

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**CONTROLE DE ORIENTAÇÃO DO PÉ
DE UMA PRÓTESE ROBÓTICA PARA
AMPUTADOS ACIMA DO JOELHO**

Davi Anders Brasil

Brasília, julho de 2008

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

CONTROLE DE ORIENTAÇÃO DO PÉ
DE UMA PRÓTESE ROBÓTICA PARA
AMPUTADOS ACIMA DO JOELHO

Davi Anders Brasil

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

Banca Examinadora

Prof. Geovany Araújo Borges, ENE/UnB
Orientador

Prof. João Yoshiyuki Ishihara, ENE/UnB
Examinador interno

Glauco Garcia Scandaroli, Engenheiro
Examinador interno

Dedicatória

À minha mãe, que dedicou sua vida aos filhos; ao meu pai, que sempre me deu todo o seu carinho; e a todos que tornaram possível mais esta realização minha.

Davi Anders Brasil

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por tudo que Ele fez em minha vida e não foi pouco. Não posso deixar de citar meus pais, que me deram uma educação íntegra e digna, e o professor Geovany, que confiou a mim este trabalho disponibilizando-se a esclarecer dúvidas, questionamentos e sugestões.

E, por último, e não menos importante, agradeço aos técnicos dos laboratórios que muito me ensinaram nessa jornada, assim como a todos os amigos que comigo compartilharam desta caminhada.

Davi Anders Brasil

RESUMO

No contexto de um projeto de prótese para amputados acima do joelho, em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Elétrica da UnB, esse trabalho propõe um sistema de controle independente à ação do usuário da prótese no qual se estima a orientação do pé em relação ao solo a partir de sensores infravermelhos localizados nas extremidades do pé. Esse sistema foi inicialmente concebido com o objetivo de manter a orientação do pé sempre paralela ao chão, não importando a mudança de inclinação ou a movimentação do joelho. Para tanto, dois motores de corrente contínua são controlados por controladores PI, motores esses associados a dois graus de liberdade do tornozelo. Um microcontrolador AT91SAM7 recebe dados de sensores infravermelhos, girômetros e potenciômetros, e gera o sinal necessário para o acionamento dos motores determinando a orientação em dois eixos (plantiflexão/dorsiflexão) e eversão/inversão) e mantendo o pé paralelo ao solo. Todo o sistema é monitorado com as informações sendo enviadas via protocolo RS-232 e apresentadas na tela de um microcomputador pelo programa MATLAB em tempo real. O controle PI da posição dos motores apresentou resultados satisfatórios para um projeto inicial, no que diz respeito a seguir a referência de orientação do solo para movimentações diversas.

ABSTRACT

In the context of a project of prosthesis for leg amputees above the knee, that is being developed at the Department of Electrical Engineering, University of Brasília, the present work proposes a control system which is independent of the prosthesis costumer. In this model, the orientation of the artificial foot in relation to the ground is achieved by infrared sensors placed in the foot borders. This system was initially conceived with the purpose of keeping the foot's orientation always parallel to the ground, independent of the change in inclination or of the knee's movements. In order to achieve this goal, two direct current motors, associated to two degrees of freedom of the ankle, are controlled by PI controllers. A AT91SAM7 microcontroller receives the information data from the infrared sensors, girometers and potentiometers. Then it generates the necessary signal to start the motors and to determine the orientation of the foot in two axis (plantar flexion/dorsiflexion and eversion/inversion) thus keeping the prosthetic foot parallel to the ground. The whole system is monitored with the information transmitted through a RS-232 protocol and displayed, at real time, in a PC screen/monitor employing the program MATLAB. The PI control of the motors position gave satisfactory results for an initial project, concerning the compliance of the system to follow the reference of the ground's orientation to several movements.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	3
1.3	OBJETIVOS DO PROJETO	5
1.4	APRESENTAÇÃO DO MANUSCRITO	5
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1	FUNDAMENTOS DE GEOMETRIA ANALÍTICA	7
2.1.1	EQUAÇÃO GERAL DO PLANO	7
2.1.2	VETOR NORMAL AO PLANO	8
2.1.3	PARALELISMO DE DOIS PLANOS	9
2.1.4	TRANSFORMAÇÕES LINEARES NO PLANO	9
2.2	MODELAMENTO DE MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA (CC)	11
2.2.1	ACIONAMENTO PELA CORRENTE DE ARMADURA	12
2.2.2	CONTROLE PI DA POSIÇÃO ANGULAR DO EIXO DE UM MOTOR	13
2.3	BANDA MORTA DE UM MOTOR E A AÇÃO DA GRAVIDADE	14
2.4	IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS - MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS	15
2.5	CONTROLE PID	16
3	DESENVOLVIMENTO PARA O CONTROLE DO PÉ DA PRÓTESE	17
3.1	INTRODUÇÃO	17
3.2	MODELO GEOMÉTRICO	17
3.3	MEDIÇÃO DOS ÂNGULOS DO PÉ	19
3.4	ADAPTAÇÃO DOS MOTORES E ACIONAMENTO	20
3.5	CORRENTE NOS MOTORES	21
3.6	VELOCIDADE ANGULAR	21
3.7	SENSORES INFRAVERMELHOS	22
3.8	PLACA DOS SENSORES DE MOVIMENTO	24
3.9	INTERFACE DE MEDIÇÃO, CONTROLE E ACIONAMENTO	25
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	29
4.1	INTRODUÇÃO	29
4.2	DETERMINAÇÃO DA BANDA MORTA E DO EFEITO DA GRAVIDADE SOBRE OS MOTORES	30

4.3	MODELOS DOS MOTORES CC	32
4.4	CONTROLE PI DA POSIÇÃO DOS MOTORES	34
4.5	EXPERIMENTOS	36
5	CONCLUSÕES	41
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
	ANEXOS.....	45
I	DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS	46
II	SISTEMA SUPERVISÓRIO	50
III	DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD	52

LISTA DE FIGURAS

1.1	Versões da prótese	1
1.2	Arquiteturas de instrumentação e controle anteriores	2
1.3	Prótese robótica.....	3
1.4	Movimentos do pé	4
1.5	Arquitetura de instrumentação e controle da prótese	4
2.1	Definição de um plano (fonte: [1]).....	8
2.2	Vetor normal a um plano (fonte: [1])	8
2.3	Planos paralelos (fonte: [1])	9
2.4	Rotação nos eixos X, Y e Z	10
2.5	Planos paralelos transladados	11
2.6	Circuito equivalente de um motor CC (fonte: [2])	12
2.7	Banda morta de um motor sem carga (fonte: [3]).....	14
3.1	Postura do pé em relação ao solo.....	18
3.2	Ângulos medidos nos potenciômetros.....	19
3.3	Medição dos ângulos do plano do pé	19
3.4	Motores da junta do pé	20
3.5	Placa de acionamento.....	21
3.6	Ação do acionamento do motor	21
3.7	Sensor de medição de corrente (fonte: [4])	22
3.8	Girometro usado na IMU	22
3.9	Sensor Infravermelho.....	23
3.10	Placa de aquisição de dados com proteção dos sensores	24
3.11	Circuito de proteção de sensores.....	24
3.12	Placa de controle e transmissão de dados	25
3.13	Circuitos do multiplexador	26
3.14	Circuito RS-232 da Olimex.....	26
3.15	Conector JTag da Olimex	27
3.16	Diagrama da interface entre acionamento, aquisição e controle.....	28
4.1	Dispositivos conectados ao microcontrolador	29
4.2	Características Motor Eversão/Inversão	30
4.3	Características Motor Plantiflexão/Dorsiflexão	31
4.4	Dados experimentais para identificação dos modelos dos motores	34

4.5	Diagrama de blocos do controle utilizado no sistema.....	35
4.6	Sistema em malha fechada	35
4.7	Experimento de movimentação no eixo de plantiflexão/dorsiflexão.....	37
4.8	Experimento de movimentação no eixo de eversão/inversão.....	38
4.9	Experimento de movimentação no eixo de plantiflexão/dorsiflexão dando ênfase a velocidade e a distância	40
4.10	Experimentação do movimento de eversão/inversão dando ênfase a velocidade e a distância	40
I.1	Placa de sensores inerciais e opticos	47
I.2	Placa de controle e transmissão de dados	48
I.3	Circuitos de acionamento do motor (fonte: [5]).....	49
II.1	Sistema supervisorio de dados pelo Simulink	51

LISTA DE TABELAS

4.1	Termos do polinômio das funções de compensação da gravidade.....	33
4.2	Parametros dos sistemas de primeira ordem dos motores	34
4.3	Parâmetros dos controladores	35
4.4	Ajuste nos ganhos dos sistemas	36
4.5	Parâmetros dos controladores ajustados	36

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

k	amostra	
t	tempo	[s]
g	aceleracao da gravidade	[m/s ²]
i	corrente	[A]
R	resistência elétrica	[Ω]
L	indutância	[H]
J	momento de inércia no eixo do motor	[kg.m ²]
B	coeficiente de atrito estático	[N.m/rad/s]
V	tensão elétrica	[V]
\mathbf{n}	vetor normal a um plano	
G	função de transferência	

Símbolos Gregos

α	representação de um plano qualquer	
Ξ	plano do solo no modelo geométrico para a orientação do pé	
τ	constante de tempo de um sistema	[s]
ω	velocidade angular	[rad/s]
θ	posição Angular	[rad]
θ_1	ângulo de rotação em relação eixo X	[rad]
θ_2	ângulo de rotação em relação eixo Y	[rad]
θ_3	ângulo de rotação em relação eixo Z	[rad]
ϕ	fluxo magnético	[Wb]

Subscritos

<i>f</i>	campo
<i>a</i>	armadura
<i>m</i>	motor
<i>L</i>	carregamento
<i>p</i>	proporcional
<i>i</i>	integral
<i>d</i>	derivativo
<i>max</i>	máximo

Sobrescritos

*	referência
---	------------

Siglas

A/D	Analógico - Digital
ARM	<i>Advanced RISC Machine</i>
CC	Corrente Contínua
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CTS	<i>Clear To Send</i>
D/A	Digital - Analógico
GND	<i>Ground</i>
GPDS	Grupo de Processamento Digital de Sinais
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
LARA	Laboratório de Robótica e Automação
PC	<i>Personal Computer</i>
PI	Proporcional e Integral
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PWM	<i>Pulse With Modulation</i>
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RTS	<i>Request To Send</i>
RX	<i>Receive Data</i>
TX	<i>Transmit Data</i>
USART	<i>Universal Synchronous and Asynchronous Serial Receiver and Transmitter</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

Uma das frentes de pesquisa do Laboratório de Robótica e Automação (LARA) e do Grupo de Processamento Digital de Sinais (GPDS), vinculados ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília, é a robótica de reabilitação. O trabalho com próteses robóticas vem sendo desenvolvido, desde 2005, envolvendo diversos alunos que têm dado, cada um com sua parte, contribuições para o projeto de uma prótese final. No início, a prótese tinha uma estrutura mecânica semelhante à atual, porém não compatível com o formato comercial. Várias peças foram sendo desenvolvidas até se chegar a uma estrutura bem semelhante a de uma perna biológica com suas diversas movimentações [6] como pode ser visto na Fig. 1.1(a), porém parte da estrutura foi trocada e modificada [8] para compatibilizar com um modelo comercial doado pela empresa *Ottobock*, Fig. 1.1(b).

A parte de controle se desenvolvia para um controle descentralizado com a utilização de mi-

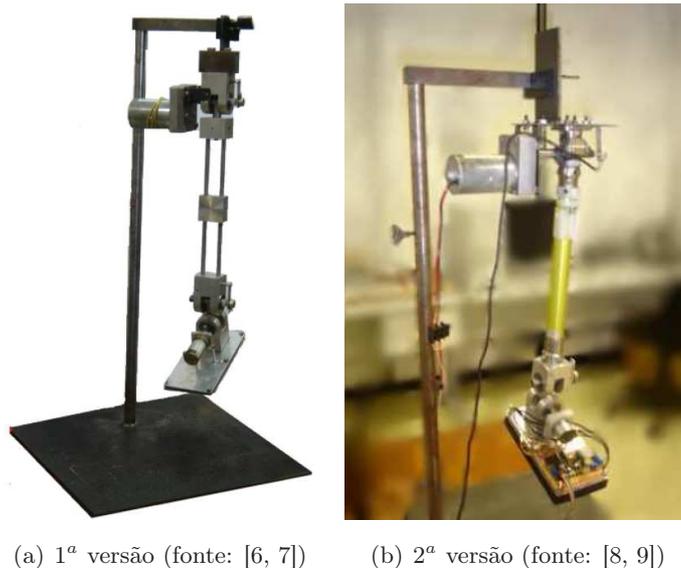
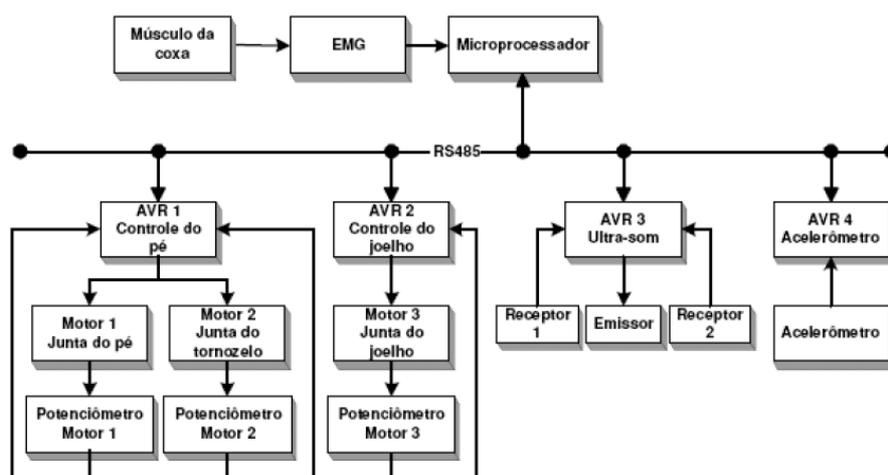


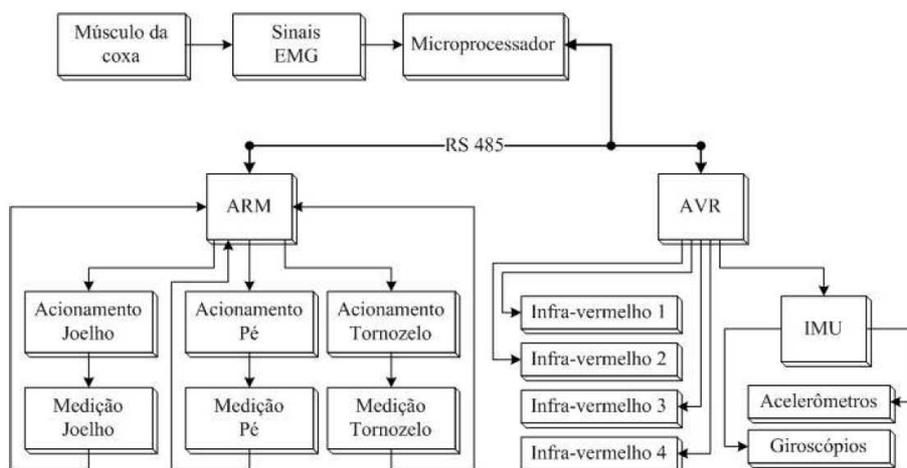
Figura 1.1: Versões da prótese

crocontroladores AVR, comunicando entre si por meio de um microcontrolador central, dedicados cada um individualmente ao controle do pé, ao controle do joelho, à medição de distâncias com o uso de sensores ultra-som e à medição com acelerômetros do movimento central [6, 7], Fig. 1.2(a). Esse sistema foi modificado trazendo toda a parte de controle para um único microcontrolador de arquitetura ARM7 com 32 bits e de aquisição sensorial concentrada em um AVR, Fig. 1.2(b); para tanto, novos circuitos de acionamento e aquisição sensorial tiveram de ser desenvolvidos [8, 9]. Foram escolhidos novos sensores para se adequar à nova realidade do projeto e ao desenvolvimento da tecnologia de mercado. Sensores infravermelhos foram adotados como instrumentos para a nova medição de distâncias relacionadas à posição do pé e girômetros para medir a movimentação angular do pé [9].

A partir desse contexto, surgiu a necessidade de um controle da orientação da posição do pé, da montagem dos motores na estrutura e de seus circuitos de acionamento, do modelamento dos motores utilizados e de um sistema supervisor das variáveis do sistema.



(a) 1ª versão (fonte: [6, 7])



(b) 2ª versão (fonte: [8, 9])

Figura 1.2: Arquiteturas de instrumentação e controle anteriores

1.2 Definição do problema

A prótese mostrada na Fig. 1.3 representa uma perna direita de uma pessoa e corresponde a todo o conjunto de processamento e transmissão de informações capaz de movimentá-la em conjunto de forma simultânea. A sola do pé em si possui sensores infravermelhos em suas extremidades, como será mostrado mais à frente, que permitem realizar medições de distância. Esses sensores devem ser usados para estimar a orientação relativa entre o plano do pé e o plano do solo. Procura-se fazer com que a orientação do plano siga a orientação do solo que se encontra abaixo dele. A orientação de um plano pode ser alterada com duas movimentações de giro com representação em coordenadas em um espaço tridimensional. Dois motores correspondem a uma configuração apropriada para a movimentação desse plano que caracteriza o pé e seus eixos de mobilidade.

Os movimentos característicos dos eixos em que os motores passaram a atuar são denominados eversão/inversão e plantiflexão/dorsiflexão. A eversão é definida como o giro da borda lateral do pé em direção à parte lateral da perna; já a inversão é tomada como o movimento oposto da eversão. A plantiflexão consiste em abaixar o pé procurando alinhá-lo com a perna, elevando o calcanhar do chão; a dorsiflexão é o movimento oposto. Esses movimentos são mostrados nas Fig. 1.4(a) e (b) retiradas de <http://www.hu.ufsc.br/~grumad/anatomia.htm> para melhor compreensão. A velocidade angular e orientação do pé, a partir das medidas dos sensores infravermelhos, foram determinadas em uma placa de aquisição de dados que armazena e retransmite as informações ao microcontrolador.

