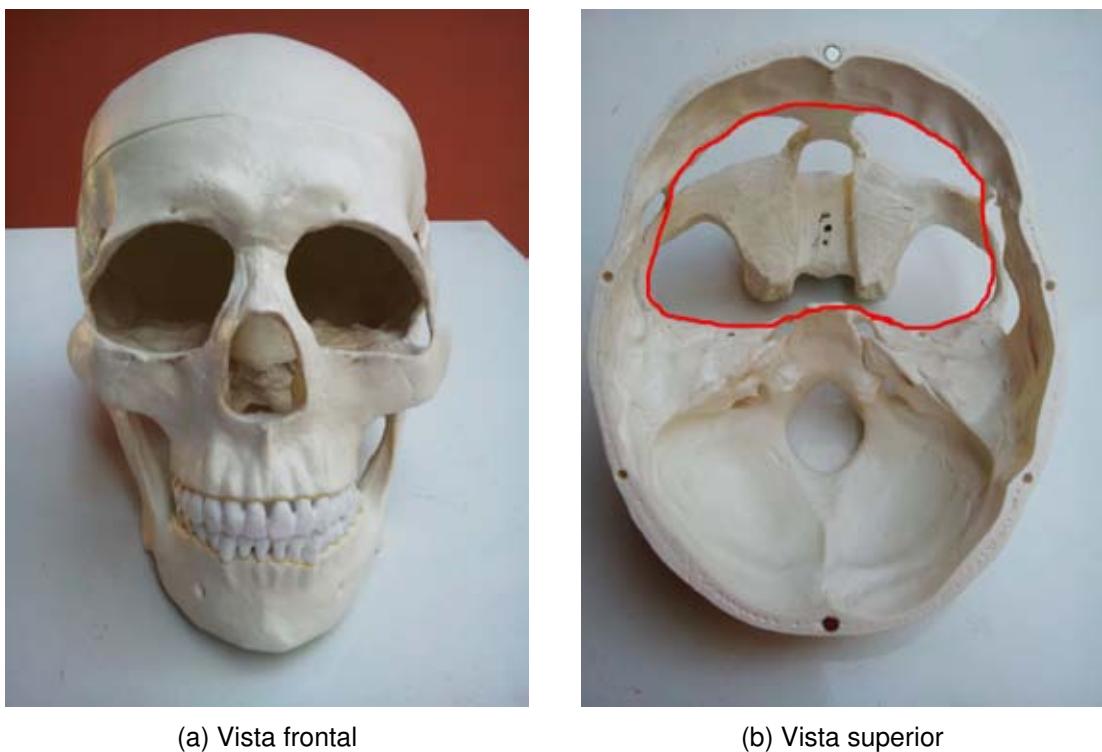


Figura 4.2: Crânio após usinagem

A zona delimitada pela linha vermelha será a área onde ficará o mecanismo de acionamento dos olhos e das pálpebras. Na parte posterior do crânio será colocada a estrutura de fixação do crânio no pescoço. Após a decisão deste volume de trabalho, podem ser definidas as dimensões máximas do mecanismo e, em função disso, projetar as suas respectivas peças.

As figuras 4.3 (a) e (b) apresentam o mecanismo conceito idealizado para a resolução do problema. Ele já respeita todas as especificações e está dentro das limitações existentes. Nelas pode-se observar a posição de cada componente do mecanismo como juntas, motores, peças estruturais, próteses oculares e hastes de movimentação.

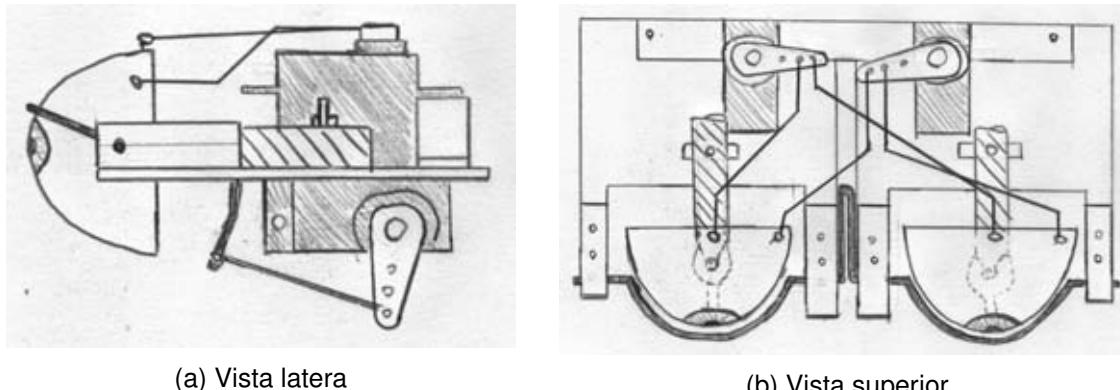


Figura 4.3: Conceitos iniciais do mecanismo

## 4.2 Sistema de movimentação dos olhos

Levando em consideração o que foi abordado na sessão anterior, o projeto das peças pode ser iniciado. Os primeiros elementos a serem especificados são os olhos do sistema, pois a partir de suas dimensões e zonas de movimentação serão especificadas todas as outras partes. Como encontrado nos estudos de anatomia, o olho humano não é completamente esférico, podendo ser visto mais como um geóide. Entretanto, no que se refere a este projeto, o olho pode ser aproximado por uma esfera para facilitar o projeto do seu acionamento. Para verificar se esta aproximação seria adequada para este projeto e também para simular uma futura prótese ocular que será colocado crânio, foram usadas bolas de isopor de diversos diâmetros, desde 20mm até 35mm.

Para validar a utilização dos diferentes diâmetros, as bolas de isopor foram colocadas dentro do crânio, na posição dos olhos e, em seguida, o crânio foi coberto com uma amostra da pele que será usada no final do projeto. Foi constatado que a esfera de 25mm de diâmetro não se adequou ao modelo de crânio utilizado pois era pequena demais. Isto foi verificado pois, após cobrir o crânio com a pele de silicone, criou-se um espaço entre o olho e a lateral da abertura ocular, que não existe em uma pessoa. Depois de alguns testes com bolas de outros diâmetros, verificou-se que o que melhor se adaptou a este modelo foi uma esfera de 35mm de diâmetro. Outra característica dos olhos é que estes não são esferas completas, mas setores esféricos maiores do que semi-esferas. Além disso, eles devem ser ocos para que seja possível fixar a junta universal na parte interna, sem que haja obstrução de movimentos. A figura 4.4 mostra um esquema dos olhos projetados.

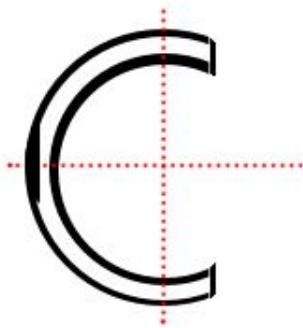


Figura 4.4: Esquema da geometria dos olhos do mecanismo

Para dar continuidade ao projeto, foi necessário decidir a posição das próteses dentro do crânio. Elas devem estar centralizadas dentro das aberturas oculares para que os olhos não fiquem tortos ou muito espaçados um do outro. As medições foram feitas por meio de um paquímetro e então estes valores foram determinados.

Um último ponto muito importante no que diz respeito à prótese ocular é escolher o método de fixação adequado para cada olho no crânio. Isto implica em escolher o tipo de junta que será utilizado para garantir que o olho seja fixado e, mais importante, que ele seja capaz de realizar todos os movimentos descritos nas especificações de projeto sem nenhum tipo de bloqueio ou interferência mecânica. Depois de uma busca sobre os tipos de juntas existentes no mercado, decidiu-se optar por uma junta universal, a qual permite que cada olho possua dois graus de liberdade de movimento. Com isso, as próteses são capazes de se movimentar tanto na horizontal quanto na vertical, cobrindo todo o espaço de movimentos especificado. Além disso, essas juntas são facilmente encontradas em lojas de hobbymodelismo. A figura 4.5 mostra a junta utilizada.

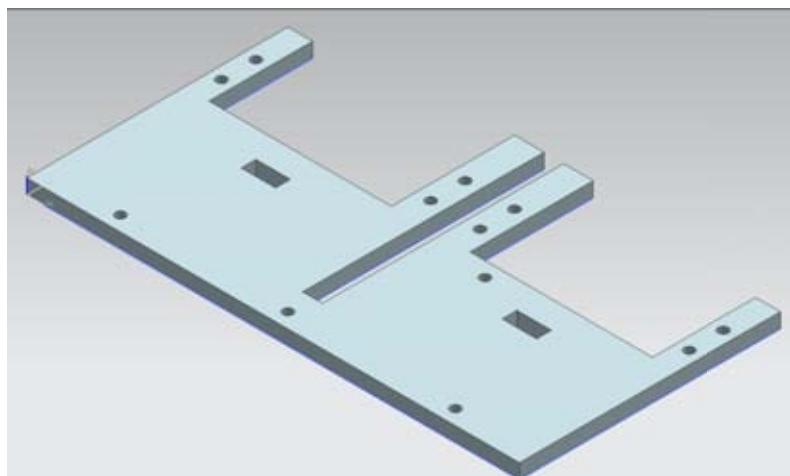


Figura 4.5: Junta universal utilizada no mecanismo

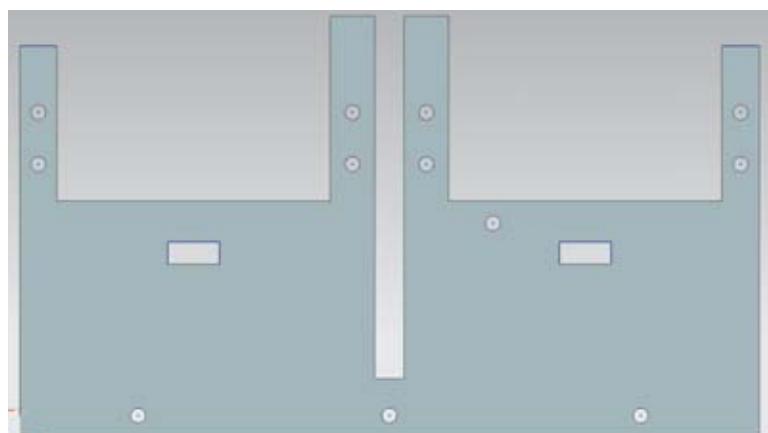
Para as outras peças do mecanismo, foi necessário fazer o projeto usando um software CAD (*Computer Aided Design*), pois são componentes específicos para o projeto e que, portanto, tem que ser fabricados. Para o projeto foi usado o software NX7.0 para realizar todos os desenhos de fabricação das peças que seriam, depois,

usinadas em alumínio. Devido à geometria irregular das paredes internas e da base do crânio, a fixação dos componentes do mecanismo, como as juntas e os motores, diretamente no crânio se mostrou uma solução não viável. Para contornar este problema, foi proposto construir um mecanismo condensado em uma placa que serviria de base para todos os outros componentes. Após a montagem completa do mecanismo, este seria acoplado ao crânio de resina por parafusos colocados em um canal, localizado logo atrás da abertura nasal.

O projeto da base descrita acima foi feito tomando a princípio as dimensões máximas encontradas dentro da zona delimitada pela linha vermelha da figura 4.2 (b). Além disso, optou-se por projetar uma peça de geometria simples, para evitar que sua usinagem fosse dificultada. Como resultado deste estudo, a figura 4.6 (a) e (b) mostram o resultado final da base do mecanismo.



(a) Vista isométrica



(b) Vista superior

Figura 4.6: Vista isometrica da base do mecanismo

Analizando as figuras acima, pode-se notar que esta base possui uma geometria particular e cada corte possui uma função determinada. Os espaços retangulares presentes na parte anterior da peça, logo à frente dos dois rasgos retangulares, servem para delimitar a zona de movimentação de cada olho. Os rasgos retangulares, por sua vez, servem para fixar as juntas universais das próteses e foram projetados dessa forma para garantir um ajuste fino da posição dos olhos uma vez que o mecanismo for colocado no crânio. O canal presente no meio desta peça foi projetado para dar espaço ao mecanismo de movimentação das pálpebras, que será descrito mais adiante. Os demais furos presentes servem para fixar os suportes dos servo motores e os mancais que sustentarão a peça que movimenta as pálpebras do robô.

Para fixar esta base, e consequentemente todo o mecanismo, no crânio foi necessário desenvolver uma outra peça, visto que a superfície da base do crânio é irregular. Analisando a figura 4.2 (b) vê-se que existe um corredor mais profundo na região posterior do nariz. Aproveitando este corredor, foi pensado em projetar uma outra peça que servirá de apoio para a base e será fixa neste local. A figura 4.7 mostra o desenho em CAD deste apoio.

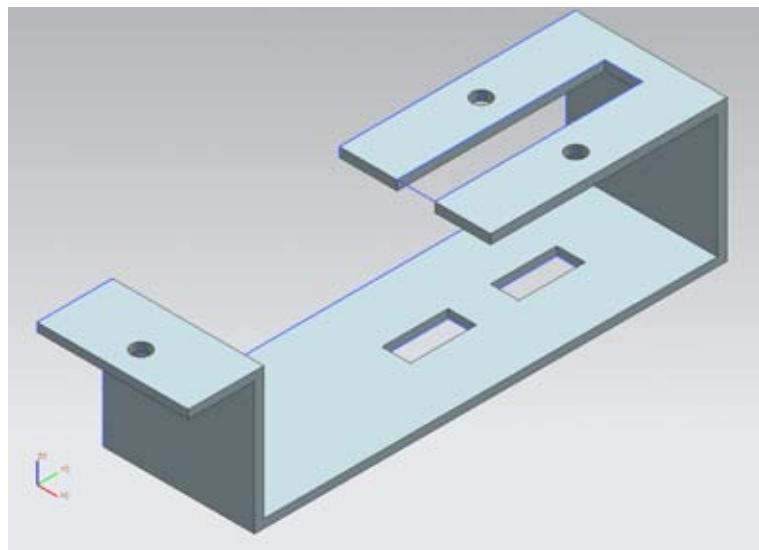


Figura 4.7: Vista isométrica do apoio da base

Para garantir uma margem de ajuste após a colocação desta peça no crânio, também foi pensado em usar rasgos retangulares ao invés de furos simples. Isso permite que haja possibilidade de ajustar a profundidade dos olhos ao final da montagem. Para unir este apoio à base, serão usados cilindros com roscas internas de 2mm de diâmetro. Estes são presos ao apoio pelos furos superiores anteriores e posteriores e servem para garantir a altura que os olhos devem ficar.

Com o desenho da base feito, é possível projetar as peças que se encaixarão à ela e que suportarão os motores de movimentação dos olhos. Para realizar todos os movimentos necessários para os olhos serão utilizados dois motores: um para movimentação vertical de ambos os olhos e outro para movimentação lateral, também de ambos os olhos. Devido à necessidade de componentes pequenos para a movimentação dos olhos optou-se por utilizar micro servo-motores. Com dimensão máxima de 23mm, estes dispositivos são adequados para realizar as tarefas requisitadas, pois além de serem compactos produzem um torque na saída suficiente para este tipo de aplicação. A figura 4.8 contém uma imagem do motor que será utilizado e, em seguida, estão relacionadas as suas características técnicas.



Figura 4.8: Motor Hextronik (imagem retirada de [4])

#### Características do motor:

- Modelo: Hextronik - HXT900
- Dimensões: 23mm x 12mm x 29mm
- Torque: 1,5 kg.cm
- Velocidade: 0,10 sec/ 60 °

Como passo inicial para o projeto da peça que servirá de apoio para estes motores, foi primeiro necessário decidir qual seria a configuração de posicionamento dos motores a ser adotada. Após uma análise levando em conta as facilidades de acionamento dos olhos provenientes de cada configuração escolheu-se utilizar os dois motores em paralelo. A figura 4.9 apresenta esta peça projetada em CAD.

