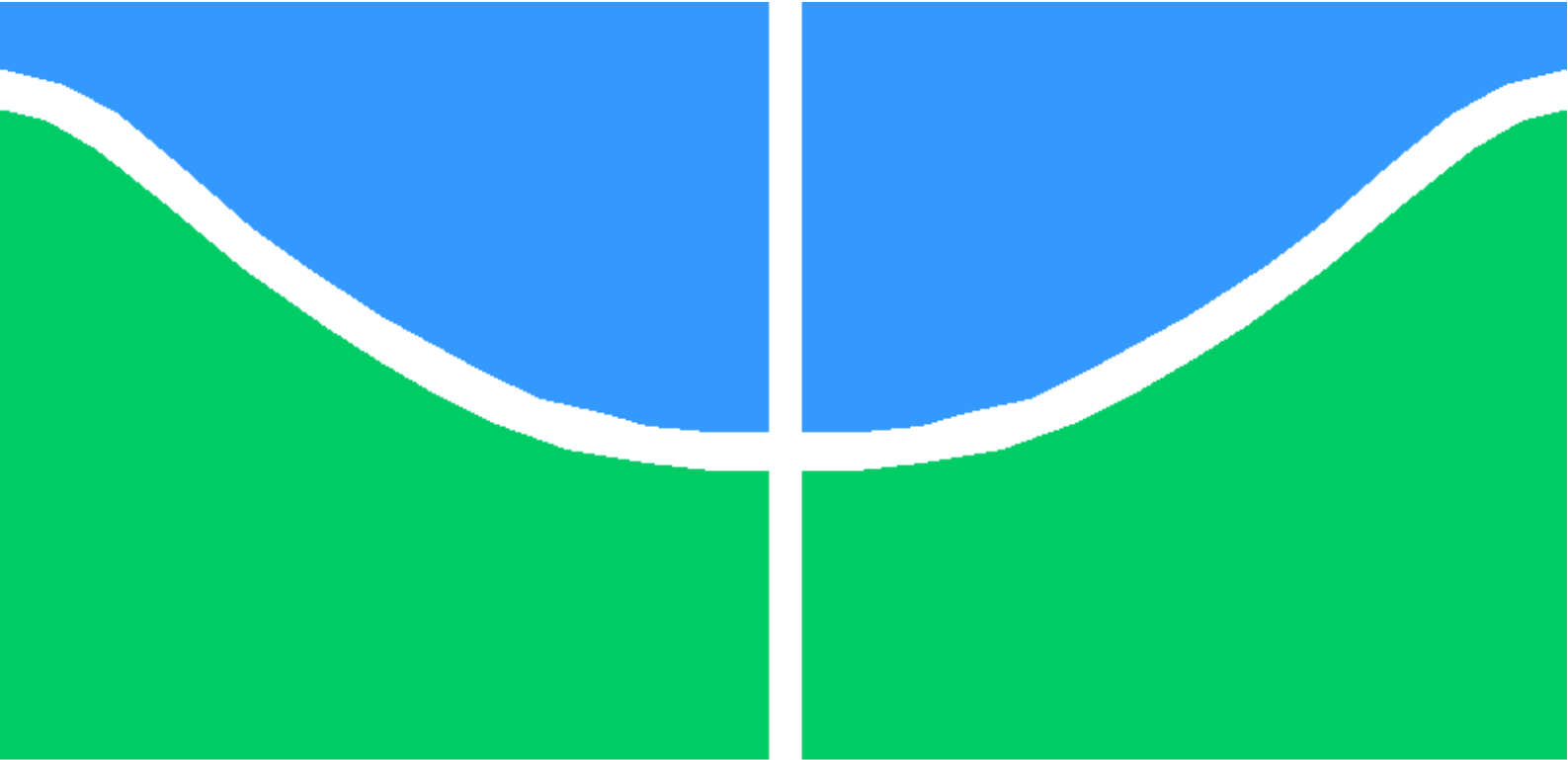




TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**PROPOSTA DE UM MÓDULO SENSORIAL PARA
ESTIMAÇÃO DE POSTURA COM RELAÇÃO AO SOLO
DE UMA PRÓTESE ROBÓTICA DE PERNA**

Eduardo da Silva Alves

Brasília, julho de 2007

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**PROPOSTA DE UM MÓDULO SENSORIAL PARA
ESTIMAÇÃO DE POSTURA COM RELAÇÃO AO SOLO
DE UMA PRÓTESE ROBÓTICA DE PERNA**

Eduardo da Silva Alves

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Controle e Automação*

Banca Examinadora

Prof. Geovany Araújo Borges, ENE/UnB
Orientador

Prof. Alexandre R. Soares Romariz, ENE/UnB
Examinador externo

Dedicatória

Dedico este trabalho à todas as pessoas que me apoiaram até este momento, principalmente aos meus pais que sempre acreditaram em mim.

Eduardo da Silva Alves

Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais Francisco e Marizete, pois sem eles nada seria possível.

Também gostaria de agradecer ao professor Geovany pela oportunidade e suporte oferecidos durante a execução deste trabalho.

À todos os meus amigos que me proporcionaram, durante estes cinco anos uma convivência sadia e agradável.

Por último, gostaria de lembrar da minha avó Divina, que provavelmente foi uma das pessoas que mais torceu para o meu sucesso.

Eduardo da Silva Alves

RESUMO

Na pesquisa referente a próteses de membros inferiores com objetivo de aumentar seu desempenho e consequentemente fornecer qualidade ao usuário, a utilização de sensores se torna fundamental e imprescindível. Em próteses biônicas, os sensores e detectores têm por missão enviar sinais elétricos analógicos ou digitais para as placas microcontroladoras, correspondentes às grandezas a monitorar. Para tanto, se encontram ligados a entradas analógicas ou digitais das placas. Este trabalho concentrou-se na elaboração de um modelo de sensoriamento, baseado em sensores infravermelhos para estimação de postura do pé de uma prótese de perna robótica com relação ao solo. A primeira parte do projeto englobou a implementação de uma simulação em Matlab[®] para melhor visualização dos resultados e validação do modelo implementado. Logo em seguida, as atividades do projeto foram direcionadas para implementação de uma placa de aquisição dos sinais dos sensores utilizados. A placa de aquisição desenvolvida foi baseada no microcontrolador ATMEGA8 da Atmel e conta com 4 entradas analógicas, interface de comunicação com o PC (RS-485) e uma interface de comunicação SPI para aquisição de medidas de uma central inercial desenvolvida posteriormente. Realizaram-se testes experimentais com a prótese no sentido de validar o modelo proposto, bem como analisar as limitações do mesmo. A partir dos resultados obtidos pode-se dizer que a estimação de postura do pé com relação ao solo, considerando apenas a distância entre o pé e o chão, foi razoavelmente satisfatória. Os experimentos também deixam claro que o modelo baseado apenas nos sensores infravermelhos não é inteiramente suficiente, contudo pode-se incorporar a esse modelo outros tipos de sensores, como acelerômetro e giroscópio, a fim de obter-se um funcionamento satisfatório do sistema desenvolvido.

ABSTRACT

In the research of robotic prosthesis, with the purpose of interact with environment and increasing quality of life for users, the use of sensors is primordial and indispensable. These sensors send analog or digital signals to the control board for processing. This work focuses on the formulation of a sensing model based in infrared sensors for foot attitude estimation of a robotic leg. First of all, it includes a simulation software using Matlab in order to evaluate the proposed techniques and validation of the system with real data. Once the techniques have been evaluated in simulation, an acquisition board has been implemented. This board is based on ATMEGA8 microcontroller and has four analog inputs, communication interface (RS-485) and SPI communication interface for an inertial measurement unit to be developed in the near future. The system has been evaluated under real conditions on the robotic leg prototype. The results show pretty good results for foot attitude estimation with respect to ground. However, the results suggest that the estimation model should be improved with other kinds of sensors like gyroscope and accelerometers.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	1
1.3	OBJETIVOS DO PROJETO.....	3
1.4	RESULTADOS OBTIDOS	3
1.5	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	4
2	FUNDAMENTOS BÁSICOS	5
2.1	ELEMENTOS DE GEOMETRIA ANALÍTICA	5
2.1.1	REPRESENTAÇÃO DE PLANOS.....	5
2.1.2	VETOR NORMAL AO PLANO	5
2.1.3	PROJEÇÃO OBLÍQUA DE UM PONTO SOBRE UM PLANO.....	6
2.1.4	ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PLANO	8
2.2	O MICROCONTROLADOR ATMEL AVR ATMEGA8	9
2.3	COMUNICAÇÃO SERIAL.....	10
2.3.1	INTERFACE RS232	10
2.3.2	INTERFACE RS485	11
3	DESENVOLVIMENTO	15
3.1	INTRODUÇÃO	15
3.2	MODELAGEM E ARQUITETURA SENSORIAL	15
3.2.1	O MODELO GEOMÉTRICO	15
3.2.2	ARQUITETURA SENSORIAL E ESTIMAÇÃO DOS ÂNGULOS DE ATITUDE DO PÉ ...	17
3.3	MÓDULO SENSOR	18
3.3.1	SENSORES INFRAVERMELHOS.....	18
3.3.2	A CENTRAL INERCIAL (ACELERÔMETRO E GIROSCÓPIO)	20
3.4	A PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	23
3.5	INTERFACE COM O PC	23
3.6	O PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO.....	24
3.7	O SOFTWARE DO MICROCONTROLADOR	24
3.8	O SOFTWARE DO PC	25
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	27
4.1	INTRODUÇÃO	27

4.2	SIMULAÇÃO NO Matlab®	27
4.3	EXPERIMENTOS	31
5	CONCLUSÕES	35
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
	ANEXOS.....	37
I	DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS	38
II	DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD	39

LISTA DE FIGURAS

1.1	Foto do protótipo e disposição dos sensores infravermelhos	2
1.2	Arquitetura de instrumentação e controle para a prótese	2
1.3	Diagrama de blocos do sistema	3
2.1	Representação de um plano paralelo ao plano XY	6
2.2	Ângulos de um vetor normal ao plano com relação aos eixos X, Y e Z	7
2.3	Projeção ortogonal do ponto S sobre o plano Ξ segundo a direção do vetor unitário $\mathbf{u}$	8
2.4	Pinagem do microcontrolador	10
2.5	Pinagem da Porta Serial RS232	10
2.6	Níveis de tensão para interface RS232	12
2.7	Formato de dados UART	12
2.8	Diagrama interno - DS485	13
2.9	Sinais Diferenciais	13
2.10	Sinais Diferenciais	14
3.1	Atribuição dos sistemas de coordenadas	16
3.2	Figura ilustrativa da montagem dos sensores no pé	17
3.3	Diagrama do sistema utilizado	18
3.4	Foto ilustrativa do sensor GP2D120 da Sharp	19
3.5	Ângulos diferentes para distâncias diferentes	19
3.6	Tensão de saída <i>versus</i> distância medida	20
3.7	Resíduos na estimação dos coeficientes do polinômio	20
3.8	Foto ilustrativa dos sensores	21
3.9	Diagrama funcional do ADXL320	21
3.10	Diagrama funcional do ADXRS300	22
3.11	Fotos ilustrativas da central inercial	22
3.12	Diagrama de blocos do sistema de aquisição dos dados	23
3.13	Diagrama de interface com o PC	24
3.14	Diagrama de fluxo da rotina de transmissão	25
4.1	Medições dos sensores infravermelhos na simulação	28
4.2	Erro cometido no cálculo dos parâmetros a , b e c do plano do solo com relação ao plano pé	29
4.3	Erro cometido na estimação dos ângulos de atitude do pé	30
4.4	Medições dos sensores infravermelhos obtidos experimentalmente	31

4.5	Parâmetros a , b e c do plano solo com relação ao plano pé	33
4.6	Ângulos de atitude do pé com relação ao sistema de coordenadas fixado no solo.....	34
I.1	Diagrama esquemático do circuito de aquisição dos dados dos sensores.....	38

LISTA DE TABELAS

2.1	Descrição dos pinos da porta serial RS232	11
4.1	Médias e desvios padrão para ϵ_a , ϵ_b e ϵ_c	29
4.2	Médias e desvios padrão para o erro de estimação dos ângulos de atitude do pé	30
4.3	Médias e desvios padrão as medidas de cada sensor	32
4.4	Médias e desvios padrão para os parâmetros a, b e c do plano solo	32
4.5	Médias e desvios padrão para os ângulos de atitude do pé com relação ao plano solo.	33

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Gregos

Ξ	Representação de um plano qualquer
θ	Vetor que representa os parâmetros a , b e c de um plano
α_x	Ângulo do vetor normal ao plano pé com o eixo X do sistema de coordenadas de referência
α_y	Ângulo do vetor normal ao plano pé com o eixo Y do sistema de coordenadas de referência
α_z	Ângulo do vetor normal ao plano pé com o eixo Z do sistema de coordenadas de referência
ϵ_a	Erro de estimação para o parâmetro a do plano solo com relação ao plano pé
ϵ_b	Erro de estimação para o parâmetro b do plano solo com relação ao plano pé
ϵ_c	Erro de estimação para o parâmetro c do plano solo com relação ao plano pé
γ	Variação do deslocamento angular do pé

Siglas

LARA	Laboratório de Robótica e Automação
GPDS	Grupo de Processamento Digital de Sinais
PC	<i>Personal Computer</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
A/D	Analógico-digital
I/O	<i>in-out</i>
USART	<i>Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter</i>
UART	<i>Universal Asynchronous serial Receiver and Transmitter</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo apresenta uma breve explicação sobre o atual estado de desenvolvimento de uma prótese robótica de perna, bem como a arquitetura proposta no trabalho desenvolvido. São citados também os objetivos deste trabalho de graduação. Adicionalmente, é feita uma apresentação do relatório.

1.1 Contextualização

O Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília em parceria com o Laboratório de Robótica e Automação (LARA) e o Grupo de Processamento Digital de Sinais (GPDS) está desenvolvendo um estudo sobre robótica de reabilitação. A principal proposta desse projeto é o desenvolvimento de uma prótese robótica de perna comandada por sinais eletromiográficos.

