

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Thiago Rodrigues Dias
Velho..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 31/10/2008
Helder Anibal Hermini
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Uma Contribuição para o Desenvolvimento de um
Dispositivo Háptico para Interação com Objetos
Tridimensionais Utilizando Prototipagem Rápida**

Autor: Thiago Rodrigues Dias Velho

Orientador: Prof. Dr. Helder Anibal Hermini

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

**Uma Contribuição para o Desenvolvimento de um
Dispositivo Háptico para Interação com Objetos
Tridimensionais Utilizando Prototipagem Rápida**

Autor: Thiago Rodrigues Dias Velho

Orientador: Professor Dr. Helder Anibal Hermini

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Térmica e Fluídos

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2008

S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

V543c Velho, Thiago Rodrigues Dias
Uma contribuição para o desenvolvimento de um dispositivo háptico para interação com objetos tridimensionais utilizando prototipagem rápida / Thiago Rodrigues Dias Velho. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Helder Anibal Hermini.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Biometria. 2. Interação homem-máquina. 3. Biomecânica. I. Hermini, Helder Anibal. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: A contribution to the development of a haptic device to
interaction with tridimensional objects using rapid prototyping

Palavras-chave em Inglês: Biometry, Computer-human interaction, Biomechanics

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia, Humberto Ferasoli
Filho

Data da defesa: 03/10/2008

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

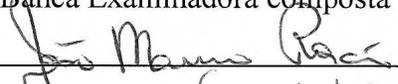
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Uma Contribuição para o Desenvolvimento de
um Dispositivo Háptico para Interação com
Objetos Tridimensionais utilizando
Prototipagem Rápida**

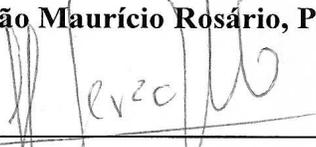
Autor: Thiago Rodrigues Dias Velho

Orientador: Professor Dr. Helder Anibal Hermini

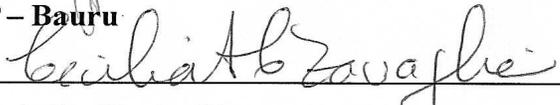
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. João Maurício Rosário, Presidente
UNICAMP



Prof. Dr. Humberto Ferasoli Filho
UNESP – Bauru



Profª. Drª. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia
UNICAMP

Campinas, 3 de Outubro de 2008

DEDICATÓRIA:

Dedico este trabalho aos meus pais Eduardo Velho Neto e Valéria Rodrigues Dias Velho e a toda minha família.

AGRADECIMENTOS:

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela vida e pela oportunidade de realizar esse trabalho.

Agradeço meu orientador Prof. Dr. Helder Anibal Hermini pelos anos de atenção que foram investidos no projeto e também pela amizade.

Ao pessoal do CTI (Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer) pelo espaço oferecido para a realização da pesquisa, em especial ao Jorge Vicente Lopes da Silva, Izaque Maia e Marcelo Fernandes de Oliveira pelas orientações e também aos amigos Gustavo, Airton, Paulo e Adriano pela ajuda em algumas etapas de desenvolvimento e testes.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo investimento financeiro concedido.

Aos funcionários e amigos da UNICAMP que direta ou indiretamente me ajudaram, em especial também à Cleudiane, Aliandro, João Polis e Prof. João Maurício Rosário pelas orientações.

“Tudo posso naquele que me fortalece”

Filipenses 4.13

Resumo

VELHO, Thiago Rodrigues Dias, “Uma contribuição para o Desenvolvimento de um dispositivo Háptico para Interação com Objetos Tridimensionais Utilizando Prototipagem Rápida”, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008, 83 páginas. Dissertação (Mestrado)

Como consequência da busca pela perfeição cinesiológica na tecnologia de realidade virtual em interfaces humanas, esses ambientes estão demandando cada vez mais dispositivos que tornem a interação homem-máquina a mais natural possível e isso inclui o desenvolvimento de tecnologias que relevem questões de anatomia e fisiologia, em função das tarefas que serão realizadas. Ante o exposto, nessa dissertação foi desenvolvido um dispositivo háptico de mão que será utilizado para interagir e/ou manipular objetos tridimensionais visando uma perfeita concatenação cinemática. Uma das principais características do funcionamento do protótipo está relacionada com o sistema mecânico, que é capaz de acompanhar toda a trajetória de extensão e flexão de um dedo antropomórfico. O dispositivo mecatrônico foi desenvolvido usando as tecnologias CAD e Prototipagem Rápida, sendo prototipada a partir do processo de sinterização a laser utilizando a composição de poliamida PA12, o que oferece ao produto final resistência adequada e também leveza.

Palavras-chave:

- Dispositivo Háptico, Exoesqueleto, Interação háptica.

Abstract

VELHO, Thiago Rodrigues Dias, “A Contribution to the Development of a Haptic Device to Interaction with Tri-dimensional Objects Using Rapid Prototyping”, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008, 83 p. Dissertação (Mestrado)

As a consequence of the search of the kinesthesia perfection in the technology of human virtual interfaces, this environments are each time more in need for devices that is able to turn the human-machine interaction as most natural as possible and this includes the development of technologies that reveals questions of anatomy and physiology, in order to realize the tasks that they are going to. Based in that, in this dissertation it was developed a hand haptic device the will be used to interact and/or manipulate tridimensional objects focusing on a perfect cinematic concatenation. One of the main characteristics of the prototype functioning is related with the mechanic system, which is able to follow the entire extension and flexion trajectory made by one anthropomorphic hand finger. The device was developed using CAD and Rapid Prototyping technologies, being prototyped through laser sinterization process which uses the PA12 polyamide composition which offers to the final product adequate resistance and also lightness.

Key-Words:

- Haptic Device, Exoskeleton, Haptic Interaction

Índice

Lista de figuras	XII
Lista de tabelas	XVI
Nomenclaturas.....	XVII

Capítulo 1

Introdução.....	1
1.1 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO	2
1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	2

Capítulo 2

Revisão bibliográfica.....	4
2.1 ORIGEM DA ÁREA	4
2.2 TECNOLOGIA HÁPTICA	16
2.2.1 Exoesqueleto	18
2.2.1.1 Tipos de aplicações	22
2.2.1.1.1 O <i>software</i> <i>invesalius</i>	22
2.2.1.2 Tipos de dispositivos hápticos.....	26
2.3 ESTADO DA ARTE.....	27
2.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	28

Capítulo 3

Proposta de desenvolvimento de dispositivo háptico e modelagem cinemática.....	30
3.1 APRESENTAÇÃO DO DISPOSITIVO HÁPTICO.....	30
3.2 ESTUDO DOS MOVIMENTOS DO DEDO	32
3.3 MODELAGEM CINEMÁTICA DO DEDO.....	36
3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	41

Capítulo 4

Desenvolvimento do dispositivo háptico (exoesqueleto).....	42
4.1 CARACTERÍSTICAS DO PROJETO	42
4.2 PROPOSTA DE IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL	43
4.3 CONVERSÃO DE UM MOVIMENTO CIRCULAR EM LINEAR	43
4.3.1 Transdutores de posição – potenciômetro	44
4.3.2 Sistema de conversão de movimento	48
4.4 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA	49
4.4.1 Projeto mecânico assistido por computador (CAD).....	50
4.4.2 Prototipagem rápida	50
4.4.3 Modelo cad do exoesqueleto	53
4.4.4 Protótipo físico	61
4.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	65

Capítulo 5

Implementação experimental	66
5.1 SISTEMA COMPUTACIONAL PARA AQUISIÇÃO DE SINAIS.....	66
5.1.1 Desenvolvimento da interface elétrica e comunicação com o computador	67
5.1.2 Painel frontal da interface e diagrama de bloco	70
5.1.2.1 Lógica da aquisição dos sinais	73

5.1.3	Objetivos específicos da aquisição.....	74
-------	---	----

Capítulo 6

	Conclusões e perspectivas futuras.....	76
6.1	RESULTADOS OBTIDOS	76
6.1.1	Resultados da aquisição de sinais.....	78
6.2	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	82
6.3	PRÓXIMAS ETAPAS E PERSPECTIVAS FUTURAS	82
	Referências bibliográficas	84
	Anexo A – Especificações métricas do exoesqueleto.....	89
	Anexo B – Sistema de conversão de movimento	101

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Primeira imagem contida no arquivo da patente do manipulador elétrico desenvolvido por Raymond Goertz.....	7
Figura 2.2 – Usuários “lendo” textos através do OPTACON.....	9
Figura 2.3 - Esquerda - Usuário com a “Head-mounted” ; Direita - Luva vestida por usuário para interagir com ambiente virtual	10
Figura 2.4 – Esquerda: PHANTOM em sua 1º versão com 3 graus de liberdade (DOF) (1993), U.S. Patent nº 5.898.599 ; Direita: Uma das ultimas versões do dispositivo (Premium 3.0/6 DOF) (2008)	13
Figura 2.5 - Dexterous Hand Master.	15
Figura 2.6 – Esquerda: exoesqueleto com base em superfície plana	18
Figura 2.7 - Espaço de trabalho do usuário e exoesqueleto	19
Figura 2.8 – Interface do <i>software</i> InVesalius	23
Figura 2.9 - Exemplos de objetos tridimensionais (3D) gerados pelo <i>software</i> InVesalius	25
Figura 2.10 – Usuário interagindo com um objeto tridimensional através de um dispositivo háptico	26

Figura 3.1 – Usuário controlando uma mão virtual através de um exoesqueleto.	31
Figura 3.2 – Outro usuário controlando uma mão virtual através de um outro exoesqueleto	31
Figura 3.3 – Falanges do dedo	32
Figura 3.4 – Movimentos de flexão, extensão e hiper-extensão de um dedo.....	33
Figura 3.5 – Medidas de rotação da junta entre as falanges distal e medial	33
Figura 3.6 – Medidas de rotação da junta entre as falanges medial e proximal.....	34
Figura 3.7 – Medidas de rotação da junta entre a falange proximal e o metacarpo	34
Figura 3.8 - Movimentos de abdução e adução de um dedo	35
Figura 3.9 – Referências cinemáticas do dedo	36
Figura 4.1 - Potenciômetro.....	44
Figura 4.2 – Circuito elétrico de um potenciômetro	45
Figura 4.3 – 1º valor ôhmico obtido adquirido	47
Figura 4.4 – Regressão linear para teste de linearidade	48
Figura 4.5 - Peça F1 e F2 com Peça F2 e Engrenagem de apoio (Vista Superior)	54
Figura 4.6 - Peça F1 e F2 com Peça F2 e Engrenagem de apoio (Vista Frontal e linhas ocultas visíveis)	54
Figura 4.7 - Peça F1 com Peça F1 e F2.....	55
Figura 4.8 - Peça F1 com Peça F1 e F2 (Visão isométrica)	55
Figura 4.9 - Posição inicial do movimento de flexão entre a falange distal e medial.....	56

Figura 4.10 - Posição final do movimento de flexão entre a falange distal e medial	56
Figura 4.11 - Posição final do movimento de flexão entre a falange distal e medial (visão isométrica).....	57
Figura 4.12 - Posição inicial do movimento de flexão entre a falange medial e proximal	58
Figura 4.13 - Posição final do movimento de flexão entre a falange medial e proximal.....	59
Figura 4.14 - Posição inicial do movimento de flexão entre a falange proximal e o metacarpo ...	59
Figura 4.15 - Posição final do movimento de flexão entre a falange proximal e o metacarpo.....	60
Figura 4.16 – Modelo final do dispositivo (exoesqueleto).....	60
Figura 4.17 – Testes de movimento realizados com o exoesqueleto colocado no dedo	64
Figura 5.1– Pinos de entrada da porta de <i>joystick</i>	67
Figura 5.2 – Circuito dos potenciômetros para aquisição de 2 juntas.....	68
Figura 5.3 – Circuito implementado e plug de conexão com o cabo para conectar à porta de <i>joystick</i>	68
Figura 5.4 – Cabo para conectar o exoesqueleto na porta de <i>joystick</i>	69
Figura 5.5 – Janela de calibragem de novo dispositivo do sistema operacional Windows.....	69
Figura 5.6 – Interface conceitual do instrumento virtual (<i>LabView</i>) - Painel frontal.....	71
Figura 5.7 – Diagrama de blocos	72
Figura 6.1 – Avaliação de precisão do potenciômetro.....	79
Figura 6.2 – Sinais do potenciômetro em um intervalo de frequência.....	79
Figura 6.3 – Testando os limites do exoesqueleto.....	81

Figura A.1 - Especificações métricas da “Peça F1 e F2”	90
Figura A.2 - Especificações métricas da “Peça F1”	91
Figura A.3 - Especificações métricas da “Peça F2”	92
Figura A.4 - Especificações métricas da “Peça F3”	93
Figura A.5 - Especificações métricas da “Peça Metacarpo”	94
Figura A.6 - Especificações métricas da “Peça F2 e F3”	95
Figura A.7 - Especificações métricas da “Peça F3 e Metacarpo”	96
Figura A.8 - Especificações métricas da “Engrenagem de apoio 53°”	97
Figura A.9 - Especificações métricas da “Engrenagem de apoio 105°”	98
Figura A.10 - Especificações métricas do “Cilindro do eixo das falanges”	99
Figura A.11 - Especificações métricas da “Cremalheira”	100
Figura B.1 – Engrenagem e cremalheira	101
Figura B.2 – Principais parâmetros para a construção de uma engrenagem.....	102
Figura B.3 – Parâmetros do encaixe entre engrenagem e cremalheira	103
Figura B.4 – Conversão do movimento	104

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Definição dos principais termos usados para descrever o que é “háptico humano” ..	16
Tabela 2.2 - Dispositivos hápticos e seus preços	21
Tabela 3.1 - Associação das juntas com os possíveis valores para a variável θ	38
Tabela 3.2a – Variáveis da matriz de orientação	40
Tabela 3.2b – Variáveis da matriz de orientação(continuação).....	401
Tabela 4.1 – Medidas para análise da porcentagem de rotação máxima executada por cada junta.	43
Tabela 4.2a – Modelos virtuais e físicos – Parte 1.	62
Tabela 6.1 – Análise de precisão para um intervalo de frequência	79
Tabela A.1 – Especificações Métricas das peças implementadas.	89
Tabela B.1 – Descrição dos parâmetros (Provenza, 1976).....	102
Tabela B.2 – Valores obtidos para os parâmetros utilizados	104

Nomenclaturas

V_e = tensão de alimentação (V)

R_t = resistência total do potenciômetro (Ω)

V_o = tensão de saída (V)

I = Corrente elétrica (A)

Ω = unidade de resistência (Ohms)

θ = valor angular (graus)

DOF = Degrees of Freedom (Graus de liberdade)

Capítulo 1

Introdução

Desde o surgimento dos ambientes virtuais e realidade virtual na área da computação houve muito desenvolvimento relacionado a essas tecnologias e, desde sua aparição, até os dias de hoje, várias ferramentas e aplicações foram sendo inventadas e desenvolvidas.

Essas duas tecnologias foram, com o tempo, conhecidas por diversas outras áreas do conhecimento, como por exemplo: a medicina. Fazendo uma comparação rápida em relação ao desenvolvimento da mesma desde o momento em que os computadores já podiam ser utilizados para diversas tarefas complexas, até os dias de hoje, nos quais os limites da capacidade de processamento deles parecem não existir, podemos dizer que, não apenas a medicina avançou e continua avançando muito mais rapidamente utilizando os recursos oferecidos pela computação, como também todas as outras áreas que delas se utilizam.

Cada passo dessas evoluções é marcado por sua época, tecnologia disponível e nível de necessidade do momento. Sendo assim, à medida que o tempo passa, os recursos disponíveis para podermos trabalhar e realizar determinada tarefa são cada vez mais aperfeiçoados visando uma adaptação melhor naquilo que são projetados para trabalhar e, conseqüentemente, oferecer um resultado melhor.

Neste trabalho serão apresentados os passos realizados para o desenvolvimento inicial de

um dispositivo háptico¹. Esse dispositivo será utilizado para captar a posição de dedos antropomórficos e, posteriormente da mão, visando servir como orientador de um avatar², o qual poderá interagir com objetos tridimensionais. Esse dispositivo pode ajudar várias aplicações de *softwares* que oferecem recursos tridimensionais e que utilizam dispositivos primitivos para interação, além de poder ser utilizado para diversos outros fins [robótica, medicina, entretenimento, educação, indústria, artes gráficas entre outros (Torre, 2004)].

1.1 Objetivo da dissertação

O objetivo do trabalho é, portanto, desenvolver esse dispositivo utilizando tecnologias recentes visando, sobretudo, obter um resultado final de baixo custo e dessa forma contribuir com todas as áreas que utilizam ou que possam vir a utilizar esse tipo de dispositivo para realizar ou facilitar o desenvolvimento de suas tarefas. Conforme será explicado na revisão bibliográfica, a tecnologia háptica passou por muitas experiências até se tornar uma área reconhecida e de alto investimento e hoje em dia ela é um produto muito explorado e promissor no que diz respeito a tornar a interação homem-computador o mais próximo possível da maneira com a qual interagimos com os objetos do dia a dia.

1.2 Organização da dissertação

O desenvolvimento desta dissertação de mestrado está subdividido em quatro capítulos. No **Capítulo 2** será explicado o caminho percorrido pela área desde sua aparição teórica em 1925 e, posteriormente, o início de suas aplicações em meados dos anos 40, até os dias de hoje, onde será mostrado o “estado da arte” da tecnologia háptica. Logo após, baseado no capítulo 2, uma proposta de desenvolvimento de um dispositivo háptico é feita e, maiores detalhes dessa proposta

¹ Palavra derivada do grego “*haptikós*”. Significado: pertencente à sensação de toque, sensível ao toque. De maneira geral é a ciência que estuda as sensações de toque do ser humano assim como a posição no sistema de coordenadas de determinada parte do corpo.

² Um avatar é a representação virtual da interface háptica através da qual o usuário fisicamente interage com o ambiente virtual (Salisbury, 2004).

serão encontrados no **Capítulo 3**. Já, no **Capítulo 4**, encontram-se detalhes do desenvolvimento do projeto com todos os passos realizados para a construção do dispositivo e, finalmente, no **Capítulo 5** serão apresentados os resultados e as discussões a respeito do que foi obtido durante todo o projeto e, também, as conclusões e sugestões para próximos trabalhos.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1 Origem da área

Muitas áreas do conhecimento tiveram um avanço tecnológico significativo durante a 2ª Guerra Mundial (1939-1945), e muitas outras aplicações apareceram posteriormente, em decorrência deste triste episódio de nossa história. Uma delas nasceu da necessidade de se controlar máquinas e robôs, remotamente, com o objetivo de realizar determinada tarefa sem estar no local, ação conhecida na época como *tele-operação*, assim como também o termo *tele-presença*³ surgiu da necessidade do usuário, uma vez tele-operando um dispositivo, obter informações mais detalhadas do local (imagem, som, etc.) visando, com o uso dos seus sentidos, sentir-se presente no ambiente controlado.

O primeiro manipulador mecânico tele-operável, o M-1, foi desenvolvido por Raymon Goertz em meados dos anos 40 no *Argonne National Laboratory*, na cidade de Argonne, E.U.A., com o objetivo de controlar remotamente uma mão tipo “garra” para manipulação de materiais radioativos. Esse manipulador, tipo “master-slave” (mestre-escravo), foi o predecessor dos

³ O homem vive experiência de tele-presença quando, perante um conjunto de sensações, geradas de proveniência de informação sensorial artificial, disponibilizada de forma muito natural, se sente como se estivesse fisicamente presente no local. A tecnologia de tele-presença cria um sentimento de estar presente num ambiente remoto diferente do que a pessoa realmente está (Moreira, 1998).

equipamentos mais recentes que utilizam o mesmo recurso.

Essa máquina, e várias outras que surgiram em seguida, tiveram fundamentos básicos para serem desenvolvidos provenientes de algumas pesquisas anteriores relacionadas com as sensações psicológicas do ser humano, mais especificamente na área fenomenológica⁴. Um dos estudiosos nessa área foi David Katz, o qual publicou em 1925, “O Mundo do Toque” (*The World of Touch*) (Katz *et al*, 1991), livro considerado como uma das primeiras publicações usadas como base para a evolução das pesquisas posteriores referentes a tele-presença e tele-operação.

Fenomenologista e psicólogo, Katz dedicou e aprofundou suas pesquisas para conhecer detalhes específicos a respeito dos sentidos. A partir de observações feitas com deficientes auditivos e visuais, e até mesmo simulando ser um portador de determinada deficiência, suas experiências produziram resultados de extrema importância para os fundamentos da tele-presença e tele-operação.

As pesquisas nessa área continuaram. Até meados dos anos 50, porém, elas ainda não haviam sido exploradas a ponto de serem totalmente usadas como base para o desenvolvimento de máquinas e robôs tele-operados. Contraditoriamente, foi apenas após o início dos anos 50 que Geza Revesz, psicólogo e fundador do “Psychological Institute”, na Europa, escreveu “Psicologia e arte do cego” (*Psychology and art of the Blind*) (Révész *et al*, 1952) que a área háptica começou a ser mais conhecida.

Na ocasião o desenvolvimento das máquinas era mais focado para fins industriais a fim de evitar riscos de contato do operador com os produtos. Ralph S. Mosher (Mosher, 1964) explica que o perigo em manusear certos tipos de materiais, principalmente os radioativos, foi o maior responsável pelo surgimento dos manipuladores tele-operáveis.

⁴ Uma filosofia ou método de investigação baseado na premissa que a realidade consiste de objetos e eventos de forma que os mesmos são percebidos ou entendidos pela consciência do ser humano e apenas por ela. De forma geral é uma ciência que explicita cada registro sensitivo do ser humano.

Foi a partir dos resultados obtidos pelas experiências de Katz e Revesz, entre outros estudiosos da área, e também com a evolução tecnológica, que Goertz apresentou, em 1954, o E-1 (Figura 2.1) (Goertz, 1954), o qual foi o 1º manipulador “master-slave” com atuadores elétricos e servo motor, e utilizando alguns fundamentos básicos dos estudos psíquicos e fenomenológicos do ser humano até então conhecidos, o manipulador retornava força para o usuário dando para o mesmo sensação próxima do real de estar tocando o objeto, recurso conhecido contemporaneamente como “force feedback”⁵.

Mosher ainda salienta a importância desses tipos de manipuladores seguirem as características cinestéticas⁶ do ser humano, ou seja, todos os movimentos realizados pelo manipulador devem possuir uma relação diretamente proporcional com os movimentos submetidos pelo operador quando este está manipulando remotamente algum objeto, assim como é importante haver retorno das forças por parte do manipulador.

⁵ Tradução: “retorno de força”

Força transmitida para o operador pelo computador através de atuadores para representar as forças exercidas no local remoto.

⁶ A sensação de forças e posição do ser humano através de seu sistema muscular e esqueleto respectivamente.

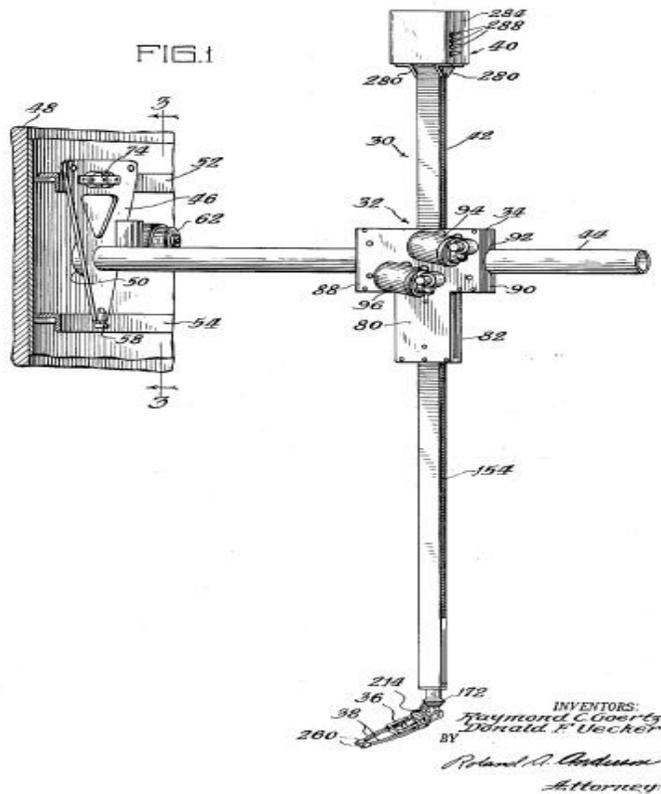


Figura 2.1 – Primeira imagem contida no arquivo da patente do manipulador elétrico desenvolvido por Raymond Goertz. Fonte: (<http://www.freepatentsonline.com/2679940.html>) (acessado dia 28/10/2008)

A área da háptica humana, ciência que estuda os componentes sensitivos, psicológicos e cognitivos da sensação de tato do ser humano, a partir do fim dessa década começou a ser mais explorada e as máquinas que surgiram, a seguir, foram desenvolvidas com uma base maior nesse campo.

Entre os anos 60 e 70 equipamentos mais sofisticados foram desenvolvidos, principalmente para investigações submarinas, onde, câmeras e outras tecnologias foram incrementadas aos sistemas para aumentar a sensação de tele-presença do usuário. Várias outras aplicações voltadas para outras áreas, militar, por exemplo, também surgiram e, nesse caso, o objetivo era simular situações de combate para fins de treinamento.

Pelo fato das aplicações demandarem extrema fidelidade na qualidade da simulação, as tecnologias, apesar de avançadas para época, comparando com os padrões atuais, deixavam muito a desejar, além de serem, praticamente, inacessíveis para os consumidores e, até mesmo, para algumas empresas, devido ao elevado custo.

Durante a década de 60, várias outras contribuições teóricas importantes foram publicadas. Gibson (Gibson, 1962) fez comparações entre os tipos ativo e passivo de toque. O tipo **ativo** é o próprio ato de tocar e o **passivo** o ato de ser tocado.

Mesmo com várias aplicações inovadoras surgindo em várias áreas do conhecimento, a tecnologia háptica ainda não era profundamente conhecida e explorada e, por isso, seguia uma trajetória rumo à evolução, porém, desordenadamente. Desde o momento em que o 1º manipulador surgiu, a base primária usada para desenvolvimento das máquinas hápticas posteriores era o conhecimento fenomenológico obtido, até então, pelos pesquisadores da área.

Um dos principais interesses dos estudiosos envolvidos com a fenomenologia era justamente desvendar a capacidade que os deficientes visuais tinham para interagir com mundo à sua volta e entendê-lo.

Dentre várias aplicações que surgiram para apoiá-los, diante tal dificuldade, a companhia Telesensory (<http://www.telesensory.com>) (acessado dia 28/10/2008) desenvolveu uma delas, o OPTACON (**O**ptical **T**actile **C**onverter) (Figura 2.2), no início dos anos 70. Esse dispositivo convertia a imagem de um texto, lida por um sensor, em vibrações as quais estimulavam os dedos dos usuários fazendo com que eles, sem visualizar, pudessem “ler” através dos dedos.

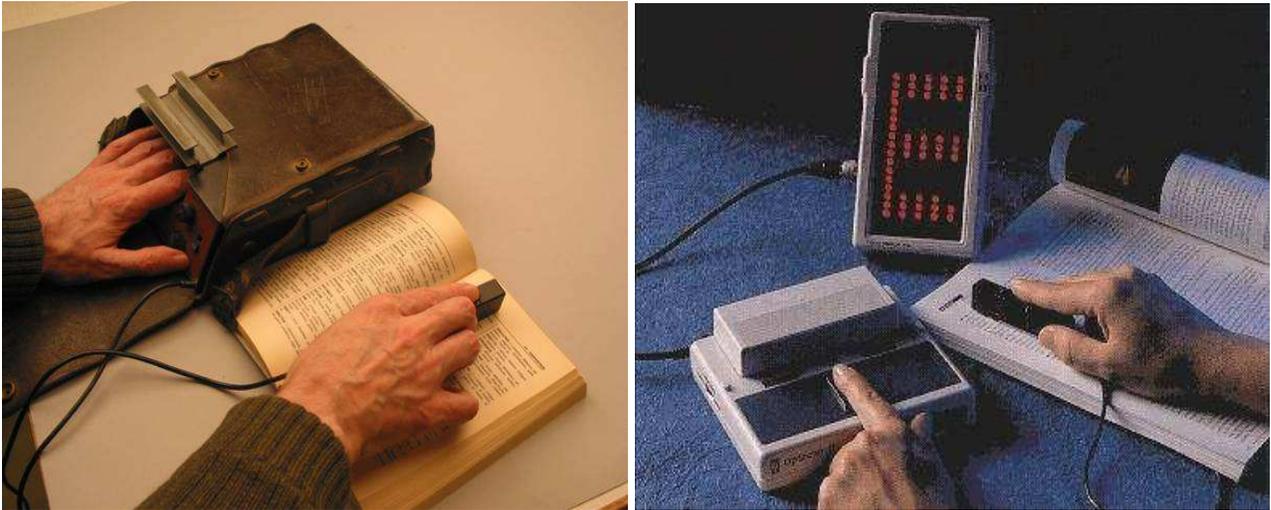


Figura 2.2 – Usuários “lendo” textos através do OPTACON. Fonte: (<http://www.upgrade-cepis.org/issues/2007/2/upgrade-vol-VIII-2.html>) (ultimo acesso dia 28/10/2008).

Entre meados da década de 70 até o final dos anos 80 a tecnologia computacional evoluiu e os recursos de computação gráfica, áudio, entre outros, foram aprimorados, além de se tornarem mais baratos e portáteis. Isso possibilitou o surgimento de trabalhos, publicações e inovações tecnológicas em diversas áreas (médica, espacial, robótica, militar, etc) que, algum tempo depois, resultou no reconhecimento definitivo do termo háptico.

A NASA foi uma das companhias que investiu nessa tecnologia e, em 1986, Warren Robinett, trabalhando em colaboração com os cientistas residentes Scott S. Fisher e Michael McGreevy, desenvolveu o “head-mounted display”, ou HMD (Figura 2.3 - esq). Tal dispositivo imergia o usuário num ambiente de realidade virtual. Um ano mais tarde Robineet criou e implementou uma luva, a “DataGlove” (Figura 2.3 - dir) na qual uma vez vestida era possível interagir com esse ambiente agarrando objetos ou usando gestos como comando (Foley, 1987).



Figura 2.3 - Esquerda - Usuário com a “Head-mounted” ; Direita - Luva vestida por usuário para interagir com ambiente virtual

Já Zimmerman e Lanier desenvolveram uma “dataglove” para pesquisas com telerobótica e também para auxiliar no “design” da interação homem-computador (Zimmerman *et al*, 1987). Na área médica, de acordo com o Prof. Robert J. Stone do “MUSE Virtual Presence” (Stone, 2000), o maior uso dos dispositivos hápticos mestres foi em modelagem molecular onde um dos projetos mais conhecidos foi o GROPE IIIb (Brooks *et al*, 1990).

Com o surgimento desses e outros dispositivos hápticos foi dada relevância no aprimoramento prático e teórico dos algoritmos que regem a interação do usuário com o computador.

O objetivo em geral dos estudos, desde as primeiras pesquisas até o presente momento, é conhecer as características cinestéticas e fenomenológicas do ser humano com o intuito de estimulá-lo artificialmente ou em situações onde ele possui deficiência e não tem a capacidade de sentir ou, então, para simplesmente fazer com que ele possa sentir-se o mais próximo do mundo

real, uma vez que interagimos com o mundo através dos sentidos (visão, tato, audição, olfato e paladar).