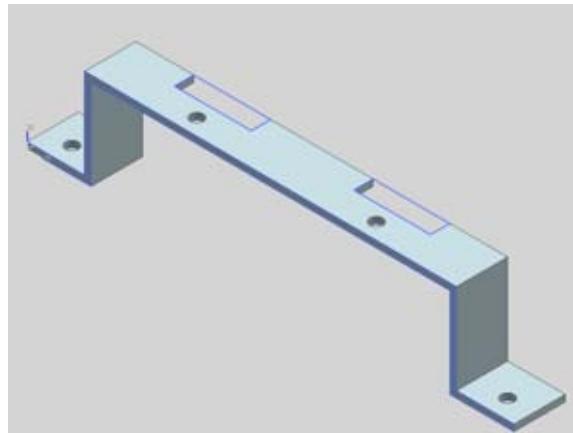


Figura 4.9: Suporte para os motores que acionarão os olhos

A partir deste ponto, o que resta para concluir o projeto do mecanismo de movimentação dos olhos é dimensionar as hastes que farão a conexão entre os motores e os olhos e servirão de meio para transferir o movimento dos motores aos olhos. Estas hastes deverão ter comprimentos especificados para o movimento dos olhos não seja limitado mecanicamente. Além disso, cada haste deve haver uma geometria particular para que não haja interferência entre uma haste e outra durante o funcionamento do mecanismo. Uma vez prontas, estas hastes serão ligadas aos motores por meio de braços plásticos com furos. As figuras 4.10 (a) e (b) mostram um esquema das hastes que serão utilizadas.

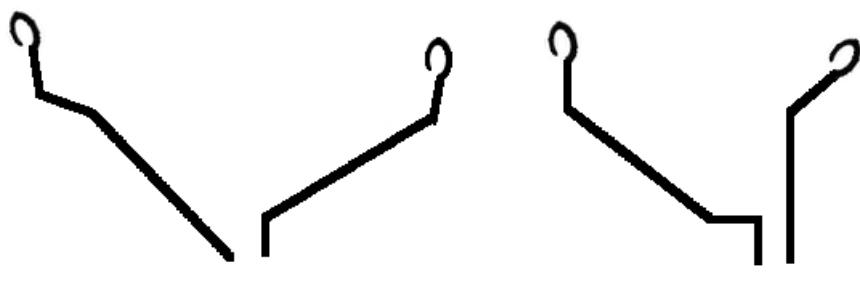


Figura 4.10: Esquema das hastes de acionamento dos olhos

Para fixar estas hastes nas próteses oculares, foi necessário pensar em um modo de garantir que o movimento do motor seja transmitido corretamente ao olho, mas sem bloquear ou restringir o movimento deste. Isso se deve ao fato de haver duas hastes acionando em conjunto um mesmo olho. A solução encontrada foi usar um acoplamento por argolas, que garante posicionamento sem interferência no movimento. A figura 4.11 um esquema deste tipo de acoplamento.

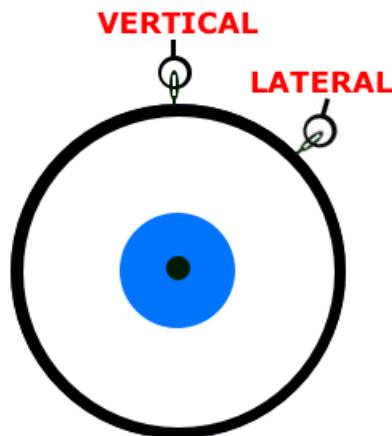


Figura 4.11: Esquema de acionamento do olho por argolas

Uma observação importante deve ser feita, analisando a figura acima. Devido a restrições físicas impostas pelas peças do mecanismo, o ponto de acionamento lateral dos olhos não pode ficar a  $90^\circ$  do ponto de acionamento vertical, pois isso acarretaria em uma colisão do olho com a estrutura do mecanismo durante sua movimentação. Sendo assim, este ponto teve de ser elevado a um ângulo de aproximadamente  $45^\circ$  do ponto de acionamento vertical. Esta configuração, no entanto, faz com que a movimentação do ponto de acionamento lateral influence tanto o movimento na direção horizontal quanto na vertical. Este problema será tratado na implementação do software, como será descrito adiante.

## 4.3 Sistema de movimentação das pálpebras

A segunda parte do mecanismo é composta pelo sistema de movimentação das pálpebras do robô, que também será fixado à base apresentada na sessão anterior. Este sistema é responsável por fazer o protótipo piscar e além disso, as pálpebras também acompanham o movimento dos olhos para baixo e para cima, tornando as expressões faciais mais reais.

A idéia para movimentar as pálpebras é usar um mecanismo de quadrilátero articulado, composto por um servo motor, uma peça de movimentação das pálpebras e uma barra que conecta os dois componentes anteriores. O servo motor que será utilizado neste sistema é o mesmo que foi usado no sistema de movimentação dos olhos, mostrado na figura 4.8, pois possui dimensão e torque compatíveis.

A chave deste mecanismo está na peça que sustentará e movimentará as pálpebras. Esta peça deve seguir uma série de restrições como ser leve, para que o motor tenha torque suficiente para acionar o conjunto completo. Ela deve, também, possuir uma geometria que se adapte ao contorno dos olhos, a fim de que não haja interferência no movimento destes dois componentes. As figuras 4.12 (a) e (b) apresentam um esquema de como será esta peça.

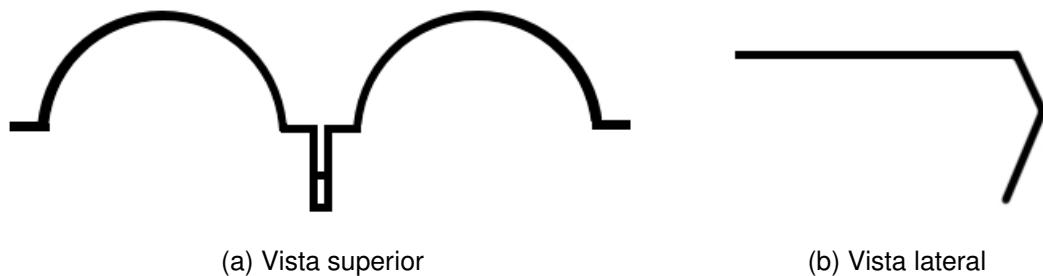


Figura 4.12: Esquema da peça de acionamento das pálpebras

Esta peça deve girar ao redor dos olhos quando o mecanismo das pálpebras for acionado. Para tanto, foram projetados mancais de apoio para fixação da pálpebra na base e dando possibilidade de executar o movimento desejado. A figura 4.13 traz o desenho do mancal que será utilizado.

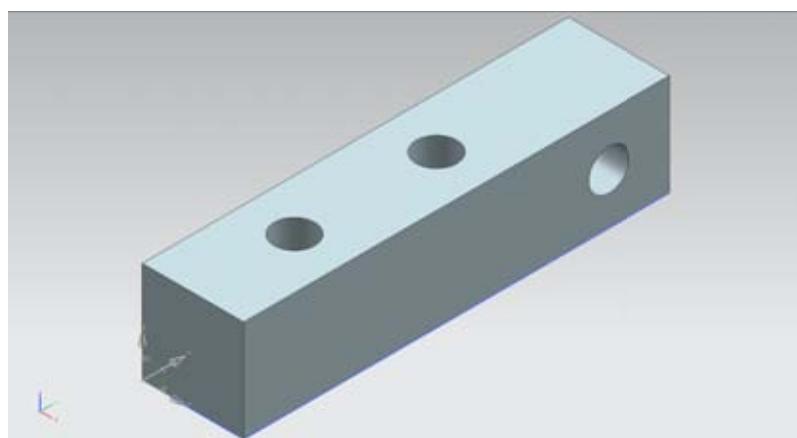
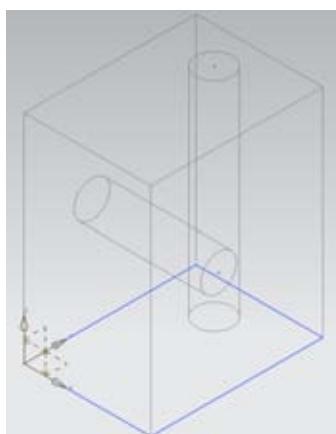


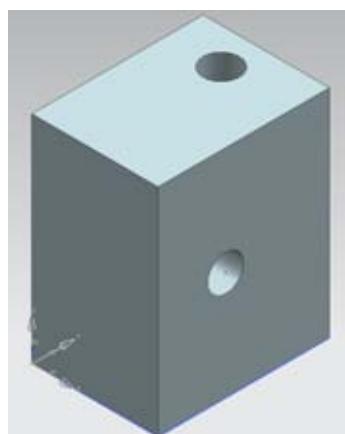
Figura 4.13: Mancal para a peça da pálpebra

Para a fixação da peça da pálpebra, foram utilizados quatro mancais colocados na parte anterior da base. Para facilitar a montagem e desmontagem desta parte do mecanismo, cada mancal foi cortado em seu plano central, na direção longitudinal. Isso permite que a peça da pálpebra seja colocada no furo localizado na lateral do mancal, mostrado na figura acima, e este seja parafusado nos dois furos localizados na parte superior, garantindo tanto o fechamento do conjunto quanto a fixação deste na base.

Como mencionado anteriormente, para acionar as pálpebras será usado um motor igual ao do acionamento dos olhos. Com o intuito de otimizar a utilização da base do mecanismo como ponto de fixação, foi decidido colocar o motor embaixo da base, eliminando qualquer risco de interferência entre o mecanismo de acionamento dos olhos e o das pálpebras. Para isso, algumas peças tiveram de ser projetadas para fixar este motor na base. No total foram feitas duas peças. Um suporte em 'U' e um bloco com furos, que será fixo na base do mecanismo e na aba lateral do motor. As figuras 4.14 (a) e (b) e 4.15 mostram as peças descritas.



(a) detalhe para os furos



(b) vista isométrica

Figura 4.14: Bloco para fixação do motor da pálpebra

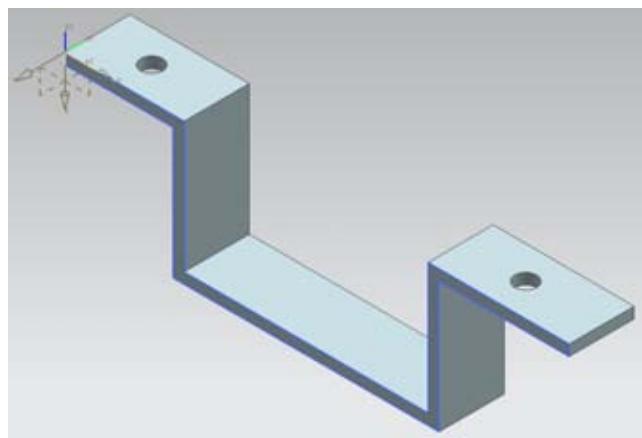


Figura 4.15: Suporte em 'U' para o motor da pálpebra

O único componente que resta para completar o mecanismo de acionamento das pálpebras é a barra que une o braço do motor à peça de movimentação das pálpebras. As figuras 4.16 (a), (b) e (c) mostram o funcionamento do quadrilátero articulado para acionamento das pálpebras.

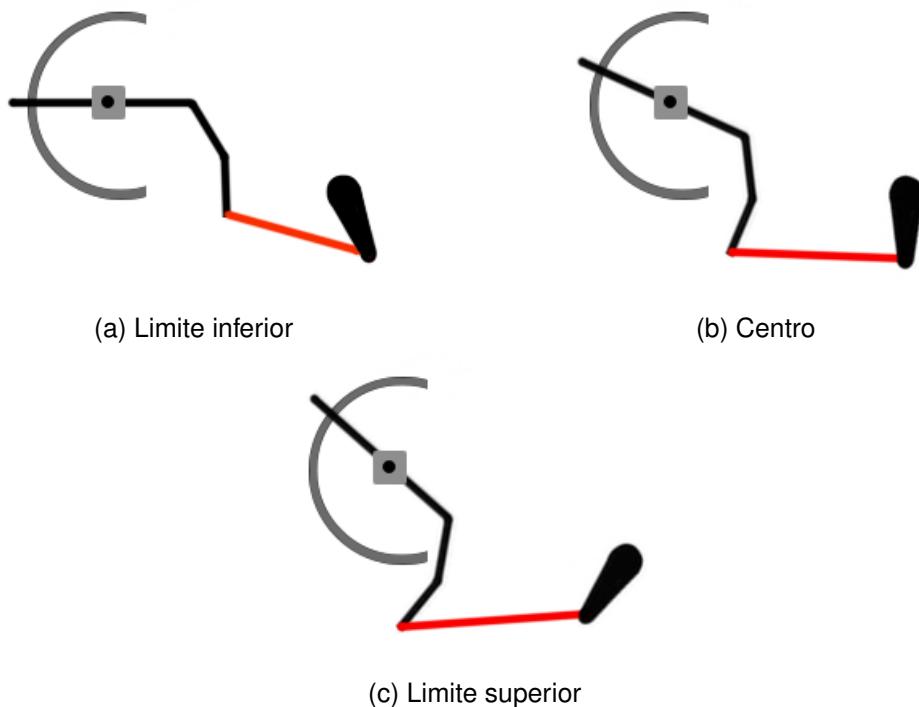


Figura 4.16: Quadrilátero articulado para movimentar as pálpebras

Das figuras acima é possível perceber que este mecanismo é capaz de satisfazer os requisitos especificados para o movimento das pálpebras, pois consegue varrer todo o espaço de movimentação delas. Além disso, devido à utilização desta tipologia de mecanismo, o acionamento é rápido e preciso, garantindo que o movimento de piscada dos olhos seja muito próximo do natural.

Com isso tem-se o fim do projeto do sistema mecânico. A figura 4.17 mostra como ficará este mecanismo após sua montagem.

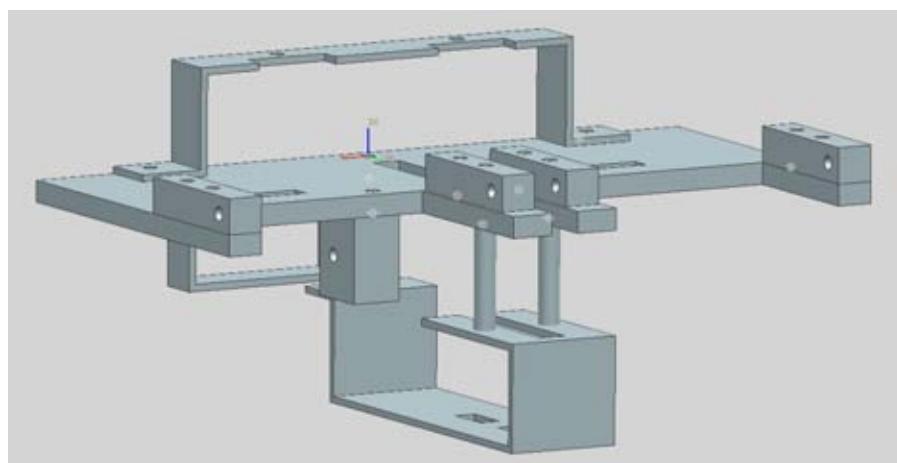


Figura 4.17: Vista de conjunto do mecanismo



# Capítulo 5

## Resultados

Tendo sido tomadas as decisões de projeto, pode-se passar então para a fase de fabricação. Esta será dividida em três partes específicas: primeira será tratada a fabricação das peças em alumínio, seguindo pela fabricação dos olhos e por último a fabricação das hastes de movimento.

### 5.1 Peças em alumínio

Nesta sessão serão descritos os processos de fabricação de todas as peças estruturais do mecanismo: base, apoio da base, peças de sustentação dos motores e mancais para as pálpebras. Primeiramente, deve-se lembrar que esse conjunto deve permitir um ajuste final da altura, profundidade e lateralidade dos olhos. Para isso, foram feitos pequenos rasgos retangulares em algumas peças que garantem os graus de liberdade para o ajuste.

Todas essas peças são feitas com operações básicas de fabricação: furos, cortes e dobras. Isso foi feito de modo a facilitar o processo total de fabricação do equipamento. Algumas peças porém, são de mais difícil fabricação devido às dimensões de projeto serem bastante reduzidas, ou até mesmo por causa da proximidade de furos diferentes em uma mesma peça para se realizar a fixação. Além disso, pensou-se também, com muita cautela, na montagem do conjunto final.

