

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Projeto e Construção de um Scanner Antropométrico Baseado  
no Método de Triangulação a Laser

*Mario Alexandre Gazziro*

São Carlos  
Agosto/2005

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

G785pc

Gazziro, Mario Alexandre.

Projeto e construção de um scanner antropométrico baseado no método de triangulação a laser / Mario Alexandre Gazziro. -- São Carlos : UFSCar, 2006.  
72 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2005.

1. Computação gráfica - hardware. 2. Aquisição 3D. 3. Antropometria. 4. Instrumentação eletrônica. 5. Processamento de imagens. I. Título.

CDD: 006.62 (20<sup>a</sup>)

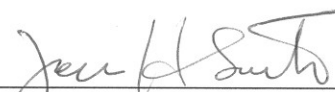
**Universidade Federal de São Carlos**  
**Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação**

***“Projeto e Construção de um Scanner Antropométrico  
baseado no método de triangulação a laser”***

**MÁRIO ALEXANDRE GAZZIRO**

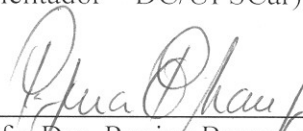
Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

**Membros da Banca:**



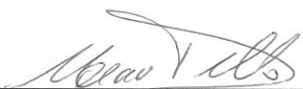
---

Prof. Dr. José Hiroki Saito  
(Orientador – DC/UFSCar)



---

Profa. Dra. Regina Borges de Araujo  
(DC/UFSCar)



---

Prof. Dr. Marcio Rillo  
(Centro Universitário da FEI)

**São Carlos**  
**Agosto/2005**

# Resumo

---

---

Um scanner antropométrico possibilita ampliar nossos estudos sobre geometria e morfologia tridimensional do corpo humano. O propósito desse estudo é construir um scanner 3D para todo o corpo humano. Utilizando lasers e câmeras instalados em uma plataforma movida por um único motor, controlado por um dispositivo dedicado, foi implementado um equipamento que permite a aquisição das formas do corpo inteiro. Uma aplicação para estudo de caso (determinação do percentual de gordura) é apresentada. Os resultados sugerem que o scanner desenvolvido pode ser útil para este caso de estudo em particular, além de outras aplicações tais como em censos antropométricos e em medicina.



# Abstract

---

---

Three-dimensional (3D) surface anthropometry enables us to extend the study to 3D geometry and morphology of human body. The purpose of this study is to build a whole 3D body scanner. Using lasers and cameras mounted on a scanning platform moved by a single motor and controlled by an embedded controller, a device has been implemented to capture the shape of the entire human body. One application case study (body fat percentage) is presented. The results suggests that the developed scanner can be useful for that particular case study and other like size surveying and medicine.

Ao meu filho Caio, o qual vai se tornar um grande pesquisador um dia, bastando para isso manter seu interesse em descobrir os mecanismos da natureza, exatamente como o faz hoje, com 3 anos de idade. E a minha filha, Alice, que ainda está por descobrir o mundo a sua volta.

# Agradecimentos

---

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Prof. José Hiroki Saito, que, dada a sua magnífica personalidade e experiência, orientou de maneira clara e objetiva o presente trabalho.

Agradeço a minha esposa, Izis Cavalcanti, pelo convívio harmonioso, mesmo frente as dificuldades mais diversas.

Agradeço a meus familiares, pai, mãe e irmãs, que me apoiaram durante mais de duas décadas de estudos.

Não poderia deixar de agradecer a João Guilherme D. M. França, o qual provou que *a imaginação é mais importante do que o conhecimento*, elaborando em sua dissertação de mestrado uma das bases para este trabalho, tendo dominado uma tecnologia de porte sem igual em países do terceiro mundo.

Outra base importante deste trabalho foi elaborada por João Paulo Góis, que em sua dissertação de mestrado estudou, comparou e até mesmo criou importantes algoritmos de reconstrução aqui utilizados.

O projeto contou ainda com o apoio fundamental de Luis Lusatello e Ailton Sgobbe, que com sua experiência auxiliaram no projeto mecânico. Não é possível deixar de citar Enivaldo José dos Santos, o qual sempre esteve de prontidão para auxiliar nas montagens e ajustes do protótipo.

Aos amigos Raul Habesch, Richard Lingner e Augusto Carbol, por terem acompanhado com interesse o desenvolvimento do presente trabalho, desde sua concepção até sua finalização.

A todas as pessoas relacionadas à empresa TRYon, principalmente Rá Cavalcanti, pela confiança e apoio financeiro para a construção do protótipo deste trabalho.

Agradeço ao pessoal do Gapis-UFSCar, alunos e professores, pelo companheirismo ao longo dos três últimos anos.

Com relação ao apoio sobre as especialidades de ciências de saúde, gostaria de agradecer à Adriana Takeuchi e à Clarissa Printes.

Por fim, gostaria de agradecer à FAPESP, o apoio dado a outros projetos desenvolvidos por mim, e que indiretamente auxiliaram no desenvolvimento do presente trabalho.

# Sumário

---

---

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação . . . . .	1
1.2	Problema de pesquisa . . . . .	1
1.3	Organização da dissertação . . . . .	2
1.4	Convenções de formato . . . . .	2
1.5	Aspectos éticos . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Projetos Relacionados</b>	<b>4</b>
2.1	Considerações iniciais . . . . .	4
2.2	Aquisição a laser . . . . .	4
2.3	Projeção de padrões de luz . . . . .	5
2.4	Modelagem e Processamento de imagens . . . . .	7
2.5	Primeiro Caso de Uso: Censos Antropométricos . . . . .	8
2.6	Segundo Caso de Uso: Medicina . . . . .	9
2.7	Considerações finais . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Técnicas tridimensionais</b>	<b>10</b>
3.1	Considerações iniciais . . . . .	10
3.2	Aquisição 3D por triangulação laser . . . . .	10
3.3	Reconstrução de objetos tridimensionais . . . . .	12
3.3.1	Métodos baseados em função implícita . . . . .	13
3.4	Considerações finais . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Composição corporal</b>	<b>16</b>
4.1	Considerações iniciais . . . . .	16
4.2	Modelos antropométricos . . . . .	16
4.3	Modelo básico de 2 compartimentos . . . . .	17
4.4	Pesagem hidrostática . . . . .	18
4.5	Considerações finais . . . . .	20

---

<b>5</b>	<b>Simulações</b>	<b>21</b>
5.1	Considerações iniciais . . . . .	21
5.2	Sistema de aquisição 3D antropométrico . . . . .	21
5.3	Extração de características . . . . .	24
5.4	Determinação do percentual de gordura . . . . .	25
5.4.1	Software para determinação da composição corporal . . . . .	26
5.5	Considerações finais . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Protótipo do Scanner Antropométrico</b>	<b>30</b>
6.1	Considerações iniciais . . . . .	30
6.2	Visão Geral . . . . .	30
6.3	Central de controle . . . . .	31
6.3.1	Computador . . . . .	31
6.3.2	Controlador de motor . . . . .	31
6.4	Cabine de varredura . . . . .	32
6.4.1	Balança de precisão . . . . .	32
6.4.2	Módulos de aquisição . . . . .	33
6.4.3	Sistema mecânico . . . . .	33
6.5	Considerações finais . . . . .	36
<b>7</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>38</b>
<b>8</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>41</b>
8.1	Conclusões . . . . .	41
8.2	Trabalhos futuros . . . . .	42
<b>A</b>	<b>Esquemas Eletrônicos</b>	<b>47</b>
<b>B</b>	<b>Projetos Mecânicos</b>	<b>50</b>
<b>C</b>	<b>Listagem de Códigos</b>	<b>53</b>
<b>D</b>	<b>Motores elétricos</b>	<b>61</b>
D.1	Motores de passo . . . . .	62
D.1.1	Torque de parada . . . . .	64
D.1.2	Torque de fricção . . . . .	66
D.1.3	Tolerância angular sistemática . . . . .	66
D.1.4	Ângulo de carga estático e dinâmico . . . . .	66
D.1.5	Ressonância . . . . .	67
D.1.6	Ondulação de torque . . . . .	67

<b>E</b>	<b>Comunicação serial em sistemas embarcados</b>	<b>69</b>
E.1	Microcontrolador AT89S8252 . . . . .	69
E.1.1	Considerações sobre cristais osciladores . . . . .	69
E.1.2	Determinação da taxa de comunicação serial . . . . .	70
E.2	Protocolo de comunicação de dados RS232-C . . . . .	71
E.2.1	Características elétricas do protocolo . . . . .	71

# Lista de Figuras

---

---

2.1	Sistemas de aquisição a laser. . . . .	5
2.2	Sistemas de aquisição por luz estruturada. . . . .	6
2.3	Extração de características 3D a partir de 2D. . . . .	7
2.4	Exemplo de informações 3D adquiridas nas pesquisas antropométricas. . . . .	8
2.5	Sistema de medição automática da espinha. . . . .	9
3.1	Geometria da aquisição por triangulação laser. Fonte:(12) . . . . .	10
3.2	Exemplo bi-dimensional dos ítems que um método de reconstrução tenta satisfazer: a) curvas não homeomorfas, mas próximas; b) curvas homeomorfas, mas não próximas. Fonte:(13) . . . . .	12
4.1	Modelos de composição corporal. Fonte:(9) . . . . .	17
5.1	Simulação da cabine de varredura. . . . .	22
5.2	Nuvens de pontos geradas na simulação. . . . .	23
5.3	Composição de todas as nuvens de pontos. . . . .	23
5.4	Modelo de corpo inteiro da Cyberware - Alison. . . . .	24
5.5	Software para determinar a composição corporal. . . . .	26
5.6	Modelo de corpo inteiro da Cyberware - Eric. . . . .	27
5.7	Modelo de corpo inteiro da Cyberware - Tammy. . . . .	28
5.8	Modelo de corpo inteiro da Cyberware - John. . . . .	28
5.9	Modelo de corpo inteiro da Cyberware - Smith. . . . .	29
6.1	Visão geral do sistema. . . . .	30
6.2	Controlador de motor. . . . .	31
6.3	Diagrama de estados do software de controle. . . . .	32
6.4	Formato de saída dos dados da balança. . . . .	33
6.5	Balança de precisão. . . . .	33
6.6	Módulo de aquisição. . . . .	34
6.7	Câmeras e laser do módulo de aquisição. . . . .	34

6.8	Motor e encoder do sistema mecânico. . . . .	35
6.9	Polias utilizadas no sistema mecânico. . . . .	35
6.10	Componentes diversos da cabine. . . . .	35
6.11	Montagem completa da cabine de varredura. . . . .	37
7.1	Nuvem de pontos de um corpo real. . . . .	39
7.2	Aquisição 3D de um manequim. . . . .	39
7.3	Nuvem de pontos da aquisição. . . . .	40
7.4	Etapas da aquisição 3D de um manequim. . . . .	40
A.1	Esquema principal. . . . .	48
A.2	Esquema do bloco de isolamento. . . . .	49
B.1	Esquema de ligação entre correias e polias. . . . .	50
B.2	Matriz de furação para o teto da cabine de varredura. . . . .	51
B.3	Matriz de furação para o piso da cabine de varredura. . . . .	51
B.4	Desenho em perspectiva do scanner antropométrico. . . . .	52
D.1	Motor elétrico de grande porte. . . . .	61
D.2	Motor de passo em ação. a) passo N. b) passo N+1. . . . .	62
D.3	Corte de seção de um motor de relutância variável. Fonte:(22) . . . . .	63
D.4	Corte de seção de um motor de ímã permanente. Fonte:(22) . . . . .	63
D.5	Visão explodida ilustrando o deslocamento dos dentes. Fonte:(22) . . . . .	64
D.6	Curva ilustrando o torque estático vs. a posição do rotor. Fonte:(22) . . . . .	64
D.7	Ângulo de carga estático. Fonte:(22) . . . . .	65
D.8	Modelo da montanha. Fonte:(22) . . . . .	66
D.9	Curva da carga dinâmica. Fonte:(22) . . . . .	67
D.10	Torque dinâmico para um motor de passo de 2 fases. Fonte:(22) . . . . .	68
E.1	Circuito equivalente do cristal. Fonte: (29) . . . . .	70



# Lista de Tabelas

---

---

5.1	Coeficientes para a equação genérica de superfície corporal. Fonte: (39)	26
5.2	Dados sobre o modelo Eric. . . . .	27
5.3	Dados sobre o modelo Tammy. . . . .	28
5.4	Dados sobre o modelo John. . . . .	28
5.5	Dados sobre o modelo Smith. . . . .	29
5.6	Comparação entre os percentuais de gordura obtidos, por método. . .	29
A.1	Listagem de componentes. . . . .	47
E.1	Definição dos símbolos para cálculo da transcondutância. . . . .	70
E.2	Definição dos símbolos para cálculo da taxa de comunicação. . . . .	71
E.3	Especificações elétricas do padrão RS-232C. Fonte: (rs2) . . . . .	72

---

# Introdução

---

O excesso de gordura corporal, ou seja, a obesidade, freqüentemente causa significativo dano à saúde, e nos dias atuais é considerada uma doença segundo a OMS (Organização Mundial de Saúde), que implica diminuição da qualidade e da expectativa de vida.

Muito se tem feito para combater o problema do excesso de gordura, sendo que este trabalho propõe a elaboração de mais uma arma nesta batalha contra a obesidade.

## *1.1 Motivação*

O aumento de peso está diretamente relacionado com um aumento da mortalidade (23). No Brasil, 33% das mulheres e 13% dos homens estão acima do peso, e muitas pessoas sofrem das complicações da obesidade mórbida, na qual o percentual de gordura ultrapassa 40%.

O desenvolvimento de um mecanismo de avaliação de gordura corporal mais dinâmico agilizaria os processos de medição, tornando possível realizar avaliações em um número maior de pessoas de uma determinada população, num curto período de tempo, simplificando a tarefa de determinação de perfis regionais de obesidade.

Um equipamento de maior precisão, ou seja, que fornece uma resposta mais fidedigna, tende a incentivar os esforços individuais daqueles que estão se tratando.

## *1.2 Problema de pesquisa*

Fazendo uso das relações entre a densidade corporal e o percentual de gordura corporal desenvolvidos na década de 60 (33)(38)(14), somado às recentes técnicas tridimensionais para aquisição(12) e reconstrução(13) de objetos 3D, este trabalho se propõe a criar um mecanismo de determinação do percentual de gordura por meio de aquisição 3D.

Para atingir tal objetivo, inicialmente deve ser realizada a construção de um sistema de aquisição antropométrico (antropometria é o estudo das medidas do corpo humano) que gere as chamadas *nuvens de pontos* (conjunto de pontos tridimensionais) do corpo humano. A partir dessas *nuvens de pontos*, é possível realizar a reconstrução tridimensional de um objeto que represente o corpo humano. Após isso, deve-se determinar seu volume.

Por fim, através de uma balança de precisão, é obtido o peso que, juntamente com o volume, permite o cálculo da densidade do corpo a ser aplicada nas equações de determinação do percentual de gordura

### 1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação apresenta descrições completas do domínio do problema, da metodologia de pesquisa aplicada e dos resultados obtidos. A estrutura do trabalho está de acordo com a seguinte seqüência:

O capítulo 2 mostra projetos relacionados ao trabalho desenvolvido, apresentando o estado da arte para tecnologias de aquisição 3D antropométricas.

Os capítulos 3 e 4 correspondem a uma revisão da literatura, detalhando assuntos relacionados ao trabalho desenvolvido.

As simulações do sistema, realizadas antes da construção do protótipo, são detalhadas no capítulo 5.

O capítulo 6 apresenta toda a implementação do protótipo, especificando a metodologia aplicada, detalhando materiais e processos do scanner antropométrico proposto.

O capítulo 7 descreve os resultados obtidos, tanto os simulados como os reais, apresentando uma discussão sobre os mesmos.

Por fim, o capítulo 8 apresenta as conclusões obtidas com o trabalho e indica possibilidades de trabalhos futuros.

Existem ainda diversos apêndices, contendo: esquemas eletrônicos, projetos mecânicos, listagens de código-fonte dos programas desenvolvidos e por fim informações mais detalhadas sobre o funcionamento de motores de passo e sobre dimensionamento de características para realizar comunicação serial com sistemas embarcados.

### 1.4 Convenções de formato

Ao longo desta dissertação, utiliza-se um padrão de formatação baseado nos seguintes critérios:

- Há termos em inglês nesta dissertação, os quais aparecem traduzidos entre parênteses no próprio texto.
- Todo termo específico em idioma estrangeiro aparece em *itálico* apenas em sua primeira ocorrência.
- Definições que aparecem correntemente no texto podem ser destacadas com o uso de **negrito**; ênfase no texto é indicada por *itálico*. Definições, descrições e fórmulas importantes são fornecidas em 

quadros destacados
--------------------
- Referências são indicadas numericamente e incluídas ao final do texto.

## 1.5 Aspectos éticos

Nos termos da Portaria 196/96 do Conselho Nacional de Saúde, tendo sido esta uma pesquisa que envolveu experimentação com seres humanos, o projeto foi submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa em Seres Humanos da UFSCar (CEP/UFSCar), sendo aprovado pela relatora Profa. Dra. Márcia Niituma Ogata em 25/06/2004, com número de protocolo 021/04.

---

## Projetos Relacionados

---

### 2.1 *Considerações iniciais*

Nas próximas seções uma atenção especial é dada à utilização de tecnologias de aquisição 3D para medições tridimensionais do corpo humano. Serão apresentadas breves descrições dos diferentes tipos de tecnologias utilizadas comercialmente para medição do corpo humano: aquisição a laser, projeção de padrões de luz estruturada e combinação de modelagem e processamento de imagens. Também serão apresentados dois casos de uso (27).

### 2.2 *Aquisição a laser*

Tecnologias de aquisição a laser consistem do uso de fontes de luz laser para projetar uma (ou várias) finas linhas laser sobre o corpo humano. Simultaneamente, sensores de luz captam a cena e, aplicando regras geométricas simples, medem a superfície do corpo humano. Para assegurar a segurança com relação ao feixe de luz, deve-se utilizar lasers do tipo eye-safe (seguro aos olhos), caso contrário, deve-se utilizar óculos de proteção. Sistemas ópticos especiais, como lentes cilíndricas, são utilizados para a geração de linhas a partir de um único feixe de luz laser.

Um scanner a laser deve ser composto por módulos, cada um contendo um laser, um sistema óptico e um sensor de luz (normalmente um CCD, linear ou matriz). Cada módulo é movido através do corpo humano para digitalizar sua superfície. O tipo de movimento e a quantidade de módulos podem variar, dependendo de quais partes do corpo devem ser medidas.

Por exemplo, o scanner de corpo inteiro da **Hamamatsu Photonics** (Japão) consiste de quatro módulos que se movem verticalmente, de forma sincronizada através de quatro pilares, como visto na Figura 2.1(a). Um segundo exemplo é o scanner de cabeça da **Cyberware** (EUA). Neste caso, um único módulo se move

em círculo ao redor da cabeça da pessoa (Figura 2.1(b)). Como último exemplo, é apresentado o scanner para pés da **Vitronic** (Alemanha): o scanner é composto de três módulos, todos se movendo horizontalmente ao longo do pé, sendo um por baixo e dois laterais (Figura 2.1(c)).

Os altos custos para produção dos componentes de hardware para as tecnologias de aquisição a laser são considerados uma desvantagem. Somados ao laser, ao sensor de luz e ao sistema óptico, também são necessários motores elétricos precisos, utilizados para o deslocamento dos módulos de aquisição. Além disso tudo, um sistema de aquisição completo necessita ser calibrado de forma que a disposição geométrica de todos os elementos possa ser determinada exatamente.

A segunda desvantagem deste método é o tempo necessário para a digitalização de grandes superfícies. Não ocorre problemas para a medição de extremidades dos pés e das mãos, desde que estas partes permaneçam imóveis por alguns segundos. Porém, no caso de medições da cabeça ou do corpo inteiro, é praticamente impossível ficar imóvel por vários segundos. Movimentos incondicionais como respiração ou contrações musculares podem gerar erros, especialmente no caso de medições do rosto com pequena escala e alta resolução.