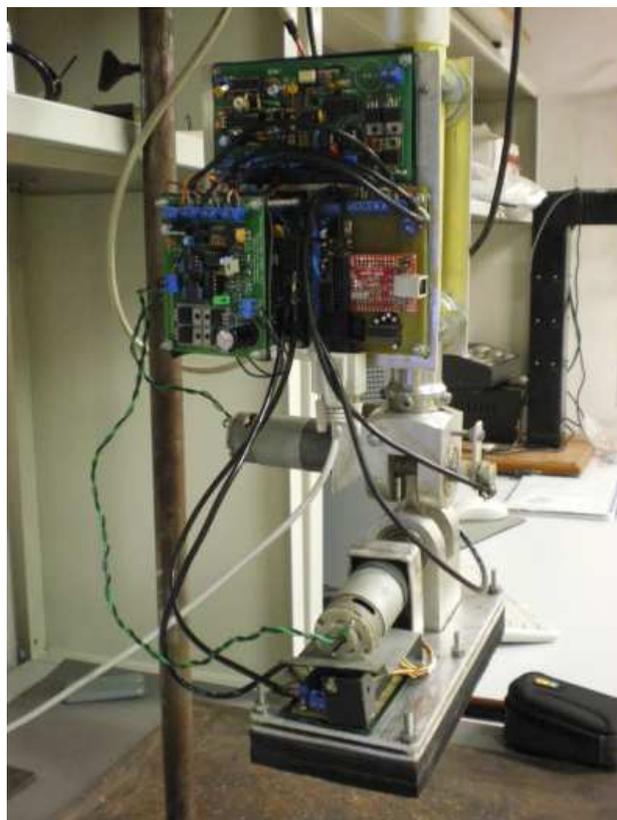


Figura 1.3: Prótese robótica

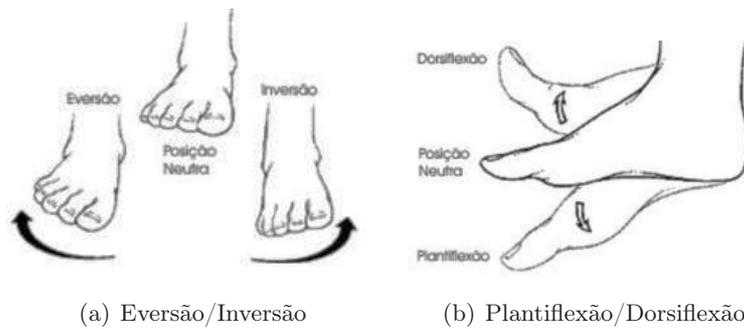


Figura 1.4: Movimentos do pé

O microcontrolador foi programado para analisar todas as informações e calcula o acionamento necessário transformado em sinal de modulação por largura de pulso (PWM) para atuar nas placas de acionamento dos motores. Estas trataram de transformar o sinal de PWM em tensões direcionadas que fazem os motores girarem em sentido horário ou anti-horário para o ajuste de orientação do pé.

Os dados recebidos pelo microcontrolador são retransmitidos ao PC via comunicação serial RS232 e monitorados pelo software MATLAB. Todo o esquemático da arquitetura está demonstrado na Fig. 1.5, ela mostra a nova proposta de arquitetura para este projeto. A aquisição das respostas dos sensores, o controle de posição e o acionamento dos motores concentraram-se em apenas um microcontrolador ARM7 comunicando com o sistema supervisor das variáveis no PC. A parte de aquisição dos sinais eletromiográficos (EMG) não foi o enfoque do trabalho, portanto esta parte até a comunicação via RS-485 não foi desenvolvida.

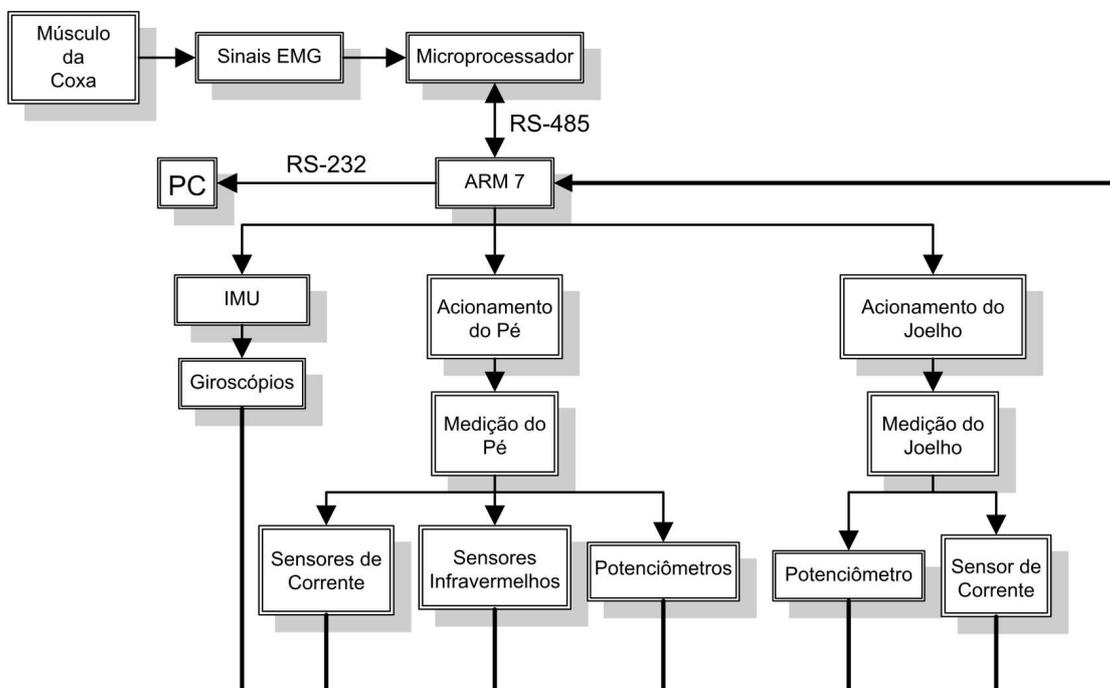


Figura 1.5: Arquitetura de instrumentação e controle da prótese

1.3 Objetivos do projeto

O principal objetivo do projeto é fazer com que o pé siga a orientação do solo, para tanto algumas tarefas tiveram de ser feitas:

- Montar motores na estrutura
- Desenvolver uma nova placa para os sensores de movimento
- Desenvolver a placa de controle
- Montar placas de acionamento
- Modelamento do sistema
- Desenvolver controle de posição dos eixos

Complementando os objetivos principais, o desenvolvimento de um sistema supervisorio precisou ser realizado em etapas:

- Comunicação serial
- Interface no MATLAB
- Visualização em tempo real

Primeiramente, os motores são montados na estrutura do pé com os devidos suportes para fixação e movimentação dos eixos relacionados aos movimentos do pé. Em seguida, a placa dos sensores de movimento é reconstruída para se adequar a nova arquitetura proposta. As informações são mandadas por meio de cabos ligados para a placa de controle, construída para hospedar o microcontrolador e transmitir dados que são processados para a atuação no sistema.

Nesta parte, o desenvolvimento do sistema supervisorio faz-se presente pela necessidade de uma interface de visualização e armazenamento de dados. Para tanto, estabeleceu-se a comunicação serial entre microcontrolador e PC, seguido da construção da interface no Simulink do MATLAB. Os dados são armazenados e visualizados em graficos montados em tempo real a partir da recepção deles. Com a construção deste sistema supervisorio, os dados da atuação nos motores são agrupados possibilitando a modelagem do sistema a ser controlado. A resposta do sistema de orientação, descrito em função da entrada, pode ser controlado afim de reorientar os eixos de movimentação do pé na posição desejada. O paralelismo entre a superfície do pé e o solo é então atingido.

1.4 Apresentação do manuscrito

Uma explicação de toda a parte de fundamentação teórica é feita no capítulo 2. No capítulo 3, é mostrado o modelo pratico do sistema analisado neste trabalho seguindo pela descrição dos sensores utilizados, suas formas de aplicação, a montagem em circuitos, a interação com o microcontrolador, programação e comunicação. Na sequência do capítulo 4, os experimentos realizados são descritos

seguido de resultados e análises. As conclusões do trabalho são apresentadas no capítulo 5 assim como sugestões para trabalhos futuros. O anexo I mostra os circuitos das placas projetadas no trabalho e o circuito de acionamento dos motores. O anexo II apresenta o projeto no MATLAB da monitoração via PC dos dados. Por fim, o anexo III descreve o conteúdo do CD anexado ao trabalho.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Fundamentos de Geometria Analítica

A descrição do movimento de um objeto é de suma importância para o entendimento das possíveis reações que ele pode ter em decorrência de uma reação externa. Várias formas geométricas existem e muitas vezes se torna difícil definir uma forma geral para a qual uma base teórica será fundamentada. Para facilitar no entendimento e também no modelamento, são adotadas formas geométricas simples como superfícies planas, vetores, retas e pontos; para melhor compreensão e servem de base para a aplicação em outros tipos de formas mais complexas sem perdas nas fundamentações.

2.1.1 Equação geral do plano

Sejam três pontos não colineares P_1 , P_2 e P_3 . Em um sistema de coordenadas tridimensional, formam um plano α sendo a posição de cada ponto pode ser dada por:

$$P_1 = (x_1, y_1, z_1)$$

$$P_2 = (x_2, y_2, z_2)$$

$$P_3 = (x_3, y_3, z_3)$$

Dado um ponto genérico $P = (x, y, z)$, este será pertencente ao plano se, e somente se, os vetores $(P - P_1)$, $(P_2 - P_1)$ e $(P_3 - P_1)$, não nulos e não paralelos, forem coplanares (Fig. 2.1); para tanto, as imagens geométricas devem ser paralelas ao mesmo plano α . Isso acontecerá se um dos vetores for combinação linear dos outros dois [1] como descrito na equação:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.1)$$

A resolução do determinante gera a equação do plano:

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (2.2)$$

em que a, b, c e d são constantes.

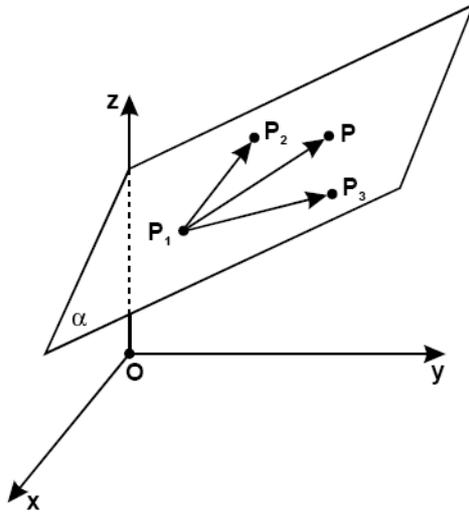


Figura 2.1: Definição de um plano (fonte: [1])

2.1.2 Vetor normal ao plano

Todo plano possui vetores normais a ele característicos que descrevem sua orientação por serem perpendiculares ao plano. Dado um plano α , um ponto $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$ e um ponto $P = (x, y, z)$ do plano e um vetor $\mathbf{n} = a \vec{\mathbf{i}} + b \vec{\mathbf{j}} + c \vec{\mathbf{k}}$ não necessariamente unitário, o vetor \mathbf{n} será normal ao plano, Fig. 2.2, se

$$(P - P_0) \cdot \mathbf{n} = 0 \tag{2.3}$$

$$a(x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0) = 0 \tag{2.4}$$

que corresponde exatamente à Eq.(2.2) do plano; portanto, os coeficientes a , b e c do plano determinam as coordenadas de um vetor normal a esse plano [1]. Esse vetor não é necessariamente unitário. Para transformá-lo em unitário basta dividir seus termos pelo módulo do vetor, o mesmo pode ser feito na equação do plano para todos os termos sem prejuízo nas características do plano.

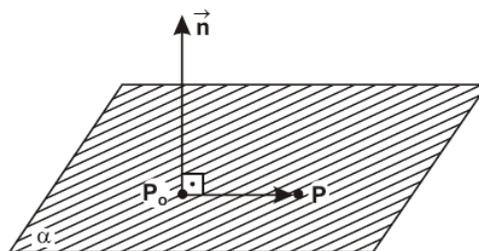


Figura 2.2: Vetor normal a um plano (fonte: [1])

2.1.3 Paralelismo de dois planos

O principal objetivo desse projeto é manter o plano da sola do pé paralelo à superfície que se encontra embaixo dele. Para tanto, devemos considerar algumas relações. Dados os planos

$$\alpha_1 : a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0$$

$$\alpha_2 : a_2x + b_2y + c_2z + d_2 = 0$$

e seus vetores normais

$$\mathbf{n}_1 = a_1 \vec{\mathbf{i}} + b_1 \vec{\mathbf{j}} + c_1 \vec{\mathbf{k}}$$
$$\mathbf{n}_2 = a_2 \vec{\mathbf{i}} + b_2 \vec{\mathbf{j}} + c_2 \vec{\mathbf{k}}$$

para que eles sejam paralelos, as suas variáveis correspondentes (a, b e c) devem ter a mesma propagação, ou seja:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{b_1}{b_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (2.5)$$

Portanto, se esta condição é satisfeita, os planos são paralelos entre si (Fig. 2.3). Em um caso particular, quando os planos α_1 e α_2 são coincidentes, temos que um plano tem uma expressão igual à do outro multiplicada por uma constante [1], chegando à igualdade das razões de fatores dos planos:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{b_1}{b_2} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{d_1}{d_2} \quad (2.6)$$

2.1.4 Transformações lineares no plano

Quando nos referimos a transformações lineares de um plano, estamos falando em movimentações de rotação e translação desse plano em um referencial de coordenadas tridimensional estático. No caso desse experimento, movimentações afim de obter o paralelismo de dois planos.

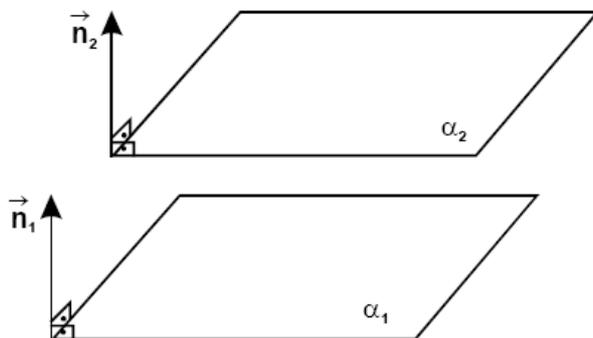


Figura 2.3: Planos paralelos (fonte: [1])

2.1.4.1 Rotação

A rotação, Fig. 2.4, de um plano afeta a orientação do vetor normal do plano. O novo vetor normal pode ser calculado como uma transformação do anterior pela multiplicação por uma matriz transformação com o vetor normal original transposto. As matrizes transformação de rotação [10] são:

$$\mathbf{M}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ 0 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \mathbf{M}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \mathbf{M}_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Dado um vetor normal inicial $\mathbf{n}_0 = a \vec{\mathbf{i}} + b \vec{\mathbf{j}} + c \vec{\mathbf{k}}$, após a rotação, os novos coeficientes do vetor normal $\mathbf{n}_r = a' \vec{\mathbf{i}} + b' \vec{\mathbf{j}} + c' \vec{\mathbf{k}}$ serão:

$$\begin{bmatrix} a' \\ b' \\ c' \end{bmatrix} = \mathbf{M}_x \mathbf{M}_y \mathbf{M}_z \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

2.1.4.2 Translação

Sejam dois planos paralelos

$$\alpha_1 : ax + by + d_1 = 0$$

$$\alpha_2 : ax + by + d_2 = 0$$

sabe-se que o vetor normal a estes planos será

$$\mathbf{n}_1 = a \vec{\mathbf{i}} + b \vec{\mathbf{j}} + 0 \vec{\mathbf{k}}$$

Para encontrar a distância entre estes planos, considere dois pontos quaisquer, um pertencente ao plano α_1 e outro pertencente a α_2 . Por exemplo, os pontos $P_1 = -d_1/a$ e $P_2 = -d_2/a$ da Fig. 2.5. A distância entre os planos pode ser encontrada como sendo o módulo de um vetor que toca os dois planos em suas extremidades e tem mesma orientação do vetor normal. O módulo do vetor pode ser calculado pela multiplicação do vetor formado pelos pontos P_1 e P_2 com o vetor normal

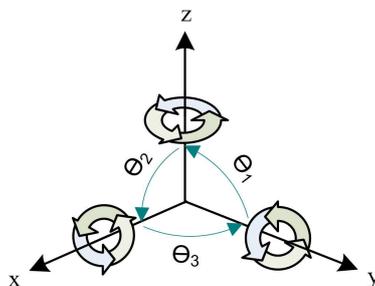


Figura 2.4: Rotação nos eixos X, Y e Z

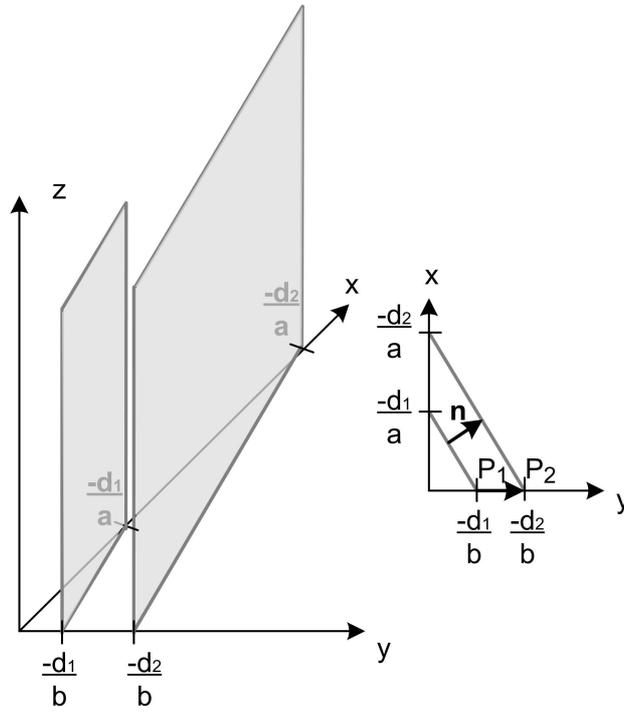


Figura 2.5: Planos paralelos transladados

unitário dos planos. Esta multiplicação é exatamente a projeção do vetor $(P_2 - P_1)$ no eixo virtual que tem orientação do vetor normal aos planos. O cálculo da distância pode ser representado pela fórmula:

$$l = \frac{|(P_2 - P_1) \cdot \mathbf{n}|}{|\mathbf{n}|} \quad (2.10)$$

Pode-se ver pela Fig. 2.5 que a translação necessária para que o plano α_1 , paralelo ao plano α_2 , vá para a posição α_2 é um incremento do coeficiente d_1 de $d_2 - d_1$ movimentando o plano uma distância l descrita acima.

2.2 Modelamento de Motores de Corrente Contínua (CC)

Continuando a idéia de movimentação do pé, motores são necessários para a transmissão de um torque capaz de gerar movimentação em um eixo. Devido à grande variedade de tamanhos, potência e disponibilidade no mercado; os motores de corrente contínua são ideais para o tipo de aplicação desejada. A Fig. 2.6 mostra o modelo físico desse tipo de motor em que V_f é a tensão no enrolamento de campo, i_f é a corrente no enrolamento de campo, R_f a resistência do enrolamento de campo, L_f a indutância do enrolamento de campo, B o coeficiente de atrito estático, J o momento de inércia no eixo do motor, θ o ângulo de movimentação do eixo do motor, V_a a tensão na armadura, V_b a tensão contra eletro-motriz, i_a a corrente na armadura, R_a a resistência e L_a a indutância da armadura.

Os motores de corrente contínua podem ter como fonte uma tensão aplicada sobre o campo (V_f) ou sobre a armadura (V_a) o que determina na função de transferência característica do motor [11].