Para se fazer todas essas peças, contou-se com chapas de 2mm de espessura, alguns tarugos e também prismas. Além disso, todos os furos feitos nas peças tem diâmetro de 2mm e as roscas nos tubos de apoio também são de 2mm com passo 0,4mm.

A partir dos prismas de alumínio foi feito o bloco de fixação do motor da pálpebra. Um desses prismas foi usinado até chegar ao tamanho de projeto e depois foram feitos dois furos para fixar esta peça tanto ao motor quanto à base do mecanismo. Além disso, outros blocos de alumínio foram utilizados para a fabricação dos mancais. Porém, neste caso, além de redução ao tamanho desejado e dos furos, foi feito um corte longitudinal em cada um deles, separando-os em duas metades, para que a peça de movimentação das pálpebras possa ser montada corretamente sem dificuldade. Com relação aos cilindros de suporte da base na peça de apoio da base, foram usado tarugos de alumínio usinados até o diâmetro de 3mm. Ao final, em cada cilindro foi feita uma rosca interna de 2mm de diâmetro.

Os suportes em 'U' para fixação dos motores foram fabricados utilizando-se uma chapa, que foi cortada, furada e por fim dobrada. No caso do suporte superior, foram feitos mais dois cortes para que os motores de movimentação dos olhos fossem devidamente encaixados.

Para a base também utilizou-se uma chapa, em que foram realizados cortes e furos para se chegar às especificações de projeto. Além disso, com operações de fresamento, foram feitos os rasgos para ajuste da lateralidade das juntas universais e também para o rasgo na parte central, que permite a movimentação da peça de acionamento das pálpebras.

Por fim, a peça de apoio da base ao crânio foi fabricada de maneira semelhante à base. A partir de uma chapa, realizou-se cortes, furos e operações de fresamento para a fabricação dos rasgos que permitem ajuste de profundidade do mecanismo. Esta chapa foi também dobrada para se chegar à forma projetada. A figura 5.1 mostra o resultado da fabricação das peças descritas acima.



Figura 5.1: Resultado das peças em alumínio fabricadas

## 5.2 Próteses oculares

A confecção das próteses oculares foi realizada em parceria com a Disciplina de Prótese Bucomaxilofacial do Departamento de Cirurgia, Prótese e Traumatologia Maxilo Faciais da Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo com a colaboração do Prof. Titular Reinaldo Brito e Dias e da Professora Doutora Neide Pena Coto.

A Prótese Bucomaxilofacial é a especialidade da Odontologia responsável pelo tratamento e/ou reabilitação, através de prótese, aparelhos e dispositivos em casos de perdas de tecido bucomaxilofaciais. É a especialidade odontológica que compreende o estudo clínico e o tratamento (reparação artificial ou correção ortopédica) das lesões congênitas, evolutivas, traumáticas (accidentais e cirúrgicas) e patológicas sediadas na boca, maxilares e face. Desse modo, foi responsável pela confecção dos olhos que serão utilizados na face robótica, para obter maior semelhança com um olho real.

O processo de confecção do olho foi dividido em algumas partes. Primeiro foi feito um modelo a partir de uma bola de isopor com a dimensão desejada, no caso, uma esfera de 35mm de diâmetro. Porém o modelo não foi feito de uma esfera completa, mas um setor de esfera maior do que uma semi-esfera.

A partir do modelo em isopor, foram feitos dois moldes, em gesso tipo pedra onde foi contornado o nicho para a inserção da íris protética. Esta foi previamente obtida através de pintura com pigmentos minerais em calota de resina termicamente polimerizável (Classico® Ind Bras). No caso deste trabalho, foi escolhida a cor azul-acinzentada que é, segundo [10], a cor dos olhos da Deusa Minerva. A íris possui também um eixo em resina alinhado com a pupila que serviu para realizar a sua centralização sendo desgastada posteriormente.

Enquanto isso foi confeccionado um modelo, em gesso, semelhante a uma segunda bola de isopor, com 25mm de diâmetro, importante para que a peça protética (olho) fosse oca, com peso reduzido e espaço para o encaixe dos mecanismos necessários, como junta universal e as hastas, necessárias para o movimento ocular. Após a cristalização do gesso foi vertida resina acrílica quimicamente ativada tipo esclera I (Classico® Ind Bras).

Após a polimerização da resina as próteses oculares foram caracterizadas, isto é, foram acrescentados pigmentos e fios de nylon nas cores vermelha e azul para simular veias, vênulas presentes na superfície da esclera humana (parte branca do olho). Logo após as peças protéticas receberam uma camada final em resina acrílica termicamente ativada, receberam polimento feito primeiramente passando-se uma lixa fina para deixar a superfície mais homogênea, passando para um polimento com pedra pomes e branco de espanha no intuito de se assemelhar ao brilho do olho natural. Com a prótese pronta (figura 5.2), pode-se passar então à sua adaptação para o mecanismo.



Figura 5.2: Próteses oculares

Primeiramente é feito um pequeno furo na parte interior da prótese ocular (olho) que servirá como suporte de encaixe da junta universal. A junta é então encaixada e é feito na sequência uma camada de resina que fica ao redor da parte da frente da junta e ao mesmo tempo colada na parte interna do olho. Isso servirá como o encaixe completo da junta no olho. Desse modo o olho pode ser montado e desmontado da junta sem maiores dificuldades.



Figura 5.3: Detalhe do suporte em resina para o encaixe do olho

Em seguida foram feitos dois furos em cada prótese. Um na parte superior da peça protética, sobre seu diâmetro, e outro a aproximadamente 45º do primeiro furo. Nesses dois furos são então encaixadas pequenas argolas feitas com fio de aço ortodôntico que servirão para encaixar as hastes de movimentação. Esses furos foram então preenchidos com resina para que as argolas fiquem bem fixas. Isso pode ser observado na figura 5.4



Figura 5.4: Detalhe das argolas de acionamento dos olhos

Por fim foi feito um desgaste da região exterior do olho como um todo, para que ele se ajustasse melhor ao mecanismo. A resina foi retirada com pedras montadas para desgastar levemente a parte externa, inclusive a íris.

### 5.3 Hastes para movimentação dos olhos e pálpebras

Tanto as hastes para movimentação dos olhos quanto a haste das pálpebras foram feitas com fios de aço ortodôntico. Para as hastes foi utilizado um fio de espessura de 0,7mm enquanto que para a pálpebra foi utilizado um fio de espessura 0,9mm. Também foram utilizadas ferramentas ortodônticas especiais, pois devido à pequena dimensão das peças que deveriam ser feitas, o uso de alicates normais não garantia a precisão desejada, além tornar o manuseio do material muito mais complicado.

Entre as ferramentas principais estão os três alicates apresentados nas figuras 5.5 (a), (b) e (c). O alicate Tridente serve para fazer ângulos retos. O alicate 139 serve

para fazer curvas e também manusear com precisão os fios de aço. Por último, o alicate de corte é um alicate basicamente capaz de cortar os fios de aço, porém, dada sua pequena dimensão, consegue-se uma precisão maior nos cortes.



(a) Alicate Tridente



(b) Alicate 139



(c) Alicate de corte

Figura 5.5: Alicates ortodônticos

Para fabricar a peça de movimentação das pálpebras, foram feitas dobras no fio de aço para que este acompanhasse a geometria dos olhos, porém sem tocá-los para evitar atrito e sobrecarregar os motores. Após alguns ajustes finos, o resultado obtido pode ser vista na figura 5.6.



Figura 5.6: Haste da pálpebra

Como dito na sessão de projeto, o mecanismo de movimentação das pálpebras é baseado em um quadrilátero articulado, comandado pelo braço do servo motor. Para ligar este braço à peça de movimentação das pálpebras mostrada acima, foi feita mais uma haste reta. Analisando figuras 5.7 (a), (b) e (c), pode-se observar o mecanismo de acionamento das pálpebras funcionando.

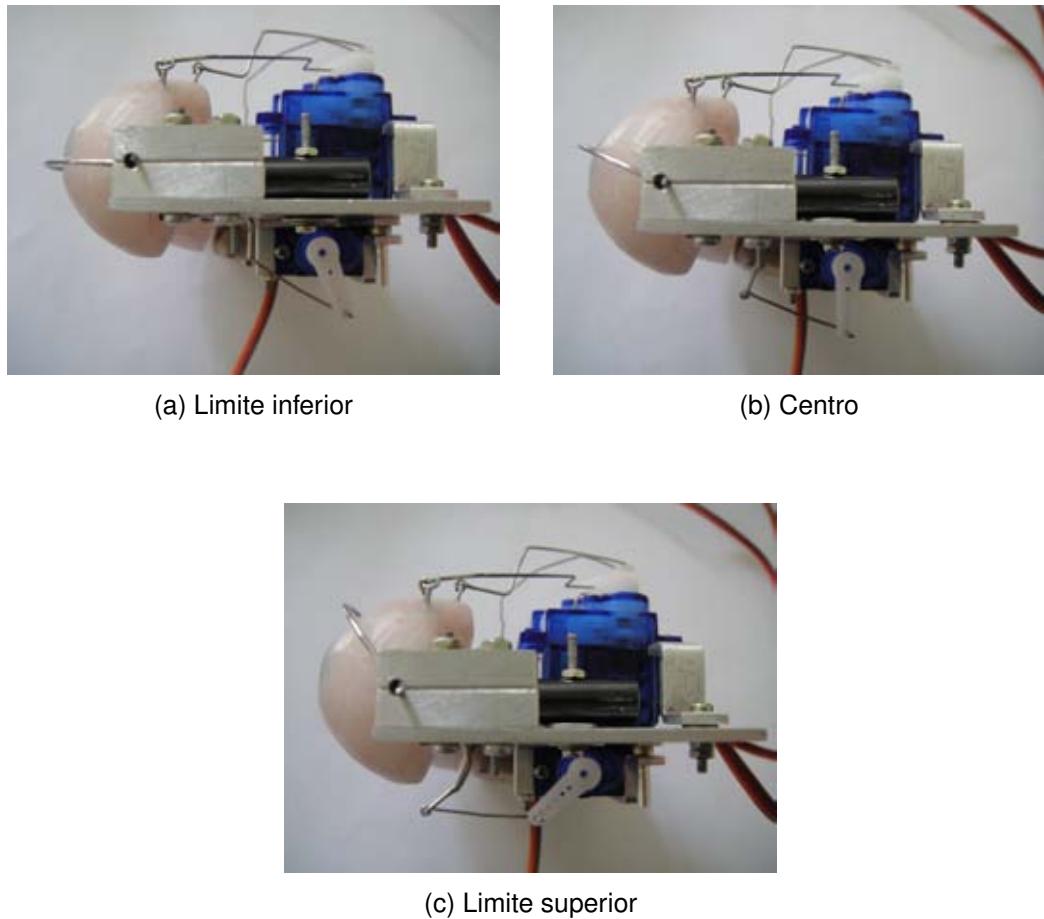


Figura 5.7: Mecanismo de acionamento da palpebra

As hastes de movimentação dos olhos bem como a do movimento da pálpebra mostrada acima, foram também projetadas baseadas nos princípios de mecanismos. Neste caso, porém, o mecanismo possui 3 dimensões. Por isso, diversos ajustes tiveram que ser feitos à mão para se chegar ao melhor resultado. Durante a fabricação destas hastes, teve de se tomar cuidado para que os movimentos de uma haste não interferisse nos movimentos das outras e também não colidisse com qualquer outra parte do mecanismo. As hastes finais podem ser observadas na figura 5.8.



Figura 5.8

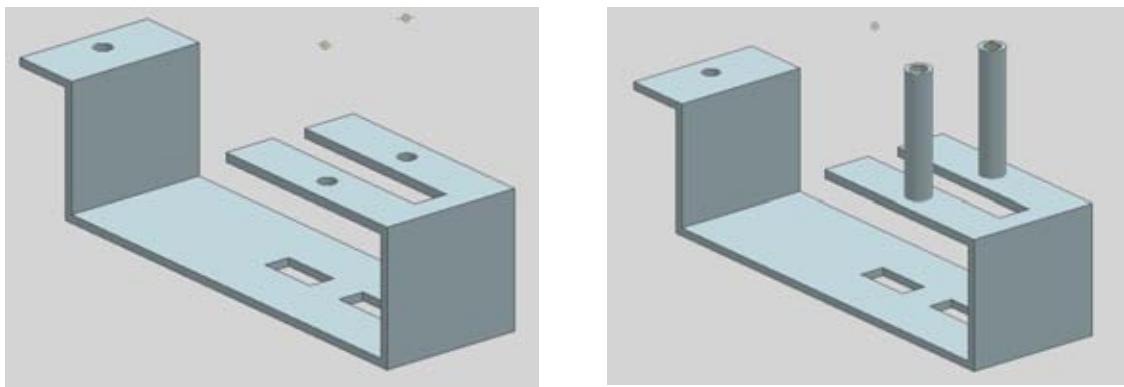
Assim, depois de diversos testes, conseguiu-se fabricar as hastes que geram todos os movimentos básicos dos olhos como olhar para cima, para baixo, para os lados e diagonais, além de uma haste que simule corretamente movimento das pálpebras.

## 5.4 Montagem do Mecanismo

Nesta sessão será apresentado o esquema de montagem do mecanismo de movimentação dos olhos e das pálpebras.

Inicialmente, com a peça de apoio da base 5.9 (a), fixar com parafusos os dois cilindros de apoio nos furos da frente do apoio da base 5.9 (b). Eles devem ser fixos com parafusos de baixo para cima, pois a parte de cima dos cilindros de apoio serão utilizados para a fixação da base neste conjunto.

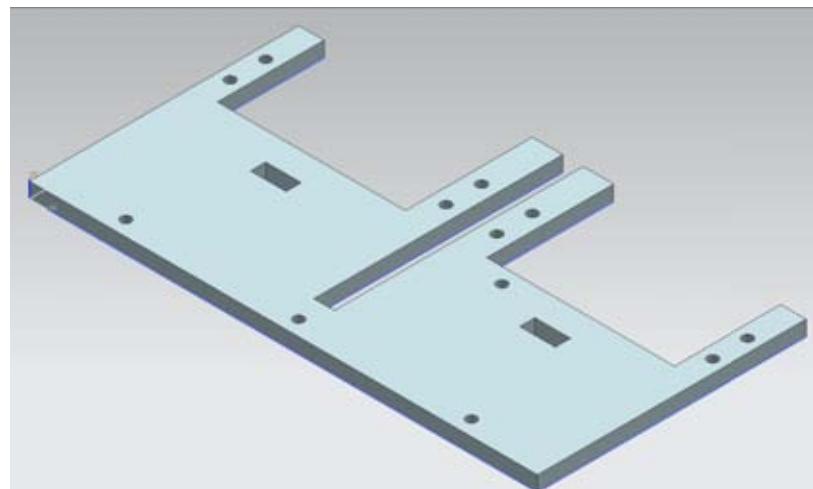
Agora, deve-se montar este conjunto no crânio, na corredor presente atrás do nariz, utilizando os dois rasgos retangulares. Estes rasgos permitem ajuste de profundidade do mecanismo, como foi dito anteriormente. Passa-se agora para a montagem da parte superior do mecanismo, onde os motores, juntas, olhos e pálpebra estão localizados. Primeiramente, deve-se pegar a base do mecanismo 5.9 (a), e pode-se já prender com parafusos os mancais externos 5.9 (b).