Desde o lançamento de “O mundo do toque” (*The World of Touch*) (Katz *et al*, 1991), a curiosidade em conhecer os meios pelos quais esses sentidos trabalham tem aumentado cada vez mais, principalmente com o crescente número de dispositivos remotamente controlados que surgiram alguns anos mais tarde.

Portanto, com o objetivo de tornar o virtual, ou remoto, o mais real, ou local, respectivamente, possível, métodos matemáticos, cálculos vetoriais, bibliotecas de *softwares*, entre outros, foram desenvolvidos visando implementações que estimulam o usuário, através da háptica computacional, de maneira se sinta no mundo real onde é possível saber a forma e textura de um objeto através do toque, saber a cor e localização através da imagem e assim por diante. Alguns exemplos de pesquisas realizadas são encontrados em (Brooks, 1988), (Perlin, 1985), (Hannaford, 1989), (Mark *et al*, 1996) e (Lederman *et al*, 1985).

Apesar do emprego da tecnologia háptica em várias áreas do conhecimento havia, entretanto, uma insegurança por parte de algumas delas no uso definitivo dessa tecnologia. Mais especificamente para a robótica, Lederman *et al* (1994), através da pergunta “Em quais caminhos os estudos científicos dos seres vivos talvez ajudem a área da robótica?”, sugerem uma possível solução baseada em pesquisas científicas do processamento biológico de informações na qual, por sua vez, envolve considerações anatômicas, biomecânicas, neurofisiológicas e comportamental.

Essa possível solução, exemplificada através de cinco lições (Lederman *et al*, 1994), dita situações relevantes onde as aplicações desses estudos científicos biológicos fazem diferença na área em questão. Alguns dos testes práticos mais importantes realizados e utilizados como

exemplo, envolvendo o **sistema háptico humano e o processamento de objetos**⁷, feito para justificar o uso do conhecimento científico biológico em diversas áreas, entre elas a robótica, foram: “Identificando objetos pelo toque: Um sistema especialista” (Identifying Objects by Touch: An Expert System), por Lederman *et al* (1985) e “Movimentos da mão: Uma janela para o reconhecimento háptico de objetos” (Hand Movements: A Window into Haptic Object Recognition), também por Lederman *et al* (1987).

Em consequência de todos esses anos de estudo e de interesse crescente no desenvolvimento de dispositivos e máquinas hápticas, finalmente, no início dos anos 90, o termo “háptico” se tornou uma área de pesquisa independente. Desde então o que, há algumas décadas atrás, seguia um rumo indefinido, porém evolutivo, agora, já possuía objetivos mais concretos. De acordo com Salisbury (1999) houve um notável progresso durante década de 90 no potencial para simular interações hápticas com objetos virtuais em tempo real.

A partir daí, companhias especializadas no desenvolvimento de tecnologia háptica direcionada a varias áreas do conhecimento (medicina, controle industrial, automotivo, etc) foram fundadas, dentre elas estão a “Immersion Corporation” (<http://www.immersion.com>) (acessado dia 28/10/2008) e a “SensAble Technologies” (<http://www.sensable.com>) (acessado dia 28/10/2008), a qual foi fundada por Thomas Massie em 1993 para comercializar sua invenção, o “PHANTOM” (Figura 2.4), com colaboração do Prof. Kenneth Salisbury.

⁷ Vide Lederman *et al* (1994)

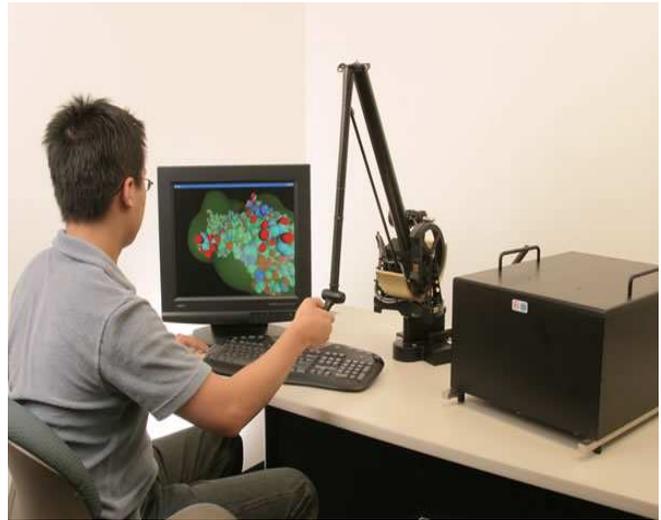
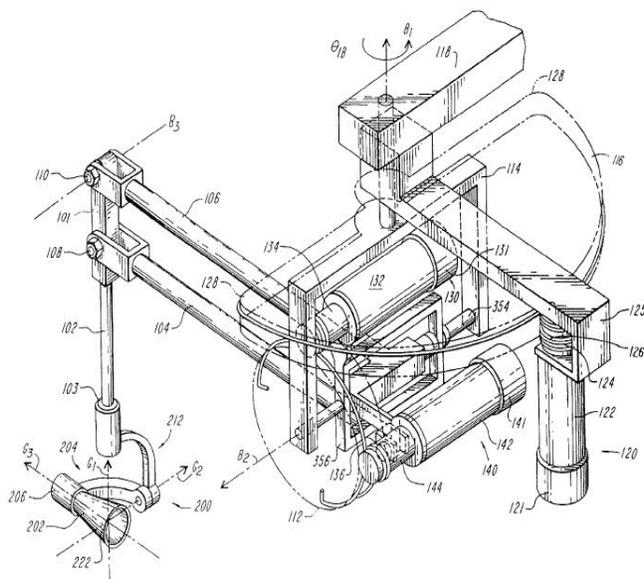


Figura 2.4 – Esquerda: PHANTOM em sua 1ª versão com 3 graus de liberdade (DOF) (1993), U.S. Patent nº 5.898.599 ; Direita: Uma das últimas versões do dispositivo (Premium 3.0/6 DOF) (2008)

O PHANTOM, assim como vários outros exoesqueletos [(Koyama *et al*, 2002), (Stergiopoulos *et al*, 2003), (Turki *et al*, 1995), (Ueda *et al*, 2004), (Bouzit *et al*, 2002)] retornam estímulo ao usuário, recurso conhecido por “force feedback”, fator que surgiu da necessidade de aplicar maior realismo sensitivo para imergir o ser humano num ambiente onde, *a priori*, não existe ou os estímulos passados para o usuário não são suficientes para fazer com que ele se sinta num ambiente mais real .

Alguns desses dispositivos, além de possuírem recursos de manipulação mestre-escravo com objetos tridimensionais oferecem, também, a opção de reabilitar determinada parte do corpo através dos atuadores que pertencem ao sistema mecânico do dispositivo. Um exemplo de dispositivo para fins de reabilitação pode ser visto em (Gupta *et al*, 2006).

Conforme o mercado dos dispositivos hápticos crescia – em meados dos anos 90 surgiram muitos deles (CyberGrasp e GyberGlove da Immersion, Dexterous Hand Máster (Figura 2.5) entre outros) - também crescia, dependendo da finalidade, os métodos para gerenciamento da interação entre o usuário e o ambiente remoto (virtual, robótico, submarino, espacial, entre

outros).

Zilles e Salisbury, por exemplo, usaram o dispositivo desenvolvido por Massie (PHANTOM) e criaram o método “God-Object” (Zilles *et al*, 1995) onde é possível estimar as forças passivas exercidas no ato do toque através de cálculos matemáticos que por sua vez são realizados e processados, sendo que o destino final é justamente o estímulo causado pelo hardware que é sentido pelo usuário.

Os benefícios causados por consequência de todos esses anos de evolução da tecnologia háptica tiveram, desde então, reconhecimento rápido nas mais diversas áreas do conhecimento. De acordo com o Prof. Robert (Stone, 2000), diretor científico do *MUSE Virtual Presence*, os avanços tecnológicos na área háptica possibilitaram que ela fosse descoberta por várias disciplinas, desde a medicina, aplicações militares até para *vídeo games*, além daquelas já mencionadas e, uma vez estabelecidas em cada uma delas, se adaptaram tornando-se um recurso muito mais poderoso e útil.

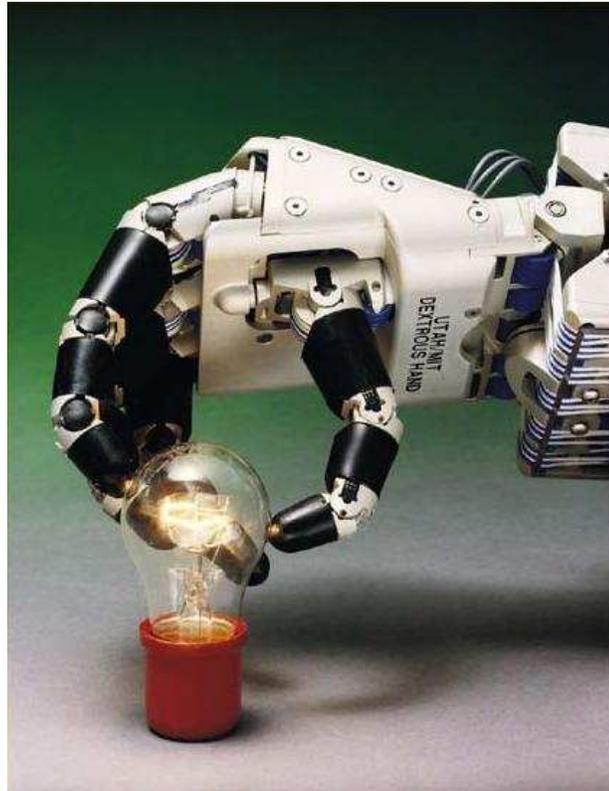


Figura 2.5 - Dexterous Hand Master. Fonte (http://www.sarcos.com/telepic_dexhand.html) (acessado dia 28/10/2008)

Durante os anos que se passaram até os dias de hoje, cada vez mais, empresas especializadas no desenvolvimento de técnicas, dispositivos e derivados e também métodos para aprimorar a tecnologia já existente, estão sendo abertas e isso tem causado um rápido crescimento da tecnologia háptica (Salisbury *et al*, 2004).

Um fato relevante que marca a importância do termo háptico na contemporaneidade é que instituições renomadas no mundo todo abriram espaço para investirem nessa tecnologia como é o caso do *Haptics Laboratory* “http://haptics.lcsr.jhu.edu/Main_Page” (acessado dia 28/10/2008), pertencente ao *Johns Hopkins University*, em Baltimore, nos Estados Unidos assim como empresas especializadas no assunto foram inauguradas, dentre elas o *UK Haptics* “<http://www.ukhaptics.co.uk/Default.aspx>” (acessado dia 28/10/2008), em Rothbury, na Inglaterra, fundado em 2004 com o objetivo de desenvolver dispositivos para treino na área médica.

2.2 Tecnologia háptica

Na seção 2.1 foi explicado o caminho percorrido pela tecnologia háptica, sendo que ela só foi reconhecida como uma área independente muito tempo depois de sua primeira aparição em 1925. No entanto, atualmente, já existe muito investimento em pesquisas cujo objetivo é utilizar o conhecimento da engenharia mecânica e da computação e desenvolver dispositivos hápticos específicos para determinada tarefa. Para isso ser possível é necessário também uma união não apenas dessas duas áreas como também um estudo focado nas diversificações da tecnologia háptica, das quais fazem parte a “háptica humana”, a “háptica computacional” e “interfaces hápticas”. Cada uma delas é responsável por estudar componentes que pertencem a outras matérias e que, no final, compõem a “tecnologia háptica”. Maiores detalhes de suas diversificações são mostrados, na seqüência:

- **Háptica humana:** Consiste na ciência que estuda os componentes mecânicos, cognitivos, sensoriais e motor do ser humano. A seguir é apresentada uma tabela que resume os principais termos relacionados com a háptica humana:

Tabela 2.1 - Definição dos principais termos usados para descrever o que é “háptico humano”

Termo	Definição
Háptico	Relacionado com a sensação de toque do ser humano.
Proprioceptivo	Relacionado com as informações sensoriais sobre o estado do corpo (inclui-se: sensações cutâneas, cinestéticas e sensações vestibulares).
Cinestética	Significa a sensação de movimento do corpo proveniente do estado que se encontram os músculos, tendões e juntas.
Vestibular	Pertencente à percepção da posição da cabeça, aceleração e desaceleração.
Cutânea	Pertencente às sensações da pele (inclui-se: sensações de pressão, temperatura e dor).
Tátil	Pertencente às sensações cutâneas, porém, mais especificamente, à sensação de pressão mais do que a de temperatura ou dor.
Retorno de força	Relacionado com a produção mecânica de informação sentida pelo sistema cinestético humano.

- **Háptica computacional:** Campo que estuda métodos computacionais (algoritmos de renderização háptica) para criar efeitos hápticos juntamente com uma interface háptica. Dentre esses efeitos estão: Algoritmos para detecção de colisão, processamento de retorno de força, ferramentas de interação para a sensação de posição entre outros.
- **Interfaces hápticas:** Campo que estuda e produz dispositivos hápticos (hardware) para permitir que usuários interajam com algum ambiente (real ou virtual). Desde o desenvolvimento do primeiro manipulador mecânico teleoperável, o M-1, em meados dos anos 40 até os dias de hoje, muitas diversificações de interfaces hápticas foram inventadas e, de acordo com Srinivasan (1995), uma taxonomia aproximada dos principais tipos de interfaces que tem sido desenvolvidos em laboratórios e empresas em todo mundo é a que segue:

Ground-based Devices (Dispositivos com a base em uma superfície)

- *Joysticks/* Controladores de mão. [Um exemplo desse dispositivo é o “PHANTOM” (Figura 2.4, página 13)].

Body-based Devices (Dispositivos com a base no corpo humano)

- Exoesqueletos.
 - Flexível (luvas e roupas para o usuário vestir). Exemplo pode ser visto na Figura 2.3 “DataGlove”, na página 10.
 - Links rígidos (Membros ligados por juntas afixados ao usuário ou a uma superfície plana). Exemplo pode ser visto na Figura 3.1 (página 31)

Tactile displays (Display tátil)

- Modificadores de formato
- Vibradores táteis. [Exemplo: OPTACON (figura 2.2, página 9)]
- Displays eletro-tátil

Neste trabalho será dado um enfoque maior nos dispositivos do tipo “exoesqueleto”, levando-se em conta suas principais características.

2.2.1 Exoesqueleto⁸

Esse tipo de dispositivo caracteriza-se pelo fato de possuir membros rígidos ligados através de links formando juntas. Existem dois tipos de dispositivos: aqueles cuja base está em uma superfície plana fora do corpo humano (Figura 2.6 – Esquerda) e aqueles cuja base é o corpo humano (Figura 2.6 – Direita) (Massimo, 2007).

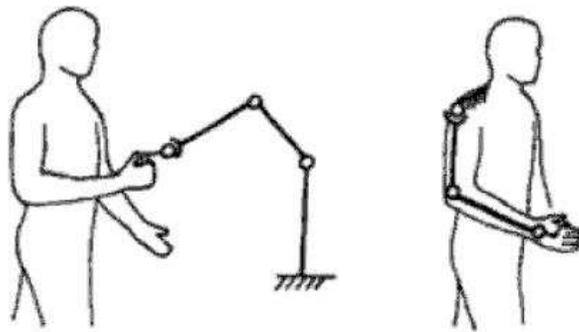


Figura 2.6 – Esquerda: exoesqueleto com base em superfície plana
Direita – exoesqueleto com base no corpo humano. Fonte (Massimo, 2007)

Os exoesqueletos com base em superfície plana têm a desvantagem, se comparados com os de base no corpo humano, de possuírem o espaço de trabalho limitado, pois está fixo em um ponto e dessa forma não é possível mover seu elemento terminal mais do que sua estrutura cinemática permite [área representada por ETE (Espaço de Trabalho do Exoesqueleto) na Figura 2.7].

Ao mesmo tempo, existe também o espaço de trabalho limitado da estrutura cinemática

⁸ Exo – Palavra de origem grega. Significado: Fora, externo. Exoesqueleto: Esqueleto externo a alguma coisa.

antropomórfica [área representada por ETU (Espaço de Trabalho do Usuário) na Figura 2.7] resultando num limite ainda menor disponível para realizar os movimentos de interação homem-máquina (Interseção de ETU/ETE da Figura 2.7).

Já os exoesqueletos com base no corpo humano são caracterizados pelo fato de serem designados a fixar-se externamente a determinado membro do corpo humano (um dedo, por exemplo) e dessa forma mover-se junto com os mesmos. Como resultado tem-se um exoesqueleto com uma estrutura cinemática parecida, senão idêntica, à estrutura antropomórfica sendo assim possível aplicar sensores (elemento passivo) ou motores atuadores (elemento ativo) em partes específicas e estratégicas do exoesqueleto (Torre, 2004). Dessa forma, utilizando um tipo de sensor de posição, dentre os variados tipos existentes (Rosário, 2005), pode-se fazer, por um lado, aquisição de posição do membro e, de outro, com os atuadores, movimentar o membro visando reabilitação, aumento de força ou então para retornar força.

Esse tipo de exoesqueleto possui a grande vantagem de ter o espaço de trabalho igual ao dos membros antropomórficos (ETU) aos quais está fixado e, portanto, o usuário realiza seus movimentos de forma natural.

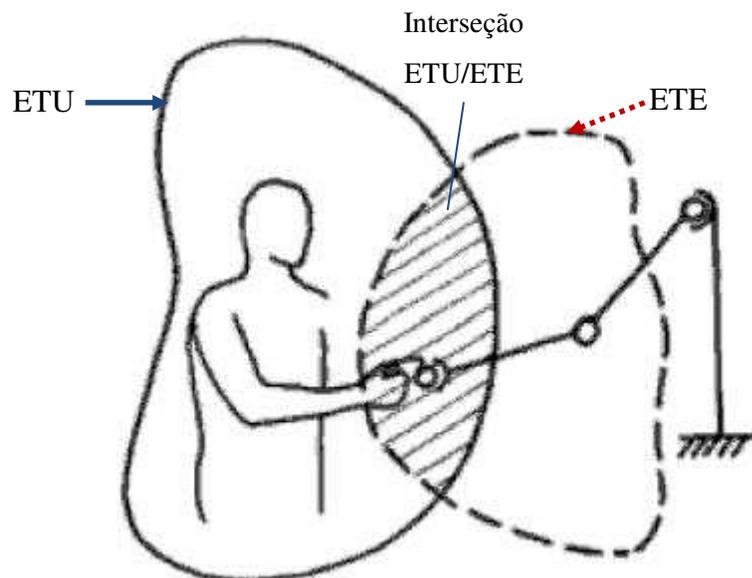


Figura 2.7 - Espaço de trabalho do usuário e exoesqueleto

Algumas características principais que esses exoesqueletos apresentam são (Salisbury, 2004):

- 1- Seguir e captar o movimento dos membros aos quais estão afixados, e com isso acompanhar toda, ou praticamente toda, a trajetória exercida por eles e, dessa forma, adquirir sua posição no sistema de coordenadas.

Dentro dessa característica existem sub-características que são, comumente, desejáveis estar presentes no exoesqueleto. São elas:

- 1.a - Mínimas forças impostas pelo exoesqueleto ao usuário quando este estiver realizando os movimentos para que o mesmo sinta-se livre ao movimentar os membros.
 - 1.b - Ergonomia apropriada para que o usuário foque-se em utilizar o exoesqueleto de maneira a evitar dor ou desconforto (ex: dispositivo muito pesado), caso contrário isso pode distraí-lo diminuindo o desempenho da interação.
- 2- Ser possível exercer as forças processadas pela háptica computacional nos membros do corpo humano, através de atuadores, utilizando sua área de contato com esses membros e criando dessa forma o “retorno de força”.

Apesar de citadas, essas características não são encontradas em todos os dispositivos, simplesmente pelo fato da necessidade, ou seja, determinadas aplicações não necessitam de certos retornos hápticos, porém, quanto mais, melhor, mas dependendo da finalidade o custo pode ser alto, (Brewster, 2001). A Tabela 2.2 apresenta alguns exemplos de dispositivos hápticos, com suas respectivas características e preços.

Tabela 2.2 - Dispositivos hápticos e seus preços

Nome	Descrição	Retorno de força	Preço	Fonte
CyberForce	Exoesqueleto que capta a posição da mão e dedos do usuário e os utiliza para manipulação/interação com um ambiente virtual.	Sim	Entre \$90.000,00 e \$100.000,00	Fonte 1
Sensable Phantom Desktop	Dispositivo com base fora do corpo humano que permite o usuário a interagir com ambiente computacional a partir de seu elemento terminal.	Sim	\$13.350,00	Fonte 2
Virtuose 6D35-45	Dispositivo com base fora do corpo humano que permite o usuário a interagir com ambiente computacional a partir de seu elemento terminal e todo o processamento de dados é feito através de uma CPU própria.	Sim	\$ 110.005,00	Fonte 3
DGTech VHand	Luva que capta a posição da mão e dedos do usuário e os utiliza para manipulação/interação com um ambiente virtual.	Não (e pelo fato de ser uma luva não possibilita aplicação futura)	\$ 335,00	Fonte 4

Fonte 1: <http://www.pcmag.com/article2/0,2817,416983,00.asp> (acessado dia 27/11/2008)

Fonte 2: http://www.inition.com.au/inition/product.php?URL_=product_ffhaptic_sensable_phantomdesktop&SubCatID_=36&Tab=all%20info (acessado dia 27/11/2008)

Fonte 3: http://www.inition.com.au/inition/product.php?URL_=product_ffhaptic_haption&SubCatID_=36&cur=USD (acessado dia 27/11/2008)

Fonte 4: http://www.inition.com.au/inition/product.php?URL_=product_glove_dgtech_vhand&SubCatID_=26 (acessado dia 27/11/2008)

2.2.1.1 Tipos de aplicações

Em decorrência da diversidade de dispositivos que surgiram para atender a demanda da abrangente quantidade dos campos do conhecimento, para fins de organização, serão aqui apresentadas algumas mais relevantes, da atualidade, por área.

De acordo com Gabriel Robles de la Torre (Torre, 2004) os dispositivos hápticos podem ser aplicados em:

- GUI (Graphical User Interfaces)
- Jogos
- Arte e criação
- Edição de sons e imagens
- Operação veicular
- Engenharia
- Manufatura
- Teleoperação e telerobótica
- Educação e treinamento
- Reabilitação
- Estudo científico do toque

Nas áreas citadas já existem inúmeros dispositivos hápticos aplicados. A próxima seção irá apresentar um exemplo de *software* passível de aplicação de algum tipo de dispositivo onde a interação homem-máquina pode ser aperfeiçoada através dos exemplos citados neste capítulo.

2.2.1.1.1 O *Software* InVesalius

A grande maioria dos *softwares* existentes, atualmente, que auxiliam no planejamento de trabalho nas áreas: engenharia, médica, espacial, através do design tridimensional de objetos

utilizam como ferramenta de interação os dispositivos mais típicos (mouse, teclado, *joystick*).

Um exemplo desses *softwares* é o InVesalius, apresentado na Figura 2.8, desenvolvido como tese de doutorado por Ailton Santa Bárbara pela Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) em 2006 (Bárbara, 2006). Ele tem como funcionalidade, a partir de imagens médicas tomográficas, permitir a criação de modelos tridimensionais (3D) de estruturas anatômicas (alguns exemplos podem ser vistos na Figura 2.9) o que torna possível a confecção de modelos físicos com o auxílio da prototipagem rápida (será explicada na seção 4.3).

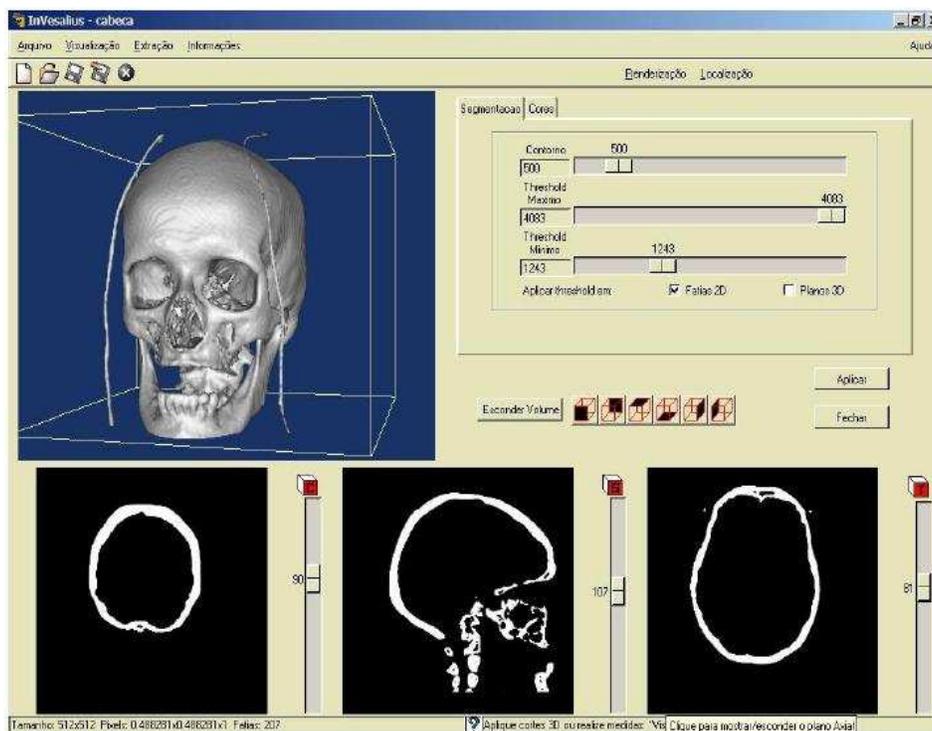


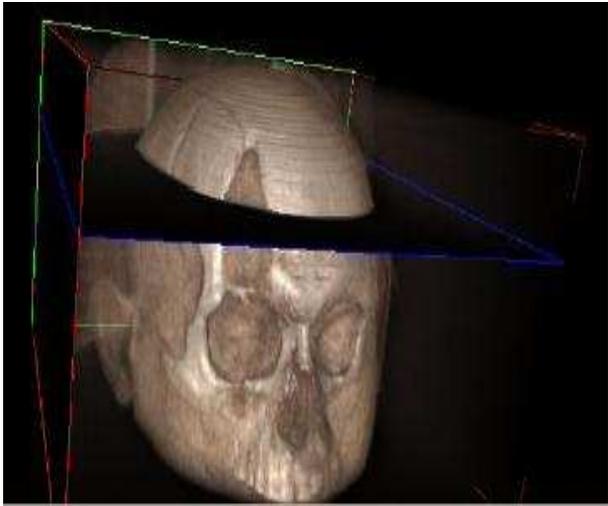
Figura 2.8 – Interface do *software* InVesalius

Toda a interação existente entre o usuário e os recursos do *software* é através do teclado e mouse. Estes meios de comunicação homem-computador, por consequência da simplicidade e dos poucos recursos que oferecem para interação, dependendo da finalidade, podem vir a prejudicar um melhor resultado de trabalho.

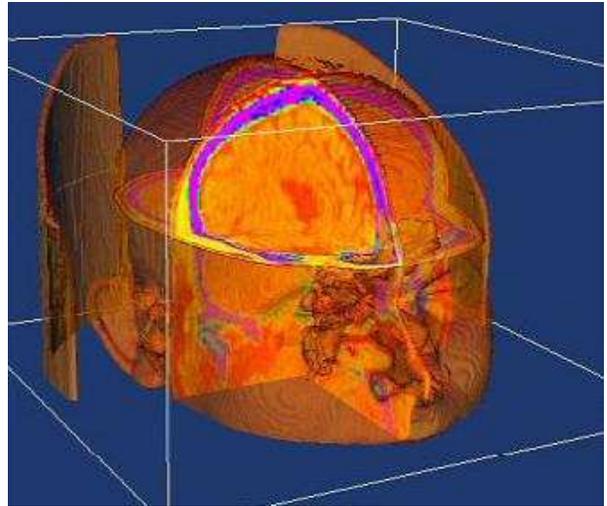
Na área médica, principalmente, os detalhes do corpo humano são observados cuidadosamente, para que se possa fazer um diagnóstico com qualidade. Trabalhar com dispositivos que oferecem a maior quantidade de respostas hápticas para o usuário é muito importante, levando em consideração que não apenas na medicina, mas em toda prática, o meio de contato utilizado pelo ser humano para reconhecimento de um local, objeto ou alimento é via seus sentidos (tato, olfato, paladar, audição e visão – este último é o único que o *software* oferece).

Refletindo sobre isso a aplicação de um dispositivo háptico mais aperfeiçoado e específico poderia oferecer ao usuário mais estímulos hápticos, que fariam com que ele se sentisse num ambiente mais real, o que conseqüentemente torna a interação mais rica em detalhes. A Figura 2.10 demonstra um exemplo de interação entre um usuário e um objeto tridimensional onde é possível ter uma idéia de como ela seria se o usuário estivesse trabalhando com os objetos tridimensionais do *software* InVesalius.

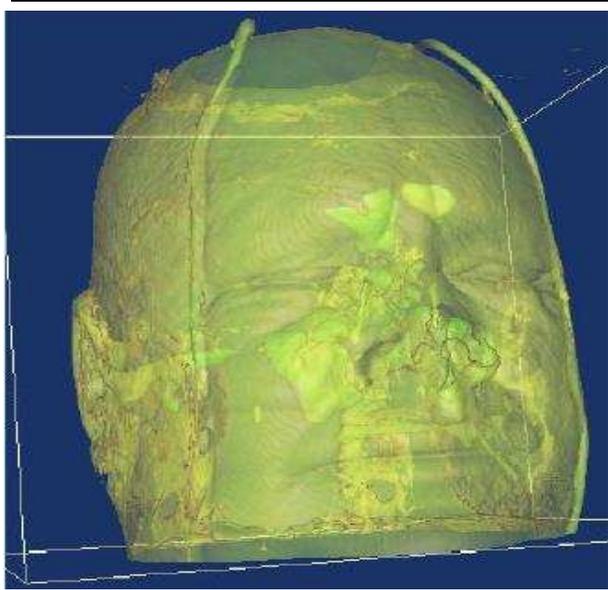
A diferença, no entanto, não mostrada na Figura 2.10, é que, ao invés de puxar e contorcer o objeto tridimensional, o usuário iria realizar ações do tipo pegar, girar, cortar entre outras funções adequadas para um modelo anatômico que não distorcê-lo, visando apenas preparar o objeto para obter o modelo físico dele.



