

MODELAMENTO E CONTROLE DE UM ROBÔ DE UMA PERNA

Alexandre Schammas



Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Glauco A. P. Caurin

São Carlos
1999

Class.	TESE-EEEC
Curr.	5248
Tombo	187/99

31100007810

S/S 1060 838

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S299m Schammas, Alexandre
Modelamento e controle de um robô de uma perna /
Alexandre Schammas. -- São Carlos, 1999.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Glauco Augusto de Paula
Caurin.

1. Dinâmica passiva. 2. Robôs de pernas.
3. Sistemas dinamicamente estáveis. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **ALEXANDRE SCHAMMASS**

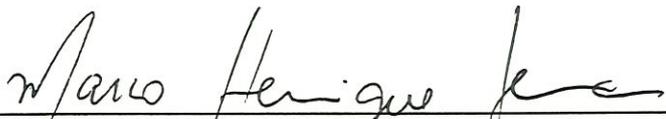
Dissertação defendida e aprovada em 14.06.1999
pela Comissão Julgadora:



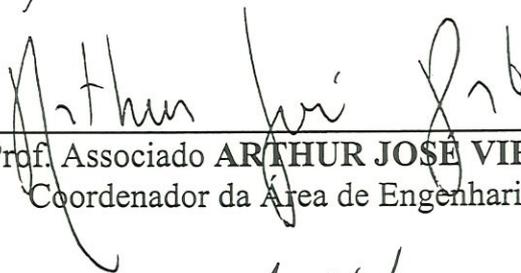
Prof. Doutor **GLAUCO AUGUSTO DE PAULA CAURIN (Orientador)**
(Universidade de Mogi das Cruzes)



Prof. Doutor **MARIO FRANCISCO MUCHERONI**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **MARCO HENRIQUE TERRA**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



JOSÉ CARLOS A CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Ao Prof. Glauco, pela amizade e pela orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de pesquisa fornecida durante os dois anos de mestrado, permitindo a realização deste trabalho.

E aos demais colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC/USP, e em especial ao Prof. Mário Mucheroni e Prof. Marco Terra, pela colaboração.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE SÍMBOLOS	viii
RESUMO	xv
<i>ABSTRACT</i>	xvi
1. INTRODUÇÃO	1
<hr/>	
1.1. Motivação	1
1.2. Tipos de locomoção por pernas	2
1.2.1. Locomoção estaticamente estável	2
1.2.2. Locomoção ativamente estabilizada	3
1.2.3. Locomoção passivamente estabilizada	4
1.2.4. Locomoção auto-estabilizada	6
1.3. Dinâmica passiva	6
1.4. Motivação para dinâmica passiva na locomoção por pernas	7
1.4.1. Autonomia	7
1.4.2. Dinâmica passiva na caminhada e na corrida	7
1.4.3. Dinâmica passiva na natureza	8
1.5. Objetivo e organização do trabalho	9
2. MODELAMENTO DE UM ROBÔ DE UMA PERNA	12
<hr/>	
2.1. Modelo do robô com perdas de energia	13
2.2. Modelo do robô simplificado	16

3. CONTROLE DE UM ROBÔ DE UMA PERNA	18
<hr/>	
3.1. Controle vertical através da compensação das perdas de energia	19
3.2. Controle horizontal – velocidade e atitude	25
3.2.1. Método 1 – posicionamento do pé	26
3.2.2. Método 2 – posicionamento do pé e controle de atitude	28
3.3. Critérios para o projeto dos controladores	31
3.3.1. Controlador para a fase de vôo	32
3.3.2. Controlador para a fase de <i>stance</i>	33
4. CORRIDA DINAMICAMENTE PASSIVA CONTROLADA	35
<hr/>	
4.1. Corrida dinamicamente passiva	36
4.1.1. Oscilação do quadril	36
4.1.2. Oscilação vertical	37
4.1.3. Acoplamento entre o tempo de <i>stance</i> e a velocidade longitudinal	38
4.1.4. Seleção dos parâmetros físicos e das condições iniciais	40
4.2. Controle baseado na dinâmica passiva	42
4.2.1. Controle vertical simplificado	44
4.2.2. Tempo de locomoção	45
4.2.3. Controle de velocidade	47
4.2.4. Controle de atitude	49
5. CONTROLE COM REDUÇÃO DA ENERGIA CONSUMIDA	51
<hr/>	
6. SIMULAÇÕES E RESULTADOS	54
<hr/>	
6.1. Controle vertical através da compensação das perdas de energia	55
6.2. Controle horizontal – velocidade e atitude	58
6.2.1. Método 1 – posicionamento do pé	58
6.2.2. Método 2 – posicionamento do pé e controle de atitude	59
6.3. Validação e desempenho dos controladores	62

6.3.1. Validação dos modelos lineares utilizados no projeto dos controladores	62
6.3.2. Desempenho do controlador	65
6.3.3. Influência dos controladores na velocidade longitudinal	67
6.4. Corrida dinamicamente passiva	68
6.5. Controle da corrida dinamicamente passiva	70
6.6. Desempenho do controle com redução no consumo de energia	73
6.7. Energia consumida pelo atuador do quadril	75

7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS	77
--	-----------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
-----------------------------------	-----------

APÊNDICE – EQUAÇÕES E VALORES NUMÉRICOS DOS MODELOS UTILIZADOS

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Tipos de locomoção por pernas	2
FIGURA 2 – Estabilidade estática	3
FIGURA 3 – Modelos propostos por McGeer	5
FIGURA 4 – Caminhada e corrida passivas	8
FIGURA 5 – Elasticidade nos mamíferos	9
FIGURA 6 – Organização do trabalho	10
FIGURA 7 – Modelo do robô de uma perna mais completo	14
FIGURA 8 – Modelo do robô de uma perna simplificado	17
FIGURA 9 – Esquema geral da estratégia proposta por Raibert	18
FIGURA 10 – Fases de locomoção durante o ciclo de pulo	21
FIGURA 11 – Controle vertical baseado na compensação das perdas de energia	22
FIGURA 12 – O método 1 para o controle horizontal	27
FIGURA 13 – O método 2 para o controle horizontal	29
FIGURA 14 – Trajetória simétrica do robô durante o <i>stance</i>	29
FIGURA 15 – Posicionamento do pé do robô em relação ao ponto neutro	30
FIGURA 16 – Princípio da corrida dinamicamente passiva	35
FIGURA 17 – Acoplamento do tempo de <i>stance</i> e a velocidade longitudinal	39
FIGURA 18 – Esquema geral da corrida dinamicamente passiva controlada	43
FIGURA 19 – Controle vertical simplificado	44
FIGURA 20 – Uma oscilação completa da perna em função do tempo de locomoção	46
FIGURA 21 – Configuração da perna para correção do ângulo de contato	48
FIGURA 22 – Controle de velocidade durante o vôle	49
FIGURA 23 – Oscilação ideal para o ângulo da perna	51

FIGURA 24 – Controle horizontal com redução no consumo de energia	53
FIGURA 25 – Regulagem da altura do pulo a partir do repouso	55
FIGURA 26 – Plano de fase durante o ciclo limite	56
FIGURA 27 – Controle vertical para uma seqüência de pulos	57
FIGURA 28 – Controle horizontal através do método 1	58
FIGURA 29 – Controle horizontal através do método 2	60
FIGURA 30 – Controle de velocidade utilizando o método 2	61
FIGURA 31 – Controle de uma seqüência de velocidades utilizando o método 2	62
FIGURA 32 – Simulação para validar o modelo linear durante o vôo	63
FIGURA 33 – Resultados da validação do modelo linear durante o vôo	64
FIGURA 34 – Resultado da validação do modelo linear durante o <i>stance</i>	65
FIGURA 35 – Desempenho do controlador durante o vôo	66
FIGURA 36 – Desempenho do controlador durante o <i>stance</i>	67
FIGURA 37 – Velocidade longitudinal e definição dos parâmetros de desempenho geral	68
FIGURA 38 – Resultado da corrida dinamicamente passiva	69
FIGURA 39 – Resultado da corrida dinamicamente passiva controlada	70
FIGURA 40 – Desempenho do controlador, durante o vôo, utilizado na corrida dinamicamente passiva controlada	71
FIGURA 41 - Desempenho do controlador, durante o <i>stance</i> , utilizado na corrida dinamicamente passiva controlada	72
FIGURA 42 – Controle de velocidade utilizando a estratégia baseada no movimento passivo do quadril	73
FIGURA 43 – Desempenho do controlador baseado na dinâmica inversa simplificada	74
FIGURA 44 – Energia consumida pelo atuador do quadril	75
FIGURA 45 - Energia consumida pelo atuador do quadril nas fases de vôo e <i>stance</i>	76

LISTA DE SÍMBOLOS

B_G	- amortecimento do solo para o modelo mais completo
B_{L2}	- amortecimento do fim de curso do modelo mais completo
$C(s)$	- função transferência do controlador utilizado no modelo mais completo
E_f	- energia total do modelo mais completo durante o vôo
E_H	- energia necessária para o modelo mais completo pular a uma altura H
E_{lo-}	- energia total do modelo mais completo um pouco antes da decolagem
$E_{lo,perna}$	- perda de energia do modelo mais completo na decolagem
E_s	- energia total do modelo mais completo durante o <i>stance</i>
$E_{td,perna}$	- perda de energia do modelo mais completo no contato
e_{θ}	- erro do ângulo da perna do modelo simplificado
e_{θ_1}	- erro do ângulo da perna do modelo mais completo
e_{θ_2}	- erro do ângulo do corpo do modelo mais completo
$e_{\theta_{1,2}}$	- erro do ângulo do quadril do modelo mais completo
e_{ϕ}	- erro do ângulo do corpo do modelo simplificado
g	- aceleração gravitacional
$G(s)$	- função transferência do modelo mais completo linearizado
H	- altura do pulo medida a partir do pé do modelo mais completo
$H(s)$	- função transferência do modelo mais completo linearizado (malha fechada)
I_1	- momento de inércia da perna do modelo mais completo
I'_1	- momento de inércia da perna do modelo mais completo calculado em relação ao quadril

I_2	- inércia do corpo do modelo mais completo
I'_2	- momento de inércia do corpo do modelo mais completo calculado em relação ao quadril
I_e	- momento de inércia efetivo para a oscilação do quadril do modelo mais completo
J_b	- momento de inércia do corpo do modelo simplificado
J_e	- momento de inércia efetivo para a oscilação do quadril do modelo simplificado
J_l	- momento de inércia da perna do modelo simplificado
k_0	- comprimento de repouso da mola da perna do modelo mais completo
K_1	- ganho de correção da velocidade longitudinal para o modelo mais completo
K_2	- ganho de correção do ângulo do corpo para o modelo mais completo
K_3	- ganho de correção da velocidade angular do corpo para o modelo mais completo
KE	- energia cinética do modelo mais completo
K_G	- rigidez do solo para o modelo mais completo
K_H	- rigidez da mola do quadril do modelo mais completo
k_h	- rigidez de mola do quadril do modelo simplificado
K_L	- rigidez da mola da perna do modelo mais completo
k_l	- rigidez de mola da perna do modelo simplificado
K_{L2}	- rigidez do fim de curso do modelo mais completo
k_{norm}	- rigidez normalizada da perna do modelo simplificado
K_{pf}	- ganho proporcional do controlador no <i>stance</i> para o modelo mais completo
k_{pf}	- ganho proporcional do seguidor no vôo para o modelo simplificado
K_{ps}	- ganho proporcional do controlador no vôo para o modelo mais completo
k_{ps}	- ganho proporcional do seguidor no <i>stance</i> para o modelo simplificado
k_v	- rigidez vertical equivalente da perna do modelo simplificado
K_{vf}	- ganho derivativo controlador no <i>stance</i> para o modelo mais completo
k_{vs}	- ganho derivativo do seguidor no <i>stance</i> para o modelo simplificado