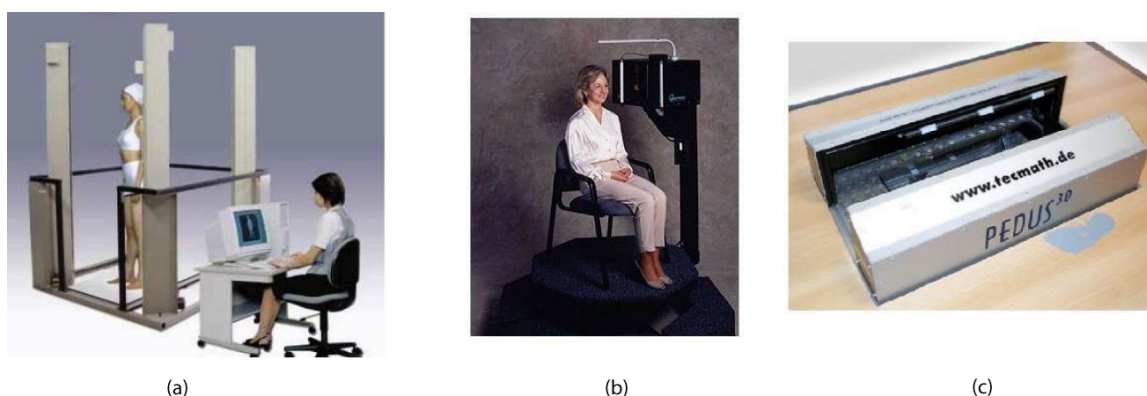


Figura 2.1: Sistemas de aquisição a laser.

### 2.3 Projeção de padrões de luz

A segunda tecnologia utilizada para medições do corpo humano é baseada na projeção de padrões de luz. Esta tecnologia apresenta soluções para algumas desvantagens do método anterior descrito acima, porém apresenta também suas próprias limitações, discutidas ao final desta seção.

Ao invés de mover o módulo de aquisição, um padrão de luz (geralmente na forma de faixas) é projetado sobre o corpo humano (Figura 2.2(a)). Um sensor de luz (em geral uma camera digital) capta a cena. O módulo de aquisição é composto normalmente por um projetor de padrões e um sensor de luz (Figura 2.2(b)).

Sistemas mais complexos utilizam dois ou três sensores de luz. O processo de medição é similar ao método de aquisição a laser: faixas sobre a superfície são medidas singularmente pelo uso de triangulação. A diferença é que acontece em um único passo, e a superfície total pode ser digitalizada por uma única aquisição. Para ampliar a resolução, as faixas projetadas são deslocadas e múltiplas cenas são adquiridas.

Tudo acontece em um período curto de tempo (geralmente menos do que um segundo), assim corpos humanos podem ser digitalizados sem problemas. No entanto, o campo de medição deste tipo de dispositivo é limitado.

Por exemplo, o *Capturor* da **InSpeck** (Canadá) (Figura 2.2(b)) pode medir superfícies com tamanho máximo de metade de um corpo humano (no exemplo, o torso superior). Para medir o corpo todo, múltiplos módulos de aquisição são necessários. A Figura 2.2(c) mostra um exemplo de sistema para aquisição do corpo inteiro composto por seis módulos de aquisição.

Este processo tem uma grande desvantagem, pois as unidades não podem operar simultaneamente, uma vez que os padrões de luz interferem uns com os outros. Praticamente, isto significa que múltiplos equipamentos devem ser utilizados serialmente, o que implica em uma extensão do tempo de aquisição. Uma vantagem com relação aos sistemas de aquisição a laser, é o custo inferior dessa tecnologia.

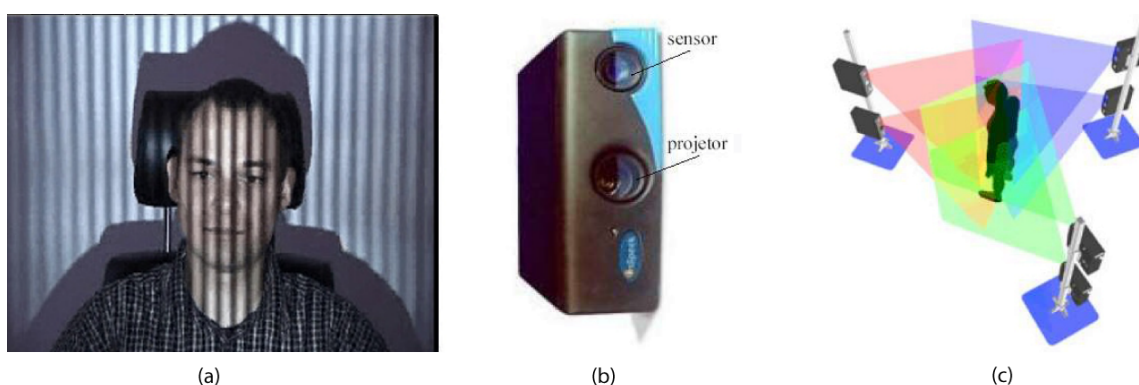


Figura 2.2: Sistemas de aquisição por luz estruturada.

## 2.4 Modelagem e Processamento de imagens

A terceira tecnologia utiliza técnicas de modelagem e processamento de imagens para a digitalização do corpo humano. Neste caso, medidas 3D não são realizadas, mas a informação 3D é gerada e extraída a partir de 2D. Dois exemplos são descritos para explicar esta técnica: o scanner de corpo inteiro 2D *Contour*, da **Human-Solutions** (Alemanha) (Figuras 2.3(a) e 2.3(b)) e o modelador de rostos *FaceGen* da **Singular Inversions** (USA) (Figuras 2.3(c) e 2.3(d)).

No primeiro exemplo, três imagens de uma pessoa são adquiridas (duas pela frente e uma pelo lado). Utilizando a simetria do corpo humano, os tamanhos mais importantes do corpo são calculados com precisão, a partir das silhuetas. Os tamanhos do corpo extraídos, neste exemplo, são utilizados para realização de ajustes personalizados em vestidos originalmente de tamanho padrão.

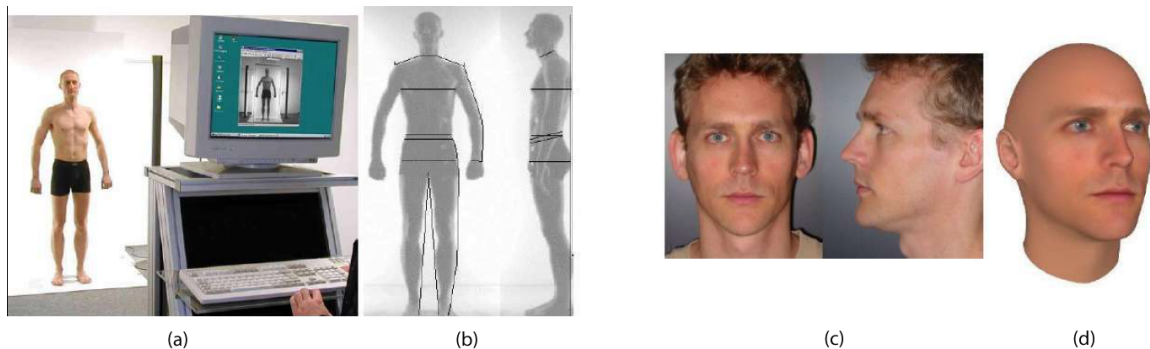


Figura 2.3: Extração de características 3D a partir de 2D.

O segundo exemplo mostra a possibilidade de gerar modelos de rosto extremamente realísticos utilizando apenas duas imagens da pessoa (de frente e de lado). O modelo computacional 3D é gerado manualmente com a ajuda de ferramentas de software com interfaces amigáveis. Neste caso, uma medição real do rosto não é realizada. No entanto, os modelos 3D produzidos são extremamente foto-realísticos e completamente adequados para aplicações, como por exemplo, animações e jogos de computador.

A grande vantagem dessa técnica é o seu baixo custo, comparada as demais técnicas. Já a principal desvantagem é a impossibilidade de utilização em aplicações onde a correspondência entre o modelo e a realidade são críticas, como por exemplo, em aplicações clínicas e de saúde.



## 2.5 Primeiro Caso de Uso: Censos Antropométricos

Recentemente, questionários de avaliação sobre dimensões do corpo humano tem se tornado uma necessidade. Todas as instituições e companhias que trabalham com ergonomia estão no aguardo de maiores informações para aproveitamento imediato em suas praticas. Já se sabe que dados antropométricos podem aumentar a qualidade e usabilidade do design do produto, e muitas vezes até a segurança do mesmo. Estabelecer bancos de dados antropométricos para cada nação se tornou sem dúvida uma necessidade nos tempos atuais.

No Brasil, foi apresentado um projeto de ampliação de abrangência da norma NBR 13.377, visando a utilização de scanners de corpo inteiro da marca "Body Scanner", de fabricação alemã, com a finalidade de obter tabelas de medidas confiáveis e respeitáveis pela industria e comércio do vestuário em nível nacional, traçando perfis regionais, com diferenças muito significativas em termos de biotipo (30).

Pesquisas de âmbito nacionais começaram a ser realizadas em todo o mundo. No Reino Unido, Estados Unidos, França e Suécia, cerca de 11 mil pessoas foram submetidas a aquisição 3D, com 130 medidas extraídas para cada pessoa.

A postura padrão utilizada em todas as pesquisas utilizam as pernas e braços levemente afastados do corpo, e cotovelos e mãos levemente arqueados (Figura 2.4(a)).

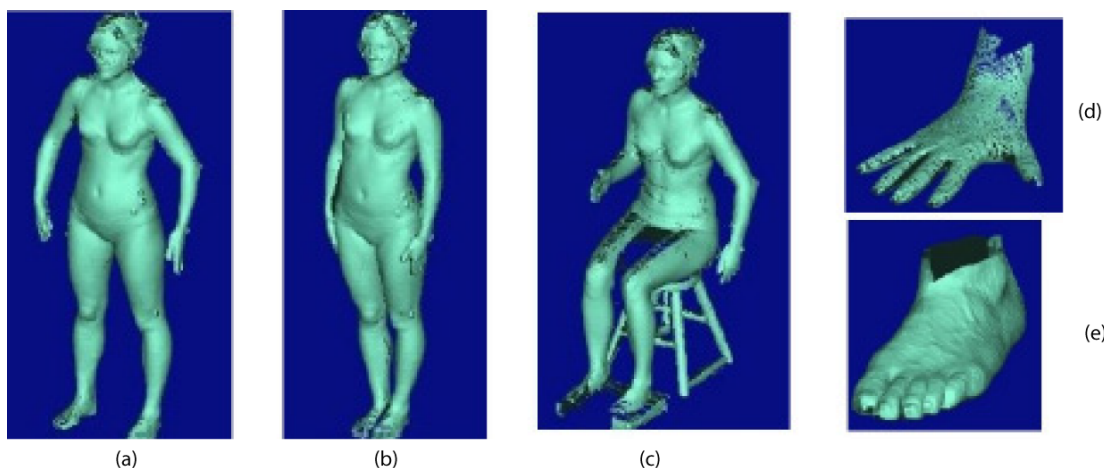


Figura 2.4: Exemplo de informações 3D adquiridas nas pesquisas antropométricas.

As pesquisas mais recentes realizadas na Suécia e França adicionaram posturas sentado e em pé (Figuras 2.4(b) e 2.4(c)). Novas pesquisas iniciadas na China incluem medições 3D das mão e dos pés (Figuras 2.4(d) e 2.4(e)).

## 2.6 Segundo Caso de Uso: Medicina

O campo médico representa um grupo de usuários cativos das tecnologias de digitalização 3D do corpo humano. Várias aplicações já existem em ortodontia, prótese, ortopedia, cirurgia plástica, medicina reconstructiva, medicina forense, odontologia e cosméticos.

Como exemplo comercial deste campo, a Figura 2.5 mostra um sistema de medição 3D para a espinha e para análise postural, desenvolvido por uma companhia alemã, chamado *Formetric*. O sistema é baseado em projeção de luz estruturada.

O curto tempo de aquisição de 40 mili-segundos permite uma medição 3D dinâmica da espinha. As informações obtidas são de grande uso para análises e diagnósticos. As Figuras 2.5(a) e 2.5(b) mostram respectivamente o sistema completo e o sistema em utilização. Já as Figuras 2.5(c) e 2.5(d) apresentam telas do software de controle.

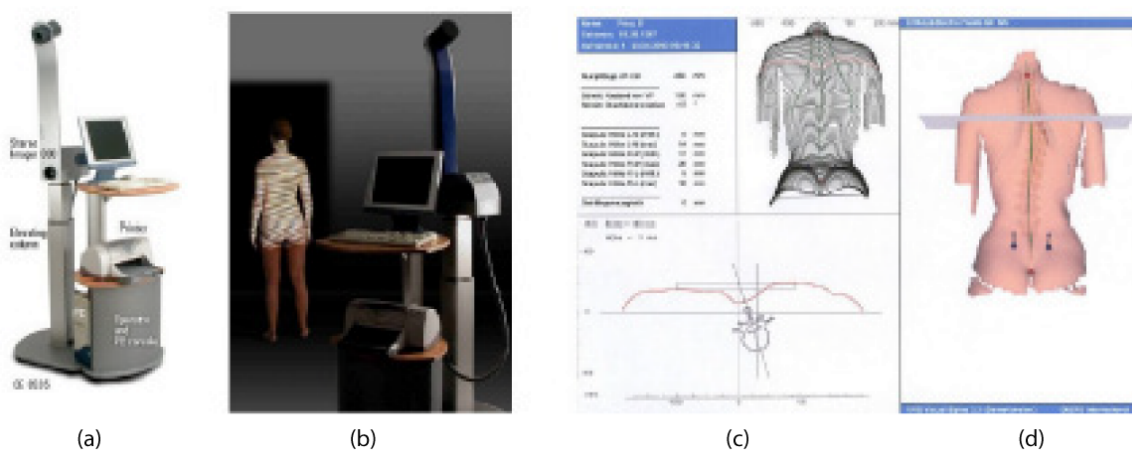


Figura 2.5: Sistema de medição automática da espinha.

## 2.7 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas as tecnologias do estado da arte para aquisição 3D de corpos humanos. Este estudo introdutório foi fundamental para o levantamento das especificações necessárias para a realização do presente projeto, como escolha do tipo de tecnologia e particularidades do funcionamento dos módulos de aquisição desenvolvidos.

## Técnicas tridimensionais

### 3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo será apresentada uma introdução às técnicas de aquisição e reconstrução tridimensionais, as quais serão utilizadas no decorrer do presente trabalho.

### 3.2 Aquisição 3D por triangulação laser

O método de aquisição 3D por triangulação laser consiste na projeção de um padrão de luz estruturada (no caso, uma linha vertical projetada por um laser) sobre o objeto o qual se deseja realizar a aquisição. Essa projeção é capturada pela câmera e a distância até o objeto é calculada por geometria, dado o conhecimento a priori das posições do laser e da câmera (32). Uma configuração de sistema de triangulação é mostrada na Figura 3.1.

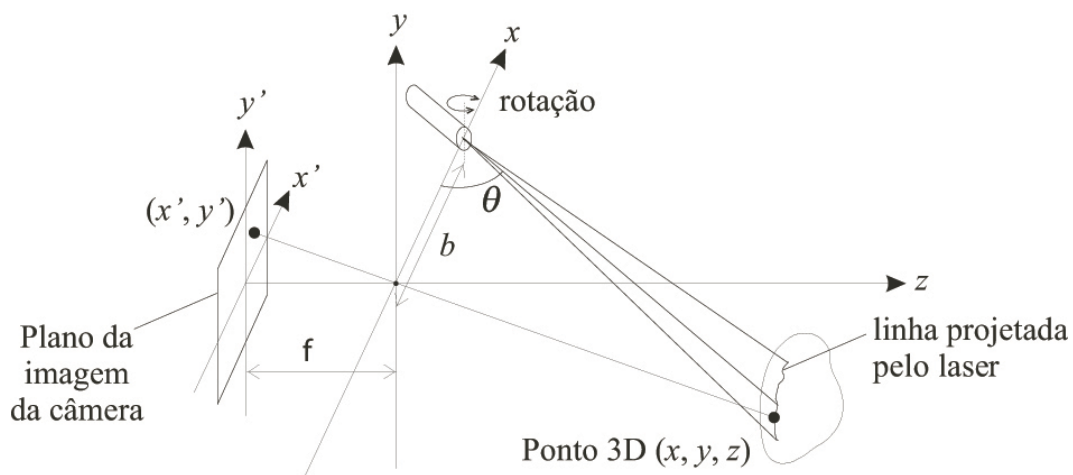


Figura 3.1: Geometria da aquisição por triangulação laser. Fonte:(12)

O centro das lentes está localizado na origem, com distância focal  $f$  até o plano da imagem, sendo a distância entre o projetor e a câmera representada pela linha de base  $b$ . A projeção do laser forma o ângulo  $\theta$  em relação à linha de base (36) e o ponto 3D  $(x, y, z)$  no espaço real é projetado no pixel da imagem  $(x', y')$ .

O valor de  $\theta$  é conhecido pelo sistema de varredura e a distância focal  $f$  é determinada pela calibração da câmera. A linha de base  $b$  é calculada posicionando o laser de maneira que sua projeção incida no centro da imagem, apontando para um objeto a uma distância conhecida  $z_0$ . Dessa forma, tem-se que:

$$b = \frac{z_0}{\tan\theta} \quad (3.1)$$

Um ponto  $(x, y, z)$  no espaço real é projetado na câmera no pixel  $(x', y')$ , de forma que:

$$x' = \frac{xf}{z} \quad (3.2a)$$

$$y' = \frac{yf}{z} \quad (3.2b)$$

Inicialmente, é feita uma varredura girando-se o laser, o qual projeta uma linha vertical, capturando imagens, armazenando os respectivos valores de  $\theta$  obtidos pelo sistema de varredura para cada imagem. Determina-se os valores de  $x'$  e  $y'$  onde o laser foi refletido para cada imagem e então os pontos (nas coordenadas reais) são calculados pelas equações abaixo.

$$x = \frac{bx'}{fcot\theta - x'} \quad (3.3a)$$

$$y = \frac{by'}{fcot\theta - x'} \quad (3.3b)$$

$$z = \frac{bf}{fcot\theta - x'} \quad (3.3c)$$

A vantagem dos sensores de luz estruturada é o custo. No entanto, eles não são muito precisos, já que a resolução do sistema é limitada pela resolução do pixel de medida  $x', y'$ . Existe ainda o problema das partes perdidas: a fonte de luz e a câmera não são coaxiais e algumas áreas do padrão de projeção podem ser escondidas por outras superfícies que fazem parte do próprio objeto.

Uma melhor definição pode ser feita pelo sensor ampliando a linha de base  $b$ . Entretanto, o problema de oclusão aumenta. Uma possível solução é uma configuração com múltiplas câmeras, integrando as informações de suas fontes.

### 3.3 Reconstrução de objetos tridimensionais

Seja uma superfície  $S \subset \mathbb{R}^3$  e uma amostragem de pontos  $P \subset S$ , que definimos como *nuvem de pontos de  $S$* .

Uma reconstrução a partir de nuvens de pontos  $P \subset S$  é, na quase totalidade dos trabalhos existentes, uma aproximação linear por partes  $S'$  de  $S$ .

Os métodos de reconstrução buscam satisfazer os seguintes itens:

- $S'$  deve manter a mesma topologia de  $S$ .
- Dado um ponto de  $S'$ , sua distância da superfície  $S$  deve ser suficientemente pequena (Figura 3.2).

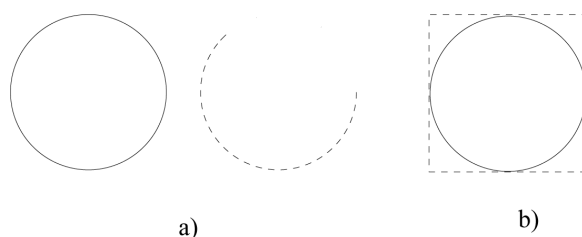


Figura 3.2: Exemplo bi-dimensional dos itens que um método de reconstrução tenta satisfazer: a) curvas não homeomorfas, mas próximas; b) curvas homeomorfas, mas não próximas. Fonte:(13)

Questões críticas em reconstrução de superfícies são manipular superfícies de topologia arbitrária, utilizar conjunto de pontos não-uniformes e produzir superfícies que garantam uma boa representação da forma original do objeto. Os algoritmos de reconstrução, em geral, além dessas questões, ainda buscam satisfazer requisitos, como eficiência de tempo e espaço, com estruturas de dados espaciais e topológicas eficientes.

A correta reconstrução de uma superfície é possível apenas se o conjunto  $P$  for adequado. A definição de um conjunto adequado varia conforme os algoritmos. Em geral, ou exige-se uma maior densidade de pontos nas regiões em que a curvatura do objeto sofre maior variação (16), ou superfícies  $r$ -amostradas (1), ou amostragem densa e uniforme (8).

Classificamos os métodos de reconstrução a partir de nuvens de pontos da seguinte maneira:

- Métodos baseados em esculpimento ou decomposição espacial;
- Métodos baseados em funções implícitas;
- Métodos incrementais;
- Métodos baseados em modelos deformáveis.