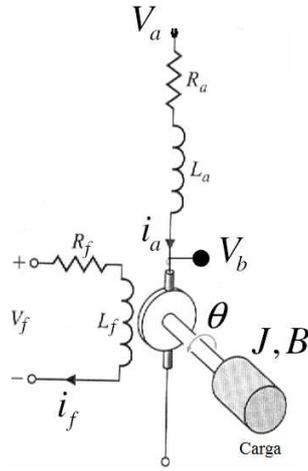


Figura 2.6: Circuito equivalente de um motor CC (fonte: [2])

Para que um fluxo magnético ϕ esteja atuante sobre o motor de modo que este possa movimentar, pode-se ter um ímã permanente ou uma corrente passando pela bobina de campo:

$$\phi = K_f i_f \quad (2.11)$$

em que i_f é a corrente que passa na bobina de campo e K_f é uma constante. O torque desenvolvido pelo motor é diretamente proporcional a ϕ e a corrente de armadura:

$$T_m = K_1 \phi i_a(t) = K_1 K_f i_f i_a(t) \quad (2.12)$$

em que K_1 é uma constante. A partir desse ponto existem duas formas de trabalho do motor CC. Uma é o acionamento pela corrente de campo e outra o acionamento pela corrente de armadura. No caso desse trabalho, faz-se uso de motores com campo gerado por ímã permanente.

2.2.1 Acionamento pela corrente de armadura

Nesta situação, $i_f(t)$ é constante ou existe um ímã permanente em que o fluxo magnético ϕ é constante, sendo assim a equação (2.12) do torque elétrico se reduz a:

$$T_m(s) = K_m I_a(s) \quad (2.13)$$

sendo I_a a corrente que passa na armadura e K_m é definida como constante do motor. A corrente de armadura pode ser relacionada como:

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - V_b(s)}{(R_a + L_a s)} \quad (2.14)$$

Como a velocidade do motor é diretamente proporcional à tensão sobre o motor:

$$V_b(s) = K_b \omega(s) \quad (2.15)$$

então a corrente que passa pela armadura é definida como:

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - K_b \omega(s)}{(R_a + L_a s)} \quad (2.16)$$

Desconsiderando perturbações no motor (em sistemas com pequenas perturbações magnéticas), temos que o torque no carregamento é igual ao torque do motor:

$$T_L(s) = T_m(s) \quad (2.17)$$

O torque no carregamento para mover a inércia do motor é:

$$T_L(s) = Js^2\theta(s) + Bs\theta(s) \quad (2.18)$$

em que B é um coeficiente de atrito estático no mancal do motor e J o momento de inércia no eixo do motor. Resolvendo as equações (2.13), (2.16), (2.17) e (2.18), chegamos a função de transferência:

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_m}{s[(R_a + L_a s)(Js + B) + K_b K_m]} \quad (2.19)$$

A constante de tempo de armadura $\tau_a = L_a/R_a$, quando comparada a constante de tempo de armadura/mecânica $\tau_1 = R_a J/(R_a B + K_b K_m)$, normalmente é desprezada pois $\tau_a \ll \tau_1$ transformando a equação (2.19) em:

$$\begin{aligned} G(s) = \frac{\theta(s)}{V_a(s)} &= \frac{[K_m/(R_a B + K_b K_m)]}{s(\tau_1 s + 1)} \\ &= \frac{K_1}{s(\tau_1 s + 1)} \end{aligned} \quad (2.20)$$

em que $K_1 = [K_m/(R_a B + K_b K_m)]$.

2.2.2 Controle PI da posição angular do eixo de um motor

Um controlador PI pode ser definido pela seguinte função:

$$C(s) = \frac{K_i}{s} + K_p = \frac{K_i + K_p s}{s} \quad (2.21)$$

em que K_i é o ganho da ação integral e K_p é o ganho da ação proporcional.

Quando o controlador é inserido na malha da planta, o sistema passa a seguir uma referência relativa a saída desejada. Utilizando um controlador PI, Eq.(2.21), para uma planta com função de transferência como a descrita pela Eq.(2.20), é possível emular uma função de transferência que responda sem erro de regime permanente e rapidamente. O sistema passa a ter uma planta descrita da seguinte forma:

$$C(s)G(s) = \frac{K_i + K_p s}{s} \cdot \frac{K_1}{\tau_1 s + 1} \quad (2.22)$$

Escolhendo valores de forma que K_p/K_i seja igual a τ_1 , a planta será descrita como segue na Eq.(2.23).

$$C(s)G(s) = \frac{K_i K_1}{s} \quad (2.23)$$

Em malha fechada, a função de transferência passa a ser:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\frac{K_i K_1}{s}}{\frac{K_i K_1}{s} + 1} = \frac{1}{s + \frac{1}{K_i K_1}} \quad (2.24)$$

em que $Y(s)$ é a saída do sistema e $R(s)$ é a referência a ser seguida. Se K_i for igual a $\frac{1}{K_1}$, o sistema passa a responder com a seguinte função de transferência em malha fechada:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{1}{s + 1} \quad (2.25)$$

Com essa configuração, o erro estacionário é igual a zero o que é desejável para o modelo de orientação de um pé. Por isso, controladores PI são suficientes para o controle de posição dos eixos dos motores CC devido à característica de resposta dos motores como um sistema de primeira ordem.

2.3 Banda morta de um motor e a ação da gravidade

Ao tentar arrastar um objeto que esteja parado em um piso rugoso, podemos reparar que enquanto não é alcançada uma certa força, o objeto não se movimenta. Existe uma força de atrito estático contrária à força exercida no objeto que a anula e faz com que o objeto permaneça parado. A força de atrito possui um valor máximo que corresponde ao valor que devemos aplicar para que o objeto fique na iminência de se mover. Da mesma maneira, nos motores com escovas, existe uma fricção entre as escovas e a armadura contrapondo a força magnética que rotaciona o motor, assim o motor só se movimentará quando a força magnética superar o atrito existente, Fig. 2.7. Se o motor possui redução, a força de atrito soma-se à inércia do motor aumentando a banda morta consideravelmente.

Quando o motor se mantém em movimento, o atrito se torna dinâmico e o motor passa a apresentar amortecimento e outros efeitos enquanto aumenta-se a tensão sobre o motor. Porém quando se reduz lentamente a tensão, como demonstrado na Fig. 2.7 na linha tracejada, a velocidade será segurada em um valor maior que o de aumento de tensão pelo que o atrito dinâmico é menor que o estático e o motor só irá parar quando a força magnética for menor que a força de atrito dinâmico que logo em seguida a parada tornará a ser atrito estático.

Para um motor com uma carga, além da banda morta, existe a gravidade agindo sobre o centro

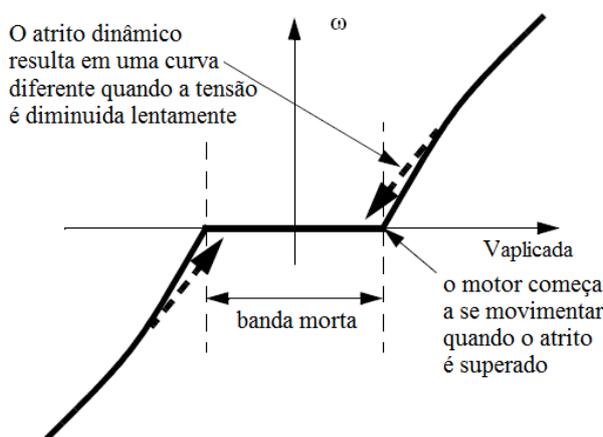


Figura 2.7: Banda morta de um motor sem carga (fonte: [3])

de massa do corpo. Essa força da gravidade acaba por gerar um torque crescente que se contrapõe ao movimento e soma-se ao atrito quando o centro de massa se desloca do centro do eixo para um outro ponto pelo movimento do motor. Isso pode gerar pequenas zonas mortas ao longo do acionamento que devem ser compensadas afim de não prejudicar a ação de controle para o modelo linear, caso contrário, o modelo ficará prejudicado e de difícil controle dadas as não linearidades do sistema. As zonas mortas correspondem a pequenas bandas mortas parecidas com as descritas anteriormente em que uma variação na tensão de entrada não tem efeito no movimento do motor caracterizadas pelas mesmas forças de atrito estático e dinâmico somadas à força da gravidade se contrapondo ao torque do motor.

2.4 Identificação de parâmetros - Método dos mínimos quadrados

Podemos representar modelos lineares de sistemas dinâmicos em tempo discreto da seguinte forma:

$$\begin{aligned} y(k) &= \varphi_1(k)\lambda_1 + \varphi_2(k)\lambda_2 + \dots + \varphi_n(k)\lambda_n \\ &= \varphi^T(k)\lambda \end{aligned} \quad (2.26)$$

sendo λ o vetor que contém os parâmetros do sistema e $\varphi(k)$ o vetor composto de entradas e saídas passadas do sistema.

Coletando os dados de saída e entrada em pares $Z = \{(y(k), \varphi), k = 1, 2, \dots, N\}$ procuramos os parâmetros $\hat{\lambda}$ que minimizem a função de custo[12]:

$$V(\lambda, N) = \sum_{k=1}^N (y(k) - \varphi^T(k)\lambda)^2 \quad (2.27)$$

sendo assim:

$$\hat{\lambda} = \operatorname{argmin}_{\lambda} V(\lambda, N) \quad (2.28)$$

Fazendo uso das notações:

$$\mathbf{Y}^T = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \dots & y(N) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} \varphi^T(1) \\ \varphi^T(2) \\ \vdots \\ \varphi^T(N) \end{bmatrix}$$

A Eq.(2.27) pode ser reescrita como sendo

$$\begin{aligned} V(\hat{\lambda}, N) &= (\mathbf{Y} - \mathbf{\Phi}\hat{\lambda})^T(\mathbf{Y} - \mathbf{\Phi}\hat{\lambda}) \\ &= \mathbf{Y}^T\mathbf{Y} - \mathbf{Y}^T\mathbf{\Phi}\hat{\lambda} - \hat{\lambda}^T\mathbf{\Phi}^T\mathbf{Y} + \hat{\lambda}^T\mathbf{\Phi}^T\mathbf{\Phi}\hat{\lambda} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Completando os quadrados da equação (2.31):

$$\begin{aligned}
V(\hat{\lambda}, N) &= \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} - \mathbf{Y}^T \Phi \hat{\lambda} - \hat{\lambda}^T \Phi^T \mathbf{Y} + \hat{\lambda}^T \Phi^T \Phi \hat{\lambda} \\
&\quad + \mathbf{Y}^T \Phi (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{Y} - \mathbf{Y}^T \Phi (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{Y} \\
&= \mathbf{Y}^T (I - \Phi (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T) \mathbf{Y} \\
&\quad + (\hat{\lambda} - (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{Y})^T \Phi^T \Phi (\hat{\lambda} - (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{Y})
\end{aligned} \tag{2.32}$$

O mínimo da função de custo é dado pela equação abaixo já que o primeiro termo da equação (2.32) é independente de λ .

$$\hat{\lambda} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{Y} \tag{2.33}$$

$$= \left(\sum_{k=1}^N \varphi(k) \varphi^T(k) \right)^{-1} \cdot \left(\sum_{k=1}^N \varphi(k) y(k) \right) \tag{2.34}$$

2.5 Controle PID

Quando se fala nessa questão o que se busca é um sistema que siga uma referência de forma mais próxima possível a ela dependendo dos recursos de atuação no sistema e o tipo de controle adotado. Sistemas simples de até segunda ordem podem ser controlados por uma combinação de ação proporcional, integral e/ou derivativa [13]. Essas ações em tempo contínuo são constituídas da seguinte forma:

$$u_p(t) = K_p \cdot e(t) \tag{2.35}$$

$$u_i(t) = K_i \int_0^t e(\eta) d\eta \tag{2.36}$$

$$u_d(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \tag{2.37}$$

sendo K_p o ganho proporcional, K_i o ganho integral, K_d o ganho derivativo e $e(t)$ o erro instantâneo. A aproximação dessas equações de controle pelo método de Euler para equações algébricas que podem ser implementadas digitalmente são estas:

$$u_p(k) = K_p \cdot e(k) \tag{2.38}$$

$$u_i(k) = u_i(k-1) + K_i \cdot T \cdot e(k) \tag{2.39}$$

$$u_d(k) = \frac{K_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \tag{2.40}$$

em que T é o período de amostragem do sistema, $e(k)$ o erro na amostragem atual e $e(k-1)$ o erro na amostragem anterior. Então, a ação PID na entrada do sistema é dada por:

$$u(t) = u_p(k) + u_i(k) + u_d(k) \tag{2.41}$$

Capítulo 3

Desenvolvimento para o Controle do Pé da Prótese

3.1 Introdução

A partir do desenvolvimento dos projetos anteriores, foram propostas uma série de adaptações para a implantação do controle da junta do pé. Todo o controle do sistema e a aquisição de dados foram concentrados em um único controlador de arquitetura ARM7 com 32 bits de forma que as informações de posicionamento, giro e orientação tanto do pé quanto do joelho estivessem mais próximos. A finalidade dessa decisão foi prever uma movimentação relativa das duas juntas identificada de forma mais precisa pela concentração dos dados e do controle, evitando perdas de transmissão.

A parte de movimentação e aquisição de dados da junta do joelho não foi enfoque deste trabalho, portanto, foi mantida em seu estado original [8]. O trabalho foi concentrado na adaptação de novos motores para a junta do pé, montagem das placas de acionamento dos motores, montagem do suporte para placas de acionamento, aquisição dos dados dos sensores pelo ARM7, controle dos motores, comunicação e análise de dados em tempo real.

3.2 Modelo Geométrico

Com base na fundamentação de geometria analítica desenvolvida na Seção 2.1, foi desenvolvido um modelo geométrico representado pela Fig. 3.1(a). Existem dois planos representados na figura, o plano do pé Π e o plano do solo Ξ de forma que os sensores representados pelos pontos I_1 , I_2 , I_3 e I_4 tem suas projeções representadas no plano Ξ nos pontos M_1 , M_2 , M_3 e M_4 respectivamente.

A distância entre os sensores e suas projeções determinam a orientação do plano do pé com relação ao solo. Para que os planos se tornem paralelos, deve-se movimentar o plano Π de acordo com as matrizes apresentadas em (2.7) afim de igualar os vetores que ligam os pontos no plano do

pé às projeções no solo:

$$\begin{aligned}(I_1 - M_1) &= (I_3 - M_3) \\ (I_2 - M_2) &= (I_4 - M_4)\end{aligned}\tag{3.1}$$

Quando essas igualdades são obedecidas, a relação dada pela Eq.(2.5) torna-se verdadeira, os planos tornam-se paralelos e os vetores normais possuem uma mesma orientação. O ângulo entre os planos em relação a um eixo pode ser tomado a partir das seguintes relações tirada da Fig. 3.1(b):

$$h_1 = l_1 \cdot \cos \theta\tag{3.2}$$

$$h_2 = l_2 \cdot \cos \theta\tag{3.3}$$

$$h_1 - h_2 = d \cdot (-\sin \theta)\tag{3.4}$$

em que l_1 e l_2 são as distâncias dos sensores partindo perpendicularmente do plano Π , h_1 e h_2 são as distâncias dos sensores chegando perpendicularmente ao plano Ξ , e d é a distância entre os sensores.

Resolvendo (3.2) e (3.3) em (3.4) temos:

$$\theta = \arctan((l_2 - l_1)/d)\tag{3.5}$$

Aplicando esta equação para o modelo segundo a Seção 2.1.4.1, generalizamos:

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \arctan\left(\frac{(|(I_3 - M_3)| - |(I_1 - M_1)|)}{|(I_3 - I_1)|}\right) \\ \theta_2 &= \arctan\left(\frac{(|(I_4 - M_4)| - |(I_2 - M_2)|)}{|(I_4 - I_2)|}\right)\end{aligned}\tag{3.6}$$

ou seja, o ângulo necessário a ser rotacionado em cada eixo está diretamente relacionado à medida das distâncias de um plano a outro neste modelo geométrico e a distância entre os sensores. Para o eixo z de ângulo θ_3 , não existe movimentação no eixo devido a inexistência de um motor nesse eixo e a não alteração do plano com a rotação neste eixo.

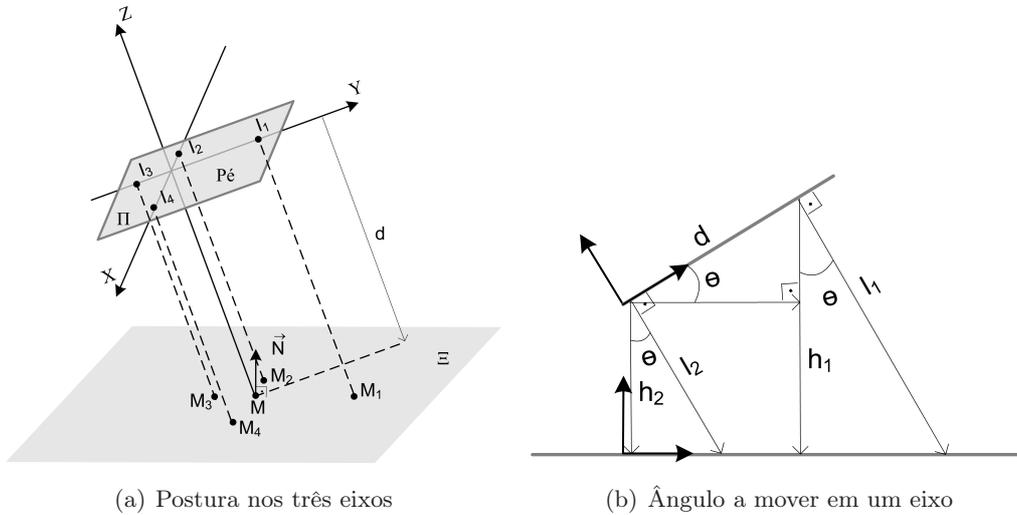


Figura 3.1: Postura do pé em relação ao solo

3.3 Medição dos ângulos do pé

O ângulo da sola do pé com relação à perna é medido utilizando dois potenciômetros, Fig. 3.3), de $1K\Omega$ fixos aos eixos de movimentação no tornozelo. Os potenciômetros foram alimentados com 5V e uma tensão proporcional ao ângulo em que o eixo se encontra momentaneamente é obtida no terminal de resistência variável. Esse tipo de sensoriamento tem uma resposta estável para uma certa angulação e a equação que a rege é:

$$V_{pot} = V_{max} \cdot \frac{\theta_{pot}}{180^\circ} \quad (3.7)$$

sabendo que V_{max} determina a tensão obtida para o ângulo máximo de posicionamento do potenciômetro que é 180° , a função depende apenas da posição angular do eixo em que este potenciômetro se encontra. Os potenciômetros foram montados de forma que quando o plano do pé se encontra perpendicular ao chão, para ambos os eixos, a tensão no terminal do potenciômetro fosse aproximadamente 0V, Fig. 3.2(a) e (c). Com isso, o ângulo nos potenciômetros para qualquer posição, Fig. 3.2(b) e (d), é igual à tensão no potenciômetro na posição qualquer multiplicada por 180° e dividida pelo valor da própria tensão no ângulo de 180° . Foi definido que o ângulo zero seria quando os planos do pé e do chão estivessem paralelos, para tanto foi subtraído do ângulo em cada posição o valor de 90° .