K_{vs}	- ganho derivativo do controlador no vôo para o modelo mais completo
k_{vf}	- ganho derivativo do seguidor no vôo para o modelo simplificado
k_x	- ganho de correção da velocidade para o modelo simplificado
m	- massa total ($m_b + m_l$) do modelo simplificado
M_1	- massa da perna do modelo mais completo
M_2	- massa do corpo do modelo mais completo
m_b	- massa do corpo do modelo simplificado
m_l	- massa da perna do modelo simplificado
PE_e	- energia potencial elástica do modelo mais completo
PE_g	- energia potencial gravitacional do modelo mais completo
p_1	- deslocamento do atuador linear da perna do modelo simplificado
r	- comprimento da perna do modelo simplificado
r_0	- comprimento máximo da perna do modelo simplificado
r_1	- distância do centro de massa da perna do modelo mais completo em relação ao quadril
r_2	- distância do centro de massa do corpo do modelo mais completo em relação ao quadril
T_f	- período de vôo
t_{lo}	- instante de decolagem
t_p	- tempo de pico do modelo mais completo linearizado (malha fechada)
t_{r_min}	- tempo de subida mínimo permitido para o modelo mais completo linearizado (malha fechada)
T_s	- período de <i>stance</i>
t_s	- tempo de acomodação do modelo mais completo linearizado (malha fechada)
t_{s_max}	- tempo de acomodação máximo permitido para o modelo mais completo linearizado (malha fechada)
T_{step}	- período do passo
t_{td}	- instante de contato
w	- comprimento da perna do modelo mais completo
x	- posição horizontal do quadril do modelo simplificado em relação ao eixo

	inercial
$\bar{\dot{x}}$	- velocidade longitudinal média do modelo simplificado
x_0	- posição horizontal do pé do modelo mais completo em relação ao eixo inercial
x_1	- posição horizontal do CG da perna do modelo mais completo em relação ao eixo inercial
x_2	- posição horizontal do CG do corpo do modelo mais completo em relação ao eixo inercial
$\dot{x}_{2,d}$	- velocidade longitudinal desejada para o modelo mais completo
x_{CG}	- projeção horizontal do centro de gravidade do modelo mais completo
\dot{x}_d	- velocidade longitudinal desejada para o modelo simplificado
x_{ERR}	- termo corretivo dado pela combinação dos erros da velocidade e ângulo do corpo do modelo mais completo
x_{ft}	- posição horizontal do pé em relação ao quadril do modelo simplificado
$x_{f,td}^*$	- posição horizontal do pé em relação ao quadril do modelo simplificado no contato (movimento passivo)
$x_{f,td,d}$	- posição horizontal do pé em relação ao quadril do modelo simplificado no contato (movimento desejado)
x_{td}	- posição horizontal do pé em relação ao quadril do modelo mais completo no contato
y_0	- posição vertical do pé do modelo mais completo em relação ao eixo inercial
y_1	- posição vertical do CG da perna do modelo mais completo em relação ao eixo inercial
$\dot{y}_{1,lo+}$	- velocidade vertical da perna logo após a decolagem
$\dot{y}_{1,td-}$	- velocidade vertical da perna um pouco antes do contato
y_2	- posição vertical do CG do corpo do modelo mais completo em relação ao eixo inercial
$\dot{y}_{2,lo-}$	- velocidade vertical do corpo um pouco antes da decolagem
$\dot{y}_{2,lo+}$	- velocidade vertical do corpo logo após a decolagem

$\dot{y}_{2,td-}$	- velocidade vertical do corpo um pouco antes do contato
z	- posição vertical do quadril do modelo simplificado em relação ao eixo inercial
z_{1o}	- posição vertical do quadril do modelo simplificado na decolagem
\dot{z}_{1o}	- velocidade vertical do quadril do modelo simplificado na decolagem
z_{td}	- posição vertical do quadril do modelo simplificado no contato
\dot{z}_{td}	- velocidade vertical do quadril do modelo simplificado no contato
z_{td}^*	- velocidade vertical do quadril do modelo simplificado no contato (movimento passivo)
z_{apice}	- posição vertical máxima desejada do quadril do modelo simplificado
z_{max}	- posição vertical máxima do quadril do modelo simplificado no último salto
ΔE_H	- variação de energia necessária para o modelo mais completo pular a uma altura H
ΔE_x	- energia fornecida ao modelo mais completo pelo atuador linear
Δx_s	- distância percorrida durante o <i>stance</i> pelo modelo mais completo
$\Delta \chi$	- deslocamento do atuador linear da perna do modelo mais completo
χ	- posição do atuador linear da perna do modelo mais completo
χ_i	- posição inicial do atuador linear da perna do modelo mais completo
χ_{max}	- limite superior para o deslocamento do atuador linear da perna do modelo mais completo
χ_{min}	- limite inferior para o deslocamento do atuador linear da perna do modelo mais completo
ϕ	- ângulo de orientação do corpo do modelo simplificado
$\hat{\phi}^*$	- amplitude da velocidade angular do corpo do modelo simplificado
$\dot{\phi}_0^*$	- velocidade angular inicial do corpo do modelo simplificado
ϕ_0^*	- ângulo de orientação inicial do corpo do modelo simplificado
ϕ_d	- ângulo desejado para o corpo do modelo simplificado
$\hat{\phi}_d$	- amplitude desejada da oscilação do corpo do modelo simplificado

$\phi_{d,td}$	- ângulo do corpo do modelo simplificado no contato (movimento desejado)
η	- tempo de locomoção
η_f	- tempo de locomoção durante o vôle
η_{lo}	- tempo de locomoção na decolagem
η_s	- tempo de locomoção durante o <i>stance</i>
η_{td}	- tempo de locomoção no contato
θ	- ângulo de orientação da perna do modelo simplificado
$\hat{\theta}^*$	- amplitude da velocidade angular da perna do modelo simplificado
$\hat{\theta}$	- amplitude da oscilação do quadril do modelo simplificado
$\hat{\theta}^*$	- amplitude do ângulo da perna do modelo simplificado
$\dot{\theta}_0^*$	- velocidade angular inicial da perna do modelo simplificado
θ_0^*	- ângulo de orientação inicial da perna do modelo simplificado
θ_1	- ângulo de orientação da perna do modelo mais completo
θ'_1	- ângulo de orientação da perna do modelo linearizado
$\theta_{1,d}$	- ângulo da perna desejado do modelo mais completo
$\theta_{1,td}$	- ângulo da perna do modelo mais completo no contato
θ_2	- ângulo de orientação do corpo do modelo mais completo
θ'_2	- ângulo de orientação do corpo do modelo linearizado
$\theta_{2,d}$	- ângulo do corpo desejado para o modelo mais completo
θ_d	- ângulo desejado para a perna do modelo simplificado
$\hat{\theta}_d$	- amplitude desejada da oscilação da perna do modelo simplificado
$\theta_{d,td}$	- ângulo da perna do modelo simplificado no contato (movimento desejado)
θ_{td}^*	- ângulo da perna do modelo simplificado no contato (movimento passivo)
θ_{td}	- ângulo da perna do modelo simplificado no contato
ρ	- fator de trabalho
τ	- torque aplicado ao quadril dos modelos simplificado e mais completo

τ'	- torque no quadril do modelo linearizado
τ_f	- torque aplicado ao quadril dos modelos simplificado e mais completo durante o <i>stance</i>
τ_s	- torque aplicado ao quadril dos modelos simplificado e mais completo durante o vôo
ω_H	- frequência natural aproximada da oscilação do quadril do modelo mais completo
ω_h	- frequência da oscilação do quadril do modelo simplificado
ω_L	- frequência natural aproximada do movimento vertical do modelo mais completo
ω_l	- frequência natural do movimento vertical do modelo simplificado
ω_n	- frequência natural do modelo mais completo linearizado (malha fechada)
ξ	- fator de amortecimento do modelo mais completo linearizado (malha fechada)

RESUMO

Desenvolvimento de uma nova estratégia de controle para um robô de uma perna visando reduzir a energia consumida pelo sistema. Para isso, duas estratégias de controle são estudadas inicialmente. O modelo consiste de uma perna com elasticidade, um corpo e uma junta torsional como quadril. A primeira estratégia divide o problema de controle em três partes, considerando a altura do pulo, a velocidade longitudinal e a atitude do corpo separadamente. Esta estratégia foi extensivamente validada em simulações e em robôs experimentais, e portanto, é utilizada como base de comparação. A segunda estratégia é baseada na dinâmica passiva, definida como a resposta do sistema sem forças externas, com o objetivo de reduzir o consumo de energia. Este algoritmo é aplicado a um modelo simplificado. Baseado nestes dois algoritmos, a nova estratégia explora também a dinâmica passiva, utilizando um modelo mais sofisticado. Esta estratégia é comparada com o primeiro algoritmo e os resultados mostram uma redução considerável no consumo de energia.

ABSTRACT

This work presents a new strategy to control an one-legged robot aiming to reduce the energy expended by the system. For achieving this, two strategies are studied initially. The model consists of a springy leg, a simple body, and an actuated hinge-type hip. The first control strategy divides the problem in three parts, considering the hopping height, the forward speed, and the body attitude separately. This strategy has been extensively validated by simulations and experimental prototypes, and therefore it can be used as benchmark. The second strategy is based on passive dynamics, defined as system response without external forces, in order to reduce the energy consumption. This algorithm is applied to a simplified model. Based on these two algorithms, the new strategy exploits also the passive dynamics, using a more sophisticated model. This strategy is compared to the first algorithm and the results show considerable reduction of energy consumption.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

A pesquisa em robôs de pernas atrai a comunidade científica pelo grande potencial deste tipo de robô de se adaptar a vários tipos de terrenos, quando comparado aos robôs de rodas. As pernas possuem maior mobilidade que as rodas em terreno acidentado pois utilizam apoios isolados que otimizam o suporte e a tração (TODD, 1985). Outro fator de motivação é a busca de uma melhor compreensão da locomoção por pernas dos seres vivos (ALEXANDER et al., 1982, 1985, 1990; DIMERY et al., 1986; McMAHON, 1985). Os homens e os animais apresentam grande mobilidade e eficiência na locomoção devido ao seu sistema de pernas. Os pesquisadores possuem um grande interesse em produzir máquinas que possam imitar estes movimentos complexos. Além disto, um estudo iterativo da locomoção de sistemas robóticos e biológicos pode acelerar o desenvolvimento de ambas as áreas.

Os robôs com um alto grau de mobilidade são necessários em várias áreas: exploração terrestre e espacial, vigilância ou trabalho em ambientes perigosos, operações policiais, aplicações médicas e entretenimento. Na maioria das aplicações, um robô de pernas funciona como meio de locomoção ou realiza tarefas onde a presença de pessoas pode ser economicamente inviável, arriscada do ponto de vista de segurança, ou mesmo impossível. As aplicações envolvem atividades que são um desafio para os robôs de rodas, como subir e descer escadas, andar em terrenos irregulares e transpor obstáculos. Apesar das pesquisas com robôs de pernas já se estenderem desde a década de 50 (RAIBERT, 1986; TODD, 1985), ainda possuem um longo caminho a percorrerem até viabilizarem a construção de robôs de pernas que sejam ágeis e hábeis (AHMADI, 1998).

1.2. Tipos de locomoção por pernas

Existem diferentes tipos de locomoção por pernas, dependendo de como os robôs são estabilizados (FIGURA 1). Robôs com locomoção estaticamente estável se movem lentamente e possuem uma base de sustentação larga, de maneira que a dinâmica no seu movimento pode ser ignorada. Por outro lado, os robôs dinamicamente estáveis possuem dinâmica significativa e uma base de sustentação pequena. A maioria dos robôs dinamicamente estáveis são controlados por um sistema computacional que calcula como o robô deve se mover (locomoção ativamente estabilizada). Esta dissertação aborda este tipo de locomoção e diferentes estratégias de controle para a estabilizar o sistema. RINGROSE (1997) divide os robôs dinamicamente estáveis que não utilizam um sistema computacional em robôs passivamente estabilizados e auto-estabilizados (FIGURA 1). Os robôs passivamente estabilizados são movimentados pela força da gravidade. Embora os robôs auto-estabilizados são movimentados por atuadores, nenhum sistema computacional ou qualquer outro mecanismo de controle retroalimentado é utilizado.

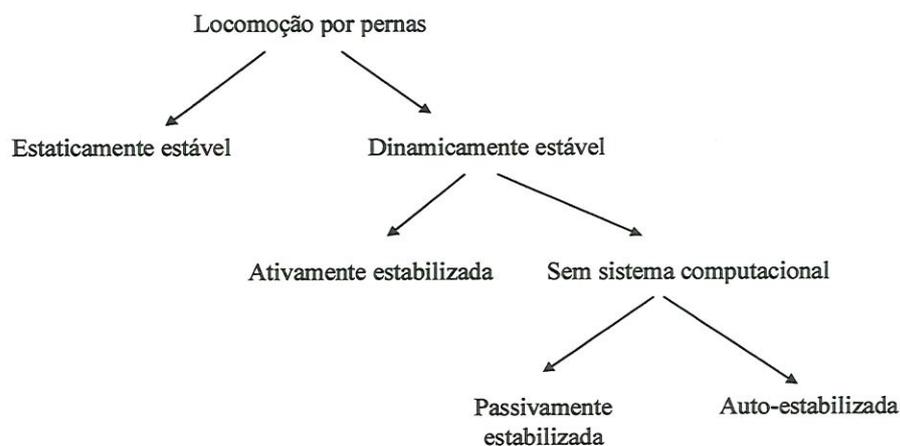


FIGURA 1 - Tipos de locomoção por pernas. Os robôs de pernas são divididos basicamente em robôs estaticamente estáveis e robôs dinamicamente estáveis.

1.2.1. Locomoção estaticamente estável

Para analisar a estabilidade de um robô de pernas, é comum definir um polígono de suporte através dos pontos em que os pés tocam o solo. O robô é estaticamente estável se seu centro de massa permanece no interior deste polígono de suporte (FIGURA 2). Este critério de estabilidade é válido apenas para velocidades

baixas; se o robô atingir uma velocidade suficientemente grande e o centro de massa ficar próximo da extremidade do polígono de suporte (limite¹), o robô pode virar e cair. Como resultado, os robôs estaticamente estáveis possuem uma velocidade máxima razoavelmente baixa. Alguns princípios de equilíbrio, força do pé aplicada e utilização do terreno, são válidos para os robôs dinamicamente estáveis.