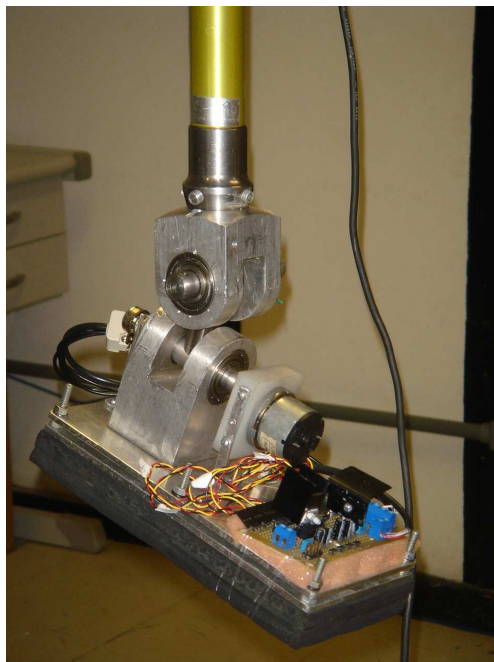
Os estudos em desenvolvimento almejam restaurar funções motoras perdidas em pacientes que sofreram amputações de seus membros inferiores. As próteses mecânicas passivas disponíveis atualmente oferecem grandes dificuldades de locomoção em terrenos inclinados e com obstáculos, como rampas e escadas.

Nesse contexto, torna-se importante definir e estimar a postura da prótese com relação ao solo durante um ciclo de marcha completo. A estimação de postura durante todas as fases do movimento (apoio, balanço, etc) é importante no sentido de auxiliar a marcha do paciente contribuindo para uma movimentação mais suave e segura.

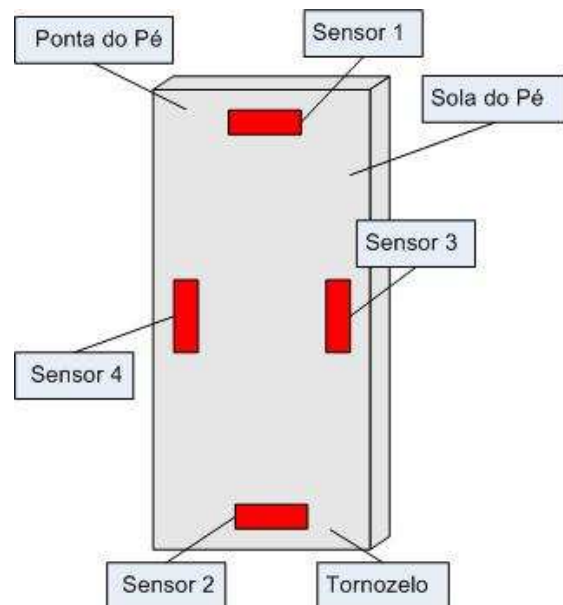
A atual estrutura da prótese em desenvolvimento está ilustrada na Figura 1.1.

1.2 Definição do problema

A arquitetura de instrumentação e controle da prótese está ilustrada na Figura 1.2. Esta arquitetura prevê o uso de um microcontrolador, associado à medição de posição do pé com relação ao solo. Essas informações são fornecidas ao microprocessador mestre de modo a auxiliar na geração de referência para o movimento. A comunicação entre os dispositivos foi feita através de



(a) Foto ilustrativa da prótese



(b) Disposição dos sensores infravermelhos

Figura 1.1: Foto do protótipo e disposição dos sensores infravermelhos

um barramento serial RS485.

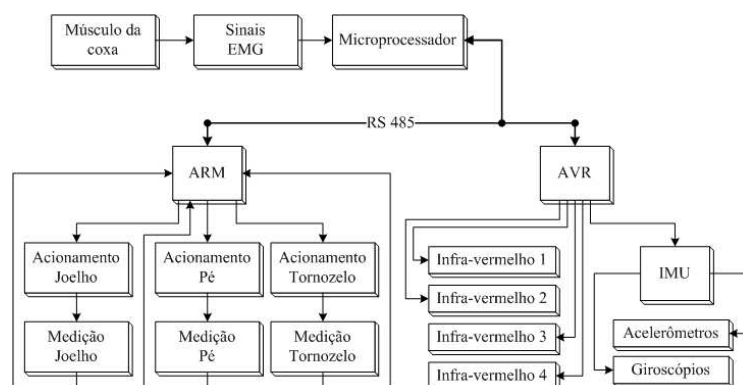


Figura 1.2: Arquitetura de instrumentação e controle para a prótese

Para dar continuidade ao projeto construiu-se uma placa de aquisição, baseada no microcontrolador ATmega8, para os sensores infravermelhos localizados no pé e para as medições fornecidas por uma central inercial. Os sensores infravermelhos medem a distância do pé com relação ao solo e a central inercial fornece medidas de aceleração e velocidade angular nos três eixos cartesianos. Essas informações são enviadas periodicamente a um PC onde são feitos os cálculos necessários para estimação de postura do pé com relação ao solo. A figura 1.3 ilustra um diagrama do sistema desenvolvido.

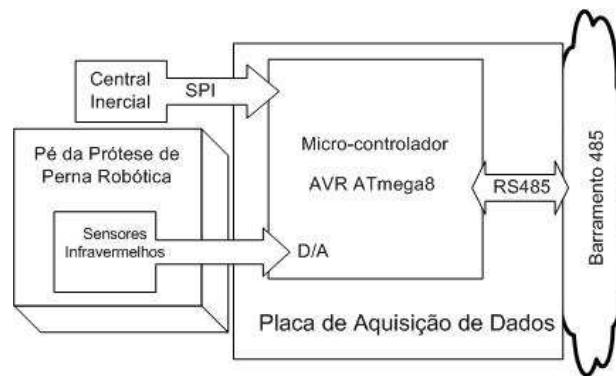


Figura 1.3: Diagrama de blocos do sistema

1.3 Objetivos do projeto

Este trabalho de graduação teve como principal objetivo o desenvolvimento de um aparato sensorial para estimação de postura com relação ao solo de uma prótese de perna robótica. Com o intuito de se alcançar este objetivo, foi desenvolvida uma simulação em Matlab[®] para auxiliar nas atividades propostas e na validação dos dados obtidos experimentalmente. Outras atividades foram desenvolvidas ao longo do projeto com a finalidade de cumprir os objetivos. Estas atividades englobam a construção de uma placa de aquisição dos sinais dos sensores utilizados e a construção de uma central inercial para auxiliar a estimação de postura da prótese.

1.4 Resultados Obtidos

Durante a execução do projeto foi desenvolvido um aparato sensorial baseado em sensores infravermelhos para estimação de postura do pé de uma prótese robótica de perna com relação ao solo. A postura da prótese pode ser traduzida em 3 ângulos de atitude do pé, os quais podem ser considerados como sendo o ângulo do vetor normal ao plano do pé com os 3 eixos coordenados de um sistema de referência(plano solo).

Os resultados obtidos foram apresentados de forma a se ressaltar o erro na estimação dos valores dos ângulos de atitude do pé de maneira a verificar a qualidade do sistema desenvolvido. Os resultados obtidos apenas com os sensores infravermelhos mostraram-se razoavelmente satisfatórios, contribuindo para uma primeira aproximação para a estimação de postura da prótese com relação ao solo.

Identificou-se também algumas limitações do sistema proposto. Nesse sentido, a inclusão de outros tipos de sensores faz-se necessário, como uma central inercial, a fim de melhorar a qualidade do sistema desenvolvido. Contudo, esta unidade inercial não foi inteiramente concluída.

1.5 Apresentação do Manuscrito

Este documento está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 são apresentados os fundamentos básicos sobre a teoria utilizada na síntese do modelo e da arquitetura propostos. Neste capítulo são abordados tópicos tais como: geometria analítica, comunicação serial e características do microcontrolador AVR ATMega8. No capítulo 3 apresenta-se todo o desenvolvimento necessário para se chegar no modelo sensorial proposto. Neste capítulo inclui-se as atividades relacionadas com a elaboração da arquitetura e modelo sensorial utilizados, bem como a construção da placa de aquisição de dados e da central inercial. Adicionalmente, aborda-se aspectos relacionando com o protocolo de comunicação e ainda os softwares do microcontrolador e do computador(PC). No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos experimentalmente. Além disso, é feita uma análise destes dados por meio de uma comparação com os dados simulados no Matlab[®]. No capítulo 5 é apresentada uma conclusão acerca das atividades desenvolvidas, bem como sugestão de melhorias que podem ser incorporadas em trabalhos futuros. O anexo I apresenta os esquemáticos dos circuitos desenvolvidos e no anexo II é descrito o conteúdo do CD com material complementar.

Capítulo 2

Fundamentos Básicos

Este capítulo trata dos aspectos teóricos e conceituais básicos para o entendimento do presente trabalho.

2.1 Elementos de Geometria Analítica

2.1.1 Representação de Planos

Um plano, representado por Ξ , é parametrizado por $\boldsymbol{\theta} = (a, b, c)^T$ tais que qualquer ponto P de coordenadas $\mathbf{p} = (x, y, z)^T$ pertencente a Ξ deve satisfazer:

$$ax + by + c = z. \quad (2.1)$$

Esta representação é conveniente no sentido de que qualquer plano paralelo ao plano $X \times Y$, conforme mostra a Figura 2.1, possui $a = b = 0$. Às vezes, também é conveniente usar a seguinte representação:

$$ax + by - c = -z. \quad (2.2)$$

$$\mathbf{p}^T \begin{bmatrix} a \\ b \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & -1 \end{bmatrix} \mathbf{p} = -c. \quad (2.3)$$

2.1.2 Vetor Normal ao Plano

Sendo $\mathbf{p}_1 = [x_1, y_1, z_1]^T$ e $\mathbf{p}_2 = [x_2, y_2, z_2]^T$ as coordenadas de dois pontos distintos pertencentes ao plano Ξ de parâmetros $\boldsymbol{\theta} = (a, b, c)^T$, um vetor $\mathbf{n}$ normal a Ξ satisfaz:

$$\mathbf{n}^T(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) = 0. \quad (2.4)$$

Sendo

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a & b & -1 \end{bmatrix} \mathbf{p}_1 &= -c. \\ \begin{bmatrix} a & b & -1 \end{bmatrix} \mathbf{p}_2 &= -c. \end{aligned}$$

uma vez que $\mathbf{p}_1$ e $\mathbf{p}_2$ pertencem ao plano Ξ , então, a subtração destas relações resulta em

$$\begin{bmatrix} a & b & -1 \end{bmatrix} (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) = 0. \quad (2.5)$$

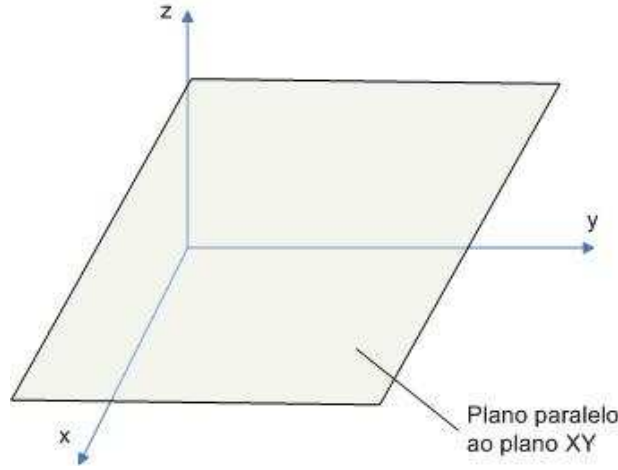


Figura 2.1: Representação de um plano paralelo ao plano XY

Sendo $\beta \neq 0$ uma constante, esta pode multiplicar ambos os lados de (2.5) que o resultado não se altera:

$$\beta \begin{bmatrix} a & b & -1 \end{bmatrix} (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) = 0. \quad (2.6)$$

Comparando-se (2.4) e (2.6), obtem-se uma forma genérica para o vetor normal:

$$\mathbf{n} = \beta \begin{bmatrix} a \\ b \\ -1 \end{bmatrix}$$

Se for desejado que tal vetor tenha comprimento unitário, basta fazer:

$$\mathbf{n} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}} \begin{bmatrix} -a \\ -b \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

O vetor normal $\mathbf{n}$ possui ângulos α_x , α_y e α_z com relação aos eixos X , Y e Z do sistema de coordenadas de referência, conforme ilustrado na Figura 2.2. Estes ângulos são dados por:

$$\alpha_x = \arccos\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{n}\right) = \arccos\left(\frac{-a}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}\right)$$

$$\alpha_y = \arccos\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{n}\right) = \arccos\left(\frac{-b}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}\right)$$

$$\alpha_z = \arccos\left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{n}\right) = \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}\right)$$

Observa-se que se o plano Ξ estiver paralelo ao plano $X \times Y$, o que levaria a $a = b = 0$, teria-se $\alpha_x = \alpha_y = \frac{\pi}{2}rad$ e $\alpha_z = 0rad$.

2.1.3 Projeção Oblíqua de um Ponto Sobre um Plano

Considerando-se $\mathbf{s} = (x_s, y_s, z_s)^T$ as coordenadas de um ponto S , deseja-se determinar o ponto V sobre o plano Ξ que é a projeção de S segundo a direção determinada pelo vetor $\mathbf{u}$. Não

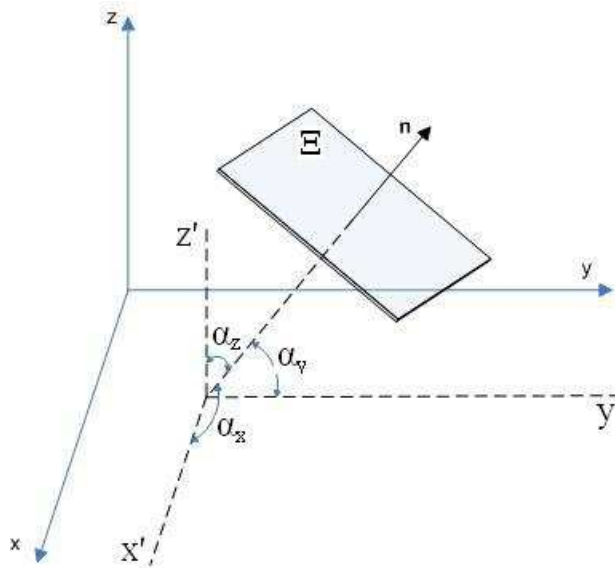


Figura 2.2: Ângulos de um vetor normal ao plano com relação aos eixos X, Y e Z

necessariamente $\mathbf{u}$ deve ser unitário. O problema pode ser escrito como sendo equivalente ao de determinar a constante λ tal que:

$$\mathbf{s} + \lambda \mathbf{u} = \mathbf{v} \quad (2.8)$$

sendo que, como $V \in \Xi$, então suas coordenadas $\mathbf{v}$ devem satisfazer a (2.1). Sendo o plano representado por $\boldsymbol{\theta} = (a, b, c)^T$, então o ponto $\mathbf{s} + \lambda \mathbf{u}$ deve respeitar (2.3), que é equivalente a:

$$\begin{bmatrix} a & b & -1 \end{bmatrix} (\mathbf{s} + \lambda \mathbf{u}) = -c.$$

que se resolve com:

$$\lambda = \frac{-c - \begin{bmatrix} a & b & -1 \end{bmatrix} \mathbf{s}}{\begin{bmatrix} a & b & -1 \end{bmatrix} \mathbf{u}} = \frac{-c - ax_s - by_s + z_s}{ax_u + by_u - z_u}$$