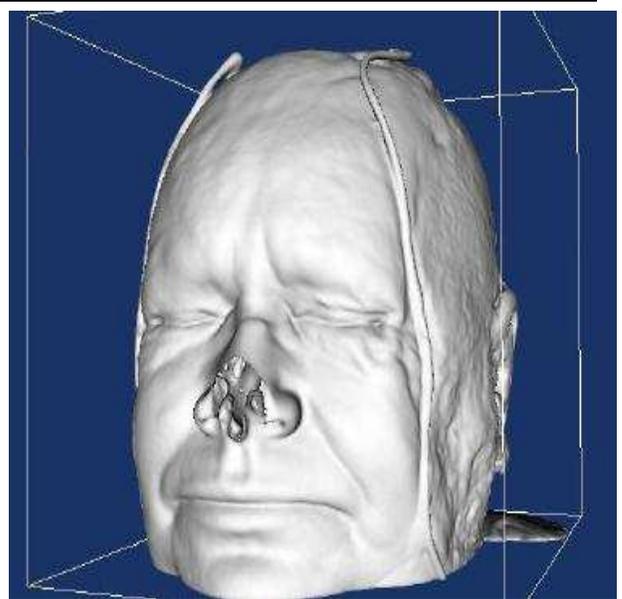
I



ii



iii



iv

Figura 2.9 - Exemplos de objetos tridimensionais (3D) gerados pelo *software* InVesalius



Figura 2.10 – Usuário interagindo com um objeto tridimensional através de um dispositivo háptico (Fonte: <http://www.ul.ie/~idc/hci/lecture07/lecture07.html>) (acessado dia 28/10/2008)

2.2.1.2 Tipos de dispositivos hápticos

Torre ainda cita os principais tipos de dispositivos que atendem às aplicações citadas na seção 2.2.1.1 dando alguns exemplos. São eles:

- Teclado programável
Desenvolvido por Cadoz *et al.* em 1990 o “Modular feedback keyboard” consiste de um teclado parecido com um piano o qual retorna estímulo tátil ao usuário em cada uma das 16 teclas as quais são dirigidas através de uma criação musical.
- Dispositivos de agarrar
- Mouses aumentados
- *Joysticks*
- Datagloves

- Exoesqueletos

Dois tipos de dispositivos, bem comuns para a área da robótica contemporânea, que evoluíram muito e, ultimamente, têm sido bastante utilizados para diversas funções, principalmente, em tarefas de tele-operação, são os exoesqueletos e as luvas sensoriais.

A principal diferença entre eles é que enquanto o exoesqueleto possui um sistema mecânico, muitas vezes complexo e grande, que tem a tarefa de acompanhar os movimentos de determinada parte do corpo para nele atuar (visando reabilitação, por exemplo), ou também, através de sensores de posição [alguns tipos disponíveis em Rosário (2005), outros em <http://www.dca.ufrn.br/~lmarcos/courses/robotica/notes> (acessado dia 16/11/2008)], captar os movimentos para utilizá-los como orientadores indiretos num sistema externo (ambientes virtuais, manipulação/interação com objetos tridimensionais, controle robótico, etc.). A luva sensorial dispensa sistemas mecânicos acoplados ao corpo, porém, faz uso de outros sensores (sensores óticos e sensores de luz) que também têm a capacidade de captar os movimentos do corpo vestindo, literalmente, uma luva.

No próximo capítulo será apresentado um “design” de um exoesqueleto para a mão, onde o objetivo principal é utilizar os movimentos da mão como ferramenta fundamental para manipular, *a priori*, objetos tridimensionais, utilizando sensor de posição de baixo custo e, posteriormente, pode ser utilizado em aplicações diversas, como por exemplo algumas das que foram citadas na seção 2.2.1.1.

2.3 Estado da arte

Desde que se tornou uma área de pesquisa independente, a tecnologia háptica tem evoluído muito e ganho rápido espaço no mercado mundial. Dentre as principais áreas do conhecimento, envolvidas no desenvolvimento e estudos dessa tecnologia, estão as engenharias mecânica, elétrica e de computação para o desenvolvimento de interfaces hápticas, ciências da computação para o desenvolvimento da háptica computacional e da medicina e psicologia para estudos mais

aprofundados da háptica humana.

Atualmente, graças às condições que a tecnologia mundial apresenta, é possível encontrar a háptica nos mais variados dispositivos, partindo de um simples *joystick*, onde estímulos hápticos são apenas para interação, até uma cirurgia remota, onde é possível operar um paciente e salvar sua vida à longa distância, a partir do retorno de força sentidos pelo cirurgião.

O efeito causado por essa evolução pode ser resumido em um amplo investimento por parte de diversas faculdades e empresas no mundo inteiro que se preocupam cada vez mais em descobrir a importância do termo “háptico”. A diversidade de aplicações é tamanha que inclusive celulares com retorno tátil aperfeiçoado para o usuário estão sendo desenvolvidos. Um deles, lançado pela Samsung em março deste ano, publicado na Revista *Veja* (Vieira, 2008), é o aparelho chamado *AnyCall Haptic*, o qual possui a tecnologia *touch screen* e, além disso, quando pressionados os botões de comando retornam sensações ao usuário de estar realmente pressionando um botão, e não apenas tocando uma tela. Nessa mesma reportagem, Vieira apresenta a luva *CyberTouch* da empresa Immersion (<http://www.immersion.com>) (acessado dia 28/10/2008), luva essa capaz de estimular o usuário, com sensações de toque, num ambiente virtual.

2.4 Conclusões do capítulo

Neste capítulo foi apresentado um breve histórico da tecnologia háptica e seus respectivos dispositivos, desde os mais primitivos até os mais sofisticados. Essa história incluiu as diversas dificuldades que surgiram no caminho do reconhecimento da tecnologia até que no início dos anos 90 ela se tornou uma área independente de pesquisa, originando ainda diversas áreas de aplicação correlacionadas a ela.

Sendo assim, um enfoque mais detalhado foi dado à tecnologia háptica onde seus principais termos e características foram apresentados, com uma ênfase nos dispositivos conhecidos por **exoesqueletos**, que é palavra chave desse trabalho e, também, algumas aplicações atualmente

conhecidas, incluindo um exemplo de possível aplicação háptica utilizando o *software* InVesalius.

Foi apresentado também o estado da arte da tecnologia háptica, onde os principais e mais recentes dispositivos hápticos foram citados.

Capítulo 3

Proposta de desenvolvimento de dispositivo háptico e modelagem cinemática

3.1 Apresentação do dispositivo háptico

Baseado no conhecimento adquirido a partir da revisão bibliográfica e tendo conhecido as principais características que um dispositivo deve possuir para suggestionar o usuário, com estímulos artificiais, a se sentir num ambiente real, uma vez interagindo com um ambiente virtual, foi desenvolvido um exoesqueleto para um dedo antropomórfico dotado de sensores de posição onde o mesmo acompanha os movimentos básicos de flexão e extensão do dedo, os quais serão posteriormente utilizados como atuadores de movimento para uma mão virtual.

Tendo como principal motivação uma possível aplicação no *software* InVesalius apresentado no capítulo anterior , a idéia é continuar usando a mão para interagir com os objetos tridimensionais (3D), porém, os recursos disponíveis para interação com esses objetos serão as ações típicas do dia-a-dia usadas pelo ser humano para interagir com objetos reais (agarrar, tocar, girar, etc.) sendo que, para isso, o usuário precisa movimentar seus dedos, realizando flexões e extensões dos mesmos, durante a interação. Alguns exemplos do funcionamento de outros dispositivos realizando esse tipo de interação são mostrados nas figuras 3.1 e 3.2.



Figura 3.1 – Usuário controlando uma mão virtual através de um exoesqueleto (Iwata, 1990).

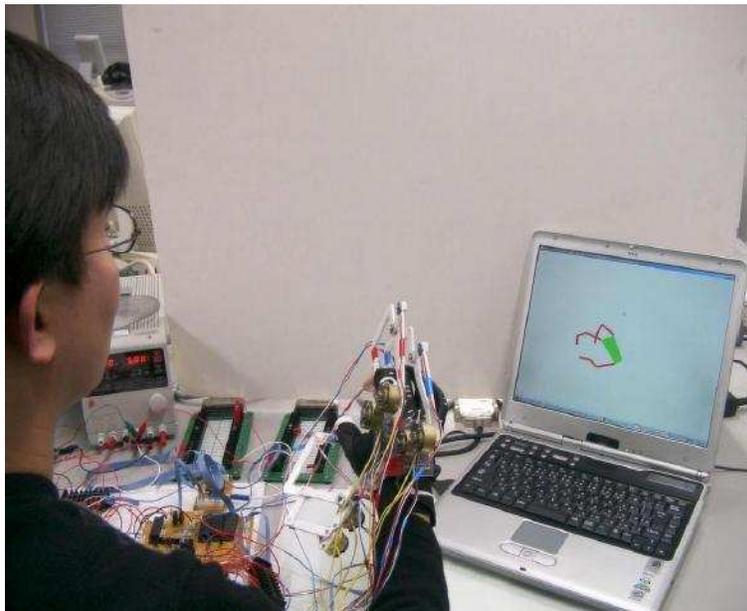


Figura 3.2 – Outro usuário controlando uma mão virtual através de um outro exoesqueleto (Koyama *et al*, 2002)

Na próxima seção (3.2) será apresentado o estudo anatômico realizado para conhecer

detalhes cinestéticos específicos e necessários para o cálculo da posição de cada dedo da mão.

3.2 Estudo dos movimentos do dedo

Primeiramente foi necessário descobrir o limite máximo de extensão das falanges distal, medial e proximal ilustrado na Figura 3.3 para saber, com exatidão, qual o melhor sensor a ser usado para transformar os movimentos dos dedos em sinais analógicos.

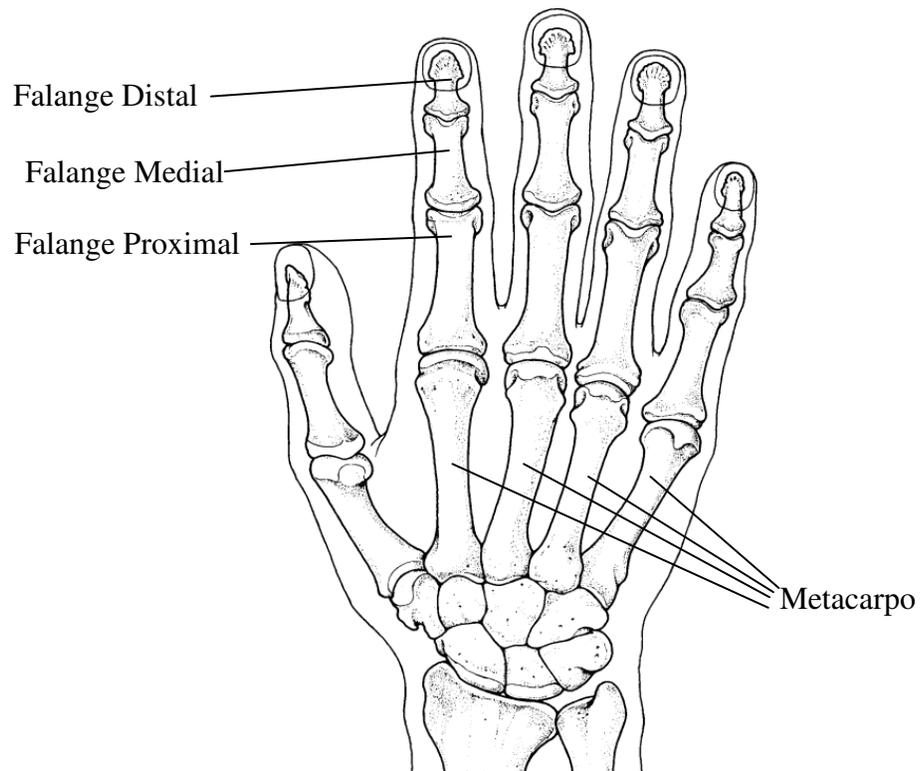


Figura 3.3 – Falanges do dedo (Sturman, 1991)

Os limites de flexão-extensão das falanges, exemplificados na Figura 3.4, foram medidos e são apresentados nas figuras 3.5, 3.6 e 3.7, respectivamente, para cada junta entre as falanges, considerando que os pontos negros são os pontos do centro de rotação de cada falange (Kapandji, 2000). (obs: O dedo usado para realizar as medidas foi o indicador, do próprio autor).

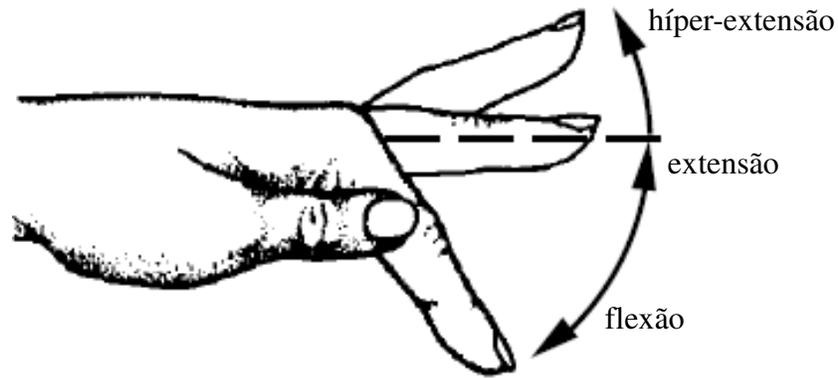


Figura 3.4 – Movimentos de flexão, extensão e hiper-extensão de um dedo
(Sturman, 1991)

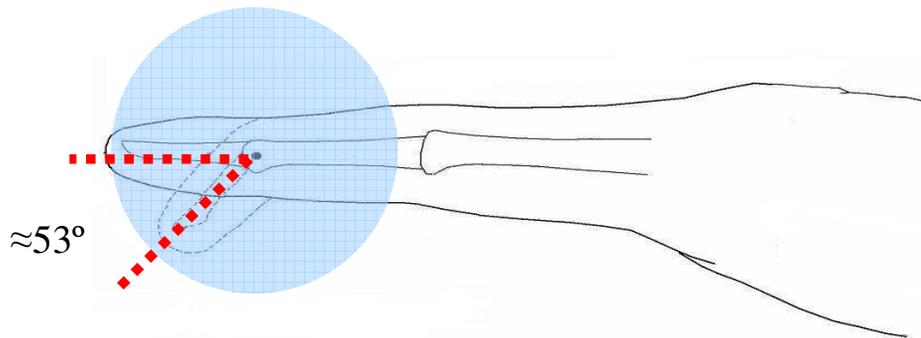


Figura 3.5 – Medidas de rotação da junta entre as falanges distal e medial

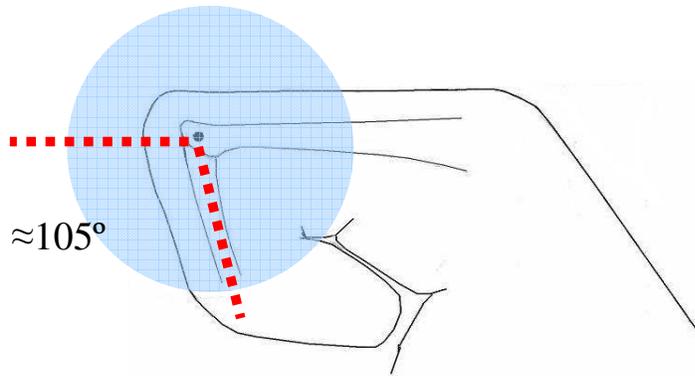


Figura 3.6 – Medidas de rotação da junta entre as falanges medial e proximal

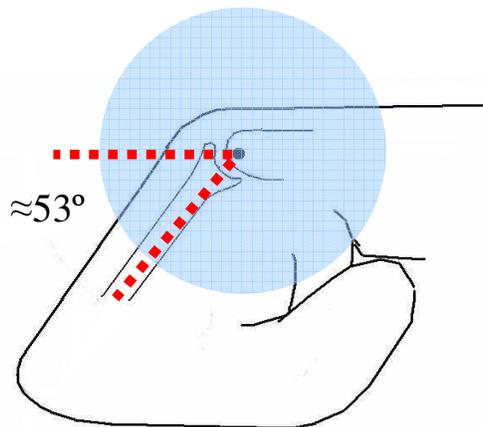


Figura 3.7 – Medidas de rotação da junta entre a falange proximal e o metacarpo

A idéia foi desenvolver um sistema mecânico que ficaria, especificamente, na região dorsal da mão, por motivo de espaço e, futuramente, não atrapalhar nos movimentos de abdução e adução dos dedos (exemplificado na Figura 3.8). O sensor escolhido para ser usado na conversão do movimento anômico em sinais analógicos foram três transdutores de posição (potenciômetro linear) de 20 K Ω , um para cada falange.

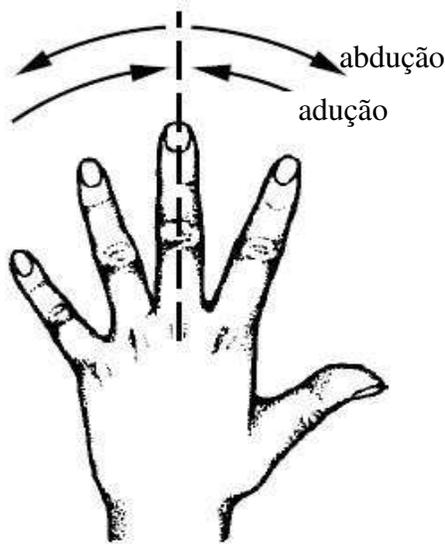


Figura 3.8 - Movimentos de abdução e adução de um dedo (Sturman, 1991)

Nenhum outro sensor foi testado, justamente, pelo fato de que o primeiro sensor adquirido (Figura 4.1) já respeitava os limites de tamanho referente à região dorsal do dedo, porém, o que restava era fazer testes de precisão para avaliar sua eficácia sensitiva. Sendo assim, as características e testes realizados com ele serão apresentados na seção 4.3.1.

Pelo fato do sensor trabalhar de forma linear foi necessário criar um sistema de conversão de movimentos que nele atuasse, modificando seu valor à medida que cada falange executasse os movimentos de extensão ou flexão. Cada falange é individual, ou seja, é possível rotacioná-las separadamente, porém, com os limites de rotação citados nas figuras 3.5, 3.6 e 3.7.

Na próxima seção (3.3) serão apresentados alguns cálculos matemáticos que resolvem o modelo cinemático como uma maneira alternativa de encontrar a posição dos dedos. Essa solução poderá ser utilizada como uma opção de controle de um elemento remoto, e que, no caso do projeto, será utilizada futuramente, para controlar um avatar, que por sua vez, fará interação com objetos tridimensionais.

3.3 Modelagem cinemática do dedo

Pelo fato do dedo possuir uma estrutura na qual existem três graus de liberdade (todas as juntas sendo rotativas como é apresentado na Figura 3.9) existem métodos com os quais, através de variáveis articulares que representam cada junta, é possível calcular a posição do elemento terminal.

De acordo com Rosário (2005) “um sistema articulado pode ser representado matematicamente por n corpos móveis C_i , com $i=1, 2, \dots, n$, e por um corpo C_0 fixo, interligados por n articulações, formando uma estrutura de cadeia, com essas juntas podendo ser rotacionais ou prismáticas”.

Dessa forma a cada membro é associado um sistema de coordenadas cartesianas: o sistema $O_0x_0y_0z_0$ é associado à base (membro 0), o sistema $O_1x_1y_1z_1$ é associado ao membro 1 e assim por diante.

Devido à consideração de corpo rígido, qualquer ponto do membro $i+1$ tem coordenadas constantes com relação ao sistema $O_ix_iz_i$. A Figura 3.9 ilustra tais convenções:

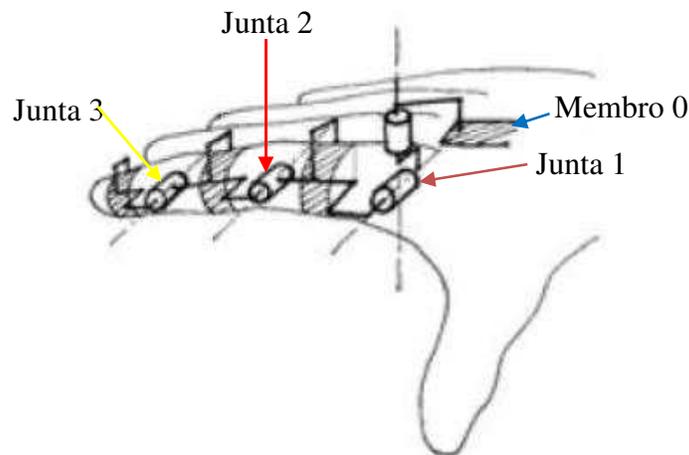


Figura 3.9 – Referências cinemáticas do dedo (Massimo, 2007)

Sendo assim, para cada junta, é definida uma matriz que define sua orientação. Tal matriz é

definida da seguinte forma:

$$T_{n-1}^n = \begin{bmatrix} R_{n-1}^n & d_{n-1}^n \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

O índice n , em questão, indica o número de juntas do robô iniciando por 1, R_{i-1}^i é equivalente à matriz de rotação em determinado eixo e d_{n-1}^n é igual à $\begin{bmatrix} Px_n \\ Py_n \\ Pz_n \end{bmatrix}$, que equivale à matriz de translação. E para cada eixo tem-se:

$$R(\theta_n, z) = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\text{sen} \theta_n & 0 \\ \text{sen} \theta_n & \cos \theta_n & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{Rotação de } \theta_n \text{ graus no eixo Z}) \quad (3.2)$$

$$R(\theta_n, x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_n & -\text{sen} \theta_n \\ 0 & \text{sen} \theta_n & \cos \theta_n \end{bmatrix} \quad (\text{Rotação de } \theta_n \text{ graus no eixo X}) \quad (3.3)$$

$$R(\theta_n, y) = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & 0 & -\text{sen} \theta_n \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen} \theta_n & 0 & \cos \theta_n \end{bmatrix} \quad (\text{Rotação de } \theta_n \text{ graus no eixo Y}) \quad (3.4)$$

Portanto, a matriz de transformação homogênea de uma junta em relação à junta anterior para uma rotação no eixo z, será igual à

$$T_{n-1}^n = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & \Delta x \\ r_4 & r_5 & r_6 & \Delta y \\ r_7 & r_8 & r_9 & \Delta z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Matriz de rotação 3x3 R_{i-1}^i
Matriz de translação d_{n-1}^n
Fator de escala
Perspectiva

Levando em consideração essas informações podemos obter as matrizes de orientação para cada junta de um robô, e obtendo o produto dessas matrizes, é possível encontrar a matriz de orientação final T_0^n , ou seja, a orientação na qual o ultimo membro do robô se encontra com relação à orientação da base.

$$T_0^n = T_0^1 \cdot T_1^2 \cdot \dots \cdot T_{n-1}^n \quad (3.6)$$

Os valores internos da matriz resolvem o problema cinemático direto do manipulador.

$$T_0^n = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

A partir da Tabela 3.1 é possível analisar os valores das variáveis θ_n e d_n , os quais foram extraídos a partir das figuras 3.5, 3.6 e 3.7, da seção 3, e que devem ser substituídos na matriz de transformação homogênea. Lembrando que a variável d é equivalente a distância linear percorrida por uma junta prismática e não rotativa, portanto no caso do exoesqueleto, ela será sempre 0.

Tabela 3.1 - Associação das juntas com os possíveis valores para a variável θ

Junta	θ_n	d_n
1	$\theta_1 = \min 0^\circ; \max 53^\circ$	0
2	$\theta_2 = \min 0^\circ; \max 105^\circ$	0
3	$\theta_3 = \min 0^\circ; \max 53^\circ$	0

Utilizando como base a Equação 3.5 e também as equações 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 temos para a junta 1,

$$T_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\text{sen} \theta_1 & 0 & 0 \\ \text{sen} \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

para a junta 2 temos $T_1^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\text{sen} \theta_2 & 0 & 0 \\ \text{sen} \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

e para a junta 3 temos $T_2^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\text{sen} \theta_3 & 0 & 0 \\ \text{sen} \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

A partir daí, seguindo a equação 3.6, teremos a matriz de orientação do elemento terminal. Lembrando que seguinte notação será utilizada:

$$\cos \theta_n = c \theta_n$$

$$\text{sen} \theta_n = s \theta_n$$

$$T_1^3 = T_1^2 \cdot T_2^3 = \begin{bmatrix} c \theta_2 & 0 & s \theta_2 & 0 \\ s \theta_2 & 0 & -c \theta_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c \theta_3 & -s \theta_3 & 0 & 0 \\ s \theta_3 & c \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c \theta_2 \cdot c \theta_3 & -c \theta_2 \cdot s \theta_3 & s \theta_2 & 0 \\ s \theta_2 \cdot c \theta_3 & -s \theta_2 \cdot s \theta_3 & c \theta_2 & 0 \\ s \theta_3 & c \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_0^3 = T_0^1 \cdot T_1^3 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c\theta_2 \cdot c\theta_3 & -c\theta_2 \cdot s\theta_3 & s\theta_2 & 0 \\ s\theta_2 \cdot c\theta_3 & -s\theta_2 \cdot s\theta_3 & c\theta_2 & 0 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_3 - s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot c\theta_3 & -c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_3 + s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3 & 0 & 0 \\ s\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_3 + c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot c\theta_3 & -s\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_3 + -c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3 & c\theta_3 & 0 \\ s\theta_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Por fim, obteremos T_0^3 (equação 3.8) que é equivalente à matriz de orientação do elemento terminal. Portanto, temos:

$$T_0^3 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

onde cada variável possui seus valores definidos de acordo como é exibido nas tabelas 3.2 a e b.

Tabela 3.2a – Variáveis da matriz de orientação

Variável	Valor
n_x	$c\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_3 - s\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot c\theta_3$
n_y	$s\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot c\theta_3 + c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot c\theta_3$
n_z	$s\theta_3$
o_x	0
o_y	$-s\theta_1 \cdot c\theta_2 \cdot s\theta_3 + -c\theta_1 \cdot s\theta_2 \cdot s\theta_3$
o_z	0

Tabela 3.2b – Variáveis da matriz de orientação (continuação)

a_x	$c\theta_5$
a_y	0
a_z	0
p_x	0
p_y	0
p_z	0

Uma vez estando as variáveis $\cos\theta_n$ e $\sin\theta_n$ resolvidas o modelo cinemático direto é então resolvido.

3.4 Conclusões do capítulo

Neste capítulo, aproveitando o conhecimento adquirido através da revisão bibliográfica apresentada no capítulo anterior, foi apresentado o início de uma pesquisa visando o desenvolvimento de um dispositivo háptico que possa aperfeiçoar a interação entre um usuário e um *software* que oferece recursos tridimensionais. Para isso, foi apresentado também o modelo cinemático do dedo antropomórfico, o qual poderá ser usado mais tarde para controlar uma mão virtual. No próximo capítulo, a proposta de desenvolvimento aqui apresentada, será colocada em prática e todos os detalhes construtivos serão apresentados.

Capítulo 4

Desenvolvimento do dispositivo háptico (exoesqueleto)

4.1 Características do projeto

Considerando os aspectos da fisiologia articular da mão (Kapandji, 2000) foi necessário tratar alguns pontos relevantes relacionados com o que ocorre ao se realizar o movimento de extensão de uma falange (figuras 3.5, 3.6 e 3.7, localizadas nas páginas 33 e 34).

O dispositivo mecânico possui três graus de liberdade referente a cada junta (menos o polegar) e as medidas escolhidas para o desenvolvimento foram do dedo indicador do autor.

Cada falange pode ser rotacionada individualmente, porém, obviamente, a posição no sistema de coordenadas (x,y) da(s) junta(s) localizada(s) na frente desta que foi rotacionada é modificado mas não rotacionada, com exceção da junta entre a falange distal e medial pois não existe outra na frente. Sendo assim, considerando algumas principais características e sub-características que um dispositivo háptico deve possuir e que foram apresentadas na seção 2.2.1, o exoesqueleto deve atender às seguintes demandas:

- O exoesqueleto, tendo seguido a trajetória do movimento de extensão, deve

acompanhar de forma idêntica, porém no sentido retrógrado, quando o movimento é de flexão para cada falange individualmente.

- O sistema de conversão de movimento deve estar acoplado ao exoesqueleto para que quando este estiver acompanhando os movimentos, possa realizar a conversão.
- O exoesqueleto deve funcionar de forma que a flexão e a extensão possam ser realizadas de forma natural, ou seja, sem limitar os movimentos do usuário.
- O exoesqueleto deve ser leve, para evitar desconforto do usuário.

4.2 Proposta de implementação experimental

O protótipo virtual foi desenvolvido utilizando-se a tecnologia CAD que possibilitou a realização de testes e simulações. Concluídos estes testes e simulações o protótipo virtual foi então submetido ao processo de Prototipagem Rápida (RP - *Rapid Prototyping*), onde é obtido o protótipo físico que possibilita realizar testes experimentais e métricos e também desenvolver a versão definitiva do exoesqueleto.

4.3 Conversão de um movimento circular em linear

Para realizar essa tarefa, de acordo com a seção 3.2, as medidas necessárias para análise da porcentagem de rotação máxima, executada por cada junta, foram realizadas, sendo apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Medidas para análise da porcentagem de rotação máxima executada por cada junta.

Descrição da Medida	Ângulo de rotação (graus)	% Mobilidade (em relação à 360°)
Junta entre a falange distal e falange medial	≈ 53°	14,72%
Junta entre a falange medial e falange proximal	≈ 105°	29,16%
Junta entre a falange proximal e metacarpo	≈ 53°	14,72%

Esses valores serão utilizados, posteriormente, para fazer os cálculos de construção do sistema de conversão de movimento, o qual será explicado na seção 4.3.2. Como em nenhum dos casos de rotação, descritos acima, é realizada uma volta completa, ou seja, 360°, o projeto baseou-se apenas no tamanho necessário para realizar a conversão. Podemos verificar que o valor da medida para a junta entre falange proximal e metacarpo é aproximadamente igual à falange distal e medial.

4.3.1 Transdutores de posição – Potenciômetro

Os potenciômetros, exemplo ilustrado na Figura 4.1, por sua vez transformam energia mecânica em energia elétrica. Seu princípio de funcionamento corresponde a um deslocamento linear de um contato móvel (letras 'CM' na Figura 4.1) sobre um elemento resistivo (Rt) onde a equação 4.1 (lei de ohm) rege no circuito (Figura 4.2).