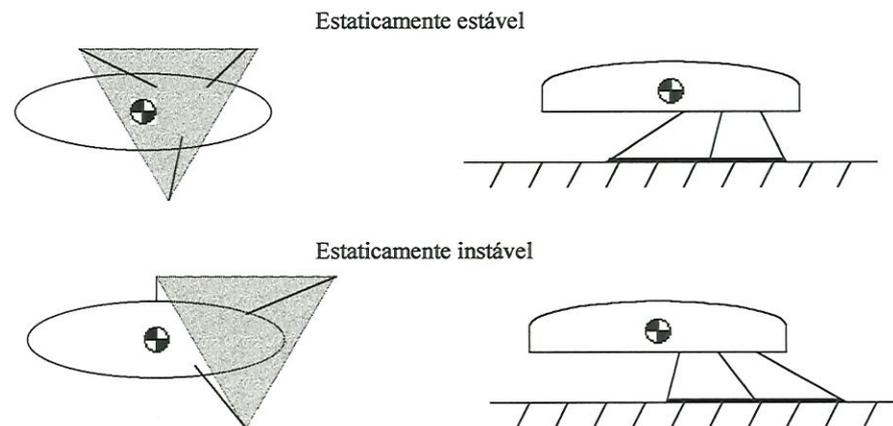


FIGURA 2 - Ilustração de um robô de três pernas dentro e fora do seu polígono de suporte. A figura superior mostra o suporte estaticamente estável. A figura inferior mostra o suporte estaticamente instável.

Como o polígono de suporte é definido pelos pontos de contato dos pés, deve existir pelo menos três pés no solo durante qualquer instante de tempo, incluindo quando um pé está sendo reposicionado para o próximo passo. Portanto, um robô estaticamente estável deve possuir pelo menos quatro pernas. Muitos robôs que andam possuem seis pernas porque as pernas adicionais permitem marchas diferentes e aumentam o tamanho do polígono de suporte. Estas podem também levar a uma tolerância maior a falhas, quando por exemplo as pernas quebram ou seus pés escorregam (RAIBERT, 1986; TODD, 1985).

1.2.2. Locomoção ativamente estabilizada

Durante a corrida, tanto os animais como os robôs utilizam suas pernas como se fossem molas (McMAHON, & CHENG, 1990). Uma pessoa correndo irá pisar com uma perna, armazenar parte de sua energia cinética nos tendões e músculos, e então recuperar esta energia quando desprende-se do solo novamente. Normalmente, a orientação do corpo (atitude) nestes movimentos não é estável.

¹ É importante salientar que a projeção do CG do robô precisa estar fora do polígono por um período de tempo para que o robô tombe, e não apenas por um instante.

Como foco deste trabalho, os robôs ativamente estabilizados podem ser estudados através de um sistema de uma única perna. Os robôs de uma perna não são estaticamente estáveis, e portanto, a estabilidade dinâmica pode ser estudada exclusivamente. Além disso, como o sistema possui apenas uma perna, o problema de acoplamento dinâmico entre as pernas é evitado (FRANCOIS & SAMSON, 1994; RAIBERT, 1984; RAIBERT et al., 1984; SCHWIND & KODITSCHECK, 1995). Um método de estabilizar ativamente um robô de uma perna é considerar sua atitude, velocidade, e altura dos pulos separadamente. Enquanto o pé está em contato com o solo (fase de *stance*), o torque aplicado ao quadril controla a atitude do corpo. A posição do pé, no momento em que o robô toca o solo (contato), controla a velocidade. A perna é projetada para se portar como uma mola em série com um atuador de deslocamento, que estendendo-se ou encurtando-se durante a fase de *stance*, controla a altura do pulo (RAIBERT, 1984, 1986). Esta estratégia de controle é apresentada detalhadamente no Capítulo 3.

KODITSCHKEK & BUHLER (1991), considerando um robô de uma perna simplificado, analisaram e mostraram que existem marchas de período 1 e período 2 além de proporem um controle para tal movimento (MICHALSKA et al., 1996; RAD et al., 1993). M'CLOSKEY et al. (1990); M'CLOSKEY & BURDICK (1991); OSTROWSKI & BURDICK (1993); VAKAKIS et al. (1991) estenderam o modelo de Koditschek e Bühler, simplificando algumas considerações. Dado parâmetros apropriados, o monópode exibirá um movimento de pulo com qualquer período desejado ou um movimento caótico. Esta análise se baseia no fato de que o monópode, confinado a um movimento vertical, possui essencialmente um grau de liberdade. A altura máxima de um determinado pulo determina completamente o resto do pulo, incluindo o tempo em que o atuador da perna deve estender-se.

1.2.3. Locomoção passivamente estabilizada

Se um robô for projetado adequadamente, é possível locomover-se passivamente pela simples iteração da gravidade com a inércia, sem atuadores, sem sensores, e sem sistema computacional. McGEER (1989) apresenta a simulação de uma máquina que corre. Em McGEER (1990), também é apresentado uma máquina física que anda através da dinâmica passiva. A respeito de seu trabalho, McGeer

concebe a essência da caminhada: um conjunto de movimentos simples gerados por um mecanismo simples.

A máquina de McGeer, que caminha através da dinâmica passiva, desce uma rampa utilizando uma marcha de um pêndulo invertido, ilustrado na FIGURA 3a. Esta máquina consiste de duas pernas conectadas por um pino (quadril), restrito ao um plano. Esta pode inclinar-se para frente e girar, mas não pode inclinar-se ou girar para os lados. Permanecendo vertical, o robô cai para frente. Em uma descida não muito íngreme, dado as condições iniciais apropriadas, o robô irá colocar uma perna de cada vez. O momento irá empurrar uma perna para traz enquanto a outra perna é movimentada para frente e se posiciona para o próximo movimento de queda. A descida gradual compensa a perda de energia pelo amortecimento. Com comprimento e massa da perna corretos, este movimento é estável.

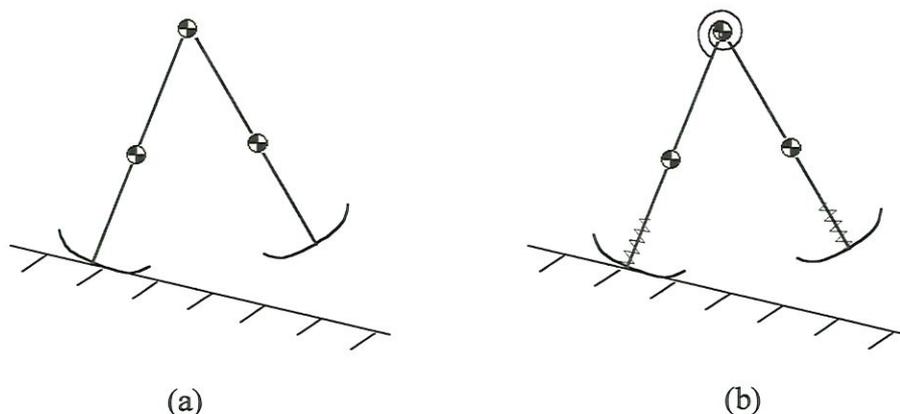


FIGURA 3 – Os dois modelos propostos por McGeer. (a) Caminhada passivamente estabilizada e (b) corrida passivamente estabilizada.

A simulação da corrida passivamente estabilizada proposta por McGEER (1989) é similar ao seu robô que anda com estabilidade passiva, exceto que as pernas e o quadril possuem molas (FIGURA 3b). As molas das pernas permitem que se pule com os pés, de maneira bem similar ao robô bípede proposto por HODGINS et al. (1986). A mola no quadril propulsiona a perna para frente para continuar correndo. Novamente, com as constantes de mola, comprimento e massa da perna apropriadas, este tipo de mecanismo pode correr estavelmente (McGEER, 1989).

O conceito de corrida dinamicamente passiva tem sido utilizado na área de robótica, onde máquinas que pulam tiram proveito dos elementos de elasticidade para eficiência na corrida. As primeiras máquinas utilizando este conceito

(RAIBERT, 1986), foram basicamente uma massa e uma mola oscilando em um plano vertical. RAIBERT & THOMPSON (1989) sugeriram a adição de uma mola torsional ao quadril de um robô de uma perna, proporcionando a perna um movimento de balanço passivo. Este trabalho mostrou através de simulações que, se fornecido os parâmetros físicos do robô e suas condições iniciais corretas, o modelo do robô pularia varias vezes antes de cair, apesar do movimento sem controlador ser instável.

A idéia da dinâmica passiva, como aplicada no quadril, inspirou AHMADI & BUEHLER (1995, 1997a, 1997b); AHMADI (1998) a realizarem um estudo no controle da corrida dinamicamente passiva. Estes trabalhos propõem uma abordagem de controle (corrida dinamicamente passiva controlada) explorando a dinâmica passiva com o objetivo de diminuir o consumo de energia (GREGORIO et al., 1994, 1997). O estudo da corrida dinamicamente passiva e esta abordagem de controle são apresentadas no capítulo 4.

1.2.4. Locomoção auto-estabilizada

Um robô auto-estabilizado não possui sistema computacional para controlá-lo, porém, possui atuadores que realizam um ciclo fixo e repetitivo. Nos estudos realizados por RINGROSE (1997), foi assumido que cada atuador opera em série com uma mola na sua junta e um amortecedor em paralelo à combinação mola-atuador. Existe apenas um sinal sincronizador como entrada e o atuador possui uma função fixa de deslocamento em relação ao sinal de sincronismo. Foi mostrado neste trabalho que um robô construído propriamente e com as funções apropriadas pode correr de uma maneira estável.

1.3. Dinâmica passiva

Do ponto de vista energético, a maneira mais eficiente de criar um movimento desejado, é gerá-lo de forma passiva utilizando características do próprio mecanismo, ou seja, o movimento é obtido sem o auxílio de forças externas. Ao longo deste trabalho este conceito é denominado dinâmica passiva. O conceito é uma idealização, e é evidente que na presença da dissipação de energia do mundo real, não pode ser alcançada exatamente. Além disso, um sistema dinamicamente passivo ideal, sem

perdas de energia e sem adição de energia de controle, não pode ser estável (AHMADI, 1998).

Os movimentos dinamicamente passivos estão presentes no cotidiano. A idéia de explorar tais movimentos tem sido utilizada no desenvolvimento de mecanismos que produzem um movimento periódico. Por exemplo, o pêndulo de um relógio gera um movimento passivo periódico. Uma mola em série com uma lamina vibrando de um aparelho de barbear é projetada para uma frequência de ressonância de 60 Hz, igual à sua frequência de excitação. Na ressonância, é necessário o mínimo esforço de excitação para se manter uma certa amplitude nas vibrações. Outros exemplos são observados quando as crianças estão balançando ou pulando com um pula-pula.

1.4. Motivação para dinâmica passiva na locomoção por pernas

1.4.1. Autonomia

Os robôs dinamicamente estáveis oferecem uma maior eficiência devido à sua configuração mais simples, peso mais baixo e velocidades mais altas. Porém, estes robôs (LEBAUDY et al., 1993; HODGINS et al., 1986; RAIBERT & BROWN, 1984; RAIBERT et al., 1984, 1986) ainda possuem muitos sensores, atuadores e componentes eletrônicos atuando como dissipadores de energia (AHMADI, 1998). Para alcançar autonomia de energia – uma necessidade para todos os robôs móveis – a energia deve ser utilizada cuidadosamente. Atingir uma alta eficiência de energia é particularmente desafiador nos robôs de pernas. Isto ocorre pois existe grande troca de energia nos movimentos internos como no movimento vertical do corpo e na oscilação da perna. Como estes movimentos não contribuem diretamente para a mobilidade, a energia utilizada para produzi-los deve ser minimizada.

1.4.2. Dinâmica passiva na caminhada e na corrida

Como um pêndulo que produz um movimento periódico num ciclo de energia cinética e potencial, os movimentos periódicos internos necessários na caminhada e na corrida podem ser produzidos eficientemente como ciclos de energia cinética e potencial.

As marchas de caminhada e corrida na locomoção por pernas são diferentes maneiras que o corpo explora a dinâmica passiva. Tradicionalmente, a corrida se distingue da caminhada por possuir uma fase de vôo, definida como o período em

que a perna não está em contato com o solo. Uma maneira mais confiável de se distinguir a caminhada da corrida é através da altura no meio da fase de *stance* (*mid-stance*) (McMAHON, 1985). No *mid-stance*, o robô está andando se o corpo se encontra em sua altura máxima e se este se encontra em sua altura mínima, o robô está correndo (FIGURA 4).

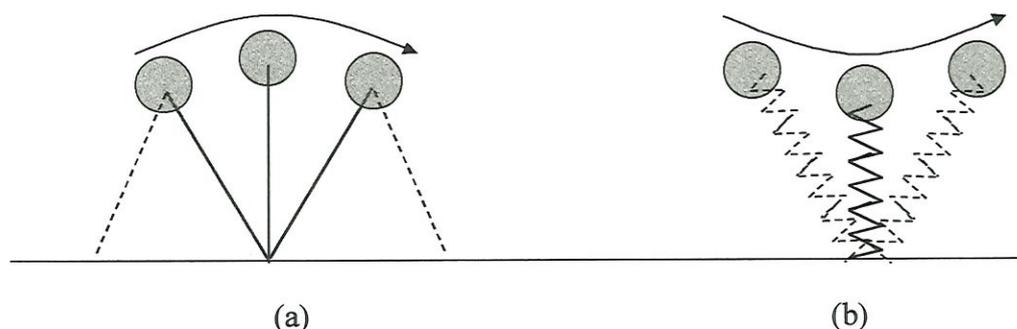


FIGURA 4 - (a) Movimento dinamicamente passivo da perna na caminhada – altura máxima no *mid-stance* (pêndulo invertido). (b) Movimento dinamicamente passivo da perna – altura mínima no *mid-stance* na corrida (sistema massa-mola).