Deve-se observar que se $\mathbf{u}$ for um vetor unitário, então $|\lambda|$ corresponde à distância de S ao plano Ξ segundo a direção dada por $\mathbf{u}$. A partir de λ , obtem-se a projeção $\mathbf{v}$ pela fórmula (2.8). Um caso especial é o da projeção ortogonal, que está ilustrado na Figura 2.3. Neste caso, sendo $\mathbf{u}$ o vetor normal unitário ao plano Ξ dado por (2.7) tem-se:

$$\lambda = \frac{c + ax_s + by_s - z_s}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}$$

Sendo $\mathbf{s} = [0, 0, 0]^T$, então obtem-se de (2.8) e (2.7) que o ponto

$$\mathbf{v}_0 = \frac{c}{a^2 + b^2 + 1} \begin{bmatrix} -a \\ -b \\ 1 \end{bmatrix}$$

pertence ao plano Ξ e é o que está mais próximo da origem. Isto pois este ponto é o resultado da projeção da origem sobre o plano Ξ segundo vetor normal a ele. E ainda, o módulo deste vetor define a menor distância do plano à origem, dada por:

$$d_{min} = |\mathbf{v}_0| = \frac{|c|}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}$$

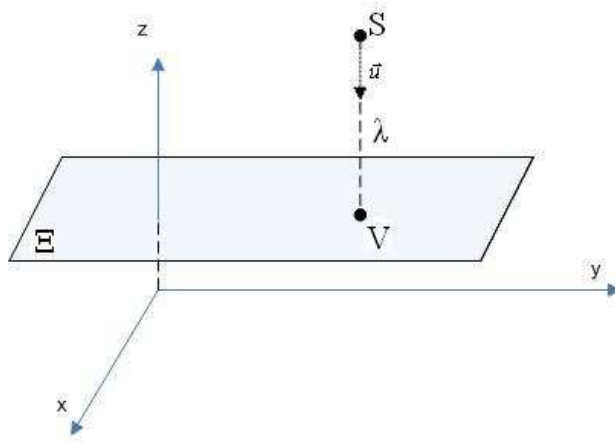


Figura 2.3: Projeção ortogonal do ponto S sobre o plano Ξ segundo a direção do vetor unitário $\mathbf{u}$

2.1.4 Estimação dos Parâmetros do Plano

Nesta seção considera-se o problema de encontrar os parâmetros do plano que melhor passa por um conjunto de pontos $P_1, P_2, \dots, P_n$. Se cada ponto P_i possui coordenadas $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i, z_i)^T$, então forma-se a seguinte equação normal:

$$\Phi \boldsymbol{\theta} = \mathbf{z}, \quad (2.9)$$

em que $\boldsymbol{\theta} = [a, b, c]^T$, e

$$\Phi = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}.$$

A melhor estimativa para este problema é dada por [1]:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \Phi^\dagger \mathbf{z}$$

em que $\Phi^\dagger$ é a pseudo-inversa de Moore-Penrose à esquerda da matriz Φ . Esta estimativa corresponde ao valor de $\boldsymbol{\theta}$ que minimiza o seguinte critério quadrático:

$$\mathbf{J} = \sum_1^n (z_i - \boldsymbol{\varphi}_i^T \boldsymbol{\theta})^2$$

com $\boldsymbol{\varphi}_i^T = [x_i, y_i, 1]$. Deve-se notar que quando $n = 3$ o plano passa exatamente pelos pontos P_1, P_2 e P_3 .

2.2 O Microcontrolador Atmel AVR ATMEGA8

Os microcontroladores são dispositivos muito versáteis que englobam em um único encapsulamento, um microprocessador, memória e diversos periféricos como entradas e saídas digitais ou analógicas, interface serial, conversores A/D, *timers*, etc. O tamanho reduzido, aliado a baixos custo e consumo, permitem que este tipo de dispositivo seja largamente usado em projetos de controle e automação.

O ATmega8 é um microcontrolador CMOS com barramentos e espaços de endereçamento separados para memória de dados e de programa. Adicionalmente, este dispositivo emprega um conjunto reduzido de instruções (RISC) com 130 instruções. A Figura 2.4 ilustra o diagrama dos pinos. Dentre as diversas características, destacam-se ¹:

- Instruções fixas de 16 bits;
- Pipeline de dois estágios, enquanto uma instrução é executada, outra é carregada na memória de programa;
- Faixa de operação e 4,5 a 5,5V;
- 32 registradores de uso geral que podem ser acessados simultaneamente pela CPU permitindo códigos de programas menores;
- Conjunto de instruções que facilitam programação em linguagens de alto nível contendo 130 instruções otimizadas, sendo que aproximadamente 80% delas são executadas em apenas 1 ciclo;
- Memória *flash* de 8K *bytes* programável em circuito sem necessidade de tensão adicional, podendo inclusive ser autoprogramável;
- 3 registradores de contagem sendo dois de 8 bits e um de 16 bits;
- 23 pinos de I/O configuráveis;
- Oscilador interno ajustável;
- Conversor A/D de 10 bits com 6 entradas multiplexadas;
- USART serial programável;
- Comparador analógico;
- 3 canais PWM;
- Cão-de-guarda programável;

¹Fonte: *8-bit AVR with 8K Bytes In-System Programmable Flash - Atmel Corporation*

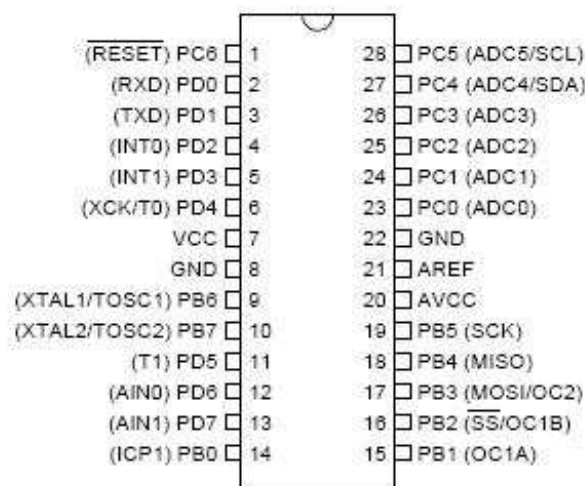


Figura 2.4: Pinagem do microcontrolador

Fonte: Manual AVR ATmega8. Atmel Corporation. Disponível em: <<http://www.atmel.com>>.

Acessado em: 11 jun. 2007.

2.3 Comunicação Serial

2.3.1 Interface RS232

RS232 retrata uma padronização de uma interface comum para transferência de dados entre dispositivos. Este padrão especifica as tensões, temporizações e funções dos sinais, um protocolo para troca de informações, e as conexões mecânicas. Esta interface é composta por algumas vias de controle e utiliza um conector DB9. A numeração e descrição de cada pino é feita na Figura 2.5 e na Tabela 2.1, respectivamente. Na Figura 2.5 os sinais mais comuns são apresentados em **negrito>**.

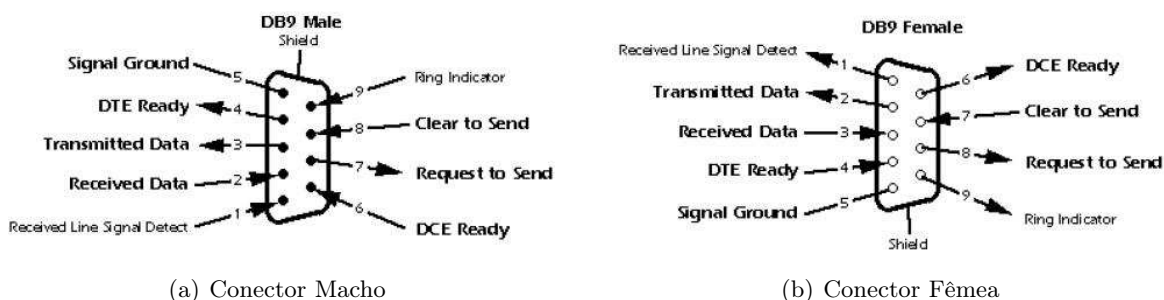


Figura 2.5: Pinagem da Porta Serial RS232

Fonte: Comunicação Serial - RS232. Disponível em: <<http://www.professores.aedb.br>>

Acessado em: 11 jun. 2007

Este padrão foi concebido como um meio de comunicação *full-duplex* ponto-a-ponto entre o PC e um dispositivo qualquer. Este dispositivo pode ser uma infinidade de periféricos tais como: microcontrolador, CLP ou modem. O padrão RS232 trabalha com tensões elevadas de forma a aumentar a capacidade da distância de transmissão. Tensões entre +3V e +15V indicam nível lógico '0' enquanto que tensões entre -3V e -15V representam o nível lógico '1'. Essas tensões são

Tabela 2.1: Descrição dos pinos da porta serial RS232

Pino	Nome	Descrição
1	Data Carrier Detect - (DCD)	Detecção de um sinal de tom de um modem, identificando que ele está conectado a uma linha telefônica.
2	Receiver Data - (RX)	Recepção dos bits transmitidos pelo dispositivo terminal.
3	Transmitted Data - (TX)	Pino no qual são enviados os bits para o dispositivo terminal.
4	Data Terminal Ready - (DTR)	Pino de sinalização para o dispositivo terminal que o PC está pronto para se comunicar.
5	Signal Ground - (GND)	Pino de referência das tensões de transmissão e de recepção. Este pino garante que o PC e o dispositivo terminal tenham o mesmo nível de referência de 0 Volts.
6	Data Set Ready - (DSR)	Pino de sinalização para o PC que o dispositivo terminal está pronto para se comunicar.
7	Request to Send - (RTS)	Pino de sinalização para o dispositivo terminal que o PC quer transmitir.
8	Clear to Send - (CTS)	Pino de sinalização para o PC que o dispositivo terminal está pronto para receber uma transmissão.
9	Ring Indicator - (RI)	Indica que uma ligação chegou pela linha telefônica.

com referência à um terra comum. Portanto, nota-se que existe uma faixa de tensão onde o nível do sinal é indefinido. Esta área entre -3V e +3V foi projetada para absorver ruídos na linha de transmissão. A Figura 2.6 ilustra os níveis de tensão utilizados na interface RS232.

Esta interface utiliza uma temporização baseada no formato UART, que se trata de um protocolo assíncrono. De acordo com este protocolo, o canal é mantido em nível lógico 1 e quando é feita uma transmissão o canal vai para nível lógico 0. Logo em seguida é transmitido um *byte* (8 bits) - formato de dados ASCII - seguidos de um bit de paridade (opcional) e de dois bits de parada, como ilustra a Figura 2.7. A velocidade de comunicação deste protocolo vai desde 2400 a 512000 bps (bits por segundo). Nos micros IBM-PC, a velocidade máxima é de 115200 bps.

2.3.2 Interface RS485

O padrão RS485 surgiu com a finalidade de corrigir diversos problemas de comunicação entre dispositivos tais como: ruído induzido, diferenças de tensão entre os aterramentos dos terminais de comunicação, assim como distâncias elevadas entre os mesmos. Por esta razão ele é amplamente utilizado em aplicações industriais ou em configurações onde se tem um dispositivo mestre que

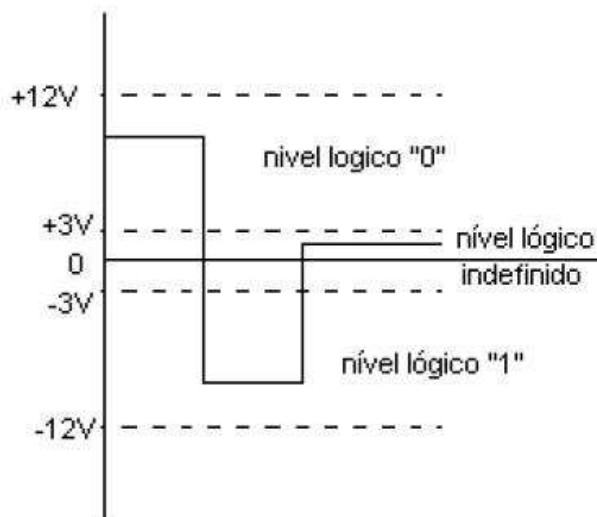


Figura 2.6: Níveis de tensão para interface RS232

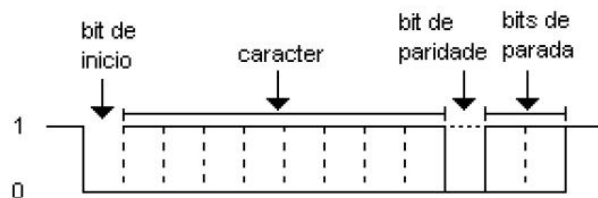


Figura 2.7: Formato de dados UART

comanda vários dispositivos escravos.

A interface RS485 consiste em uma topologia de rede de comunicação do tipo barramento. As informações são transmitidas por meio de um par trançado de forma *half duplex*. Um dispositivo de interface RS485, por exemplo, o circuito integrado DS485 tem seu diagrama interno mostrado na Figura 2.8. Esses transceptores são formados por um *driver* de transmissão **D** e um de recepção **R** conectados juntos. Adicionalmente estão presentes os pinos de habilitação de transmissão **$\overline{RE}$** (ativo 0) e de habilitação de recepção **DE** (ativo 1). Estes pinos, geralmente, são conectados juntos garantindo que o dispositivo esteja em operação de transmissão ou recepção, ou seja, nunca habilitando os dois *drivers* juntos. As saídas para o barramento, **A** e **B** operam com nível de tensão diferencial. O transceptor é normalmente alimentado com 5V DC, consome 0.5mA sem carga e suporta uma taxa de transmissão superior a 10Mbps.

Para que um dispositivo possa transmitir um dado, ele deve elevar para 5V o pino **DE**, desabilitando o *driver* de recepção. A informação deve ser transmitida pelo pino **DI** e ao fim da transmissão o pino **DE** deve ser desabilitado, recolocando o dispositivo no modo de recepção. Esta habilitação, por exemplo, pode ser feita por software, controlando um pino do microcontrolador ou uma porta de comunicações de um PC.