Outras formas de classificação menos gerais são encontradas na literatura. Huang classifica as categorias baseadas em superfície (equivalente aos métodos incrementais), volume (equivalente métodos de esculpimento) e implícitas (20). Zhao apenas classifica os trabalhos como paramétrico (baseados em esculpimento) e não paramétrico (superfícies implícitas) (40).

Com relação a um dos objetivos do presente trabalho, que é a determinação do volume, serão detalhados apenas os métodos baseados em funções implícitas, mais indicados a esse tipo de aplicação.

### 3.3.1 Métodos baseados em função implícita

Estes métodos, também conhecidos como métodos baseados em conjunto zero de função, consistem em utilizar a amostragem para definir uma função distância com sinal  $f$  e calcular o conjunto zero de  $f$ , que denotamos por  $Z(f)$ . A superfície é estimada por meio de uma superfície de nível de  $f$ . Os pontos em  $Z(f)$  devem ser, por hipótese, regulares ou o processo de reconstrução pode não gerar a superfície original do objeto.

O algoritmo descrito por Hoppe (19) é executado em dois estágios:

- O primeiro consiste em definir uma função  $f: D \subset \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$  em que  $f$  estima uma distância com sinal para a superfície  $S$  procurada. O conjunto  $Z(f)$  é a estimativa para  $S$ .
- A segundo estágio consiste em aproximar  $Z(f)$  por um complexo simplicial.

A função distância definida por Hoppe é dada por  $f(p) = dist_i(p) = (p - o_i) \cdot \hat{n}_i$ , sendo  $o_i$  o centro (centróide) de uma região plana e  $\hat{n}_i$  a normal unitária dessa região. O centro do plano  $o_i$ , denotado por  $V(x_i)$ , é definido pelos  $k$  pontos mais próximos de  $x_i$  ( $x_i$  pertence à nuvem de pontos). O cálculo do vetor normal é feito pela matriz de covariância simétrica e semi-definida positiva definida por:

$$Cov = \sum_{y \in V(x_i)} (y - o_i)^t (y - o_i) \quad (3.4)$$

Pelo fato da matriz ser simétrica e semi-definida positiva (21), tem-se três autovalores reais e maiores ou iguais a zero, sejam eles  $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3$ . Então escolhe-se  $\hat{n}$  como o autovetor associado a  $\lambda_3; v_3$  ou  $-v_3$ , de modo a manter os planos orientados.

Para obter a isosuperfície, Hoppe utiliza uma variação do algoritmo *Marching Cubes* em que cada cubóide é decomposto em tetraedros (19).

Boissonnat e Cazals utilizam vizinhanças naturais e superfícies  $r$ -amostradas para provar garantias de reconstrução homeomorfa e próxima à superfície original (4).

Dado um conjunto de pontos  $P \subset \mathbb{R}^3$ , os vizinhos naturais  $N_{x,P}$  de um ponto  $x \in \mathbb{R}^3$  são dados pelo conjunto:

$$N_{x,P} = \{p \in P : V(x) \cap V_p \neq \phi\} \quad (3.5)$$

onde  $V(x)$  é a célula de Voronoi de  $x$  em  $V_{P \cup \{x\}}^1$  e  $V_p$  é a célula de Voronoi de  $p$  de  $V_P^2$ . Seja  $A(x,p)$  o volume tomado por  $x$  de  $V_p$ , definido por:

$$A(x,p) = V(x) \cap V_p \quad (3.6)$$

A coordenada natural associada ao ponto  $p$  é a função contínua  $\lambda_p: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$  onde:

$$\lambda_p(x) = \frac{A(x,p)}{\sum_{q \in P} A(x,q)} \quad (3.7)$$

Boissonnat e Cazals assumem ainda que cada ponto  $p$  está associado a uma normal unitária  $n_p$ . A função distância com sinal para cada ponto  $p$  é definida por:

$$h(x) = (p - x) \cdot n_p \quad (3.8)$$

Uma função global é utilizada interpolando as funções com as coordenadas naturais:

$$h(x) = \sum_{p \in P} \lambda_p^{1+\delta}(x) h_p(x) \quad (3.9)$$

<sup>1</sup>Diagrama de Voronoi de  $P \cup \{x\}$ .

<sup>2</sup>Diagrama de Voronoi de  $P$ .

O termo  $\delta$  (pequeno) é adicionado para tornar  $h$  continuamente diferenciável e, conseqüentemente, evitar pontos não regulares. Neste algoritmo, aplica-se  $h$  a todos os vértices das arestas de Voronoi. O conjunto de triângulos duais das arestas de Voronoi que possuem sinais diferentes definem a aproximação linear por partes da superfície.

Bajaj (2) propôs um método<sup>3</sup> que opera em três fases:

- A primeira fase, denominada pré-processamento, consiste em criar uma função distância com sinal, em que o sinal da função vem da classificação dos tetraedros da triangulação de Delaunay (como internos e externos). A classificação dos tetraedros é realizada com auxílio de uma  $\alpha$ -*shape* calculada sobre a amostragem (o ponto está fora se estiver contido em um tetraedro externo ou o ponto está dentro se estiver localizado no interior de um tetraedro interno). A distância da função é obtida com auxílio do diagrama de Voronoi.
- Na aproximação, como é designada a segunda fase, o espaço é subdividido em tetraedros que contém porções do domínio. Os tetraedros são refinados até satisfazerem condições de erro estabelecidas pelo usuário. Nesta fase, garante-se uma aproximação de classe  $C^0$ .
- A fase final, denominada suavização, consiste em suavizar a superfície obtida nas fases anteriores para uma superfície de classe  $C^1$ .

### 3.4 Considerações finais

Foram apresentadas técnicas de triangulação simples para determinação dos pontos na superfície do objeto, assim como várias possibilidades de algoritmos para reconstrução do objeto e determinação de seu volume.

---

<sup>3</sup>No trabalho, além do ajuste da superfície, é feita uma interpolação de dados escalares definidos sobre os vértices da malha.



---

# Composição corporal

---

## 4.1 *Considerações iniciais*

Embora existam scanners antropométricos para diversas aplicações, como apresentado no capítulo 2, foi identificado neste trabalho que, até o presente momento, não existia nenhum trabalho relacionado a determinação da composição corporal humana através de técnicas de aquisição tridimensionais. Para explicar melhor como isto pode ser obtido, este capítulo traz uma introdução aos processos de medição da composição corporal humana.

## 4.2 *Modelos antropométricos*

Existe uma grande quantidade de dados antropométricos, os quais incluem espessuras de dobras cutâneas de várias regiões, circunferências e comprimentos de várias partes e regiões do corpo, e ainda um certo número de índices de massa corporal.

Foram desenvolvidos modelos antropométricos para prever a composição corporal para todos os grupos de idades (5). São divididos entre o *modelo básico de 2 compartimentos* e os *modelos multi-compartimento*: atômico, molecular, celular e funcional (Figura 4.1).

Abrangendo todos estes modelos, atualmente têm-se os seguintes métodos, detalhados no trabalho de Lukaski (25):

- Densitometria ou pesagem hidrostática.
- Dobras cutâneas.
- Condução elétrica.
- Metabolismo muscular.

### Modelo Básico de 2 Compartimentos

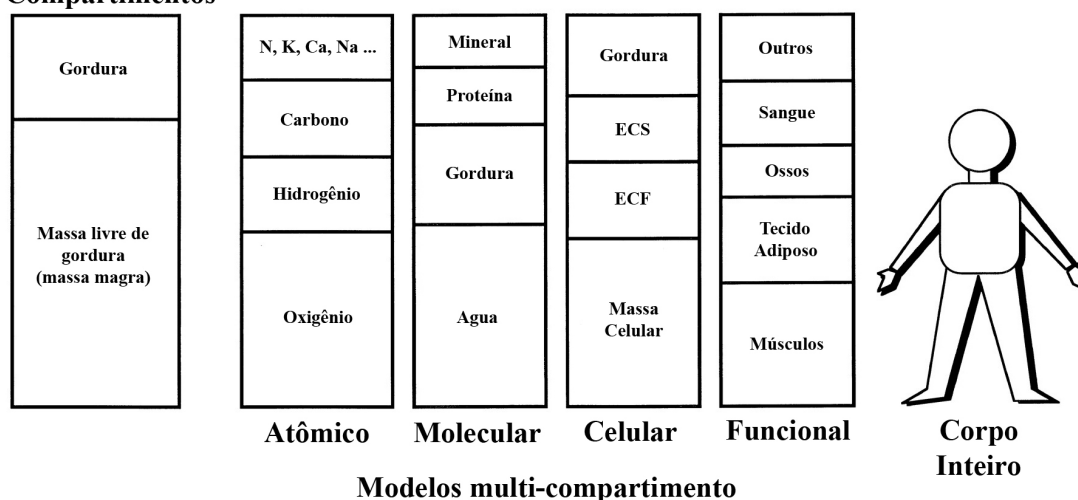


Figura 4.1: Modelos de composição corporal. Fonte:(9)

- Medidas de absorção.
- Ultra-som.
- Infra-vermelho.
- Ressonância magnética.
- Tomografia computadorizada.
- Determinação de água, potássio, nitrogênio ou cálcio total do corpo.

O presente trabalho faz uso do *modelo básico de 2 compartimentos*, utilizando um método muito similar ao da pesagem hidrostática. Tais assuntos serão aprofundados nos tópicos a seguir.

### 4.3 Modelo básico de 2 compartimentos

Algumas das primeiras informações sobre a composição corporal eram baseadas em análises químicas de órgãos específicos e, ocasionalmente, do corpo todo. O desenvolvimento e a aplicação do clássico *modelo de 2 compartimentos*, também conhecido por 2-C, aceleraram nos últimos anos devido à associação entre excesso de gordura e aumento da ocorrência de doenças cardiovasculares.

No modelo 2-C básico, o corpo é dividido em duas partes. Uma parte consiste da gordura corporal, também chamada de **massa gorda**, e todos os tecidos remanescentes são agrupados em outra parte chamada **massa magra** ou *massa livre de*

*gordura*. A medição direta da **massa gorda** não tem sido uma tarefa simples e vem representando um grande desafio para a maioria das técnicas de composição corporal. No entanto, se for possível determinar o total de **massa magra**, a **massa gorda** poderá ser calculada, indiretamente, como sendo a diferença entre o peso corporal e a **massa magra**.

O modelo 2-C é utilizado na pesquisa de composição corporal por mais de 50 anos e continua desempenhando papel importante, especialmente no avanço de novas tecnologias que focam estimar a gordura corporal (9).

O primeiro uso (e, provavelmente, o mais freqüente) do modelo 2-C é baseado na medição da densidade total do corpo. O método mais comum é a *hidrodensitometria*, ou *pesagem hidrostática*, que remonta ao trabalho pioneiro de Behnke (3). É interessante o fato de que este método inicialmente envolveu as universidades com um foco especial em educação física, freqüentemente relacionado com medição de movimentos, exercícios e performance nos esportes.

Dois novos métodos nucleares surgiram para utilização com o modelo de composição corporal 2-C: a contagem de  $^{40}K$  e a diluição com água radioativa, cada qual requerendo tecnologias mais sofisticadas do que a pesagem hidrostática. Para a avaliação da gordura corporal com quaisquer desses modelos nucleares, a água ou o potássio contidos na **massa magra** devem ser medidos e suas concentrações relativas devem ser assumidas como constantes para todas as idades: 0,732 l/kg para a água corporal (28) e 68.1 meq/kg para o potássio corporal (11). Da mesma forma, a densidade da **massa magra** para o modelo 2-C foi assumida constante (3).

#### 4.4 *Pesagem hidrostática*

Devido à sua ampla utilização durante muito tempo, a medida da densidade corporal  $D$  é normalmente referenciada como sendo o padrão ouro para avaliações de composição corporal, mesmo sendo apenas um modelo 2-C. O método mais comum para determinar a densidade corporal é a pesagem hidrostática, a qual requer que o sujeito seja completamente submerso em água (3).

O volume de água deslocado e/ou o peso do sujeito embaixo da água, combinados com a pesagem de laboratório, são utilizados para calcular a densidade  $D$  do corpo todo. Existe, porém, um pequeno problema para se obter uma medida precisa do peso do corpo (24); as limitações e restrições estão associadas com as estimativas de volume corporal e volume residual do pulmão (37).

No modelo clássico de composição corporal 2-C, o peso corporal pode ser dividido em **massa gorda**  $f_{fat}$  e **massa magra**  $f_{FFM}$ , assim como:

$$\frac{1}{D} = \frac{f_{fat}}{D_{fat}} + \frac{f_{FFM}}{D_{FFM}} \quad (4.1)$$

onde  $D_{fat}$  e  $D_{FFM}$  são as densidades para os compartimentos de **massa gorda** e **massa magra**, respectivamente.

A suposição de que a densidade da **massa gorda** seja relativamente constante é razoável (10) (26) (35). No entanto, a natureza heterogênea do compartimento de **massa magra** rapidamente leva a questionar a validade de assumirmos uma densidade constante para o mesmo. Podem existir variações individuais relacionadas ao sexo e etnia (6) (31), assim como alterações individuais na densidade, que ocorrem com o crescimento, maturação sexual, idade, atividade física e doenças (7) (17).

As equações normalmente utilizadas para estimar a **massa gorda**, por meio de pesagem hidrostática para o modelo 2-C, determinam inicialmente a densidade do corpo, seguido do percentual de gordura corporal (%G).

Para determinar a densidade  $D$ , levando em conta o volume residual, Wilmore e Behnke (38) elaboraram a seguinte equação:

$$D = \frac{P}{\frac{P-P_s}{D_a} - (V_r + V_g)} \quad (4.2)$$

onde  $P$  é o peso fora da água,  $P_s$  é o peso submerso, ambos em kg,  $D_a$  é a densidade da água,  $V_r$  o volume residual e, por fim,  $V_g$  é o volume de ar gastrointestinal, constante, definido como 0,1 litro ou  $100 \text{ cm}^3$ .

O volume residual  $V_r$  é obtido pela equação de Goldman e Becklake (14), para homens 4.3a e mulheres 4.3b:

$$V_r = 0,017.I + 0,027.A - 3,477 \quad (4.3a)$$

$$V_r = 0,009.I + 0,032.A - 3,9 \quad (4.3b)$$

sendo  $I$  a idade, em anos, e  $A$  a altura, em centímetros.

A seguir é apresentada a equação de Siri (33) para a determinação do percentual de gordura %G:

$$\%G = \frac{495}{D} - 450 \quad (4.4)$$

sendo  $D$  expresso em *gramas por cm<sup>3</sup>*.

Embora existam muitas definições para o valor ideal do percentual de gordura (em função de idade, etnia, prática de esportes, doenças e outros) Heywadr e Stolarczyk (18) consideram o percentual de gordura normal sendo 15% para homens e 23% para mulheres, e o valor estético sendo 13% para homens e 17% para mulheres.

## 4.5 Considerações finais

Aqui foram apresentados os modelos para composição corporal, com ênfase no modelo de dois compartimentos. A partir deste modelo, e com o estudo da pesagem hidrostática, é simples perceber que podemos substituir o volume, antes obtido pela pesagem hidrostática, por um volume calculado por técnicas de aquisição tridimensionais, a fim de aplicá-lo na equação de Siri para determinação da composição corporal.

---

# Simulações

---

## 5.1 Considerações iniciais

No início do projeto, antes da construção do protótipo do scanner antropométrico, foram realizadas três tipos de simulações. A primeira delas foi a simulação do sistema de aquisição 3D antropométrico proposto para o trabalho, a fim de verificar a viabilidade técnica do projeto e ajustar os algoritmos de filtragem, segmentação de imagens e estimador de distâncias. A segunda simulação foi sobre a extração de características de modelos virtuais já existentes. E, por fim, foi realizada uma simulação de determinação do percentual de gordura, também para modelos virtuais já existentes.

## 5.2 Sistema de aquisição 3D antropométrico

Com base no trabalho de França et al. (12), e contando também com a assessoria do mesmo, foram realizadas simulações do processo de aquisição 3D, em um ambiente virtual similar à proposta do trabalho.

No trabalho original, uma única câmera permanecia imóvel, enquanto um laser, a uma distância conhecida da câmera, percorria o objeto da aquisição com um padrão de linha, variando um ângulo  $\theta$ , também conhecido (Figura 3.1 no capítulo 3).

Na proposta atual, a fim de realizar a aquisição 3D de um corpo inteiro, dentro de um período de tempo razoável e com câmeras de custo acessível, foram idealizados quatro conjuntos para realização da tarefa, todos idênticos, denominados *módulos de aquisição*.

Cada *módulo de aquisição* deve ser constituído de uma câmera e de um laser, com gerador de padrão de linha, instalado paralelamente ao eixo central do campo de visão da câmera, a uma distância conhecida.

Dado que tais módulos devem percorrer toda a extensão do corpo humano, foi proposta a criação de um compartimento no qual as pessoas permaneceriam durante o curto período da avaliação, denominado *cabine de varredura*.

Os módulos de aquisição devem ser instalados em seções ortogonais da cabine de varredura, a fim de maximizar o aproveitamento do campo de visão de cada um deles. A cabine deve conter ainda uma balança de precisão em sua base, de forma a avaliar a massa do indivíduo, ao mesmo tempo em que realiza a aquisição 3D de seu corpo. A Figura 5.1 apresenta o modelo desenvolvido.

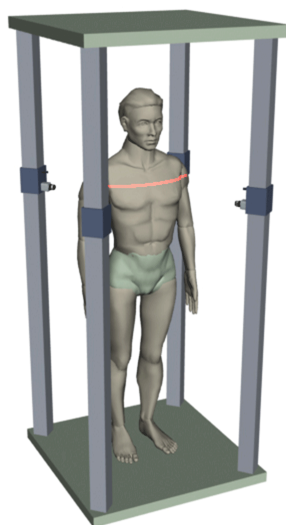


Figura 5.1: Simulação da cabine de varredura.

O modelo virtual de simulação trata-se de uma animação gráfica criada com o software **Lightwave**<sup>™</sup>, reproduzindo vários detalhes do sistema proposto, listados a seguir:

- Possui um objeto central representando um corpo;
- Realiza a projeção de um padrão de linha do laser;
- Movimenta os módulos ao longo da cabine;
- Possui quatro janelas de visualização onde devem ficar as câmeras reais.

Com base nesse modelo foram geradas 240 imagens, sendo 60 de cada janela de visualização. O deslocamento dos módulos foi de 3 *cm* entre cada imagem.

As imagens obtidas foram filtradas e a distância do laser foi estimada, da mesma forma como realizado no trabalho original de França, resultando nas nuvens de pontos da Figura 5.2.

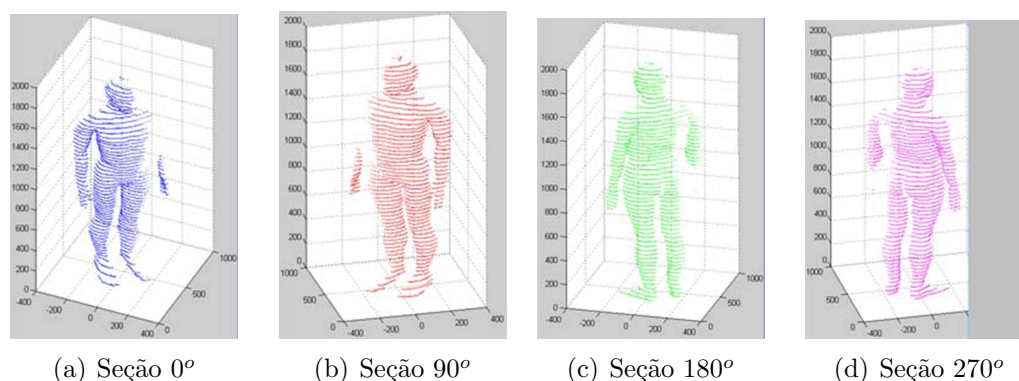


Figura 5.2: Nuvens de pontos geradas na simulação.

Cada *nuvem de pontos* representa uma seção ortogonal da *cabine de varredura*, atribuída a uma das janelas de visualização renderizada. A composição de todas estas nuvens, formando a nuvem completa do corpo, é apresentada na Figura 5.3.