1.4.3. Dinâmica passiva na natureza

Muitos animais exploraram a dinâmica passiva e procuram reduzir consideravelmente o metabolismo na corrida utilizando as propriedades elásticas de seus músculos, tendões e ossos (ALEXANDER et al., 1982, 1985; DIMERY et al., 1986; McMAHON, 1985).

Um exemplo é o pulo do canguru. Os músculos equivalentes a molas, localizados no joelho, possuem um importante papel na eficiência do movimento do canguru (ALEXANDER, 1985). Na verdade, a elasticidade do músculo possui três papéis para o corpo. Pode funcionar como armazenador de energia, produzir um movimento de retorno ou agir como um isolador nos impactos com o solo (ALEXANDER, 1990).

O princípio de massa-mola da perna, como ilustrado na FIGURA 4, é utilizado em mamíferos, incluindo humanos, cangurus e quadrúpedes. Neste princípio, as molas são os tendões (FIGURA 5a) dos músculos da perna e os ligamentos no pé (FIGURA 5b) (ALEXANDER, 1982). Os tendões possuem boas propriedades elásticas: testes dinâmicos para uma grande faixa de frequências mostram que estes

recobram, através de sua capacidade elástica, 93% do trabalho realizado para esticá-las.

Em mamíferos quadrúpedes (ALEXANDER, 1990), a *fascia lata* (FIGURA 5c) pode ser considerada uma mola de retorno para a perna traseira com função semelhante a mola no quadril do robô de McGeer (FIGURA 3b). Consiste de uma folha de fibras com propriedades elásticas como a dos tendões e se estende pela coxa, conectando seu músculo à tibia (o principal osso da parte inferior da perna). A *fascia lata* possui a função de parar o movimento para traz da perna e movimentá-la para frente.

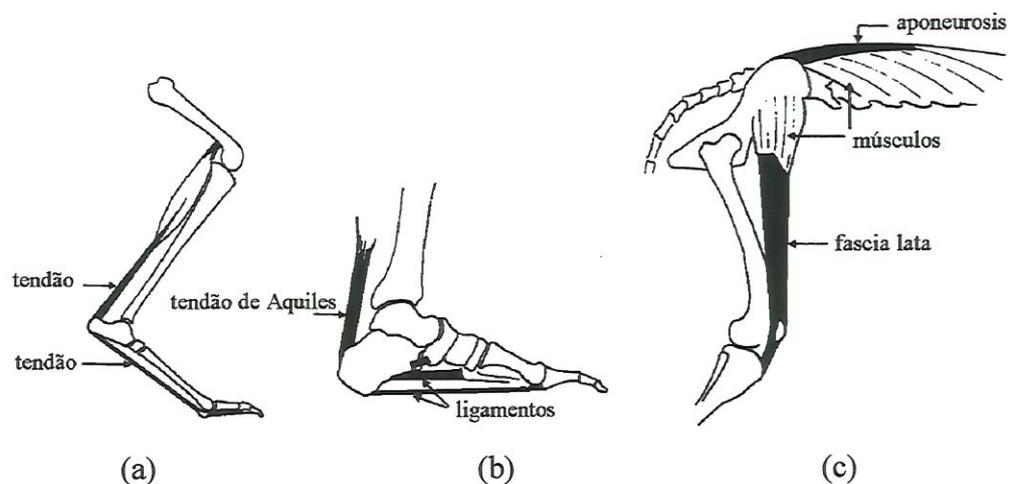


FIGURA 5 - Elasticidade nos mamíferos: (a) Tendões importantes na perna do canguru. (b) Ligamentos no pé humano, e o tendão de Aquiles. (c) *Fascia lata* e *longissimus aponeurosis* do cachorro. Figura extraída de ALEXANDER (1990).

Os movimentos passivos causados pela elasticidade dos músculos, tendões e ossos ajudam os animais a nadar, voar e correr. Os detalhes de como os músculos podem ser modelados como molas, amortecedores e atuadores, e o efeito desta flexibilidade são descritos em McMAHON (1985).

1.5. Objetivo e organização do trabalho

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma estratégia para o controle de um robô de uma perna com o objetivo de reduzir o consumo de energia. Para isto, duas estratégias são estudadas inicialmente. A primeira estratégia é baseada no algoritmo proposto por RAIBERT (1984) que serve de uma base importante para comparações

com outros algoritmos pois foi testado extensamente em simulações (RAIBERT, 1984, 1986; RAIBERT & WIMBERLY, 1984) e experimentalmente (RAIBERT & BROWN, 1984; RAIBERT et al., 1984). A segunda estratégia aborda um algoritmo proposto por AHMADI & BUEHLER (1995, 1997) que explora os aspectos da dinâmica passiva de um modelo simplificado, visando diminuir o consumo de energia. No entanto, este algoritmo apresenta alguns problemas de implementação que motivam o desenvolvimento de uma nova estratégia. Esta estratégia também é baseada na dinâmica passiva e utiliza o modelo mais completo da primeira estratégia com uma mola do quadril. Desta forma, é possível comparar os dois algoritmos em relação ao desempenho e a energia consumida. Conforme ilustrado na FIGURA 6, o trabalho é organizado da seguinte forma:

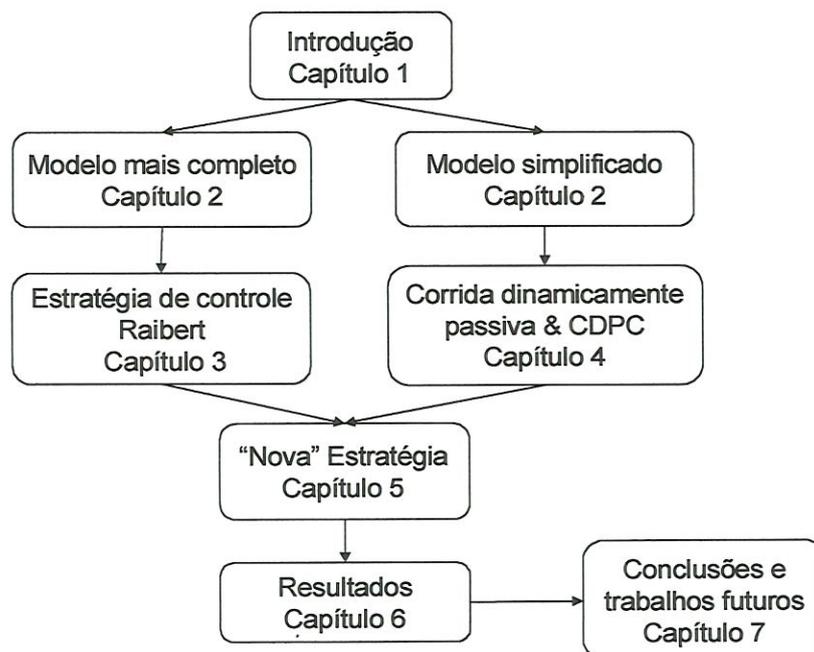


FIGURA 6 – Organização do trabalho em relação aos capítulos da dissertação.

O capítulo 2 apresenta dois modelos para o robô de uma perna. Ambos consistem de uma perna com elasticidade, um corpo e uma junta torsional como quadril. O modelo mais completo considera as perdas de energia no contato com o solo e será utilizado pelas estratégias de controle apresentadas nos capítulos 3 e 5. O modelo mais simplificado não considera perdas de energia e possui o centro de massa localizado no quadril. Este modelo é utilizado no estudo da corrida

dinamicamente passiva e na corrida dinamicamente passiva controlada apresentados no capítulo 4.

O capítulo 3 apresenta uma estratégia de controle proposta primeiramente por RAIBERT (1984) que divide o problema de controle em três partes: altura dos pulos, velocidade longitudinal e atitude do corpo sem considerar o acoplamento entre estas partes. No controle horizontal, é proposto dois métodos diferentes para controlar a velocidade e a atitude.

O capítulo 4 apresenta o estudo da corrida dinamicamente passiva e a estratégia de controle baseada nesta dinâmica (AHMADI & BUEHLER, 1995, 1997). Um modelo simplificado do robô é utilizado para encontrar as condições iniciais que resultam no movimento do robô sem atuadores. Através deste estudo, é então abordada a corrida dinamicamente passiva controlada (CDPC). Neste capítulo, são mostrados também os problemas deste algoritmo aplicado ao modelo mais completo.

O capítulo 5 apresenta a nova estratégia de controle, também baseada na dinâmica passiva, para a redução no consumo de energia. Este algoritmo é uma extensão da estratégia apresentada no capítulo 3, utilizando alguns princípios da segunda estratégia. Como o controle foi aplicado ao modelo mais completo, foi possível comparar as estratégias dos capítulos 3 e 5 em relação ao desempenho e à energia consumida.

O capítulo 6 apresenta as simulações e os resultados para as três estratégias de controle apresentadas nos capítulos 3, 4 e 5. Para a primeira estratégia de controle, são apresentados os resultados do controle horizontal e vertical separadamente. Em relação à corrida dinamicamente passiva, são apresentados os resultados do modelo simplificado sem controle, apenas considerando o movimento passivo com as condições iniciais apropriadas. Posteriormente, são apresentados os resultados da estratégia baseada na corrida dinamicamente passiva para velocidades diferentes. Finalmente, são apresentados os resultados da nova estratégia em relação ao desempenho e consumo de energia. Estes resultados são comparados com os da estratégia de Raibert (Capítulo 3).

O Capítulo 7 apresenta a discussão dos resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros.

2. MODELAMENTO DE UM ROBÔ DE UMA PERNA

Um robô de pernas é formado por um conjunto de pernas e um corpo ao qual estas estão conectadas. Nos seres humanos e outros animais, o corpo possui muitos graus de liberdade cujas ações aperfeiçoam o desempenho e a versatilidade. Estender as costas, por exemplo, aumenta consideravelmente a largura do passo para os quadrúpedes corredores (RAIBERT, 1986). Do ponto de vista mecânico, a característica mais importante do corpo é possuir uma massa que deve ser equilibrada sobre as pernas. Forma-se então, uma estrutura na qual é aplicado um torque para a movimentação do corpo.

As pernas realizam fundamentalmente duas tarefas durante a locomoção: mudam o seu comprimento e a sua orientação em relação ao corpo. Isto ocorre em sistemas que apresentam diferentes tipos de marchas (engatinhar, andar, correr e pular) e que possuem duas, quatro ou mais pernas. Uma perna muda seu comprimento para impulsionar o corpo, amortecer o impacto com o solo, reduzir seu próprio momento de inércia e aumentar o seu espaço livre quando move-se para frente.

Quando a perna é encurtada, a energia é armazenada nos músculos e nos tendões (propriedades elásticas), e quando a perna é estendida, parte desta energia é recuperada. As pernas também oscilam de tal maneira que os pés sejam posicionados precisamente em relação ao centro de gravidade do sistema e mudando assim o seu momento angular.

Neste capítulo são apresentados dois modelos para um robô de uma perna. Em ambos os casos, o modelo possui uma única perna elástica que se articula em relação ao corpo através de uma junta rotacional simples no quadril. Como existe apenas uma perna, o equilíbrio dinâmico é diretamente estudado, evitando os problemas de acoplamento entre as pernas e várias fases de suporte. As oscilações verticais são estudadas utilizando um modelo que inclui massa, mola e posição do atuador.

Considera-se somente o caso plano, evitando assim os efeitos da dinâmica tridimensional.

Em cada modelo, é adicionada uma mola torsional ao quadril. Deste modo, pode-se estudar as vantagens da elasticidade não apenas da perna, mas também no quadril.

Na Seção 2.1. é apresentado o modelo do robô de uma perna, considerando as perdas de energia no contato com o solo e com o fim de curso. Este modelo foi utilizado por RAIBERT (1984) para a análise, simulação e implementação de sua estratégia de controle apresentada no Capítulo 3. Este modelo foi extensivamente validado através de simulações e experimentos (RAIBERT) e por isso será utilizado como base para comparar as estratégias de controle apresentadas nos capítulos 4 e 5.

A Seção 2.2. apresenta um modelo mais simplificado que o da Seção 2.1. Este modelo considera os centros de massa da perna e do corpo coincidentes e localizados no quadril, além de desconsiderar as perdas de energia no contato com o solo. Este modelo é utilizado no Capítulo 4 como base para o estudo da corrida dinamicamente passiva e a estratégia de controle baseada nesta dinâmica (AHMADI & BUEHLER, 1995).

2.1. Modelo do robô com perdas de energia

Como ilustrado na FIGURA 7, o modelo possui uma única perna elástica que se articula em relação ao corpo sob uma junta rotacional simples no quadril. Um atuador é localizado nesta junta, exercendo um torque τ , entre o corpo e a perna. O corpo é representado por uma massa rígida, na qual a perna está conectada. A perna possui uma massa M_1 , com momento de inércia I_1 , e o corpo possui massa M_2 , com momento de inércia I_2 . O centro de massa da perna é localizado a distância r_1 da extremidade inferior da perna (pé do robô). O centro de massa do corpo é localizado a uma distância r_2 acima do quadril. Para estudar os efeitos da elasticidade no quadril no Capítulo 5, é utilizado uma variação deste modelo com uma mola torsional no quadril de rigidez K_H .