A transmissão por tensão diferencial é feita da seguinte forma: quando pretende-se transmitir o nível lógico 1, o pino **A** é levado para 5V e o pino **B** é colocado em 0V. Desta maneira tem-se $A - B = +5V$. No entanto, se almeja-se transmitir o nível lógico 0, o pino **B** é setado em 5V

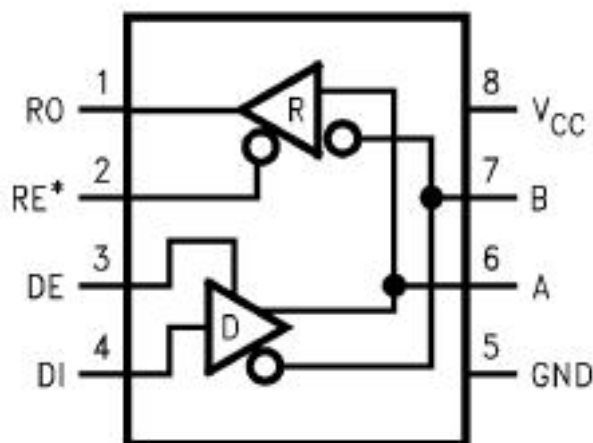


Figura 2.8: Diagrama interno - DS485

Fonte: Data sheet DS485, National Semiconductor Corporation. Disponível em <<http://www.national.com>>. Acessado em 12 jun 2007.

e o pino **A** é levado para 0V. Então tem-se a tensão $A - B = -5V$. Este comportamento está ilustrado na Figura 2.9.

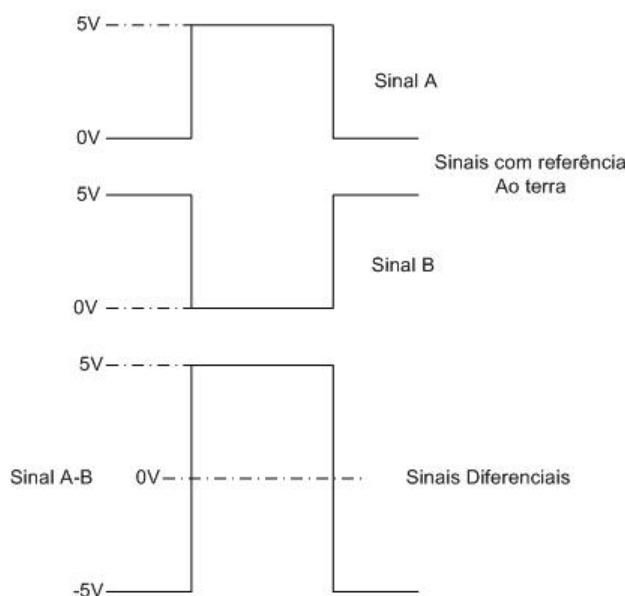


Figura 2.9: Sinais Diferenciais

Pelo fato da utilização uma tensão diferencial, a escolha de um par trançado elimina muito o ruído eletromagnético induzido pelo meio, que provém desde campos magnéticos de outros aparelhos de telecomunicação até harmônicos gerados por máquinas de grande potência na rede elétrica. O cancelamento do ruído se dá pelo fato de que um ruído somado ao sinal de um dos fios também será somado ao sinal de seu par trançado. Por conseguinte, o ruído é cancelado quando é tomada a tensão diferencial.

Uma importante consideração é que quando todos os nós do barramento estão em modo de recepção o nível do barramento pode ficar indefinido. Para contornar esse problema deve-se garantir

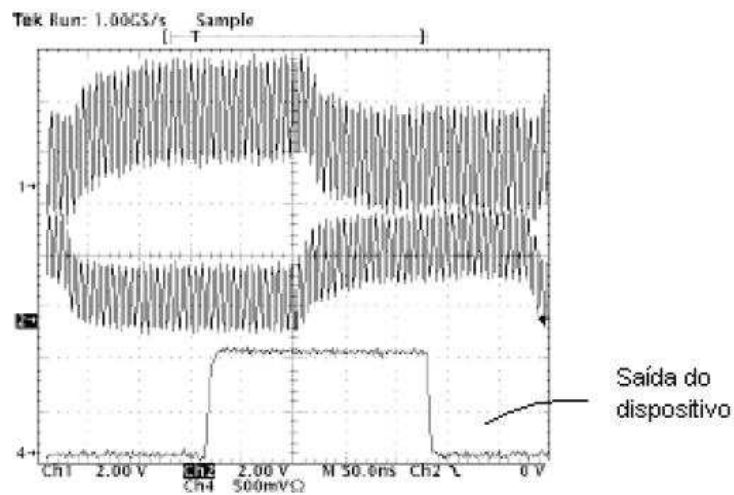


Figura 2.10: Sinais Diferenciais

Fonte: Application Notes ST485, STMicroelectronics. Disponível em <<http://www.st.com>>

Acessado em: 12 jun. 2007

que o barramento fique sempre em nível lógico 1, adicionando um resistor de *pull-up* no pino **A** e um de *pull-down* no pino **B**. Deve-se atentar para o valor das resistências, que devem ter valores iguais para não alterar o balanceamento da linha de transmissão.

Capítulo 3

Desenvolvimento

Este capítulo apresenta as atividades desenvolvidas durante o projeto.

3.1 Introdução

Neste trabalho foi elaborada uma proposta de uma arquitetura sensorial para estimação de postura com relação ao solo de uma prótese de perna robótica.

Com a finalidade de se alcançar os objetivos do projeto foram desenvolvidas diversas atividades. Dependendo da atividade adotou-se uma metodologia específica, de modo que elas serão melhor detalhadas no decorrer do presente capítulo. Inicialmente as atividades foram direcionadas para a implementação de uma simulação em Matlab[®] de um ciclo de marcha completo. Num segundo momento, partiu-se para construção de uma placa de aquisição de dados dos sensores, bem como a montagem dos sensores na prótese. Finalmente, ainda iniciou-se a implementação de uma central inercial, a qual será futuramente incorporada no módulo sensorial proposto.

3.2 Modelagem e Arquitetura Sensorial

3.2.1 O modelo geométrico

Afim de obter-se uma ferramenta que auxiliasse na visualização da movimentação do pé com relação ao solo e ajudasse na apresentação dos resultados conseguidos, as primeiras atividades desenvolvidas foram direcionadas para a implementação de uma simulação utilizando o software Matlab[®].

A geração da movimentação do pé com relação a um sistema de referência(solo) foi obtida com base em um modelo geométrico de posição da prótese. Este modelo foi obtido considerando a atribuição de dois sistemas de coordenadas: um fixado no plano do pé e outro fixado no solo(mundo externo), conforme mostra a Figura 3.1.

Conforme em [2], a posição do pé com relação ao solo pode ser determinada utilizando uma matriz de transformação homogênea que relaciona o sistema de coordenadas do pé com o sistema de coordenadas fixado no mundo externo. Esta matriz é dada por:

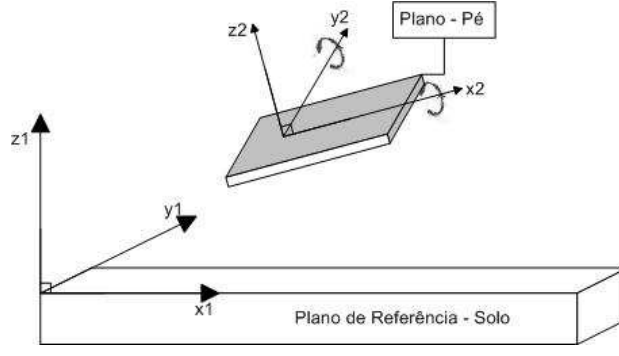


Figura 3.1: Atribuição dos sistemas de coordenadas

$$\mathbf{M}_0^3 = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_0^3 & \mathbf{t}_0^3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sendo

$$\mathbf{R}_0^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad e \quad \mathbf{t}_0^3 = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$$

Na matriz $\mathbf{M}_0^3$, a submatriz $\mathbf{R}_0^3$ corresponde ao operador de rotação e representa a orientação do sistema móvel(pé) com relação ao referencial fixo(solo). Na simulação, o ângulo γ , que representa a variação do deslocamento angular do pé, é feito de modo arbitrário, conforme mostrado logo abaixo:

$$\gamma(t) = -0.6 \times \sin(\pi t/2) \quad (3.1)$$

De maneira que, variando-se t de 0 a 2 em incrementos de 0.02, tem-se uma variação senoidal em γ conforme em 3.1. Por exemplo, em $t = 1$, a variação do deslocamento angular do pé será máxima e igual a 0,6 rad.

O vetor $\mathbf{t}_0^3$ é o vetor de translação e indica a localização do sistema de coordenadas fixado no pé em relação ao sistema de coordenadas fixado no solo. Em $\mathbf{t}_0^3$, tem-se t_x , t_y e t_z que correspondem à trajetória dos pontos pertencentes ao plano do pé com relação ao sistema de coordenadas do solo. Na simulação, cada uma dessas componentes em $\mathbf{t}_0^3$ varia de acordo com t , conforme ilustra as relações demonstradas a seguir:

$$\begin{aligned} t_x &= 0 \\ t_y &= -0,5t \\ t_z &= 0,3 \times \sin(\pi t/2) \end{aligned}$$

Portanto, a partir das relações determinadas nesta subseção foi simulada uma trajetória para o pé da prótese robótica seguindo a matriz de transformação homogênea $\mathbf{M}_0^3$, a qual determina o modelo geométrico de posição do pé com relação ao solo.

3.2.2 Arquitetura sensorial e estimação dos ângulos de atitude do pé

A arquitetura utilizada no desenvolvimento deste módulo baseou-se em quatro sensores infravermelhos capazes de medir a distância do plano do pé ao plano do solo. Para tal, esses sensores foram montados na sola do pé e dispostos de maneira convenientemente simétrica. A posição aproximada de cada sensor localizado no pé é demonstrada na Figura 3.2.

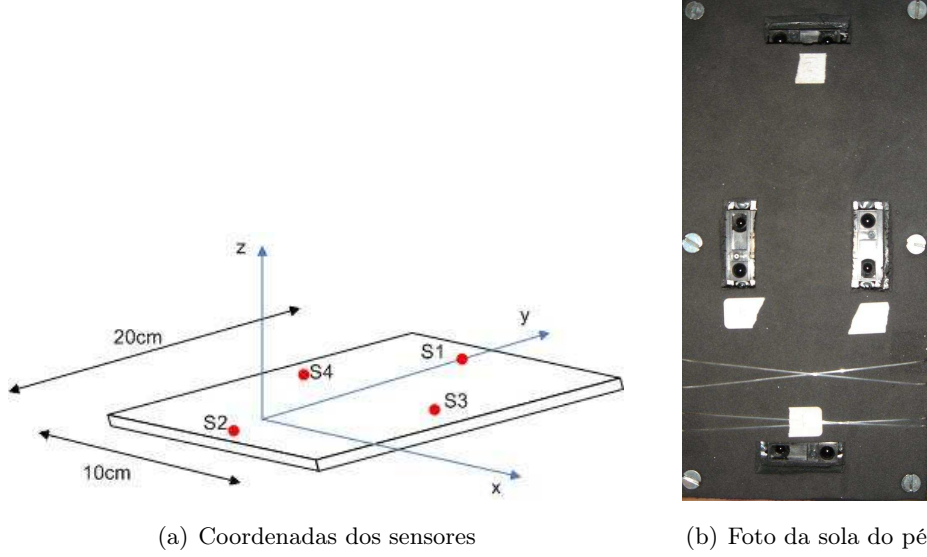


Figura 3.2: Figura ilustrativa da montagem dos sensores no pé

Na Figura 3.2, os pontos em vermelho representam os sensores infravermelhos e suas coordenadas em relação ao sistema de coordenadas fixado no pé são: $\mathbf{s1} = [0 \ 18 \ 0]$, $\mathbf{s2} = [0 \ -3 \ 0]$, $\mathbf{s3} = [3 \ 7,5 \ 0]$ e $\mathbf{s4} = [-3 \ 7,5 \ 0]$, com todas as coordenadas em centímetros. Uma foto dos sensores montados no pé também é apresentada na Figura 3.2.

Conforme visto na subseção 2.1.3 e conhecendo-se a medida de distância de cada sensor, pode-se encontrar a projeção de cada 'ponto-sensor' no plano do solo, seguindo a direção do vetor normal ao plano do pé. Desta forma, os parâmetros a , b e c do plano que melhor passa por esse conjunto de pontos projetados pode ser encontrado utilizando as relações desenvolvidas na subseção 2.1.4. Assim tem-se uma representação do plano do solo com relação ao sistema de coordenadas fixado no pé.

A postura do pé com relação ao solo pode ser traduzida em três ângulos. Considerando-se o vetor normal ao plano do pé, pode-se estabelecer que esses ângulos fossem os ângulos deste vetor com relação a um sistema de coordenadas de referência. Utilizando o sistema de coordenadas fixado no solo como referencial, foi demonstrado na subseção 2.1.2 que partindo-se dos parâmetros a , b e c deste plano os ângulos de atitude do pé podem ser calculados como:

$$\begin{aligned}\alpha_x &= \arccos\left(\frac{-a}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}\right) \\ \alpha_y &= \arccos\left(\frac{-b}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}\right) \\ \alpha_z &= \arccos\left(\frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + 1}}\right)\end{aligned}$$

O diagrama da Figura 3.3 ilustra o modelo de sistema utilizado. Partindo-se dessa idéia enumera-se uma série de etapas que compõem o modelo e a arquitetura sensorial propostos.

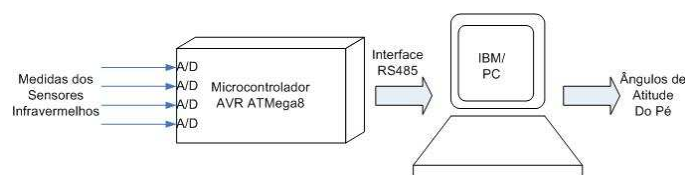


Figura 3.3: Diagrama do sistema utilizado

1. Geração do movimento do pé com relação ao solo pela aplicação do modelo geométrico considerado na subseção anterior.
2. Aquisição das medidas dos sensores infravermelhos dispostos no pé
3. Estimação dos coeficientes a , b e c do plano do solo com relação ao sistema de coordenadas fixado no pé.
4. Cálculo dos ângulos de atitude do pé, conforme definido nesta subseção.

3.3 Módulo Sensor

3.3.1 Sensores infravermelhos

A família de sensores infravermelhos da Sharp é muito utilizada em aplicações que requerem medição de distância. O sensor escolhido foi o GP2D120 da Sharp. Este sensor oferece uma boa faixa de detecção e possui lentes especiais as quais permitem medir menores valores de distância. Uma foto do sensor está ilustrada na Figura 3.4.