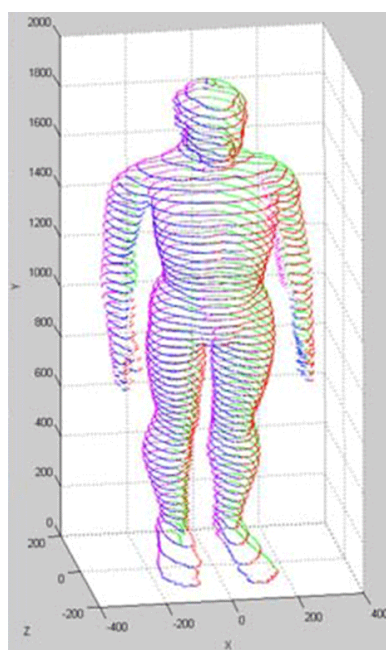


Figura 5.3: Composição de todas as nuvens de pontos.

A estrutura de dados que representa estas nuvens de pontos trata-se apenas de uma lista não-encadeada, onde cada ponto é representado por uma trinca de números em ponto flutuante, correspondendo as coordenadas dos eixos X, Y e Z, sendo a quantidade de elementos na lista equivalente a quantidade de pontos da nuvem.



### 5.3 Extração de características

A empresa **Cyberware™** (cyb) mantém disponível na internet exemplos de aquisição 3D de corpos completos, gerados por seus equipamentos comerciais.

Foi utilizado um desses modelos em nossa simulação de extração de características, no caso, a representação do corpo de uma mulher jovem, não obesa, com 7.562 vértices e 15.128 faces, apresentado na Figura 5.4 a seguir.

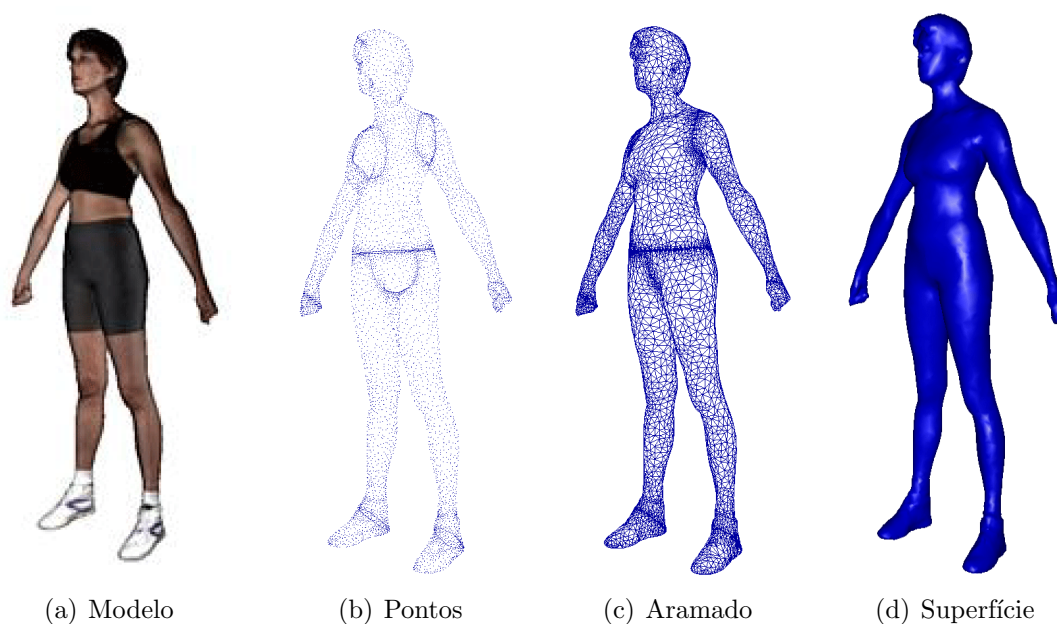


Figura 5.4: Modelo de corpo inteiro da Cyberware - Alison.

Seguem abaixo os resultados gerados pelo software de extração de características, a partir da entrada da nuvem de pontos da Figura 5.4(b).

```

Volume = 6.76124e+07
Area   = 1.78047e+06
Altura = 1.81273e+03
Tempo  = 47.67
Enter any character to quit

```

As unidades estão em  $mm^3$  para o volume,  $mm^2$  para a área de superfície,  $mm$  para a altura e segundos para o tempo de processamento. Para obtenção do volume, foi utilizado o método de decomposição por tetraedros.

Esse software foi desenvolvido por *Gois* (13), tendo cedido sua utilização para o presente trabalho.

## 5.4 Determinação do percentual de gordura

É possível determinarmos o percentual de gordura da pessoa avaliada unicamente por meio de técnicas tridimensionais e modelos antropométricos, sem a necessidade de uma balança de precisão. Porém, a eficácia desse método está condicionada a eficiência dos modelos antropométricos utilizados.

A fórmula de *Chi-Yuan Yu* (39) nos apresenta uma estimativa da área de superfície, a partir de dados antropométricos levantados por scanners 3D:

$$S = 0,015925 \cdot \sqrt{A \cdot M} \quad (5.1)$$

sendo  $S$  a área da superfície em  $m^2$ ,  $A$  a altura em  $cm$  e  $M$  a massa, em  $kg$ .

A área de superfície corporal calculada na seção anterior, abaixo descrita como  $S$ , quando expressa em  $m^2$ , equivale a 1,78047, e a altura, quando expressa em  $cm$ , equivale a 181,27.

Se aplicarmos na equação 5.1 os valores da área de superfície e altura calculados, obtemos a massa corporal  $M = 68.957,98g$ .

O volume corporal calculado na seção anterior, abaixo descrito como  $V$ , quando expressado em  $cm^3$  equivale a 67.612,41. O volume residual calculado pela equação 4.3b é 2.540,64  $cm^3$ , para idade estimada de 20 anos. O volume final é calculado como  $67.612,41 - 2.540,64 = 65.071,77$ .

Temos então a densidade  $D = M/V = 68.957,98/65.071,77 = 1,0597219$  e o percentual de gordura  $\%G = (495/D) - 450 = (495/1,0597219) - 450 = 17,10$ .

Ou seja, o percentual de gordura estimado para a pessoa que gerou o modelo tridimensional é de 17,10%, considerado normal para mulheres, segundo *Heywadr e Stolarczyk* (18).

Levando em conta o porte atlético da pessoa utilizada para geração do modelo, visto na Figura 5.4(a), podemos considerar aceitável o percentual de gordura estimado, e conseqüentemente também o volume, a área de superfície e a altura, obtidos a partir da nuvem de pontos pelo software de extração de características.

Abaixo é apresentada a equação para determinação do percentual de gordura utilizando apenas características extraídas por meio de técnicas tridimensionais:

$$\%G = \frac{495VA}{1000\left(\frac{S}{0,015925}\right)^2} - 450 \quad (5.2)$$

sendo  $V$ ,  $S$  e  $A$  fornecidos pelo sistema tridimensional.

### 5.4.1 Software para determinação da composição corporal

Para avaliar os métodos que relacionam a área de superfície do corpo com o peso e a altura, foi elaborado um programa de simulação, apresentado na Figura 5.5.



Figura 5.5: Software para determinar a composição corporal.

A fórmula genérica para a determinação da área de superfície é a equação 5.3.

$$S = a_0 \cdot A^{a_1} \cdot M^{a_2} \quad (5.3)$$

sendo  $S$  a área da superfície em  $m^2$ ,  $A$  a altura em  $cm$ ,  $M$  a massa, em  $kg$ ,  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$  os coeficientes para cada método.

Além do método de *Chi-Yuan Yu* (39), utilizado na seção anterior, foram testados outros métodos, apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Coeficientes para a equação genérica de superfície corporal. Fonte: (39)

Método	$a_0$	$a_1$	$a_2$
DuBois and DuBois	0,007184	0,7250	0,4250
Faber and Melcher	0,007850	0,7250	0,4250
Boyd	0,017827	0,5000	0,4838
Banerjee and Sen	0,007466	0,7250	0,4250
Banerjee and Bhattacharya	0,007000	0,7250	0,4250
Gehan and George	0,023500	0,4225	0,5146
Haycock et al.	0,024265	0,3964	0,5378
Shuter and Aslani	0,009490	0,6550	0,4410

Nas figuras de 5.6 até 5.9 e nas tabelas de 5.2 até 5.5, são apresentados os resultados obtidos para diferentes modelos.

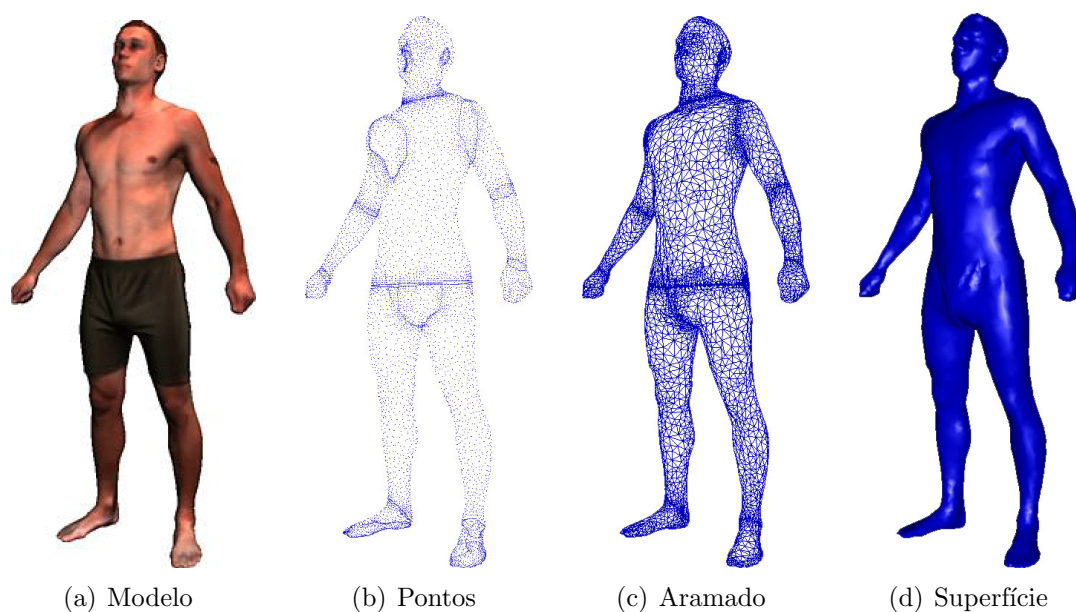


Figura 5.6: Modelo de corpo inteiro da Cyberware - Eric.

Tabela 5.2: Dados sobre o modelo Eric.

Característica	Volume ( $cm^3$ )	Área ( $m^2$ )	Altura ( $cm$ )	Idade ( <i>anos</i> )	%G (Yu)
Valor	71.756,95	1,83507	176,7	20	11,91

## 5.5 Considerações finais

A Tabela 5.6 apresenta o percentual de gordura obtido para cada método aplicado na simulação.

Podemos observar que o método de *Chi-Yuan Yu* (39) apresentou os resultados mais compatíveis com a realidade dos modelos virtuais. Isso pode ser explicado pelo fato deste método ter sido elaborado utilizando técnicas de aquisição 3D similares as utilizadas no presente trabalho.

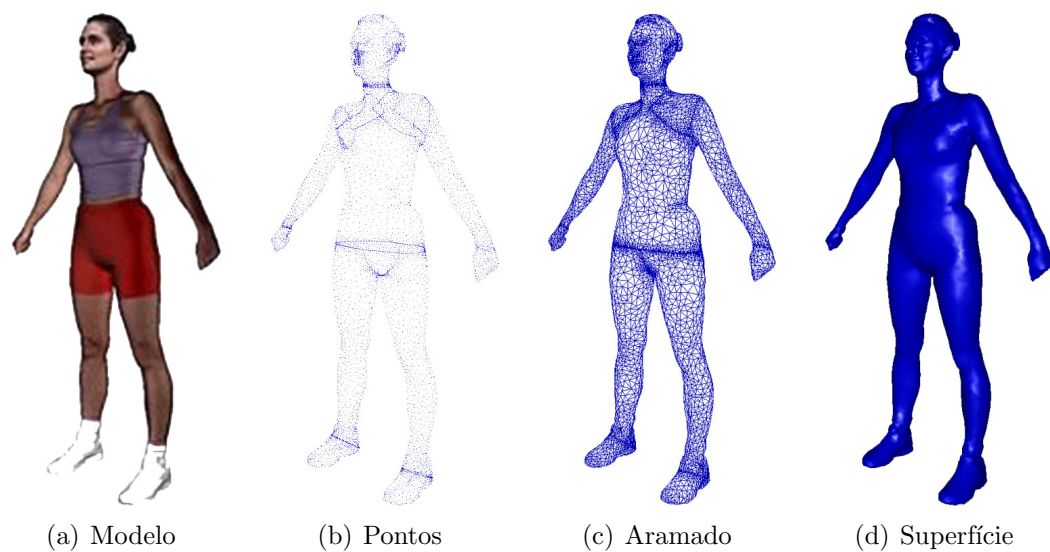


Figura 5.7: Modelo de corpo inteiro da Cyberware - Tammy.

Tabela 5.3: Dados sobre o modelo Tammy.

Característica	Volume ( $cm^3$ )	Área ( $m^2$ )	Altura ( $cm$ )	Idade ( <i>anos</i> )	%G (Yu)
Valor	72.883,81	1,83986	179,8	20	19,35

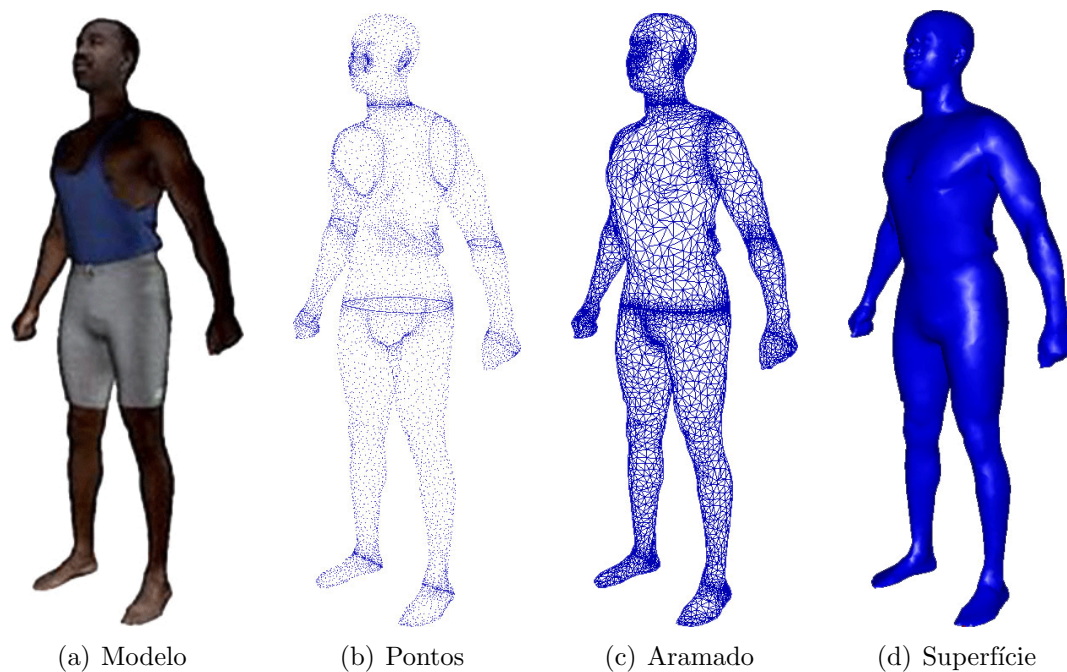


Figura 5.8: Modelo de corpo inteiro da Cyberware - John.

Tabela 5.4: Dados sobre o modelo John.

Característica	Volume ( $cm^3$ )	Área ( $m^2$ )	Altura ( $cm$ )	Idade ( <i>anos</i> )	%G (Yu)
Valor	86.768,20	2,04929	183,4	30	14,80

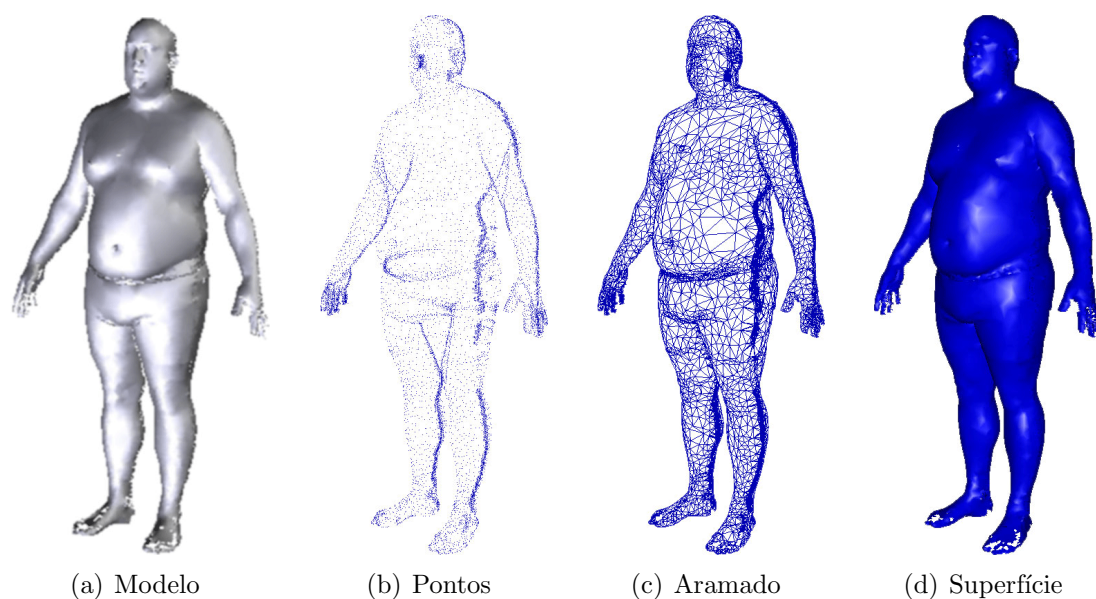


Figura 5.9: Modelo de corpo inteiro da Cyberware - Smith.

Tabela 5.5: Dados sobre o modelo Smith.

Característica	Volume ( $cm^3$ )	Área ( $m^2$ )	Altura ( $cm$ )	Idade ( <i>anos</i> )	%G (Yu)
Valor	109.869,42	2,24951	181,2	30	35,23

Tabela 5.6: Comparação entre os percentuais de gordura obtidos, por método.

Método	Alison	Eric	Tammy	John	Smith
Chi-Yuan Yu	17,10	11,91	19,35	14,80	35,23
DuBois and DuBois	83,46	62,60	76,81	59,30	60,12
Faber and Melcher	207,20	181,51	199,01	177,44	178,44
Boyd	61,83	54,68	63,02	54,73	73,42
Banerjee and Sen	134,04	111,21	126,76	107,60	108,49
Banerjee and Bhattacharya	51,86	32,25	45,61	29,14	29,91
Gehan and George	62,69	60,18	66,86	63,17	89,73
Haycock et al.	55,47	55,35	61,34	61,44	92,68
Shuter and Aslani	59,80	43,91	55,76	41,33	47,36



## Protótipo do Scanner Antropométrico

### 6.1 Considerações iniciais

Como as técnicas tridimensionais que utilizam o princípio da triangulação só podem fazer a aquisição de dados onde os sensores captam o alvo, reconstruir objetos inteiros geralmente envolve a integração de várias aquisições feitas em diferentes pontos de vista. O problema de interesse é, então, construir uma representação da superfície corporal a partir de múltiplas aquisições, e também determinar a densidade do indivíduo, através do cálculo do volume e medição do seu peso.

### 6.2 Visão Geral

Para atingir esse objetivo, foi construído um equipamento constituído de uma **cabine de varredura** e uma **central de controle**, como mostra a Figura 6.1.

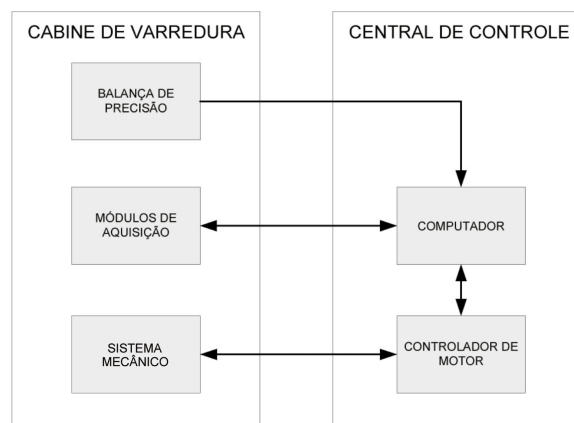


Figura 6.1: Visão geral do sistema.

## 6.3 Central de controle

A central de controle é constituída por um computador e um controlador de motor. O computador será responsável pela captação e processamento das imagens geradas pelos módulos de aquisição, devidamente referenciadas pelo controlador de motor, e deve gerar as nuvens de pontos, utilizando o software desenvolvido por França et al. (12).