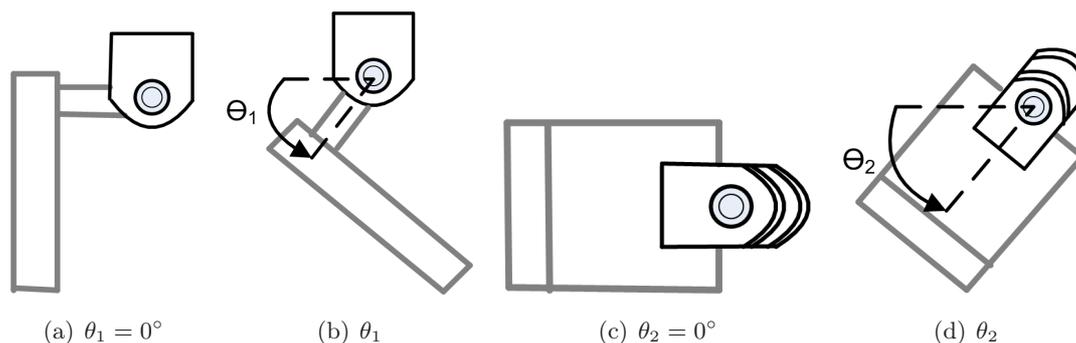
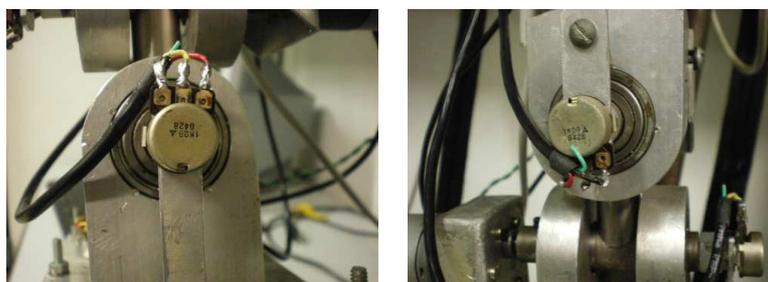


Figura 3.2: Ângulos medidos nos potenciômetros



(a) Eversão/Inversão

(b) Plantiflexão/Dorsiflexão

Figura 3.3: Medição dos ângulos do plano do pé

3.4 Adaptação dos Motores e Acionamento

Tendo posse de dois novos motores CC com escovas de alimentação 12V, dois suportes construídos a partir de uma chapa de alumínio foram acoplados aos motores. Os suportes limitaram intencionalmente o movimento dos motores podendo apenas girar os eixos do pé em movimentos de eversão/inversão, Fig. 3.4(a), e plantiflexão/dorsiflexão, Fig. 3.4(b). Realizando seguidos testes, foi verificada a adequação dos motores ao projeto, sendo estes capazes de girar todo o conjunto do pé com certa facilidade operando abaixo da potência máxima possível.

Utilizou-se como atuador para motor CC um servo amplificador PWM [5] realizado no laboratório e montado conforme a Fig. 3.5 exemplifica e parte dos circuitos do Anexo I o projetam, pois utilizou-se um servo amplificador simplificado e o Anexo I apresenta um servo amplificador com controle de corrente sendo assim algumas etapas realizadas pelo próprio microcontrolador. O circuito trabalha com uma entrada PWM que determina a tensão sobre o motor e sua polaridade de forma que, quando o ciclo de trabalho representa 50%, o motor tem aplicada uma tensão média de 0V em seus terminais. À medida que o ciclo de trabalho decresce ou incrementa, é aplicada uma tensão nos terminais do motor podendo chegar, em módulo, a 11,4V [8] nas situações extremas (ciclo de trabalho de 5% ou 95%) como mostra a Fig. 3.6. Isso ocorre porque o acionamento da ponte H dos motores utiliza o driver IR2104 e deve-se garantir que a tensão para acionar os mosfets superiores da ponte se mantenha.

O PWM opera em uma frequência escolhida de 28KHz pois procura-se trabalhar em uma frequência fora da faixa audível, que se encontra entre 20Hz e 20KHz, com uma margem de segurança evitando incomodos ao usuário, as pessoas que o rodeiam e aos projetistas em diversas experimentações. Uma entrada de habilitação do motor existente no circuito possibilita um desacionamento rápido do motor para situações que possam por em risco o usuário ou os mecanismos em que possivelmente possa existir como uma corrente muito alta, operação em posicionamento que leve perigo ao usuário e a propria prótese assim como velocidades exorbitantes. Quando operando dentro dos padrões estabelecidos, o circuito permanece habilitado até que alguma situação de risco seja detectada.

A modulação por largura de pulso, ou PWM, envolve a modulação de um sinal cíclico. Dada

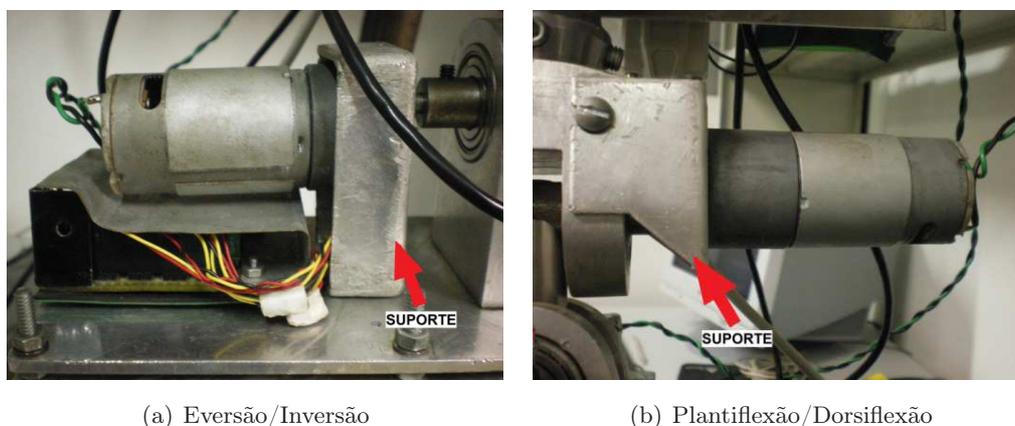
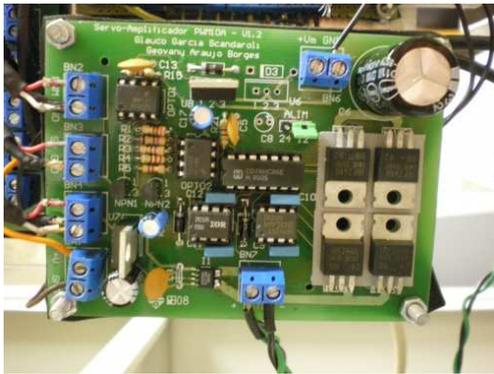
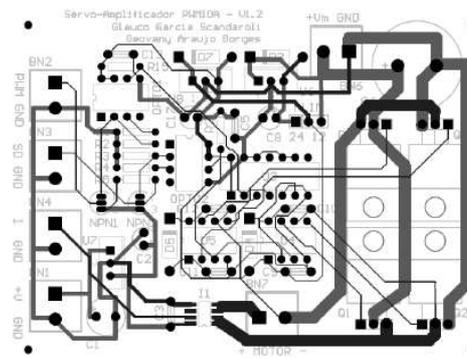


Figura 3.4: Motores da junta do pé



(a) Circuito montado



(b) PCB do atuador (fonte: [5])

Figura 3.5: Placa de acionamento

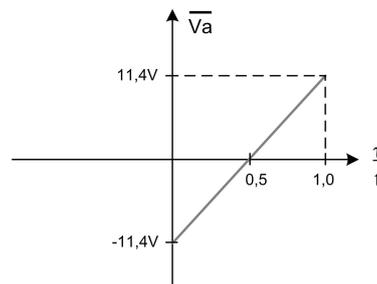


Figura 3.6: Ação do acionamento do motor

uma determinada frequência que um sinal trabalha em níveis de tensão definidos como alto e baixo, pode-se colocar uma porcentagem de tempo desejada dentro da frequência determinada que o sinal permanece em nível alto ou baixo, o ciclo de trabalho. Com esse sinal, os circuitos de acionamento trabalham com uma tensão nos motores de acordo com o ciclo de trabalho do sinal.

3.5 Corrente nos motores

A corrente em cada motor foi obtida com a utilização do sensor ACS704, Fig. 3.7(a). Esse sensor mede a corrente por meio do efeito Hall convertendo a medição da densidade de portadores em uma tensão proporcional. A resistência interna do sensor é tipicamente $1,5m\Omega$ [4], interferindo pouco no sistema em que é inserido pela pequena queda de tensão em seus circuitos, preservando a característica do circuito pela possibilidade de isolamento elétrico sem o uso de opto-acopladores ou técnicas caras de isolamento como desejado. A resposta do sensor é linear como mostrada na Fig. 3.7(b)

3.6 Velocidade angular

A velocidade angular em cada eixo foi estimada com a utilização de sensores giroscópios ADXRS300 (Fig. 3.8(a) retirada de <http://www.analog.com/>). O sensor é capaz de medir velocidades até $\pm 300^\circ/s$ [14] de acordo com a Fig. 3.8(b) em que pode ser vista a linearidade entre

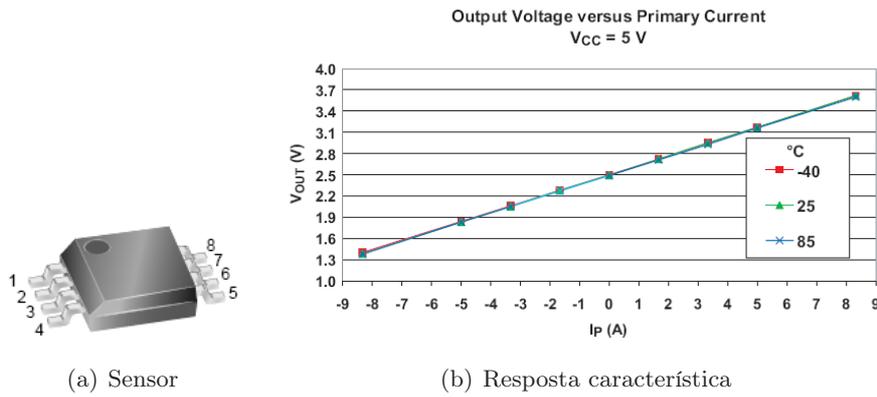
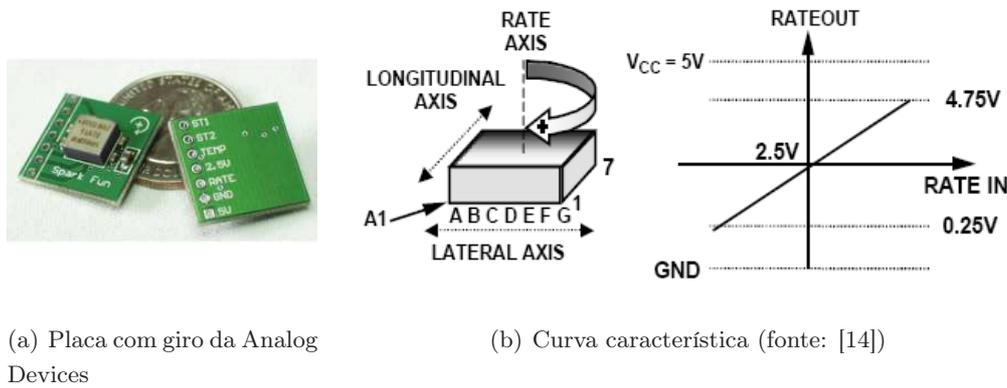


Figura 3.7: Sensor de medição de corrente (fonte: [4])



(a) Placa com giro da Analog Devices

(b) Curva característica (fonte: [14])

Figura 3.8: Girometro usado na IMU

o giro e a tensão de saída para uma alimentação de 5V. O sensor funciona pelo princípio de giro ressonante em que duas estruturas de silicone são acionadas eletrostaticamente para entrar em ressonância produzindo o elemento de velocidade necessário para produzir uma força de Coriolis durante a medição angular. A força é medida por uma estrutura capacitiva e o sinal resultante alimenta uma série de ganhos e estágios de demodulação que produzem o sinal elétrico de saída. O sensor da força rejeita forças g externas e vibrações pela sua fabricação com o sinal eletrônico condicionante preservando a integridade em ambientes ruidosos. O sensor consome 6mA em operação.

3.7 Sensores Infravermelhos

A Sharp possui uma série de sensores para a medição de distância e dentre eles o sensor infravermelho GP2D120 (Fig. 3.9(a) retirada de <http://www.acroname.com/>) de saída analógica adequado para leituras entre 4cm e 30cm [15] com lentes especiais que permitem medir tais distâncias. Os sensores utilizam do princípio da triangulação linear e uma disposição linear de CCD, *Charge Coupled Device*, para identificar a distância de um objeto.

Um emissor envia luz infravermelha e ela é refletida formando um triângulo entre o objeto e a lente do emissor e do detector. O ângulo em que o raio de luz incide no emissor é retransmitido a várias partes do vetor CCD. Os dispositivos determinam o ângulo da luz refletida e é calculada

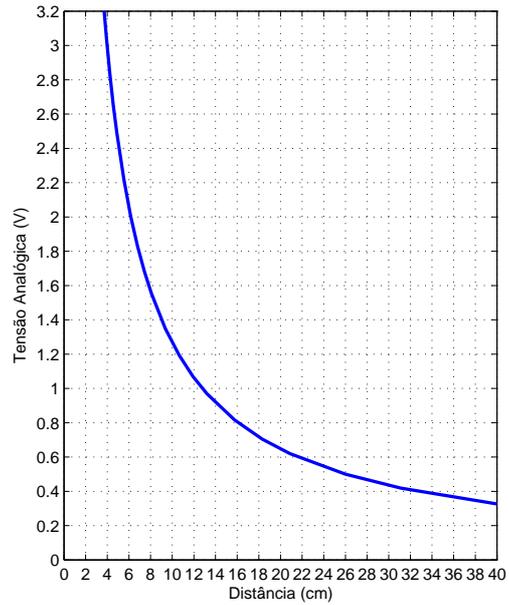
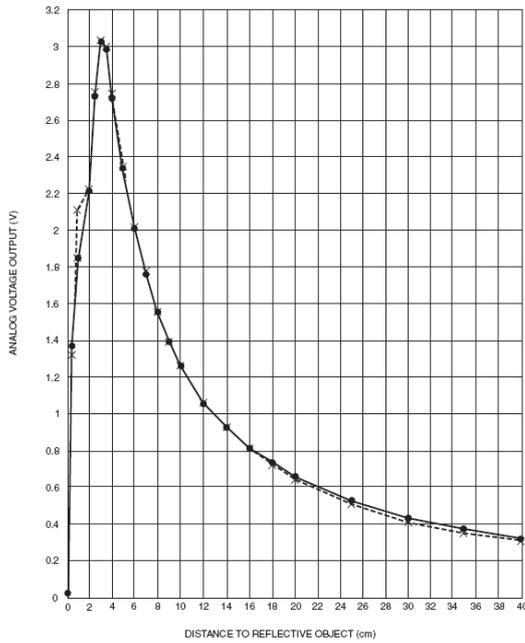
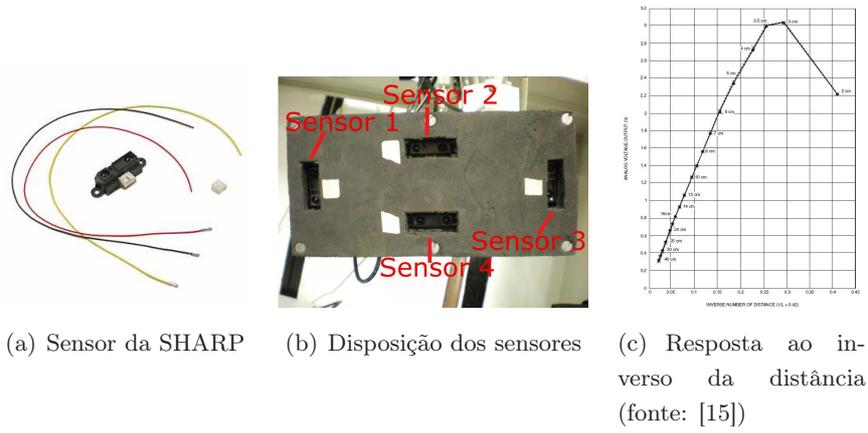


Figura 3.9: Sensor Infravermelho

a distância correspondente. Esse método é independente a cor do objeto e robusto em relação a iluminação ambiente. Cada sensor consome corrente de 33mA em operação.

A resposta com relação a distância não é linear, porém pode ser calculada pelo gráfico da Fig. 3.9(c), que representa a relação entre a tensão de saída e o inverso da posição que aproxima-se a uma reta. Para encontrar a equação desta reta, são selecionados os pontos (0,05;0,66) e (0,10;1,32) da reta e chega-se à seguinte relação:

$$V_{inf} = \frac{1,32}{0,10(L + 0,42)}$$

$$L = \frac{13,2}{V_{inf}} - 0,42 \quad (3.8)$$

em que V_{inf} é a tensão encontrada no potenciômetro e L é a distância medida pelo sensor.

A Fig. 3.9(e), que representa a Eq.(3.8), é bem parecida com a da Fig. 3.9(d) e relaciona a tensão lida no sensor com a distância medida pelo sensor. Quatro sensores foram montados na sola

do pé em suas extremidades na configuração da Fig. 3.9(b) afim de aferir a orientação do plano da sola do pé.

3.8 Placa dos sensores de movimento

Desenvolveu-se uma placa, Fig. 3.10, que abrange todos os sensores de movimento (giroscópios e sensores infravermelhos) de forma que essa fosse compacta para ser acoplada embaixo do motor junto ao pé. Para isolar a placa do campo magnético do motor, uma chapa de alumínio foi modelada servindo como uma proteção entre o motor e a placa quase que fechando-a e blindando-a totalmente.

Os sensores deveriam ser protegidos devido a uma questão pensada antes da confecção da placa, a transmissão dos sinais dos sensores até o ARM7 pediria cabos blindados longos que, devido a sua grande impedância e uma possível ocorrência de uma corrente inversa, poderia sobrecarregar os sensores. Para evitar tal ocorrência, amplificadores operacionais foram projetados como *buffer* isolando o sensor do circuito por meio do curto virtual entre as entradas do amplificador (Fig. 3.11). Caso haja uma sobrecarga, apenas o amplificador irá sofrê-la e os sensores serão preservados pela proteção contruída, já que constituem parte fundamental do sistema e produzem um custo elevado. O esquemático completo de todas as proteções com os sensores foi representado no Anexo I.