Estes sensores utilizam o princípio da triangulação e uma disposição linear de CCD, do inglês *Charge Coupled Device*, para calcular a distância entre objetos. A idéia básica é a seguinte: um pulso de luz infravermelha é emitido por um led emissor. Quando essa luz é refletida por um objeto, ela retorna para o dectetor e forma-se um triângulo entre o ponto de reflexão, o emissor e o detector. A distância pode ser calculada com base no ângulo interno a este triângulo, conforme mostrado na Figura 3.5.

A porção receptora deste sensor é capaz de transmitir a luz refletida em várias partes do vetor de CCD de acordo com o ângulo descrito na Figura 3.5. Esses dispositivos determinam o ângulo da luz refletida e então pode-se calcular a distância do objeto. Este método é bastante robusto com relação à iluminação ambiente e oferece uma independência com relação à cor do objeto a ser detectado.

O sensor possui saída analógica de tensão que corresponde à distância que ele se encontra do objeto alvo. Consegue-se medir uma faixa de valores de distância de 4 até 30 centímetros. Este sensor é alimentado tipicamente com uma faixa de tensão de 4,5V a 5,5V e consome uma corrente de 33mA.

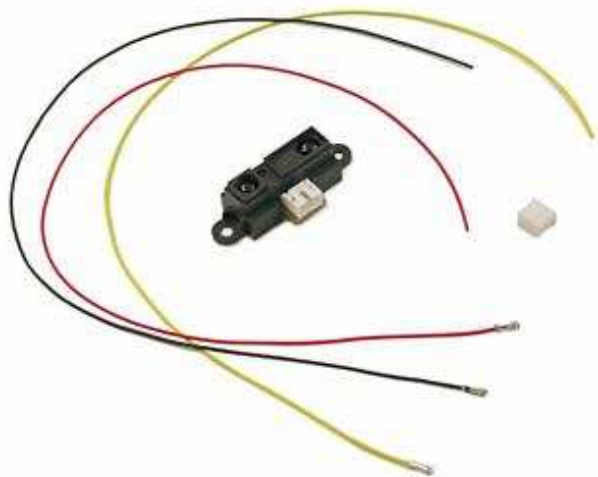


Figura 3.4: Foto ilustrativa do sensor GP2D120 da Sharp

Fonte: Disponível em <<http://www.acroname.com/robotics/parts/R146-GP2D120.htm>>
Acessado em: 14 jun. 2007

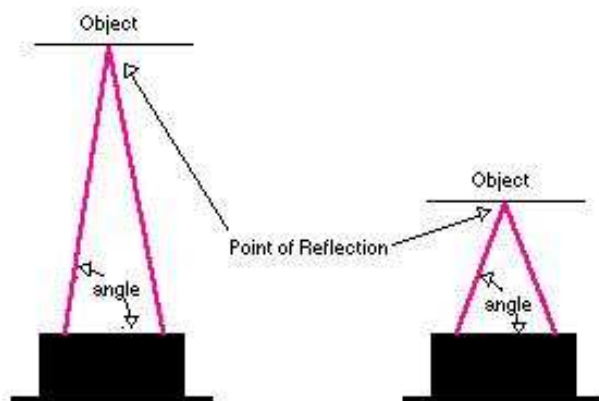


Figura 3.5: Ângulos diferentes para distâncias diferentes

Fonte: Disponível em <<http://www.acroname.com/robotics/info/articles/sharp/sharp.htm>>
Acessado em: 14 jun. 2007

Uma das desvantagens deste tipo de sensor é que a tensão de saída não é linear com relação à distância medida. Na verdade, a saída deste sensor se aproxima bastante de um padrão logarítmico. A tensão de saída *versus* distância medida está ilustrada na Figura 3.6. Para a aplicação em questão, uma maneira de converter a tensão de saída em valores de distância foi utilizando o programa Matlab[®] para encontrar uma função polinomial, por meio de uma regressão linear, que relacionasse as variáveis tensão de saída e distância, e que melhor aproximasse a curva da Figura 3.6. Os coeficientes do polinômio encontrado estão evidenciados na fórmula 3.2. Logo a seguir na Figura 3.7, são mostrados os resíduos na estimação dos coeficientes deste polinômio.

$$y(x) = 0,0005x^4 - 0,0104x^3 + 0,1406x^2 - 1.1854x + 5,7376 \quad (3.2)$$

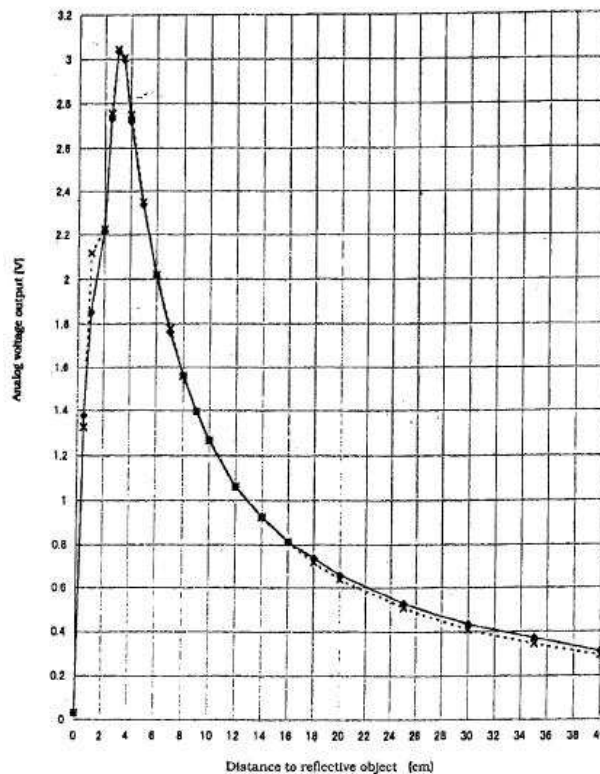


Figura 3.6: Tensão de saída *versus* distância medida

Fonte: Sharp Data sheet. Disponível em <<http://www.acroname.com/robotics/parts/R146-GP2D120.htm>>

Acessado em: 14 jun. 2007

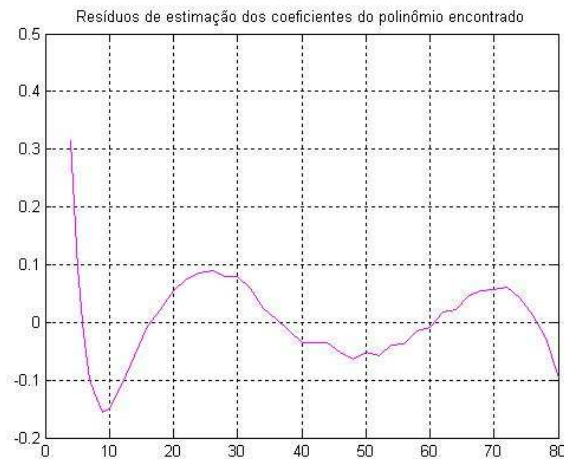
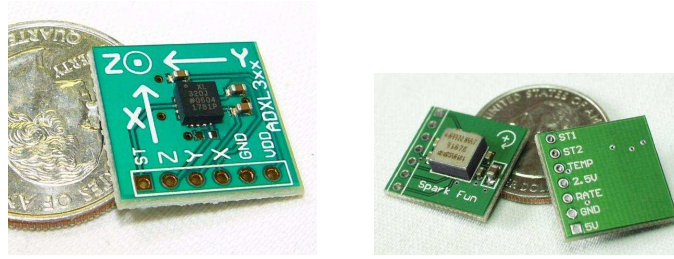


Figura 3.7: Resíduos na estimação dos coeficientes do polinômio

3.3.2 A central inercial (acelerômetro e giroscópio)

Adicionalmente aos sensores infravermelhos utilizou-se mais dois tipos de sensores, acelerômetro e giroscópio. Estes sensores foram combinados numa mesma placa com o objetivo de obter-se uma central inercial que medisse a aceleração e velocidade angular nos três eixos coordenados de um sistema de referência. Uma foto destes sensores está mostrada na Figura 3.8.

O sensor acelerômetro escolhido foi o ADXL320 da Analog Devices. Este sensor consegue medir



(a) Acelerômetro

(b) Giroscópio

Figura 3.8: Foto ilustrativa dos sensores

Fonte: Disponível em <<http://www.sparkfun.com>>

Acessado em: 14 jun. 2007

acelerações numa faixa de $\pm 5g$. A Figura 3.9 mostra o diagrama funcional do dispositivo.

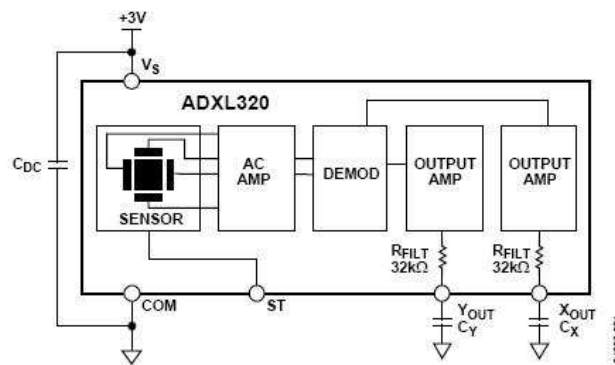


Figura 3.9: Diagrama funcional do ADXL320

Fonte: The ADXL320 Data sheet. Disponível em <<http://www.sparkfun.com>>

Acessado em: 14 jun. 2007

O princípio de funcionamento deste sensor é baseado na deflexão de uma estrutura de poli-silicone. Esta deflexão é medida usando um capacitor diferencial que consiste de duas placas fixas e independentes unidas à massa movente. A aceleração a qual é submetida o sensor deflexiona o feixe de poli-silicone e causa o desbalanciamento do capacitor diferencial, resultando numa forma de onda quadrada da tensão de saída cuja amplitude é proporcional à aceleração. Este sinal é então retificado e pode-se determinar a direção da aceleração medida.

A maioria das especificações no manual deste sensor são para tensões de alimentação de 3V. Entretanto, o acelerômetro pode, perfeitamente, ser alimentado com tensões diferentes. A tensão de saída deste dispositivo varia proporcionalmente com respeito à tensão de alimentação. Por exemplo, se o sensor for alimentado com 5V, o fator de escala na saída será de aproximadamente 312 mV/g. Da mesma forma, a tensão na saída será $V_S/2$ quando a aceleração medida for igual a 0g, em que V_S é a tensão de alimentação. Este sensor consome uma corrente de $750\mu A$ quando alimentado com 5V.

O sensor giroscópio escolhido foi o ADXRS300, também da Analog Devices. Este dispositivo é um sensor capaz de medir velocidade angular em torno de um eixo, sendo projetado para medir faixas de valores de $\pm 300^\circ/s$. A Figura 3.10 mostra o diagrama funcional do dispositivo.

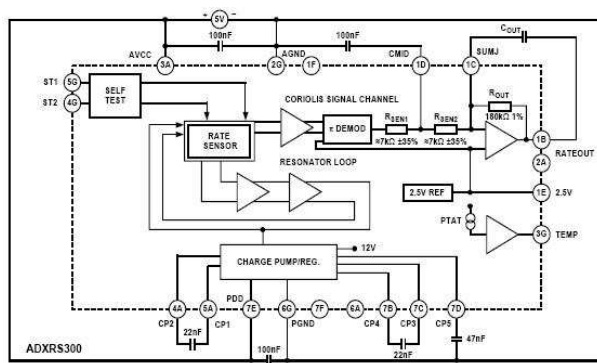


Figura 3.10: Diagrama funcional do ADXRS300

Fonte: The ADXRS300 Data sheet. Disponível em <<http://www.sparkfun.com>>

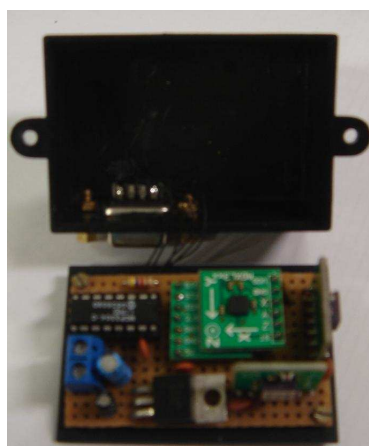
Acessado em: 15 jun. 2007

Este sensor opera sob o princípio de um giroscópio ressonante. Duas estruturas de poli-silicone são acionadas eletrostaticamente afim de que entrem em ressonância. O sinal de saída deste sensor é uma tensão analógica que é proporcional à velocidade de rotação em torno do eixo de medição. A saída possui um fator de escala de $5 \text{ mV}/^\circ/\text{s}$. O dispositivo suporta tensões de alimentação na faixa de 4,75V a 5,25V e consome uma corrente de 6mA. Da mesma forma que o acelerômetro, a tensão na saída será $V_S/2$ quando a velocidade de rotação medida for igual a $0^\circ/\text{s}$, em que V_S é a tensão de alimentação.

Os sensores acelerômetro e giroscópio foram montados em placa perfurada, de modo a formar uma central inercial que pudesse fornecer informações sobre aceleração e velocidade angular num sistema de referência. A disposição dos sensores na placa está ilustrada na Figura 3.11.



(a) Foto da caixa fechada



(b) Foto da caixa aberta

Figura 3.11: Fotos ilustrativas da central inercial

Os sinais de saída dos sensores são levados a um conversor analógico-digital(A/D) de resolução de 13 bits. A comunicação da central inercial com a placa de aquisição de dados se dá por meio de uma interface serial SPI disponível no conversor A/D.

3.4 A Placa de Aquisição de Dados

Durante o desenvolvimento deste projeto foi construída uma placa para aquisição dos sinais dos sensores. Esta placa baseou-se no microcontrolador AVR ATmega8 da Atmel e seu diagrama esquemático pode ser visualizado na Figura 3.12.

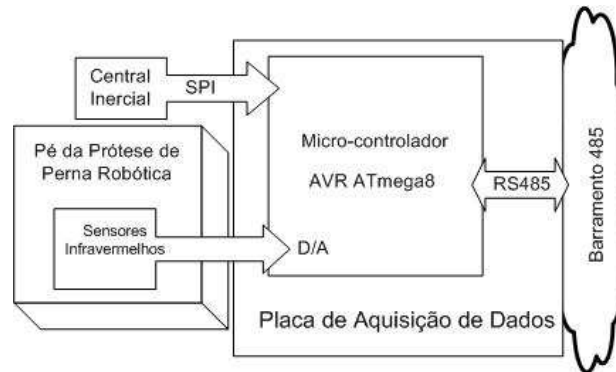


Figura 3.12: Diagrama de blocos do sistema de aquisição dos dados

Esta placa possui 4 entradas analógicas para os sensores infravermelhos, sendo que também está disponível uma interface de comunicação serial SPI. Adicionalmente, a placa conta com uma interface de comunicação com o PC baseada no padrão RS485.