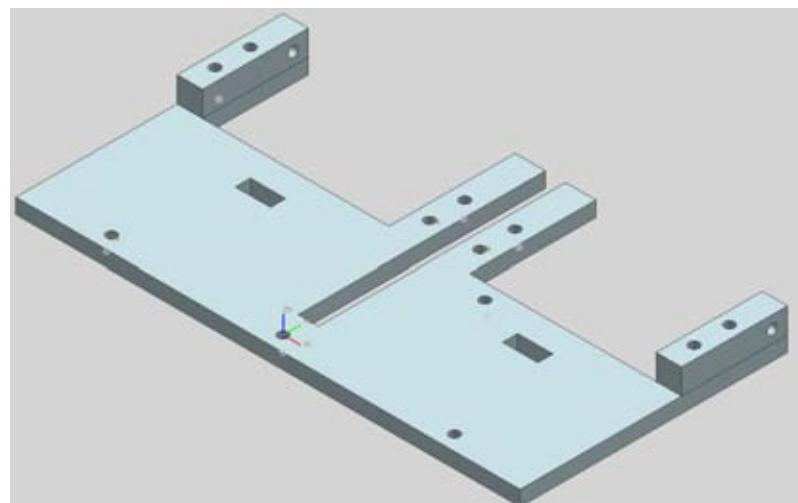
(a) Apoio da base

(b) Apoio da base e cilindros de sustentação

Figura 5.9: Passos 1 e 2 da montagem



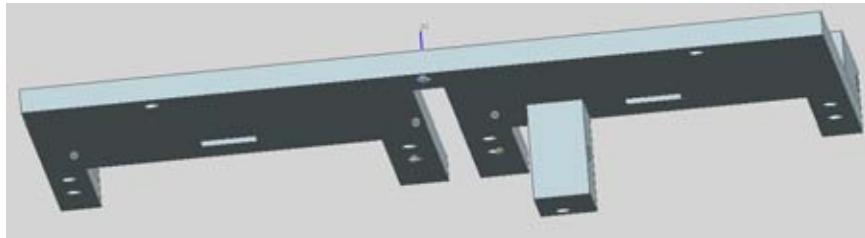
(a) Base



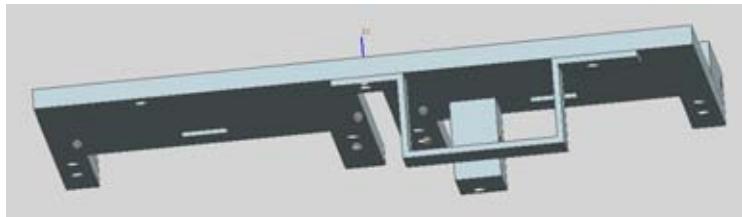
(b) Base e mancais

Figura 5.9: Passos 3 e 4 da montagem

Depois, deve-se pegar o motor das pálpebras e prendê-lo no respectivo bloco de fixação. Estando esses dois componentes unidos por parafusos, o conjunto deve ser parafusado à base com os mancais 5.10 (a). Agora, deve-se pegar o suporte em 'U' para o motor das pálpebras e encaixá-lo sobre o motor, porém sem realizar nenhuma fixação por parafuso ainda 5.10 (b). Isso porque ainda será necessário acoplar mais peças a este conjunto antes de se colocar os parafusos.



(c) Bloco de fixação do motor das pálpebras na base

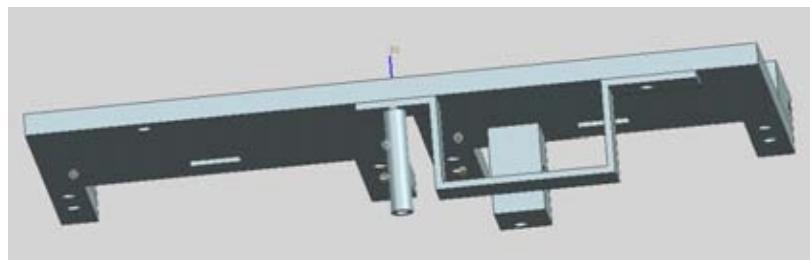


(d) Suporte em 'U' sob a base

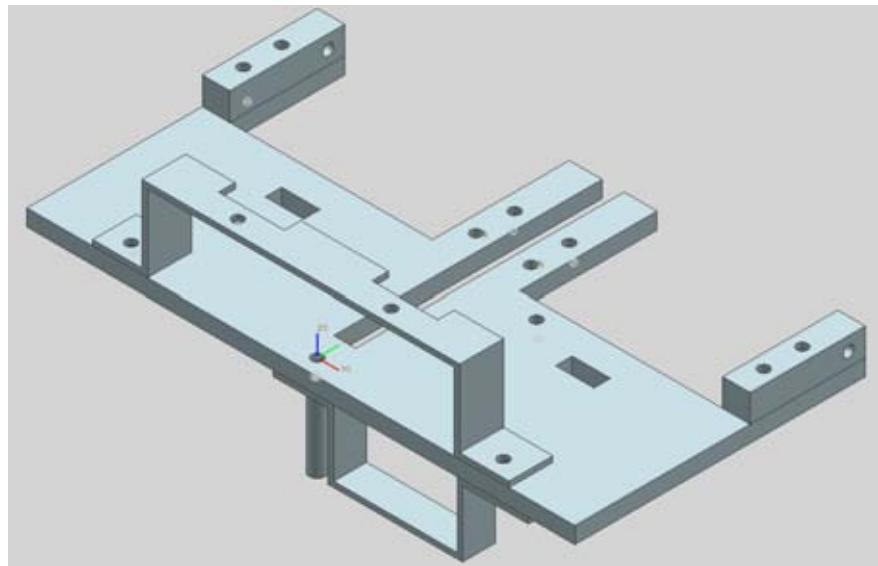
Figura 5.10: Passos 5 e 6 da montagem

Neste ponto, deve ser colocado o cilindro de sustentação na parte posterior da base do mecanismo. Ele vei colocado diretamente em contato com o suporte em 'U' do motor da pálpebra e deve ser parafusado por cima, deixando a parte inferior para ser parafusada ao apoio da base 5.11 (a).

Logo após, deve-se colocar o suporte em 'U' para os motores dos olhos. Este pode ser diretamente parafusado à base pelo lado direito em relação às figuras, porém, pelo lado esquerdo, o parafuso de fixação deve passar por este apoio, pela base e também pelo suporte em 'U' para o motor das pálpebras. Assim, o mesmo parafuso unirá essas três peças 5.11 (b).



(a) Colocação do cilindro de apoio da parte posterior do mecanismo



(b) Suporte em 'U' sobre a base

Figura 5.11: Passos 7 e 8 da montagem

Com este conjunto montado, pode-se então fixar os motores responsáveis pelos movimentos dos olhos ao suporte em 'U'. Além disso, as juntas podem também ser fixadas à base nos rasgos retangulares, utilizando-se parafusos, porcas e arruelas. Esses rasgos foram feitos especialmente com um tamanho maior para poder haver um ajuste na posição dos olhos, com a finalidade de centralizá-los de maneira correta.

Por fim, pode-se fixar os mancais centrais à base. Esses devem ser fixados por último para também se poder colocar a haste das pálpebras. Esta haste, com uma leve torção conseguem entrar nos mancais laterais, porém para os mancais centrais, deve-se primeiro colocar a parte de baixo dos mancais, a haste da pálpebra e a parte de cima dos mancais. O conjunto deve ser parafusado pelos furos de trás, somente, pois os furos da frente serão utilizados posteriormente (5.12).

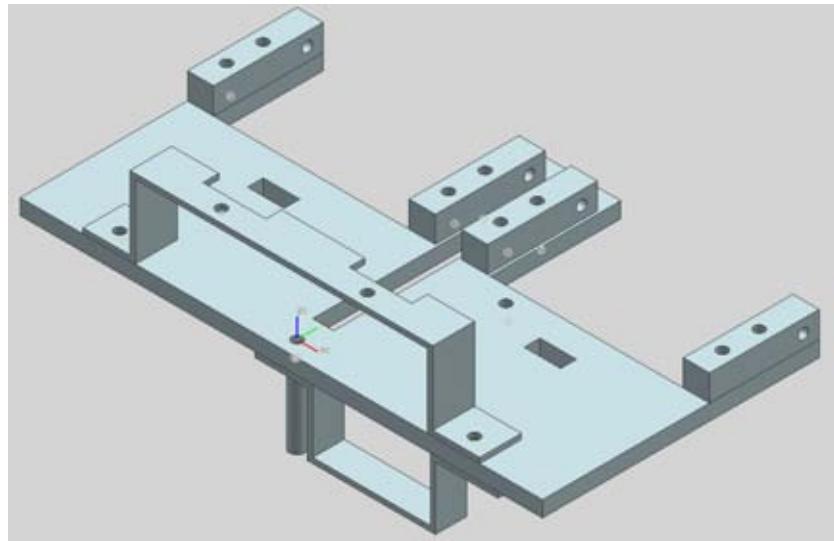
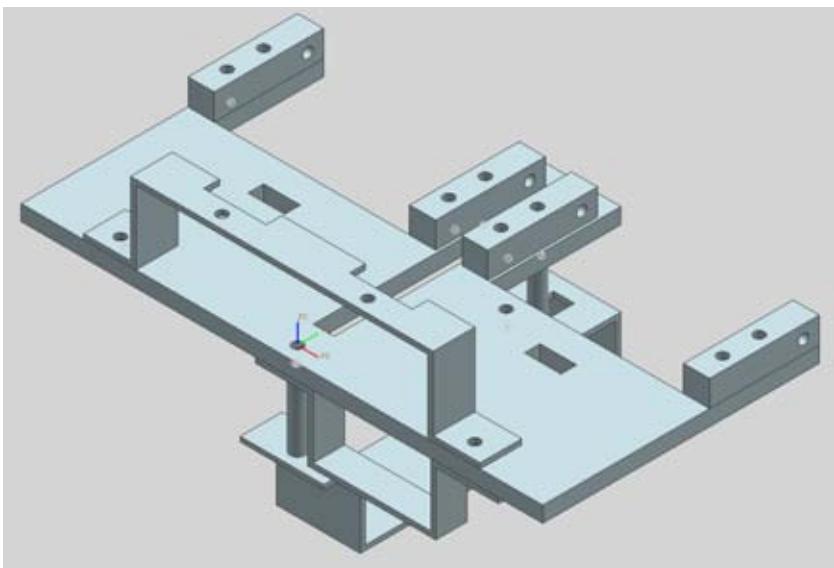


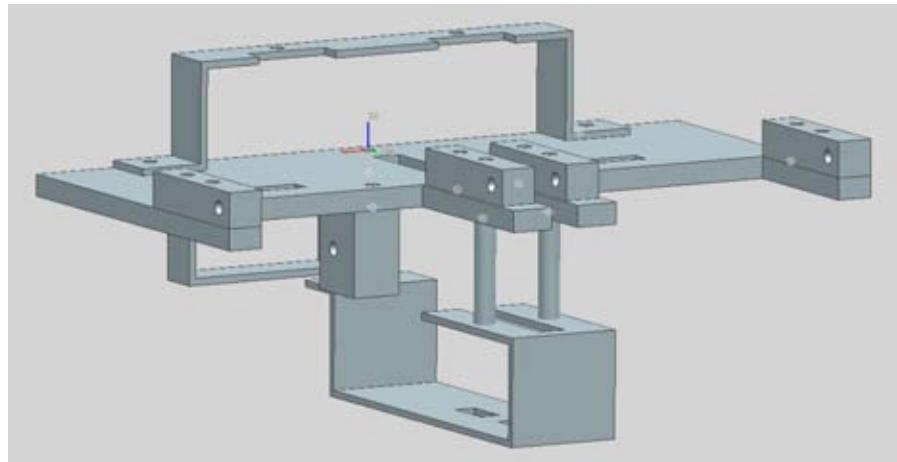
Figura 5.12: Passo 9 da montagem

Com o conjunto completo montado, este pode enfim ser fixado ao suporte da base que já está devidamente fixado ao crânio. Isto será feito em duas partes. Primeiro, deve-se colocar dois parafusos nos mancais da frente e prendê-los aos dois cilindros de suporte que já estão fixados ao apoio da base.

Por fim, deve-se virar todo o crânio de cabeça para baixo e colocar um parafuso que passa pelo apoio da base e se fixa no cilindro de apoio que já está fixado junto ao suporte em 'U' do motor das pálpebras e à base. Deste modo, o mecanismo está completamente fixado ao crânio e pronto para ser utilizado.



(a) Vista de trás



(b) Vista de frente

Figura 5.12: Vistas do conjunto montado

## 5.5 Programação e Controle dos Movimentos

Nesta seção será abordada a parte computacional do projeto, desde o modo para comandar os motores, passando pela calibração e definição das posições-chave dos olhos e das pálpebras, até rotinas implementadas para diversos movimentos. Para isso foram utilizados um microprocessador PIC16F876A, um programador para o PIC o ambiente de desenvolvimento MPLAB IDE da própria fabricante do microprocessador e um programa que monitora a porta serial do computador.

### 5.5.1 Controle dos servo motores

Os micro servo motores utilizados neste projeto, assim como todos os servo motores possuem três fios: dois para alimentação ( $V_{cc}$  e terra) e um para sinais de comando. Estes motores são alimentados com 5V de tensão e comandados com sinais PWM (*Pulse Width Modulation*), que consistem de uma onda quadrada com duty cycle variável. Dependendo do valor do duty cycle associado à onda, o servomotor se estabiliza em uma determinada posição. Para estes motores, as especificações da onda PWM devem ser:

- período de 20ms
- duty cycle variando de 1ms a 2ms

O eixo do motor se movimenta dentro de um intervalo que vai de  $0^\circ$ , correspondendo ao duty cycle de 1ms, a  $180^\circ$ , relacionado ao duty cycle de 2ms. Para

gerar os sinais de PWM necessários para o comando dos motores, foi utilizado um microprocessador PIC16F876A, da *Microchip*®. Algumas especificações deste processador, retiradas de [11], são apresentadas abaixo:

- Frequência de clock de 20MHz (externo)
- 8KB de memória flash
- 2 módulos PWM
- Entrada e saída serial (USART)
- 8 canais de conversão analógico-digital
- Timer de 8 bit com 8bit de prescaler

Para programar o microprocessador foi usado o software MPLAB IDE, que permite a criação de projetos em linguagem C e também possui uma gama de programadores diferentes para o PIC. Neste projeto, foi utilizado o programador MultiPROG, que segue o padrão ICD 2.

Apesar deste processador possuir saídas PWM, elas não suprem a totalidade dos sinais que devem ser gerados, pois se deve controlar três motores, ao invés de dois. Para isso, os sinais PWM devem ser gerados de outra maneira. A solução adotada foi criar estes sinais através de interrupções de software e disponibilizá-los através das saídas analógicas existentes no PIC. A figura 5.13 mostra a placa de circuito com microprocessador utilizado.

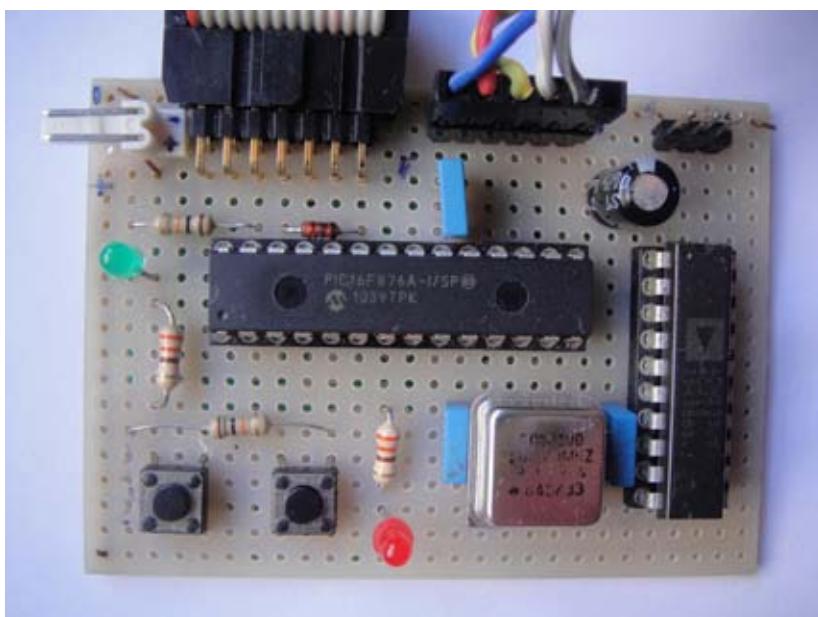


Figura 5.13: Placa com o microprocessador PIC16F876A

Para gerar as interrupções por software, deve ser utilizado o módulo de timer, presente do processador. Primeiramente existem alguns fatores de escala entre a frequência de clock e a frequência de incremento do timer. Este PIC já possui um divisor de escala que reduz por um fator de 4 a frequência do clock. Ou seja, para qualquer consideração relacionada ao software, a frequência de clock é de 5MHz e não 20MHz. Além disso, podem ser adicionados outros fatores de escala que diminuem ainda mais esta frequência. Neste projeto, existe ainda uma fator de redução de 2 entre a frequência de 5MHz e a frequência do timer. Ao final, tem-se que a frequência de incremento do timer é de 2,5MHz. É possível também escolher o valor inicial que o timer terá toda a vez que ele atingir o valor 255. Este valor influenciará o número de interrupções que correspondem aos 20ms de período. Para este projeto, decidiu-se por haver 300 interrupções correspondendo aos 20ms de período do PWM. Portanto, o valor inicial do timer tem de ser de 88.