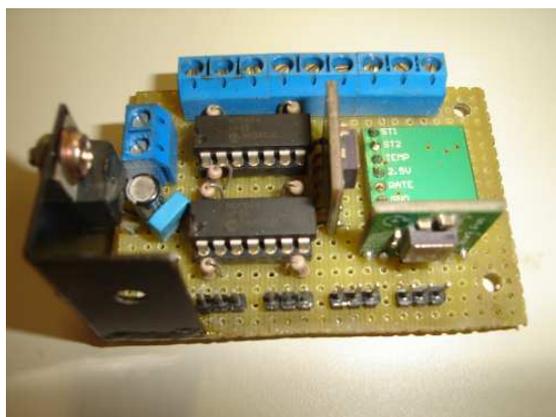


Figura 3.10: Placa de aquisição de dados com proteção dos sensores

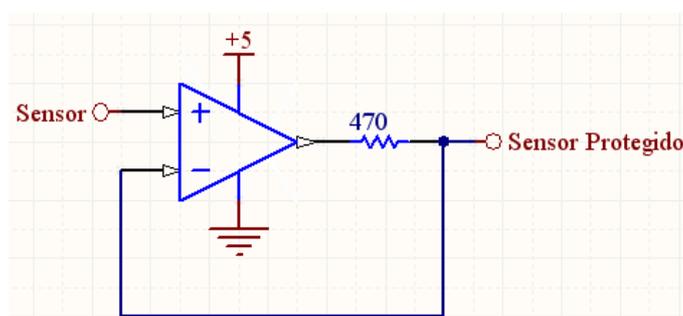


Figura 3.11: Circuito de proteção de sensores

3.9 Interface de medição, controle e acionamento

Após a transmissão das medições dos sensores indicados anteriormente, passou-se ao projeto da placa de controle e transmissão de dados, Fig. 3.12(a) pelo microcontrolador ARM7. A plataforma comercial utilizada foi a AT91SAM7S64, Fig. 3.12(b) retirada de <http://www.atmel.com/>, com um processador RISC de 32-bits de alta performance, 64K Bytes de memória flash, 16K Bytes de memória SRAM, clock de tempo real, 3 canais de timer de 16-bit, 4 canais PWM, 8 canais de conversores A/D de 10-bit, 2 USARTs, 32 pinos I/O e outros periféricos. Devido a sua alta capacidade e bom desempenho, esse microcontrolador foi escolhido para a atuação em todas as juntas da perna colocando todo o processamento em apenas um local.

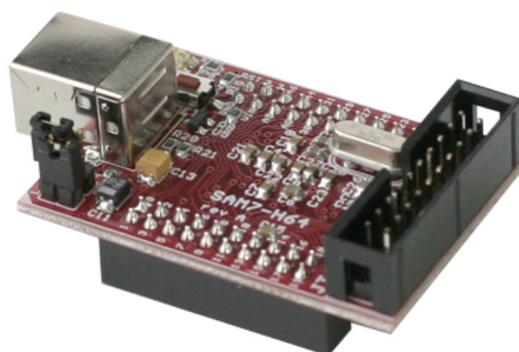
Os sensores deste projeto constituem um total de 10 unidades analógicas (4 infravermelhos, 2 potenciômetros, 2 giroscópios e 2 sensores de corrente) podendo ser convertidas por 8 conversores A/D do controlador. Para administrar esta quantidade de sensores, foi inserido no projeto um multiplexador analógico CD4051 de 8 canais selecionados por 3 bits conforme mostra a Fig. 3.13(b) sendo então lidos de maneira sequencial pela seleção de 3 pinos de saída do microcontrolador. Os sensores de corrente não tiveram sinal multiplexado.

Afim de preservar o multiplexador de sobrecargas, cada entrada de sensor passa por um circuito descrito na Fig. 3.13(a) em que se procura limitar a tensão de entrada entre 5V e 0V. Esse circuito também previne uma entrada em aberto do multiplexador forçando esta para 0V e evitando que ruídos do circuito interno o danifiquem.

Uma saída do microcontrolador foi separada para a habilitação do motor sendo acionada ou desacionada a medida que eram adquiridos os dados dos sensores e interpretados como situações de operação ou situações de risco. Definiu-se como situação de risco quando a corrente passando pelo motor atingia um valor acima de 1,5A pois este valor foi definido como uma grande requisição do motor, forçando uma situação de grande velocidade ou uma situação de travamento. Outras situações consideradas de risco foram as angulações máximas admitidas nos eixos sendo restringidas



(a) Placa com circuito



(b) Microcontrolador AT91SAM7S64

Figura 3.12: Placa de controle e transmissão de dados

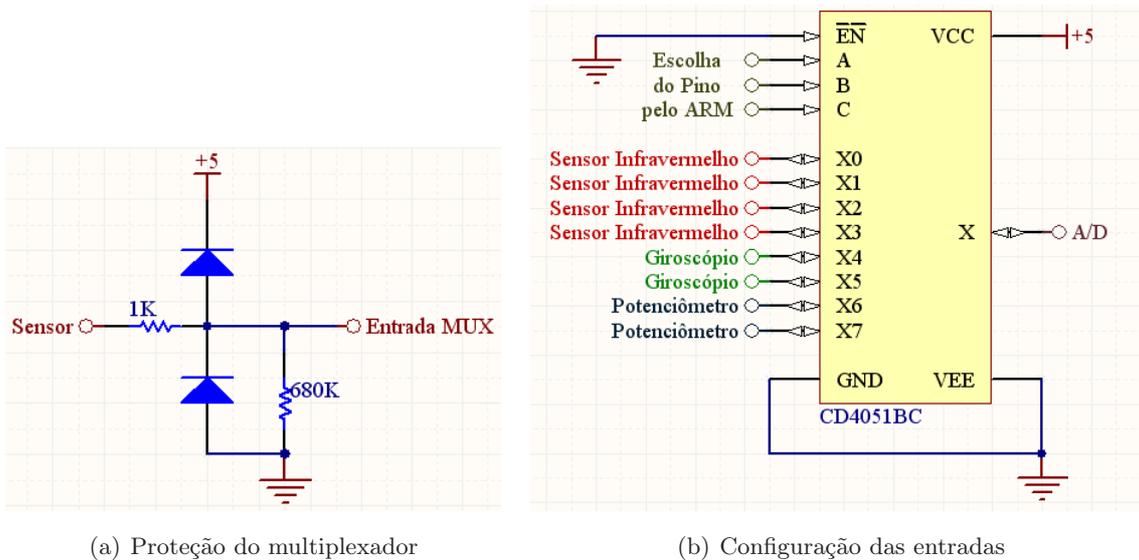


Figura 3.13: Circuitos do multiplexador

não pelo desacionamento do motor mas a suspensão do controle e a manutenção da posição pela compensação da gravidade naquela posição.

A transmissão de dados obtidos pelo microcontrolador foi montada a partir do diagrama da Fig. 3.14 fornecida pelo fabricante em <http://www.olimex.com/> sendo uma comunicação serial RS-232. Os únicos pinos necessários para a comunicação com o microcontrolador ARM7 são RX, TX e GND; recepção de dados, transmissão de dados e terra respectivamente; pois o microcontrolador trata de verificar via *software* se o canal de transmissão e recepção está livre com a utilização das bibliotecas padrões e as variáveis que as compoem não sendo necessária a utilização de pinos como RTS ou CTS, requisição para envio e canal livre para envio respectivamente, por exemplo. Os únicos pinos utilizados neste trabalho foram TX e GND pelo que o PC funcionou apenas como um monitor de dados não necessitando enviar qualquer tipo de informação porque o microcontrolador tratou de todo o processamento e das tomadas de decisão necessárias na movimentação da prótese. Os esquemáticos contendo o multiplexador, os circuitos de proteção do multiplexador, o circuito de comunicação via RS-232 relacionados a placa de controle e transmissão de dados são apresentados no Anexo I.

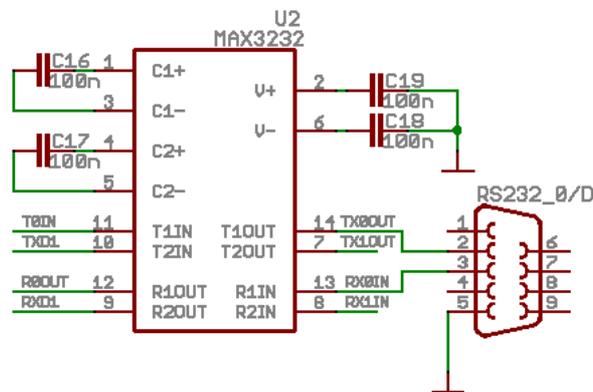


Figura 3.14: Circuito RS-232 da Olimex

No programa MATLAB, foi definido-se um protocolo de comunicação bem simples devido a confiabilidade da transmissão em que as informações foram mandadas em codificação ASCII separadas por tabulação e, ao fim de cada envio de dados, um retorno de carro (ENTER) era enviado para indicar o fim de mensagem. A velocidade de transmissão escolhida foi de 57600 bps para que os dados transmitidos com período de 10ms pudessem chegar em tempo de serem apresentados em tela e o sistema do PC, com seus diversos programas que carregam o processamento de dados, pudesse executar este programa sem travar o sistema. A velocidade máxima de transmissão para esse tipo de comunicação 115200bps. No Anexo II, está representado o desenvolvimento da aquisição de dados feita no Simulink/MATLAB em que os dados são recebidos conforme descrito anteriormente, como uma mensagem '%u\t%u\t%u\t%u\t%u\t%u\t%u\t%u\t%u\t%u\n\r' pelo bloco Query Instrument e esta mensagem é subdividida em várias variáveis medidas e/ou controladas pelo sistema. Na mensagem, %u representa um inteiro sem sinal, \t tabulação e \n\r retorno de carro. Os inteiros sem sinal transmitem as distâncias obtidas nos quatro sensores infravermelhos, as velocidades medidas nos dois girômetros, os ângulos dos dois eixos, as correntes passando pelos dois motores e o relógio marcando o tempo real.

Na Fig. do Anexo II, ds primeiros fatores subtraídos das variáveis correspondem a uma correção de valores negativos, foi definido no microcontrolador a transmissão de valores apenas positivos somando o maior valor negativo possível ao dado no momento da transmissão, e para que esta variável volte a medição original do microcontrolador, é subtraído o valor. Para a transmissão de valores fracionários foi feita a coleta de dados já com uma multiplicação por 1000 no microcontrolador e da mesma forma, no Simulink, foi dividido o valor por 1000 novamente afim de se obter o valor na unidade real de medida. Somente os dados de corrente foram transmitidos já na unidade correta pela não necessidade de coleta de mais casas decimais para esses dados, então o dado é dividido por 1000 afim de aparecer em um valor observável no osciloscópio virtual que mostra todos os dados e multiplicado por 1000 em um osciloscópio próprio.

Na parte de programação do microcontrolador, utilizou-se o *software* WinARM que utiliza um compilador GCC em conjunto com o *software* openOCD utilizando linguagem C. A transferência do código binário do programa para o microcontrolador ocorreu via porta paralela utilizando o conector JTag (Fig. 3.15 retirada de <http://www.olimex.com/>) próprio para a plataforma comercial utilizada do ARM7.

A representação de toda a parte de aquisição, acionamento e controle foi representada na Fig. 3.16 sendo mostrados visualmente os caminhos que os dados percorrem desde a aquisição passando



Figura 3.15: Conector JTag da Olimex

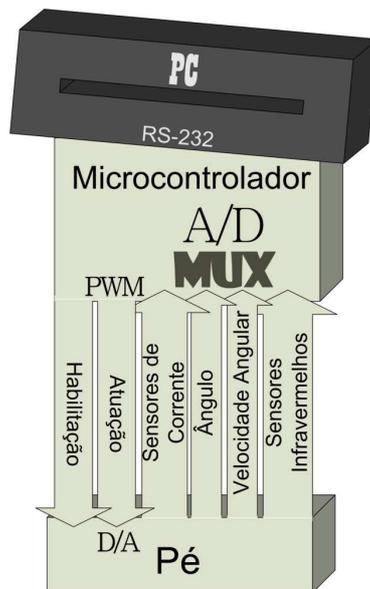


Figura 3.16: Diagrama da interface entre acionamento, aquisição e controle

por diversas transformações como A/D e D/A até o acionamento por PWM a partir dos dados obtidos nos sensores e análises feitas pelo microcontrolador. A comunicação com o computador via RS-232 incrementa o processo de análise e monitoramento da relação de tomadas de decisão e suas consequências nos motores principalmente.

Capítulo 4

Resultados Experimentais

4.1 Introdução

Nesta parte do projeto, o esforço esteve concentrado no modelamento dos motores de forma a obter as principais características deles com precisão. Para isso foram estimadas aproximações e identificados os parâmetros dos sistemas com métodos computacionais nos quais respostas reais foram comparadas a modelos ideais.

O desenvolvimento de um controlador de posição está completamente relacionado com os resultados dos parâmetros encontrados nos modelos, assim o objetivo do experimento é uma melhor resposta do sistema para o paralelismo entre o plano do pé e o do solo atendendo a requisitos de projeto em rapidez e precisão de resultados. Com todos esses resultados, o modelo foi provado em experimentos reais de movimentação do solo relacionando o modelo proposto à resposta real.

Os experimentos realizados foram relacionados à identificação das bandas mortas dos motores, compensação da gravidade na movimentação dos motores, modelamento do sistema e controle de forma a se seguir a referência de orientação. Para todos estes testes, são utilizados todos os dispositivos da Fig. 4.1 identificados e caracterizados no capítulo 3.

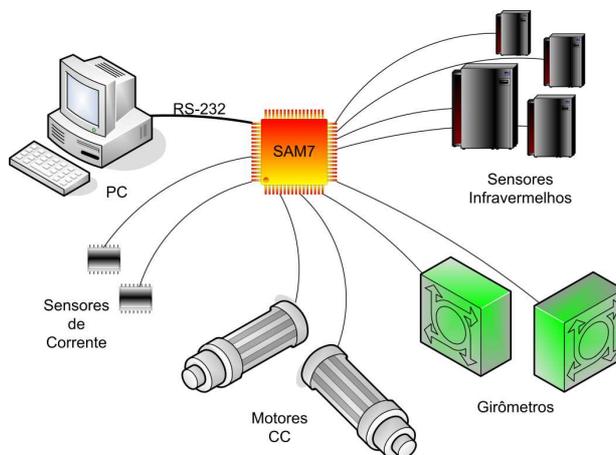
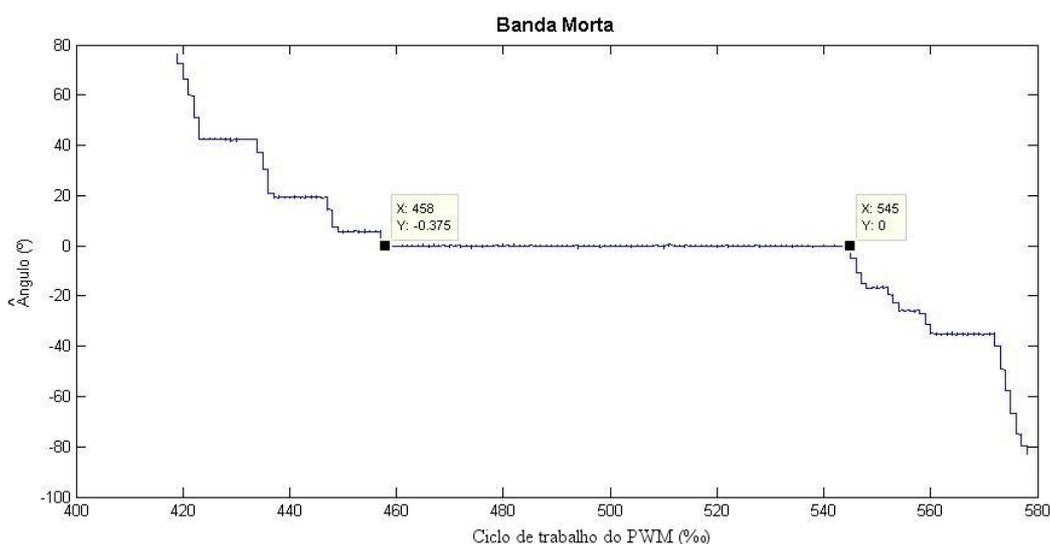


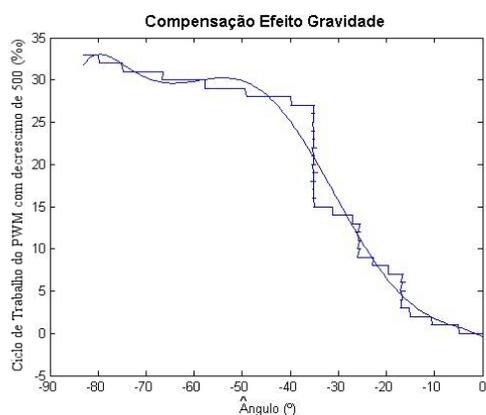
Figura 4.1: Dispositivos conectados ao microcontrolador

4.2 Determinação da banda morta e do efeito da gravidade sobre os motores

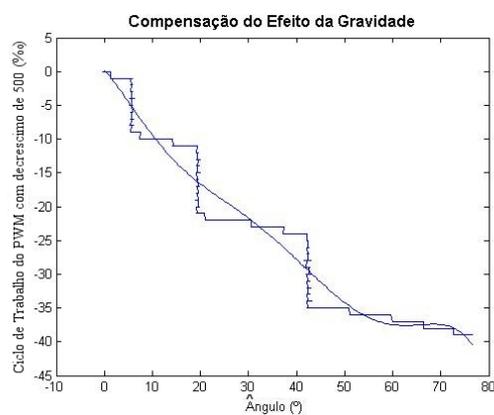
Na determinação da banda morta, cada motor foi acionado por um sinal PWM, produzido pelo microcontrolador, em que cada incremento ou decremento decimal do ciclo de trabalho do PWM corresponde a um incremento ou decremento na tensão no motor de 24mV. Partindo de um ciclo de trabalho de 50%, o ciclo de trabalho foi sendo incrementado em 0,1% e os ângulos correspondentes medidos pelo potenciômetro respeitando o ciclo de trabalho máximo de 95%. Da mesma forma, foi feito o experimento decrementado o ciclo de trabalho respeitando o ciclo mínimo de 5%. Os ciclos extremos não foram atingidos pois os limites angulares do sistema delimitados fisicamente pelos ângulos -80° e 80° para o motor de eversão/inversão e -80° e 50° para o motor de plantiflexão/dorsiflexão atingidos pelos ciclos de trabalho de 58% e 42%, e 63% e 33% respectivamente. Com essas informações puderam ser montados gráficos em que a banda morta dos motores ficou bem evidenciada (Fig. 4.2(a) e 4.3(a)). A banda morta representa um valor



(a) Experimento de banda morta



(b) Efeito gravidade horário (Eversão)