Os sensores infravermelhos são conectados pelas entradas analógicas da placa. Utilizou-se o conversor Analógico/Digital disponível no próprio ATmega8, que possui uma resolução de 10 bits, para converter os sinais de saída dos sensores infravermelhos para lógica digital. A central inercial comunica-se com a placa de aquisição via interface SPI. Todas essas informações são transmitidas a um PC por meio de um barramento RS485.

3.5 Interface com o PC

Implementou-se o módulo de comunicação com o PC considerando uma arquitetura em dois blocos. O primeiro faz a conversão dos níveis lógicos RS232 para níveis TTL, e o segundo é, fundamentalmente, um dispositivo transceptor RS485 para acesso ao barramento de dados. Para acesso ao barramento utilizou-se a porta serial do PC e por simplicidade, assumiu-se que sempre haveria um dispositivo presente na outra ponta do barramento. Desta maneira muitos sinais de sincronização presentes no padrão RS232 foram ignorados. Assim os únicos pinos utilizados foram TX, RX, GND e RTS. Este último faz-se necessário na medida em que o acesso ao barramento é feito através deste pino, via software. Consequentemente, foi utilizada uma biblioteca específica que proporcionasse o controle do pino RTS, visto que as funções típicas da API do Windows não permitiam essa funcionalidade. O esquema de comunicação com o PC está mostrado na Figura 3.13.

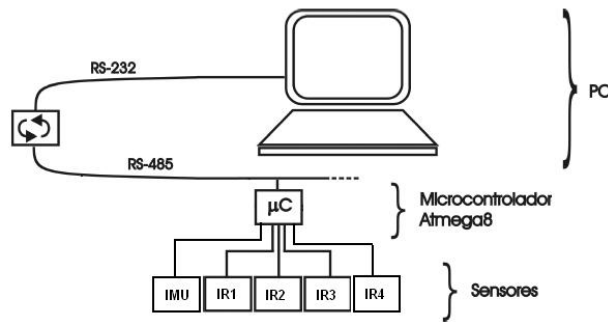


Figura 3.13: Diagrama de interface com o PC

3.6 O Protocolo de Comunicação

O protocolo de comunicação entre PC e dispositivos foi concebido levando em consideração a topologia da rede e a característica da aplicação. Para a aplicação em questão, foi acertado que o PC apenas faria requisições periódicas e os dispositivos responderiam apenas quando solicitados. Portanto, utilizar-se-ia um controle centralizado onde o PC fosse o mestre e todos os outros dispositivos fossem escravos. Adicionalmente, este protocolo não contemplaria nenhum algoritmo de detecção de colisão e nenhuma política de acesso ao meio.

Contudo, diante das dificuldades encontradas em se realizar uma rotina periódica no PC por causa da arquitetura da máquina utilizada, optou-se por uma simplificação do protocolo. Desta forma, o microcontrolador ficou responsável por executar uma tarefa periódica que era de obter os valores medidos pelos sensores infravermelhos e enviá-los ao PC, o qual seria responsável pelo processamento das informações. Portanto, o protocolo de transferência de dados tornou-se unidirecional, na medida em que o microcontrolador apenas envia mensagens para o PC e este apenas processa as informações contidas nas mensagens e exibe os resultados.

As mensagens trocadas neste protocolo são bastante simples e baseadas na utilização de datagramas. As mensagens enviadas pelo microcontrolador são formadas por caracteres ASCII. O início de cada mensagem é marcado pelo caracter '#' e o fim pelo caracter ';', de modo que as mensagens enviadas pelo microcontrolador têm a seguinte formatação:

$$\#variável = valor;$$

Futuramente, apesar da simplificação considerada para este caso, não torna-se tão complicado converter este protocolo para um padrão mestre-escravo, conforme suposto inicialmente.

3.7 O Software do Microcontrolador

Conforme mostrado na seção 2.2, o microcontrolador é responsável por várias funções, que neste caso, podem ser relacionadas com os seguintes processos: comunicação e medição.

As funções de comunicação se restringem a enviar mensagens para o computador. As funções

de medição englobam, praticamente, a conversão-digital da distância medida pelos sensores infravermelhos. Estes processos ocorrem de maneira concorrente no microcontrolador, pois ele deve sempre estar pronto para realizar a conversão analógico-digital e também tratar da comunicação. Portanto, periodicamente, o microcontrolador deve fazer a conversão analógico-digital das medições dos sensores infravermelhos e enviar mensagens para o computador.

A execução de uma rotina periódica no microcontrolador é feita utilizando uma interrupção que é acionada pelo estouro de um dos *timers* interno ao microcontrolador, neste caso foi usado o *timer0*. Este *timer*, trata-se de um contador de 8 bits, o qual gera uma interrupção toda vez que o seu valor de contagem ultrapassa o valor máximo. Para o caso em questão temos que o valor máximo de contagem é de 255. O *timer0* é configurado para gerar uma interrupção a cada 10ms.

O processo de comunicação conta com basicamente apenas uma rotina de transmissão de mensagens. Essa rotina realiza a transferência de um byte de cada vez pelo barramento. A rotina de transmissão esta ilustrada no diagrama da Figura 3.14.

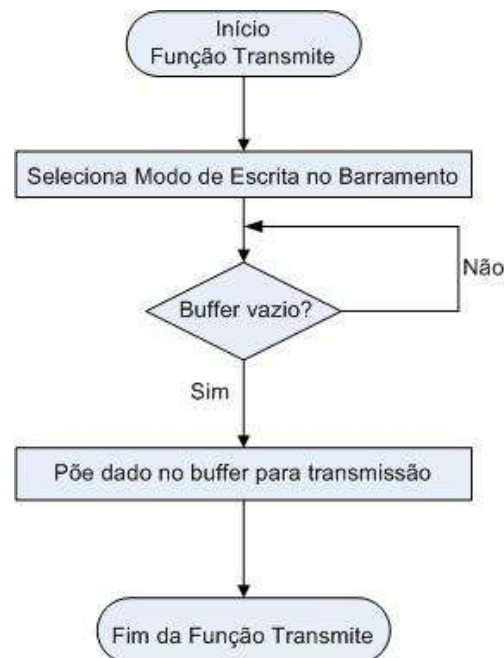


Figura 3.14: Diagrama de fluxo da rotina de transmissão

3.8 O Software do PC

O computador comunica-se com o barramento recebendo mensagens originadas no microcontrolador. Isto é feito por meio de uma rotina que está sempre pronta a escutar mensagens pelo barramento. Cada mensagem é recebida de caractere em caractere e para cada caractere recebido uma rotina de processamento identifica se é início, fim, variável ou valor da mensagem, conforme definido no datagrama utilizado. Isto é, existe uma rotina específica para separar a mensagem recebida nos campos definidos pelo datagrama e consequentemente processar as informações contidas nas mesmas.

Após separar a mensagem em seus campos constituintes, as informações são processadas, ou seja, os valores das medidas dos sensores infravermelhos são adquiridas e processadas de forma a obter uma medida de distância em centímetros de cada sensor. A rotina que calcula a distância medida para cada sensor implementa uma função polinomial obtida a partir da curva de calibração dos sensores.

A partir dos valores de distância obtidos dos sensores infravermelhos é possível por meio da utilização do modelo sensorial proposto calcular a postura do pé com relação ao solo. Com o intuito de facilitar a análise e apresentação, os dados de estimação de postura são salvos em um arquivo binário que pode ser lido pelo software Matlab[®].

Capítulo 4

Resultados Experimentais

4.1 Introdução

Para validar a arquitetura e o modelo sensorial utilizados foram realizados alguns experimentos. Com o objetivo de estimar a postura da prótese com relação ao solo foi fixada uma configuração básica: o pé manteve-se sempre paralelo ao plano do solo. Um detalhamento maior dos procedimentos utilizados durante o experimento encontra-se nas seções subsequentes.

4.2 Simulação no Matlab[®]

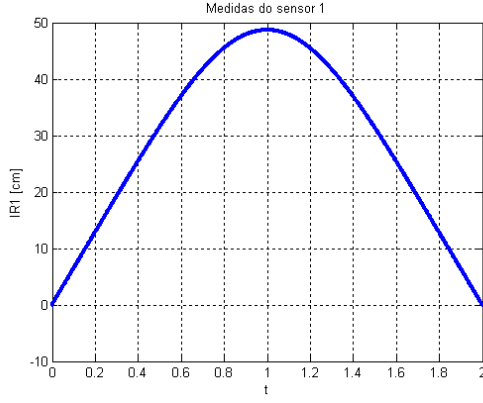
Utilizando-se o software Matlab[®], implementou-se uma simulação do movimento da prótese com relação a um sistema de coordenadas de referência. A movimentação do pé com relação ao solo foi gerada de maneira conveniente de modo que o pé pudesse descrever uma trajetória senoidal seguindo a matriz de transformação indicada na seção 3.1.

Durante a simulação, foram obtidas as medidas dos sensores infravermelhos. Essas medidas foram calculadas conforme demonstrado na subseção 2.1.3:

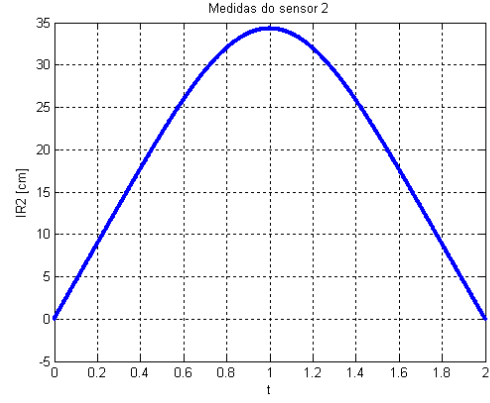
$$\lambda = \frac{-c - \begin{bmatrix} a & b & -1 \end{bmatrix} \mathbf{s}}{\begin{bmatrix} a & b & -1 \end{bmatrix} \mathbf{u}}$$

em que λ representa a medição de cada sensor, $\mathbf{s}$ indica as coordenadas dos sensores de acordo com o sistema de coordenadas fixado no pé e $\mathbf{u}$ o vetor unitário normal ao plano do pé. Adicionalmente, a , b e c são os parâmetros do plano do solo com relação ao sistema de coordenadas do pé. Estes parâmetros são obtidos considerando um conjunto de três pontos no plano do solo, cujas coordenadas estão relacionadas com o sistema de coordenadas fixado no pé. Associado a cada medição dos sensores infravermelhos foi adicionado um ruído, o qual foi modelado como sendo uma perturbação aleatória que segue uma distribuição normal com média zero e desvio padrão de 5mm. A Figura 4.1 mostra as medições feitas pelos sensores infravermelhos.

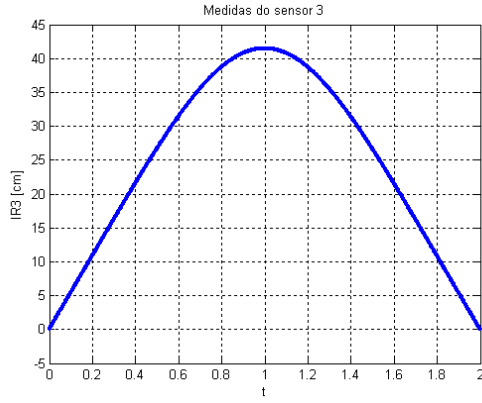
Considerando que a variação do deslocamento angular do pé foi feita de acordo com a submatriz



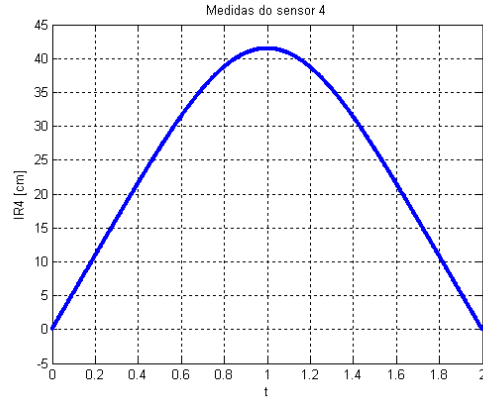
(a) Medidas do sensor 1



(b) Medidas do sensor 2



(c) Medidas do sensor 3



(d) Medidas do sensor 4

Figura 4.1: Medições dos sensores infravermelhos na simulação

de rotação $\mathbf{R}_0^3$ apresentada na seção 3.1 e que o ângulo γ dessa matriz é feito conforme:

$$\gamma = -0.6 \times \sin(\pi t/2) \text{ [rad]}$$

Tem-se que as medidas dos sensores estão bem coerentes. Por exemplo, para $t = 1$, tem-se γ igual a $34,37^\circ$. Uma característica que confirma a boa acuidade das medições realizadas com os sensores na simulação é o fato dos sensores 3 e 4 mostrarem, aproximadamente, sempre a mesma medida. Isso era esperado, visto que ambos os sensores ocupam as posições laterais ao pé e durante a simulação não há nenhum deslocamento angular em torno do eixo y do sistema de coordenadas do pé.

De acordo com as relações estabelecidas na seção 2.1, a partir das distâncias medidas pelos sensores infravermelhos pode-se calcular os parâmetros a , b e c do plano solo com relação ao sistema de coordenadas fixado no pé. Para se avaliar a qualidade no cálculo destes parâmetros, foi estabelecido um erro entre o valor real dos parâmetros e o valor obtido por meio das distâncias medidas pelos sensores infravermelhos. Este erro denominou-se ϵ , de forma que ϵ_a , ϵ_b e ϵ_c representam os erros cometidos no cálculo dos parâmetros a , b e c , respectivamente.

Os valores reais dos parâmetros do plano solo são obtidos considerando a representação de um conjunto de pontos no plano solo com relação ao sistema de coordenadas fixado no pé utilizando a

matriz de transformação mostrada na subseção 3.1. Dada a representação deste conjunto de pontos no sistema de coordenadas do pé pode-se encontrar os parâmetros do plano que melhor passa por esses pontos. Feito isso, mostram-se os dados dos erros cometidos no cálculo desses parâmetros, conforme ilustra a Figura 4.2.