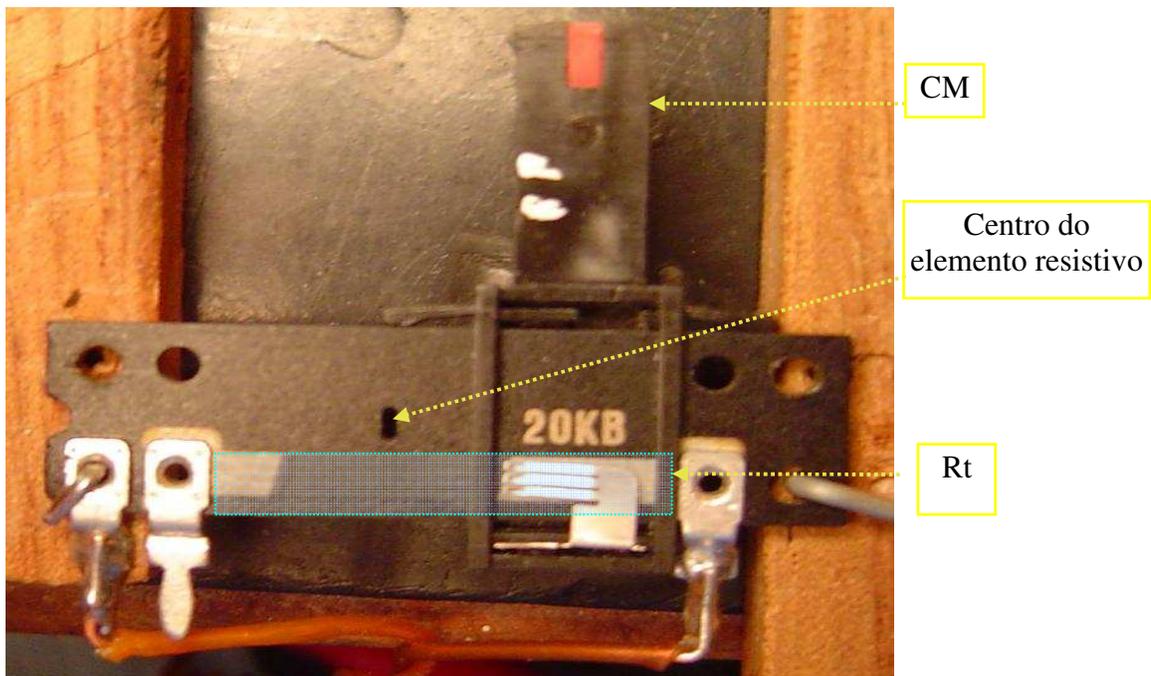


Figura 4.1 - Potenciômetro

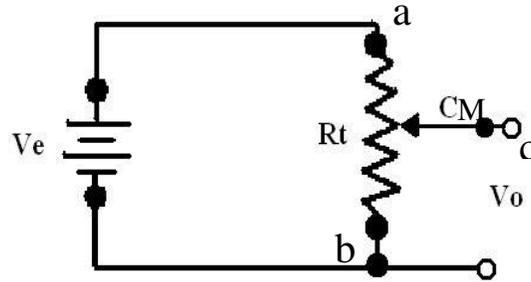


Figura 4.2 – Circuito elétrico de um potenciômetro

Equação:

$$R_{ac} + R_{cb} = R_t$$

$$I = \frac{V_e}{R_t}$$

$$V_o = I \cdot R_{cb} \tag{4.1}$$

Onde,

V_e = tensão de alimentação (V)

R_t = resistência total do potenciômetro (Ω)

V_o = tensão de saída (V)

I = Corrente elétrica (A)

O elemento resistivo dos transdutores potenciométricos, na sua forma mais comum, é constituído por um fio condutor bobinado sobre um suporte isolante. A variação de resistência entre seu contato móvel e um dos extremos fixos é função dos seguintes fatores:

- Posição relativa do contato sobre a resistência total;
- Valor da resistência;
- Distribuição da resistência em relação ao deslocamento (translação ou rotação) do contato. Esta distribuição poderá ser linear ou logarítmica.

Nos transdutores potenciométricos, utilizados para medida de deslocamento, existe uma relação linear entre o sinal de saída e o deslocamento que lhe deu origem. Na prática, para obter uma boa linearidade, é necessário que a medida do sinal de saída seja efetuada por um circuito cuja resistência interna seja suficientemente alta quando comparada com a resistência total do transdutor.

A seleção e utilização de resistências em circuitos nos quais a precisão é um dos fatores decisivos do desempenho, devem ser acompanhadas de precauções técnicas quanto à:

- Tolerância do valor nominal e à sua estabilidade, em função das condições de armazenamento e de funcionamento (por exemplo, as resistências mais estáveis são as de fio bobinado, as de película fina metálica, de carvão e as aglomeradas);
- Potência máxima dissipável ao coeficiente de temperatura;
- Tensão máxima aos terminais ao ruído de fundo;
- Faixa de frequências recomendada, fora da qual se tornam significativas as capacitâncias e as indutâncias parasitas associadas, sejam ao corpo ou aos terminais de acesso;
- Linearidade

O transdutor escolhido para medida de deslocamento de cada falange foi o potenciômetro exibido na Figura 4.1, pois é um sensor de baixo custo (valor aproximado de R\$3,00) e também porque seu comprimento equivale à medida máxima permitida para ser colocada na região dorsal da falange do dedo utilizado no projeto (maiores detalhes serão explicados a partir da seção 4.4.3 em diante). No caso deste potenciômetro a letra 'B' impressa na sua superfície, juntamente com os caracteres '20K', indica que o sensor possui resistência com função linear e os testes de linearidade, realizados através de regressão linear, estão exibidos na Figura 4.4, lembrando que, por motivo de necessidade de precisão, os valores ôhmicos referentes às extremidades do elemento resistor foram desconsiderados pelo fato de imprecisão no valor resistivo.

Para obter a regressão linear foi necessário obter os valores exibidos na Tabela 4.2 (obs: O valor inicial de deslocamento obtido foi 11.61 cm (Figura 4.3), referente ao centro do elemento resistivo, os outros foram obtidos deslocando o contato móvel em direção às duas extremidades de 0.4 em 0.4 mm):



Figura 4.3 – 1º valor ôhmico obtido adquirido

Tabela 4.2 - Valores referentes ao deslocamento (cm) e a variação da resistência

Deslocamento (cm)	Resistência (K Ω)	Regressão linear ($y=2,75x-22,5275$)
9,21	3,2	2,8
9,61	4,2	3,9
10,01	5,7	5
10,41	6,2	6,1
10,81	7,2	7,2
11,21	8,5	8,3
11,61	9,6	9,4
12,01	10,6	10,5
12,41	11,6	11,6
12,81	12,6	12,7
13,21	13,6	13,8
13,61	14,7	14,9
14,01	15,7	16

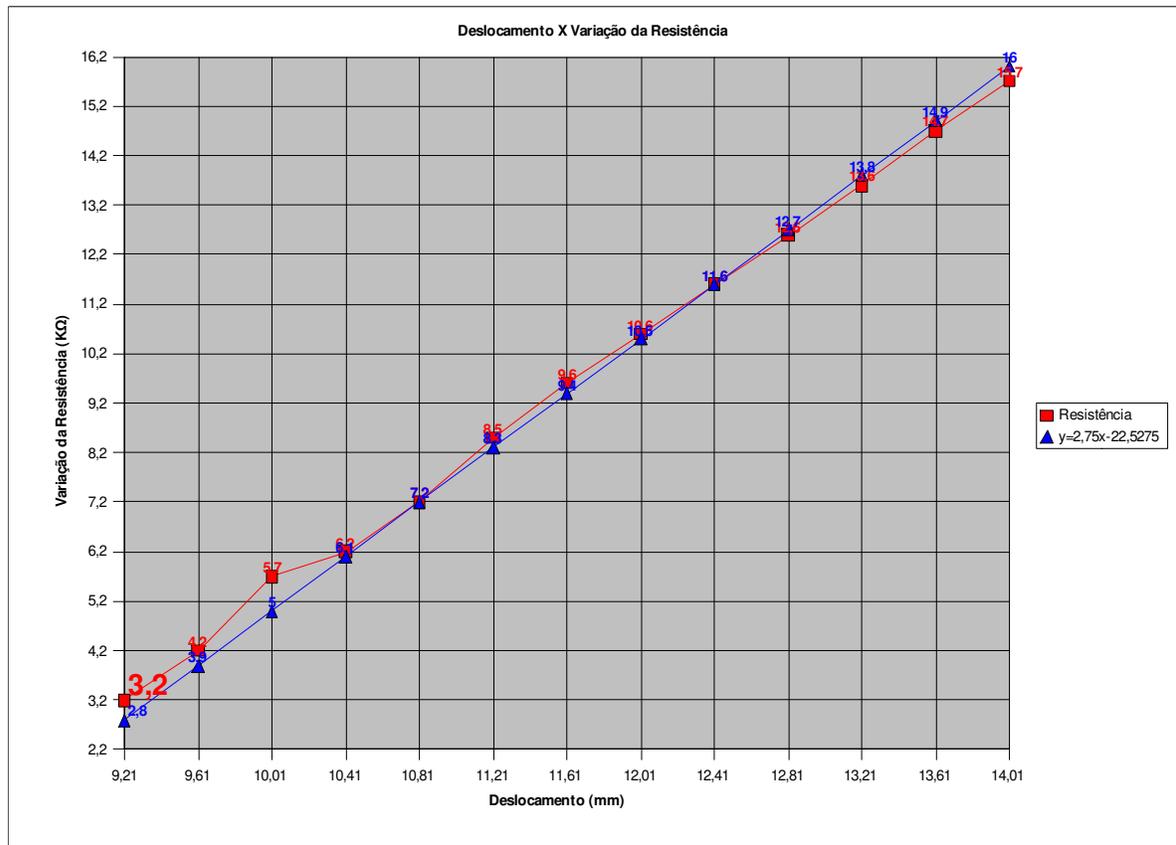


Figura 4.4 – Regressão linear para teste de linearidade

Tendo obtido esses resultados o próximo passo foi desenvolver o sistema que é responsável pela conversão de movimento rotativo, referente a cada junta entre as falanges, em linear, para atuar no transdutor de posição.

4.3.2 Sistema de conversão de movimento

Os componentes mecânicos, responsáveis pela transmissão de movimento rotativo em movimento linear, são as engrenagens⁹ juntamente com as cremalheiras¹⁰.

⁹ Vide apêndice B

¹⁰ Vide apêndice B

O funcionamento desses componentes se deve à existência de um número z de dentes, idênticos uns aos outros, dispostos circularmente na engrenagem e, linearmente, na cremalheira. Esse sistema foi uma das melhores soluções encontradas, visando a solução dos seguintes problemas:

- Conversão de tipos de movimento
- Atuar no limite de espaço disponível na região dorsal do dedo e possuir um tamanho pequeno, porém suficiente, para solucionar o item anterior.
- Converter apenas o perímetro desejado, ou seja, não deve ser necessário utilizar os 360° de uma rotação completa e, sim, conforme a demanda de cada junta.
- O sistema de engrenagem deve possuir uma relação diretamente proporcional à rotação das falanges.

Como o objetivo foi desenvolver um dispositivo leve e pequeno, o sistema de conversão de movimento foi construído a partir das características métricas do exoesqueleto. Portanto, os cálculos necessários para criá-lo, assim como sua forma geométrica e, também, uma melhor compreensão da resolução dos problemas citados, serão adquiridos com a leitura das seções 4.4.3, 4.4.4 (Modelo CAD do exoesqueleto e Protótipo físico), Anexo A e B.

Visando, portanto atingir, senão todos, mas a grande maioria dos objetivos citados para o desenvolvimento do exoesqueleto uma alternativa foi utilizar tecnologias atuais de modelagem 3D (CAD) assim como a Prototipagem Rápida.

4.4 Descrição do processo de Prototipagem Rápida

Nas duas próximas seções, o processo responsável pelo desenvolvimento de modelos virtuais em reais (modelo físico) será explicado.

4.4.1 Projeto mecânico assistido por computador (CAD)

Computer Aided Design (CAD) ou Projeto Assistido por Computador é o nome dado a sistemas computacionais utilizados para facilitar o projeto, a partir de desenhos técnicos, em diversas áreas para o estudo de estilo e conceito de um produto. Estes sistemas consistem numa série de ferramentas para construção de entidades geométricas planas ou tridimensionais.

Uma divisão básica entre os *softwares* CAD é feita com base na capacidade do programa em desenhar em duas dimensões (2D) ou criar modelos tridimensionais (3D). Eles ainda são subdivididos em relação a tecnologia que usam como modelador 3D. Existem basicamente dois tipos de modelagem 3D: por polígonos e por NURBS. Nos *softwares* pode haver intercâmbio entre o modelo 3D e o desenho 2D.

O principal *software* CAD, para indústrias pequenas, arquitectos e treinamento é o AutoCAD, produzido pela empresa Autodesk. Para grandes indústrias e projetos mais complexos, alguns *softwares* mais usados são: o SolidWorks, o Catia, o Pro-Engineer, o Inventor e o Microstation.

4.4.2 Prototipagem Rápida

Computer Aided Manufacturing (CAM) ou Manufatura Assistida por Computador) refere-se a qualquer processo auxiliado por microcontrolador ou controlador numérico. Os sistemas CAM trabalham tendo como base modelos matemáticos provenientes do sistema CAD. Através desses modelos os sistemas geram um arquivo de caminho de ferramenta.

É possível transferir todas as coordenadas para as máquinas efetuarem as usinagens de uma peça através dos sistemas de CAM. Quanto maior a precisão do desenho gerado no CAD, maior será a precisão dos caminhos de ferramenta gerados pelo CAM e, conseqüentemente, maior será a qualidade da peça.

Uma evolução dos sistemas CAM é a Prototipagem Rápida (RP – Rapid Prototyping). A prototipagem rápida consiste na geração de um protótipo para testes funcionais e/ou dimensionais, baseadas em camadas (layers).

Há várias formas de processo, podendo-se destacar:

1. Sinterização seletiva a laser (Selective Laser Sintering, SLS) – É a sinterização localizada de um pó pela ação de um sistema de laser de CO₂, contido numa máquina específica. Existem, atualmente, dois sistemas de sinterização disponíveis: o DTM, americano, e o EOS, antigo sistema alemão, hoje incorporado pela 3D System (<http://www.3dsystems.com/>) (acessado dia 16/10/2008). O sistema funciona com o laser percorrendo ou escaneando a superfície da camada de pó depositada e regularizada pelo sub-sistema de alimentação, aquecendo as partículas e aglutinando-as, até formar uma camada sólida. Uma vez solidificada a primeira camada, os espelhos apontam novamente o laser para um ponto específico, a plataforma se movimenta para baixo e o sub-sistema adiciona nova camada de pó e assim, sucessivamente, até a solidificação da última camada (Ahrens *et al*, 2007).

- Estereolitografia (SLA) - É a mais antiga e mais importante técnica de prototipagem. Tem como base, a polimerização de uma resina foto-sensível (ex. acrílica, epóxi), composta por monômeros, fotoiniciadores e aditivos através de um feixe de luz ultravioleta. A cuba da máquina é preenchida com resina, na qual há uma plataforma que pode se movimentar para cima e para baixo. O microcomputador envia para a plataforma a primeira camada do modelo virtual. O controle numérico da máquina posiciona essa plataforma na superfície da resina e os espelhos galvanométricos direcionam o feixe de laser para a porção de resina correspondente a essa primeira camada. Esta camada, quando atingida pelo laser, faz com que os fotoiniciadores desencadeiem uma reação localizada que promove a formação de uma cadeia polimérica entre as moléculas do monômero dispersas na resina, ocorrendo a solidificação. Após a conclusão desse primeiro passo, a plataforma desce imergindo a primeira camada solidificada na resina

líquida para que nova camada seja polimerizada sobre a primeira e assim, sucessivamente até a conclusão do modelo. A estereolitografia supera as demais técnicas pela transparência, maior precisão e melhor acabamento do modelo (Ahrens *et al*, 2007).

2. Multi-Jet Modeling (MJM) – O mecanismo básico é um cabeçote, que se movimenta numa direção X, e uma plataforma, que se movimenta nas direções Y e Z, conforme o tamanho do objeto. O material termoplástico aquecido é expelido pelo cabeçote, através de 96 orifícios, que se abrem e se fecham enquanto ele executa um movimento repetitivo de vai-e-vem na direção X. Simultaneamente a plataforma se movimenta na direção Z, para criar uma nova camada. No caso de objetos maiores do que o cabeçote, a plataforma se movimenta também na direção Y, para permitir a construção do modelo. Essa técnica é muito empregada para obtenção de modelos pelo processo da cera perdida (Ahrens *et al*, 2007).
- Impressão tridimensional (3D Printing) – A máquina se constitui de um reservatório para um pó cerâmico ou polimérico; uma plataforma que se movimenta no sentido horizontal descendente, à medida que o pó é solidificado; um rolo para reposição e regularização da camada de pó a ser aglutinado e um cabeçote, abastecido com o aglutinante. O rolo avança e deposita uniformemente uma camada do pó; o cabeçote se movimenta nas direções X-Y e derrama um jato de fluido sobre o pó, aglutinando-o; a plataforma desce e a outra camada de pó depositada recebe novo jato de fluido. Esta segunda camada se aglutina e se adere à camada anterior e assim, sucessivamente. Depois de concluído, o modelo é aspirado para eliminação de pó não aglutinado em sua superfície (Ahrens *et al*, 2007).
3. Modelagem por deposição fundida (FDM) – Baseia-se na deposição, sobre uma plataforma, de camadas resultantes do aquecimento e amolecimento de filamentos (arames) do material plástico destinado à confecção do modelo. Simultaneamente, outros fios amolecidos vão formando suportes para as superfícies livremente suspensas do modelo, a fim de que elas possam ser construídas. A máquina, para a FDM, possui uma

plataforma, revestida de uma espuma densa e flexível, que se movimenta no sentido vertical (eixo Z) e um cabeçote provido de dois bicos extrusores de arames aquecidos: um para alimentar as camadas do modelo e outro para a construção automática dos suportes. Esses arames ficam estocados dentro da máquina, em ambiente a vácuo aquecido, pois a umidade do material dentro do bico extrusor poderia causar formação de bolhas, que impediria a continuidade de sua deposição pelo bico. Os bicos extrusores, que na verdade funcionam como uma resistência, são alimentados por esses filamentos através de duas guias giratórias ligadas a um motor, as quais vão transferindo para eles os arames estocados no rolo. O *software* da FDM é um misto CAD / CAM e não é integrado à máquina. Esta é conectada ao computador, com o sistema CAM, que monitora constantemente os comandos de construção. Para cada camada geram-se coordenadas ou caminhos pelos quais o bico extrusor vai depositando os fios fundidos. Ao final de cada camada a plataforma desce e o cabeçote inicia a deposição de mais material para a outra camada, repetindo a operação até a conclusão do modelo (Ahrens *et al*, 2007).

A grande vantagem da prototipagem rápida está no fato de que peças tridimensionais (CAD) geometricamente complexas podem ser transformadas em modelo físico num processo rápido e, em muitos casos, de baixo custo dependendo do seu volume e, além disso, são muito úteis para realizar testes (mecânicos, funcionais, ergonômicos, entre outros) antes da fabricação propriamente dita.

As desvantagens são que a prototipagem não é viável para aplicações em larga escala; alguns requisitos podem ser difíceis ou mesmo impossíveis de implementar num protótipo. E também, por motivo do volume limitado que as máquinas de prototipagem possuem, dependendo do tamanho da peça e da forma que ela necessita ser prototipada, não é possível submetê-la para prototipagem.

4.4.3 Modelo CAD do exoesqueleto

As primeiras peças a serem desenvolvidas foram as responsáveis pela conversão da junta

entre a falange distal e a medial, cuja montagem é apresentada nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7. Através dos apêndices A.1, A.2, A.3 e A.8 é possível analisar as medidas utilizadas para a modelagem das peças “Peça F1 e F2”, “Peça F1”, “Peça F2” e “Engrenagem de apoio 53^o” respectivamente, onde F1 representa “Falange Distal” e F2 “Falange Medial”. Nas figuras 4.7 e 4.8 é possível analisar o encaixe das peças umas às outras.

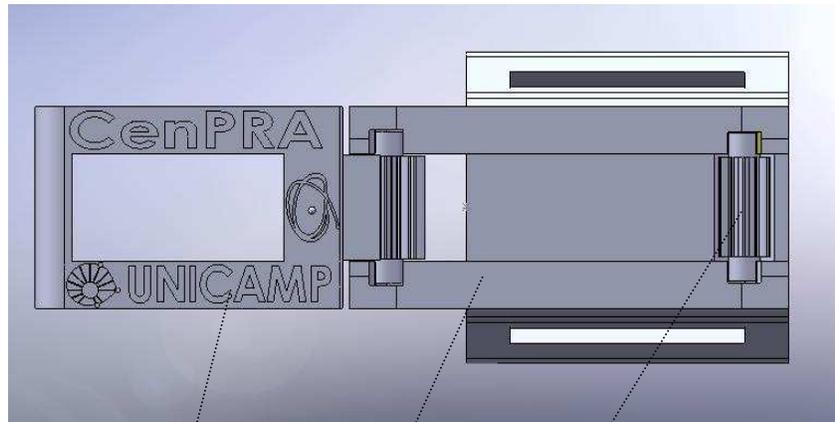


Figura 4.5 - Peça F1 e F2 com Peça F2 e Engrenagem de apoio (Vista Superior)

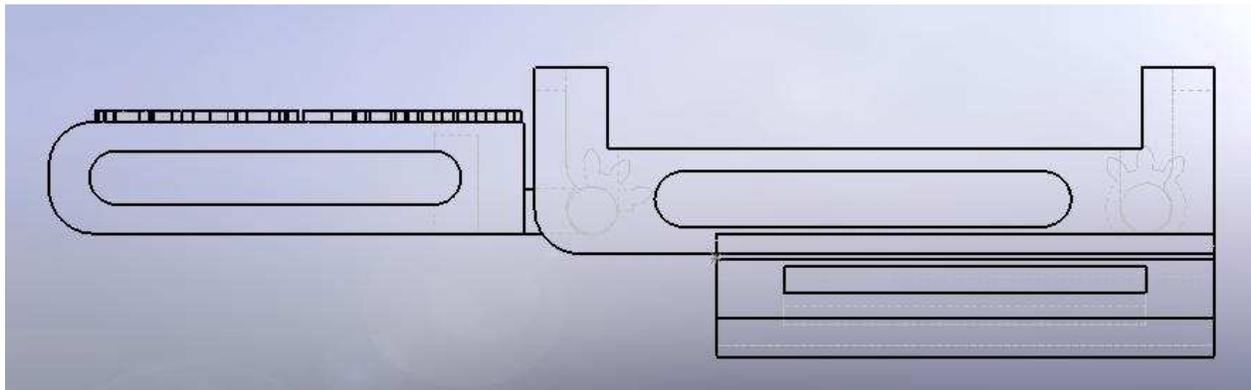


Figura 4.6 - Peça F1 e F2 com Peça F2 e Engrenagem de apoio (Vista Frontal e linhas ocultas visíveis)

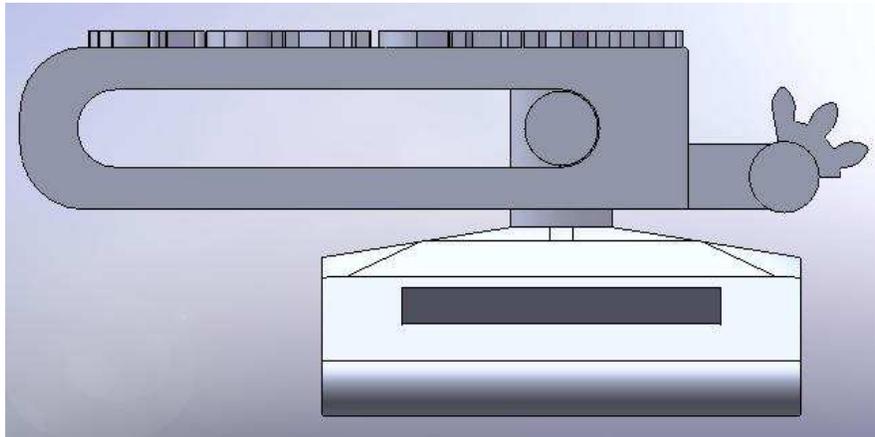


Figura 4.7 - Peça F1 com Peça F1 e F2

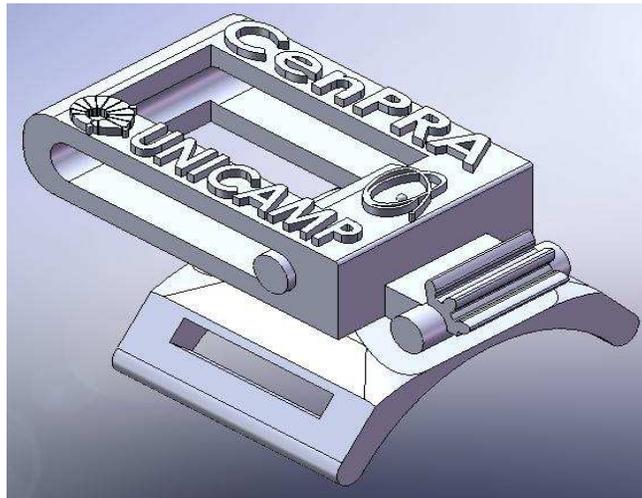


Figura 4.8 - Peça F1 com Peça F1 e F2 (Visão isométrica)

Acoplada à Peça F1 e F2 está o sistema de engrenagem responsável pela conversão do movimento rotacional em linear. A quantidade de dentes da engrenagem foi calculada de acordo com o ângulo rotacionado pela junta, ou seja, o suficiente para acompanhar os aproximados 53°.

Tendo a Peça F1, que está fixa à região dorsal da falange, acompanhado o seu movimento quando realiza a flexão, esta traz junto, através do seu cilindro, a Peça F1 e F2, pois esta última

possui um guia que está paralelo à falange distal onde o cilindro pode correr por ela, mantendo-a sempre na mesma relação.

Realizando esse movimento a Peça F1 e F2, que está encaixada à Peça F2 por seu cilindro rotativo, faz a engrenagem atuar em uma cremalheira convertendo assim o movimento rotativo em linear. Essa conversão pode ser observada através das figuras 4.9 e 4.10.

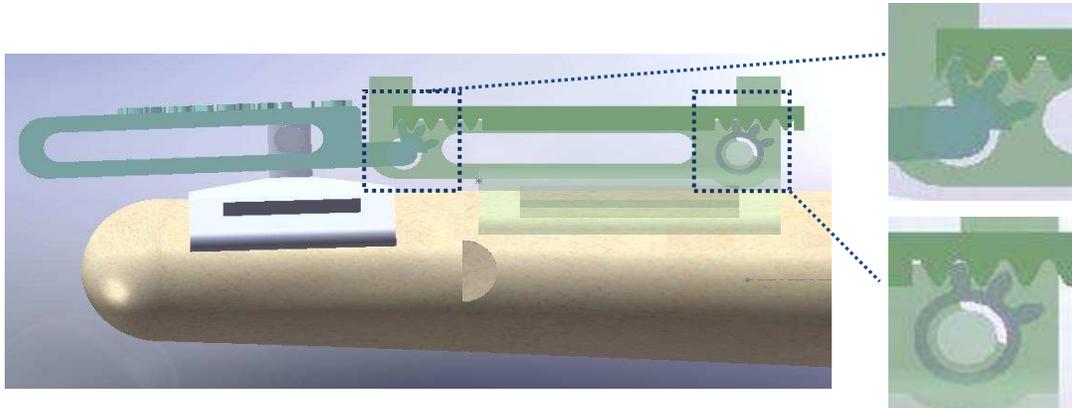


Figura 4.9 - Posição inicial do movimento de flexão entre a falange distal e medial

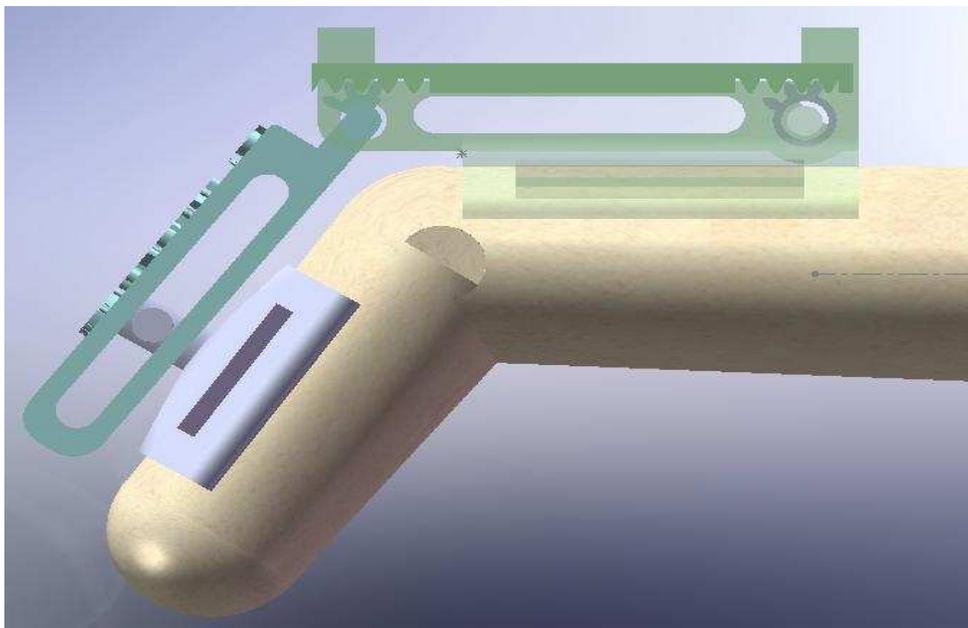


Figura 4.10 - Posição final do movimento de flexão entre a falange distal e medial

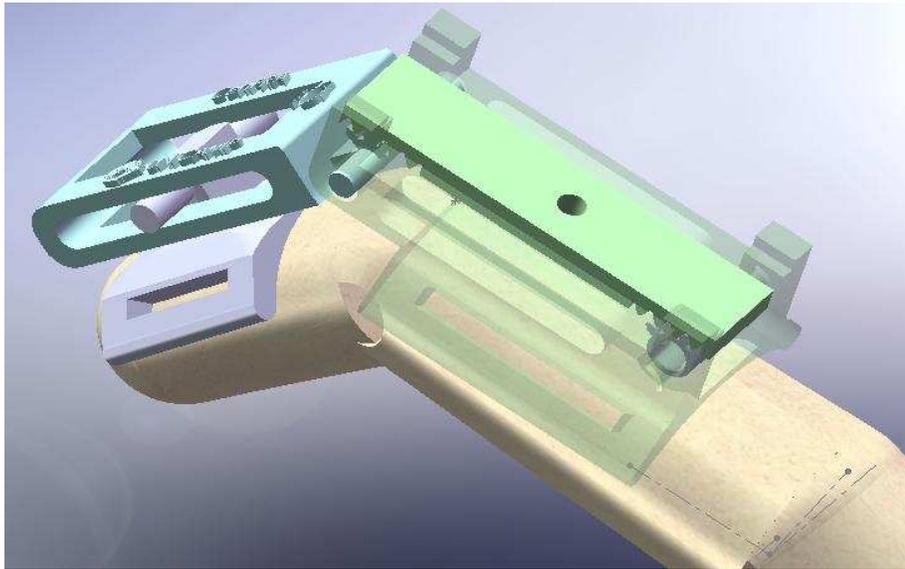


Figura 4.11 - Posição final do movimento de flexão entre a falange distal e medial (visão isométrica)

Levando-se em consideração, a trajetória retrógrada, a diferença existente é que as posições: inicial e final se tornam posições final e inicial, respectivamente.

A idéia utilizada para desenvolver a parte funcional, realizada pelas peças mostradas nas figuras 4.9, 4.10 e 4.11, foi a mesma para fazer a conversão de movimento das juntas entre as falanges restantes (medial com proximal e proximal com o metacarpo). Sendo assim as peças responsáveis por essas duas conversões restantes são: “Peça F2”, “Peça F2 e F3”, “Peça F3”, “Peça F3 e Metacarpo”, “Peça Metacarpo” e “Engrenagem de apoio 105°” cujas medidas para modelagem estão presentes nos apêndices A.3, A.6, A.4, A.7, A.5 e A.9 respectivamente.

O mesmo trabalho que é realizado pela Peça F1 no momento em que a falange distal exerce o movimento de extensão, também ocorre com a Peça F2 uma vez que está fixa à falange medial e também possui um guia que puxa e orienta o cilindro da Peça F2 e F3, porém, com uma rotação de aproximadamente 105°.