O comprimento total da perna é influenciado por uma mola, um atuador de posição em série com a mola e um fim de curso. A mola da perna é modelada com

uma de suas extremidades rigidamente conectada ao pé e com outra extremidade fixa a um lado do atuador. O fim de curso é modelado como uma mola muito rígida e um amortecedor. A mola e o fim de curso são arranjados de tal modo que a mola apenas gera forças quando $(w - \chi) < k_0$, e o fim de curso apenas atua quando $(w - \chi) > k_0$, como ilustrado na FIGURA 7. As constantes de elasticidade e de amortecimento do fim de curso, K_{L2} e B_{L2} , são escolhidas de tal maneira que as vibrações que ocorrem entre o corpo e a perna decaiam em poucos ciclos quando o fim de curso é atingido.

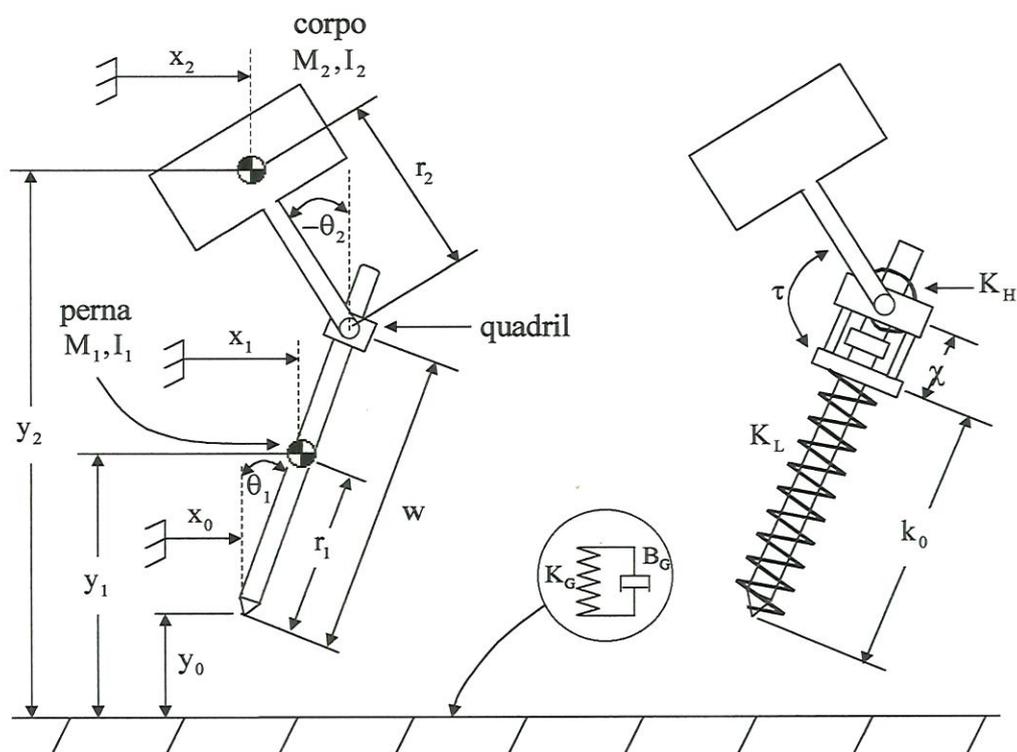


FIGURA 7 - Modelo do robô de uma perna para análise e simulação. O corpo e a perna são conectados por uma junta onde o torque é gerado. A perna consiste de uma mola em série com o atuador de posição. A superfície de suporte é elástica em duas dimensões. O modelo é restrito ao movimento no plano. As equações de movimento e os parâmetros do modelo utilizados na simulação são apresentadas no Apêndice. A figura é baseada em RAIBERT (1984).

O atuador de posição, cujo deslocamento é representado por χ , é arranjado em série com a mola da perna, atuando entre a perna e o quadril. As mudanças no deslocamento do atuador fazem com que a energia armazenada na mola da perna aumente ou diminua. O tempo de resposta do atuador é levado em consideração.

Além de assumir uma trajetória quadrática ao longo do tempo, o atuador possui o seu curso limitado em $\chi_{\min} < \chi < \chi_{\max}$, com $\chi_{\min} > 0$.

A importância desta configuração do atuador, mola e fim de curso é que quando o robô está em contato com o solo (*stance*), a atuação rítmica do atuador pode excitar a frequência de ressonância do sistema massa-mola formado pelo corpo e a perna. Como a amplitude desta oscilação cresce, o sistema deixa o solo e começa a pular.

A superfície de suporte é modelada como uma elasticidade K_G , e amortecimento B_G bi-dimensional. Uma dimensão da mola atua verticalmente e a outra horizontalmente sem nenhuma interação entre as duas. A elasticidade e o amortecimento do solo influenciam o robô apenas quando o pé está em contato com o solo, $y_0 < 0$. Durante o voo, os coeficientes da mola e do amortecedor são nulos e portanto as forças de contato são também nulas. Cada vez que o pé toca o solo (contato), a posição de repouso da mola horizontal do solo é reajustada para a posição de contato. Foi assumido também que a rigidez do solo é muito maior do que a rigidez da perna, $K_G \gg K_L$. O coeficiente de amortecimento é escolhido de forma que as vibrações entre o pé e o solo sejam desprezíveis, enquanto que o coeficiente de atrito entre o pé e o solo é assumido como grande o suficiente para que o escorregamento nunca ocorra. Este modelo elástico do solo representa tanto as elasticidades presentes na superfície de suporte como as encontradas no pé.

As equações de movimento do modelo em relação às coordenadas inerciais foram deduzidas utilizando o princípio de d'Alembert. O sistema de equações diferenciais não-linear é apresentado no Apêndice. Estas equações descrevem o comportamento do sistema para as fases de *stance* e de voo através das forças descontínuas geradas pelo contato com o solo.

Simulações foram realizadas utilizando este modelo com as estratégias de controle abordadas nos capítulos 3 e 5 e os resultados são apresentados no Capítulo 6. Utilizando o mesmo modelo, é possível realizar comparações de desempenho e energia consumida entre as estratégias. Os parâmetros numéricos adotados para o modelo são apresentados no Apêndice.

2.2. Modelo do robô simplificado

Para estudar a corrida dinâmica passiva (Capítulo 4), utilizou-se um modelo de uma perna, como na seção anterior. Porém, para este modelo (FIGURA 8), foi adotado um número adicional de hipóteses simplificadoras.

Conforme ilustrado na FIGURA 8, o modelo possui um corpo de massa m_b e momento de inércia J_b , em relação ao quadril, e uma perna de massa m_1 e momento de inércia J_1 , também em relação ao quadril. O modelo possui duas molas. A mola do quadril, com rigidez k_h , atua entre a perna e o corpo, exercendo um torque sobre o eixo do quadril. A mola da perna, com rigidez k_l , não possui massa e exerce força somente durante o *stance*.

Conforme apresentado por RAIBERT & THOMPSON (1989) e por AHMADI & BUEHLER (1997), foram feitas hipóteses simplificadoras desprezando as perdas por atrito, massa do pé, pré-carga da mola e considerando o centro de massa total do sistema localizado na junta do quadril.

O modelo do robô possui quatro graus de liberdade durante a fase de vôo, incluindo a posição cartesiana do quadril x, z ; o ângulo do corpo em relação a horizontal ϕ ; e o ângulo da perna em relação à vertical θ . Durante o *stance*, o número de graus de liberdade é três, incluindo o comprimento total da perna r ; o ângulo do corpo ϕ ; e o ângulo da perna θ . A massa da mola é desprezível e sua força é axial. Existem dois atuadores, um atuador de deslocamento linear p_1 em série com a mola da perna e um atuador de torque τ no quadril. Ao contrário do modelo apresentado na seção anterior, o contato com o solo é modelado como uma junta rotacional entre o pé e o solo. Portanto, deduziu-se equações de movimento diferentes para as fases de vôo e de *stance*.

As equações de movimento do modelo em relação às coordenadas inerciais foram deduzidas utilizando o método de Lagrange. As equações e os valores numéricos utilizados nas simulações são apresentados no Apêndice.

Simulações foram realizadas utilizando este modelo com a estratégia de controle abordada no Capítulo 4 e os resultados são apresentados no Capítulo 6 (Seção 6.5). Apesar do modelo ser simplificado, este considera aspectos importantes da dinâmica passiva da locomoção.

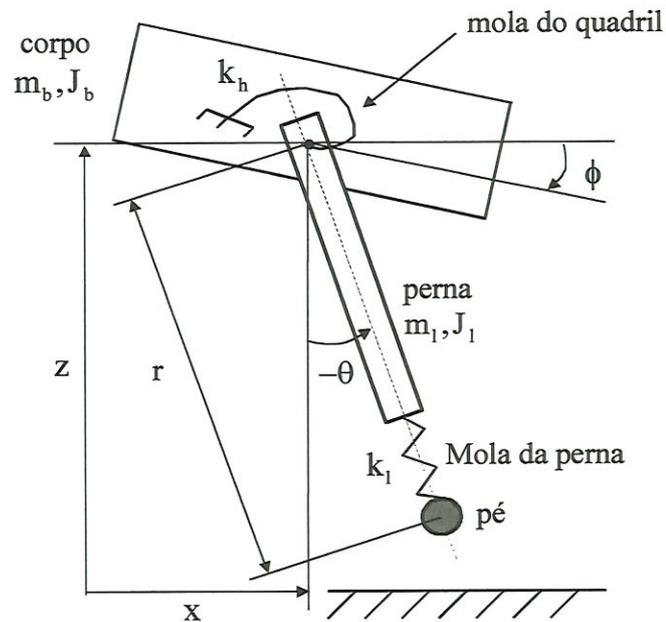


FIGURA 8 - Modelo do robô de uma perna simplificado. Despreza-se as perdas por atrito, massa do pé, pré-carga da mola e considera-se o centro de massa total do sistema localizado na junta do quadril. O modelo possui duas molas. A mola do quadril, com rigidez k_h , atuando entre a perna e o corpo e a mola da perna, com rigidez k_l . O modelo é restrito ao movimento no plano.

3. CONTROLE DE UM ROBÔ DE UMA PERNA

A abordagem de controle explorada neste capítulo é baseada no modelo de uma perna mais completo (Seção 2.1). Esta estratégia trata o movimento vertical, a velocidade longitudinal, e atitude do corpo como três problemas de controle separados conforme é ilustrado na FIGURA 9.

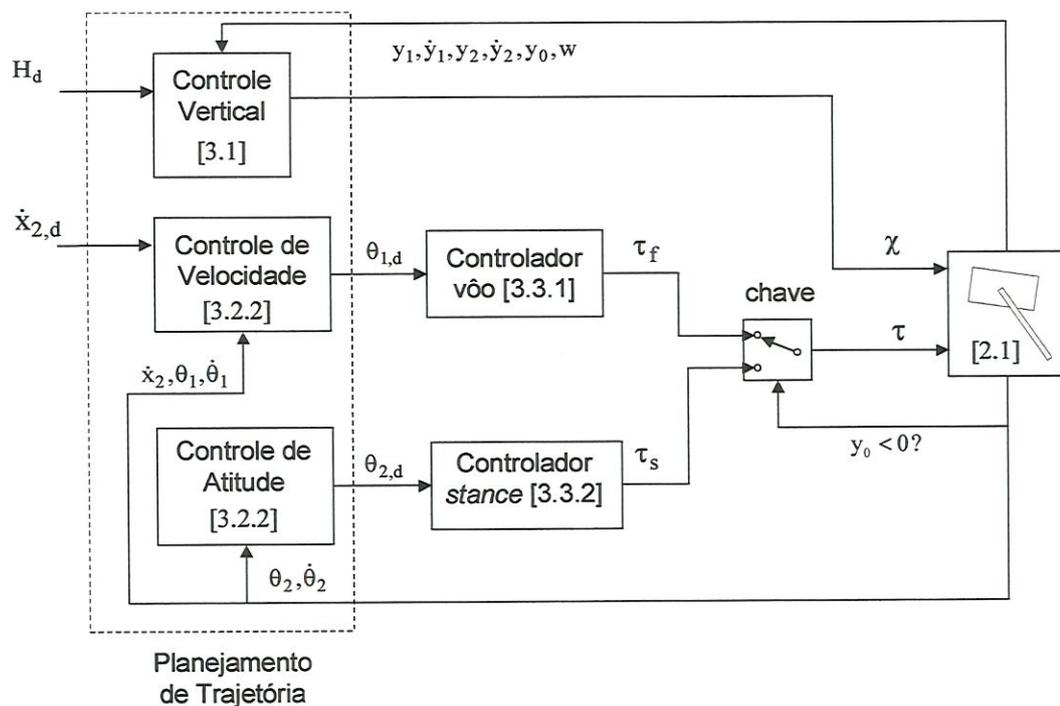


FIGURA 9 – Esquema geral da estratégia de controle dividida em três partes. O controle vertical regula a altura dos pulos do robô para um valor desejado. A velocidade é controlada, posicionando o pé em relação ao quadril quando o robô está no ar. Durante o período em que o robô se encontra no solo, o controle de atitude entra em ação, mantendo o corpo com postura vertical. Os controladores são utilizados para seguir os ângulos gerados por cada parte do controle horizontal. O número entre chaves representa o número da seção que aborda cada bloco.