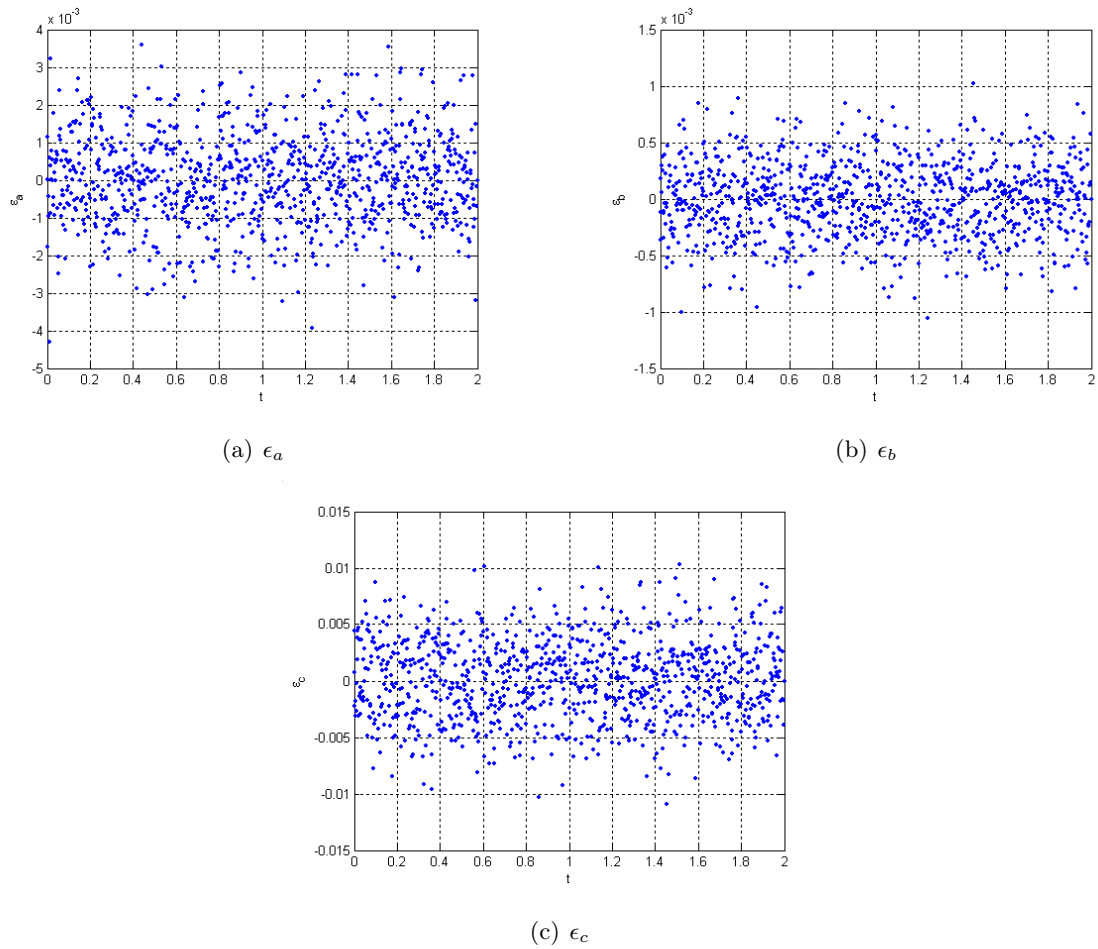


Figura 4.2: Erro cometido no cálculo dos parâmetros a , b e c do plano do solo com relação ao plano pé

Neste momento, faz-se uma breve análise estatística dos dados afim de se avaliar a qualidade na obtenção destes parâmetros. Mais especificamente, aborda-se uma análise baseada na média e desvio padrão do erro no cálculo dos parâmetros. Esses dados estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Médias e desvios padrão para ϵ_a , ϵ_b e ϵ_c

ϵ	Média	Desvio Padrão
ϵ_a	$-1,4786 \times 10^{-6}$	0.0012
ϵ_b	-9.5244×10^{-6}	3.2500×10^{-4}
ϵ_c	6.7216×10^{-5}	0.0035

Os dados apresentados na Tabela 4.1 estão muito satisfatórios, visto que as médias e desvios padrão para o erro de estimação dos parâmetros a , b e c estão bem próximos de zero, atribuindo

uma grande confiabilidade ao sistema.

Finalmente, os ângulos de atitude do pé com relação ao solo podem ser determinados sabendo-se os parâmetros do plano solo com relação ao sistema de coordenadas do pé, conforme visto na subseção 3.2.2. Da mesma forma como foi feito para os parâmetros do plano solo, admitiu-se um erro proveniente na estimação dos ângulos de atitude do pé. Determinou-se ϵ_x , ϵ_y e ϵ_z como sendo o erro de estimação dos ângulos de atitude do pé com relação aos eixos x, y e z do sistema de coordenadas do plano solo, respectivamente. Os ângulos de atitude reais são calculados com base nos parâmetros reais do plano solo com relação ao pé e os ângulos de atitude estimados são obtidos com base nos valores estimados dos parâmetros do plano solo. A diferença entre os ângulos reais e estimados está mostrada na Figura 4.3.

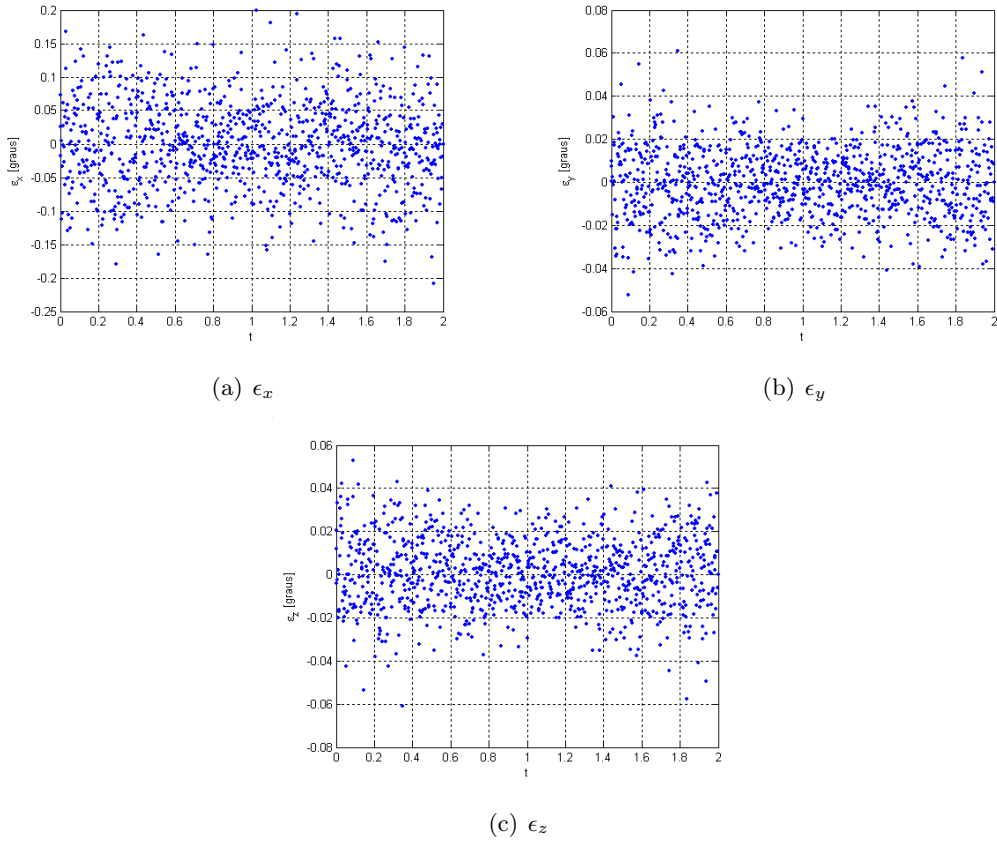


Figura 4.3: Erro cometido na estimação dos ângulos de atitude do pé

Computaram-se a média e desvio padrão dos dados apresentados na Figura 4.3 e na Tabela 4.2 esses valores estão apresentados.

Tabela 4.2: Médias e desvios padrão para o erro de estimação dos ângulos de atitude do pé

ϵ [graus]	Média	Desvio Padrão
ϵ_x	5.5392×10^{-5}	0.0630
ϵ_y	-8.7445×10^{-4}	0.0161
ϵ_z	0.0011	0.0162

Mais uma vez, os resultados obtidos com a simulação estão bem satisfatórios visto que o erro de estimação dos ângulos de atitude do pé são bem pequenos, chegando a serem desprezíveis. Portanto, por meio da simulação foi possível avaliar o modelo e a arquitetura propostos, chegando-se à conclusão que com os dados de distância do pé ao solo é possível estimar a postura do pé da prótese com relação ao solo, que neste caso traduziu-se nos ângulos que um vetor normal ao plano do pé faz com os eixos coordenados de um sistema de referência(solo).

4.3 Experimentos

Na prática, foi realizado um simples experimento para verificar a qualidade e confiabilidade das medições feitas pelos sensores infravermelhos e também analisar as limitações oferecidas por este tipo de sensor na estimação de postura do pé da prótese com relação ao solo. Neste experimento considerou-se uma configuração fixa para a prótese robótica: o pé manteve-se fixo e aparentemente paralelo ao solo, à uma altura de aproximadamente 22cm.

Considerando o pé na posição descrita logo acima, realizou-se algumas medidas dos sensores infravermelhos e esses resultados estão mostrados na Figura 4.4.

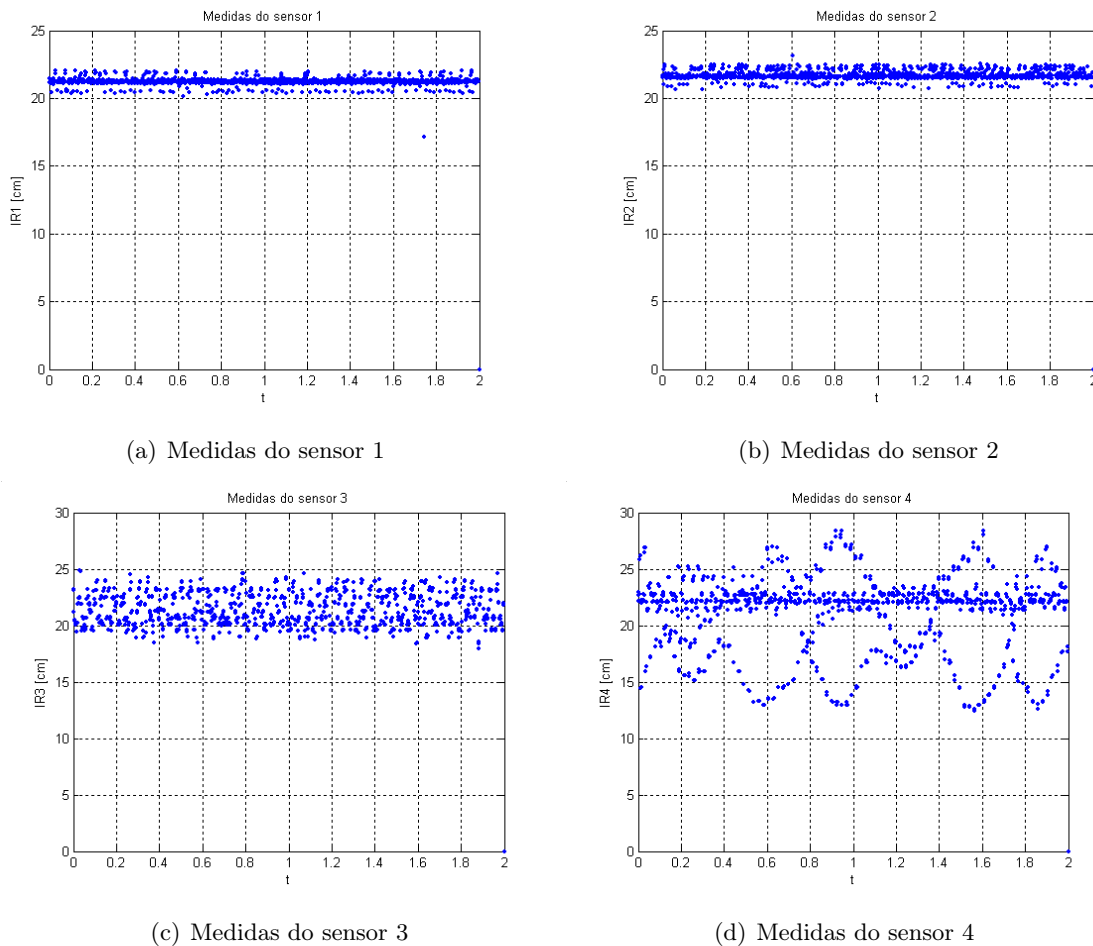


Figura 4.4: Medições dos sensores infravermelhos obtidos experimentalmente

Realizou-se uma análise estatística dos dados da Figura 4.4 e esses resultados estão mostrados

na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Médias e desvios padrão as medidas de cada sensor

Medidas [cm]	Média	Desvio Padrão
Sensor 1	21.1856	0.7403
Sensor 2	21.6930	0.7711
Sensor 3	21.3445	1.5785
Sensor 4	21.1248	3.2526

Nota-se que os dois primeiros sensores são bastante confiáveis, visto que a média dos valores obtidos tem um viés próximo do valor real (lembre-se que o pé encontra-se à aproximadamente 22 centímetros do solo). Outro fator positivo para esses dois sensores é o desvio padrão encontrado. De acordo com o valor observado, nenhum dos dois sensores apresentou uma dispersão em torno da média maior do que 1cm.

Contudo o mesmo não se verifica para os sensores 3 e 4. Apesar da média dessas medidas mostrarem um valor bastante razoável, existe uma dispersão significativa em torno dessa média. O sensor 3 apresenta um desvio padrão aproximadamente 2,3 vezes maior quando comparado com o desvio padrão dos sensores 1 e 2. A situação piora um pouco quando analisamos o sensor 4. Novamente, apesar da média das medições para este sensor apresentar-se bastante razoável, a dispersão dos valores em torno da média é aproximadamente 4,5 vezes maior quando comparada com o valor obtido para os sensores 1 e 2.

Com as medidas dos sensores infravermelhos obtidas experimentalmente, pode-se calcular os parâmetros do plano solo da mesma forma como foi feita na simulação. Os dados sobre os parâmetros a , b e c do plano do solo estão mostrados na Figura 4.5.

A média e desvio padrão para os dados da Figura 4.5 estão mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Médias e desvios padrão para os parâmetros a , b e c do plano solo

	Média	Desvio Padrão
Parâmetro a	-0.0366	0.5698
Parâmetro b	0.0242	0.0221
Parâmetro c	-21.5182	1.1289

Considerando que o plano do pé está, aparentemente, paralelo ao solo, foi demonstrado na seção 2.1 que os parâmetros a e b deste plano são iguais a zero e o parâmetro c igual a uma constante relacionada com a altura do plano pé com relação ao solo. Neste sentido pode-se dizer que os dados dos parâmetros do plano solo com relação ao pé estão razoavelmente coerentes, conforme mostrado na Tabela 4.4.