O sistema de engrenagem também possui a quantidade de dentes, relativamente calculada, de acordo com o ângulo rotacionado e está acoplado à Peça F2 e F3 em volta de um cilindro rotativo o qual está encaixado na Peça F3 que por sua vez está fixado à falange proximal e atua da mesma forma quando ocorre extensão. Este, porém, trabalha com as peças “Peça F3 e Metacarpo” e “Peça Metacarpo” e sua rotação é de aproximadamente 53°. Nas figuras 4.12 e 4.13 são ilustrados o funcionamento do dispositivo para as falanges medial e proximal e nas figuras 4.14 e 4.15 para a proximal com o metacarpo.

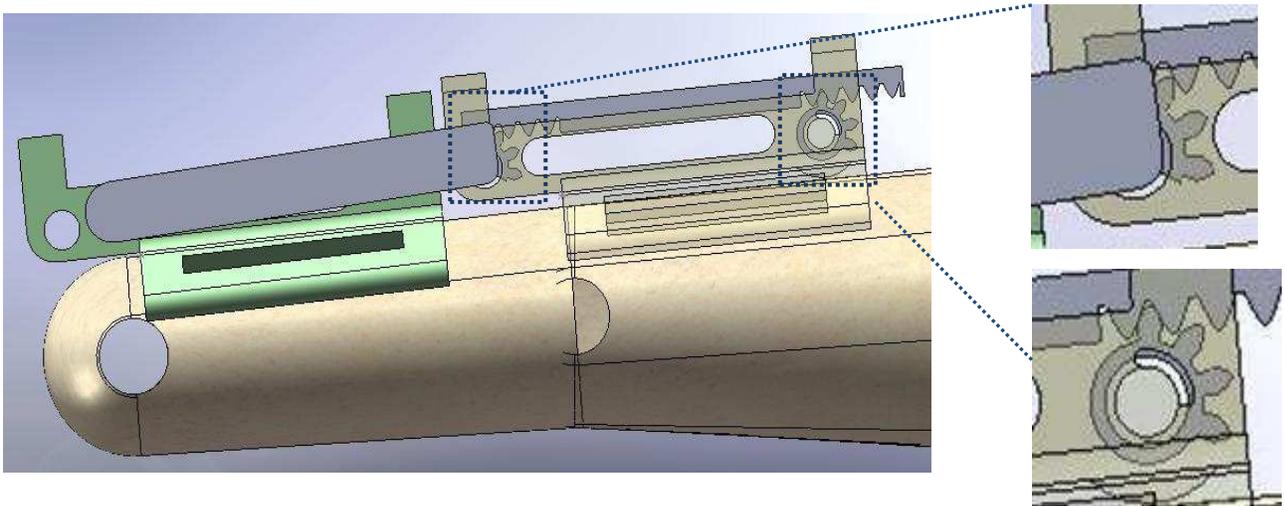


Figura 4.12 - Posição inicial do movimento de flexão entre a falange medial e proximal

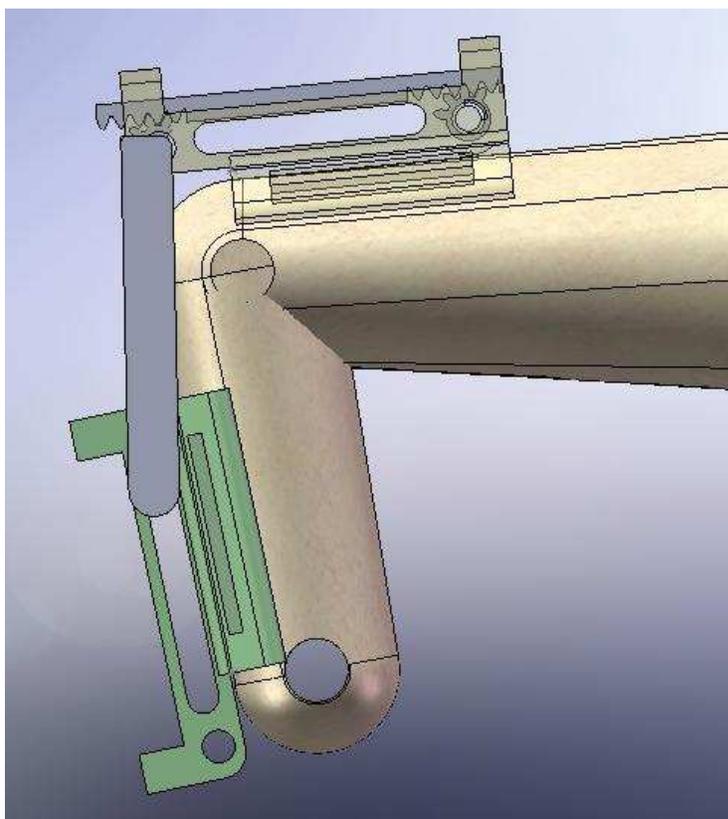


Figura 4.13 - Posição final do movimento de flexão entre a falange medial e proximal

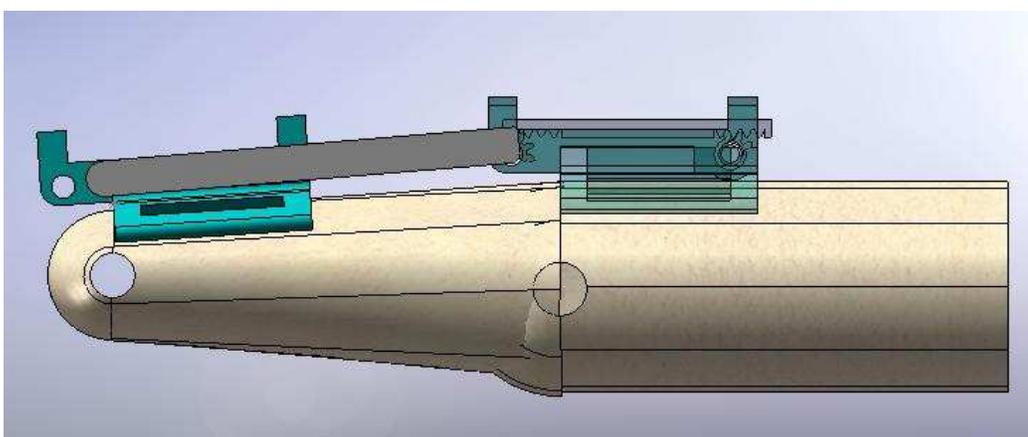


Figura 4.14 - Posição inicial do movimento de flexão entre a falange proximal e o metacarpo

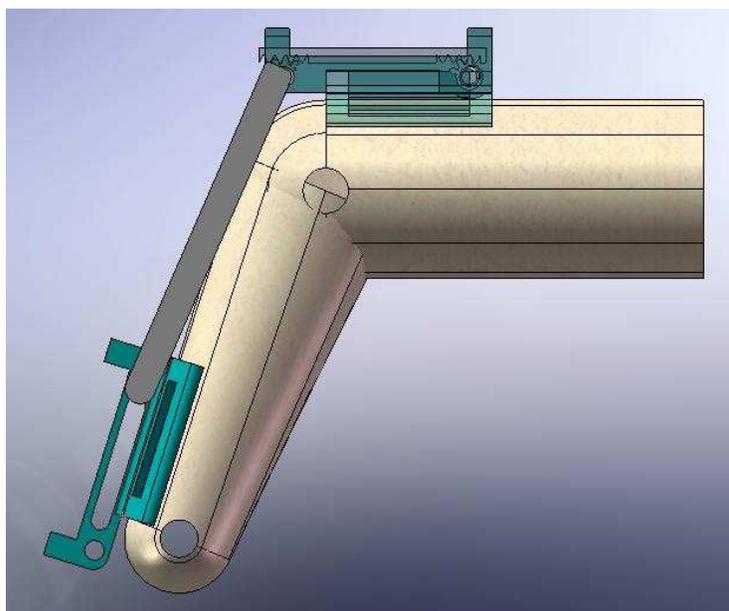


Figura 4.15 - Posição final do movimento de flexão entre a falange proximal e o metacarpo

Todas as peças mostradas nas figuras 4.5, 4.8, 4.9, 4.12 e 4.14 formam o dispositivo por completo. Todas elas, porém, são unidas de forma que cada uma trabalhando em conjunto, como mostra a Figura 4.16, fecha o sistema para acompanhar a trajetória de um dedo propriamente dito.

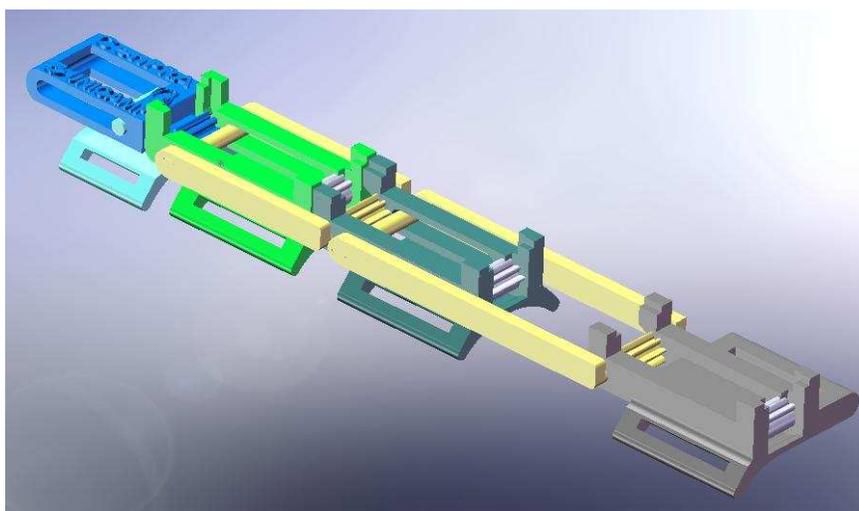


Figura 4.16 – Modelo final do dispositivo (exoesqueleto)

No desenvolvimento deste trabalho, até agora, foi utilizado apenas a tecnologia CAD. Na

próxima seção, visando tornar o protótipo virtual em real, serão explicados os passos realizados para tornar isso possível.

4.4.4 Protótipo físico

Considerando que a RP é uma evolução da tecnologia CAM, o CTI (Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer – <http://www.cti.gov.br>) (acessado dia 28/10/08), localizado em Campinas, possui a SLS, FDM e a 3D printer.

A principal diferença entre elas é o material utilizado no processo de prototipagem assim como a precisão, de cada uma delas, para realizar a sinterização ou deposição de material. Os testes de prototipagem realizados foram processados por duas máquinas pertencentes ao CTI, sendo elas a SinterStation 2000, e a HiQ. Ambas sinterizam o material poliamida PA12 com precisão de 0,2 mm, porém a HiQ, por ser uma máquina mais recente, possui um melhor gerenciamento no processo de sinterização e, por isso, é capaz de oferecer um melhor resultado na prototipagem. As outras máquinas (FDM e 3D printer) não foram testadas por questão de prioridade, pois o protótipo final, sinterizado pela SLS, atingiu as expectativas necessárias para alcançar alguns objetivos referentes à prototipagem. Acredita-se que um protótipo, utilizando a tecnologia FDM, também atinja certos objetivos. Já no caso da 3D printer, pelo fato de se utilizar gesso como matéria prima do protótipo, possíveis testes com ela foram descartados por motivo de fragilidade do produto final.

A partir do modelo virtual da Figura 4.16 foi possível criar a extensão STL, que é utilizada pelas máquinas para leitura de arquivos. Pelo fato do projeto ter sido desenvolvido em uma escala pequena, por consequência do espaço disponível na região dorsal dos dedos, foi necessário fazer alguns protótipos (aproximadamente 8) com o objetivo de adaptar as características métricas do modelo virtual com os recursos que as máquinas oferecem até que o protótipo físico final fosse obtido.

Na Tabela 4.2a e b são apresentadas cada uma das peças, separadamente, no formato virtual (CAD). No lado direito, seu modelo físico. A separação, no processo de prototipagem, foi necessária pois, apesar da precisão no processo de sinterização ser de 0,2 mm, o calor incidente nas folgas existentes onde as peças se encaixam, causa união indesejada das peças não sendo possível, dessa forma, fazer com que os cilindros e as engrenagens de apoio rotacionem ou que o primeiro corra pelo guia.

Tabela 4.2a – Modelos virtuais e físicos – Parte 1.

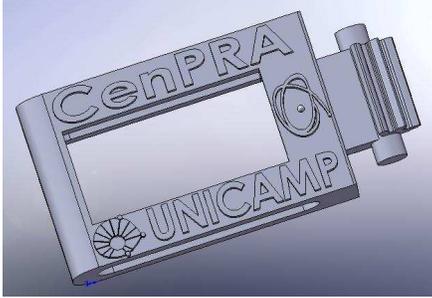
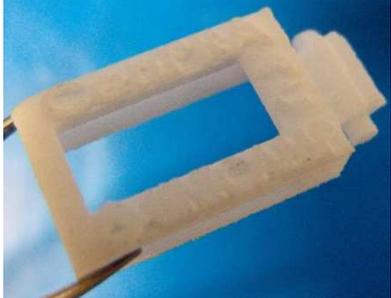
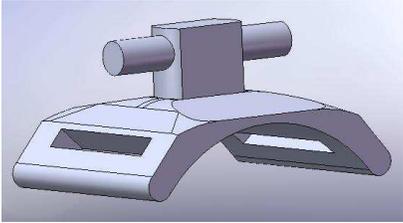
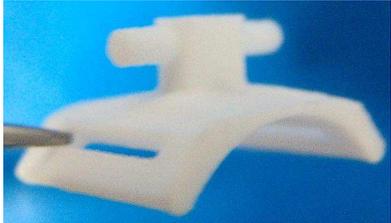
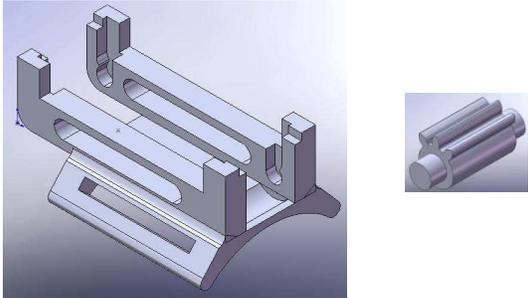
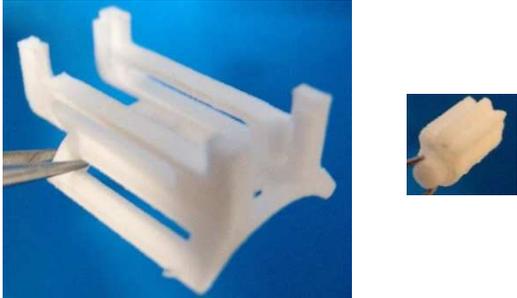
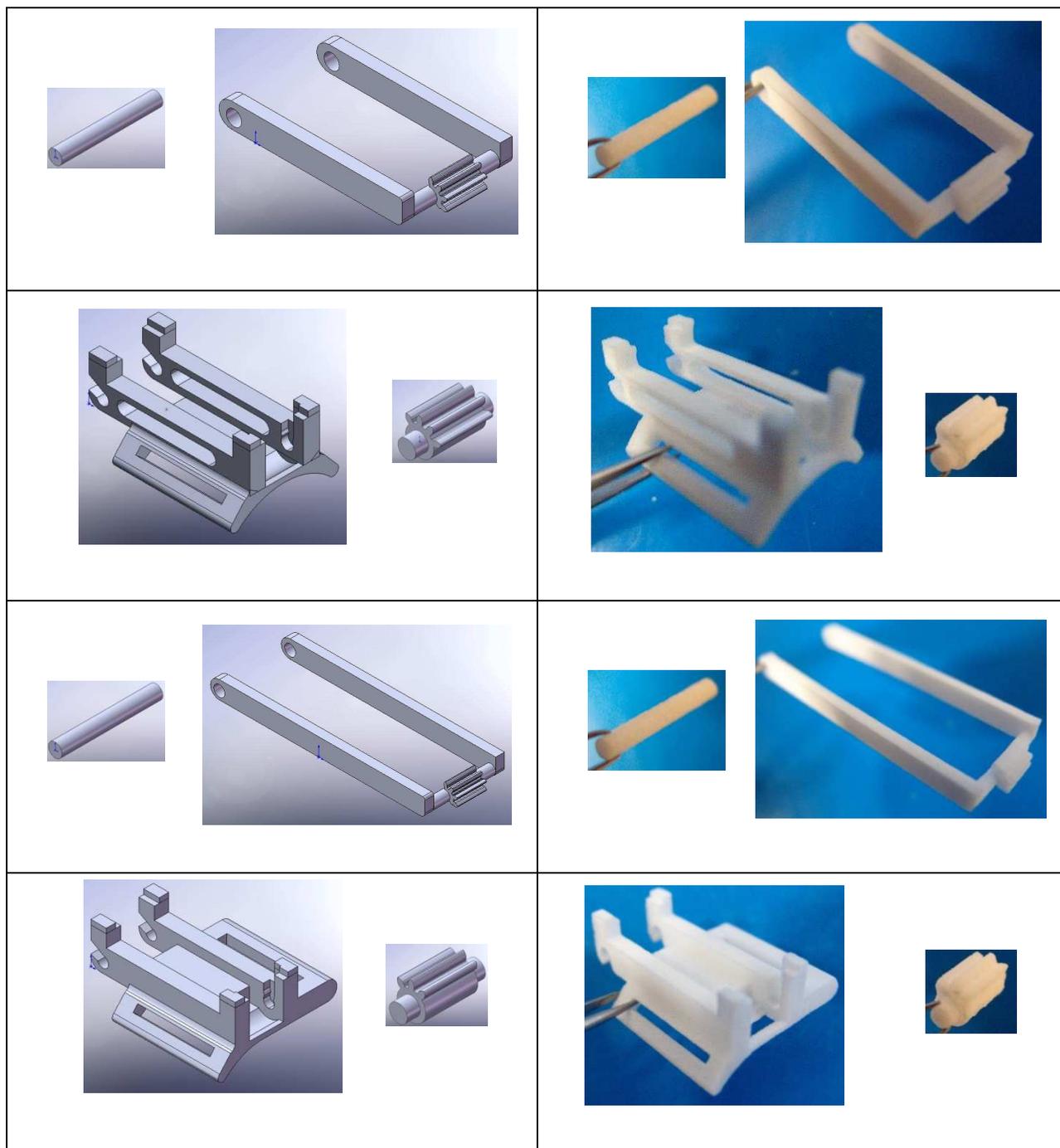
	
	
	

Tabela 4.2b – Modelos virtuais e físicos – Parte 2.



Estando as peças prontas e encaixadas o exoesqueleto foi posto em prática. A Figura 4.17 mostra alguns testes de movimento realizados com o dispositivo em funcionamento para testar

sua eficácia.

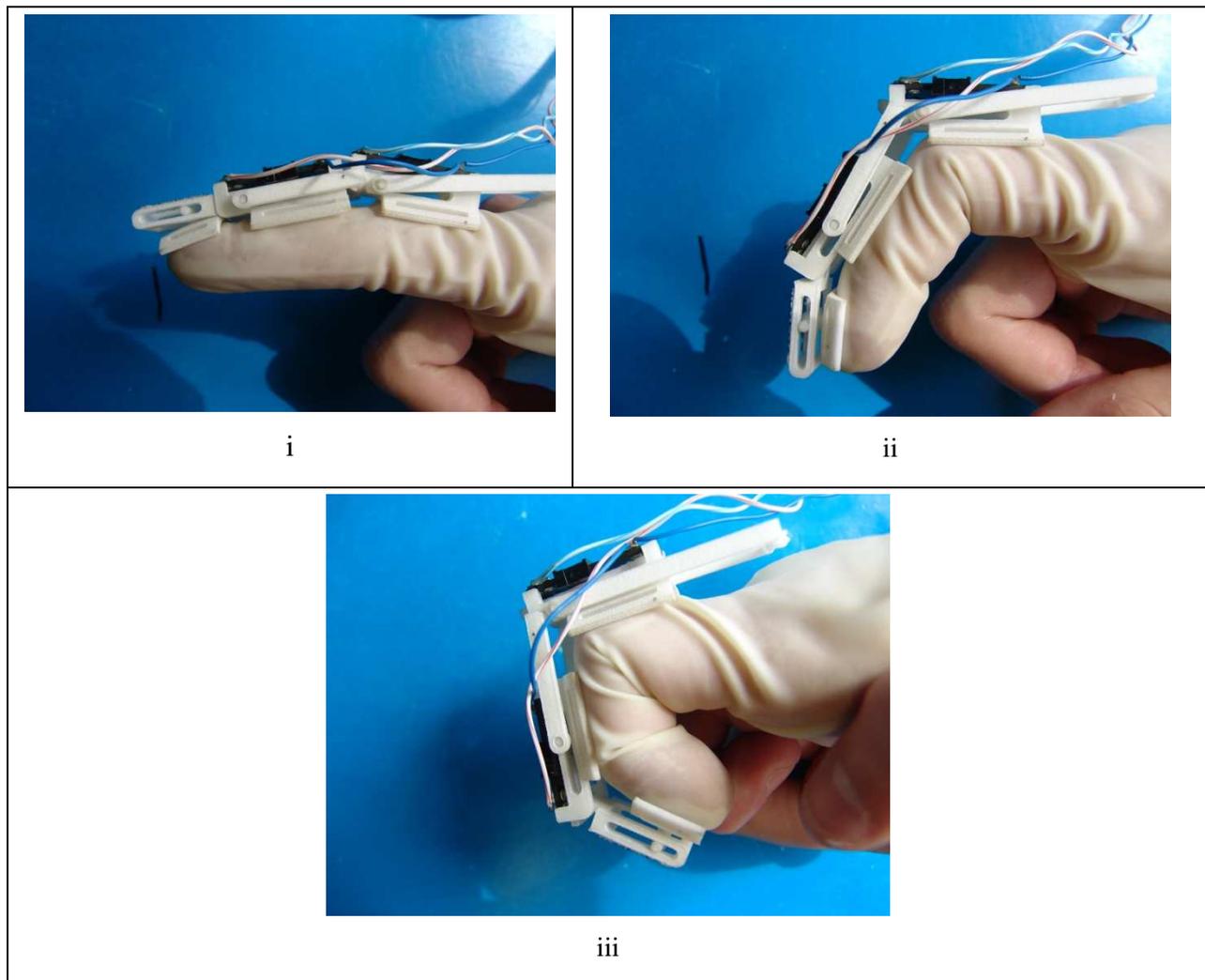


Figura 4.17 – Testes de movimento realizados com o exoesqueleto colocado no dedo

O custo da prototipagem depende do volume que as peças ocupam no *build*¹¹ das máquinas, e também de empresa para empresa. No caso deste trabalho as peças não atingiram o limite mínimo de volume imposto pela tabela de preços do CTI (Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer), portanto, o preço para prototipar todas as peças citadas nas tabelas 4.2 a e b é de

¹¹ Volume total disponível nas máquinas de prototipagem onde serão, camada por camada, prototipadas as peças.

R\$650,00. Como o limite não foi atingido é possível, ainda com o mesmo valor, prototipar, aproximadamente, mais cinco vezes as mesmas peças. Portanto, com esse valor, pode-se prototipar as peças referentes aos outros dedos para completar uma mão, e assim, obter um exoesqueleto completo.

No próximo capítulo uma implementação experimental, visando testes funcionais, com o exoesqueleto, a partir da aquisição dos sinais dos potenciômetros para avaliar a precisão efetiva deles serão apresentadas.

4.5 Conclusões do capítulo

Durante este capítulo, a proposta apresentada no capítulo 3 foi colocada em prática e, a partir de características definidas para o desenvolvimento do exoesqueleto, utilizando tecnologias recentes como a RP e também da modelagem em CAD foi possível efetivamente prototipar o dispositivo.

Pode ser considerado como uma das etapas mais complicadas o método utilizado para a conversão de movimento, pois, geralmente, engrenagens e cremalheiras não são fabricadas utilizando o processo de prototipagem, ao contrário, elas são fresadas a partir de um valor específico conhecido por módulo.

Considerando a importância da RP, foram apresentados, também, detalhes mais específicos desta tecnologia, sendo que não apenas para o tipo de aplicação mostrado nesse capítulo, mas para várias áreas existe o interesse em gerar modelos físicos a partir do virtual e deles realizarem testes funcionais que serão apresentados no próximo capítulo deste trabalho.

Capítulo 5

Implementação experimental

5.1 Sistema Computacional para Aquisição de Sinais

Com o objetivo de obter resultados digitais a partir do uso prático do exoesqueleto, com os potenciômetros acoplados, o *software* LabVIEW® (<http://www.ni.com/labview/>) (acessado dia 16/11/10) foi utilizado visando, entre outros objetivos mais específicos (seção 5.1.3), a geração de gráficos de deslocamento linear em função do tempo. Esta linguagem de programação gráfica utiliza ícones de linhas de texto para criar aplicações. Em contraste com a linguagem de programação baseada em texto para criar aplicações, onde instruções determinam a execução do programa, o LabVIEW® utiliza a programação por “fluxo de dados”, onde o dado determina a execução. O ambiente de desenvolvimento apresenta basicamente três componentes: uma tela inicial, que serve como uma interface do usuário; um diagrama de bloco, que contém os códigos gráficos e ícones, que identificam o instrumento virtual utilizado. Cada projeto referente à alguma aquisição, manipulação ou análise de dados desse *software* é chamado de VI, de *virtual instrument*.

O LabVIEW® (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) utiliza uma linguagem de programação chamada G. Essa linguagem possui diretivas, como PASCAL e C, porém, ao invés de utilizar comandos na forma de texto para gerar as linhas de código, usa uma linguagem de programação gráfica, ou seja, o programa é feito na forma de diagrama de blocos.

Por utilizar uma estrutura de programação orientada pelo fluxo de dados e hierárquica, o LabVIEW® torna simples a implementação de sistemas complexos que englobam aquisição e manipulação de dados, ou ainda o controle de equipamentos através do computador. Além disso inclui diversas bibliotecas compostas por componentes, contendo funções para aplicações específicas (algoritmos de análise estatística, processamento e geração de sinais, etc.).

5.1.1 Desenvolvimento da interface elétrica e comunicação com o computador

Para ser possível realizar testes de qualidade sensitiva e funcional, a partir do uso do exoesqueleto, é necessário que ele esteja, de alguma forma, conectado ao computador e pelo fato da porta de *joystick* do computador já possuir circuito adequado e específico ela foi a escolhida ser esse meio de conexão. A configuração dos pinos dessa porta é vista na Figura 5.1.

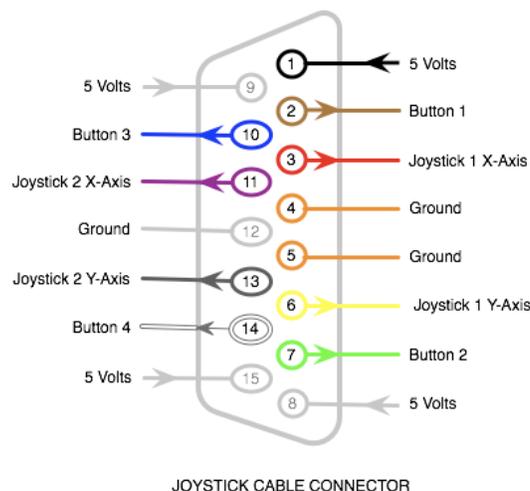
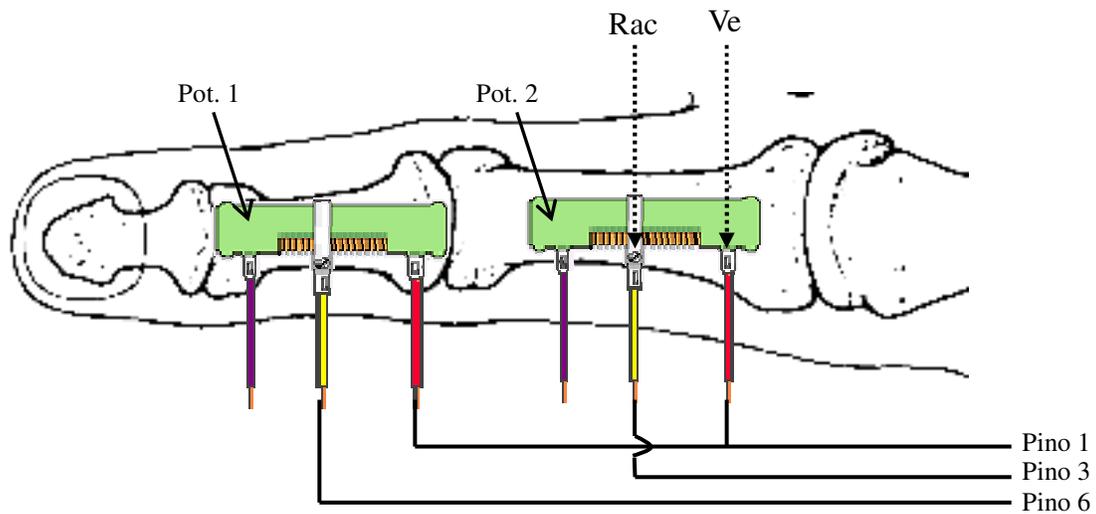


Figura 5.1– Pinos de entrada da porta de *joystick*

Utilizando os pinos de número 1, 3 e 6 foi possível fazer a conexão com os potenciômetros equivalentes às juntas entre as falanges distal e medial e da medial com a proximal. O circuito resultante, ilustrativamente, pode ser observado na Figura 5.2, já a Figura 5.3 mostra o exoesqueleto com esse circuito implementado. O conector macho DB15 (Figura 5.4) foi utilizado para fazer contato com os pinos de entrada da porta do computador. A mesma figura mostra o

cabo utilizado para fazer a conexão exoesqueleto-computador.



Pot. 1: Sensor de posição referente à junta entre a falange distal e medial

Pot. 2: Sensor de posição referente à junta entre a falange medial e proximal

Rac : Vide Figura 4.2

Ve : Vide Figura 4.2

Figura 5.2 – Circuito dos potenciômetros para aquisição de 2 juntas

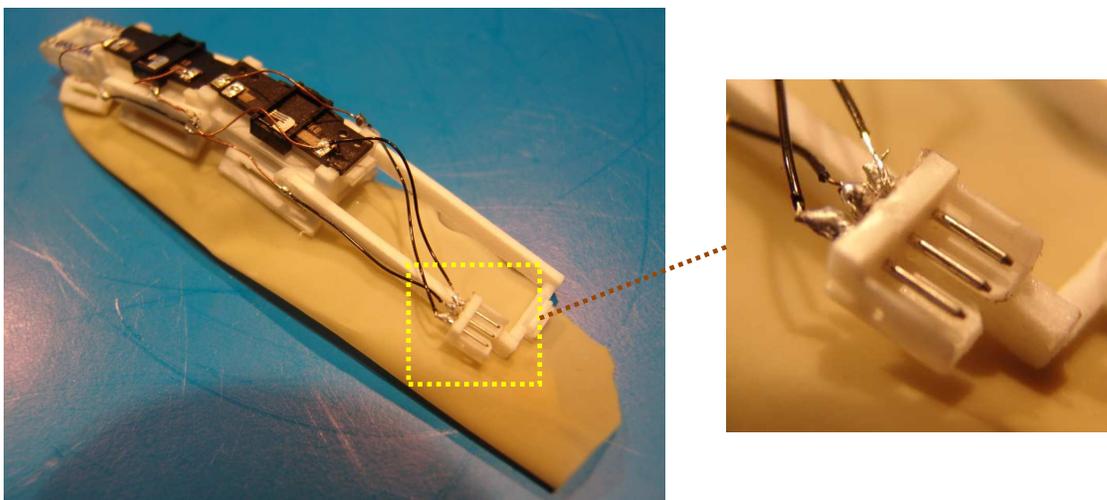


Figura 5.3 – Circuito implementado e plug de conexão com o cabo para conectar à porta de *joystick*.