A primeira parte do controle excita o movimento vertical do robô e regula sua altura através do impulso gerado pelo atuador da perna em cada pulo. A segunda

parte do controle estabiliza a velocidade longitudinal do robô, estendendo o pé (ponto de contato) para frente em uma posição que fornecerá a aceleração necessária durante o *stance*. A terceira parte do controle mantém o corpo em atitude vertical, atuando no quadril durante o *stance*. Estas três partes do sistema de controle são sincronizadas em função dos eventos do robô. Decompondo o problema desta maneira, considera-se o fraco acoplamento entre estes movimentos. Para o robô realizar as trajetórias dos ângulos determinadas pelo planejamento de trajetória (FIGURA 9), é utilizado um controlador para cada parte do controle horizontal (controles de velocidade e atitude). Estes controladores são chaveados em função do contato do robô com o solo.

3.1. Controle vertical através da compensação das perdas de energia

Para sintetizar a estratégia, esta foi dividida em dois conjuntos de algoritmos. Um conjunto controla a velocidade longitudinal, permitindo que o sistema locomova-se mantendo o corpo em sua postura vertical. Este conjunto é denominado controle horizontal, o qual será descrito mais detalhadamente na próxima seção. Esta seção discute o algoritmo que controla o movimento vertical. Este gera uma oscilação ressonante que inicia o pulo a partir do repouso e controla sua altura.

Quando o atuador é estendido durante o *stance*, realiza-se um trabalho positivo no sistema comprimindo a mola da perna e acelerando a massa do corpo para cima. Quando o atuador é contraído, realiza-se um trabalho negativo no sistema. Portanto, é possível adicionar energia ao sistema em um determinado número de ciclos estendendo o atuador durante o *stance* e o encurtando durante o vôo. Mudando a fase destas ações é possível remover energia do sistema.

Durante o *stance*, o modelo é aproximadamente um oscilador massa-mola com frequência natural:

$$\omega_L \cong \sqrt{\frac{K_L}{M_2}} \quad (3.1)$$

Durante os pulos repetitivos, cada intervalo de *stance* T_s possui duração de aproximadamente:

$$T_s \cong \frac{\pi}{\omega_L} = \pi \sqrt{\frac{M_2}{K_L}} \quad (3.2)$$

Durante a fase de vôo, o modelo é um oscilador massa-gravidade. Um ciclo completo de pulo possui período T_{step} :

$$T_{step} \cong \pi \sqrt{\frac{M_2}{K_L}} + \sqrt{\frac{8H}{g}} \quad (3.3)$$

onde K_L é a rigidez da mola da perna, H é a altura do pulo medida a partir do pé e g a aceleração da gravidade.

Uma função importante do movimento vertical é estabelecer um ciclo regular no qual o controle horizontal possa ser utilizado. Ao contrário da roda, a perna muda seu ponto de suporte de maneira descontínua. Para realizar esta tarefa, a perna deve estar descarregada. Portanto, para um sistema de pernas equilibrar-se e locomover-se longitudinalmente, devem existir períodos de suporte e períodos onde o pé está livre para mover-se. Esta alternância entre as fases (FIGURA 10) é observada em todos sistemas de pernas. Para o sistema utilizado neste capítulo, a alternância entre as fases aparece no ciclo do pulo. A FIGURA 10 ilustra quatro eventos bem definidos no ciclo do pulo.

- Decolagem: Instante no qual o pé perde o contato com o solo,
- Ápice: Instante durante o vôo quando o corpo atinge a altura máxima,
- Contato: Instante em que o pé faz o contato com o solo,
- *Bottom*: Instante durante o *stance* quando o corpo atinge a altura mínima.

Estes eventos, detectados através do comportamento das variáveis de estado, são utilizados para determinar quatro estados distintos.

O controle vertical deve iniciar o pulo, controlar a altura de pulo e finalizar o pulo. Estas tarefas podem ser alcançadas regulando a energia de oscilação do sistema massa-mola formado pela perna elástica e a massa do corpo. O pulo é iniciado excitando o oscilador mola/massa através do atuador de posição até que a energia do sistema seja suficientemente grande para superar a gravidade, o pé deixa o solo e começa a pular. Neste ponto, o sistema se torna um oscilador massa-mola/massa-gravidade.

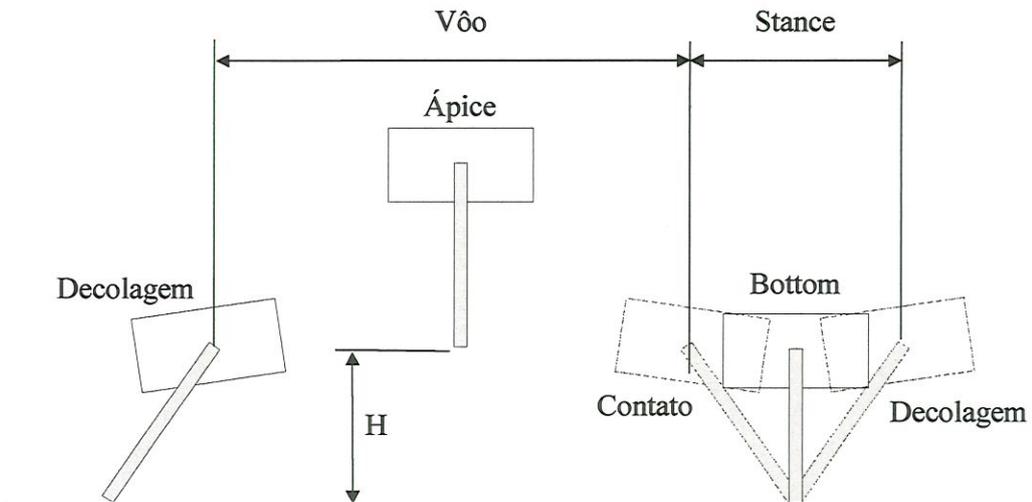


FIGURA 10 - Fases de locomoção durante o ciclo de pulo. Na fase de vôo, o pé não está em contato o solo descrevendo uma trajetória balística. No *stance*, o pé está em contato com o solo e a mola da perna se encontra comprimida. O início da fase de vôo e da fase de *stance* são denominados decolagem e contato respectivamente. Os instantes de máximo e mínimo da altura do corpo são denominados ápice e *bottom*.

Conforme ilustra a figura 11, a altura do pulo pode ser controlada através da energia do sistema. Para o caso simplificado, no qual o movimento é basicamente vertical, o ângulos e velocidades angulares da perna e do corpo, θ_1 , $\dot{\theta}_1$, θ_2 e $\dot{\theta}_2$ são desprezadas. A energia total do sistema no *stance* é então dada por:

$$\begin{aligned}
 E_s = & PE_g(\text{corpo}) + PE_g(\text{perna}) + KE(\text{corpo}) + KE(\text{perna}) + \\
 & PE_e(\text{corpo}) + PE_e(\text{perna}) \\
 E_s = & M_1gy_1 + M_2gy_2 + \frac{1}{2}M_1\dot{y}_1^2 + \frac{1}{2}M_2\dot{y}_2^2 + \\
 & \frac{1}{2}K_L(k_0 - w + \chi)^2 + \frac{1}{2}K_Gy_0^2
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

onde PE_g é a energia potencial gravitacional, PE_e é a energia potencial elástica, KE é a energia cinética, g é a aceleração da gravidade, k_0 é o comprimento de repouso da mola da perna e K_G é a rigidez do solo onde $K_G = 0$ para $y_0 > 0$. As demais variáveis são definidas na FIGURA 7 do Capítulo 2. As energias gravitacionais são escolhidas de tal forma que sejam nulas quando a mola está em repouso e o pé apenas toca o solo.

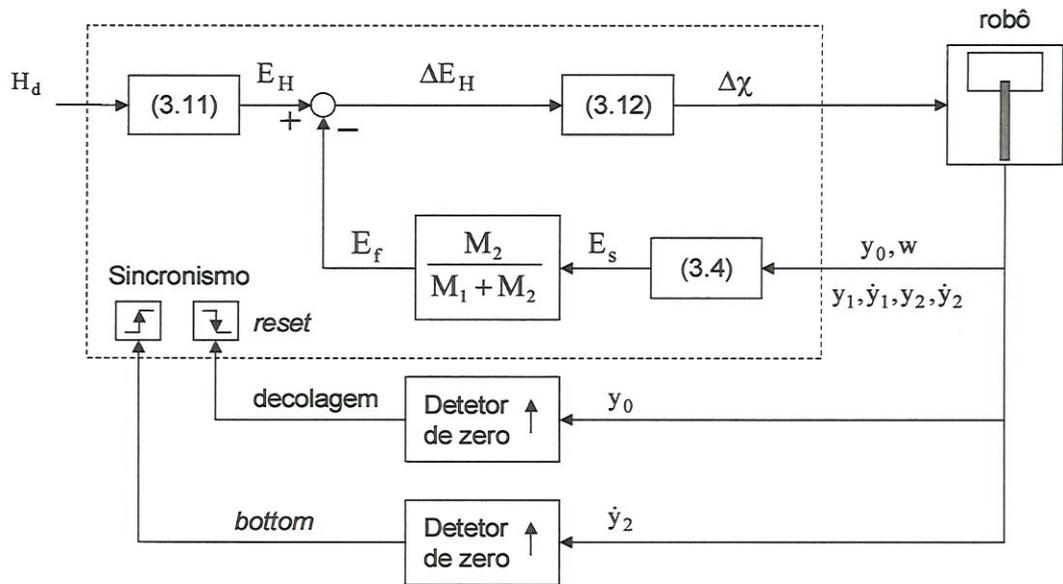


FIGURA 11 - Controle vertical baseia-se na compensação das perdas de energia. A energia necessária para se atingir H_d é calculada. Esta energia é subtraída pela energia para o período de vôo estimada a partir da energia medida no *stance*. A diferença de energia ΔE_H é então convertida em termos do deslocamento do atuador. Os movimentos do atuador são sincronizados através da identificação dos eventos do robô. O atuador estende-se na posição de *bottom* e se encurta logo após a decolagem. O número entre parênteses representa o número da equação associada ao bloco.

As perdas significativas de energia ocorrem em dois eventos no ciclo do pulo, no contato e na decolagem. No contato, a perna é levada abruptamente ao repouso, dissipando sua energia cinética através do amortecimento do solo:

$$E_{td,perda} = KE(\text{perna}) = \frac{1}{2} M_1 \dot{y}_{1,td-}^2 \quad (3.5)$$

onde $\dot{y}_{1,td-}$ é a velocidade vertical da perna um pouco antes do contato.

Na decolagem, uma fração da energia cinética do sistema é dissipada. Esta fração pode ser calculada equacionando o momento linear do sistema um pouco antes e logo depois da decolagem. Como a perna está em repouso durante o *stance*, sua velocidade vertical é nula. Quando a perna se estende totalmente durante o *stance*, o robô deixa o solo, acelerando a perna que estava em repouso para $\dot{y}_{1,lo+}$. Após a decolagem, a perna e o corpo se movem com a mesma velocidade vertical ($\dot{y}_{1,lo+} = \dot{y}_{2,lo+}$). Equacionado o momento linear antes e depois da decolagem:

$$\dot{y}_{2,lo+} = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \dot{y}_{2,lo-} \quad (3.6)$$

Substituindo (3.6) em (3.4), deduz-se as energias cinéticas antes e depois da decolagem. A perda associada é portanto:

$$E_{lo,perda} = \frac{M_1}{M_1 + M_2} KE_{lo-} = \frac{M_1 M_2}{2(M_1 + M_2)} \dot{y}_{2,lo-}^2 \quad (3.7)$$

onde KE_{lo-} é a Energia cinética total um pouco antes da decolagem e $\dot{y}_{2,lo-}$ é a velocidade vertical do corpo um pouco antes da decolagem.

A razão $M_2 / (M_1 + M_2)$ representa uma eficiência fundamental da perna e é maximizada quando a razão da massa da perna e a massa do corpo é minimizada. Isto pode ser obtido minimizando a massa não elástica da perna. Para compensar as perdas, o controlador vertical opera o atuador de posição para aumentar a energia vertical. Quando χ muda de χ_i para $\chi_i + \Delta\chi$, com $w < k_0$, ocorre então uma mudança de energia:

$$\Delta E_x = K_L \left[\frac{1}{2} \Delta\chi^2 + \Delta\chi(\chi_i - w + k_0) \right] \quad (3.8)$$

A energia é removida quando o $\Delta\chi$ é negativo. Para um dado $\Delta\chi$, a magnitude de ΔE_x depende do comprimento da perna e da posição do atuador. O maior trabalho é realizado quando a mola está totalmente comprimida. Portanto, estendendo o atuador no *bottom* e o encurtando durante o vôo faz com que a energia vertical total aumente. Por outro lado, encurtando o atuador no *bottom* e o estendendo durante o vôo faz com que a energia diminua.