Dado os parâmetros do plano solo com relação ao plano pé, pode-se calcular os ângulos de atitude do pé com relação a um sistema de coordenadas de referência(solo), conforme foi feito na

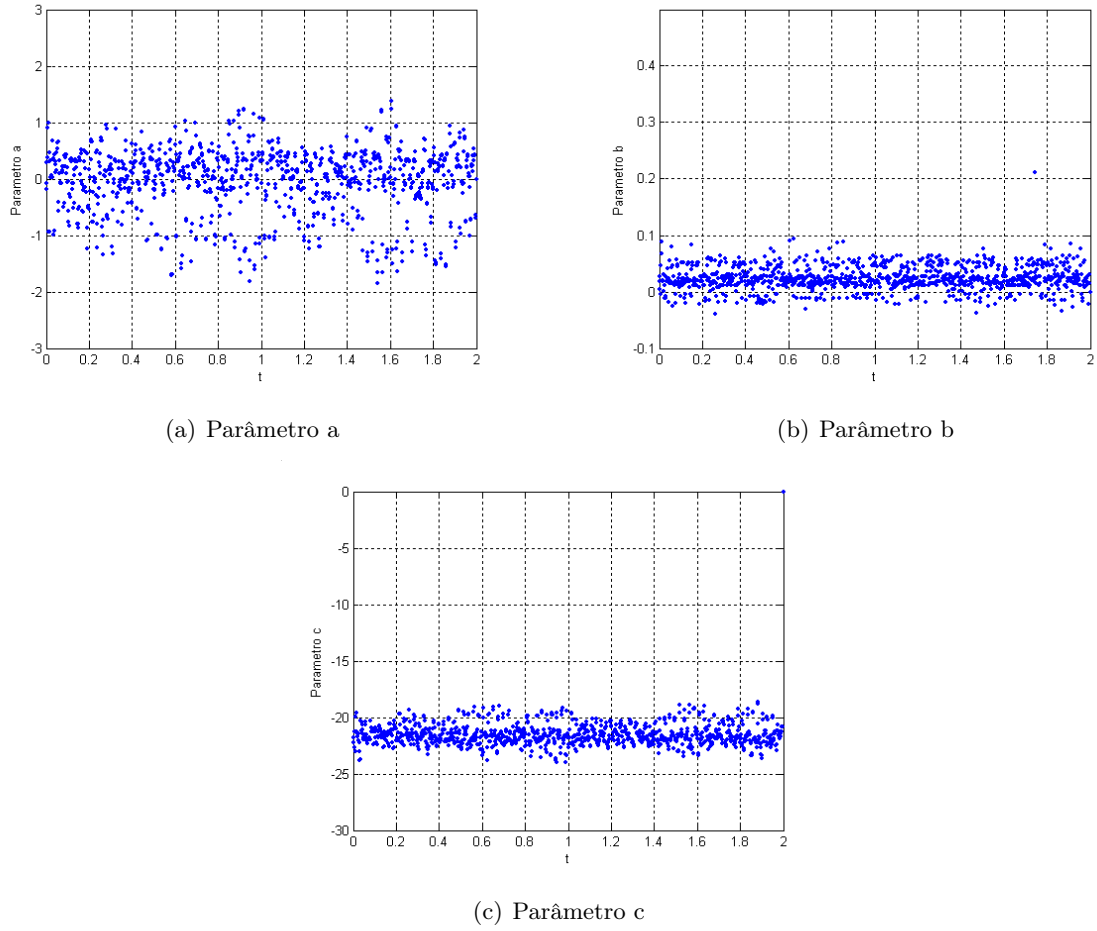


Figura 4.5: Parâmetros a , b e c do plano solo com relação ao plano pé

Tabela 4.5: Médias e desvios padrão para os ângulos de atitude do pé com relação ao plano solo

Ângulo [graus]	Média	Desvio Padrão
α_x	89.5760	25.9501
α_y	91.2420	1.1447
α_z	21.1532	15.1303

simulação e demonstrado na subseção 3.2.2. A Figura 4.6 mostra os valores dos ângulos calculados.

Finalmente, a Tabela 4.5 mostra as médias e desvios padrão para os ângulos de atitude do pé, obtidos experimentalmente.

A partir do experimento realizado, os ângulos esperados seriam $\alpha_x = \alpha_y = 90^\circ$ e $\alpha_z = 0^\circ$. Neste sentido, observa-se que o ângulo de atitude do pé com relação ao eixo Y do sistema de coordenadas de referência(solo) mostrou-se bastante razoável, visto que a média dos valores obtidos experimentalmente foi condizente com o esperado. Além disso, a dispersão desses valores em torno da média é bem pequena, o que garante uma boa confiabilidade para este caso.

Contudo, não é isso que percebe-se ao analisar os outros dois ângulos. A pior estimativa fica por conta do ângulo de atitude do pé com relação ao eixo Z do sistema de referência(solo). A

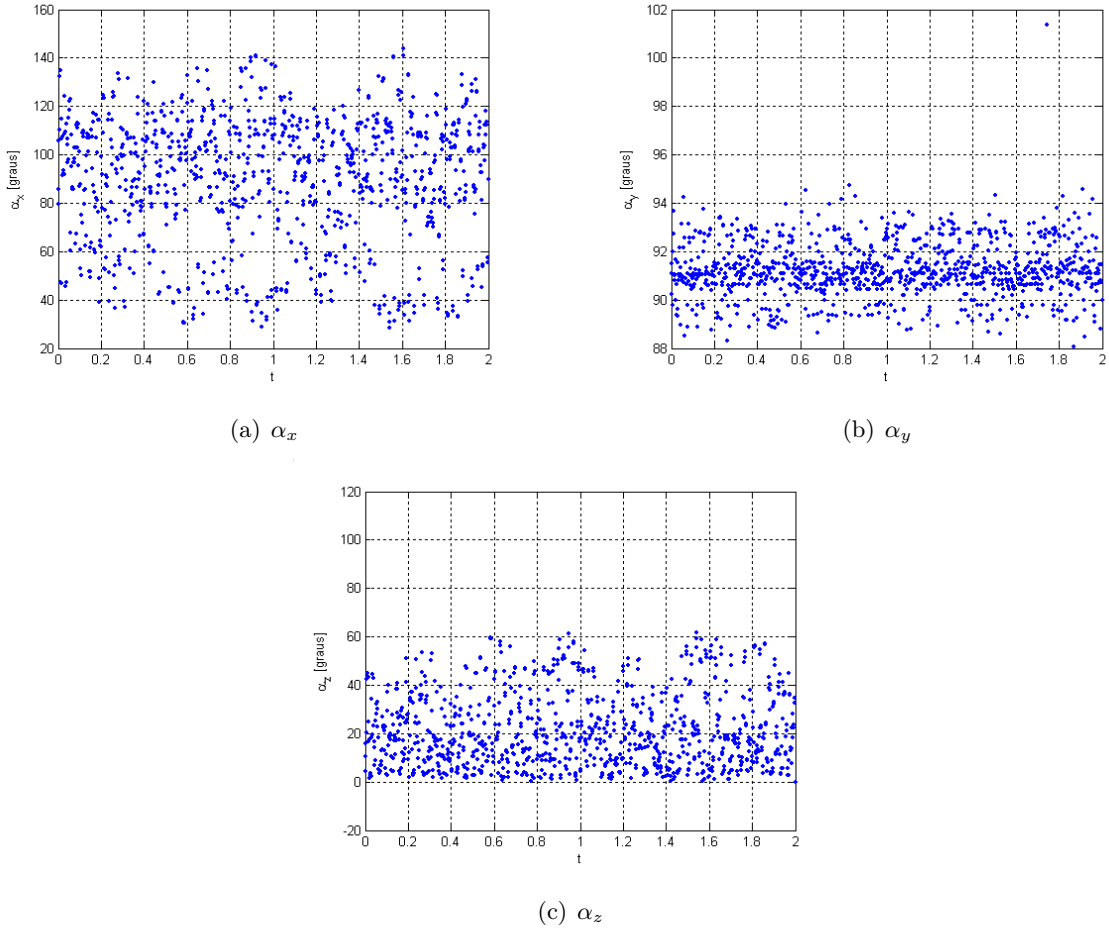


Figura 4.6: Ângulos de atitude do pé com relação ao sistema de coordenadas fixado no solo

explicação para este caso pode ser encontrada no fato de que os sensores 3 e 4 não mostraram resultados razoavelmente confiáveis. O sensor 4, principalmente, apresenta uma grande variação nas medidas realizadas quando comparada com os outros sensores. Portanto, uma propagação de erros, devido à instabilidade dessas medidas, pode ter gerado essa grande discrepância no valor estimado para este ângulo.

A estimativa do ângulo de atitude do pé com relação ao eixo X do sistema de referência(solo), também não se mostrou muito confiável. Novamente, a média dos valores estimados encontra-se próxima do valor real, contudo existe uma enorme variação em torno deste valor. Este fato reforça a influência que a instabilidade das medições dos sensores exerce sobre o resultado final de estimação de postura do pé, principalmente quando consideramos o sensor 4.

Capítulo 5

Conclusões

Este trabalho de graduação apresentou uma proposta de um módulo sensorial para estimação de postura de uma prótese de perna robótica baseado em sensores infravermelhos. O modelo apresentado baseou-se em conceitos de geometria analítica e na distância do pé ao solo fornecida pelos sensores utilizados. Além disso, iniciou-se o desenvolvimento de uma central inercial baseada nos sensores acelerômetro e giroscópio. Esta unidade inercial não foi avaliada experimentalmente, contudo será incorporada em trabalhos futuros.

A simulação desenvolvida durante o andamento do projeto foi bastante útil no que diz respeito à compreensão do modelo proposto e na validação dos dados obtidos experimentalmente. Por meio da simulação, foi possível fazer uma primeira análise da eficiência do modelo.

A estimação de postura baseada apenas nos sensores infravermelhos mostrou-se um pouco insatisfatória. A estimação dos ângulos de atitude do pé considerando apenas a distância entre os planos do pé e do solo apresentou-se um tanto insuficiente devido às variações existentes com relação à confiabilidade dos sensores. Pelos resultados experimentais, percebeu-se que alguns sensores estão mais susceptíveis às variações em suas medidas, como foi o caso do sensor 4.

Na verdade a consideração de apenas um tipo de sensor para estimação de postura da prótese não é suficiente para se obter um resultado satisfatório. A incorporação de outros tipos de sensores na arquitetura desenvolvida se faz necessário, na medida em que pode-se realizar uma abordagem de filtros estocásticos para fazer uma fusão multisensorial e melhorar bastante a estimação dos dados de postura da prótese com relação ao solo. Neste contexto utilizar-se-ia a central inercial desenvolvida como mais um elemento sensorial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LJUNG, L. *System Identification - Theory for the User*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1999.
- [2] SHILING, R. J. *Fundamentals of Robotics: Analysis and Control*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1990.

ANEXOS

I. DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS

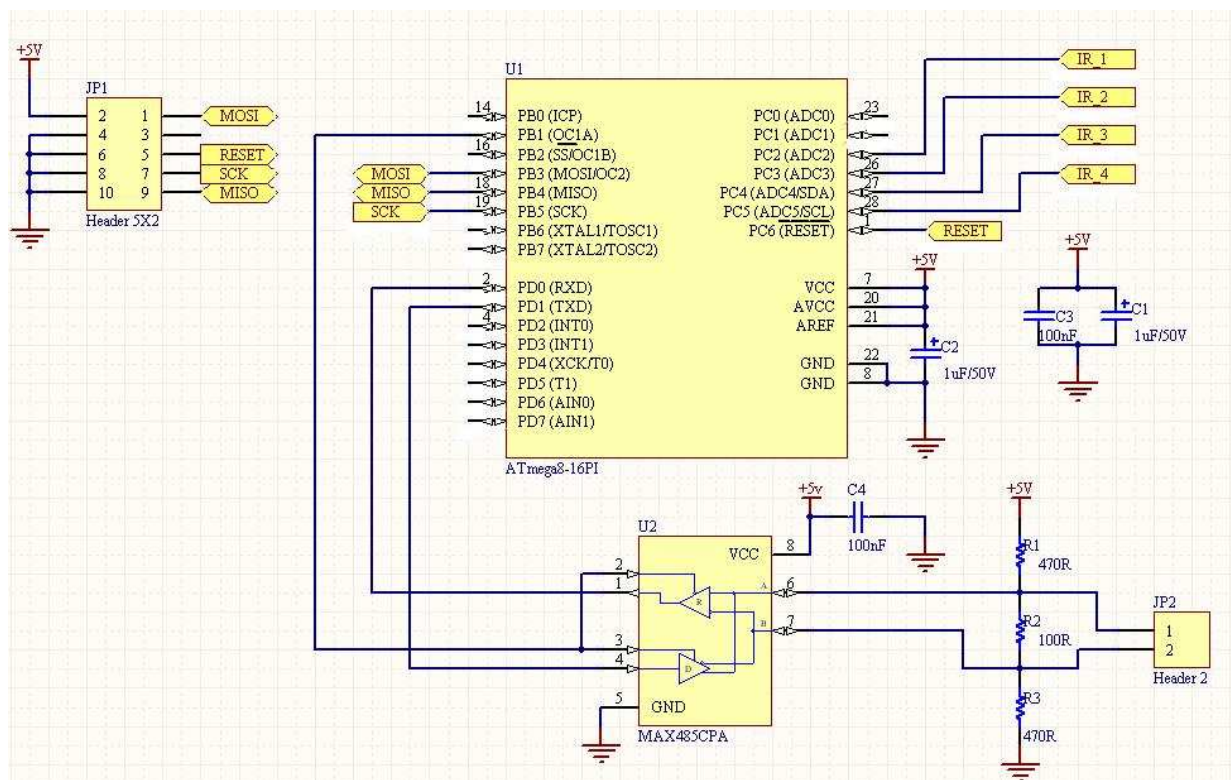


Figura I.1: Diagrama esquemático do circuito de aquisição dos dados dos sensores

II. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD

O CD disponibilizado em anexo a este trabalho apresenta os softwares presentes tanto no micro-controlador quanto na plataforma PC. Adicionalmente, estão disponibilizadas as figuras utilizadas neste manuscrito, bem como os scripts Matlab utilizados na simulação.

- /avr/ - código utilizado na aquisição dos dados de saída dos sensores infravermelhos, bem como envio dos mesmos para a plataforma PC.
- /pc/ - código utilizado na plataforma PC para processamento dos dados dos sensores e cálculo de postura do pé com relação ao solo.
- /figs/ - figuras utilizadas na elaboração deste trabalho e outras figuras da prótese.
- /matlab/ - scripts matlab utilizados na simulação e calibração dos sensores.