Por fim, para gerar o PWM, usa-se a função *pwm\_preset(id,duty)*. Esta função recebe como parâmetros o identificador do motor (que varia entre 0, 1 e 2) e um número que corresponde ao duty cycle desejado. Neste projeto, o número 6 corresponde ao duty cycle de 1ms e o número 31, ao duty cycle de 2ms.

### 5.5.2 Programação dos movimentos

Como foi dito, os sinais PWM são capazes de colocar os servos motores nas posições desejadas. A próxima etapa consiste em identificar a relação entre os ângulos dos motores e as posições dos olhos e das pálpebras. Para isso, foi elaborada uma rotina, chamada *serial\_control()*, que permite variar a posição dos servos motores através de comandos enviados pela porta serial do computador ao PIC. Também, para facilitar a identificação das diversas posições, foram usados os caracteres da tabela ASCII para determinar o duty cycle a ser passado para a função *pwm\_preset*.

Para calibrar as posições, primeiramente deve-se centralizar os motores, para que os braços dos motores possam ser colocados em posições conhecidas. Uma vez acertadas essas posições, deve-se variar gradualmente a posição de cada motor a fim de encontrar a posição desejada para os olhos e as pálpebras. Após inúmeros testes, os olhos e as pálpebras foram caracterizados para cinco posições: centro, cima, baixo, esquerda e direita. A tabela 5.1 mostra os caracteres correspondentes às posições dos motores e as posições dos olhos e das pálpebras. A critério de notação, o motor 0 corresponde ao motor que atua nos olhos, nos pontos localizados a 90º

com a horizontal, o motor 1 corresponde ao motor que atua nos olhos, nos pontos localizados a aproximadamente 45º com a horizontal e o motor 2 corresponde ao motor que atua nas pálpebras.

	<b>Motor 0</b>	<b>Motor 1</b>	<b>Motor 2</b>
<b>olhando para o centro</b>	g	p	j
<b>olhando para cima</b>	j	m	g
<b>olhando para baixo</b>	d	s	m
<b>olhando para a esquerda</b>	g	m	i
<b>olhando para a direita</b>	h	r	i

Tabela 5.1: Relação entre as posições dos olhos e das pálpebras e a posição dos motores

Para utilizar os valores decimais dos comandos ASCII da tabela acima como o parâmetro de duty cycle da função *pwm\_preset* deve ser introduzido um termo de offset, para que o valor fique dentro do intervalo de 1ms a 2ms. Para este projeto, o valor do offset que deve ser subtraído do valor decimal do caractere ASCII é 91.

Com a relação apresentada nesta tabela, é possível escrever funções que levem os olhos de qualquer posição à posição desejada. Para isso, foram criadas 5 funções de posicionamento: *center()*, *up()*, *down()*, *left()* e *right()*. Estas funções identificam a posição atual dos motores, salvas em 3 variáveis globais e levam os motores gradualmente às respectivas posições determinadas pela tabela acima. Para que o movimento seja natural, e não abrupto, as posições atuais dos motores são decrementadas (ou incrementadas) até atingirem a posição desejada. O tempo de movimentação dos motores é controlado por um atraso em ms, dado pela função *DelayMs(delay)*. Uma vez que todos os motores estejam nas respectivas posições desejadas, a função é encerrada. As variáveis globais correspondentes às posições dos motores agora armazenam a posição atual do sistema. Um exemplo do que foi descrito neste parágrafo pode ser visto no código da função *center()*, mostrado abaixo:

```

1 void center()
{
3   while(pos_vert!=VCE || pos_horiz!=HCE || pos_palp!=PCE)
{
5     if (pos_vert>VCE)  pwm_preset(OLHO_VERTICAL,--pos_vert
- CHAR_OFFSET);
6     if (pos_vert<VCE)  pwm_preset(OLHO_VERTICAL,++pos_vert
- CHAR_OFFSET);
7     if (pos_horiz>HCE) pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,--pos_horiz
- CHAR_OFFSET);
8     if (pos_horiz<HCE) pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,++pos_horiz
- CHAR_OFFSET);
9     if (pos_palp>PCE)  pwm_preset(PALPEBRA,--pos_palp
- CHAR_OFFSET);
10    if (pos_palp<PCE)  pwm_preset(PALPEBRA,++pos_palp
- CHAR_OFFSET);
11    DelayMs(DELAY_1);
12  }
13}

```

Os termos *VCE*, *HCE* e *PCE* correspondem respectivamente às posições dos motores 0, 1 e 2 para que os olhos estejam olhando para o centro. As variáveis globais *pos\_vert*, *pos\_horiz* e *pos\_palp* armazenam as posições atuais dos motores. Além das funções de posicionamento dos olhos, também foi criada uma função para piscar os olhos, chamada *blink()*. Esta função, quando chamada, simplesmente faz as pálpebras descerem e subirem rapidamente, caracterizando a piscada.

As funções apresentadas acima representam os movimentos básicos do comportamento dos olhos e das pálpebras. Para deixar o projeto mais interessante, pode-se fazer combinações destas funções para que o olho execute determinadas tarefas. A função *circle\_cw()*, por exemplo, faz com que os olhos executem uma trajetória circular no sentido horário, combinando as rotinas de posição descritas anteriormente. Baseando-se nesta idéia, foram desenvolvidas outras funções que utilizam combinações das funções de posição descritas acima, como a função *scary()*, que faz com que os olhos se arregalem demonstrando uma situação de espanto, a função *sleep()*, que simula uma pessoa com sono e a função *tennis\_match()*, que simula uma pessoa assistindo a uma partida de tênis.

Para finalizar, foi criada também a função *manual\_control(cmd)*, que permite ao usuário executar cada uma das funções apresentadas acima através de comandos do teclado. Estes comandos são passados para o PIC, através da porta serial e a função correspondente é executada. A tabela 5.2 mostra a correspondência entre os comandos e as funções executadas.

Comando	Função	Comando	Função
w	<i>up()</i>	p	<i>circle_cw()</i>
s	<i>center()</i>	o	<i>circle_ccw()</i>
z	<i>down()</i>	i	<i>tennis_match()</i>
a	<i>right()</i>	l	<i>scary()</i>
d	<i>left()</i>	k	<i>sleep()</i>
q	<i>blink()</i>		

Tabela 5.2: Codificação das funções disponíveis

Seguindo os comandos da tabela acima é possível ter controle sobre todas as posições possíveis dos olhos do protótipo, além de ser possível a execução de algumas rotinas pré-programadas. As figuras 5.14 (a) a (e) mostram o resultado da execução das 5 funções básicas de posicionamento dos olhos.



(a) Centro



(b) Baixo



(c) Cima



(d) Esquerda



(e) Direita

Figura 5.14: Olhos do protótipo em todas as posições descritas



# Capítulo 6

## Conclusão

O escopo deste trabalho foi o projeto, a construção e implementação de um mecanismo de movimentação dos olhos e pálpebras para ser utilizado em uma face robótica. Primeiramente passou-se por uma introdução ao trabalho como um todo, levando em consideração as pesquisas feitas neste campo da robótica e qual o estado da arte nesta área hoje em dia.

Além disso, discutiu-se sobre a interdisciplinaridade deste projeto, o qual conta com o trabalho de engenheiros, dentistas e artistas plásticos, todos trabalhando com um objetivo em comum, e contribuindo com seus conhecimentos e ideias para otimizar o resultado final.

Foi feito também um breve resumo sobre emoções humanas em robôs, citando quais são as emoções básicas e exemplificando algumas emoções mais complexas. Falou-se também como essas emoções são reproduzidas em um ser humano, mostrando os principais músculos da face. Por fim, foram propostas algumas soluções de como transmitir esses movimentos musculares para um protótipo robótico, soluções tais que serão implementadas em projetos futuros.

Passou assim, para o projeto do sistema mecânico. Vale lembrar que ele teve que respeitar uma série de especificações com relação aos movimentos a serem feitos e também limitações, como peso e espaço de trabalho reduzido. Utilizou-se um crânio em resina, uma reprodução muito fiel de um crânio humano de verdade, porém, ele teve que ser desgastado para dar mais espaço ao mecanismo. Desse modo, pôde-se então verificar com mais exatidão o espaço que se teria para trabalhar.

Os olhos do protótipo são na verdade próteses oculares feitas pela Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo. Eles foram devidamente projetados para serem acoplados ao mecanismo e fornecerem o resultado desejado. Assim, em parceria com esta outra faculdade, os olhos foram fabricados segundo as especificações de projeto. Eles foram então acoplados a uma junta universal que é capaz de fornecer todos os movimentos que um olho humano pode fazer.

Em paralelo, realizou-se o projeto das peças que servem de base e apoio para o mecanismo como um todo. Essas peças foram feitas a partir de chapas, tarugos e prismas de alumínio, material leve porém resistente. As peças foram desenhadas em CAD e depois fabricadas segundo as especificações. Os motores utilizados foram micro servo motores por terem um tamanho bem reduzido, mas ao mesmo tempo capazes de fornecer torque e velocidade de acordo com o necessário para o trabalho.

Em seguida fez-se o mecanismo de hastes tanto para a movimentação dos olhos quanto das pálpebras. No primeiro caso, as hastes eram ligadas aos motores e aos olhos. Essas hastes foram fabricadas à mão com fios de aço ortodônticos para fornecer os movimentos desejados. No segundo caso, foi feita uma haste também do mesmo material que simula as pálpebras, e esta é acionada por um mecanismo baseado em quadrilátero articulado.

Seguiu-se então com uma explicação sobre a fabricação de todas as peças, fornecendo detalhes de como cada uma foi produzida e suas particularidades de fabricação, como ferramentas específicas ou procedimentos diferenciados. Além disso foi discutida a montagem do mecanismo final para que, em projetos futuros as pessoas saibam como manuseá-lo.

Por fim foi feito um programa de controle dos movimentos. Esse controle dos servo motores foi feito com a utilização de sinais PWM (*Pulse Width Modulation*) através de um micro processador PIC e o método de como utilizar interrupções para gerar esses sinais foi abordada. O mecanismo final foi então calibrado para se verificar as posições dos olhos semelhantes a de um ser humano. Com isso, pode-se fazer enfim diversas rotinas de movimentos para simular o protótipo final.

Para concluir, este projeto permitiu o uso de diversas ferramentas de engenharia para resolver um problema moderno. Iniciando por projeto e chegando à implementação prática, este trabalho passou por uma grande variedade de conceitos

aprendidos durante o curso de Engenharia. É extremamente gratificante realmente aplicar a teoria aprendida ao longo dos anos de estudo em um problema real, encarar o problema e achar uma solução. E no final, através da verificação dos resultados, decidir qual o melhor ponto a ser implementado.

## 6.1 Projetos futuros

Em algumas partes deste trabalho, falou-se sobre projetos futuros. Isso porque, este trabalho é apenas uma parte de um projeto maior que é a construção efetiva de uma face robótica para representar emoções e se comunicar com as pessoas.

Diversos outros trabalhos estão em andamento como projetos de reconhecimento de face e emoções, reconhecimento de voz, projetos de implementação de voz, além de outros relacionados à face em si, como movimentação das sobrancelhas, ceno, testa, boca, bochechas, etc.

Assim, quando cada um desses, digamos, sub-projetos estiverem concluídos, eles poderão ser integrados em um só que será a face robótica completamente funcional e capaz de se comunicar.



# Referências

- [1] PARK, I.-W. et al. **Control Hardware Integration of a Biped Humanoid Robot with an Android Head.** *Robotics and Automation Systems*, South Korea, v. 56, p. 95–103, Setembro 2007.
- [2] MORI, M. **The Uncanny Valley.** *Energy*, p. 33–35, 1970.
- [3] JEACKEL, P.; CAMPBELL, N.; MELHUISH, C. **Facial Behavior Mapping:** From video footage to a robot head. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 56, p. 1042–1049, Setembro 2008.
- [4] **Tato Equipamentos Eletrônicos.** [http://www.tato.ind.br/detalhe\\_produto.php?codigo\\_chave=106](http://www.tato.ind.br/detalhe_produto.php?codigo_chave=106). Acessado em 11 Outubro 2011.
- [5] OH, J.-H. et al. **Design od Android type Humanoid Robot Albert HUBO.** *IEEE International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, Beijing, China, Outubro 2006.
- [6] HANSON, D. **Exploring the Aesthetic Range for Humanoid Robots.** The University of Texas at Dallas, 2005.
- [7] HANSON, D. et al. **Upending the Uncanny Valley.** Hanson Robotics Inc.
- [8] BARRETO, M. R. P. **Desenvolvimento da Face Robótica.** USP, São Paulo.
- [9] TSAI, E. C. et al. **Tumors of the Skull Base in Children:** Review of the tumor type and management strategies. <http://www.medscape.com/viewarticle/436107> Science and Technology. Acessado em 09 Outubro 2011.
- [10] KLIMT, G.; HUNT, P. **Palla Athenes of Gustav Klimt:** Eyes of a goddess. [http://traumwerk.stanford.edu/philolog/2006/07/gustav\\_klimts\\_pallas\\_athene\\_of.html](http://traumwerk.stanford.edu/philolog/2006/07/gustav_klimts_pallas_athene_of.html). Acessado em 18 Setembro 2011.
- [11] MICROCHIP. **PIC16F87XA Data Sheet.** <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39582b.pdf>. Acessado em 17 Novembro 2011.

- [12] FUKUDA, T. et al. **Facial Expressive Robotic Head System for Human-Robot Communication and Its Application in Home Environment.** *Proceedings of the IEEE*, v. 92, n. 11, p. 1851–1865, Novembro 2004.
- [13] WEIGUO, W.; QINGMEI, M.; YU, W. **Development of the Humanoid Head Portrait Robot System with Flexible Face and Expression.** *IEEE International Conference on robotics and Biomimetics*, Shenyang, China, Agosto 2004.
- [14] BENNEWITZ, M. et al. **Fritz - A Humanoid Communication Robot.** *IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication*, Jeju, Korea, Agosto 2007.
- [15] OLCUCUOGLU, O.; KOKU, A. B.; KONUKSEVEN, E. I. **i-Rok: A Human Like Robotic Head.** *Middle East Technical University*, Ankara, Turkey, 2007.

## **Apêndice A**

### **Desenhos de Fabricação**

Nas páginas seguintes estão apresentados os desenhos de fabricação das peças.