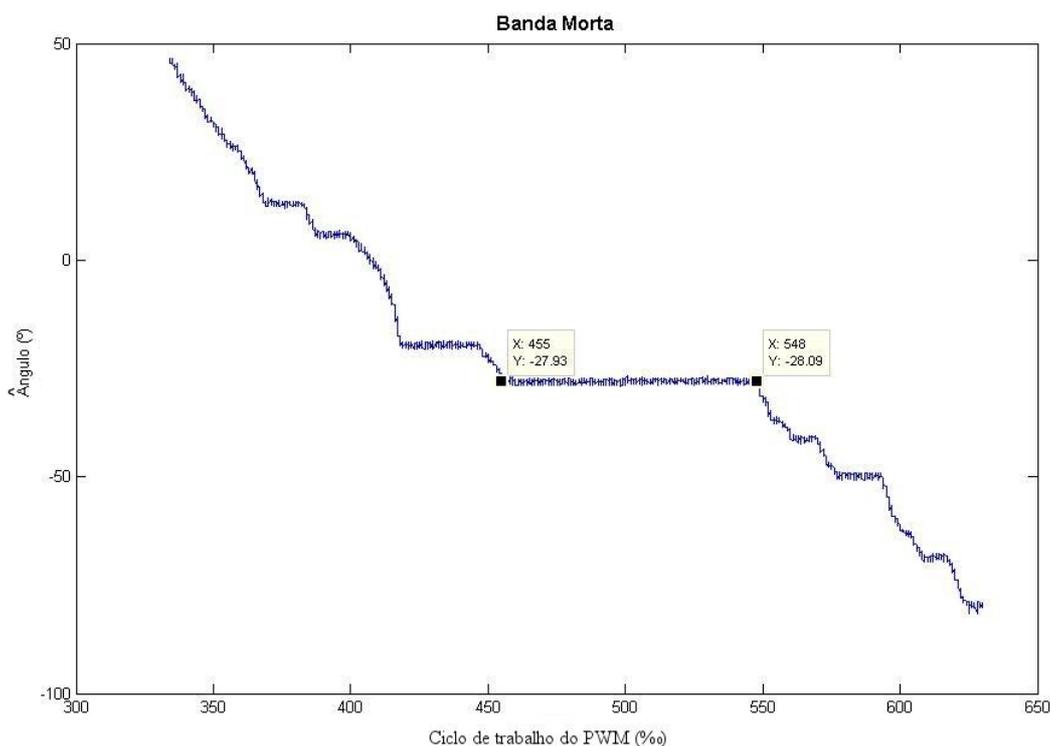


(c) Efeito gravidade anti-horário (Inversão)

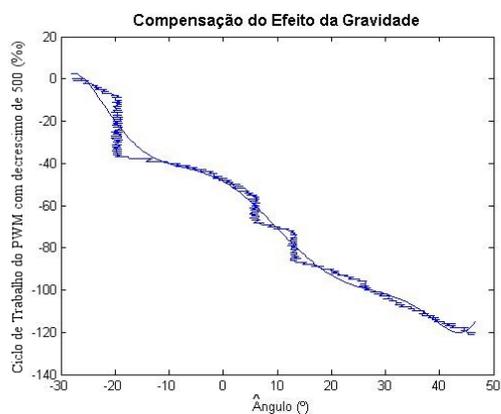
Figura 4.2: Características Motor Eversão/Inversão

único de posição para uma grande faixa de valores de ciclo de trabalho, partido de uma posição de repouso até a eminência de movimento característica do motor e influenciada pelo atrito entre as escovas, pela redução do motor e pela armadura do motor em conjunto com o carregamento no motor.

A continuação do incremento e decremento do ciclo de trabalho em um sistema sem carga acarretaria em uma rotação acelerada do eixo do motor com uma posição angular chegando a certo ponto cada vez mais rápido. Considerando um carregamento no motor, o carregamento acaba se somando ao atrito entre as escovas, ao efeito da inércia da redução do motor e à armadura do motor como descrito na Seção 2.3 e criando zonas mortas provindas da ação da gravidade agindo



(a) Banda Morta



(b) Efeito Gravidade Horário (Plantiflexão)



(c) Efeito Gravidade Anti-horário (Dorsiflexão)

Figura 4.3: Características Motor Plantiflexão/Dorsiflexão

sobre a carga como pode ser visto nas Fig. 4.2(b), 4.2(c), 4.3(b) e 4.3(c). Em determinados pontos, a soma do atrito dinâmico e da inércia da redução do motor com a força da gravidade pode superar a força imposta pelo motor. Neste momento o motor para e o atrito volta a ser estático criando assim uma zona morta. O motor volta a se mover quando a força imposta pelo motor supera o atrito estático em conjunto com a inércia da redução do motor e com a força da gravidade sobre o pé. Várias zonas mortas podem ser criadas dependendo da carga acoplada ao motor.

O motor de eversão/inversão tem como uma banda morta valores de ciclo de trabalho entre 458 e 545, e o motor de plantiflexão/dorsiflexão entre 455 e 548 sendo que, para evitar esta região, o motor deve iniciar o movimento para um lado ou para outro com esses valores sendo iniciais de forma que o acionamento sempre parte de forma ativa, sem problemas com tensões inoperantes.

O efeito da gravidade nos motores e as consequentes zonas mortas, apresentadas nas Fig. 4.3(b), 4.3(c), 4.2(b) e 4.2(c), podem ser aproximadas a funções polinomiais que quando bem similares as reais anulam o efeito da gravidade sobre os sistema. Foram feitos vários testes para ver qual polinômio se encaixava melhor na solução com o uso das ferramentas *polyval* e *polyfit* do MATLAB que para valores de entrada e saída aproximam a saída como uma função da entrada definida da seguinte forma:

$$\mathbf{y}(\mathbf{x}) = a_0 + a_1\mathbf{x} + a_2\mathbf{x}^2 + \dots + a_n\mathbf{x}^n \quad (4.1)$$

Uma aproximação bem próxima e com tempo de processamento aceitável no programa foi escolhida de ordem 7 como mostram as Fig. 4.3(b), 4.3(c), 4.2(b) e 4.2(c) relativas as Fig. 4.3(a) e 4.2(a) sem a banda morta do motor e invertendo o ciclo de trabalho do PWM agora em função da posição angular do eixo. Os termos encontrados são apresentados na Tabela 4.1. Essa ação do ciclo de trabalho no acionamento do motor faz com que em cada posição, caso o plano do solo não varie, o pé se mantenha parado com a orientação encontrada naquele momento pela compensação da gravidade que age com um torque contrário ao do motor.

As medidas dos gráficos das Fig. 4.3(b) e 4.2(b) foram tiradas da direita para a esquerda, ou seja, com o aumento da tensão polarizada sobre os motores e as das Fig. 4.3(c) e 4.2(c) da esquerda para a direita, com um aumento de polaridade oposta. Podemos perceber a partir daí o comportamento similar para os dois lados dos motores, quando reparamos no movimento de eversão e inversão assim como de plantiflexão e dorsiflexão partindo de um ângulo central para o movimento que caracterizam seus movimentos de sinais opostos. Com isso, o modelo do motor torna-se linear podendo ser mais facilmente acionado por um controlador linear.

4.3 Modelos dos motores CC

Uma forma simples de se encontrar o modelo de um sistema é a aplicação de um degrau como referência e observar a saída que conforme as variáveis que determinam o comportamento do sistema terá uma ordem definida por elas. Este procedimento é adotado para o modelo dos motores em que depois de um certo período de tempo é aplicado um degrau de tensão sobre os terminais do motor uma vez com uma polaridade e outra com outra e módulo igual e registradas as respostas de distâncias dos sensores infravermelhos para um objeto plano distante 10cm dos sensores quando o objeto e a sola do pé se encontravam paralelos.

Tabela 4.1: Termos do polinômio das funções de compensação da gravidade

Plantiflexão	a_0 $-5.997789603447766e^3$	a_1 $-8.947766790514453e^2$	a_2 -55.49535472352808
	a_3 -1.85255066554922	a_4 -0.03596505304766	a_5 $-4.071488800130311e^{-4}$
	a_6 $-2.495246216258325e^{-6}$	a_7 $-6.401816252357813e^{-9}$	
Dorsiflexão	a_0 -48.62221064288632	a_1 -1.44027339869509	a_2 -0.09156272158787
	a_3 $-6.556089628572505e^{-4}$	a_4 $2.474311704383342e^{-4}$	a_5 $-1.797130766313078e^{-6}$
	a_6 $-1.674638048165074e^{-7}$	a_7 $2.534410096340303e^{-9}$	
Eversão	a_0 -0.38461320677305	a_1 -0.28912628902504	a_2 -0.02066206539933
	a_3 -0.00125912105211	a_4 $1.828849075791123e^{-5}$	a_5 $1.518376636432133e^{-6}$
	a_6 $2.245034526895335e^{-8}$	a_7 $1.030480606477328e^{-10}$	
Inversão	a_0 0.10363407134810	a_1 -0.70016052026232	a_2 -0.06774249797470
	a_3 0.00594238111624	a_4 $-1.985204979473689e^{-4}$	a_5 $3.097194007064291e^{-6}$
	a_6 $-2.182714804075779e^{-8}$	a_7 $5.271601185575771e^{-11}$	

O resultado apresenta um sistema parecido com sistemas de primeira ordem, com uma referência de tensão para o motor de plantiflexão/dorsiflexão de 2,4V e -2,4V (ciclo de trabalho de 600 e 400) e de 1,44V e -1,44V (ciclo de trabalho de 560 e 440) para o motor de eversão/inversão como foi previsto na Seção 2.2 e exemplificado na Fig. 4.4.

Foi feito o modelamento do sistema de cada motor utilizando a ferramenta *ident* do MATLAB que utiliza o método dos mínimos quadrados, um método computacional muito utilizado para parametrização de sistemas em que para uma série de valores de referência e de resposta correlacionadas seleciona-se o modelo para o qual devem ser calculados os fatores do sistema. O modelo de processo selecionado foi:

$$G(s) = \frac{K_0}{\tau s + 1} \quad (4.2)$$

sendo τ a constante de tempo do sistema e K_0 o ganho do sistema visto que as respostas foram aproximadas a um sistema de primeira ordem, a aproximação resultou nas Fig. 4.4(a) e (b) e nos parametros registrados na Tabela 4.2.

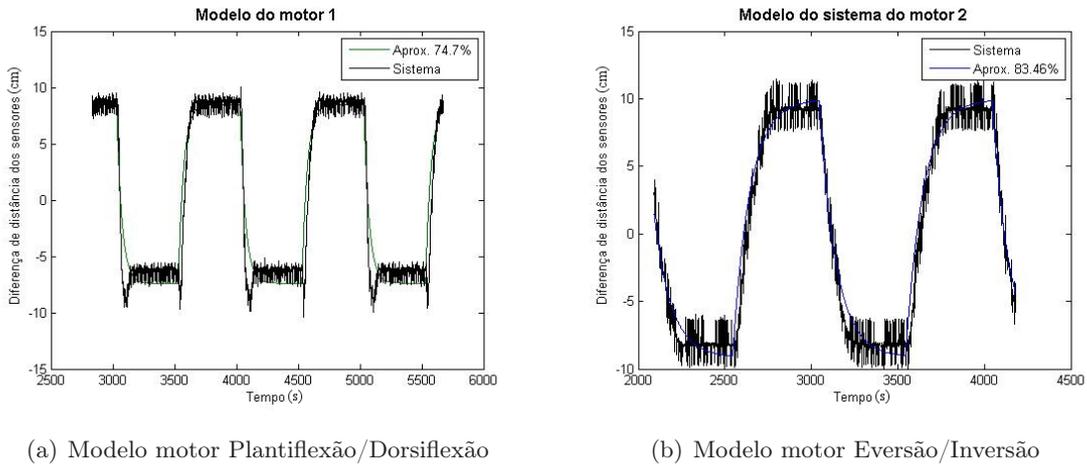


Figura 4.4: Dados experimentais para identificação dos modelos dos motores

Tabela 4.2: Parametros dos sistemas de primeira ordem dos motores

Motor	K_0	τ
Plantiflexão/Dorsiflexão	0.079245	41.764
Eversão/Inversão	0.15909	98.3158

Esses modelos, como pode ser visto na Fig. 4.4, ficaram bem próximos do sistema original com um acerto de 74,7% e 83,46% o que representa uma modelagem válida para os motores e a partir dos modelos podemos fazer um controle PI para um sistema de primeira ordem como uma solução simples e eficiente. A constante de tempo que aparece na função de transferência é bem próxima da mecânica já que a elétrica foi desconsiderada devido a sua pouca influência no sistema.

4.4 Controle PI da posição dos motores

Seguindo as considerações feitas na Seção 2.2.2, pela combinação do controle proporcional e o integral, obtem-se a seguinte função de controle no domínio de Laplace:

$$\begin{aligned}
 C(s) &= K_p + \frac{K_i}{s} \\
 &= \frac{K_p s + K_i}{s}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

O diagrama de blocos do sistema controlado é apresentado na Fig. 4.5. Para que o polo do sistema seja anulado pelo zero do controlador e a ação integral consiga fazer com que o sistema siga a referência de entrada sem erro estacionário, deve-se obedecer a seguinte relação:

$$\begin{aligned}
 \frac{K_p s + K_i}{s} \cdot \frac{K_0}{\tau s + 1} &= \frac{1}{s} \\
 K_i \cdot \frac{\frac{K_p}{K_i} s + 1}{s} \cdot \frac{K_0}{\tau s + 1} &= \frac{1}{s}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

isso porque o cancelamento do polo e do zero do sistema faz com que o método do lugar geométrico das raízes, Fig. 4.6(a), seja simplificado com apenas um polo na origem. Essa configuração para

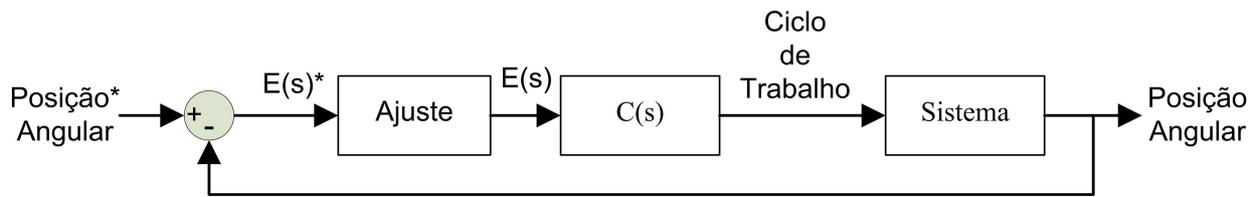


Figura 4.5: Diagrama de blocos do controle utilizado no sistema

este método segue a referência sem erro de regime estacionário com apenas um atraso na resposta dependendo do ganho do sistema. A resposta em malha fechada, Fig. 4.6(b), para um degrau de entrada segue à referência sem sobresalto. Para tanto, deve-se fazer com que:

$$K_i = \frac{1}{K_0} \quad (4.5)$$

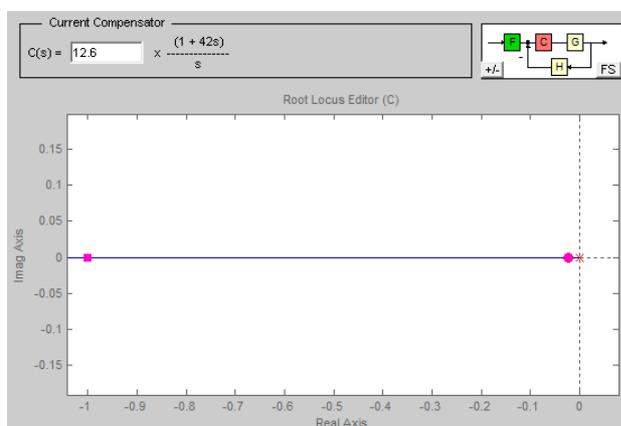
$$\frac{K_p}{K_i} = \tau \quad (4.6)$$

Calculando esses fatores a partir da Tabela 4.2, obtém-se a Tabela 4.3.

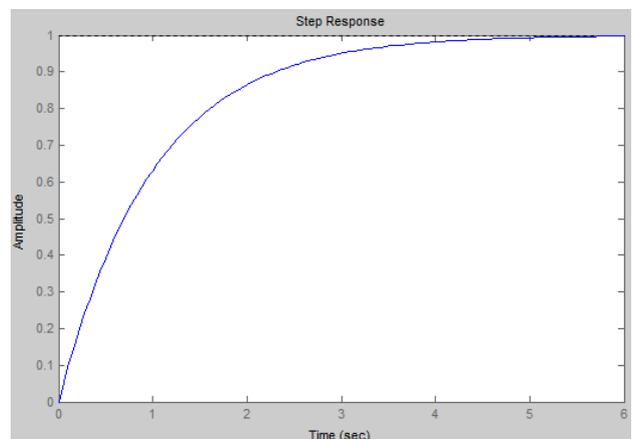
Tabela 4.3: Parâmetros dos controladores

Motor	K_i	K_p
Plantiflexão/Dorsiflexão	12.61909	527.024
Eversão/Inversão	6.28575	617.989

Os valores encontrados para os parâmetros de controle foram um pouco exorbitantes, com uma resposta muito rápida prejudicando a estrutura física do sistema, porque foram encontrados a partir de um modelo de sistema que relaciona valores de ciclo de trabalho à posição angular sem uma conversão apropriada. Foi feito um ajuste experimental em os parametros do controlador, K_p e K_i , foram divididos por uma constante a fim de reduzir o ganho encontrado para o controlador. Os fatores de ajuste foram registrados na Tabela 4.4.



(a) LGR



(b) Resposta ao degrau

Figura 4.6: Sistema em malha fechada

Tabela 4.4: Ajuste nos ganhos dos sistemas

Motor	Ajuste (Divisor)
Plantiflexão/Dorsiflexão	35
Eversão/Inversão	15

Com o ajuste a resposta ficou bem coerente não alterando a característica do controlador já que só influencia na rapidez que o sistema responde. Os novos valores de ganho foram colocados na Tabela 4.5. Para um sistema discreto, que será o caso deste projeto, são necessárias algumas adaptações nesses últimos resultados obtidos para ficar de acordo com a Seção 2.5. As constantes K_p e K_i são as mesmas e o processo de controle segue as equações da mesma seção retirando apenas o efeito derivativo já que este não se fez necessário. O único componente que entra a mais na constante integral é o período de amostragem T que foi definido como fator de projeto como sendo 10ms devido a necessidade de rapidez nesse processo já que se trata da movimentação de uma pessoa que possivelmente deve chegar futuramente a previsão de uma corrida se for necessário.

Tabela 4.5: Parâmetros dos controladores ajustados

Motor	K_i	K_p
Plantiflexão/Dorsiflexão	0.36055	15.0578
Eversão/Inversão	0.41905	41.1993

4.5 Experimentos

Por último, a parte dos experimentos feitos com a prótese. As experimentações foram feitas basicamente utilizando um objeto plano como solo fazendo movimentações de subida, descida e rotações para a previsão de terrenos irregulares e a movimentação da própria perna quanto ao andar de uma pessoa. Os sensores infravermelhos trataram de medir as distâncias de pontos definidos na sola do pé até o plano correspondente ao solo conforme as descrições de conversão de tensão em distância referentes à Seção 3.7.