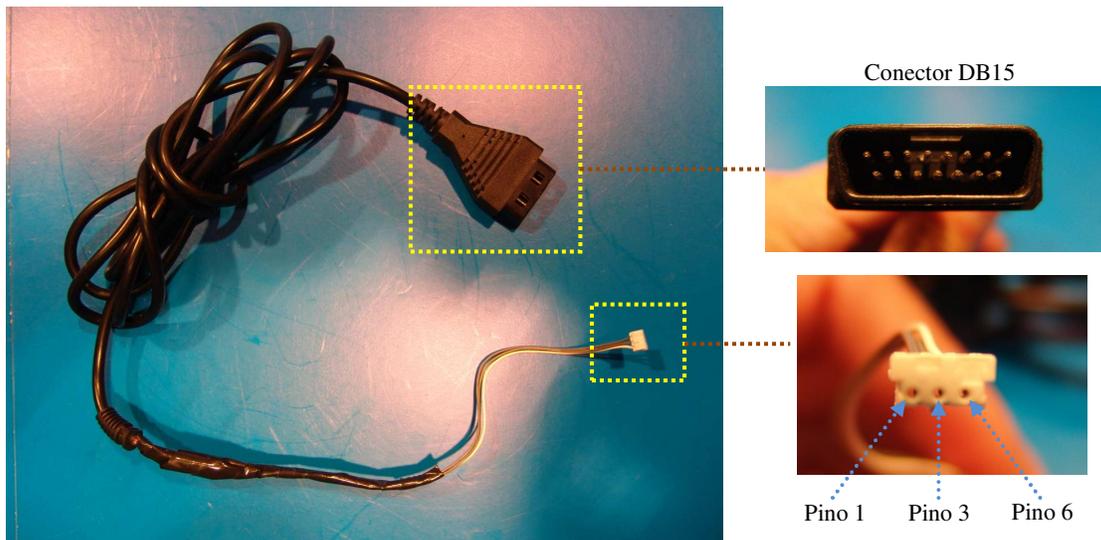


Figura 5.4 – Cabo para conectar o exoesqueleto na porta de *joystick*

Depois de conectado à porta de *joystick* do computador, foi necessário fazer uma calibragem dos sinais obtidos através da adição de um novo periférico do sistema operacional Windows, uma vez que apenas $\approx 2\text{mm}$ da resistência (de um total de $\approx 11,5\text{mm}$) são usados. A janela de calibragem é mostrada na Figura 5.5.

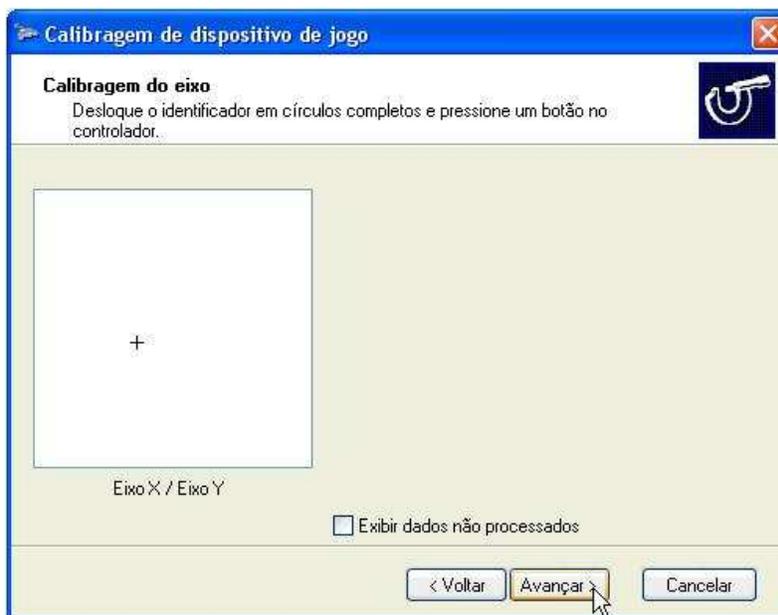


Figura 5.5 – Janela de calibragem de novo dispositivo do sistema operacional Windows

Essa calibragem funciona de modo que o valor mediano do potenciômetro é o primeiro a ser adquirido, ou seja, para este caso de captura de posição da junta do dedo ele deve estar 50% flexionado. Depois de capturado esse sinal o usuário deve flexionar e estender seu dedo atingindo o limite dos movimentos, sendo, dessa forma, calibrado o uso do potenciômetro para apenas o espaço utilizado do potenciômetro.

5.1.2 Painel frontal da interface e diagrama de bloco

Nesta seção, será apresentada a janela do painel frontal e do diagrama de blocos desenvolvidos para a aquisição dos sinais dos potenciômetros acoplados ao exoesqueleto.

A Figura 5.6 mostra o painel frontal do *software* LabView®, que consiste em uma janela apresentada na tela do monitor, na qual são desenhados ícones com formatos que lembram os componentes de um painel de instrumento (botões, indicadores, gráficos, etc). Esses componentes estão associados a vários parâmetros, cujos valores são medidos ou ajustados. O diagrama de blocos, apresentado na Figura 5.7, representa graficamente os processos aos quais estão submetidos as variáveis e parâmetros apresentados no painel frontal. Maiores detalhes sobre o *software* e seus componentes são encontrados no tutorial disponível em (<http://www.ni.com/pdf/manuals/320998a.pdf>) (acessado dia 23/11/2008).

Com o exoesqueleto (Figura 5.3) conectado via cabo (Figura 5.4) à porta de *joystick* do computador, foi possível iniciar a aquisição dos sinais dos potenciômetros e fazer uma análise deles. Os resultados, com detalhes e figuras da aquisição, serão apresentados no capítulo 6.

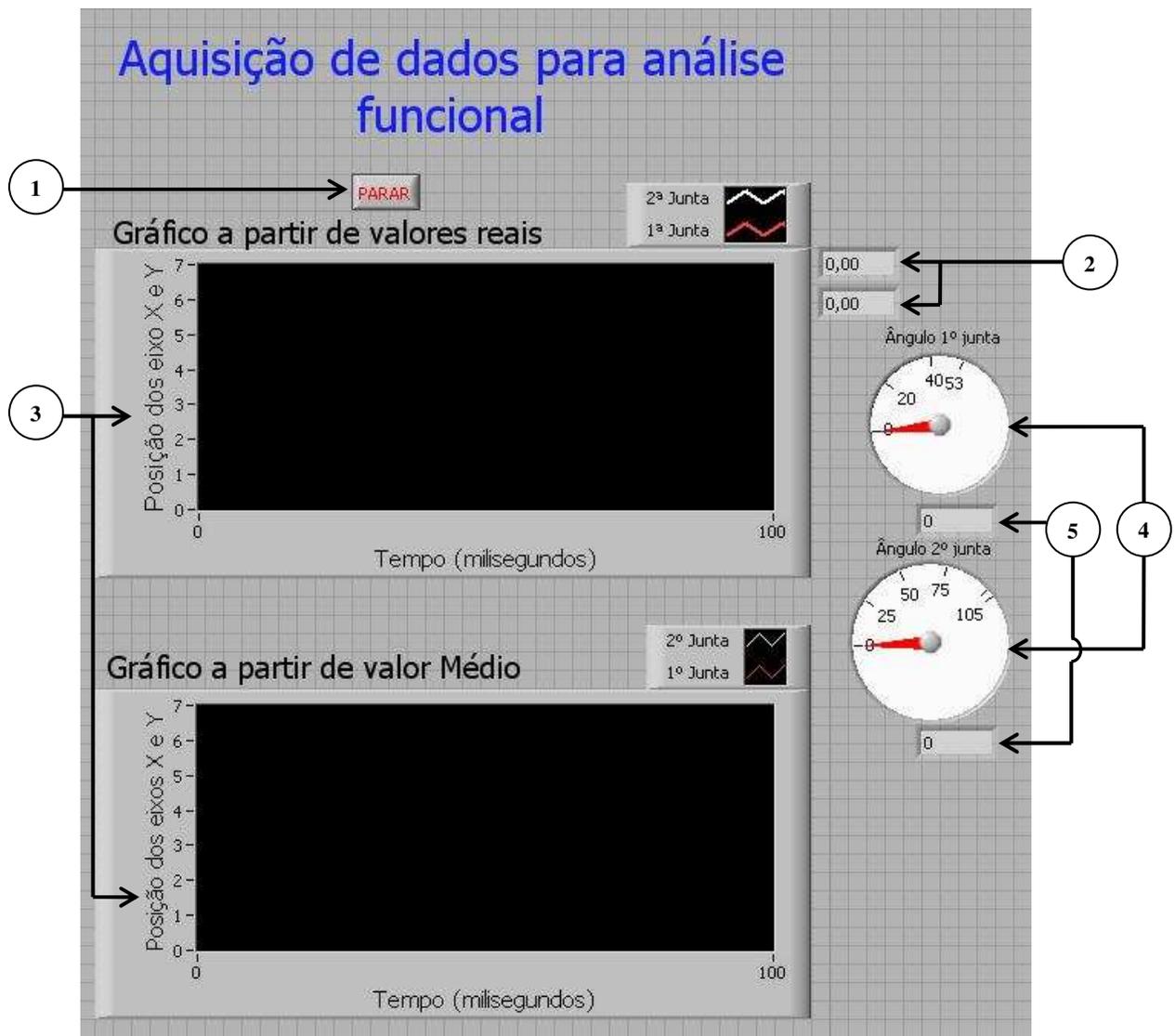


Figura 5.6 – Interface conceitual do instrumento virtual (LabView) - Painel frontal

Onde:

- 1 - Botão para parar a aquisição
- 2 - *Display* digital do sinal atual do gráfico
- 3 – Gráficos (Posição xy X tempo) do sinal capturado do potenciômetro
- 4 - *Display* analógico indicador de posição em graus (°)
- 5 – *Display* digital do valor atual da posição mostrado no item 4

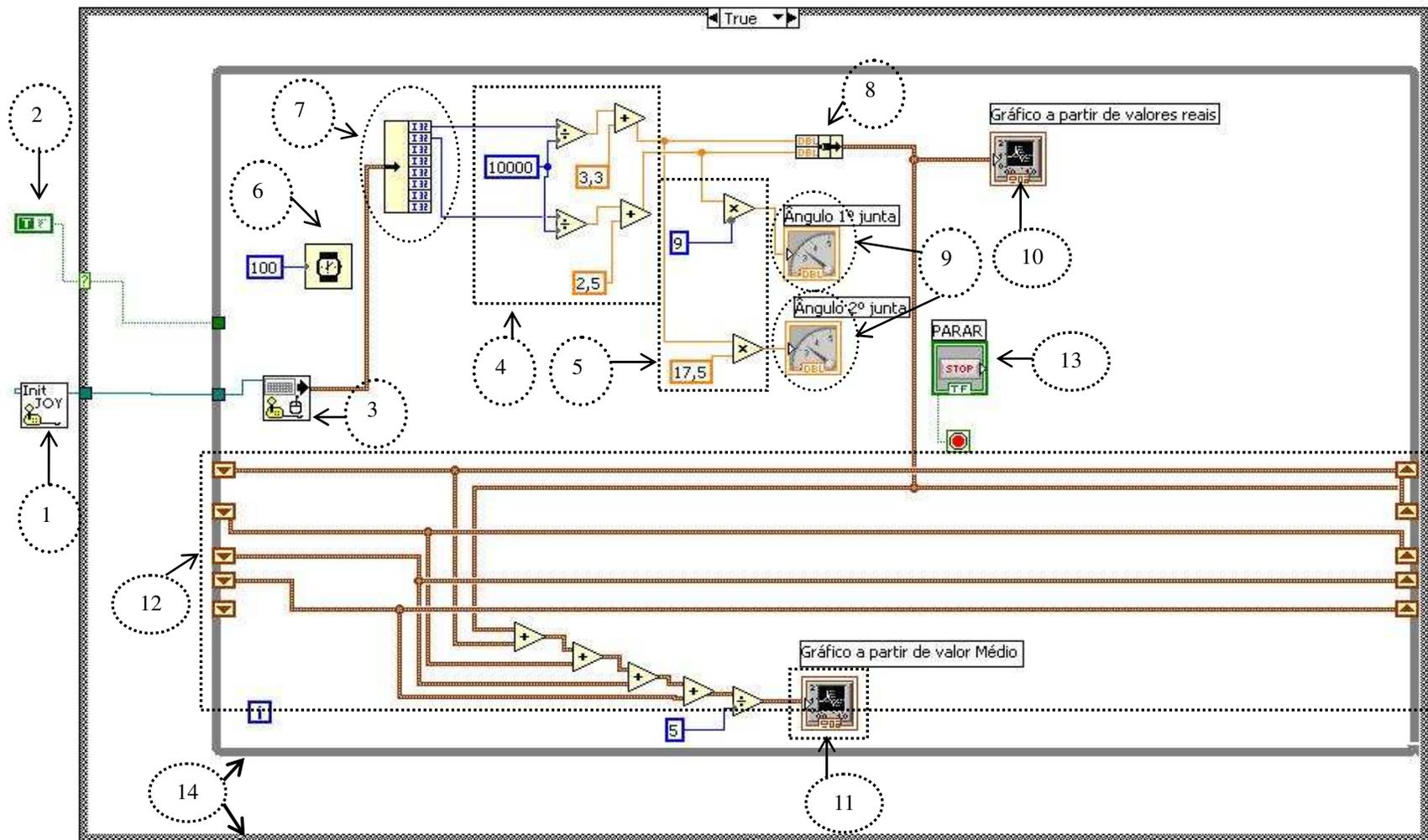


Figura 5.7 – Diagrama de blocos

- Onde:
- 1 - Componente que inicializa um *joystick* conectado à porta do computador.
 - 2 - Componente booleano.
 - 3 - Componente que adquire o sinal do potenciômetro, neste caso essas coordenadas equivalem à posição xy no sistema cartesiano.
 - 4 - Cálculos para normalizar o valor inicial do sinal adquirido, referente à completa extensão do dedo.
 - 5 - Cálculos para relacionar a escala dos sinais do potenciômetro com uma medida angular equivalente.
 - 6 - Temporizador (100 milissegundos) que dita a frequência com a qual é feita a aquisição.
 - 7 - Componente que separa as variáveis referentes à cada eixo.
 - 8 - Componente que une as variáveis referentes à cada eixo.
 - 9 - Componentes referentes ao *display* analógico do painel frontal.
 - 10 - Componente referente ao gráfico de aquisição com valores reais.
 - 11 - Componente referente ao gráfico de aquisição com valores médios.
 - 12 - Componentes que realizam soma de cinco amostras de sinal, proveniente do potenciômetro, para realizar uma média.
 - 13 - Componente que, quando acionado, para o processo de aquisição.

5.1.2.1 Lógica da aquisição dos sinais

A partir da VI apresentada na seção anterior, deu-se início à aquisição dos sinais do potenciômetro. Na seqüência, será explicada a lógica contida no diagrama de blocos (Figura 5.7).

O ícone número 1 é o responsável pela inicialização do exoesqueleto que está conectado ao computador. Nesse ponto o exoesqueleto já havia passado pela fase de calibragem.

Logo após, no ícone 3, o *software* adquire os sinais de cada potenciômetro, onde cada sinal é considerado como uma coordenada para um eixo (x ou y). Estas coordenadas são separadas pelo ícone 7 para poderem ser trabalhadas separadamente. Cada linha azul que sai dele representa

as informações de cada eixo. Como os valores iniciais de cada eixo possuem ordem de grandeza de 10^{-4} , foi necessário normalizá-los para facilitar a análise dos números. Nessa nova escala o valor inicial é igual a zero, o que corresponde ao sinal adquirido com o dedo completamente estendido. Essa normalização é realizada pelos cálculos exibidos na caixa pontilhada de número 4.

A partir desse ponto já foi possível analisar a escala obtido (valores mínimos e máximos referentes às posições das juntas). Com esses dados, a partir de um cálculo de multiplicação apresentado na caixa pontilhada de número 5, foi encontrado um valor, aproximado, do ângulo de rotação das juntas, exibidos então pelos *displays* analógicos de número 9 (associados ao *display* de número 4 da (Figura 5.6). Ao mesmo tempo esses sinais, que antes estavam separados, são novamente unidos pelo ícone 8 e seus valores exibidos pelo ícone de número 10 (associado ao gráfico de número 3, “Gráfico a partir de valores reais”, da (Figura 5.6).

Aproveitando a união dos sinais, na caixa pontilhada de número 12, é feita uma soma com os valores da aquisição de 5 sinais, adquiridos a cada 100 milissegundos, e feito uma média. Esse cálculo, um exemplo simples de filtro que pode ser utilizado, foi realizado visando diminuir o ruído existente na aquisição de apenas um sinal dos potenciômetros, também adquiridos a cada 100 milissegundos (os resultados serão mostrados no próximo capítulo). Estes sinais filtrados são exibidos através do ícone de número 11, que está associado ao gráfico de número 3, “Gráfico de valor médio”, da Figura 5.6.

Todos esses detalhes citados, desde o ícone 1 até o 12, fazem parte de dois *loops* infinitos, representados pelo número 14. Eles são responsáveis por manter a aquisição sempre ativa, capturando sinais numa frequência de 100 milissegundos, podendo ela ser parada, a qualquer momento, através do ícone de número 13, que está associado ao botão número 1 da Figura 5.6.

5.1.3 Objetivos específicos da aquisição

Visando alcançar alguns objetivos específicos com a aquisição de sinais provenientes do

sensor de posição (potenciômetro) a VI, composta pelo painel frontal (Figura 5.6), e pelo diagrama de blocos (Figura 5.7) a ele associado, foi usada. Durante os testes, buscou-se:

1. Avaliar a precisão do sensor.
2. Avaliar tempo de resposta entre ação (flexão/extensão) do usuário com o exoesqueleto e sua respectiva ação realizada no gráfico.
3. Avaliar relação entre a rotação das juntas e suas respectivas associações com o deslocamento linear do sensor de posição.

e por fim

4. Avaliar a possibilidade de uso do exoesqueleto como um futuro dispositivo háptico para manipular/interagir com objetos tridimensionais.

Todos os resultados obtidos, referentes à aquisição de sinais, serão apresentados no próximo capítulo 6.

Capítulo 6

Conclusões e perspectivas futuras

6.1 Resultados obtidos

Analisando os objetivos do projeto, os quais foram apresentados na seção 4.1, é possível concluir através das análises, testes, simulações e, finalmente, provas reais que grande parte dos pontos que demandaram soluções, foi resolvida.

Referente ao conforto que o usuário deve sentir ao usar o exoesqueleto, descrito na seção 2.1.2, o resultado obtido foi um dispositivo muito leve que pesa apenas alguns gramas e que não exerce, praticamente, nenhum tipo de força contrária quando o usuário realiza os movimentos de flexão e extensão; portanto, não causa desconforto.

O projeto deve total importância às tecnologias CAD e RP pelo fato de oferecerem vastos recursos para modelar, simular e prototipar, pois, sem elas, nenhum dos objetivos referentes ao sistema de conversão de movimento (descritos na seção 4.3.2) poderia ser alcançado. Graças aos testes de prototipagem realizados foi possível adaptar o modelo CAD de acordo com o limite de precisão oferecido pelas máquinas e, dessa forma, obter o protótipo físico exatamente como esperado.

Considerando que existiram problemas mais relevantes para serem solucionados, o maior

deles, a conversão do movimento rotativo em linear, foi resolvido através das engrenagens e cremalheiras, considerando o fato que elas, normalmente, são usinadas em tamanhos padrões através de um valor que é conhecido por “módulo”. No caso deste projeto os cálculos foram baseados no diâmetro primitivo, pois o tamanho da engrenagem deveria ser flexível de acordo com o necessário e suficiente para realizar sua tarefa e também, ao invés de ser usinada, foi sinterizada.

Uma questão relevante a ser discutida é com relação ao sensor (transdutor de posição – potenciômetro). As peças fixas às falanges, com exceção da “Peça F1”, foram todas construídas baseadas nas características métricas do sensor, uma vez que ele possui tamanho fixo e foi o principal componente utilizada como meio para transformar movimento mecânico em sinais elétricos. Portanto, caso fosse encontrado um sensor menor e mais preciso, o tamanho do exoesqueleto poderia ser menor e a qualidade de conversão poderia melhorar.

O objetivo, de relevada importância, de desenvolver um dispositivo de baixo custo, também foi atingido, uma vez feito uma comparação entre o valor total gasto com o desenvolvimento do exoesqueleto, (R\$650,00) e com os sensores de posição, (R\$3,00 cada, total R\$6,00) que foi de R\$606,00, e os valores de dispositivos citados na Tabela 2.2, do capítulo 2. Lembrando que, pelo fato do dispositivo deste trabalho ser um exoesqueleto, é possível, futuramente, aplicar atuadores nele, tornando possível o retorno de força ao usuário.

Outro fato importante é que, com o exoesqueleto grudado na luva de látex o usuário não possui limites para realizar os movimentos, alcançando dessa forma o objetivo número 4 da seção 4.1.. As peças responsáveis pela conversão de movimento rotativo em linear da junta entre a falange proximal e o metacarpo não puderam ser, perfeitamente, encaixadas e, por esse motivo, apenas as outras duas juntas tiveram seu movimento convertido.

De uma maneira geral, mesmo com alguns objetivos não sendo atingidos, os resultados foram satisfatórios para a finalidade do projeto o que possibilita sua continuidade para uma adaptação em um dispositivo mais completo.

6.1.1 Resultados da aquisição de sinais

A partir do uso da VI criada no *software* LabView, e apresentada no capítulo 5, foi possível fazer uma análise primária dos sinais dos potenciômetros e partir disso tirar algumas conclusões a respeito da eficiência e qualidade deles.

Os testes foram realizados visando atingir os objetivos descritos na seção 5.1.3 do capítulo 5.

Iniciando os resultados pelo item um dos objetivos (avaliar a precisão do potenciômetro) é possível fazer uma comparação, a partir da Figura 6.1, entre os sinais adquiridos não filtrados e exibidos no gráfico “Gráfico a partir de valores reais”, e os sinais filtrados, exibidos no gráfico “Gráfico a partir de valor médio”.

Nota-se uma diferença entre os dois sinais com relação a ruídos. Isso significa uma instabilidade, o que deveria ser evitado, quando o exoesqueleto encontra-se numa posição fixa (como, por exemplo, os sinais adquiridos entre os ≈ 220 e 231 milissegundos). Dependendo de qual será a aplicação do sinal adquirido, será necessário avaliar o nível de precisão exigido e analisar se, nessa aplicação, essa instabilidade será prejudicial. Caso seja, é possível utilizar o sinal filtrado, que oferece mais estabilidade na mesma frequência. É importante lembrar que existem diversos meios para diminuir os ruídos de sinais provenientes de sensores de posição, e que o utilizado nesse projeto pode não ser o mais adequado.

Não foram realizados testes com o exoesqueleto em um ambiente de interação com objetos tridimensionais, porém, mesmo com certa instabilidade, é possível dizer que, aparentemente, baseado na diferença citada na Tabela 6.1 (valores adquiridos a partir da Figura 6.2), não haveria problema em utilizar esses sinais para orientar um avatar em uma interação que não exija muita precisão. Os resultados, referentes aos outros objetivos restantes, serão comentados adiante e agregarão valores a essa hipótese. Já no caso de uma aplicação onde é exigido alto nível de

precisão, por exemplo, em uma cirurgia tele-operada, é necessário o uso de um filtro mais especializado e, portanto, o uso do sensor, testado nesta dissertação, não é recomendado.

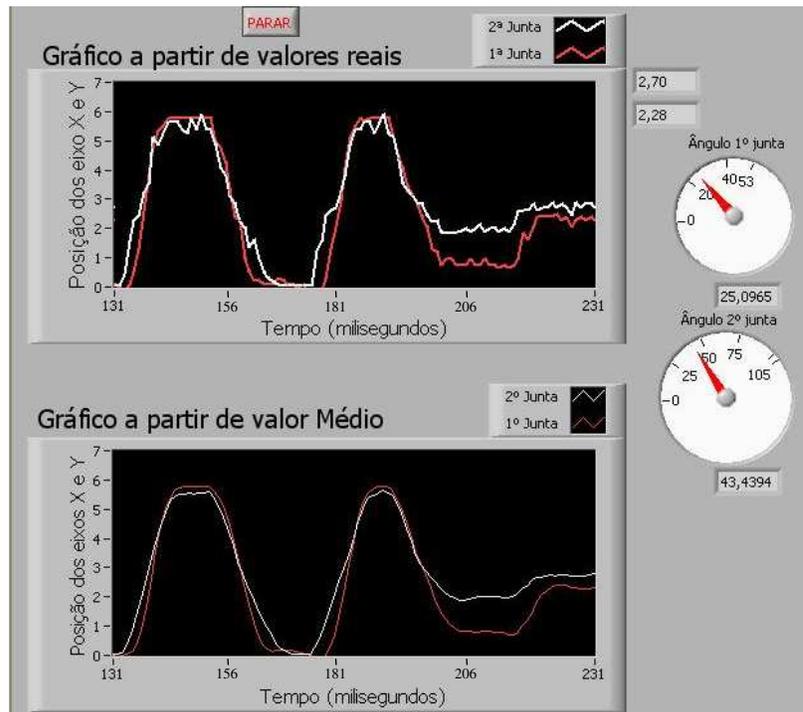


Figura 6.1 – Avaliação de precisão do potenciômetro



Figura 6.2 – Sinais do potenciômetro em um intervalo de frequência.

Tabela 6.1 – Análise de precisão para um intervalo de frequência

		Equivalente em graus (°)	Diferença
Sinal máximo	≈ 2,9	≈ 50,75	≈ 7°
Sinal mínimo	≈ 2,5	≈ 43,75	

Passando para o item dois dos objetivos [avaliar tempo de resposta entre os movimentos do

usuário (flexão/extensão do dedo) com o exoesqueleto e sua respectiva ação realizada no gráfico], não foram realizados testes que pudessem comprovar esse tempo de resposta, porém, através da experiência do próprio autor com o uso do exoesqueleto e a VI, do *software* LabView, é possível dizer que esse tempo está bem abaixo de 1 segundo (desde o exato instante em que o movimento é realizado até quando os respectivos sinais são exibidos no gráfico). Vale lembrar que esse tempo de resposta é muito relativo, pois dependendo de alguns fatores, como por exemplo o uso de uma conexão mais avançada entre o exoesqueleto e o computador, esse tempo pode variar muito, tanto para menos quanto para mais.

Para tentar avaliar a relação entre a rotação das juntas e suas respectivas associações com o deslocamento linear do sensor de posição, item três dos objetivos, foram realizados testes onde o exoesqueleto foi submetido aos seus limites, e com isso foi possível fazer uma análise para estudar essa relação.

A Figura 6.3 mostra os limites extremos de movimento (flexão: sinais em $\approx 5,78$ para a 1ª junta, entre falange distal e medial, que equivale à $\approx 52^\circ$; sinais em $\approx 5,13$ para 2ª junta, entre falange medial e proximal, que equivale à $\approx 90^\circ$; extensão: ≈ 0 para ambas, equivalente à $\approx 0^\circ$). A partir desses valores, é possível concluir que o exoesqueleto atinge, praticamente, o limite de flexão para a 1ª junta, o que é excelente, pois está obedecendo à seguinte relação: limite mínimo (sinal ≈ 0) equivale à junta totalmente estendida e limite máximo (sinal $\approx 5,13$) equivale à junta totalmente flexionada, cuja rotação máxima é de $\approx 53^\circ$.

Considerando os resultados para a 2ª junta, baseado nos valores exibidos na mesma figura, esperava-se que os sinais adquiridos, referentes à flexão total, fossem representar uma relação coerente com o movimento, porém, o sinal máximo foi de $\approx 5,13$, equivalente a $\approx 90^\circ$, o que deveria ser $\approx 105^\circ$. Já o sinal mínimo, referente à total extensão da junta, foi ≈ 0 , o que significa que ele está, praticamente, relacionado com a posição do dedo.

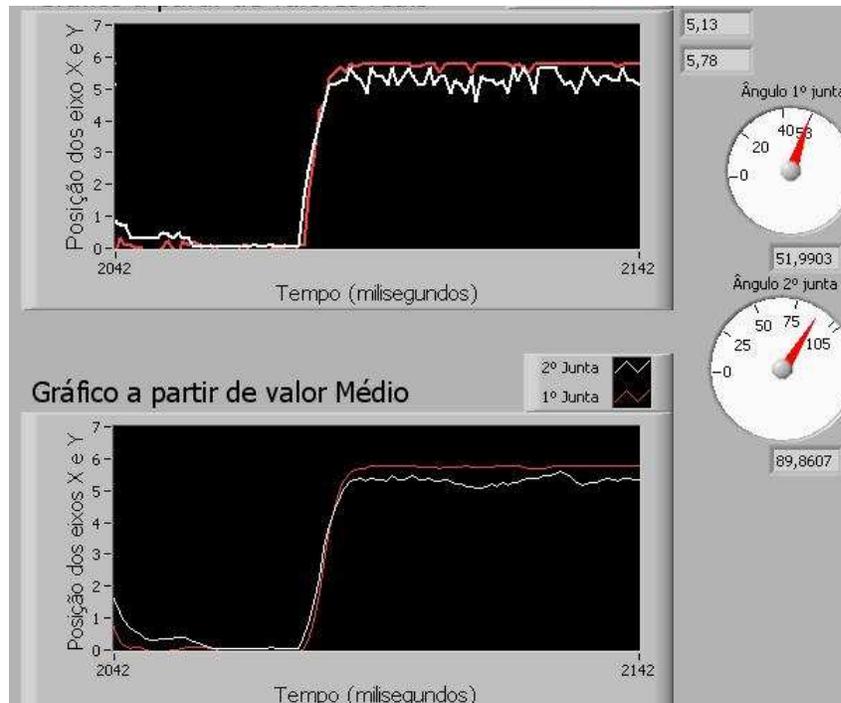


Figura 6.3 – Testando os limites do exoesqueleto.

Com esses valores é possível concluir que a relação entre os sinais do potenciômetro, referentes à 2ª junta, deve ser melhorada visando um melhor comprometimento do sinal máximo com a flexão total da junta.

A proporcionalidade dessa relação é muito importante, considerando determinadas aplicações, porém, em casos mais simples de manipulação/interação essa diferença, 90° para 105°, não é prejudicial.

Sendo assim, baseado nesses resultados e considerando o 4º, e último, objetivo (avaliar a possibilidade de uso do exoesqueleto como um futuro dispositivo háptico para manipular/interagir com objetos tridimensionais), pode-se dizer que é plausível o uso do exoesqueleto, desenvolvido e apresentado nesta dissertação, para a finalidade desse objetivo. As ações realizadas pelo avatar, porém, devem ser simples, ou seja, ações como agarrar, pegar, girar, entre outros, levando em conta a qualidade sensitiva do potenciômetro estudada até o

momento.

6.2 Principais contribuições do trabalho

Durante toda a revisão bibliográfica foi comentado sobre dispositivos responsáveis por diversos tipos de aplicação.