### 6.3.1 Computador

Foi utilizado um computador com processador **AMD™ Athlon-64**, com 512 MB de memória RAM e placa mãe marca **ASUS™**, modelo *K8V-X*, com 4 controladores **USB 2.0** desenvolvidos pela empresa **VIA™**.

### 6.3.2 Controlador de motor

O controlador de motor desenvolvido é apresentado na Figura 6.2. Ele é responsável pela interface entre o computador e o sistema mecânico da cabine de varredura.

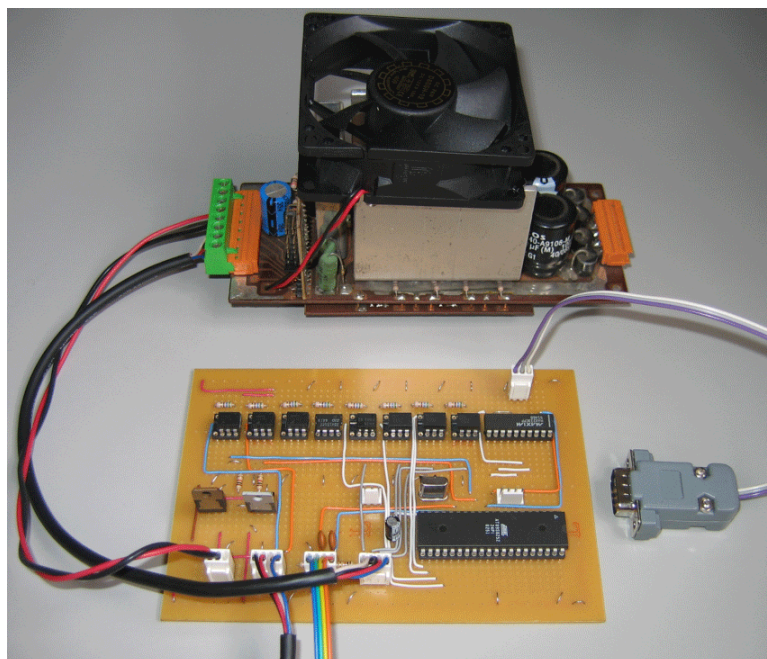


Figura 6.2: Controlador de motor.

Trata-se de um circuito eletrônico, detalhado no Apêndice A, baseado no microcontrolador *AT89S8252*, da empresa **ATMEL™**. Apresenta três funções básicas:

- fornecer a posição atual dos módulos de aquisição;



- deslocar os módulos de aquisição para uma posição desejada;
- verificar se as posições dos módulos estão dentro dos limites estabelecidos.

Na Figura 6.3 é apresentado um diagrama de estados do software de controle. A listagem completa dos código-fontes do programa é apresentada no Apêndice C.

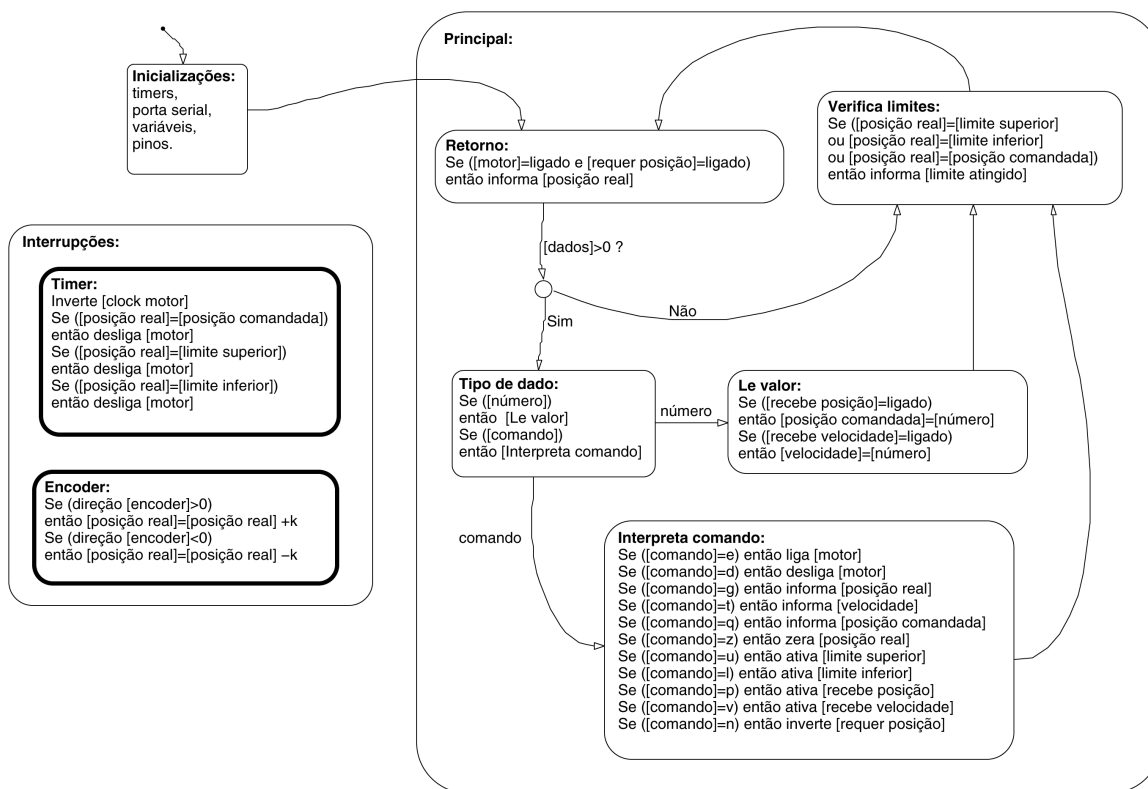


Figura 6.3: Diagrama de estados do software de controle.

## 6.4 Cabine de varredura

A cabine de varredura é composta por uma balança de precisão, para a medição do peso, e quatro módulos de aquisição, sendo que um motor promove seu movimento vertical através de quatro trilhos.

### 6.4.1 Balança de precisão

Foi utilizada uma balança de precisão modelo LC200, do fabricante nacional Marte Balanças. Ela tem capacidade para medir até 200 kg, com precisão de 50 gramas. A balança apresenta saída de dados no padrão RS-232C, sendo o formato dos dados apresentado na Figura 6.4. A balança é apresentada na Figura 6.5.

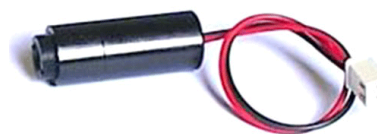




Figura 6.6: Módulo de aquisição.



(a) Câmeras



(b) Diodo laser

Figura 6.7: Câmeras e laser do módulo de aquisição.

O encoder utilizado, do fabricante chinês **Tamagawa Seiki Co Ltd**, modelo OIH código 48-1000P4-L6-5V TS-5207 N500, é apresentado na Figura 6.8(b).

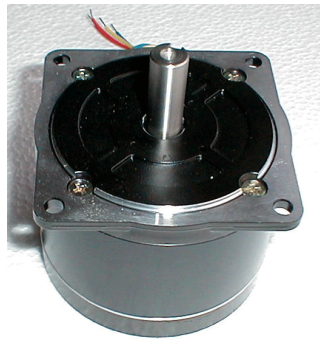
A velocidade máxima do motor utilizado é de 300 RPM. Porém, foi construído um sistema mecânico multiplicador para dobrar essa velocidade, que, em conjunto com o passo do fuso, gerou uma velocidade final de deslocamento de 10 cm/s para os módulos de aquisição.

O sistema mecânico multiplicador de velocidade foi constituído de um conjunto eixos, mancais e polias, dispostos sobre o teto da cabine de varredura, acoplados entre o motor e os fusos.

Foram utilizadas polias de 48 e 20 dentes, interligadas por seis correias sincronizadoras tipo XL (com passo de 5,08 mm).

Foram utilizadas duas correias modelo 390XL037 (990,6 mm) e quatro correias modelo 506XL037 (1.285,24 mm). As polias utilizadas são apresentadas na Figura 6.10, tendo sido utilizadas dez polias 20XL037 e duas polias 48XL037.

O diagrama do sistema mecânico é apresentado no Apêndice B.

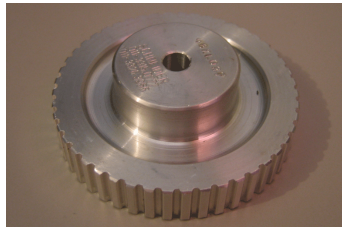


(a) Motor de passo



(b) Encoder

Figura 6.8: Motor e encoder do sistema mecânico.



(a) 48 dentes



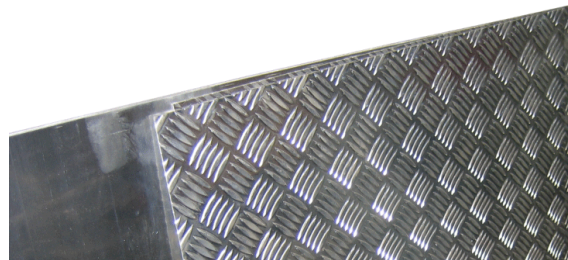
(b) 20 dentes

Figura 6.9: Polias utilizadas no sistema mecânico.

Foram utilizados perfilados de alumínio para comportar os fusos e para dar sustentação à cabine, assim como apresentado na Figura 6.10(a). Em cada trilho foi instalada uma guia linear, a fim de manter a precisão durante a movimentação do módulo de aquisição. Os trilhos e guias foram presos a chapas de alumínio quadradas com 1,25 metro de lado e 3 mm de espessura, apresentadas na Figura 6.10(b) e detalhadas no Apêndice B.



(a) Trilho, fuso e suporte



(b) Chapas de alumínio

Figura 6.10: Componentes diversos da cabine.

A Figura 6.11 apresenta a cabine de varredura completamente montada, com a balança de precisão e os módulos de aquisição.

## 6.5 Considerações finais

A metodologia utilizada durante a construção do protótipo visou atender os requisitos para realização do mapeamento da superfície total do corpo humano, utilizando a técnica de aquisição a laser. Esforços foram realizados no sentido de diminuir a principal limitação deste método quando aplicado à medição de pessoas, que é a minimização do tempo total de aquisição. Além disso, foi acrescentado ao sistema uma balança de precisão, possibilitando a utilização do protótipo para avaliação da composição corporal.



Figura 6.11: Montagem completa da cabine de varredura.

---

## Resultados e Discussões

---

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos pelo projeto. Nos testes executados no protótipo desenvolvido, o enfoque não foi dado sobre a obtenção do percentual de gordura, como nas simulações, devido a necessidade de manuseio com grupos de controle. Tal tarefa foi indicada como trabalho futuro para a continuidade desta pesquisa.

O enfoque dos testes reais foram em relação a aquisição de informações volumétricas a partir de objetos do tamanho e formato de corpos reais. Inicialmente foi realizada a aquisição do corpo do próprio autor deste trabalho, apresentada na Figura 7.1.

Dado que o tempo de aquisição foi maior do que 1 minuto, eventuais erros devido a movimentação da pessoa submetida a aquisição tridimensional ocorreram, gerando os resultados ruidosos apresentados na figura anterior.

Uma vez que o protótipo desenvolvido necessita de atualizações de câmeras, motores e mecanismos a fim de melhorar o tempo de aquisição, foram realizados testes com um manequim convencional, conforme apresentado na Figura 7.2.

O tamanho da linha de base (distância entre a câmera e o laser) nos módulos de aquisição foi de 30 cm. O ângulo entre a câmera e o laser foi de 64 graus. O tempo total da aquisição foi de 86 segundos.

As Figuras 7.3 e 7.4 apresentam com maior detalhe os resultados obtidos na aquisição da nuvem de pontos, suavização, triangulação e reconstrução da superfície do manequim.



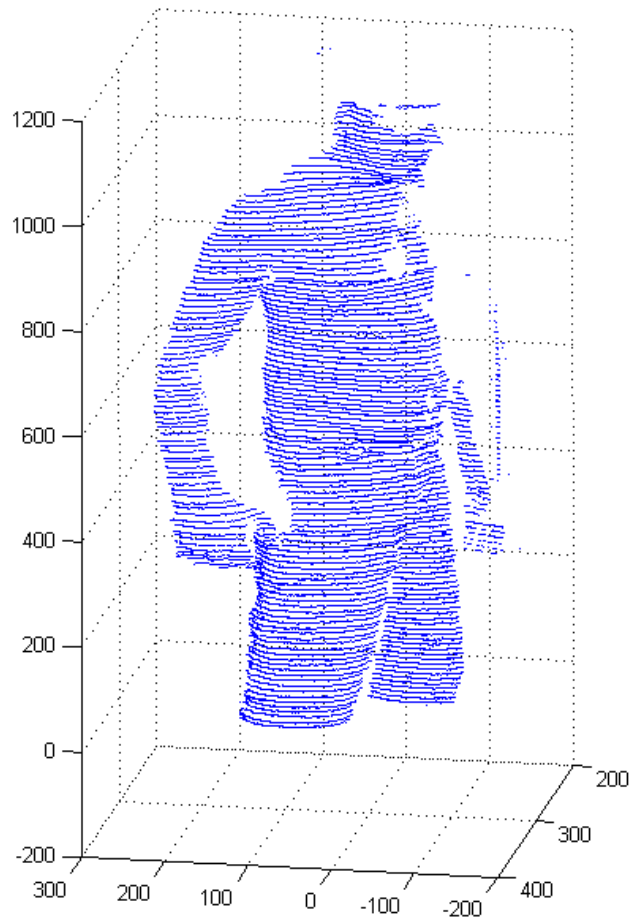
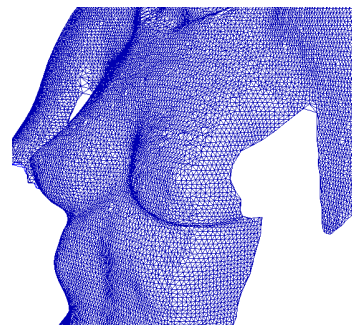


Figura 7.1: Nuvem de pontos de um corpo real.



(a) Aquisição em andamento



(b) Malha triangular

Figura 7.2: Aquisição 3D de um manequim.



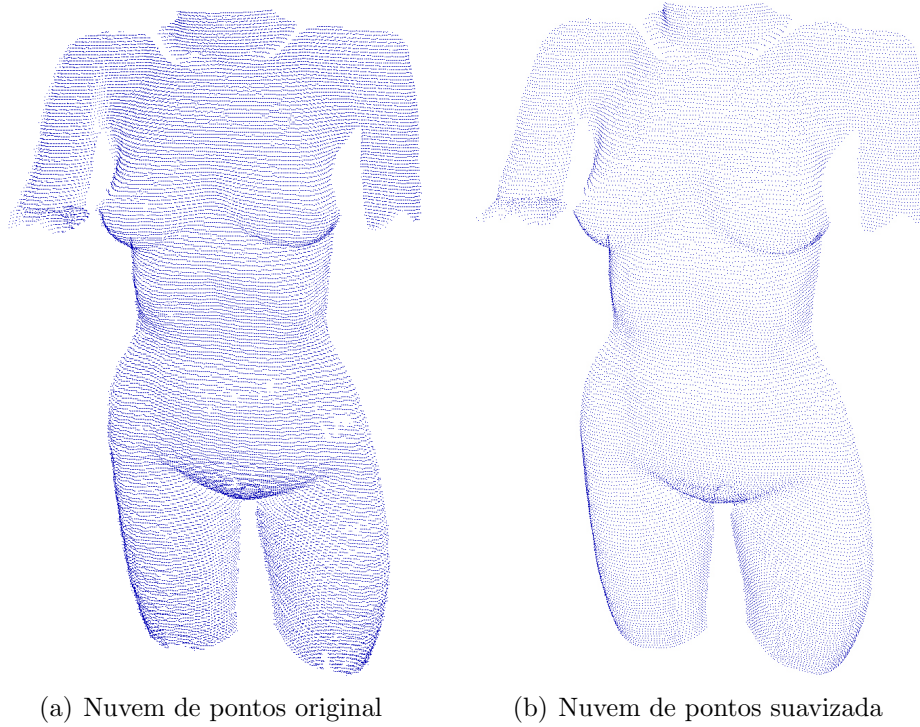


Figura 7.3: Nuvem de pontos da aquisição.

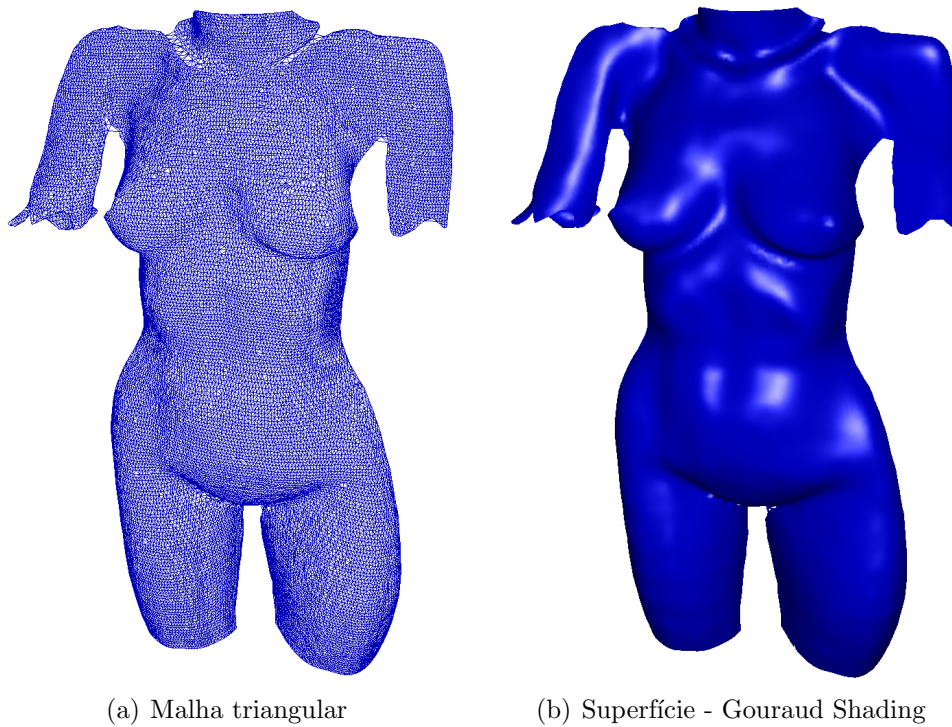


Figura 7.4: Etapas da aquisição 3D de um manequim.

---

## Conclusões e Trabalhos Futuros

---

### 8.1 *Conclusões*

Partindo dos resultados sobre aquisição 3D anteriormente obtidos pelo grupo de pesquisa, identificou-se um potencial uso desta tecnologia voltada a determinação de medições antropométricas e composição corporal. Foi realizada então a construção de um protótipo opto-eleto-mecânico e o desenvolvimento de softwares para processamento de imagens, a fim de atingir estes objetivos.

Embora estivemos a par das dificuldades inerentes ao uso da tecnologia de aquisição adotada para o desenvolvimento do projeto (aquisição a laser), foram superadas todas as dificuldades opto-eleto-mecânicas, as quais estavam fora do escopo da área da ciência da computação, e eram de grande preocupação no início do projeto.

O sistema opto-eleto-mecânico foi detalhadamente descrito ao longo deste trabalho (ver apêndices), inclusos diagramas elétricos, esboços mecânicos e listagens de códigos-fonte dos programas embutidos, de forma a possibilitar sua fácil reprodução e validação.

Foi desenvolvido ainda um protocolo especial de comunicação, para ser utilizado na central de controle, possibilitando a comunicação do computador com o controlador de motor. Este protocolo se baseou nas necessidades inerentes de um sistema de aquisição, as quais envolvem altas taxas de comunicação e mecanismos de tolerância a falhas para certificar a troca dos pacotes com informações sobre a posição dos módulos.

Também foram implementados neste protocolo mecanismos de segurança mecânica para o motor do sistema, a fim de monitorar a posição do módulo de aquisição quando o mesmo atinge as extremidades dos trilhos.

Podemos considerar, pelos resultados obtidos, que foi criado, com sucesso, a infraestrutura total para realização da aquisição de dados antropométricos, visando a reconstrução e análise tridimensional de corpos humanos, com capacidade inclu-

sive para determinação da composição corporal. Além disso, o protótipo proposto pode ser reproduzido por outras instituições de pesquisa, a fim de obterem maior autonomia em suas pesquisas, desde computação gráfica até áreas de saúde.