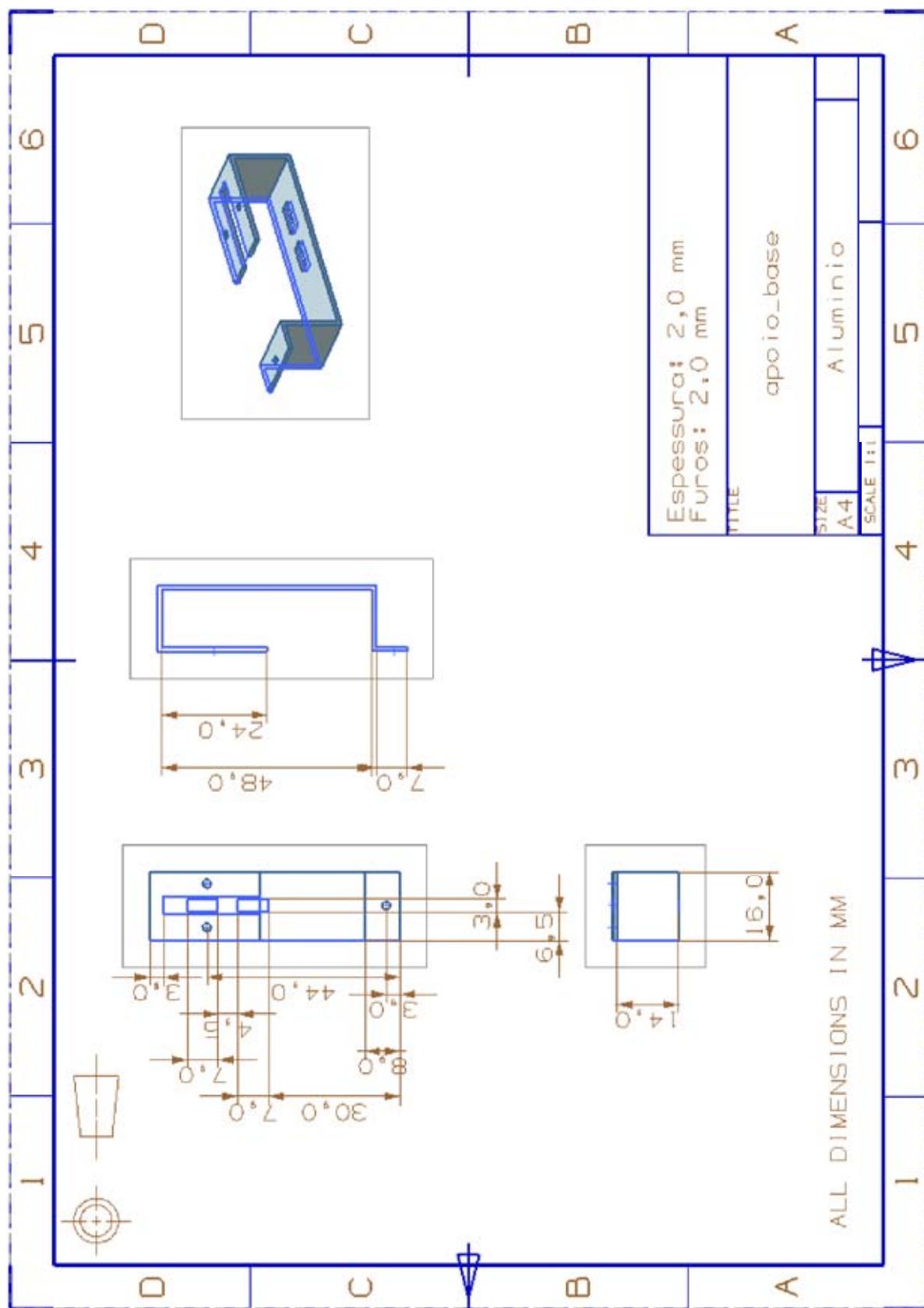


Figura A.1: Desenho de fabricação do apoio da base

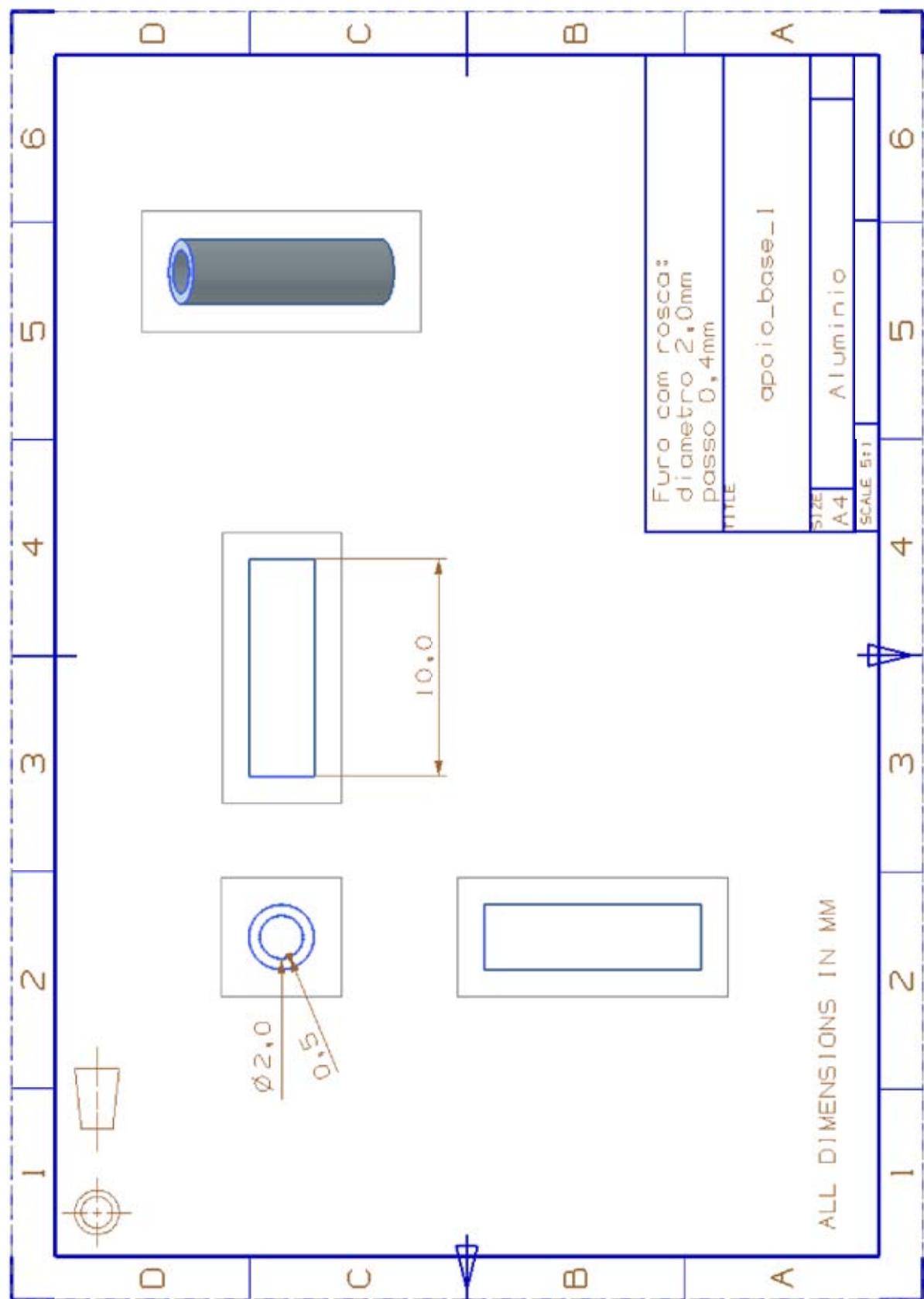


Figura A.2: Desenho de fabricação do cilindro anterior de apoio da base

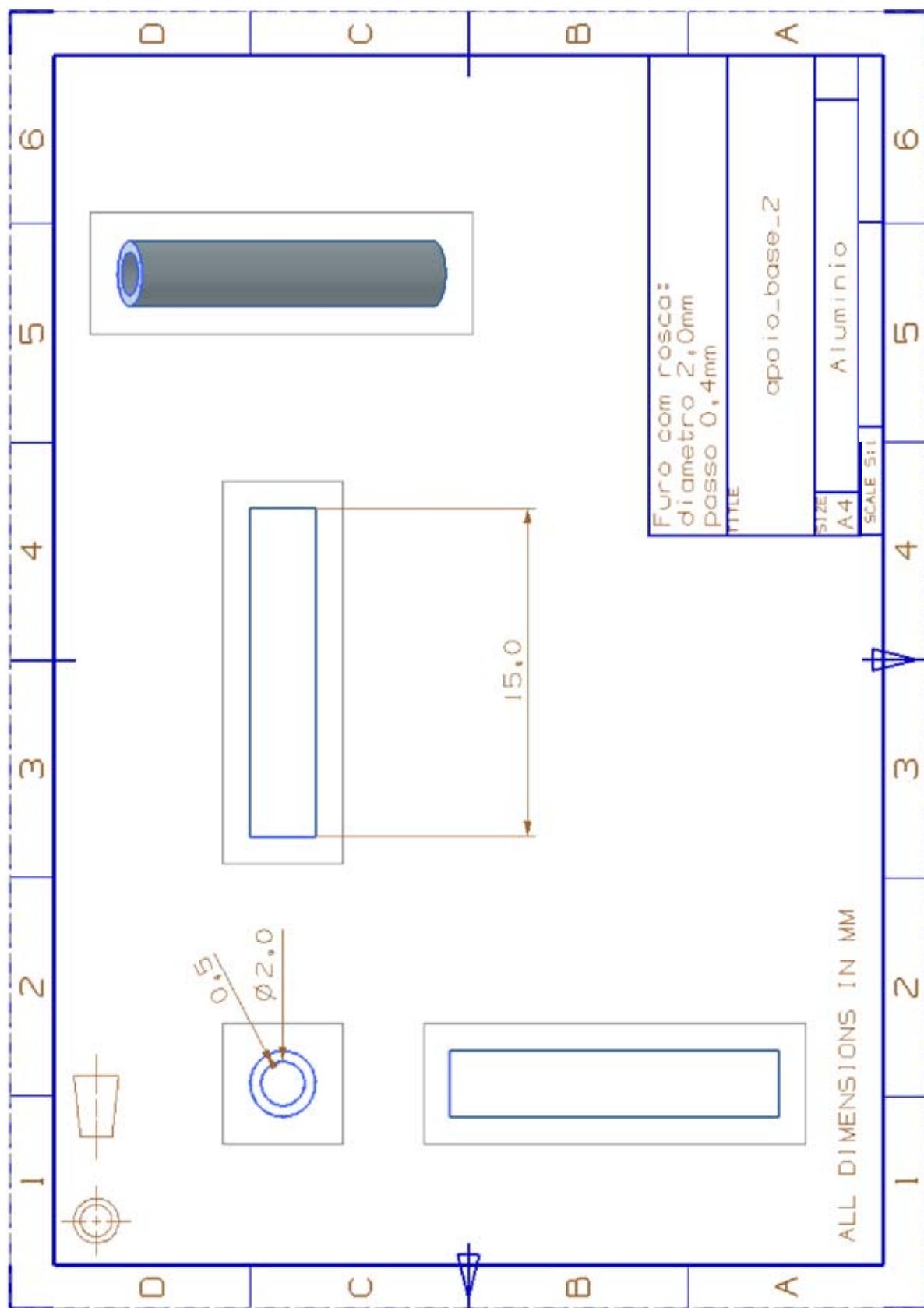


Figura A.3: Desenho de fabricação do cilindro posterior de apoio da base

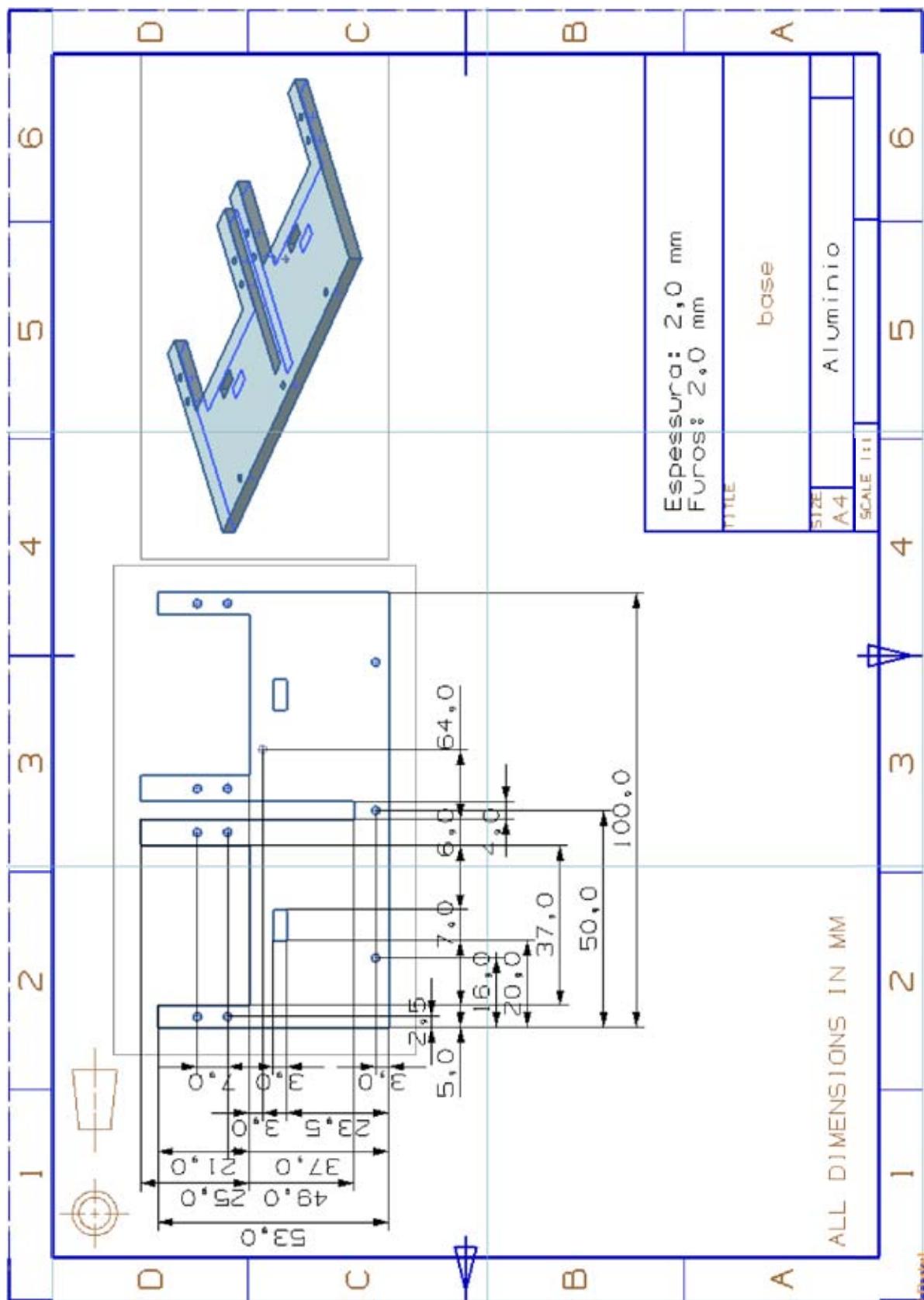


Figura A.4: Desenho de fabricação da base

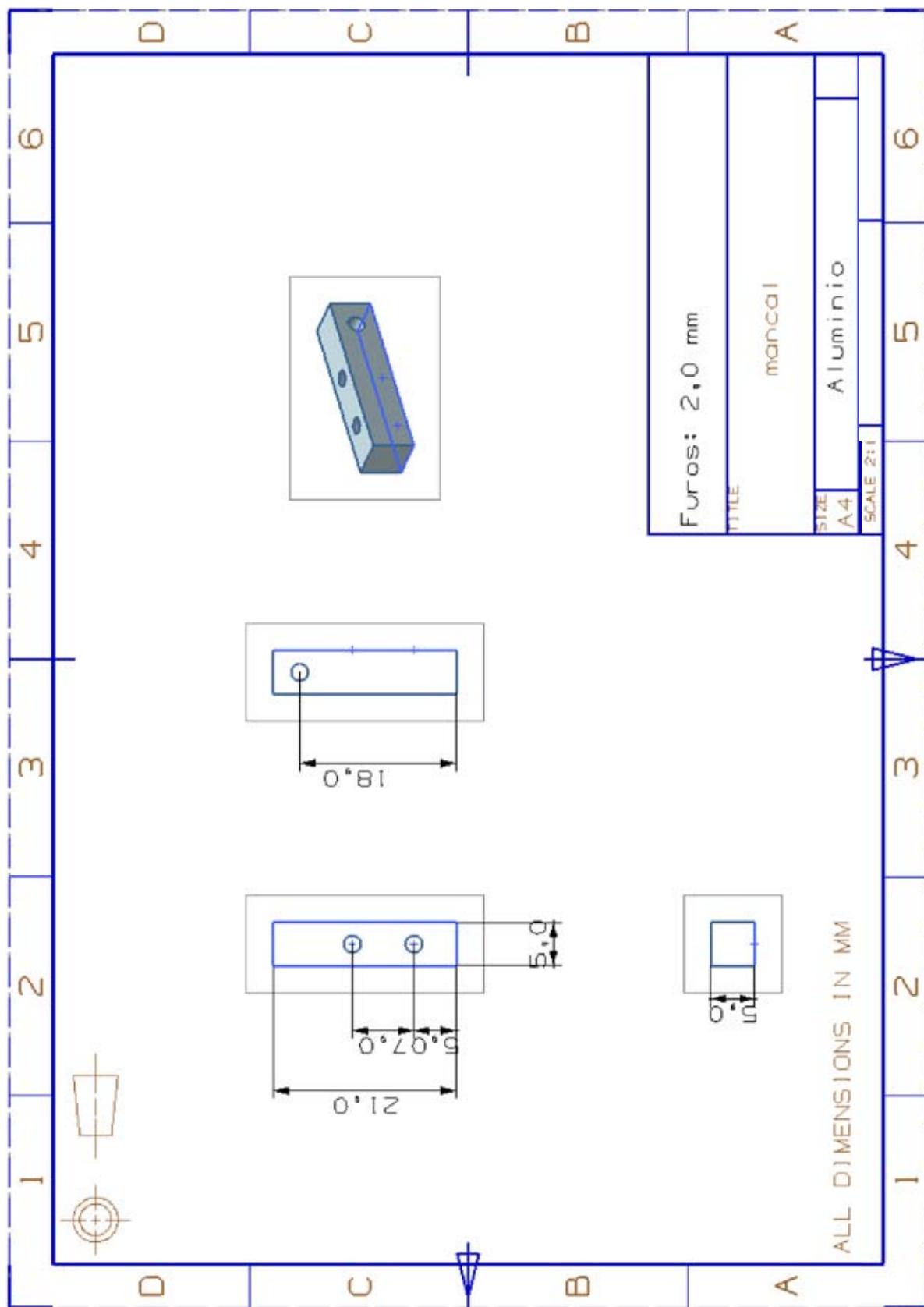


Figura A.5: Desenho de fabricação do mancal

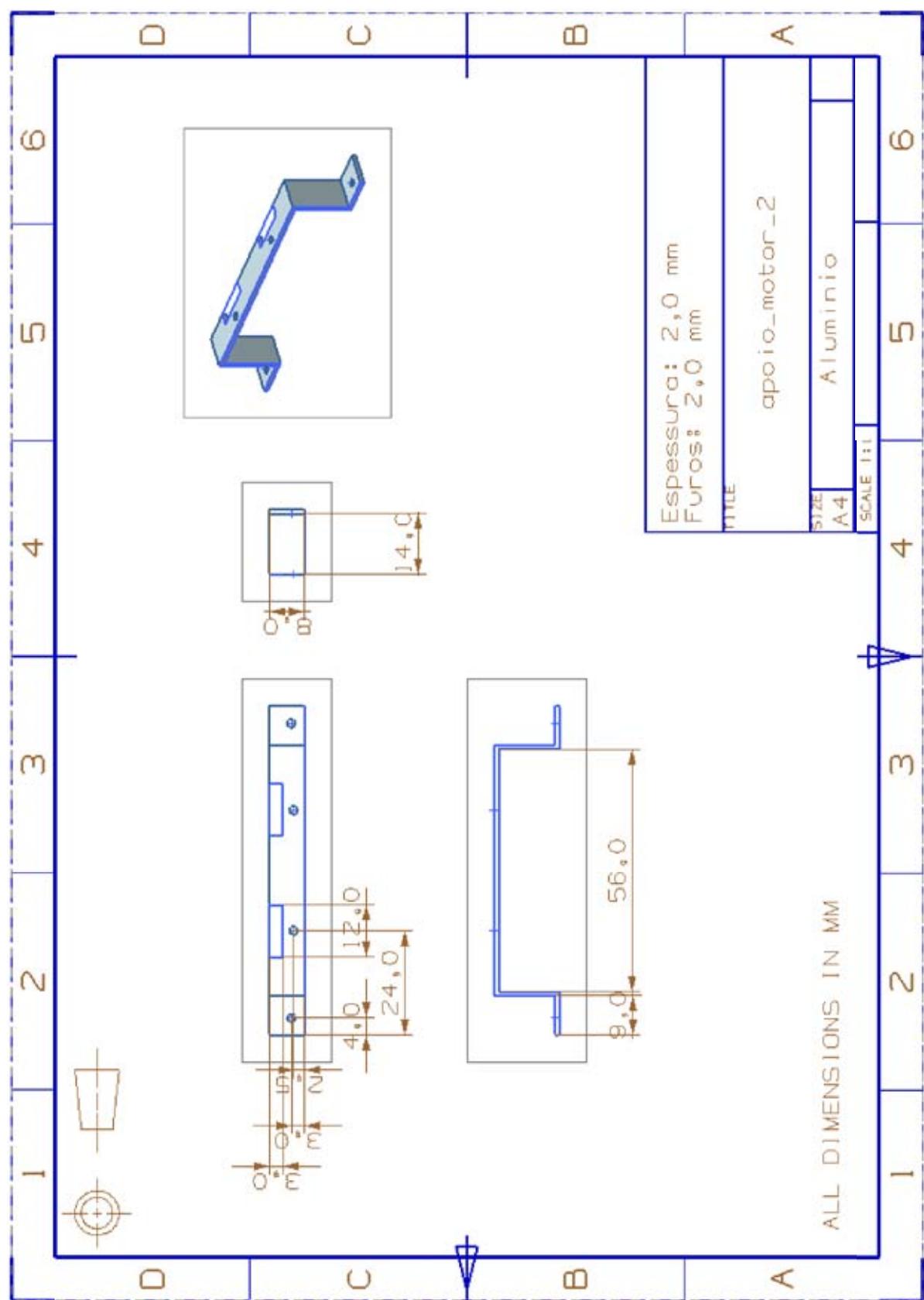


Figura A.6: Desenho de fabricação do apoio dos motores superiores

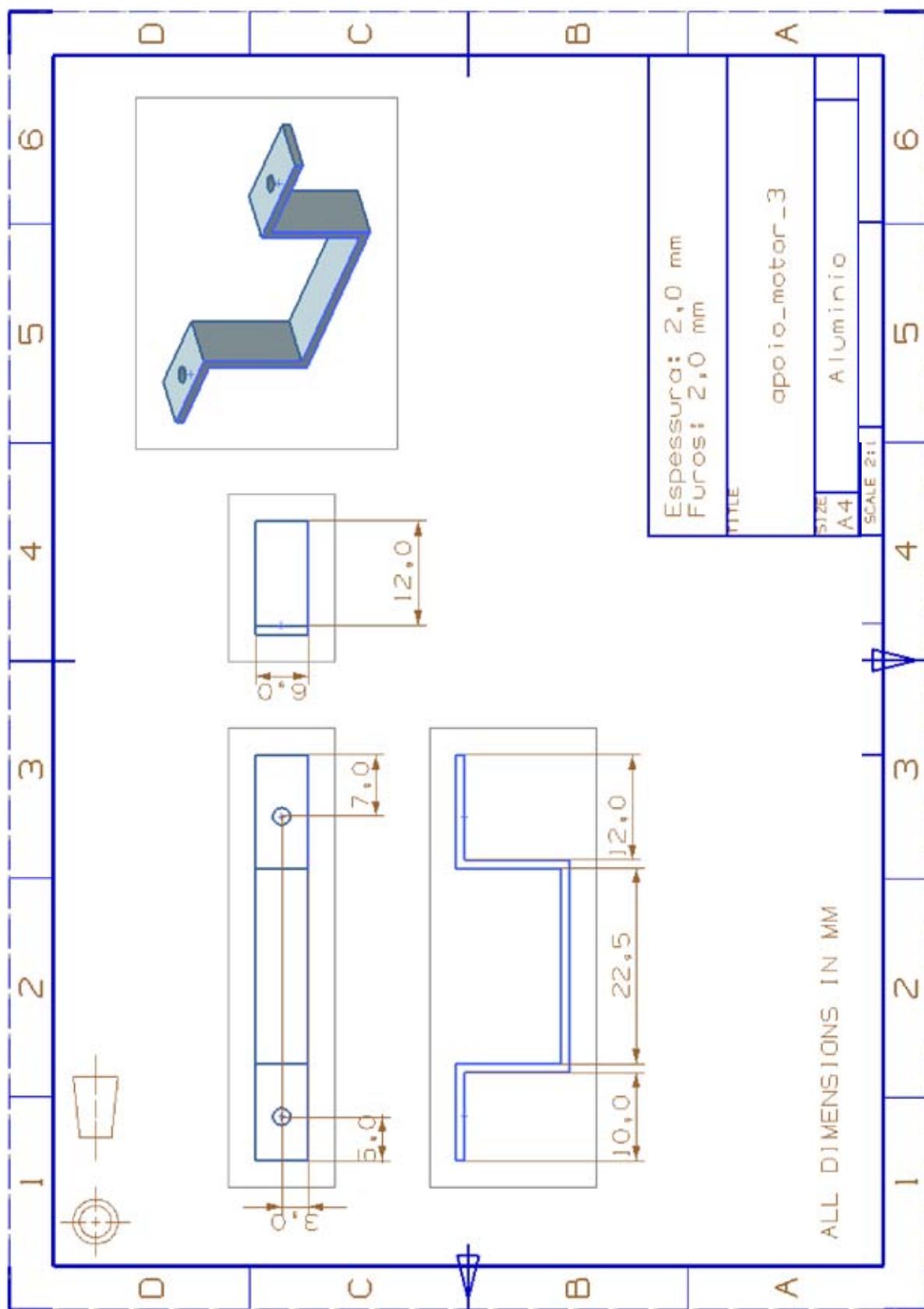


Figura A.7: Desenho de fabricação do apoio do motor da pálpebra

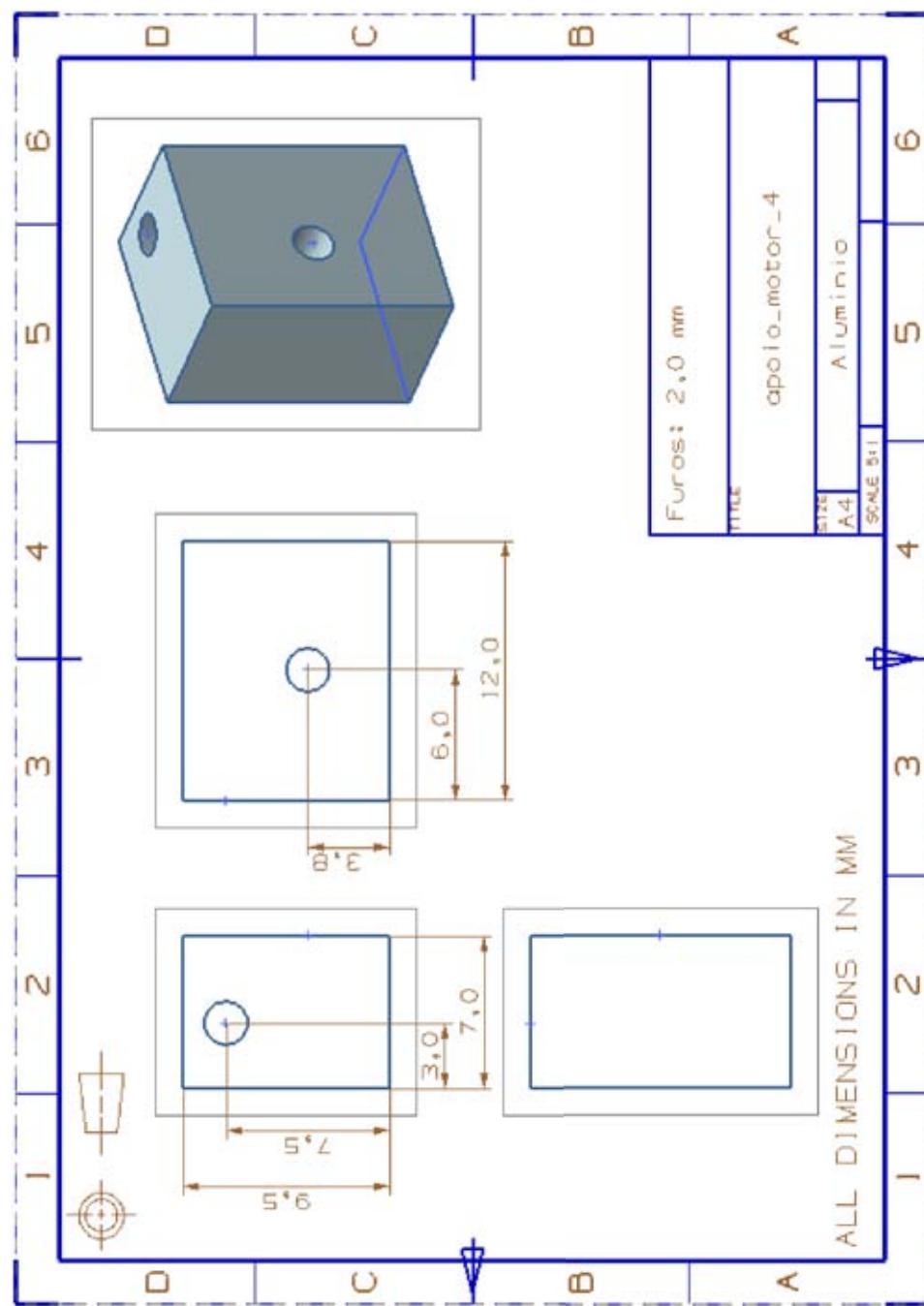


Figura A.8: Desenho de fabricação do segundo apoio do motor da pálpebra



# Apêndice B

## Códigos fonte usados no projeto

A seguir está o código fonte das funções que foram apresentadas no decorrer desta monografia.

```

1 #define _LEGACY_HEADERS
2 #include <htc.h>