De acordo com o modelo de exoesqueleto desenvolvido nesse projeto, é possível contribuir também com aplicações na área de reabilitação humana, controle robótico e também numa melhor compreensão dos limites da capacidade da tecnologia RP, uma vez que para prototipar o exoesqueleto foram necessárias 8 tentativas onde as características métricas dele eram modificadas, visando o encaixe correto das peças e o funcionamento do dispositivo quando este estivesse sendo usado.

6.3 Próximas etapas e perspectivas futuras

Considerando os objetivos alcançados do projeto e, principalmente, a intenção citada no título da dissertação, “interação com objetos tridimensionais”, para que seja possível, efetivamente, realizar um trabalho no qual o dispositivo se conecte com um hardware computacional, tornando possível, via *software* e outros recursos, essa interação, é necessário, no entanto, desenvolver o exoesqueleto por completo. Da mesma forma, para fins de melhora na qualidade da relação citada no item 3 dos objetivos da seção 5.1.3, será necessário um estudo mais aprofundado dos sinais do potenciômetro.

Esse desenvolvimento implica na adaptação do dispositivo descrito nesta dissertação para os demais dedos, principalmente, para o polegar cujos movimentos são mais complexos. Da mesma forma será necessário estudar a melhor opção para tratar a questão computacional, uma vez que será ela a responsável em tratar os sinais elétricos originados da mão humana e utilizá-los para manipular a mão virtual.

Outros trabalhos também podem ser realizados através dessa idéia. Uma das áreas que pode ser beneficiada é a de reabilitação humana, pois, se o exoesqueleto atuar na mão do usuário, ele terá os movimentos de extensão e flexão realizados pelo dispositivo trabalhando de forma a recuperar gradativamente os movimentos perdidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahrens, C. H., Ferreira, C. V., Petrusch, G., De Carvalho, J., Santos, J. R. L., Da Silva, J. V. L., Volpato, N. Prototipagem Rápida. *Editora Edgard Blücher*, 2007, 266 p.
- Provenza, F. *Desenhista de Máquinas*. São Paulo: Escola Pro-tec, 3ª.ed., 1976
- Bárbara, A. S. *Processamento de Imagens Tomográficas para Modelagem Virtual e Física – O Software Invesálius*. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006, 429 p. 2006
- Bouzit, M., Burdea, G., Popescu, G., Boian, R. The Rutgers Master II - New Design Force-Feedback Glove. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, v. 7, (2), pp. 256-263. 2002.
- Brewster, S. A. The Impact of ‘Touching’ Technology on Cultural Applications. *In proceedings of EVA’01*, 2001, pp. 1-14.
- Brooks, F. P. J. Grasping Reality Through Ilusion: Interactive Graphics Serving Science. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1988, pp. 1-11.
- Brooks, F. P. J., Ouh-Young, M., Batter, J. J., Jerome, P. Project GROPE – Haptic Displays for Scientific Visualization. *Computer Graphics*, 1990, v (24), 4, pp 177-185.

- Cadoz, C., Lisowski, L., Florens, J. A Modular Feedback Keyboard Design. *Computer Music Journal*, 1990, v. 14, (2), pp. 47-51.
- Foley, J. D. Interfaces for Advanced Computing. *Scientific American*, 1987, (4), pp 126-135.
- Gibson, J. J. Observations on Active Touch. *Psychological Review*. v. 69, (6), pp. 477-491, 1962.
- Goertz, R.C. Mechanical master-slave manipulator. *Nucleonics*, v. 12, (11), pp.45-49, 1954.
- Gupta, A., O'Malley, M. K. Design of a Arm Exoskeleton for Training and Rehabilitation. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. 11, (13), pp. 280-289, 2006.
- Hannaford, B. A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v.5 (4), pp. 426-434, 1989.
- Iwata, H. Artificial Reality with force-feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator. *Computer Graphics*, 1990, v.24, (4), pp. 165-170.
- Kapandji, A.I. *Fisiologia Articular – Membro Superior*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 298 p. 2000.
- Katz, D., Krueger, L. E. Book Reviews: The World of Touch. *American Journal of Psychology*, v. 104, (1), pp. 147-150, 1991.
- Koyama, T., Yamano, I., Takemura, K. Maeno, T. Multi-fingered exoskeleton haptic device using passive force feedback for dexterous teleoperation. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, 2002, v. 3, pp. 2905-2910.
- Lederman, S. J., Klatzky, R. L. Metzger, V. Identifying Objects by Touch: An Expert System.

Perception and Psychophysics, 1985, v. 37, (4), pp. 299-302.

Lederman, S. J., Klatzky, R. L. Hand Movements: a window into haptic object recognition. *Cognit Psychol*, 1987, v. 19, (3). pp. 342-368

Lederman, S. J., Klatzky, R. L. The intelligent hand: An Experimental Approach to Human Object Recognition and Implications for Robotic and AI. *AI Magazine*, 1994, v. 15, (1), pp.26-38.

Mark, W. R., Randolph, S. C., Finch, M. Verth, J. M. Taylor, R. M. Adding Force Feedback to Graphics Systems: Issues and Solutions. *Proceeding in Computer Graphics Annual Conference Series*, 1996, pp. 447-452.

Massimo, B., Antonio, F., Carlo, A. A., “Exoskeletons as Man-machine Interface , Systems for Teleoperation and Interaction in Virtual Environments”. *Advances in Telerobotics*, 2007, pp. 60-76.

Moreira, F. *Operação e Controlo de Equipamentos Industriais à Distância: Desenvolvimento de Teleserviços para sistemas FAC*. Universidade do Minho, Portugal, 1998, 137 p. Tese (Mestrado).

Mosher, R. S. Industrial Manipulators. *Scientific American*, v. 211,(4), pp. 88-96, 1964.

National Instruments Corporation. LabView®: “Tutorial Manual”, Part Number 320998A-01., version of software 6.0, January 1996 Edition.

Perlin, K. An Image Synthesizer. *Computer Graphics*, 1985, v. 19, (3), pp. 287-296

Révész, G., Wolf, H. A. Reviewed work(s): Psychology and Art of the Blind. *The Quarterly Review of Biology*, v. 27, (2), pp. 243, 1952.

Rosário, J. M. *Princípios de Mecatrônica*. São Paulo: Prentice Hall. 2005

Salisbury, J. K. Jr. Making Graphics Physically Tangible. *Communications of the ACM*, 1999, v. 42, (8), pp. 75-81.

Salisbury, K., Conti, F., Barbagli, F. Haptic Rendering: Introductory Concepts. *Proceedings of the IEEE Computer Society*, 2004, v. 24, (2), pp. 24-32.

Srinivasan, M. A., Haptic Interfaces. *N. Durlach & A. S. Mavor (Eds.), Virtual Reality: Scientific and Technical Challenges*. National Academy Press. 1995, pp. 161-187.

Stergiopoulos, P., Fuchs, P., Laugeau, C. Design of a 2-Finger Hand Exoskeleton for VR Grasping Simulation. *EuroHaptics 2003*.

Stone, R. J. Haptic Feedback: A Brief History, From Telepresence to Virtual Reality. *Proceedings of the First International Workshop on Haptic Human-Computer Interaction*, August/September 2000, pp. 1-16.

Sturman, D. J. *Whole-hand Input*. Massachusetts Institute of Technology, Universidade de Rutgers, Massachusetts, 1991, 233 p. Tese (Doutorado)

Torre, G. R. D. L., Grant, D., Cruz-Hernandez, M., Astley, O. R., Hayward, V. Haptic interfaces and devices. *Sensor Review*, 2004, v.24,(1), pp. 16-29.

Turki, L., Coiffet, P. On grasp synthesis and planning of multifingered robot hands for a telemanipulation task. *Proceedings of the 4th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, RO-MAN'95, 1995, pp. 141-146.

Ueda, Y., Yamano, I., Maeno, T. Development of a Grounded Haptic Device and a 5-Fingered Robot Hand for Dexterous Teleoperation. *Proceedings of the International Symposium on Robotics and Automation*, 2004.

Vieira, V. O Tato do Mundo Virtual. *Revista Veja*, Edição nº 2056, 16 de Abril de 2008. (http://veja.abril.com.br/160408/p_100.shtml) (ultimo acesso dia 28/10/2008)

Zilles, C. B., Salisbury, J. K. A Constraint-based God-Object Method for Haptic Display. *Proceedings of the IEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Human Robot Interaction, and Cooperative Robots*, 1995, v. 3, p. 3146.

Zimmerman, T. G., Lanier, J., Blanchard, C., Bryson, S., Harvill, Y. A Hand Gesture Interface Device. *Proceedings of the SIGCHI/GI Conference on Human Factors in Computing Systems and Graphics Interface*, 1987, pp. 189-192.

Anexo A – Especificações Métricas do Exoesqueleto

Este anexo tem como objetivo mostrar as medidas utilizadas para o desenvolvimento das peças através da tecnologia CAD. Para facilitar o leitor desse trabalho, a tabela descrita a seguir indica os nomes de cada peça implementada com sua respectiva página.

Tabela A.1 – Especificações Métricas das peças implementadas.

Figura	Descrição	Página
A.1	Especificações métricas da “Peça F1 e F2”	90
A.2	Especificações métricas da “Peça F1”	91
A.3	Especificações métricas da “Peça F2”	92
A.4	Especificações métricas da “Peça F3”	93
A.5	Especificações métricas da “Peça Metacarpo”	94
A.6	Especificações métricas da “Peça F2 e F3”	95
A.7	Especificações métricas da “Peça F3 e Metacarpo”	96
A.8	Especificações métricas da “Engrenagem de apoio 53°”	97
A.9	Especificações métricas da “Engrenagem de apoio 105°”	98
A.10	Especificações métricas do “Cilindro do eixo das falanges”	99
A.11	Especificações métricas da “Cremalheira”	100

A.1. “Peça F1 e F2”

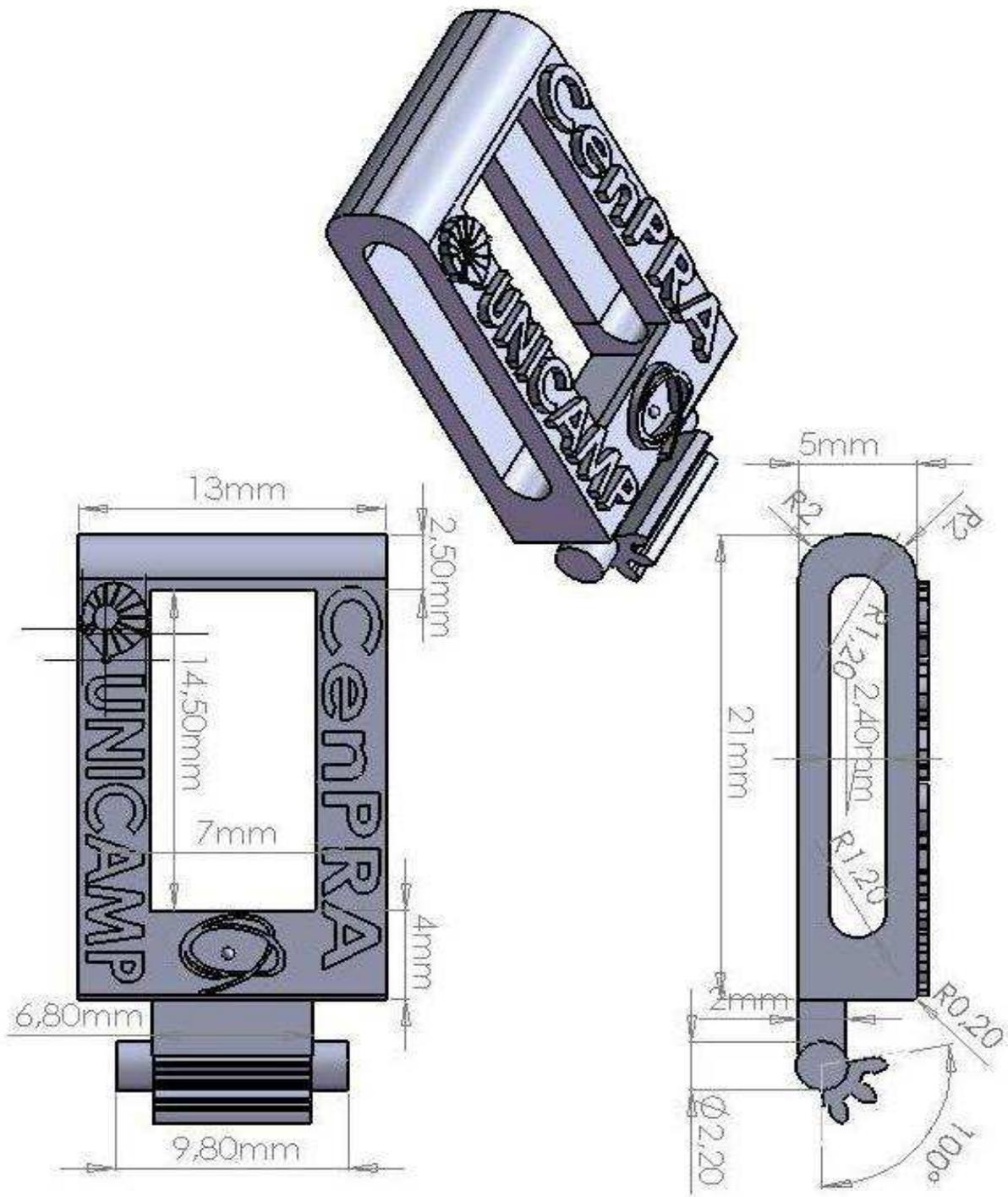


Figura A.1 - Especificações métricas da “Peça F1 e F2”

A.2. “Peça F1”

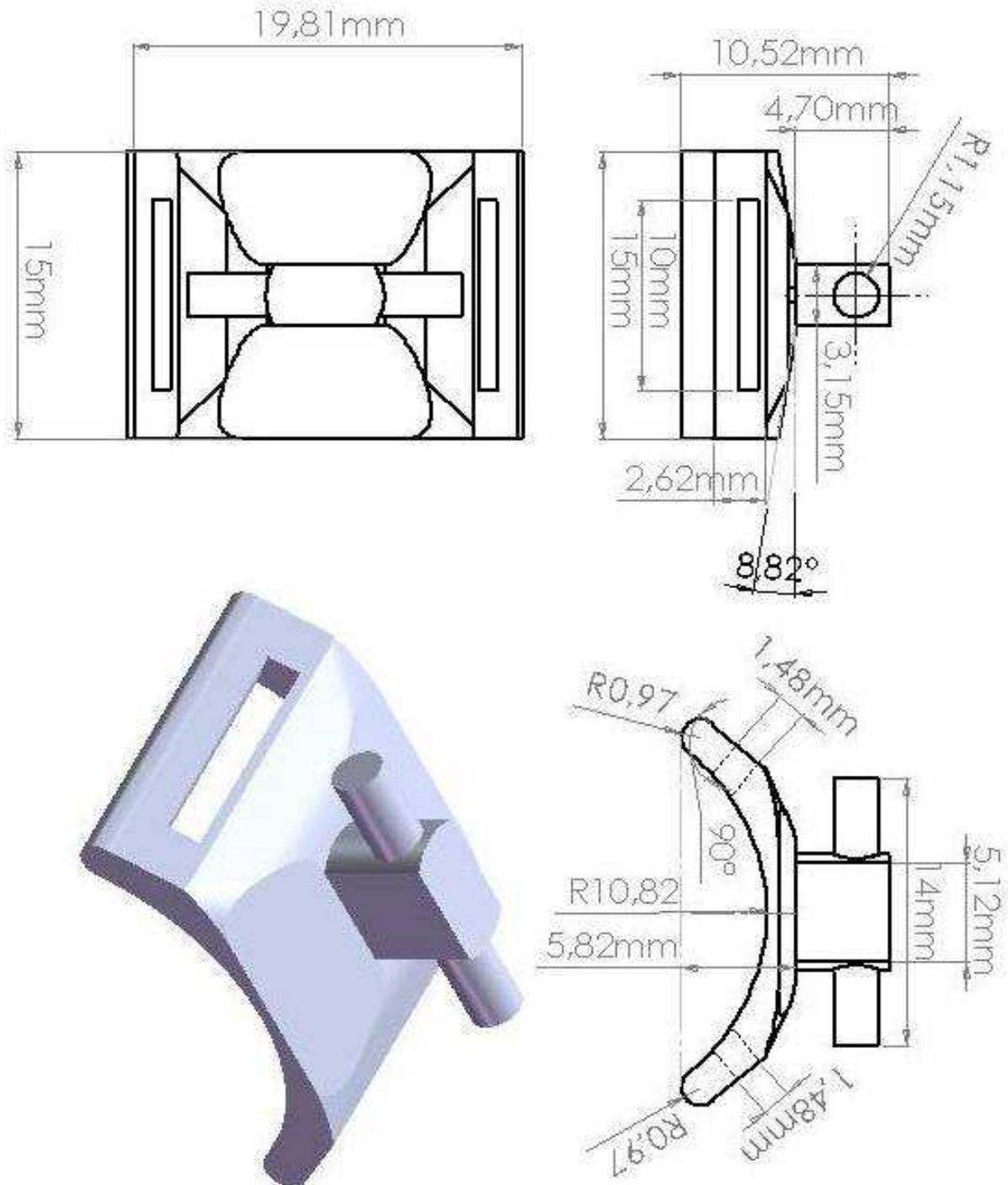


Figura A.2 - Especificações métricas da “Peça F1”

A.3. “Peça F2”

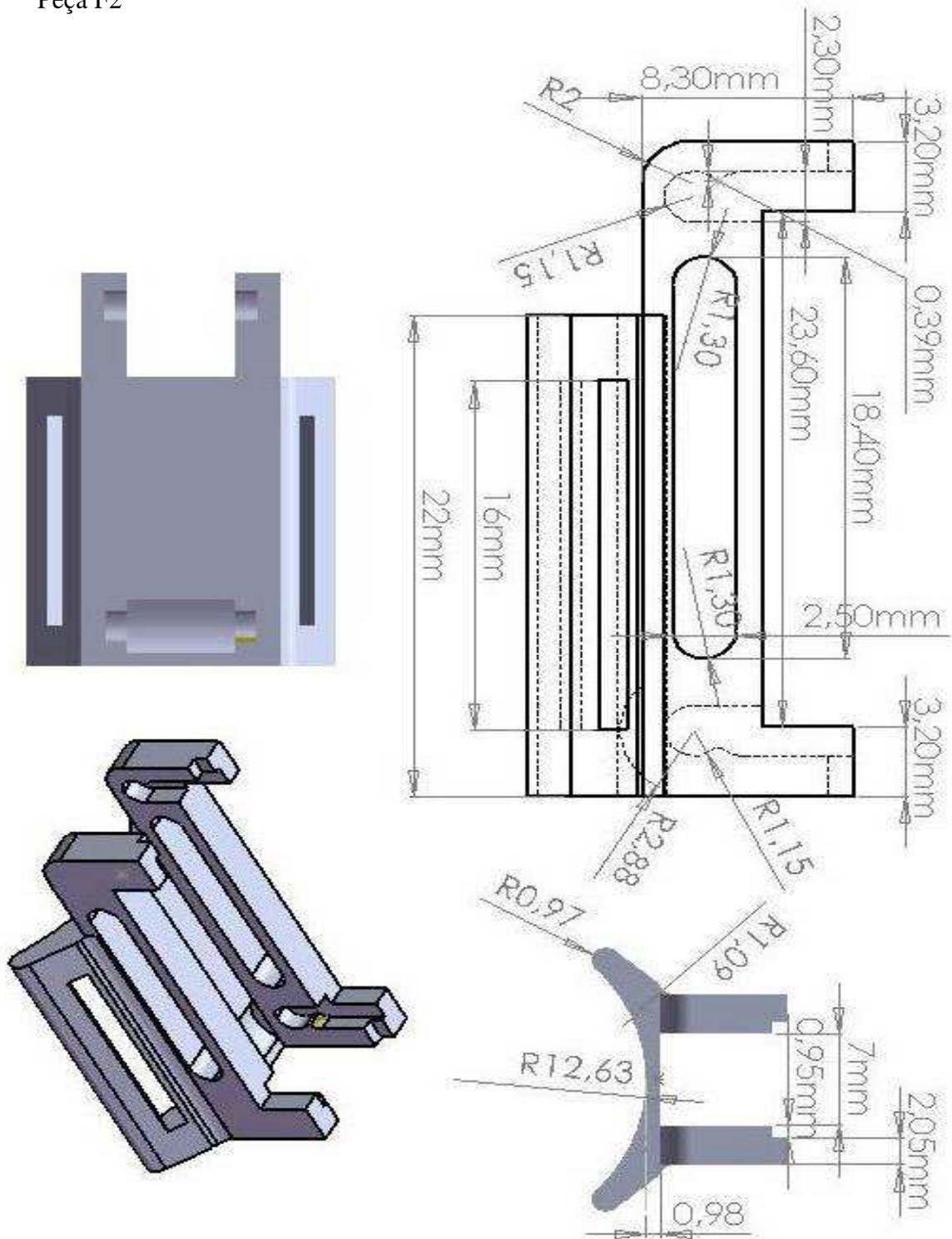


Figura A.3 - Especificações métricas da “Peça F2”

A.4. “Peça F3”

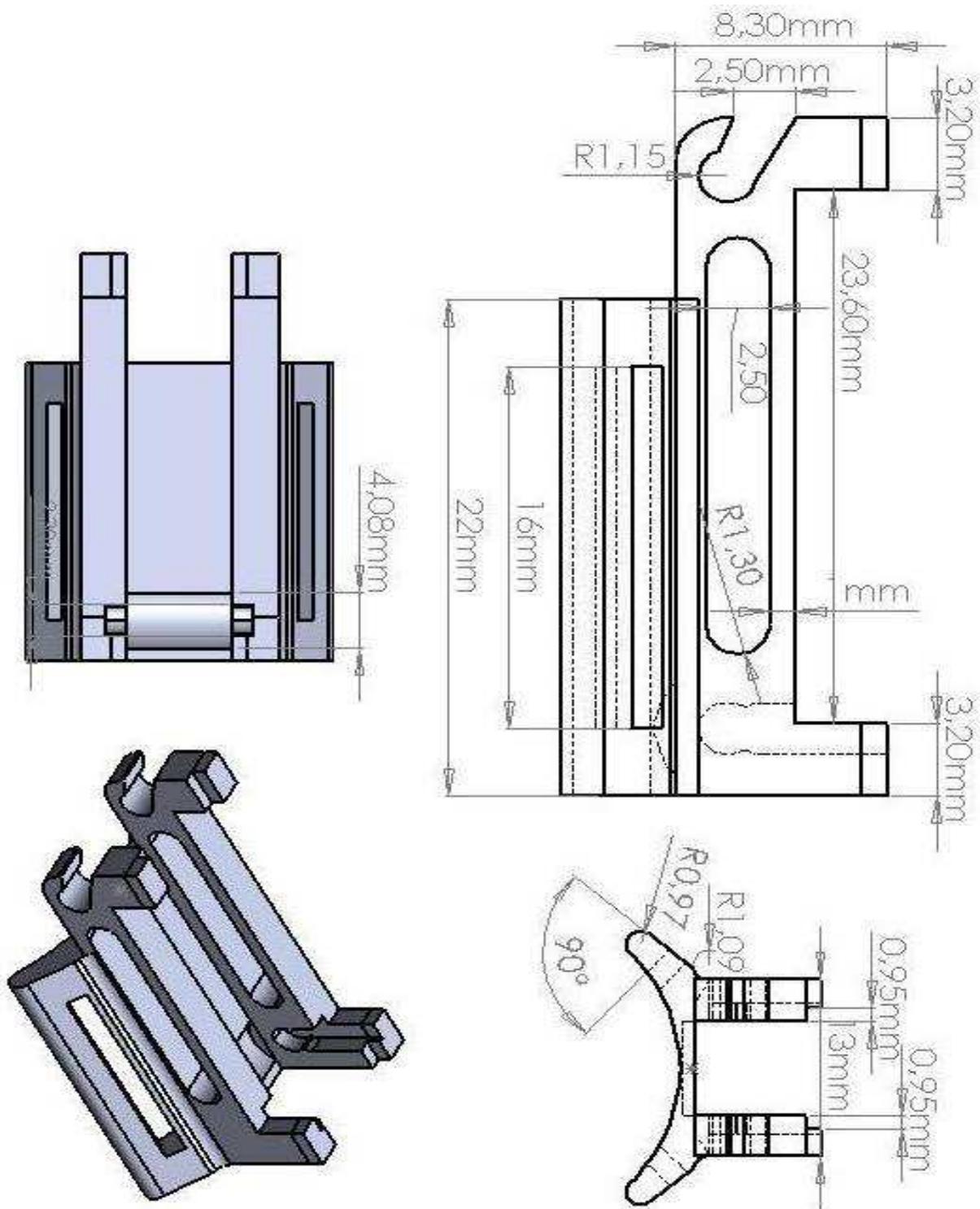


Figura A.4 - Especificações métricas da “Peça F3”

A.5. “Peça Metacarpo”

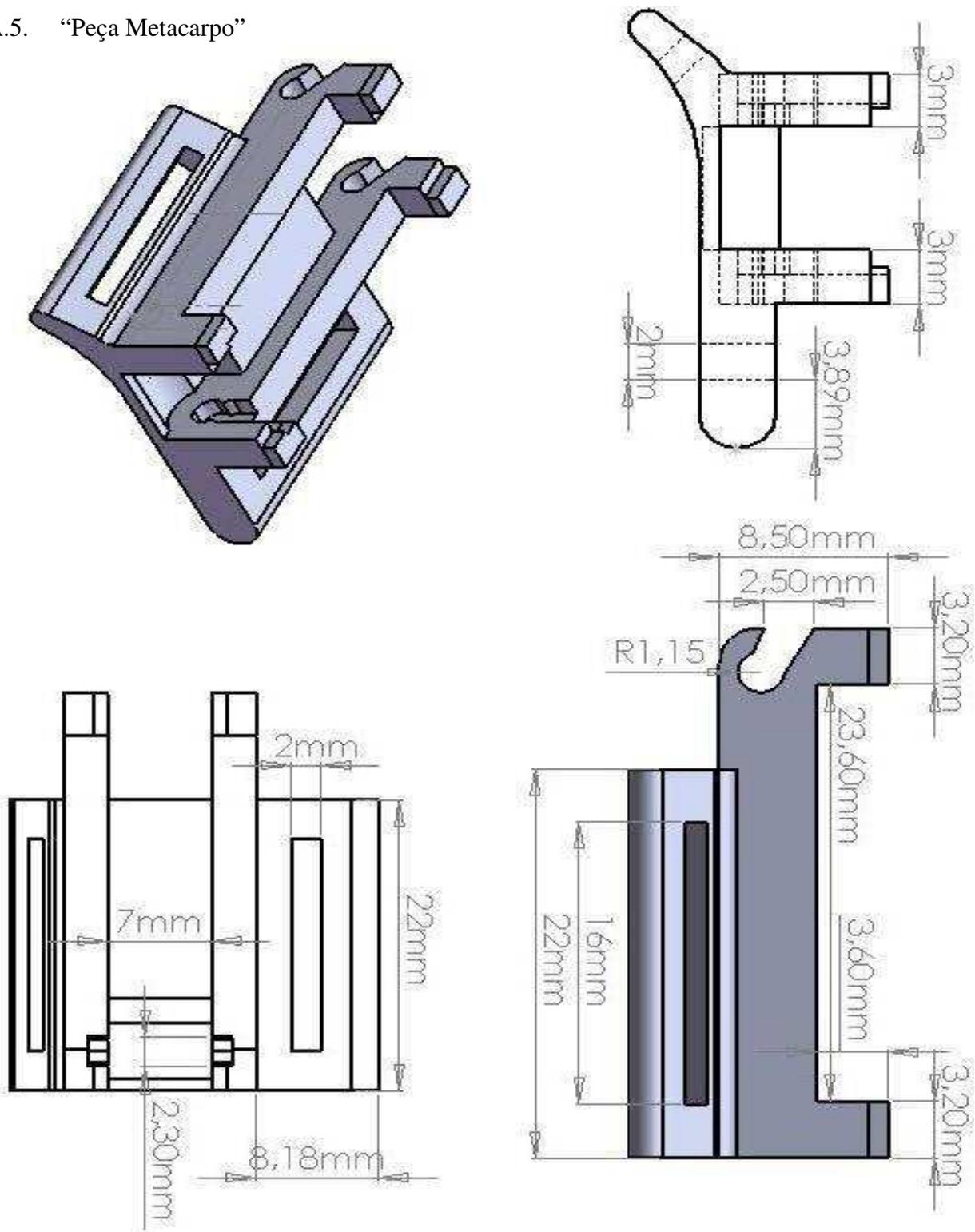


Figura A.5 - Especificações métricas da “Peça Metacarpo”

A.6. “Peça F2 e F3”

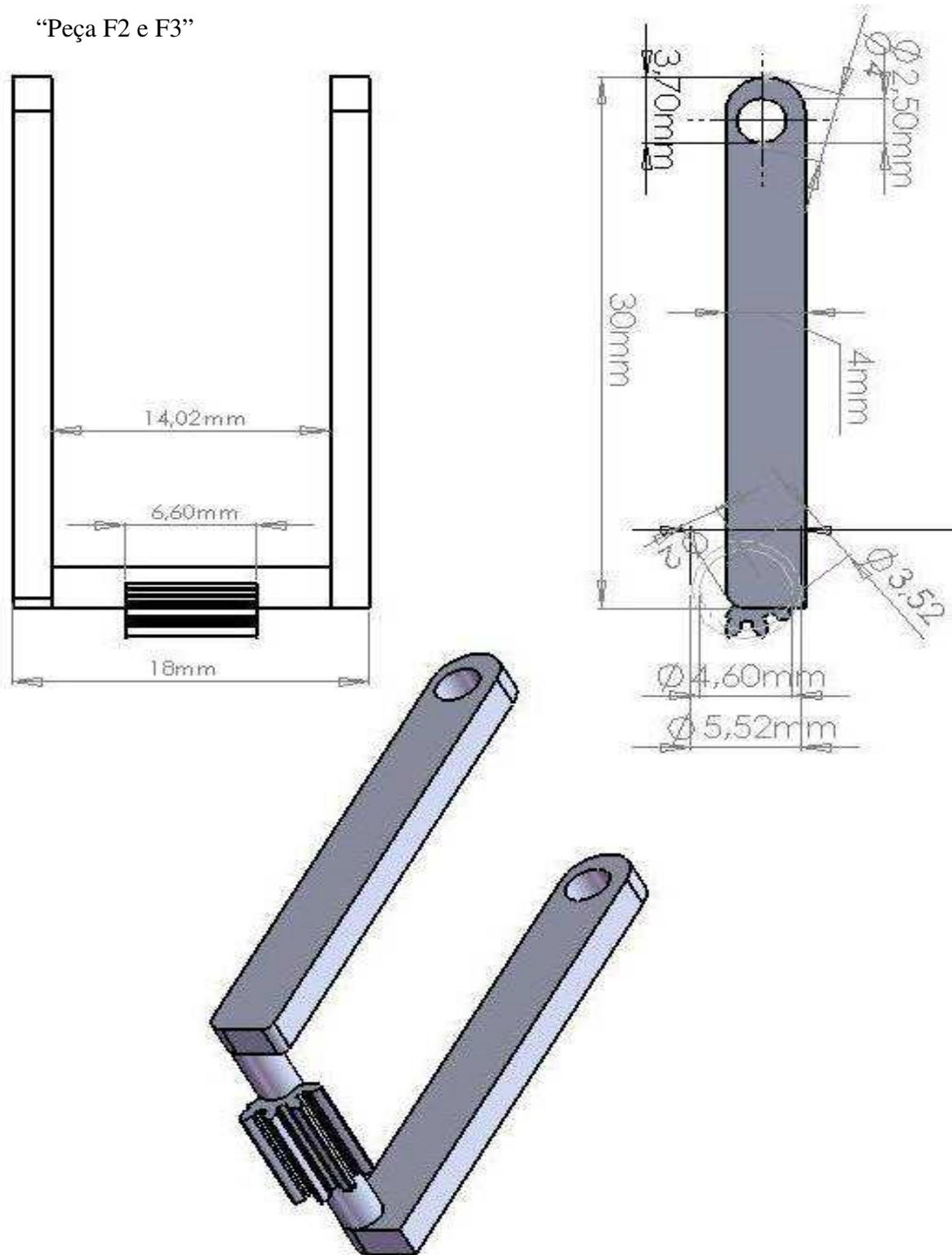


Figura A.6 - Especificações métricas da “Peça F2 e F3”