## 8.2 *Trabalhos futuros*

O protótipo desenvolvido no projeto em questão reúne todas as características de hardware necessárias para o desenvolvimento de softwares para várias aplicações. As principais delas estão listadas abaixo, como possibilidades de trabalhos futuros:

- Validar o processo de determinação de gordura corporal utilizando a técnica de aquisição 3D antropométrica aqui apresentada.
- Uma vez que o protótipo fornece a posição pelo encoder e pode controlar a velocidade do motor, é possível implementar um sistema PID (proporcional-integral-derivativo) junto ao computador da central de controle, para um controle mais refinado do posicionamento.
- Desenvolver um algoritmo de reconstrução que não necessite utilizar a triangulação de Delaunay, reduzindo em muito o tempo gasto na etapa de reconstrução.
- Estimar a massa óssea, por meio de diâmetros ósseos, e obter a massa muscular, outro item muito importante em áreas de saúde.
- Desenvolver sistemas específicos para avaliação postural humana, realizando a avaliação das diversas patologias de maneira automática.
- Determinar o somatotipo (endomorfo, ectomorfo ou mesomorfo) do corpo e gerar a somatocarta humana, de forma totalmente automática.
- Avaliar, também de forma automática, a relação cintura quadril, estimando a partir desta a gordura visceral, muito importante para monitoramento de pacientes com risco cardíaco.
- Analisar a possibilidade de adaptação do equipamento para uso em pecuária, a fim de avaliar a espessura da camada de gordura subcutânea em suínos e bovinos.

# Referências Bibliográficas

---

- [cyb] Cyberware (Acesso em 09/06/2005). Whole Body VRML Samples. <http://www.cyberware.com/wb-vrml>.
- [ele] Electric Motors (Acesso em 25/05/2005). Introduction to Electric Motors. <http://www.electricmotors.machinedesign.com>.
- [rs2] RS-232C. Revista Mecatronica Atual. No. 4. Editora Saber Ltda. 2002.
- [1] Amenta, N., Bern, M., and Kamvysselis, M. (1998). *A new Voronoi-based surface reconstruction algorithm*, pages 415–421. Computer Graphics 32(Annual Conference Series).
- [2] Bajaj, C. L., Bernardini, F., and Xu, G. (1995). Automatic reconstruction of surfaces and scalar fields from 3d scans. *Computer Graphics Proceedings SIGGRAPH*.
- [3] Behnke, A. R., Feen, B. G., and Welham, W. C. (1942). The specific gravity of healthy men. body weight and volume as an index of obesity. *American Medical Association*, 118:495–498.
- [4] Boissonnat, J. D. and Cazals, F. (2002). Smooth surface reconstruction via natural neighbour interpolations of distance functions. *Computational Geometry Theory and Applications*, 22:185–203.
- [5] Brodie, D. V., Moscrip, V., and Hutcheon, R. (1998). Body composition measurement: a review of hydrodensitometry, anthropometry, and impedance methods. *Nutrition*, 14:296–310.
- [6] Cote, K. D. and Adams, W. C. (1993). Effect of bone density on body composition estimates in young adult black and white women. *Medical Science Sports*, 25:290–296.

- [7] Deurenberg, P., Weststrate, J. A., and der Kooy, K. V. (1989). Is an adaptation of siri's formula for the calculation of body fat percentage from body density in the elderly necessary? *European Journal of Clinical Nutrition*, 43:559–568.
- [8] Edelsbrunner, H. and Mücke, E. P. (1994). Three-dimensional alpha shapes. *ACM Transactions on Graphics*, 13:43–72.
- [9] Ellis, K. J. (2000). Human body composition: In vivo methods. *Physiological Reviews*, 80:649–680.
- [10] Fidanza, F. A., Keys, A., and Anderson, J. T. (1953). Density of body fat in man and other animals. *Applied Physiology*, 6:252–256.
- [11] Forbes, G. B., Gallup, J., and Hursh, J. (1961). Estimation of total body fat from potassium-40 content. *Science*, 133:101–102.
- [12] França, J. G. D. M. (2004). Desenvolvimento de sistema de aquisição de informações volumétricas usando método de triangulação a laser e campo de visão variável. Master's thesis, Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Computação.
- [13] Gois, J. P. (2004). Reconstrução de superfícies a partir de nuvens de pontos. Master's thesis, Universidade de São Paulo, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação.
- [14] Goldman, H. and Becklake, M. (1959). Respiratory function tests. *American Review of Respiratory Disease*, 79:457–467.
- [15] Goodhue, G. (1993). Determining baud rates for 8051 uarts and other uart issues. Application Note AN448, Philips Semiconductors Microcontroller Products.
- [16] Gopi, M., Krishnan, S., and Silva, C. T. (2000). Surface reconstruction based on lower dimensional localized delaunay triangulation. *Computer Graphics Forum (Eurographics 2000)*, 19.
- [17] Heymsfield, S. B., Wang, J., Kehayias, J., Heshka, S., Lichtman, S., and Pierson, R. N. (1989). Chemical determination of human body density in vivo: relevance to hydrodensitometry. *American Journal of Clinical Nutrition*, 50:1282–1289.
- [18] Heywadr, V. H. and Stolarczyk, L. M. (2000). *Avaliação da composição corporal aplicada*. Manole.

- 
- [19] Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., McDonald, J., and Stuetzle, W. (1992). Surface reconstruction from unorganized points. *Computer Graphics*, 26(2):71–78.
- [20] Huang, J. and Menq, C. H. (2002). Combinatorial manifold reconstruction and optimization from unorganized point cloud with arbitrary topology. *Computer-Aided Design*, 1(34):149–165.
- [21] Isaacson, E. and Keller, H. B. (1966). *Analysis of Numerical Methods*. John Wiley and Sons.
- [22] Jennings, S., Huntley, J., and Massara, R. (1996). Basic theory of stepping motors. Industrial Supply MRO.
- [23] Lew, A. and Garfinkel, L. (1979). Variations in mortality by weight among 750,000 men and women. *Chronic Diseases*, 32:563–576.
- [24] Lohman, T. G., Roche, A. F., and Martorell, R. (1988). *Anthropometric Standardization Reference Manual*. Human Kinetics, Champaign, IL.
- [25] Lukaski, H. C. (1987). Methods for the assessment of human body composition: traditional and new. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 46:537–556.
- [26] Martin, A. D., Daniel, M. Z., Drinkwater, D. T., and Clarys, J. P. (1994). Adipose tissue density, estimated adipose lipid fraction and whole body adiposity in male cadavers. *Obesity*, 18:79–83.
- [27] N’Apuzzo, N. (2004). Digitization of the human body in the present-day economy. *SPIE-IS T Electronic Imaging*, 5665:252–259.
- [28] Pace, N. and Rathbun, N. (1945). Studies on body composition. iii. the body water and chemically combined nitrogen content in relation to fat content. *Biological Chemistry*, 158:685–691.
- [29] Pauptit, A. and Nordberg, E. (1996). X-tal oscillators on 8-bit microcontrollers. Application Note AN96103, Philips Semiconductors Microcontroller Products.
- [30] Romito, M. and Chaddad, R. (2003). Quando virá o censo antropométrico nacional???. *Revista da Associação Brasileira de Técnicos Têxteis*, 4:8–9.
- [31] Shutte, J. E., Townsend, E. J., Hugg, J., Shoup, R. F., Malina, R. M., and Blomqvist, C. G. (1984). Density of lean body mass is greater in blacks than in whites. *Applied Physiology*, 56:1647–1649.

- [32] Sinha, S. S. and Jain, R. (1994). Range image analysis. *Handbook of Pattern Recognition and Image Processing: Computer Vision*, 2:186–195.
- [33] Siri, W. E. (1956). *The gross composition of the body*, In: *Advances in Biological and Medical Physics*, pages 239–240. C. A. Tobias and J. H. Lawrence, New York.
- [34] Stewart, J. W. (1993). *The 8051 Microcontroller*. Prentice Hall.
- [35] Thomas, L. W. (1962). The chemical composition of adipose tissue of man and mice. *Exp. Physiology*, 47:179–188.
- [36] Tiziani, H. J. (1997). *Optical Measurement Techniques and Applications, Optical Metrology of Engineering Surfaces - Scope and Trends*, pages 15–22. P. K. Rastogi, Norwood.
- [37] Wilmore, J. H. (1969). The use of actual, predicted and constant residual volumes in the assessment of body composition by underwater weighing. *Medical Science Sports*, 1:87–90.
- [38] Wilmore, J. H. and Behnke, A. R. (1969). An anthropometric estimation of body density and lean body weight in young men. *Applied Physiology*, 27:25–31.
- [39] Yu, C., Lo, Y., and Chiou, W. (2003). The 3d scanner for measuring body-surface area: a simplified calculation in the chinese adult. *Applied Ergonomics*, 34:273–278.
- [40] Zhao, H., Merriman, B., Osher, S., and Kang, M. (2000). Implicit nonparametric shape reconstruction from unorganized points using a variational level set method. *Computer Vision and Image Understanding*, 60:295–313.

## Esquemas Eletrônicos

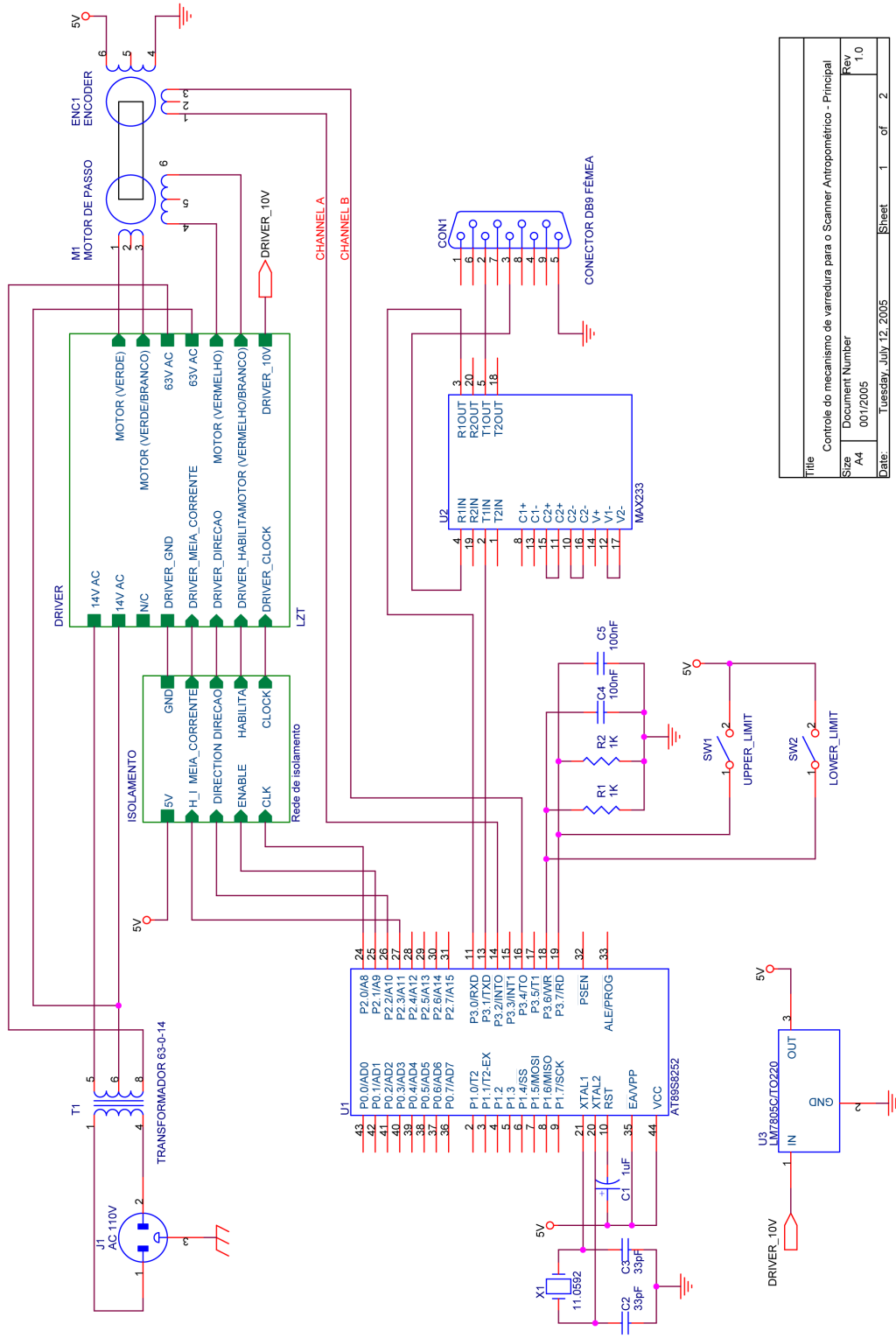
Na Figura A.1 é apresentado o esquema principal do controle do mecanismo de varredura para o scanner antropométrico. O bloco **Isolamento** é detalhado na Figura A.2. Na Tabela A.1 é apresentada a listagem dos componentes eletrônicos.

Tabela A.1: Listagem de componentes.

Item	Quantidade	Referência	Descrição (Encapsulamento)
01	1	CON1	Conector DB9 fêmea
02	1	C1	Capacitor eletrolítico 1uF
03	2	C2,C3	Capacitor cerâmico 33pF
04	2	C4,C5	Capacitor poliéster 100nF
05	1	J1	Tomada AC 110V
06	1	M1	Motor de passo 1, 8° 5Nm
07	1	ENC1	Encoder de 1000 pulsos
08	2	R1,R2	Resistor 1K
09	4	R3,R4,R5,R6	Resistor 560R
10	1	SW1,SW2	Sensor magnético Reed
11	1	T1	Transformador 63-0-14
12	1	U1	Microcontrolador AT89S8252 (PLCC)
13	1	U2	Conversor de níveis MAX233 (PDIP)
14	1	U3	Regulador de tensão LM7805 (TO220)
15	4	U4,U5,U6,U7	Acoplador óptico 4N25 (PDIP)
16	1	X1	Cristal 11.0592 MHz
17	1	DRIVER	Driver de potência LZT

O circuito utiliza um driver de potência proprietário (da empresa LZT) para realizar a interface de potência com o motor de passo.





Title	Controle do mecanismo de varredura para o Scanner Antropométrico - Principal		
Size	A4	Document Number	001/2005
Date:	Tuesday, July 12, 2005	Sheet	1 of 2
Rev	1.0		

Figura A.1: Esquema principal.

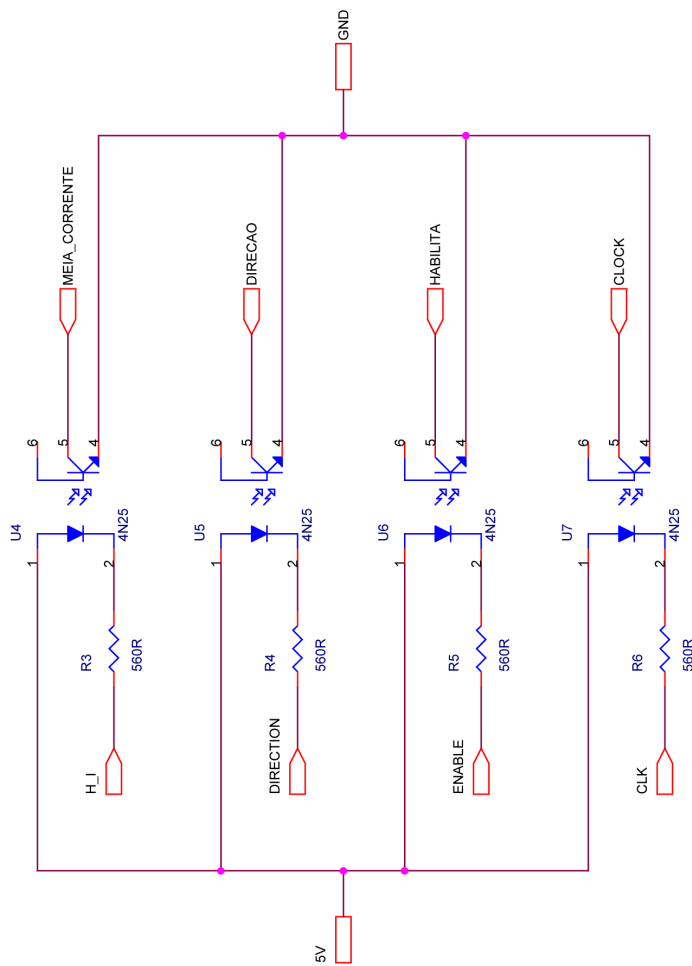


Figura A.2: Esquema do bloco de isolamento.

Title		Controle do mecanismo de varredura para o Scanner Antropométrico - Isolamento	
Size	A4	Document Number	002/2005
Rev	1.0	Date	Saturday, June 25, 2005
Sheet		2 of 2	

## Projetos Mecânicos

Neste apêndice são apresentados os esboços do projeto mecânico da cabine de varredura. A Figura B.1 apresenta o diagrama de ligação entre correias e polias.

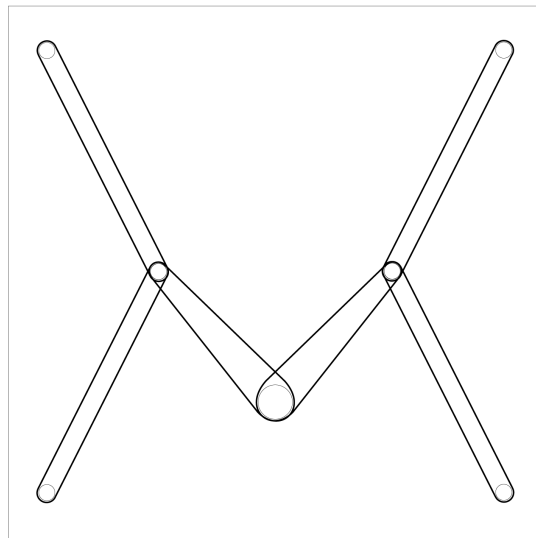


Figura B.1: Esquema de ligação entre correias e polias.

Esta configuração foi adotada devido ao fato dos máximos perímetros disponíveis no mercado para as correias de precisão não serem suficientes devido ao tamanho da cabine de varredura.

Já as Figuras B.2 e B.3 apresentam as matrizes de furação para o teto e para o chão da cabine. Por fim, a Figura B.4 apresenta a perspectiva final da cabine, que possui 2,5 metros de altura.

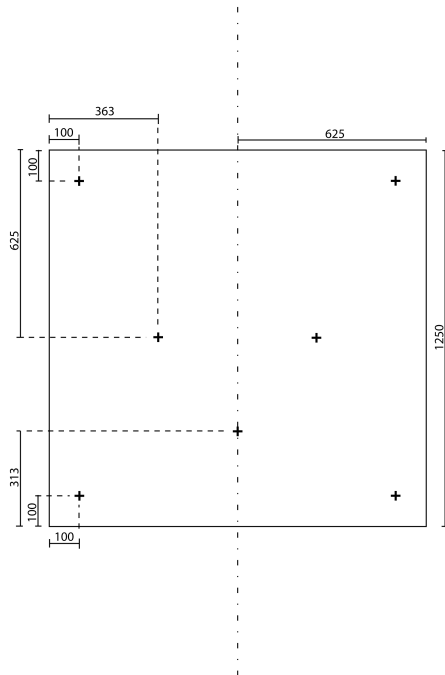


Figura B.2: Matriz de furação para o teto da cabine de varredura.

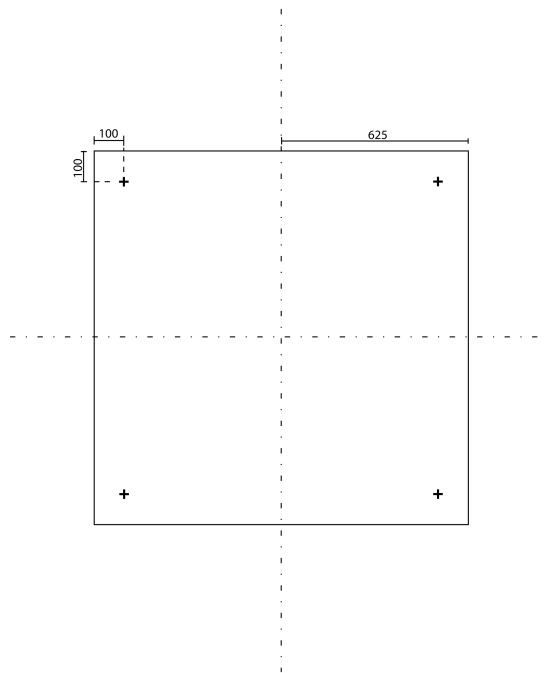


Figura B.3: Matriz de furação para o piso da cabine de varredura.