Se a mola da perna assume seu repouso durante o vôo, toda a energia é potencial gravitacional quando $\dot{y}_2 = 0$, no ápice de cada pulo. É possível, portanto, prever a altura do próximo pulo em qualquer instante durante o *stance*. Sendo toda energia na decolagem da forma cinética,

$$E_{lo-} = KE_{lo-} = E_s \quad (3.9)$$

a perda desta energia na decolagem é conhecida da eq. (3.7). Desprezando o amortecimento do solo e a resistência do ar, a energia total durante o vôo é obtida em termos das variáveis disponíveis durante o *stance*. Combinando (3.7) e (3.4), obtém-se:

$$E_f = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \left[M_1 g y_1 + M_2 g y_2 + \frac{1}{2} (M_1 \dot{y}_1^2) + \frac{1}{2} (M_2 \dot{y}_2^2) + \frac{1}{2} (K_L (k_0 - w + \chi)^2) + \frac{1}{2} (K_G y_0^2) \right] \quad (3.10)$$

Para o sistema pular a uma altura H , a energia vertical total deve ser:

$$E_H = M_1 g (H + r_1) + M_2 g (H + k_0 + r_2) \quad (3.11)$$

Durante o *stance*, a variação de energia ΔE_H necessária para produzir uma altura de pulo H pode ser fornecida ou removida pelo atuador vertical. Através de (3.8), o deslocamento do atuador linear deve ser expresso por (3.12).

$$\Delta \chi = -(\chi - w + k_0) + \sqrt{(\chi - w + k_0)^2 + \frac{2\Delta E_H}{K_L}} \quad (3.12)$$

Simulações foram realizadas para avaliar o desempenho deste algoritmo de controle, utilizando o modelo da Seção 2.1, e os resultados são apresentados na Seção 6.1. Cada vez que ocorre o *bottom* durante o ciclo do pulo, as equações (3.10) e (3.12) são utilizadas para prever o deslocamento do atuador da perna χ para atingir a altura desejada H .

O instante no qual a perna é encurtada, durante o ciclo do pulo, pode ser manipulado para otimizar o pulo de acordo com os diferentes critérios (RAIBERT, 1984).

- Quando a perna é encurtada na decolagem, o espaço livre do pé é otimizado. Isto é importante quando o terreno é irregular ou quando os movimentos da perna durante o vôo são grandes (velocidades longitudinais altas). Encurtando a perna na decolagem, minimiza-se também o momento de inércia da perna durante o vôo de tal maneira que o movimento da perna influa menos no movimento do corpo.
- Quando a perna é encurtada no ápice, o tempo entre as atuações verticais é maximizado. Esta estratégia permite a utilização de atuadores mais lentos.
- Quando a perna é encurtada no contato, as forças de impacto no pé são minimizadas. Esta estratégia é utilizada normalmente por seres humanos quando pulam em um solo plano.

É também possível encolher a perna na decolagem, estender novamente um pouco antes do próximo contato, e encurtar durante o pouso. Esta estratégia, aparentemente utilizada pelos seres humanos quando correm, maximiza o espaço livre do solo e simultaneamente minimiza as forças de impacto no pé. Embora mais energia seja necessária para estes movimentos, a perna pode ser balançada para frente com mais eficiência e com um momento de inércia menor.

3.2. Controle horizontal - velocidade e atitude

A seção anterior discutiu o comportamento vertical do modelo e um método para controlar a altura de pulo. Nesta seção, são abordados a questão do equilíbrio e o controle da velocidade longitudinal. Estes dois fenômenos estão relacionados intimamente. O algoritmo de equilíbrio deve assegurar que não exista nenhum movimento horizontal indesejado contribuindo para que o sistema caia.

Uma característica importante dos sistemas de pernas dinamicamente estabilizados é que estes estão sempre caindo, mas seu sistema de controle garante que estes movimentos sejam controlados. Dois mecanismos podem ser utilizados para controlar o equilíbrio e a locomoção horizontal: o posicionamento do pé e o movimento do quadril. O posicionamento do pé em relação ao centro de massa do robô possui uma grande influencia no movimento horizontal e angular do sistema. Durante o *stance*, a gravidade gera um momento em relação ao pé proporcional a distância entre a projeção horizontal do centro de gravidade do robô e a posição do pé. Assim, o deslocamento do pé pode ser ajustado, durante a fase de vôo de cada pulo, para influenciar a atitude e a velocidade durante o próximo período de *stance*. O movimento do quadril, durante o *stance*, influencia o momento angular total do sistema. Tais movimentos mudam o momento do sistema apenas durante o *stance*, quando existe atrito para segurar o pé em um único ponto no solo.

Esta seção explora dois métodos para o controle do equilíbrio e velocidade. O primeiro método baseia-se somente no posicionamento do pé como um meio de controle de velocidade e atitude, sem nenhum movimento do quadril durante o *stance*. O segundo método utiliza o mesmo posicionamento do pé, porém o controle da atitude é obtido atuando no ângulo do corpo durante o *stance*. Simulações foram

realizadas para os dois métodos e os resultados são apresentados e comparados no Capítulo 6 (Seção 6.2).

3.2.1. Método 1 - Posicionamento do pé

Cada vez que o robô toca o solo, o pé pode ser posicionado horizontalmente para influenciar sua translação e rotação. Quando o robô pula verticalmente no lugar, $(\theta_2 = 0, \dot{\theta}_2 = 0, \dot{x}_2 = 0)$, o movimento do pé em um sentido durante o voo faz com que o corpo translade e gire no outro sentido durante o *stance*. Regras semelhantes se aplicam quando o sistema não está na vertical e estacionário. Portanto, se o ângulo do quadril se mantém fixo durante o *stance*, ou seja $(\theta_2 - \theta_1)_{lo} = (\theta_2 - \theta_1)_{td}$, então o modelo se comporta quase como um pêndulo invertido. Não é exatamente um pêndulo invertido pois a perna encurta durante o *stance*. Para manter este ângulo fixo, utiliza-se um controlador linear dado por:

$$\tau_s = K_{ps} e_{\theta_{1,2}} + K_{vs} \dot{e}_{\theta_{1,2}} \quad (3.13)$$

onde $e_{\theta_{1,2}} = (\theta_2 - \theta_1)_{td} - (\theta_2 - \theta_1)$ é o erro entre o ângulo do quadril de contato e o mesmo ângulo durante o *stance*, e K_{ps} , K_{vs} são os ganhos do controlador. Os valores dos ganhos estão listados no Apêndice. Os critérios para a escolha destes ganhos são apresentadas na Seção 3.3.2.

Conforme ilustrado na FIGURA 12, um algoritmo simples para equilibrar o modelo utiliza uma retroalimentação linear para posicionar o pé. Dois fatores determinam onde o pé deve ser posicionado: a projeção horizontal do centro de gravidade e uma função erro das variáveis de estado. Inicialmente, a projeção do centro de gravidade x_{CG} é calculada através da eq. (3.14). Então, a função linear do erro de estados (3.15) é adicionada em (3.16). A cinemática do modelo é utilizada para calcular um ângulo da perna que posiciona o pé. A análise seguinte é realizada no sistema de coordenadas do robô que translada com o quadril:

$$x_{CG} = \frac{(r_1 - w)M_1 \text{sen}(\theta_1) + r_2 M_2 \text{sen}(\theta_2)}{M_1 + M_2} \quad (3.14)$$

Calculando a combinação dos erros da velocidade e atitude para fornecer a retroalimentação corretiva através da eq. (3.15).

$$x_{ERR} = K_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_{2,d}) + K_2(\theta_2 - \theta_{2,d}) + K_3(\dot{\theta}_2) \quad (3.15)$$

onde $\dot{x}_{2,d}$, $\theta_{2,d}$ são os valores desejados de \dot{x}_2 e θ_2 , e K_1, K_2, K_3 são os ganhos de retroalimentação.

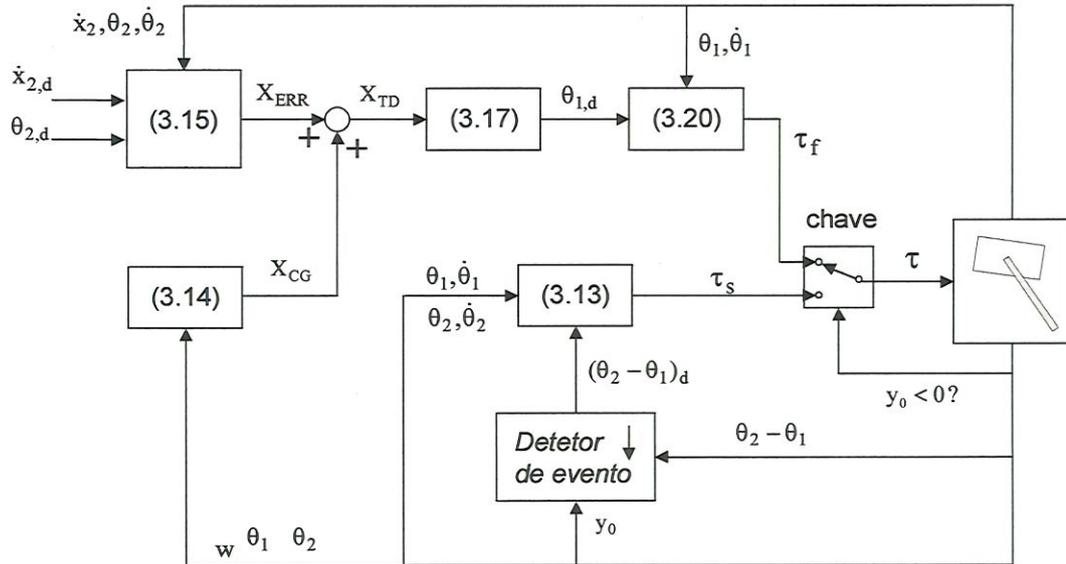


FIGURA 12 – O método 1 para o controle horizontal. Baseia-se em encontrar uma posição de contato para o pé durante o vôo. Esta posição é a soma da projeção do CG e uma função linear do erro da velocidade longitudinal e o ângulo do corpo. Durante o *stance*, um controlador linear fixa o ângulo entre a perna e o corpo, fazendo o robô se comportar semelhante ao um pêndulo invertido. O número entre parênteses representa o número da equação associada ao bloco.

Portanto, a posição do pé no contato é dada por:

$$x_{td} = x_{CG} + x_{ERR} \quad (3.16)$$

Considerando a cinemática abaixo:

$$\theta_1 = -\arcsen\left(\frac{x}{w}\right) \quad (3.17)$$

e substituindo-a em (3.14) e o resultado em (3.16), e resolvendo para a posição do pé em relação ao quadril:

$$x_{td} = w \frac{r_2 M_2 \text{sen}(\theta_2) + (M_1 + M_2) x_{ERR}}{r_1 M_1 + w M_2} \quad (3.18)$$

Portanto, aplicando a cinemática da perna novamente para obter o ângulo da perna correspondente, obtém-se:

$$\theta_{1,td} = -\arcsen\left[\frac{r_2 M_2 \text{sen}(\theta_2) + (M_1 + M_2) X_{ERR}}{r_1 M_1 + w M_2}\right] \quad (3.19)$$

O controlador linear (PD) utilizado para mover a perna a este ângulo é dado pela eq. (3.20).

$$\tau_f = K_{pf} e_{\theta_1} + K_{vf} \dot{e}_{\theta_1} \quad (3.20)$$

onde $e_{\theta_1} = \theta_{1,td} - \theta_1$ é o erro do ângulo da perna. K_{pf} , K_{vf} são os ganhos do controlador. Os critérios para a escolha destes ganhos são apresentados na Seção 3.3.1 e os valores estão listados no Apêndice.

Para a variação do modelo com a mola no quadril, utiliza-se um controlador linear que elimina a influencia da força de mola através da retroalimentação. Este sistema é utilizado para analisar a contribuição da mola na redução da energia consumida. Portanto, o controlador é dado pela eq. (3.21).

$$\tau_f = K_{pf} e_{\theta_1} + K_{vf} \dot{e}_{\theta_1} - K_H (\theta_1 - \theta_2) \quad (3.21)$$

onde K_H é a constante de mola, e K_{pf} , K_{vf} são os mesmos ganhos utilizados no controlador da eq. (3.20).

3.2.2. Método 2 – posicionamento do pé e controle de atitude

O algoritmo de controle de velocidade e atitude (FIGURA 13) é baseado na generalização do posicionamento do pé descrito na seção anterior. Primeiramente, é encontrado o movimento nominal que mantém a velocidade longitudinal constante e o corpo sem girar. Então, modifica-se este movimento para eliminar os desvios. O algoritmo consiste de duas partes: uma parte que posiciona o pé, durante o vôo, para controlar a velocidade longitudinal e outra parte movimenta o quadril, durante o *stance*, para o controle do equilíbrio.

Na natureza, um bípede correndo estende a perna para frente durante o vôo de maneira que o pé toque o solo a uma certa distância a frente do corpo. Durante o *stance*, a perna move-se para traz em relação ao corpo. O pé então deixa o solo a uma certa distância do corpo e o outro pé se estende para frente. Existe uma simetria neste movimento em relação ao ponto localizado no meio do *stance* (*mid-stance*), quando a perna está diretamente sob o centro de gravidade. A FIGURA 14 mostra este diagrama de simetria. Este movimento simétrico não gera momento nem aceleração pois o centro de gravidade gasta aproximadamente o mesmo tempo na frente e atrás

do ponto de suporte. Portanto, o momento médio e a aceleração média são nulos ao longo do *stance*.