A.7. “Peça F3 e Metacarpo”

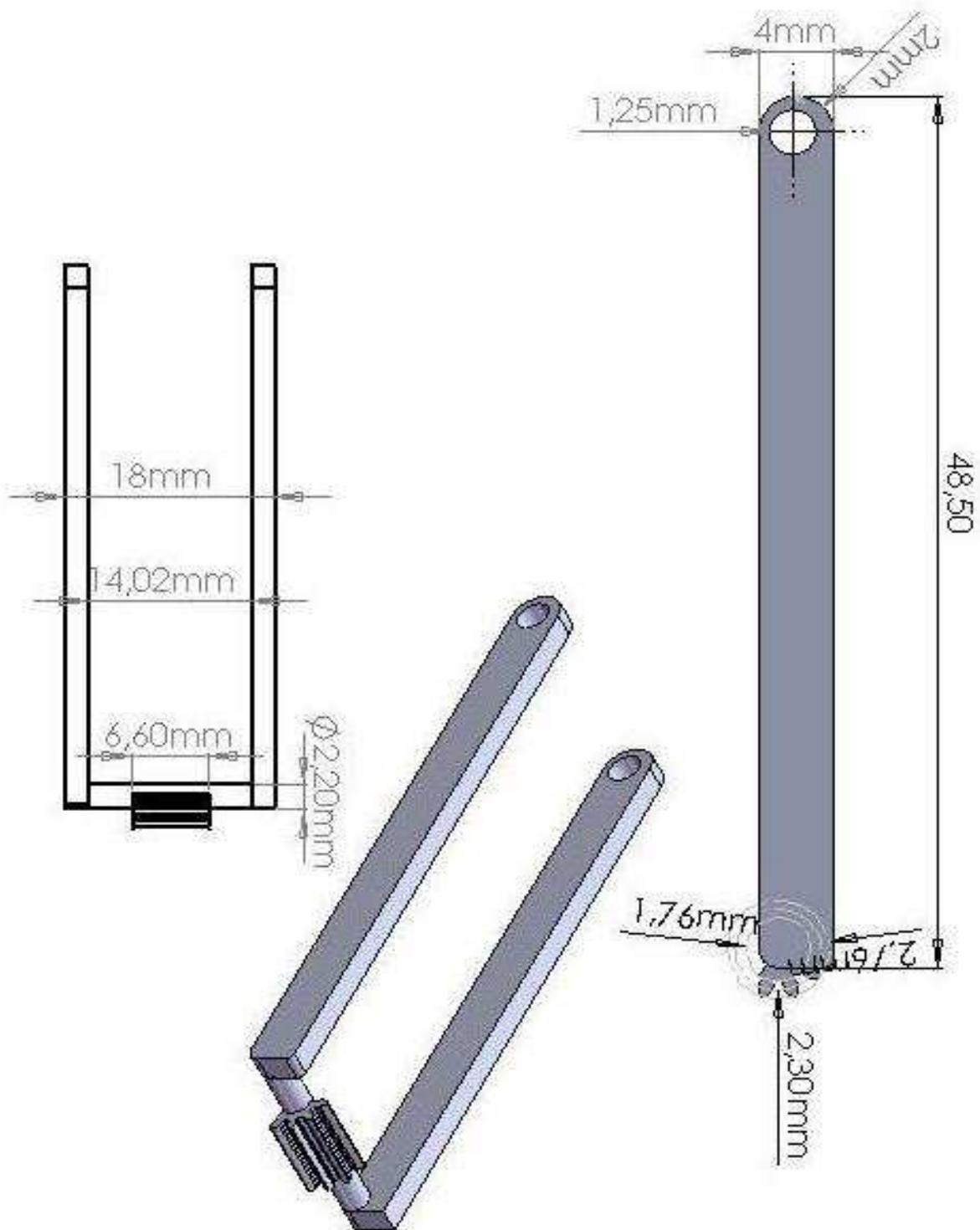


Figura A.7 - Especificações métricas da “Peça F3 e Metacarpo”

A.8. “Engrenagem de apoio 53”

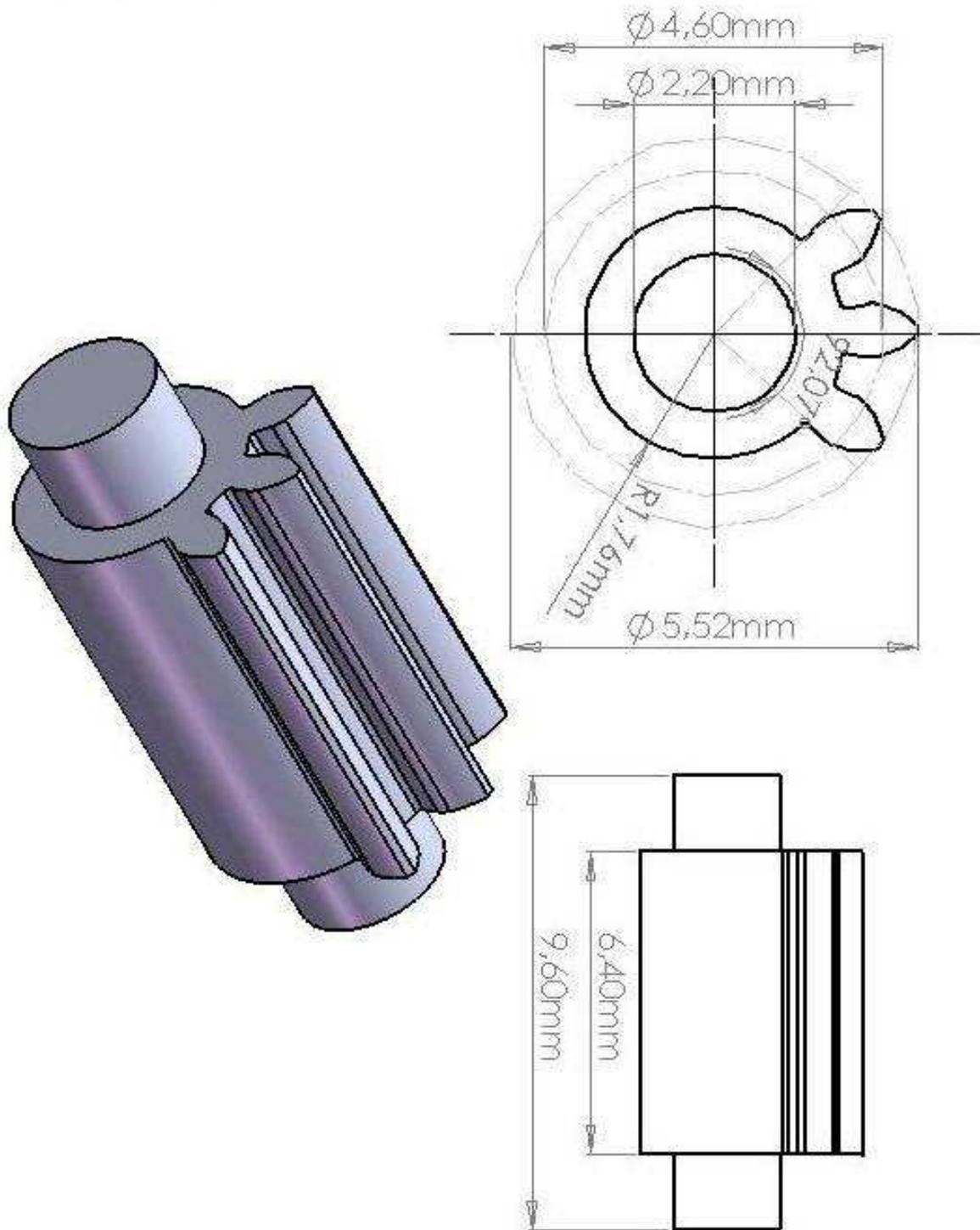


Figura A.8 - Especificações métricas da “Engrenagem de apoio 53”

A.9. “Engrenagem de apoio 105°”

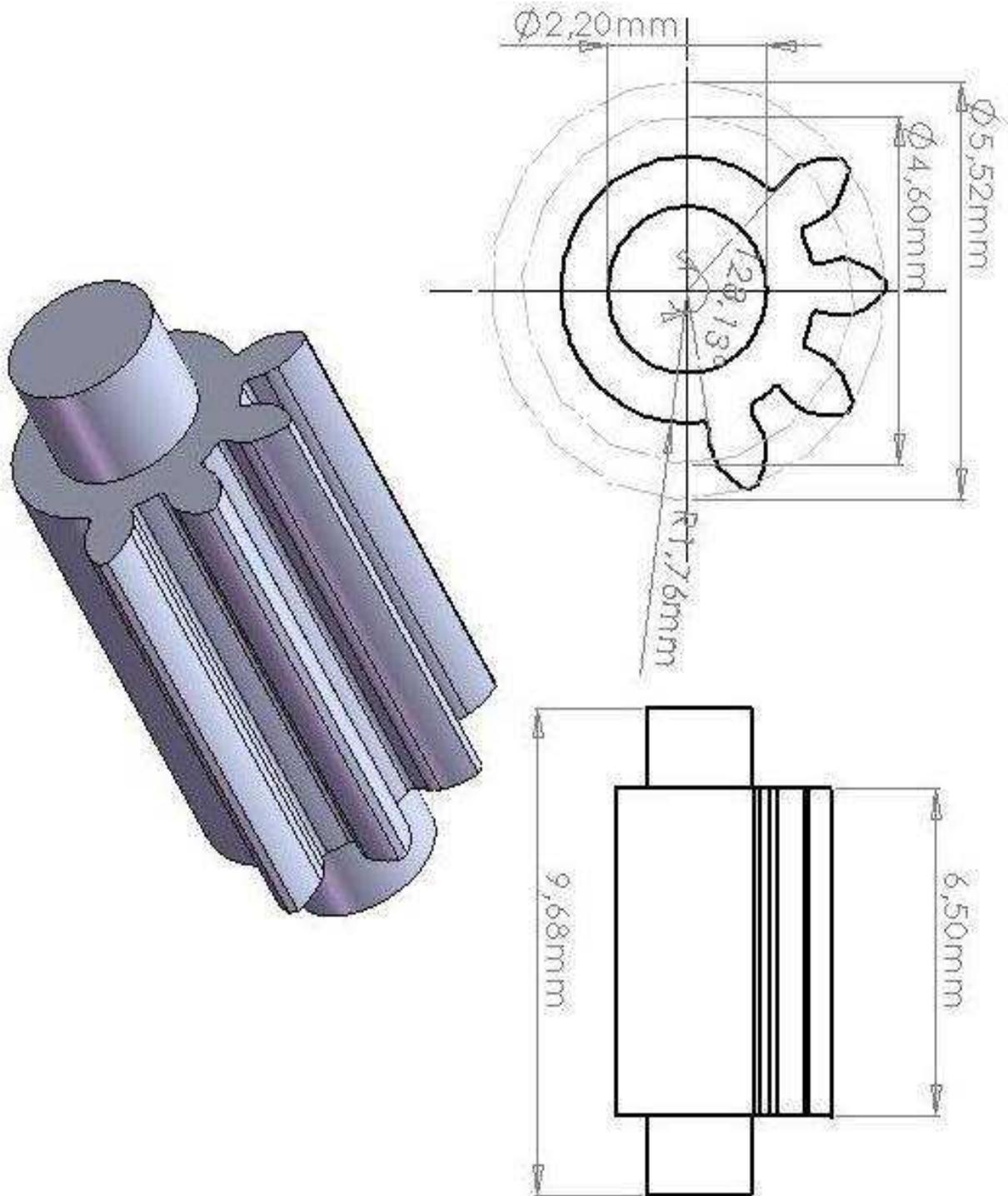


Figura A.9 - Especificações métricas da “Engrenagem de apoio 105°”

A.10. “Cilindro do eixo das falanges”

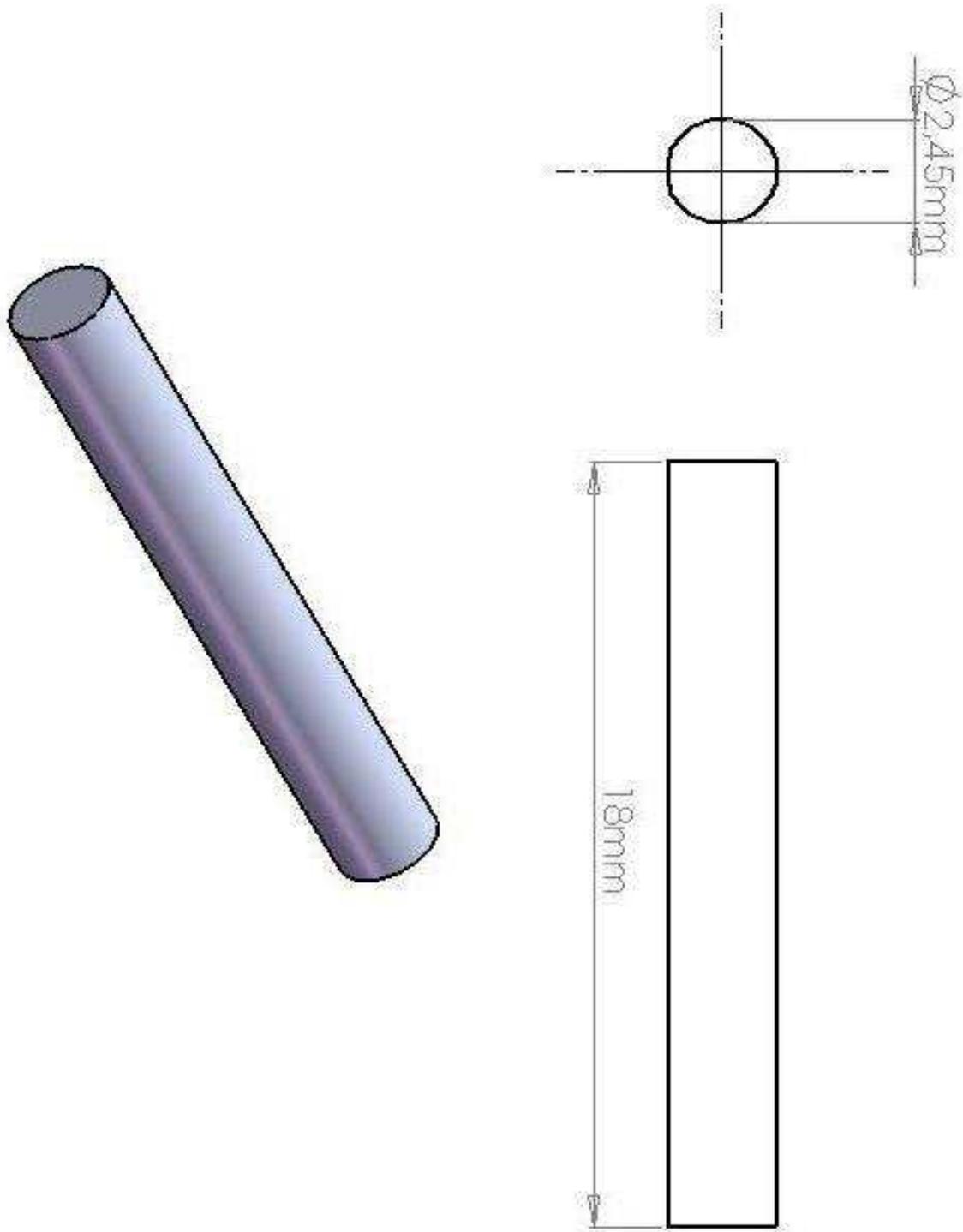


Figura A.10 - Especificações métricas do “Cilindro do eixo das falanges”

A.11. “Cremalheira”

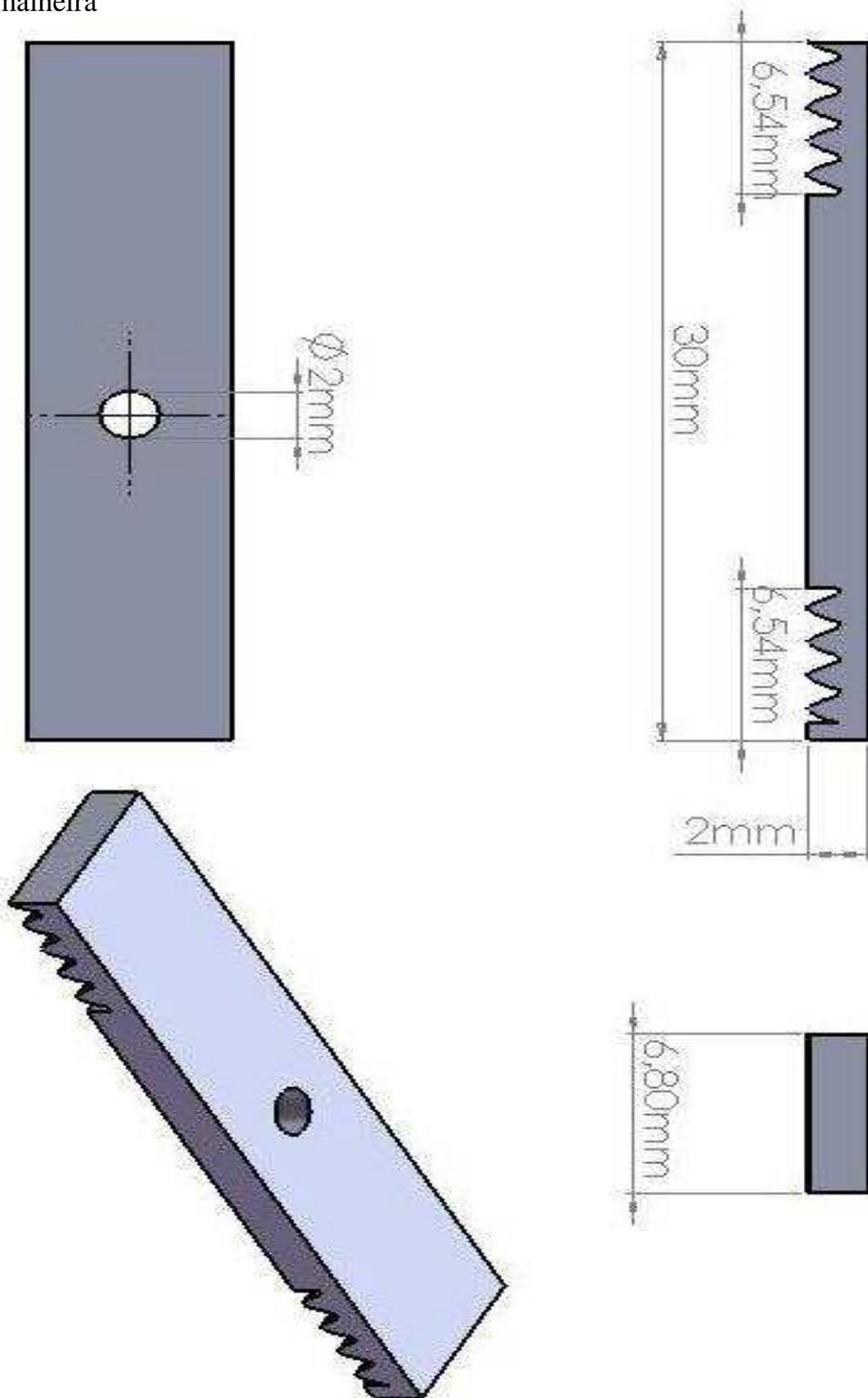


Figura A.11 - Especificações métricas da “Cremalheira”

ANEXO B – Sistema de Conversão de Movimento

B.1 Funcionamento e cálculos construtivos

Engrenagem é um componente mecânico que possui um número z de dentes idênticos uns aos outros e divididos igualmente numa roda de raio r .

A cremalheira por sua vez possui esses mesmos dentes posicionados paralelamente uns aos outros e trabalham juntamente com os dentes da engrenagem sendo que os mesmos devem estar encaixados como mostra a Figura B.1. Nesse sistema, assim que a engrenagem ganha movimento rotativo seus dentes impulsionam os dentes da cremalheira fazendo com que esta por sua vez se movimente linearmente podendo ser este para traz ou para frente dependendo do sentido que a engrenagem rotaciona.

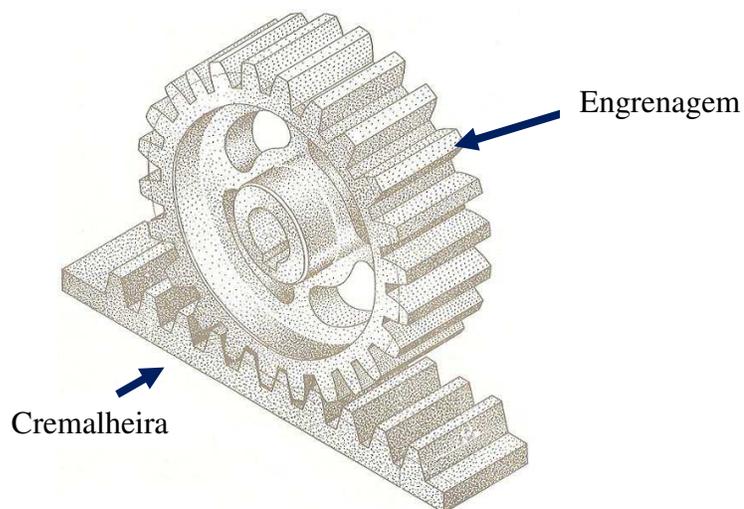


Figura B.1 – Engrenagem e cremalheira (Provenza, 1976)

Para a construção correta dos dentes da engrenagem alguns parâmetros, citados na Tabela B.1, devem ser resolvidos. A descrição dos principais deles pode ser vista na Figura B.2

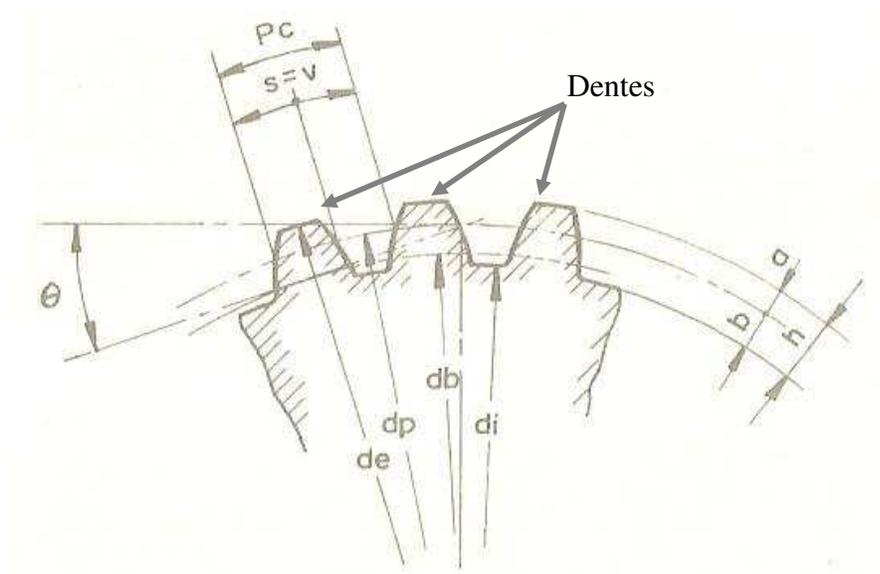


Figura B.2 – Principais parâmetros para a construção de uma engrenagem (Provenza, 1976)

Tabela B.1 – Descrição dos parâmetros (Provenza, 1976)

Descrição	Parâmetros
Número de dentes	z
Módulo	m
Diâmetro primitivo	$dp = m \cdot z$
Passo	$p = m \cdot \pi$
Espessura circular e vão	$s = v = p/2$
Espessura cordal	$sc = m \cdot z$
Diâmetro externo	$de = m (z+2)$
Diâmetro interno	$di = m (z-2,334)$
Diâmetro de círculo de base	$db = dp \cdot \cos \theta$
Altura da cabeça do dente	$\alpha = 90/z$

Normalmente, para que possa ser possível realizar o processo de fresa de uma engrenagem para uso industrial, o módulo é o valor mais importante, pois a fabricação das engrenagens são baseadas nela, uma vez que alguns outros valores são padrões (ângulo de pressão (θ) por exemplo).

No caso desse trabalho o parâmetro utilizado como base foi o **diâmetro primitivo** (d_p) pois seu valor serve como referência na conversão do movimento rotativo em linear sendo que ele sempre será tangente à **reta primitiva** da cremalheira, como pode ser observado na Figura B.3, lembrando que os mesmo valores encontrados para o a construção da engrenagem são utilizados também para a cremalheira.

Pelo fato de existir a necessidade de movimentar o contato móvel do potenciômetro durante os movimentos de flexão e extensão foi modelado também as engrenagens de apoio cujo objetivo é apenas oferecer uma base para a cremalheira para que no momento em que a engrenagem é movimentada uma idêntica à ela mantém o paralelismo com o potenciômetro movimentando então o contato móvel.

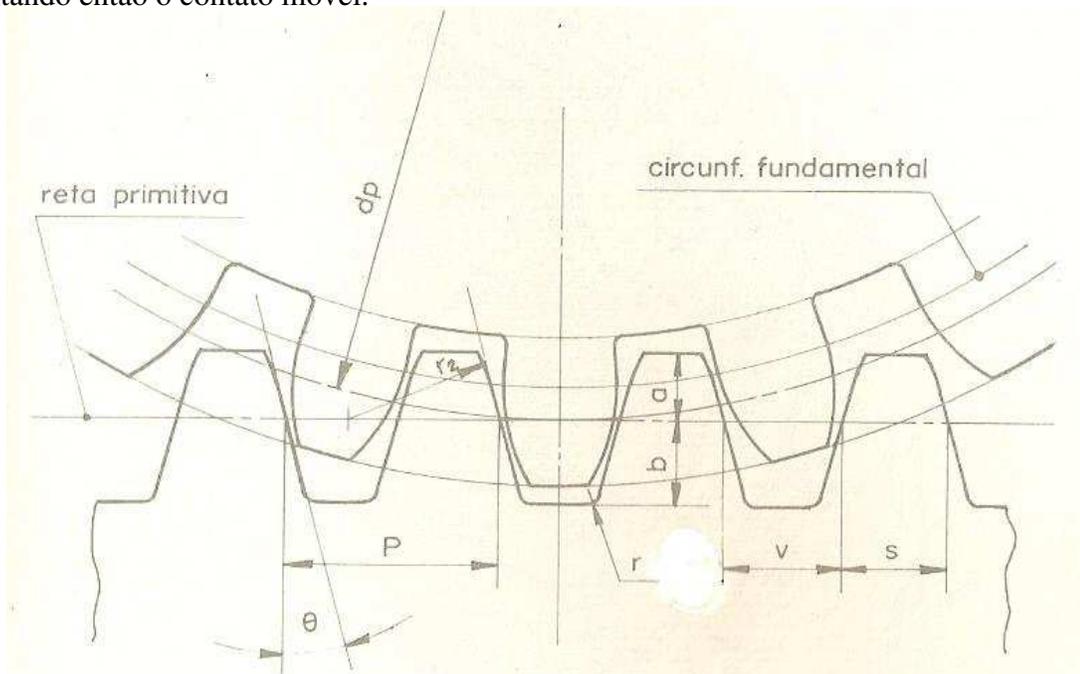


Figura B.3 – Parâmetros do encaixe entre engrenagem e cremalheira (Provenza, 1976)

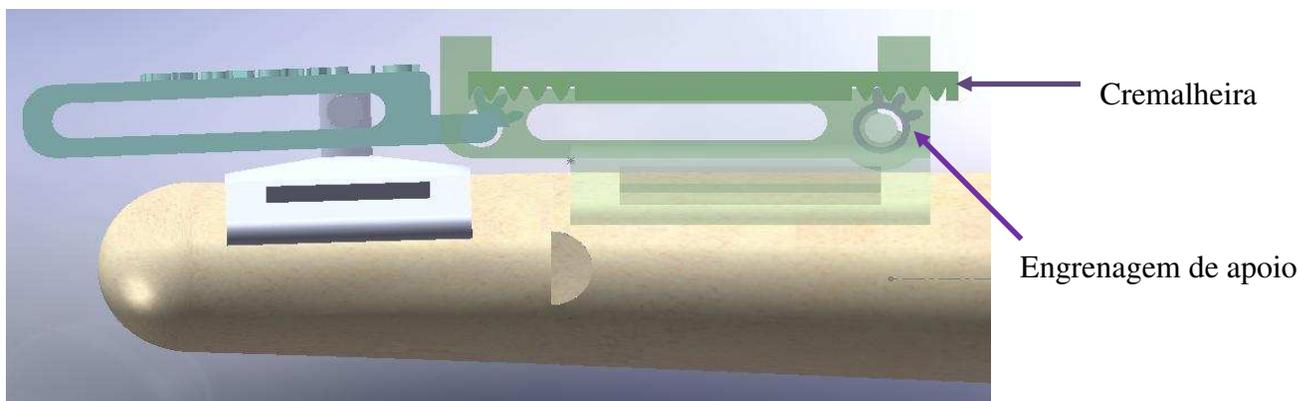


Figura B.4 – Conversão do movimento

O valor escolhido para o diâmetro primitivo após alguns testes foi de 4,6mm e o número de dentes (z) para os 360° foi de 10, lembrando que como nenhuma rotação das juntas utiliza os 360° foi-se modelado apenas o suficiente para realizar a tarefa, ou seja, um pouco mais do que a porcentagem de rotação de cada junta exibida na seção 3.3. Dessa forma os valores obtidos para o desenvolvimento da cremalheira e engrenagem utilizadas nesse trabalho são apresentados na Tabela B.2.

Tabela B.2 – Valores obtidos para os parâmetros utilizados

Descrição	Parâmetros
Número de dentes	$Z = 10$
Módulo	$M = 0,46$
Diâmetro primitivo	$D_p = 4,6 \text{ mm}$
Passo	$P = 1,445 = 36^\circ$
Espessura circular e vão	$S = v = 0,7225 = 18^\circ$
Espessura cordal	$SC = 0,72$
Diâmetro externo	$D_e = 5,52$
Diâmetro interno	$D_i = 3,526$
Diâmetro de círculo de base	$DB = 4,32$
Altura da cabeça do dente	$\alpha = 9$