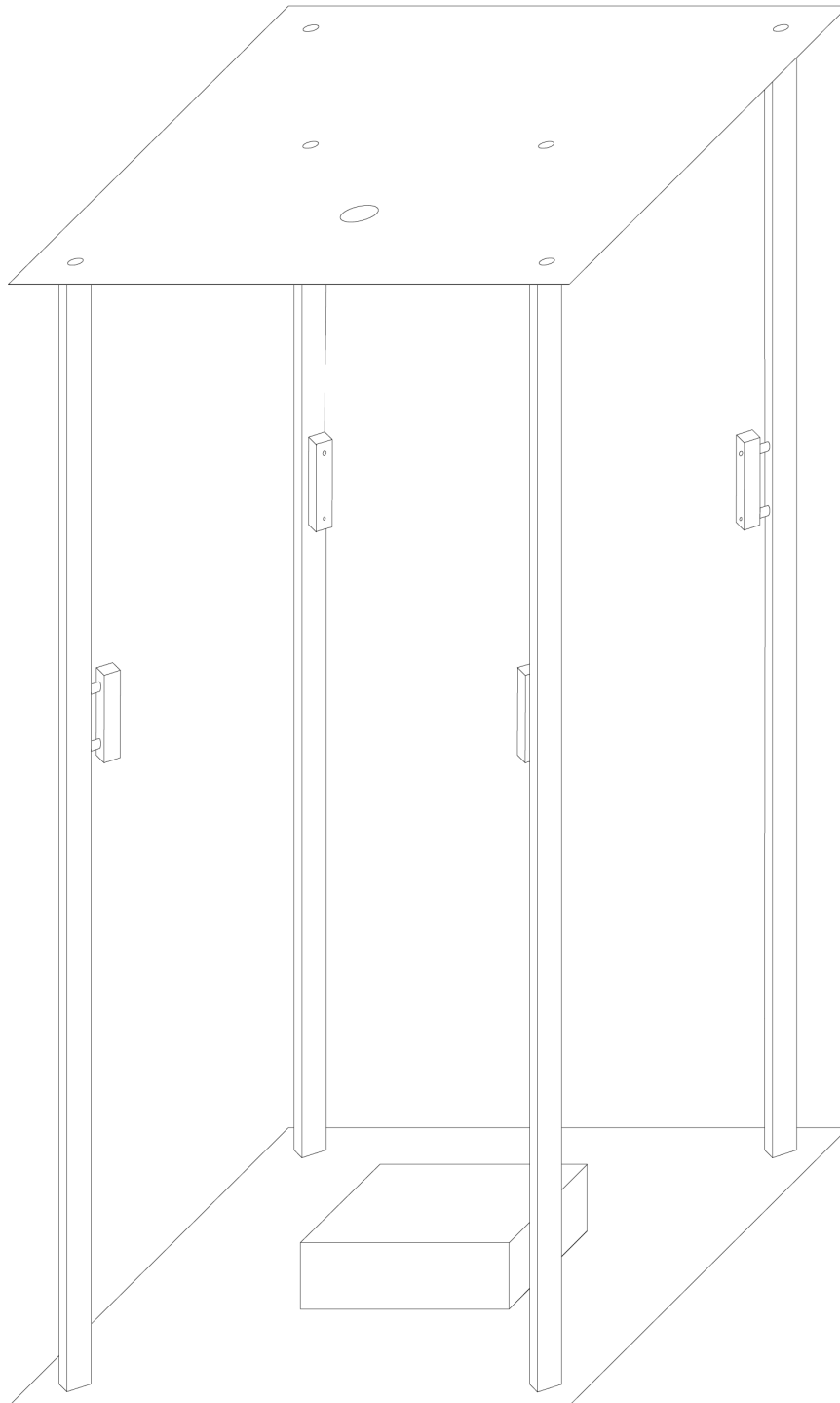


Figura B.4: Desenho em perspectiva do scanner antropométrico.

---

## Listagem de Códigos

---

```
//-----  
// scanner.c51  
// Software de controle  
// Projeto Scanner Antropometrico - Versão 1.0  
//  
// Compilado em linguagem C para o microcontrolador AT89S8252  
// Autor: Mario Alexandre Gazziro - 15/04/2005  
//-----  
  
#define MCS51  
  
#include <UARTINTR.H>  
#include <stdlib.h>  
  
sbit LOWER_LIMIT = P2^0;  
sbit UPPER_LIMIT = P2^1;  
sbit ENABLE      = P2^2;  
sbit HALF_I     = P2^3;  
sbit CLK        = P3^2;  
sbit CHA        = P3^3;  
sbit CHB        = P3^4;  
sbit DIRECTION  = P3^7;  
  
int idata position, pos, read, old_read, velocity, realpos;  
  
unsigned int idata real_velocity;  
  
bit reach, upper, lower, upper_active, lower_active, veloc, posic, ligado, np, send_pos, dir;  
  
void main(void)  
{  
    char data recv[10];  
    int n,i;  
  
    position=0; velocity=0; pos=0, read=0; reach=0; upper=0; lower=0; upper_active=0; lower_active=0;  
    veloc=0; posic=0; ligado=0; np=0; send_pos=0; realpos=0;LOWER_LIMIT=0; UPPER_LIMIT=0;  
  
    TCON = 0;  
    T2MOD = 0x00;  
    TH2 = 255;  
    TL2 = 128;  
    RCAP2H = 252;  
    RCAP2L = 128;  
    TF2 = 0;  
    T2CON = 0x04;  
    Init_Uart_Intr();  
    EX1=1;  
    IT1=1;  
    PS=1;  
    PT2=1;  
    EA=1;
```

```

ET2 = 1;
ENABLE = 1;
HALF_I = 1;
while(1)
{
    if (ligado && np && send_pos)
    {
        for (i=0;i<10;i++) recv[i]=0;
        Uart_Send_Int(realpos);
        send_pos=0;
    }
    n=num_recv();
    if (n>0)
    {
        for (i=0;i<n;i++) recv[i]=cin();
        recv[i]=0;
        old_read=read;
        read=atoi(recv);
        if (read!=0)
        {
            if (posic)
            {
                pos=read;
                posic=0;
            }
            if (veloc)
            {
                velocity=read;
                real_velocity=2*velocity;
                RCAP2H=((real_velocity&0xff00)>>8);
                RCAP2L=(real_velocity&0x00ff);
                veloc=0;
            }
        }
    } else
    {
        read=old_read;
        switch (recv[0])
        {
            case 'e':
                ENABLE = 0;
                ET2=1;
                ligado=1;
                recv[0]=0;
                break;
            case 'd':
                ET2 = 0;
                ENABLE = 1;
                ligado=0;
                recv[0]=0;
                break;
            case 'g':
                Uart_Send_Int(realpos);
                recv[0]=0;
                break;
            case 't':
                Uart_Send_Int(velocity);
                recv[0]=0;
                break;
            case 'q':
                Uart_Send_Int(pos);
                recv[0]=0;
                break;
            case 'z':
                realpos=0;
                recv[0]=0;
                break;
            case 'u':
                upper_active=1;
                recv[0]=0;
                break;
        }
    }
}

```

---

```

        case 'l':
            lower_active=1;
            recv[0]=0;
        break;
        case 'p':
            posic=1;
            Y_Delay(200);
            recv[0]=0;
        break;
        case 'v':
            veloc=1;
            Y_Delay(200);
            recv[0]=0;
        break;
        case 'n':
            np= !np;
            recv[0]=0;
        break;
    }
}
}
if (reach) { cout('p'); cout(3); reach=0; }
if (upper) { cout('u'); cout(3); upper=0; }
if (lower) { cout('l'); cout(3); lower=0; }
}
}

void interr_um() interrupt 2 using 2
{
    if (CHB) dir=1;
    else dir=0;
    if (dir)
    {
        realpos=realpos+1;
        if (realpos>30000) realpos=30000;
        send_pos=1;
    }
    else
    {
        realpos=realpos-1;
        if (realpos<-30000) realpos=-30000;
        send_pos=1;
    }
    IE1 = 0;
}

void timer2() interrupt 5 using 3
{
    if (ligado)
    {
        CLK = !CLK;
        if (!IE1)
        {
            if (realpos<pos) DIRECTION=0;
            if (realpos>pos) DIRECTION=1;
            if (realpos==pos)
            {
                ENABLE=1;
                reach=1;
                ligado=0;
            }
        }
    }
    if (LOWER_LIMIT && lower_active)
    {
        ENABLE=1;
        lower=1;
        lower_active=0;
        ligado=0;
    }
    if (UPPER_LIMIT && upper_active)

```



```
    {
        ENABLE=1;
        upper=1;
        upper_active=0;
        ligado=0;
    }
}
TF2 = 0;
}
```

---

```

//-----
// uartintr.c51
// Biblioteca para comunicacao serial utilizando interrupcoes
// Autor: Paul Stoffregen (versao em assembler) 24/02/2005
// Adaptacao: Mario Alexandre Gazziro (versao em C) 10/04/2005
//-----

#define baud_const 255
#define rx_buf_size 10
#define tx_buf_size 10

char idata rx_buf[rx_buf_size]; char idata tx_buf[tx_buf_size];

char rx_buf_head, rx_buf_tail, tx_buf_head, tx_buf_tail;

void Init_Uart_Intr(void)
{
    tx_buf[0]=0;
    tx_buf[1]=2;
    EA=0;
    PCON=PCON|0x80;
    TMOD=TMOD&0x0F;
    TMOD=TMOD|0x20;
    TR1=0;
    TF1=0;
    TH1=baud_const;
    TL1=baud_const;
    SCON=0x50;
    rx_buf_head=1;
    rx_buf_tail=1;
    tx_buf_head=0;
    tx_buf_tail=0;
    TR1=1;
    ES=1;
}

char num_rcv(void)
{
    char num;
    ES=0;
    num=rx_buf_head-rx_buf_tail;
    if (num<0) num=num+rx_buf_size;
    ES=1;
    return(num);
}

char num_xmit(void)
{
    char num;
    ES=0;
    num=tx_buf_head-tx_buf_tail;
    if (num<0) num=num+tx_buf_size;
    ES=1;
    return(num);
}

char cin(void)
{
    ES=0;
    while (rx_buf_tail==rx_buf_head) ES=1;
    ES=0;
    rx_buf_tail=rx_buf_tail+1;
    if (rx_buf_tail>rx_buf_size) rx_buf_tail=1;
    ES=1;
    return(rx_buf[rx_buf_tail]);
}

void cout(char ch)
{
    do

```

```

{
    ES=0;
    if (tx_buf_head==0)
    {
        TI=1;
        tx_buf_head=0;
        tx_buf_tail=0;
    }
    tx_buf_head=tx_buf_head+1;
    if (tx_buf_head>tx_buf_size) tx_buf_head=1;
    if (tx_buf_head!=tx_buf_tail) ES=1;
    if (tx_buf_head!=tx_buf_tail) ES=1;
} while(tx_buf_head==tx_buf_tail);
tx_buf[tx_buf_head]=ch;
ES=1;
}

void Uart_Intr() interrupt 4 using 2
{
    char discard;
    if (TI)
    {
        TI=0;
        if (tx_buf_tail==tx_buf_head) tx_buf_head=0;
        else
        {
            tx_buf_tail=tx_buf_tail+1;
            if (tx_buf_tail>tx_buf_size) tx_buf_tail=1;
            SBUF=tx_buf[tx_buf_tail];
        }
    } else
    if (RI)
    {
        RI=0;
        rx_buf_head=rx_buf_head+1;
        if (rx_buf_head>rx_buf_size) rx_buf_head=1;
        if (rx_buf_head==rx_buf_tail) discard=SBUF;
        else rx_buf[rx_buf_head]=SBUF;
    }
}

void Uart_Send(char *s)
{
    while ( *s ) cout(*s++);
    cout(3);
}

void Uart_Send_Int(int n)
{
    char i=0;
    char aux[7];
    int auxx,auxx1, m;
    m=n;
    if(n<0) n = -n;
    i=6; aux[6]=0;
    do
    {
        i--;
        if (i==0) break;
        auxx = (n/10);
        auxx1 = n - auxx*10;
        n = auxx;
        aux[i] = (char)(auxx1+48);
    } while(auxx);
    if(m<0) cout('-');
    Uart_Send(&aux[i]);
}

```

---

```

{
  Software de simulação de composição corporal.
  Programado em linguagem Delphi da Borland
  Versão 1.0 - Mario A. Gazziro - Março de 2005
}
program simulador;

uses
  Forms,
  Unit1 in 'Unit1.pas' {Form1};

{$R *.res}

begin
  Application.Initialize;
  Application.CreateForm(TForm1, Form1);
  Application.Run;
end.

{
  Biblioteca principal do software de simulação de composição corporal.
}
unit Unit1;

interface

uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, ExtCtrls, StdCtrls, Math;

type
  TForm1 = class(TForm)
    Label1: TLabel;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Label4: TLabel;
    Edit1: TEdit;
    Edit2: TEdit;
    Edit3: TEdit;
    Edit4: TEdit;
    Bevel1: TBevel;
    Button1: TButton;
    Button2: TButton;
    Bevel2: TBevel;
    Label5: TLabel;
    Label6: TLabel;
    RadioGroup1: TRadioGroup;
    Label7: TLabel;
    Label8: TLabel;
    RadioGroup2: TRadioGroup;
    Bevel3: TBevel;
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Label11: TLabel;
    Label12: TLabel;
    Label13: TLabel;
    Label14: TLabel;
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;

var
  Form1: TForm1;
  volume, area, altura, idade, volume_residual, volume_final, peso_estimado, densidade, gordura, a0, a1, a2: Real;

```

```

implementation

{$R *.dfm}

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject); begin
    form1.Edit1.Text:='0';
    form1.Edit2.Text:='0';
    form1.Edit3.Text:='0';
    form1.Edit4.Text:='0';
end;

procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject); begin
    form1.Label7.Caption:='';
    form1.Label8.Caption:='';
    form1.Label12.Caption:='';
    form1.Label13.Caption:='';
    form1.Label14.Caption:='';
    volume:=0;
    area:=0;
    altura:=0;
    idade:=0;
    volume_residual:=0;
    volume_final:=0;
    peso_estimado:=0;
    densidade:=0;
    gordura:=0;
end;

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject); begin
    volume:=strtofloat(form1.Edit1.Text);
    area:=strtofloat(form1.Edit2.Text);
    altura:=strtofloat(form1.Edit3.Text);
    idade:=strtofloat(form1.Edit4.Text);
    if (RadioGroup2.ItemIndex = -1 ) then MessageDlg('Escolha o sexo!',mtWarning,[mbOK],0)
    else
    begin
        case (Form1.RadioGroup2.ItemIndex) of
            0: volume_residual:=(idade*0.017+altura*0.027-3.477)*1000;
            1: volume_residual:=(idade*0.032+altura*0.032-3.9)*1000;
        end;

        form1.Label7.Caption:=format('%8.2f', [volume_residual]);
        volume_final:=volume-volume_residual;
        form1.Label8.Caption:=format('%8.2f', [volume_final]);
    end;
    if (RadioGroup1.ItemIndex = -1 ) then MessageDlg('Escolha um método!',mtWarning,[mbOK],0)
    else
    begin
        case (Form1.RadioGroup1.ItemIndex) of
            0: begin a0:=0.015925; a1:=0.5; a2:=0.5; end;
            1: begin a0:=0.007184; a1:=0.7250; a2:=0.4250; end;
            2: begin a0:=0.007850; a1:=0.7250; a2:=0.4250; end;
            3: begin a0:=0.017827; a1:=0.5000; a2:=0.4838; end;
            4: begin a0:=0.007466; a1:=0.7250; a2:=0.4250; end;
            5: begin a0:=0.007000; a1:=0.7250; a2:=0.4250; end;
            6: begin a0:=0.023500; a1:=0.4225; a2:=0.5146; end;
            7: begin a0:=0.024265; a1:=0.3964; a2:=0.5378; end;
            8: begin a0:=0.009490; a1:=0.6550; a2:=0.4410; end;
        end;
        peso_estimado:=(power(((area/(a0*power(altura,a1)))),(1/a2)))*1000;
        form1.Label12.Caption:=format('%8.2f', [peso_estimado]);
        densidade:=peso_estimado/volume_final;
        form1.Label13.Caption:=format('%8.2f', [densidade]);
        gordura:=(495/densidade)-450;
        form1.Label14.Caption:=format('%8.2f', [gordura]);
    end;
end;

end.

```

## Motores elétricos

Motores elétricos são fabricados em diferentes formas e tamanhos (Figura D.1). Alguns são padronizados para uso em aplicações de propósito geral. Outros são construídos para tarefas específicas.



Figura D.1: Motor elétrico de grande porte.

Em qualquer caso, motores elétricos devem ser selecionados a fim de satisfazer os requerimentos dinâmicos das máquinas as quais serão aplicados, sem exceder seu limite de temperatura de operação.

Logo, o primeiro e mais importante passo na seleção de um motor é determinar as características da carga a qual estará sujeito - torque e velocidade em função do tempo. Outros fatores como objetivos do projeto, disponibilidade de energia e custo também devem ser considerados.

O tempo de aceleração para motores elétricos é diretamente proporcional a inércia total e inversamente proporcional ao seu torque.

Para motores elétricos com torque de aceleração constante, o tempo de aceleração é dado por:

$$t = \frac{WK^2(N_2 - N_1)}{308T_x} \quad (\text{D.1})$$

onde  $WK^2$  é a inércia rotacional, em  $lb-ft^2$ ,  $(N_2 - N_1)$  é a diferença entre as velocidades e  $T_x$  é o torque de aceleração, em  $lb-ft$  (ele).

Um método de aproximação é necessário para encontrar o tempo de aceleração do motor elétrico caso o torque de aceleração não seja linear durante o aumento da velocidade. O método mais rápido é plotar as curvas de velocidade vs. torque do motor em segmentos, e calcular o tempo de aceleração para cada segmento.

## D.1 Motores de passo

Motores de passo são dispositivos rotacionais eletromagnéticos, os quais convertem pulsos em rotação mecânica. A taxa de rotação é diretamente proporcional ao número de pulsos, e a velocidade de rotação é relativa à frequência destes pulsos. Motores de passo são simples de comandar e seu tamanho provê uma excelente relação de torque a baixas velocidades (22).

O rotor de um motor de passo é simplesmente um ímã permanente que é atraído, seqüencialmente, pelos pólos de diversos eletroímãs estacionários, como visto na Figura D.2.

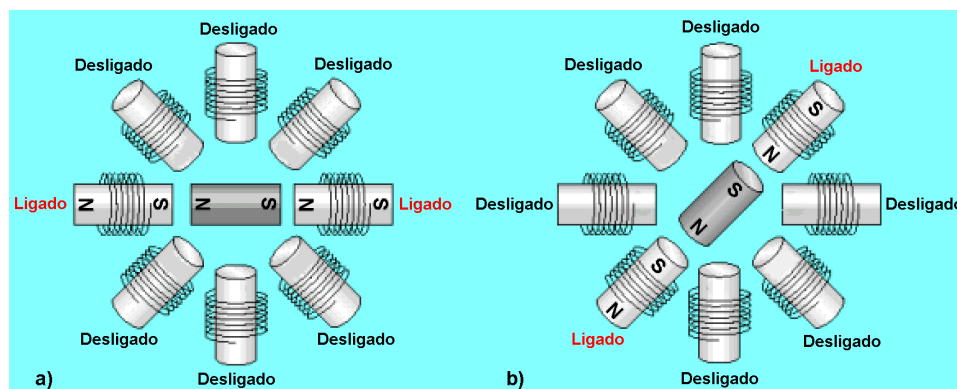


Figura D.2: Motor de passo em ação. a) passo N. b) passo N+1.

Embora muitos tipos de motores de passo foram desenvolvidos, todos eles se dividem em três categorias básicas:

- relutância variável
- ímã permanente
- híbrido

O **motor de relutância variável** (Figura D.3) consiste de um rotor e um estator, cada qual com um número diferente de dentes. Como o rotor não possui um ímã

permanente ele pode girar livremente, sem a geração de um torque por obstáculo mecânico. Ainda que a relação torque-inércia seja boa, o torque avaliado para um dado intervalo de tempo é restrito. Então, pequenos intervalos de tempo são geralmente utilizados, e por isso raramente são encontrados em aplicações industriais.