Algumas restrições de projeto aplicadas por *software*, evidenciadas nos vídeos de simulação, foram implementadas para precaver qualquer exigência além dos limites aceitáveis para o pé como os ângulos máximos de movimentação para não chegar a limites físicos como a própria perna, as placas construídas e os motores que por seu tamanho acabam sendo um limite físico.

Quanto a movimentação monitorada pelo MATLAB, um exemplo que evidencia grande parte das situações de movimentação dos motores é apresentado nas Fig. 4.7 e 4.8. Essas duas movimentações dos eixos acontecem simultaneamente apesar de serem apresentadas em gráficos diferentes, essa forma de apresentação foi feita para facilitar a visualização das variáveis medidas e convertidas. São apresentados o erro que é a entrada que o controlador recebe correspondendo à diferença entre as medidas dos sensores respectivos às movimentações de plantiflexão/dorsiflexão e ever-

são/inversão; a medida dos sensores respectivos; a posição no instante atual de cada eixo medida pelo potenciômetro fixado ao eixo; a velocidade angular momentânea de cada eixo adquirida pelos girometros e uma outra medição de velocidade estimada a partir da derivada dos ângulos tendo muito ruído pelo que tenta estimar tendo dados discretos como entrada servindo apenas de guia para ver se o girometro está com medidas coerentes; e a medição da corrente momentânea passando pelo motor em determinado instante, lembrando que neste caso a corrente estimada é a que passa pela armadura do motor e esta corrente tenta manter a tensão sobre o motor no valor de acionamento dado pelo ciclo de trabalho fornecido a placa de acionamento.

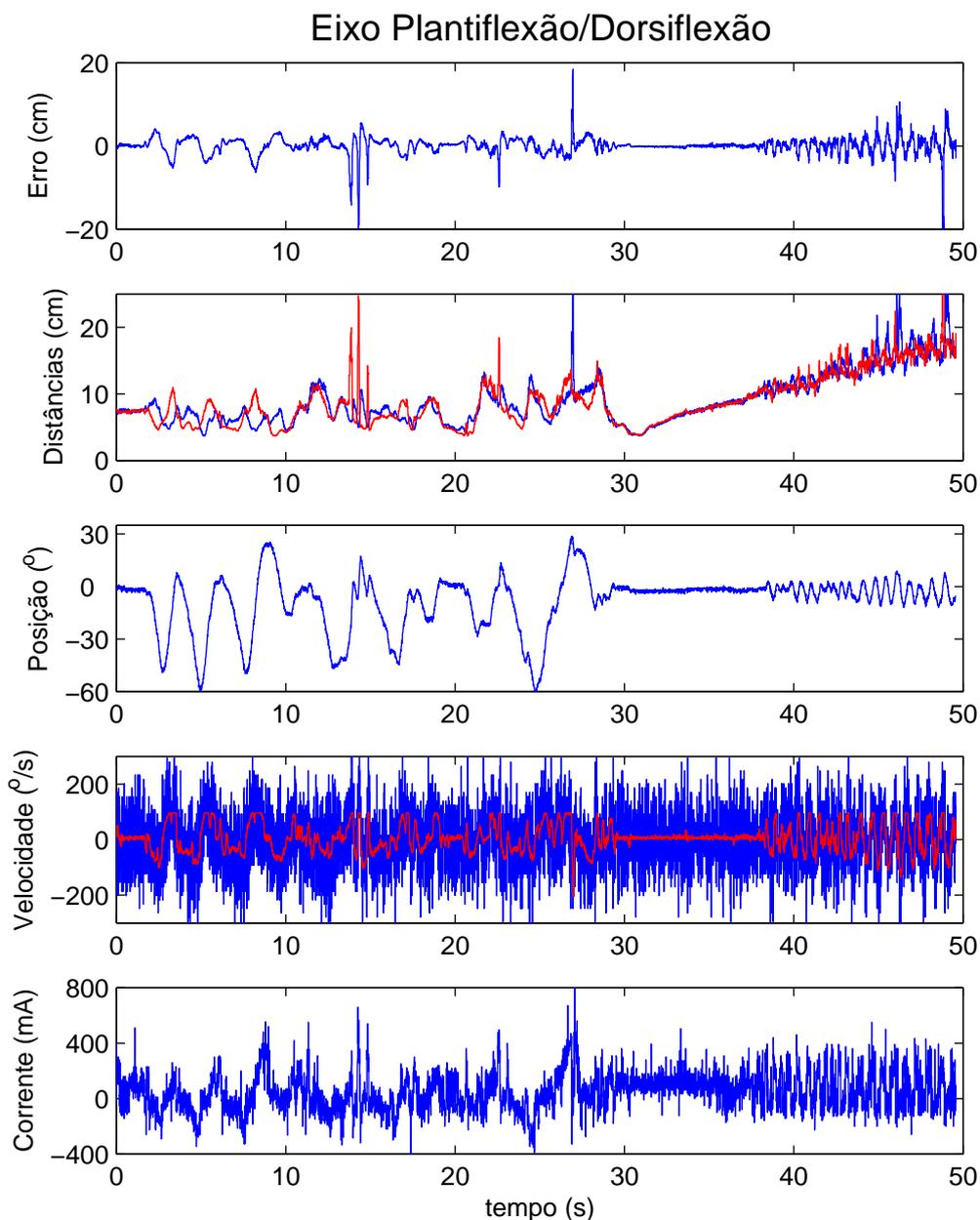


Figura 4.7: Experimento de movimentação no eixo de plantiflexão/dorsiflexão

Ambas as figuras podem ser analisadas de maneira semelhante pois como são compostas de motores idênticos em posições diferentes, acionados por placas com mesma montagem, medidos com sensores iguais e controlados com um PI favorecendo a resposta semelhantes em condições iguais. Quando os sensores infravermelhos reconhecem uma distância diferente entre eles, logo surge um erro entre as medidas, esse erro faz com que o controlador atue de forma a compensar as limitações do motor aplicando uma tensão maior que a que seria de referência para o acionamento do motor afim de emular um comportamento da planta, pelo cancelamento do seu polo, com função de transferência $\frac{1}{s}$ e a função de transferência em malha fechada $\frac{1}{s+1}$. A tensão é aplicada no motor

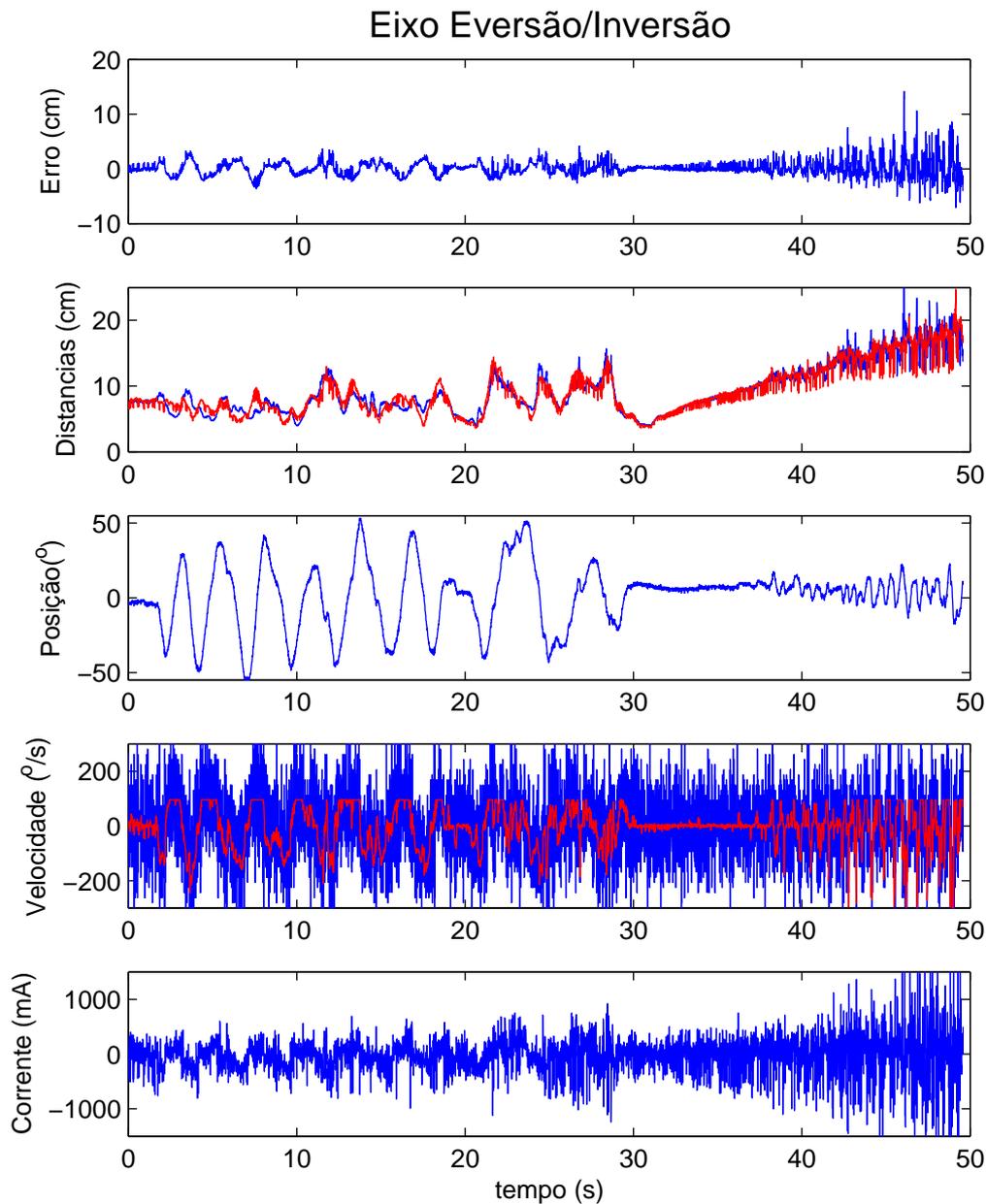


Figura 4.8: Experimento de movimentação no eixo de eversão/inversão

e a corrente por sua vez é mudada para que se mantenha aquela tensão sobre o motor sustentando o carregamento que está acoplado ao motor, no caso o pé. Sendo assim, o eixo muda de posição até que o erro das medidas se torne zero ou ao menos tente acompanhar a mudança de orientação de forma a minimizar o erro, conseqüentemente é medida a velocidade pela movimentação do motor que corresponde a derivada da posição. Quando a posição muda numa proporção constante, a velocidade se mantém em um valor constante mas a partir de uma aceleração do movimento a velocidade é mudada acompanhando a progressão do movimento. Toda a progressão do movimento é monitorada em tempo real pelo MATLAB, como pode ser visto na nos vídeos do CD anexado, possibilitando a montagem dos gráficos das Fig. 4.7 e 4.8 pelos dados acumulados e armazenados.

Nos gráficos, quando o plano do solo muda de orientação, o pé realmente acompanha a mudança de orientação mantendo o erro bem próximo de zero por causa da ação integral e da eliminação das não linearidades do sistema como a banda morta e o efeito da gravidade no carregamento do motor. Alguns picos podem ser observados no motor de plantiflexão/dorsiflexão para a parte inicial, eles se devem ao plano utilizado não ser suficientemente grande para cobrir todos os sensores em todo o tempo, então o sensor acaba captando um plano além do plano que estavam utilizando para teste.

Dando ênfase ao movimento antes de 30 segundos, as Fig. 4.9 e 4.10 correspondem ao intervalo de tempo até 30 segundos das figuras anteriores. Quando surge uma diferença entre os sensores infravermelhos pela movimentação do plano detectado por eles, a ação de controle de posição do pé passa a acionar os motores e dependendo da diferença entre as medidas dos sensores o acionamento gera uma velocidade maior se a diferença é maior. Conseqüentemente, a posição angular do pé é mudada de forma a acompanhar a reorientação do solo abaixo dele.

Na parte final do experimento, de 30 segundos para frente, o plano de solo foi mantido paralelo ao chão sendo apenas afastado do pé para verificar a situação de medição de grandes distâncias. Para distâncias a partir de aproximadamente 15cm, os sensores acabam oscilando bastante, devido a tensão de saída ser muito baixa e uma pequena variação é tomada como uma grande movimentação do objeto detectado, neste momento ruídos passam a ser uma influência grande na aquisição perturbando totalmente o sistema como pode ser visto pelo acionamento constante e exigência dos motores.

Uma forma de minimizar essa perturbação do sistema seria a utilização de um filtro que possa reduzir a influência dos ruídos. Uma sugestão escolhida foi um filtro de Kalman na aquisição de dados dos sensores, o filtro de Kalman é um filtro que modela essas incertezas dos sensores como ruídos Gaussianos brancos a partir de uma fusão sensorial provendo uma estimativa ótima para as medições. Devido a falta de tempo, a aplicação deste filtro foi objeto de mobilização até a entrega porém não foi possível a implementação deste.

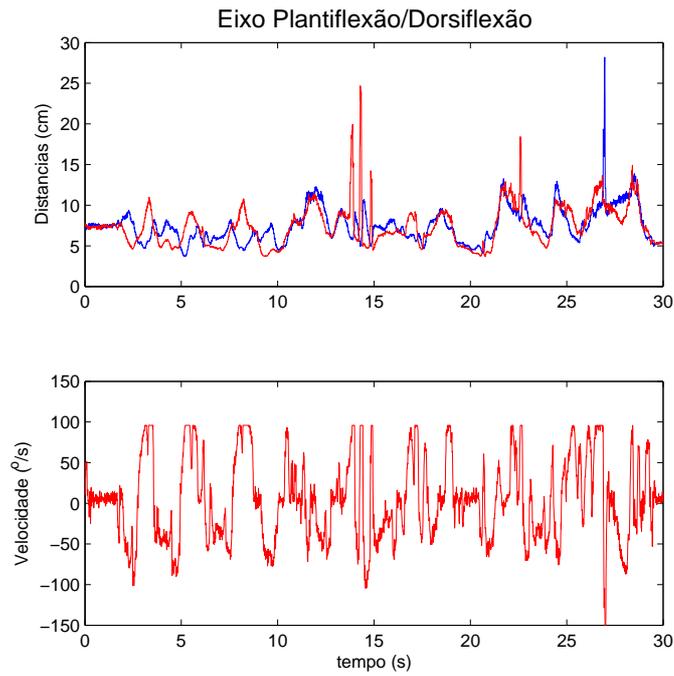


Figura 4.9: Experimento de movimentação no eixo de plantiflexão/dorsiflexão dando ênfase a velocidade e a distância

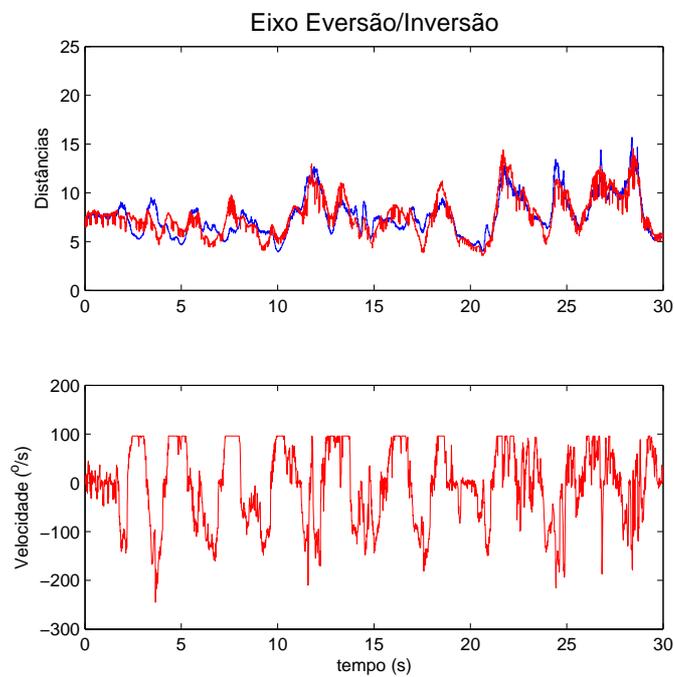


Figura 4.10: Experimentação do movimento de eversão/inversão dando ênfase a velocidade e a distância

Capítulo 5

Conclusões

O objeto do presente projeto foi o de elaborar um controle de posição dos eixos do pé de uma prótese robótica de perna para se manter uma orientação relativa ao solo utilizando-se sensores infravermelhos como principal referenciador da posição angular do pé. A movimentação do pé relacionada com planos e vetores e conceitos fundamentais da Geometria Analítica foram aplicados à dinâmica de movimentação inicial do plano do pé. A propulsão de um movimento de caminhada foi preparada com a aquisição da velocidade e posicionamento para a implantação em futuros projetos.

Determinados conceitos de acionamento de motores e suas modelagens, essenciais para o desenvolvimento do projeto, foram aplicados na implantação de um controle relativo ao acionamento do protótipo afim de se obter uma resposta rápida e dinâmica em função de um controle PI, obtido a partir dos parâmetros do sistema.

A compensação da banda morta foi de suma importância para o projeto pois, quando houve a necessidade de um motor reorientar o plano do pé, a tensão inicial aplicada no motor, com a compensação da banda morta, tornou-se capaz de movimentar o eixo do motor fazendo com que este ficasse parado apenas quando os planos do pé e do solo estavam realmente paralelos.

Para as zonas mortas no movimento do motor, a aproximação do efeito provocado, em cada motor, pela gravidade foi obtida pela modelagem polinomial facilitando a compensação desta força linearizando o modelo do motor. Este motor passou a ser semelhante a um motor sem carregamento em seu eixo.

Tendo em vista tais considerações, tornou-se possível a aplicação do controle PI no motor aproximado por um sistema de primeira ordem. A nova constante de tempo do motor foi calculada e compensada pela ação de controle. O sistema foi atualizado para se tornar mais rápido e preciso com a ação de controle. Alguns ajustes de ganho tiveram de ser feitos pelo que os fatores do controlador PI encontrados mostraram-se muito elevados. A correção dos fatores manteve o modelo de controle diminuindo apenas na rapidez que o sistema respondeu.

Os sensores empregados foram adequados ao projeto graças às respostas obtidas durante sua utilização que se mostram coerentes com as descritas pelo fabricante e pelas estimações feitas para cada uma delas. No que diz respeito aos sensores infravermelhos, o modelamento destes a

partir do seu manual teve grande eficiência adquirindo medições precisas para distâncias entre 4 e 40cm, porém foi verificada a influência de ruídos para distâncias a partir de aproximadamente 15cm dado que a resposta, em tensão, para esta faixa de distâncias é muito pequena. A sugestão para solucionar esta questão é a implementação de um filtro como, por exemplo, o de Kalman, que poderá para minimizar o ruído que prejudica as medições acima de 15cm e o correspondente controle de orientação.

O uso do MATLAB como software de monitoração de um sistema representa, não somente uma ferramenta para atualização de conversões, visualização de dados e ocorrências em tempo real, modelamento pela aquisição de dados e ambiente gráfico de interação, mas também uma ferramenta de utilização de métodos computacionais de cálculo.