3
4 __CONFIG(HS & WDTDIS & LVPDIS & BORDIS);
5
6 #define bitset(var,bitno) ((var) |= 1UL << (bitno))
7 #define bitclr(var,bitno) ((var) &= ~(1UL << (bitno)))
8 #define byte unsigned char
9 #define false 0
10 #define true 1
11
12 #define PALPEBRA 2 //motor das palpebras
13 #define OLHO_VERTICAL 0 //motor do mov. vertical dos
14     olhos
15 #define OLHO_HORIZONTAL 1 //motor do mov. horizontal dos
16     olhos
17 #define CHAR_OFFSET 91 //offset para os comandos PWM
18 #define DELAY_1 20
19 #define DELAY_2 80
20 #define DELAY_BLINK 90
21
22 //posições do motor vertical
23 #define VB 'd' //olhando para baixo
24 #define VCE 'g' //olhando para o centro
25 #define VCI 'j' //olhando para cima
26 #define VE 'g' //olhando para a esquerda
27 #define VD 'h' //olhando para a direita
28
29 //posições do motor horizontal
30 #define HB 's' //olhando para baixo
31 #define HCE 'p' //olhando para o centro
32 #define HCI 'm' //olhando para cima
33 #define HE 'm' //olhando para a esquerda
34 #define HD 'r' //olhando para a direita