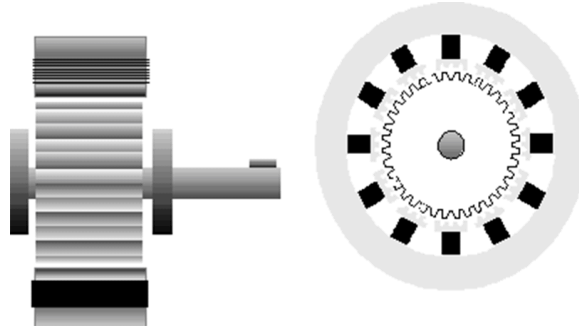


Figura D.3: Corte de seção de um motor de relutância variável. Fonte:(22)

O **motor de ímã permanente** (Figura D.4) é talvez o motor de passo mais amplamente utilizado em aplicações não-industriais. Em sua forma simples, o motor consiste de um rotor imantado radialmente e de um estator, similar ao do **motor de relutância variável**.

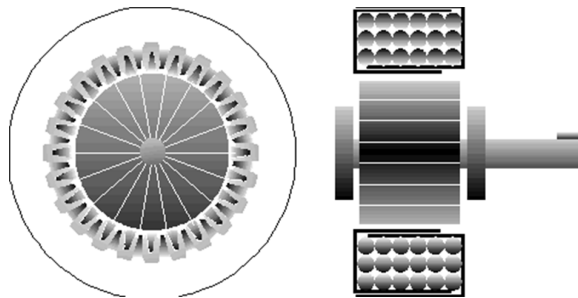


Figura D.4: Corte de seção de um motor de ímã permanente. Fonte:(22)

O **motor de passo híbrido** é provavelmente o mais utilizado de todos. Originalmente desenvolvido como um **motor de ímã permanente** com sincronismo lento, sua construção é uma combinação de ambos os anteriores. O modelo híbrido consiste de um estator dentado multi-fase e um rotor de três partes (pilha única).

O rotor de pilha única contém duas peças de polo dentadas, separadas por um ímã permanente axial, com o dente oposto deslocado metade do espaço entre dois dentes (Figura D.5), para permitir alta resolução dos passos.

A resolução, ou seja, número de passos, e o ângulo de passo de um motor de passo dependem:

- do número de pares de pólos no rotor;
- do número de fases do motor;



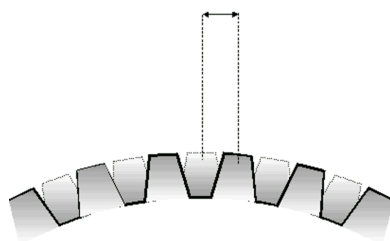


Figura D.5: Visão explodida ilustrando o deslocamento dos dentes. Fonte:(22)

- do modo o qual está ajustado o driver (passo-completo ou meio-passo).

O ângulo de passo pode ser obtido dividindo uma rotação ( $360^\circ$ ) pelo número de passos.

### D.1.1 Torque de parada

As características do torque de parada são melhor demonstradas utilizando um eletroímã e um rotor de pólo único (Figura D.6). No exemplo, o eletroímã representa o estator do motor, sendo energizado com seu polo norte em frente ao rotor.

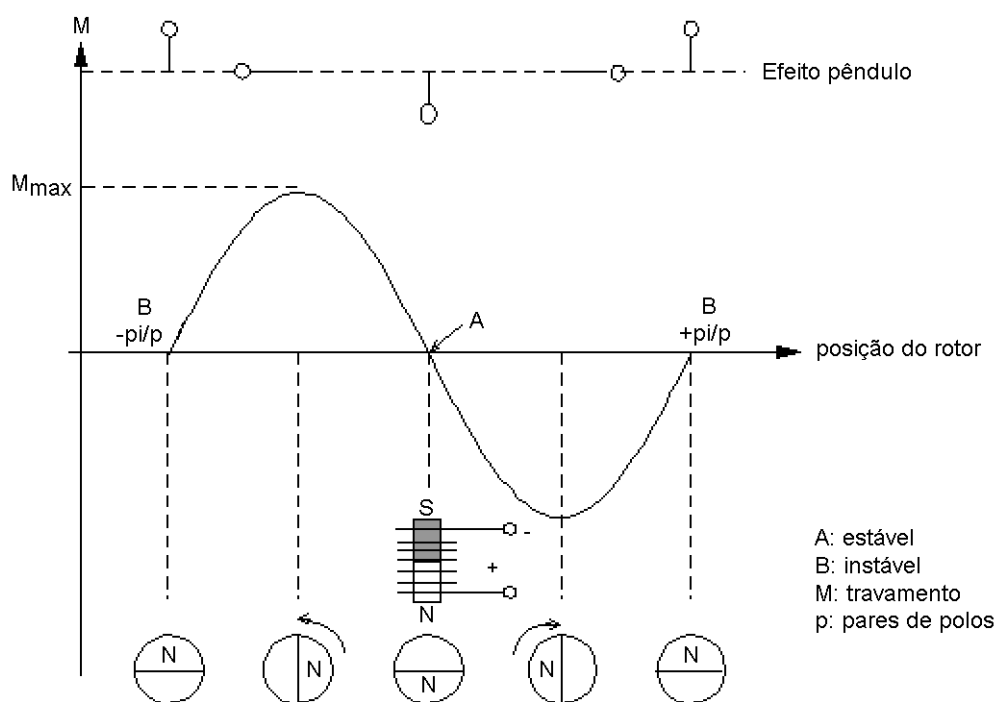


Figura D.6: Curva ilustrando o torque estático vs. a posição do rotor. Fonte:(22)

Quando o motor se desloca fora de sua posição de estabilidade, o torque aumenta de forma constante até atingir um máximo. Este valor máximo é chamado de torque

de parada, e representa a carga máxima que pode ser aplicada ao eixo sem causar rotação contínua. Se o eixo for deslocado além deste ponto, o torque irá cair até atingir zero. De qualquer forma, este ponto de zero é instável, e o torque retorna de volta ao ponto de estabilização.

Dependendo do número de fases, o ciclo da Figura D.6 deve ser equivalente ao seguinte número de passos completos: 2 fases=4 passos; 3 fases=6 passos; 5 fases=10 passos.

O torque necessário para deslocar o eixo em um dado ângulo pode ser obtido pela fórmula:

$$M(p) = -M_H * \sin(p * \psi) \quad (D.2)$$

O ângulo de carga estático é definido como sendo o ângulo entre a atual posição do rotor e a posição estável final para uma dada carga. A Figura D.7 ilustra (seja passo-completo ou meio-passo) que o torque aumenta devido ao deslocamento do eixo a partir de sua posição estável.

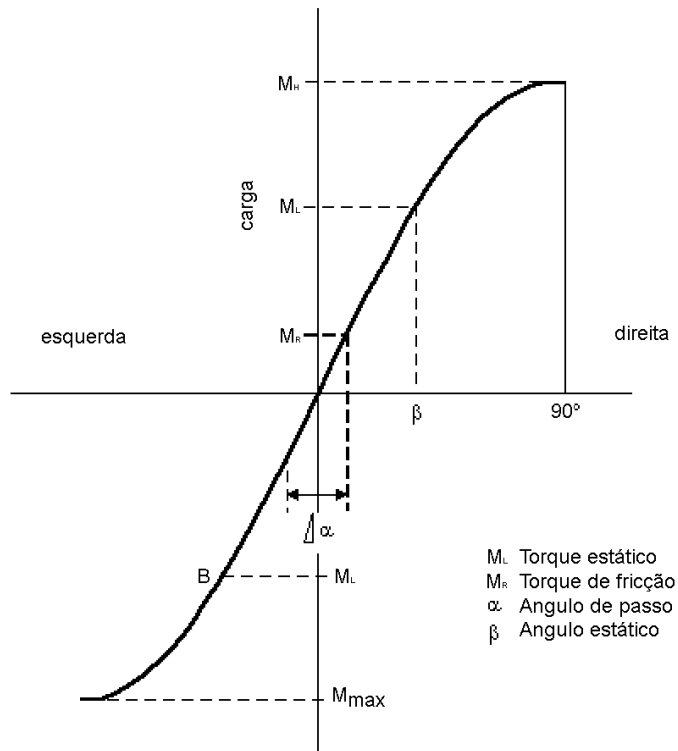


Figura D.7: Ângulo de carga estático. Fonte:(22)

O ângulo de carga estático pode ser obtido pela fórmula:

$$c(p) = -\frac{\delta M}{\delta \psi} = p * M_H * \cos(p * \psi) \quad (D.3)$$

### D.1.2 Torque de fricção

Torque de fricção é a carga aplicada no eixo através das tolerâncias mecânicas da aplicação. A Figura D.7 mostra que para uma carga ( $M_L$ ) o torque de fricção ( $M_R$ ) também necessita ser considerado, se a precisão do posicionamento é necessária.

Este fenômeno também pode ser explicado utilizando o modelo da montanha (Figura D.8). Ainda que a bola tente encontrar seu local natural de descanso, a fricção na superfície impede que ela o faça.

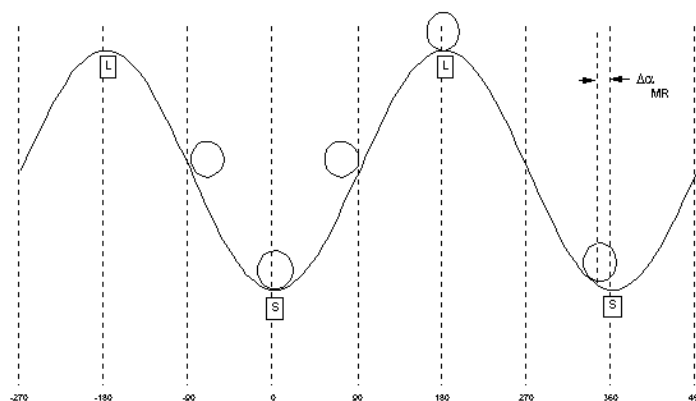


Figura D.8: Modelo da montanha. Fonte:(22)

### D.1.3 Tolerância angular sistemática

Tolerância angular sistemática é o desvio entre a posição teórica correta a partir de qualquer ângulo comandado. Também conhecida como 'precisão absoluta', pode ser expressa como uma porcentagem de um passo completo ou como uma medida angular. Também é não-cumulativa, permanecendo constante para qualquer ângulo comandado.

É causada devido a outras tolerâncias do processo de fabricação do motor (como diferença entre resistência de armaduras ou voltas, ímãs magnetizados de forma diferente, lacunas de ar, etc.) e também pela eletrônica do controlador. Ainda que com as modernas técnicas de fabricação estas tolerâncias sejam insignificantes, para casos extremos de precisão elas precisam ser consideradas.

### D.1.4 Ângulo de carga estático e dinâmico

A curva do ângulo de carga estático (Figura D.7) demonstra o que ocorre com um motor de passo estacionário sobre carga. Então, se ele está produzindo torque o motor deve estar atrasado com relação ao campo do estator, sobre condições dinâmicas, como por exemplo, com o motor em movimento. Ocorre situação semelhante durante a desaceleração. A partir da curva de torque estático, fica claro que o atraso

ou adiantamento não podem exceder o torque de parada máximo, se o motor deve manter seu sincronismo. Então, para um **motor de passo híbrido** (50 pares de pólos), o ângulo máximo de adiantamento ou de atraso é 3.6. A Figura D.9 ilustra o máximo atraso que pode ocorrer sobre condições de carga dinâmicas.

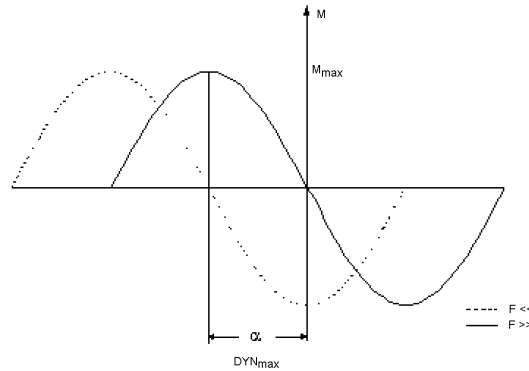


Figura D.9: Curva da carga dinâmica. Fonte:(22)

### D.1.5 Ressonância

O fenômeno da ressonância é sofrido por todos os motores de passo, independente da resolução dos mesmos. Ressonância é o termo usado para o efeito que ocorre quando um motor de passo é controlado com sua frequência natural de oscilação. O controle nesta frequência pode resultar em perda de sincronismo ou mesmo paralizar o motor.

Para **motores de passo híbridos**, sob nenhuma carga, esta ressonância ocorre entre 80 e 200 Hz, no caso, entre 80 e 200 passos por segundo. A ressonância de um motor de passo pode ser obtida pela seguinte fórmula:

$$f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{J_R}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{p * M_H}{J_R}} \quad (D.4)$$

A ressonância pode ser superada de diversas formas: operando fora de sua faixa de frequência: utilizando controle de meio-passo ou micro-passo; deslocando a frequência de ressonância através de mudanças na inércia do sistema, parte elétrica ou fricção mecânica. Aumentar a inércia dos sistemas ou a fricção geralmente é conhecido como amortecimento.

### D.1.6 Ondulação de torque

Se um motor atua próximo ao seu torque máximo, ondulações de torque podem causar um efeito de ressonância. A ondulação de torque é apresentada na Figura D.10 e a melhora atingida com maiores resoluções ou micro-passo ficam claramente visíveis.

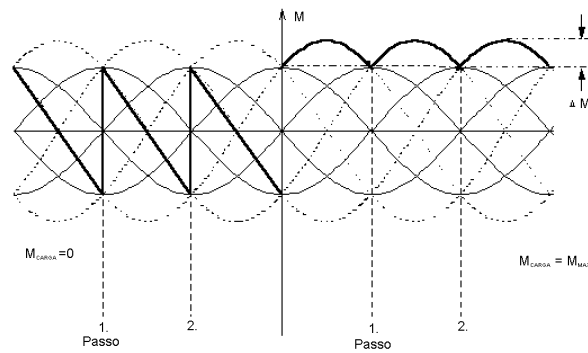


Figura D.10: Torque dinâmico para um motor de passo de 2 fases. Fonte:(22)

Quanto maior a resolução, menor é a mudança de corrente por passo, por exemplo, maior a aproximação a uma função senoidal. Isto assegura que o motor tenha uma menos ondulação de corrente e conseqüentemente uma menos ondulação de torque.

Qualquer ondulação apenas causa um efeito de aquecimento no motor, porém é facilmente dissipado através do corpo do motor.

Quanto menor a tendência a ondulações, também será melhor o efeito na redução do ruído acústico.

---

# Comunicação serial em sistemas embarcados

---

## E.1 Microcontrolador AT89S8252

O microcontrolador AT89S8252, fabricado pela Atmel Inc., membro da família 8051 da Intel, de arquitetura CISC, apresenta as seguintes características (34):

- 8 Kbytes de memória ROM do tipo FLASH;
- 2 Kbytes de memória ROM de tabela tipo EEPROM;
- 256 bytes de memória RAM;
- 32 linhas de entrada e saída;
- 2 ponteiros de dados;
- 3 *timers* (relógios)/contadores de 16 bits;
- 6 vetores de interrupção;
- 1 porta serial full duplex;

### E.1.1 Considerações sobre cristais osciladores

Dado o circuito equivalente da Figura E.1, para inicialização adequada do oscilador, a transcondutância ( $g_m$ ) do estágio do inversor deve atender a relação (29):

$$4.2[R_X\omega^2(C_L + C_0 + C_F)^2 + \frac{1}{R_P}] < g_m < \frac{C_1C_2}{[R_X(C_0 + C_F)^2 + \frac{1}{\omega^2R_P}]} \quad (\text{E.1})$$

onde os símbolos estão definidos na Tabela E.1.

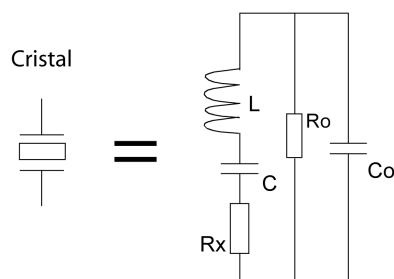


Figura E.1: Circuito equivalente do cristal. Fonte: (29)

Tabela E.1: Definição dos símbolos para cálculo da transcondutância.

Símbolo	Definição
$R_X$	Resistência serial do ressonador
$C_0$	Capacitância estática do ressonador
$R_0$	Resistência de perda do ressonador
$R_P$	$R_0 // R_F$
$R_F$	Resistor de realimentação
$C_L$	$\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$
$C_1$	$C_{1i} + C_{1e}$
$C_{1i}$	Capacitância interna da carga
$C_{1e}$	Capacitância externa da carga
$C_2$	$C_{2i} + C_{2e}$
$C_{2i}$	Capacitância interna da carga
$C_{2e}$	Capacitância externa da carga
$C_F$	Capacitância parasítica, tipicamente $2pF$
$\omega$	$2\pi f_{osc}$

### E.1.2 Determinação da taxa de comunicação serial

Um dos três timers do microcontrolador AT89S8252 deve ser ajustado no chamado *modo de auto-recarga de 8 bits*, a fim de controlar as taxas de velocidade necessárias para realização da comunicação serial.

A seguir serão apresentadas equações (com opções para dois divisores de clock) para determinação do valor de recarga do registrador do relógio, da taxa de comunicação e da frequência mínima do cristal oscilador (15).

A equação básica para obtermos o valor do registrador de recarga do timer é definida como:

$$TH1 = 256 - \frac{F_{osc}}{K B_R} \quad (E.2)$$

Esta equação também pode ser adaptada para a determinação da taxa de comunicação e da frequência mínima do cristal.

$$B_R = \frac{\frac{F_{osc}}{K}}{256 - TH1} \quad (E.3)$$

$$F_{osc_{min}} = B_R K \quad (E.4)$$

A Tabela E.2 define os símbolos utilizados nas equações acima e suas respectivas unidades.

Tabela E.2: Definição dos símbolos para cálculo da taxa de comunicação.

Símbolo	Definição
$TH1$	Registrador que armazena o valor de recarga do timer
$B_R$	Taxa de comunicação em bits por segundo (bps)
$K$	constante 192 (caso SMOD=1) ou 384 (caso SMOD=0)
$F_{osc_{min}}$	Frequência de oscilação mínima do cristal, em Hz
$F_{osc}$	Frequência de oscilação do cristal, em Hz

## E.2 Protocolo de comunicação de dados RS232-C

Antes de 1960 a comunicação de dados compreendia a troca de dados digitais entre um computador central e terminais de computador remotos, ou entre dois terminais sem o envolvimento do computador. Tais dispositivos poderiam ser conectados através de linha telefônica, e conseqüentemente necessitavam de um modem em cada lado para fazer a decodificação dos sinais.

Considerando esta situação, o comitê conhecido atualmente como Electronic Industries Association (EIA) criou a interface serial RS-232C (Recommended Standard), a qual descreve a padronização de uma interface comum para comunicação de dados entre equipamentos, especificando: tensões; temporizações; funções dos sinais e um protocolo para troca de informações.

Os maiores problemas encontrados pelos usuários na utilização da interface RS-232C estão na ausência de conexão, ou conexão errada de sinais de controle, provocando estouros de buffer ou travamento da comunicação.

### E.2.1 Características elétricas do protocolo

O padrão RS-232C define 2 níveis lógicos. As entradas têm definições diferentes das saídas e os controles têm definições diferentes do que os dados.

Para as saídas, o sinal é considerado em estado 1, quando a tensão no circuito de transferência é menor que -5V e maior que -15V.

O sinal é considerado 0 quando a tensão for maior que +5V e menor que +15V. A região compreendida entre -5V e +5V é definida como região de transição. Para as entradas, o sinal é considerado em estado 1, quando a tensão é menor que -3V e maior que -15V.



O sinal é considerado 0 quando a tensão for maior que +3V e menor que +15V. A região compreendida entre -3V e +3V é definida como região de transição. A Tabela E.3 a seguir mostra as principais características elétricas do padrão RS-232C.

Tabela E.3: Especificações elétricas do padrão RS-232C. Fonte: (rs2)

Especificações	Padrão RS232c
Modo de operação	Ponto a ponto
Tipo de transmissão	Full-duplex
Nº total de Drivers e Receivers	1 Driver e 1 Receiver
Comprimento máximo da rede	12 metros
Taxa de transmissão	20 kbps
Faixa de tensão do circuito de saída	$\pm 25$ V
Nível de tensão do circuito de saída com 2 nós (com carga)	$\pm 5$ V $\pm 15$ V
Nível de tensão do circuito de saída (sem carga)	$\pm 25$ V
Impedância do circuito de saída (ohms)	3 k a 7 k
Consumo de corrente em Tri-State (power on)	N/A
Consumo de corrente em Tri-State (power off) (ohms)	$\pm 6$ mA a $\pm 2$ V
Faixa de tensão do circuito de entrada	$\pm 15$ V
Sensibilidade do circuito de entrada	$\pm 3$ V
Impedância do circuito de entrada (ohms)	3 k a 7 k