A união de todo esse conjunto de sensores, motores, acionamento, controle e monitoração representa um direcionamento à orientação do pé da prótese com uso automatizado. Em trabalhos futuros, a inclusão da propulsão para o movimento, a interação com o joelho e a recepção de solicitações de movimentos feitas pelo usuário proporcionará a ele todo o movimento de uma perna biológica real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VENTURI, J. J. *Álgebra Vetorial e Geometria Analítica*. 9^a edição. [S.l.]: Editora da UFPR, 1991.
- [2] LIMA, J. *Modelos Matemáticos de Sistemas Físicos: Motor DC*. Notas técnicas da disciplina Teoria dos Sistemas, Departamento de Engenharia Electrónica e Informática, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve, 2007. Disponível em http://www.ualg.pt/moodle2007/file.php/14811027/SLIDES/10-_Motor_DC.pdf.
- [3] JACK, H. *Deadband Compensation for Bidirectional Motion*. Techreport from the course Dynamic System Modeling and Control, School of Engineering, Grand Valley State University, 2005. Disponível em http://claymore.engineer.gvsu.edu/~jackh/eod/courses/egr345/fall05/lab_deadband.pdf.
- [4] MICROSYSTEMS, A. *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*. Model ACS704ELC-005, 2007. Disponível em <http://www.sumzi.com/upload/files/2007/07/2007070210051108272.pdf>.
- [5] BORGES, G. A.; SCANDAROLI, G. G. *Atuador Universal para Atuadores de Corrente Contínua com Escovas*. Nota Técnica do Laboratório de Robótica e Automação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2007.
- [6] CASCÃO, C. A. *Prótese Mecânica para Reabilitação Robótica*. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecatrônica. Laboratório de Controle e Visão por Computador, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2005.
- [7] BECKMAN, E. D.; SANTOS, G. F. *Desenvolvimento de Controladores para Prótese Robótica de Perna*. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecatrônica. Laboratório de Controle e Visão por Computador, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2006.
- [8] SCANDAROLI, G. G. *Controle Adaptativo de Juntas para uma Prótese Robótica de Perna*. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecatrônica. Laboratório de Robótica e Automação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2007.
- [9] ALVES, E. S. *Proposta de um Módulo Sensorial para Estimação de Postura com Relação ao Solo de uma Prótese Robótica de Perna*. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecatrônica. Grupo de Processamento Digital de Sinais, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, 2007.

- [10] LARSON, R. E.; EDWARDS, B. H. *Elementary Linear Algebra*. [S.l.]: D. C. Heath and Company, 1988.
- [11] DORF, R. C. *Modern Control Systems*. 2ª edição. [S.l.]: Addison Wesley, 1986.
- [12] LJUNG, L. *System Identification - Theory for the User*. [S.l.]: Prentice-Hall, 1999.
- [13] FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; WORKMAN, M. L. *Digital Control of Dynamic Systems*. 3ª edição. [S.l.]: Addison Wesley, 1998.
- [14] DEVICES, A. $\pm 300^\circ/s$ *Single Chip Yaw Rate Gyro with Signal Conditioning*. Model ADXRS300, 2004. Disponível em http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXRS300.pdf.
- [15] SHARP. *Device Especification for Distance Measuring Sensor*. Model GP2D120, 1999. Disponível em http://www.acroname.com/robotics/parts/GP2D120_SS.pdf.

ANEXOS

I. DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS

Na Fig. I.1, cada sensor passa por um circuito de proteção constituído por um amplificador operacional e uma resistência de 470Ω . Pelo curto virtual que existe entre os terminais positivo e negativo do amplificador operacional, a tensão no terminal positivo, resposta de um sensor, é a mesma no terminal negativo porém não existe conexão entre estes pelo que são isolados. Caso haja uma sobrecarga por uma corrente inversa que agiria sobre o sensor, o amplificador operacional tratará de proteger o sensor sofrendo os efeitos desta sobrecarga.

A sequência deste circuito corresponde a proteção do multiplexador da Fig. I.2. O divisor de tensão composto pelas resistências de $1K\Omega$ e $680K\Omega$ evita que a entrada do multiplexador fique em aberto pela falta do circuito anterior à resistência de $1K\Omega$ citado acima. O divisor interfere muito pouco na tensão que o sensor tem como resposta. Neste caso, a entrada é aproximadamente $0V$ pela conexão com o terra do circuito. Os diodos evitam que a tensão de entrada do multiplexador ultrapasse os limites de sua alimentação forçando a entrada para $5V$ ou $0V$ caso a tensão seja maior que $5V$ ou menor que $0V$ respectivamente.

Passando para a Fig. I.2, o multiplexador analógico de 8 canais CD4051 é utilizado para seleção do sensor a ser lido. A saída entra em um conversor A/D do microcontrolador ARM7 sendo escolhida pelo próprio microcontrolador a partir de três pinos de seleção para leitura sequencial da resposta dos sensores. A comunicação serial é feita utilizando o CI MAX3232 em que os dados são mandados pelo microcontrolador no pino TXR0 e recebidos no pino RXD0. A conexão com a porta do PC é feita com um conector de 9 pinos.

O microcontrolador no formato comercial AT91SAM7S64 possui dois soquetes com 20 conexões para pinos utilizados nas suas diversas configurações. Para o circuito da Fig. I.2, além do conversor A/D da saída do multiplexador e da comunicação serial, outros dois conversores A/D são utilizados para a conversão dos sinais correspondentes às correntes passando pelos motores. As correntes são medidas pelo sensor ACS704 montado no circuito de acordo com a Fig. I.3. Dois PWMs são gerados pelo microcontrolador e atuam como entradas nos circuitos de acionamento dos motores conforme descrito na Fig. I.3. Os sinais PWM geram nas saídas dos circuitos de acionamento e, conseqüentemente, nos terminais dos motores tensões proporcionais aos ciclos de trabalho dos PWMs. Essas tensões acionam motor movimentando os eixos do pé da prótese.

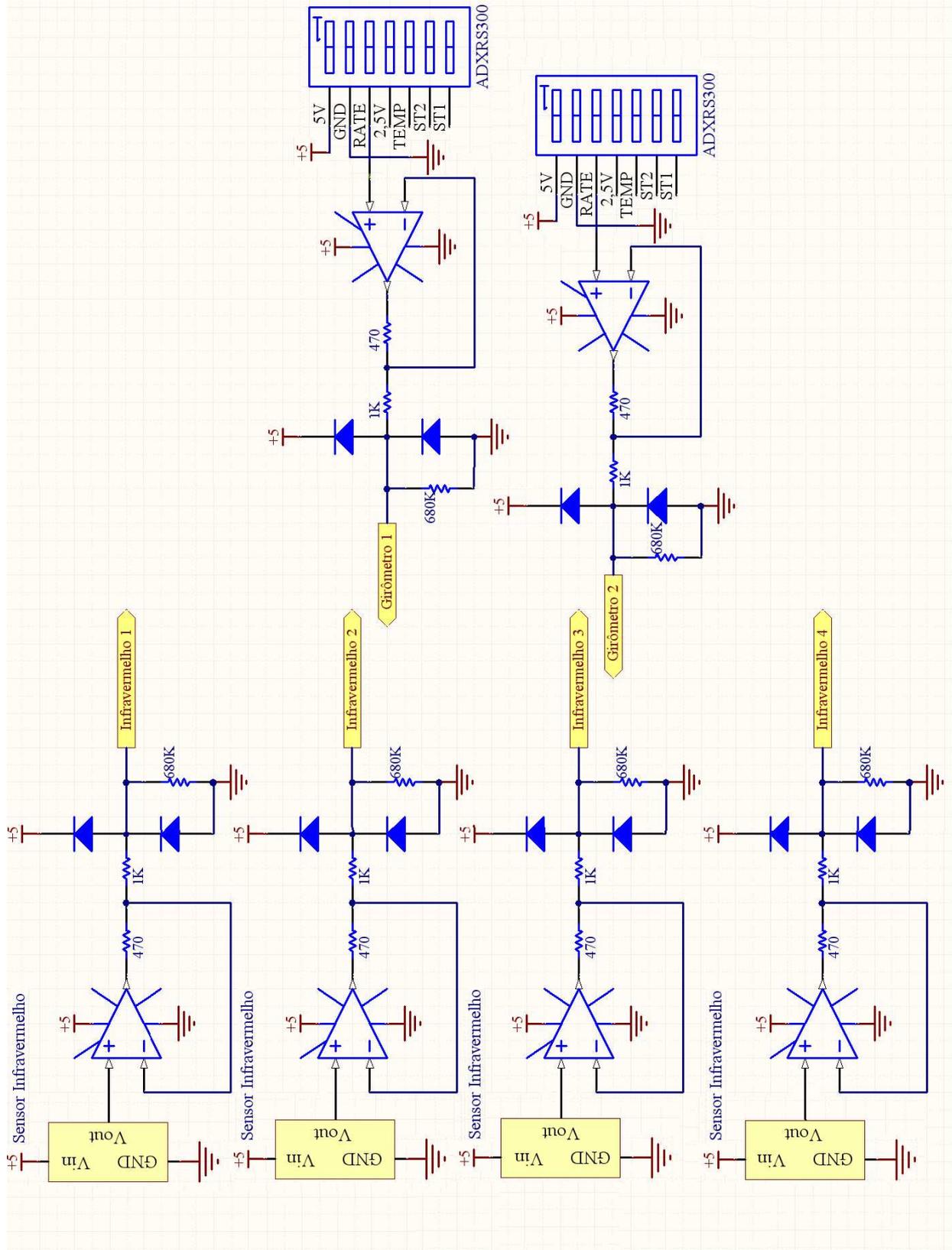


Figura I.1: Placa de sensores inerciais e opticos

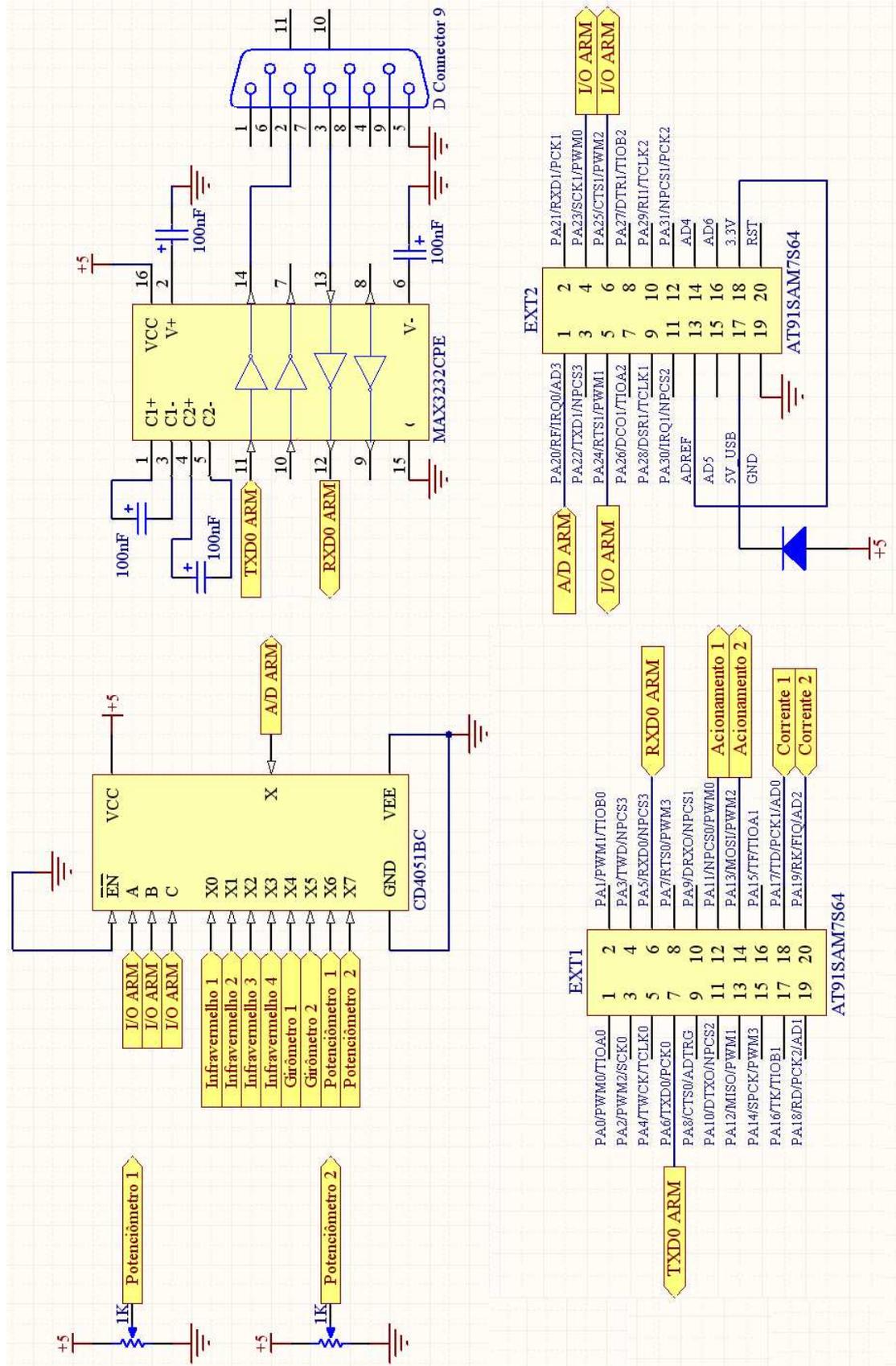


Figura I.2: Placa de controle e transmissão de dados

II. SISTEMA SUPERVISÓRIO

O sistema supervisorio, descrito pela Fig. II.1, recebe a mensagem mandada pelo microcontrolador com o bloco *Query Instrument* e separa-a em informações pelo desmembramento em variáveis simbolizado pelo bloco de *To Sample*. Algumas variáveis passam por uma subtração por uma constante, este procedimento se deve às variáveis em questão serem transmitidas apenas com números positivos. Essa subtração trata de trazer a variável à referência original do projeto. As variáveis são transmitidas em números inteiros, sem casas decimais, portanto, na transmissão são multiplicadas para que as casas decimais não sejam perdidas. Consequentemente, divide-se as variáveis pelo mesmo número de multiplicação na transmissão afim de mantê-las na unidade original. Os dados podem ser vistos em gráficos construídos nos osciloscópios virtuais do Simulink ou pelos displays de cada variável.

Para utilizar o sistema supervisorio, deve-se rodar o programa do Simulink até que o sistema fique aguardando a recepção de algum dado. Após esta situação, as alimentações de todo o sistema da prótese devem ser ligadas. Automaticamente, todos os dados vão sendo armazenados em tabelas e mostrados graficamente nos osciloscópios e nos displays a medida que são recebidos em tempo real.

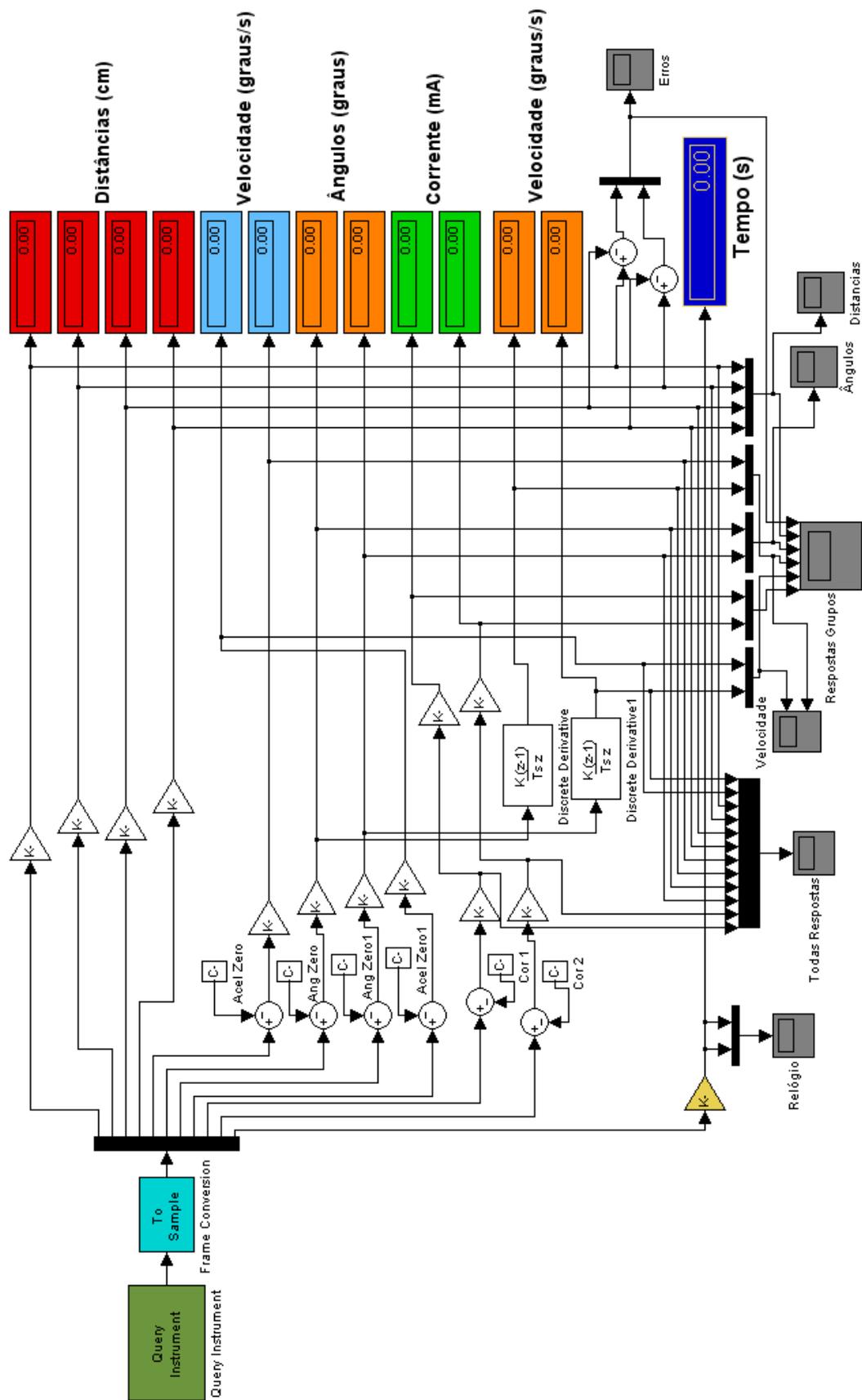


Figura II.1: Sistema supervisor de dados pelo Simulink

III. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD

O CD em anexo apresenta o código da programação do microcontrolador AT91SAM7S64 implementado em linguagem C e produzido no WinARM. As figuras e fotos utilizadas no trabalho editadas no programa Gimp sendo disponibilizadas em pasta indicada, assim como os vídeos dos experimentos.

- /arm/ - código utilizado para a aquisição de dados, acionamento de motores, controle, comunicação e transmissão de dados via RS-232
- /figs/ - figuras e fotos utilizadas neste trabalho
- /matlab/ - sistema supervisorio em tempo real via RS-232 realizado no Simulink e dados obtidos na supervisão
- /videos/ - vídeos de experimentações de mudança de orientação do solo