```

```
34 //posições do motor das pálpebras
36 #define PB 'm' //olhando para baixo
37 #define PCE 'j' //olhando para o centro
38 #define PCI 'g' //olhando para cima
39 #define PE 'i' //olhando para a esquerda
40 #define PD 'i' //olhando para a direita

42 #include "delay.h"
43 #include "serial.h"
44 #include "fastmultipwm.c"

46

48 byte ch;
byte idx;
50 byte pos_vert=VCE;
byte pos_horiz=HCE;
52 byte pos_palp=PCE;
byte tennis_count=0;
54 byte scary_count=0;

56

58 void blink();
void down();
void center();
void up();
void left();
void right();
64 void serial_control();
void circle_cw();
66 void circle_ccw();
void tennis_match();
68 void scary();
void sleep();

70 void main()
{
    int counter0=0, counter1=0, counter2=0;
74    pwm_init();
    serial_setup();
76    pwm_preset(OLHO_VERTICAL,pos_vert - CHAR_OFFSET);
    pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,pos_horiz - CHAR_OFFSET);
78    pwm_preset(PALPEBRA,pos_palp - CHAR_OFFSET);
    pwm_start();
    GIE = 1; // enable interrupts
    while(true)
    {
        if(0) serial_control();
        else
        {
79            down();
            DelayMs(DELAY_2);
            center();
            DelayMs(DELAY_2);
```

```
92     blink();
93     up();
94     DelayMs(DELAY_2);
95     center();
96     DelayMs(DELAY_2);
97     blink();
98     DelayMs(DELAY_BLINK);
99     blink();
100    left();
101    DelayMs(DELAY_2);
102    center();
103    DelayMs(DELAY_2);
104    right();
105    DelayMs(DELAY_2);
106    blink();
107    center();
108    DelayMs(DELAY_2);
109    blink();
110    DelayMs(DELAY_BLINK);
111    blink();

112    circle_cw();
113    DelayMs(500);
114    blink();
115    DelayMs(500);
116    circle_ccw();
117    DelayMs(500);
118    blink();
119    DelayMs(500);

120    tennis_match();
121    scary_count++;
122    if(scary_count==3)
123    {
124        scary();
125        scary_count=0;
126        DelayS(2);
127    }
128    sleep();

129    } //else
130    } //while(true)
131 } // main

132 /* interrupt service routine */
133 int x = 0;
134 static void interrupt isr(void) {
135     pwm_update();
136 } // isr

137 void blink()
138 {
139     pwm_preset(PALPEBRA ,PB-CHAR_OFFSET);
140     DelayMs(DELAY_BLINK);
141     pwm_preset(PALPEBRA ,PCE-CHAR_OFFSET);
142 }
```

```

150 void down()
{
152     while(pos_vert!=VB || pos_horiz!=HB || pos_palp!=PB)
    {
154         if (pos_vert>VB) pwm_preset(OLHO_VERTICAL,--pos_vert -
            CHAR_OFFSET);
155         if (pos_vert<VB) pwm_preset(OLHO_VERTICAL,++pos_vert -
            CHAR_OFFSET);
156         if (pos_horiz>HB) pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,--pos_horiz -
            CHAR_OFFSET);
157         if (pos_horiz<HB) pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,++pos_horiz -
            CHAR_OFFSET);
158         if (pos_palp>PB) pwm_preset(PALPEBRA,--pos_palp -
            CHAR_OFFSET);
159         if (pos_palp<PB) pwm_preset(PALPEBRA,++pos_palp -
            CHAR_OFFSET);
160         DelayMs(DELAY_1);
    }
162 }

164 void center()
{
166     while(pos_vert!=VCE || pos_horiz!=HCE || pos_palp!=PCE)
    {
168         if (pos_vert>VCE) pwm_preset(OLHO_VERTICAL,--pos_vert -
            CHAR_OFFSET);
169         if (pos_vert<VCE) pwm_preset(OLHO_VERTICAL,++pos_vert -
            CHAR_OFFSET);
170         if (pos_horiz>HCE) pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,--pos_horiz -
            CHAR_OFFSET);
171         if (pos_horiz<HCE) pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,++pos_horiz -
            CHAR_OFFSET);
172         if (pos_palp>PCE) pwm_preset(PALPEBRA,--pos_palp -
            CHAR_OFFSET);
173         if (pos_palp<PCE) pwm_preset(PALPEBRA,++pos_palp -
            CHAR_OFFSET);
174         DelayMs(DELAY_1);
    }
176 }

178 void up()
{
180     while(pos_vert!=VCI || pos_horiz!=HCI || pos_palp!=PCI)
    {
182         if (pos_vert>VCI) pwm_preset(OLHO_VERTICAL,--pos_vert -
            CHAR_OFFSET);
183         if (pos_vert<VCI) pwm_preset(OLHO_VERTICAL,++pos_vert -
            CHAR_OFFSET);
184         if (pos_horiz>HCI) pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,--pos_horiz -
            CHAR_OFFSET);
185         if (pos_horiz<HCI) pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,++pos_horiz -
            CHAR_OFFSET);
186         if (pos_palp>PCI) pwm_preset(PALPEBRA,--pos_palp -
            CHAR_OFFSET);
187         if (pos_palp<PCI) pwm_preset(PALPEBRA,++pos_palp -
            CHAR_OFFSET);
188         DelayMs(DELAY_1);
    }
190 }

```

```

192 void left()
193 {
194     while(pos_vert!=VE || pos_horiz!=HE || pos_palm!=PE)
195     {
196         if (pos_vert>VE) pwm_preset(OLHO_VERTICAL,--pos_vert -
197             CHAR_OFFSET);
198         if (pos_vert<VE) pwm_preset(OLHO_VERTICAL,++pos_vert -
199             CHAR_OFFSET);
200         if (pos_horiz>HE) pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,--pos_horiz -
201             CHAR_OFFSET);
202         if (pos_horiz<HE) pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,++pos_horiz -
203             CHAR_OFFSET);
204         if (pos_palm>PE) pwm_preset(PALPEBRA,--pos_palm -
205             CHAR_OFFSET);
206         if (pos_palm<PE) pwm_preset(PALPEBRA,++pos_palm -
207             CHAR_OFFSET);
208         DelayMs(DELAY_1);
209     }
210 }
211
212 void right()
213 {
214     while(pos_vert!=VD || pos_horiz!=HD || pos_palm!=PD)
215     {
216         if (pos_vert>VD) pwm_preset(OLHO_VERTICAL,--pos_vert -
217             CHAR_OFFSET);
218         if (pos_vert<VD) pwm_preset(OLHO_VERTICAL,++pos_vert -
219             CHAR_OFFSET);
220         if (pos_horiz>HD) pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,--pos_horiz -
221             CHAR_OFFSET);
222         if (pos_horiz<HD) pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,++pos_horiz -
223             CHAR_OFFSET);
224         if (pos_palm>PD) pwm_preset(PALPEBRA,--pos_palm -
225             CHAR_OFFSET);
226         if (pos_palm<PD) pwm_preset(PALPEBRA,++pos_palm -
227             CHAR_OFFSET);
228         DelayMs(DELAY_1);
229     }
230 }
231
232 void serial_control()
233 {
234     ch = chkchr();
235     if (ch == '0') {
236         putch(ch);
237         while ((ch = chkchr()) == 255);
238         putch(ch);
239         pwm_preset(OLHO_VERTICAL, ch - CHAR_OFFSET);
240     }
241     if (ch == '1') {
242         putch(ch);
243         while ((ch = chkchr()) == 255);
244         putch(ch);
245         pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL, ch - CHAR_OFFSET);
246     }
247     if (ch == '2') {
248         putch(ch);
249         while ((ch = chkchr()) == 255);
250         putch(ch);
251         pwm_preset(PALPEBRA, ch - CHAR_OFFSET);
252     }
253 }
```

```

244 void circle_cw()
245 {
246     down();
247     DelayMs(DELAY_2);
248     right();
249     DelayMs(DELAY_2);
250     up();
251     DelayMs(DELAY_2);
252     left();
253     DelayMs(DELAY_2);
254 }
255
256 void circle_ccw()
257 {
258     down();
259     DelayMs(DELAY_2);
260     left();
261     DelayMs(DELAY_2);
262     up();
263     DelayMs(DELAY_2);
264     right();
265     DelayMs(DELAY_2);
266 }
267
268 void tennis_match()
269 {
270     left();
271     DelayS(1);
272     tennis_count++;
273     if(tennis_count==3)
274     {
275         blink();
276         tennis_count=0;
277     }
278     right();
279     DelayS(1);
280     tennis_count++;
281     if(tennis_count==3)
282     {
283         blink();
284         tennis_count=0;
285     }
286 }
287
288 void scary()
289 {
290     while(pos_vert!=VCE || pos_horiz!=HCE || pos_palp!=PCI)
291     {
292         if (pos_vert>VCE)    pwm_preset(OLHO_VERTICAL,--pos_vert
293             - CHAR_OFFSET);
294         if (pos_vert<VCE)    pwm_preset(OLHO_VERTICAL,++pos_vert
295             - CHAR_OFFSET);
296         if (pos_horiz>HCE)   pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,--pos_horiz
297             - CHAR_OFFSET);
298         if (pos_horiz<HCE)   pwm_preset(OLHO_HORIZONTAL,++pos_horiz
299             - CHAR_OFFSET);

```

```

298     if (pos_palp>PCI)    pwm_preset(PALPEBRA,--pos_palp -
300         CHAR_OFFSET);
300     if (pos_palp<PCI)    pwm_preset(PALPEBRA,++pos_palp -
301         CHAR_OFFSET);
302     DelayMs(DELAY_1);
302 }
304
304 void sleep()
306 {
307     byte cnt=3;
308     center();
309     while(pos_palp!=PB)
310     {
311         if (pos_palp>PB)    pwm_preset(PALPEBRA,--pos_palp -
312             CHAR_OFFSET);
312         if (pos_palp<PB)    pwm_preset(PALPEBRA,++pos_palp -
313             CHAR_OFFSET);
314         DelayMs(cnt*17*DELAY_1);
314         cnt--;
315     }
316     cnt=3;
317 //DelayMs(200);
318     while(pos_palp!=PCI)
319     {
320         if (pos_palp>PCI)    pwm_preset(PALPEBRA,--pos_palp -
321             CHAR_OFFSET);
321         if (pos_palp<PCI)    pwm_preset(PALPEBRA,++pos_palp -
322             CHAR_OFFSET);
322         DelayMs(DELAY_1);
323     }
324     DelayMs(700);
325     while(pos_palp!=PB)
326     {
327         if (pos_palp>PB)    pwm_preset(PALPEBRA,--pos_palp -
328             CHAR_OFFSET);
328         if (pos_palp<PB)    pwm_preset(PALPEBRA,++pos_palp -
329             CHAR_OFFSET);
329         DelayMs(cnt*17*DELAY_1);
330         cnt--;
331     }
332     cnt=3;
333 // DelayMs(200);
334     while(pos_palp!=PCE)
335     {
336         if (pos_palp>PCE)    pwm_preset(PALPEBRA,--pos_palp -
337             CHAR_OFFSET);
337         if (pos_palp<PCE)    pwm_preset(PALPEBRA,++pos_palp -
338             CHAR_OFFSET);
338         DelayMs(DELAY_1);
339     }
340     DelayMs(700);
341     while(pos_palp!=PB)
342     {
343         if (pos_palp>PB)    pwm_preset(PALPEBRA,--pos_palp -
344             CHAR_OFFSET);
344         if (pos_palp<PB)    pwm_preset(PALPEBRA,++pos_palp -
345             CHAR_OFFSET);
345     }

```

```
346     DelayMs(cnt*17*DELAY_1);
348     cnt--;
349 }
350 cnt=3;
351 // DelayMs(200);
352 while(pos_palp!=PCE+1)
353 {
354     if (pos_palp>PCE+1)    pwm_preset(PALPEBRA,--pos_palp -
355                                CHAR_OFFSET);
356     if (pos_palp<PCE+1)    pwm_preset(PALPEBRA,++pos_palp -
357                                CHAR_OFFSET);
358     DelayMs(DELAY_1);
359 }
360 DelayMs(700);
361 while(pos_palp!=PB)
362 {
363     if (pos_palp>PB)    pwm_preset(PALPEBRA,--pos_palp -
364                                CHAR_OFFSET);
365     if (pos_palp<PB)    pwm_preset(PALPEBRA,++pos_palp -
366                                CHAR_OFFSET);
367     DelayMs(cnt*17*DELAY_1);
368     cnt--;
369 }
370 cnt=3;
371 DelayS(3);
372 }
```

Os autores deste trabalho não se responsabilizam pelo uso indevido do conteúdo presente nesta monografia, bem como os resultados gerados de tais atos.

## Apêndice C

### Diagrama Elétrico da Placa de Circuito com Microprocessador PIC16f876A

Na página seguinte está o diagrama elétrico da placa.

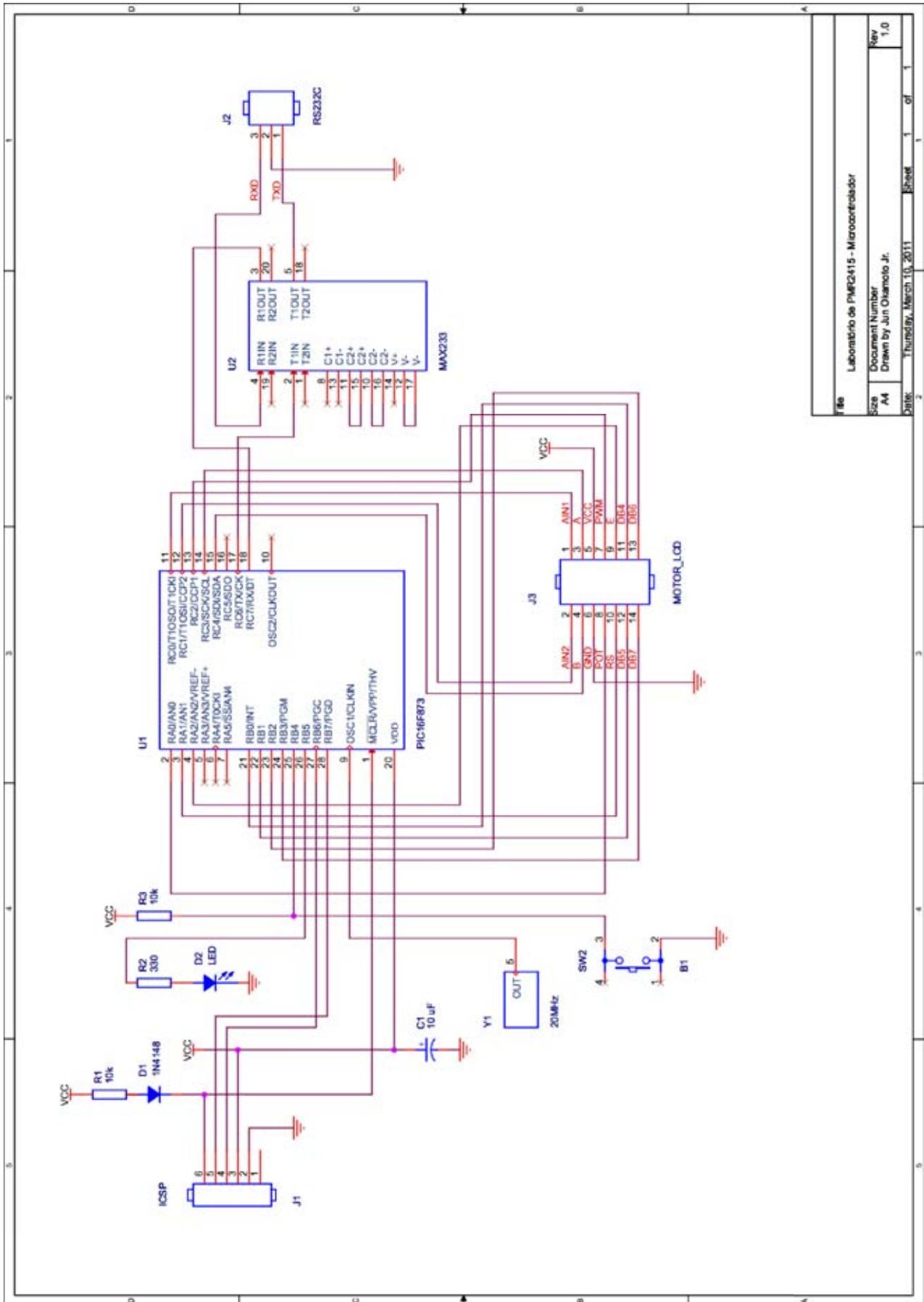


Figura C.1: Esquema elétrico da placa com Microprocessador

Re	Laboratório de Física 213 - Microcontrolador
Size	A4
Date	Thursday, March 10, 2011

Document Number  
Drawn by Jun Ocamoto Jr.  
Sheet 1 of 1  
Rev 1.0