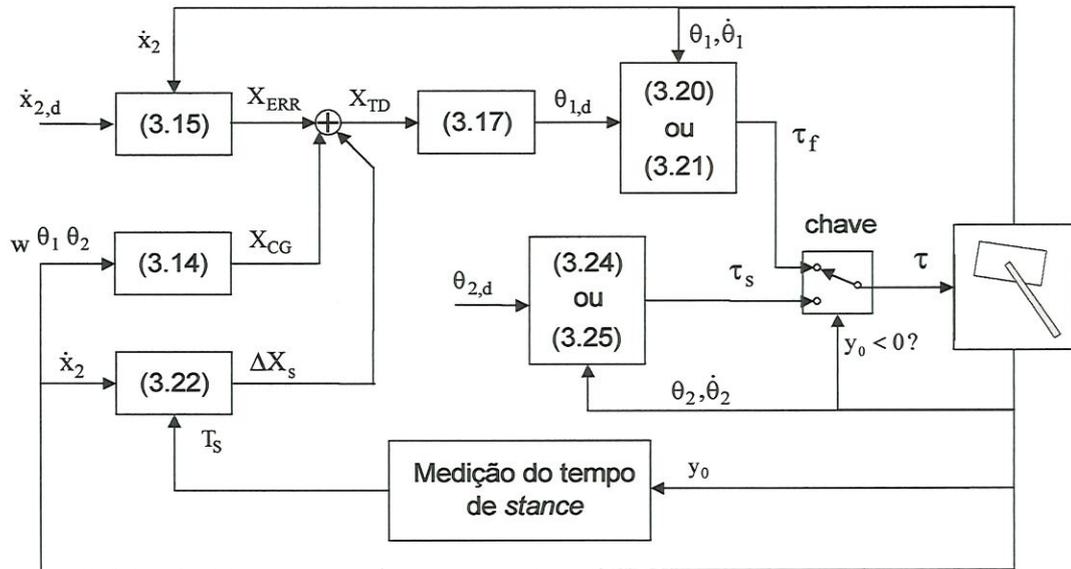


FIGURA 13 - O método 2 para controle horizontal. Baseia-se em encontrar uma posição de contato do pé durante o vôo como no método 1. Porém, um termo é adicionado contendo o ponto neutro, o que permite velocidades desejadas diferente de zero. Durante o *stance*, um servo linear controla a atitude do robô. O número entre parênteses representa o número da equação associada ao bloco.

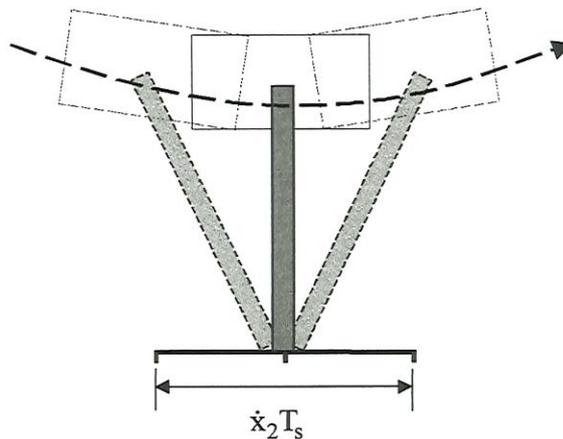


FIGURA 14 - Quando o pé é posicionado no ponto neutro, existe uma simetria no movimento do modelo. Correndo da esquerda para a direita, o desenho mais a direita mostra a configuração do modelo um pouco antes do contato, o desenho do centro mostra a configuração no *bottom* e o desenho mais a esquerda mostra a configuração logo após a decolagem.

Para atingir uma simetria deste tipo, o sistema de controle deve determinar os pontos sobre o qual o centro de gravidade irá locomover-se durante o próximo período de *stance*. Isto é denominado *CG print* (RAIBERT, 1984), em analogia à pegada (*footprint*). O comprimento do *CG print* é apenas o produto da velocidade longitudinal e a duração do *stance*. No regime, o sistema de controle posiciona o pé no centro do *CG print* que é denominado ponto neutro (RAIBERT, 1984).

Quando a velocidade longitudinal se desvia do valor desejado, o sistema de controle move o pé em relação ao ponto neutro para corrigir o erro. Posicionando o pé à frente do ponto neutro, o corpo é desacelerado durante o *stance*, enquanto que posicionando-o atrás do ponto neutro, o corpo é acelerado. A FIGURA 15 ilustra os três casos. Uma combinação linear dos erros de estado determina com que distância o pé deve ser deslocado em relação ao ponto neutro. O método para posicionamento do pé utiliza a mesma regra utilizada no método da seção anterior. Porém, neste caso, posiciona-se o pé em relação ao ponto neutro e não em relação à projeção do centro de gravidade.

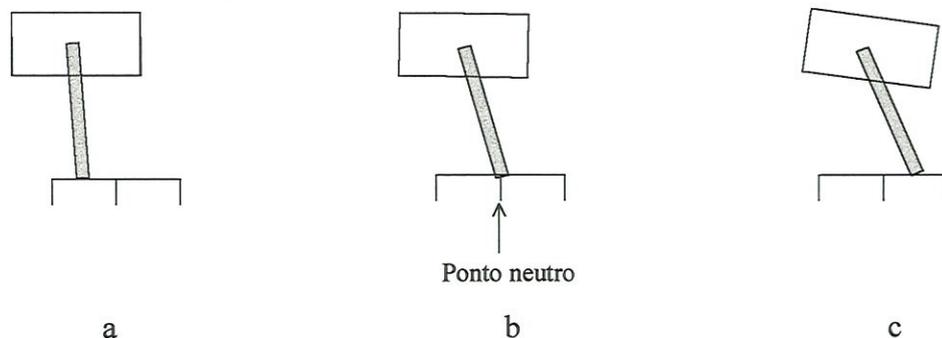


FIGURA 15 - Três tipos de comportamento. Quando o pé é posicionado no ponto neutro (b), o corpo move-se ao longo de uma trajetória simétrica o que deixa o robô sem aceleração na direção longitudinal. Um deslocamento do pé em relação ao ponto neutro acelera o corpo distorcendo a simetria da trajetória do corpo. Quando o pé é posicionado antes do ponto neutro (a), o corpo é acelerado para frente durante a fase de *stance*. Quando o pé é posicionado depois do ponto neutro (c), o corpo é desacelerado durante o *stance*.

Se a duração do *stance*, a velocidade longitudinal do corpo e a geometria do robô são conhecidas, então o ângulo de contato da perna desejado pode ser calculado. A duração do *stance* pode ser gravada dos pulos anteriores. Quando a velocidade

longitudinal é \dot{x}_2 , a distância horizontal percorrida durante o *stance* (comprimento do *CG print*) é dada por:

$$\Delta x_s = \dot{x}_2 T_s \quad (3.22)$$

Combinando (3.22) com (3.18), uma nova equação para o posicionamento do pé é obtida.

$$x_{td} = w \frac{r_2 M_2 \sin(\theta_2) + (M_1 + M_2) x_{ERR}}{r_1 M_1 + w M_2} + \frac{\Delta x_s}{2} \quad (3.23)$$

para o pulo vertical no lugar, onde $\dot{x}_2 = 0$, a eq. (3.23) é reduzida a eq. (3.18) da Seção 3.2.1.

Portanto, este algoritmo controla a velocidade longitudinal através do posicionamento do pé utilizando as expressões (3.15) e (3.23). Como o servo do quadril posiciona verticalmente o corpo durante o *stance*, o posicionamento do pé em relação ao ponto neutro controla exclusivamente a velocidade longitudinal, e portanto $K_2 = K_3 = 0$.

Para o controle da atitude é utilizado um controlador linear dado por:

$$\tau_s = K_{ps} e_{\theta_2} + K_{vs} \dot{e}_{\theta_2} \quad (3.24)$$

onde $e_{\theta_2} = \theta_{2,d} - \theta_2$ é o erro do ângulo do corpo e K_{ps} , K_{vs} são os ganhos do controlador. Os critérios para a escolha destes ganhos são apresentados na Seção 3.3.2 e os valores estão listados no Apêndice.

Para a variação do modelo com a mola no quadril, utiliza-se um controlador linear que elimina a influencia da força de mola através da retroalimentação. Portanto, o controlador é dado pela expressão abaixo:

$$\tau_s = K_{ps} e_{\theta_2} + K_{vs} \dot{e}_{\theta_2} - K_H (\theta_1 - \theta_2) \quad (3.25)$$

onde K_{ps} , K_{vs} são os mesmos ganhos utilizados no controlador da expressão (3.23).

3.3. Critérios para o projeto dos controladores

O sistema possui dois controladores diferentes que atuam em períodos diferentes durante o ciclo de pulo do robô. Durante o fase de vôo, o controlador, dado pela expressão (3.20) ou (3.21), toma como referência o ângulo da perna desejado. Durante a fase de *stance*, entra em operação o controlador, dado por (3.24)

ou (3.25), que regula o ângulo do corpo. Esta seção apresenta critérios para a seleção dos ganhos destes controladores.

3.3.1. Controlador para a fase de vôo

Para o projeto do controlador durante o vôo, primeiramente simplifica-se o modelo apresentado na Seção 2.1 (Capítulo 2), aproximando-o para um sistema linear, dado pela expressão abaixo:

$$I'_1 \ddot{\theta}_1 = -\tau_f \quad (3.26)$$

onde I'_1 é o momento de inércia calculado em relação ao quadril e dado por $I_1 + M_1 r_1^2$. A validação do modelo linear (3.26) foi realizada através de simulações apresentadas na Seção 6.3. Considerando a função transferência do sistema (3.26), obtém-se:

$$G(s) = -\frac{1}{I'_1 s^2} \quad (3.27)$$

Considerando a função transferência do controlador dada por (3.28).

$$C(s) = K_{vf}s + K_{pf} \quad (3.28)$$

Portanto, o sistema em malha fechada é dado por:

$$H(s) = \frac{G(s)C(s)}{1 + G(s)C(s)} = \frac{as + b}{s^2 + as + b} \quad (3.29)$$

onde $a = -\frac{K_{vf}}{I'_1}$, $b = -\frac{K_{pf}}{I'_1}$. Apesar de $H(s)$ apresentar um zero, o sistema é considerado como de segunda ordem, e portanto, dado a frequência natural ω_n e o amortecimento ζ (FRANKLIN et al., 1995), são encontrados os ganhos do controlador através da eq. (3.30).

$$\begin{cases} K_{pf} = -I'_1 \omega_n^2 \\ K_{vf} = -2I'_1 \zeta \omega_n \end{cases} \quad (3.30)$$

Para a escolha da frequência natural ω_n e o amortecimento ζ , são estabelecidos critérios baseados nos requisitos de desempenho (FRANKLIN et al., 1995).

- O sobre-sinal não pode ultrapassar 10% e portanto $\zeta \geq 0,6$.

- O sistema não pode ser muito amortecido. O instante de pico t_p deve ser menor que o tempo de acomodação t_s ($t_p \leq t_s$) e portanto $\zeta \leq 0.825$.
- O tempo de acomodação t_s deve ser menor que o período de vôo T_f ($t_s \leq T_f$) e portanto $\omega_n \geq \frac{4,6}{\zeta T_f}$.

Para o modelo com mola no quadril, é considerado um outro modelo linear expresso pela eq. (3.31).

$$I'_1 \ddot{\theta}_1 = -\tau_f - K_h(\theta_1 - \theta_2) \quad (3.31)$$

Neste caso, é utilizado o controlador da expressão (3.21) que compensa a força de mola. Assim, a mesma função transferência de malha fechada é obtida e portanto os critérios para a escolha dos ganhos do controlador permanecem os mesmos.

3.3.2. Controlador para a fase de *stance*

Para o projeto do controlador durante o *stance*, procede-se de maneira similar à seção anterior. Primeiramente, simplifica-se as equações do modelo (Seção 2.1) considerando-o um sistema linear, dado pela eq. (3.32).

$$I'_2 \ddot{\theta}_2 = \tau_s \quad (3.32)$$

onde I'_2 é o momento de inércia calculado em relação ao quadril dado por $I_2 + M_2 r_2^2$. A validação do modelo também foi realizada através de simulações e os resultados são apresentados na Seção 6.3. Utilizando o controlador dado pela expressão (3.24), obtém-se o sistema em malha fechada dado por (3.33).

$$H(s) = \frac{G(s)C(s)}{1 + G(s)C(s)} = \frac{as + b}{s^2 + as + b} \quad (3.33)$$

onde $a = \frac{K_{vs}}{I'_2}$, $b = \frac{K_{ps}}{I'_2}$. Portanto, como na seção anterior, são encontrados os ganhos do controlador relacionados com a frequência natural ω_n e o amortecimento ζ .

$$\begin{cases} K_{ps} = I'_2 \omega_n^2 \\ K_{vs} = 2I'_2 \zeta \omega_n \end{cases} \quad (3.34)$$

Para a escolha da frequência natural ω_n e o amortecimento ζ , são estabelecidos critérios baseados nos requisitos de desempenho (FRANKLIN et al., 1995) e nos resultados das simulações apresentadas na Seção 6.3:

- O sobre-sinal não pode ultrapassar 10% e portanto $\zeta \geq 0,6$.
- O sistema não pode ser muito amortecido. O instante de pico t_p deve ser menor que o tempo de acomodação t_s ($t_p \leq t_s$) e portanto $\zeta \leq 0,825$.
- O tempo de pico t_p deve ser menor que o período de *stance* T_s ($t_p \leq T_s$) e portanto $\omega_n \geq \frac{\pi}{T_s \sqrt{1-\zeta^2}}$.
- O tempo de acomodação deve ser pequeno suficiente para que erro da velocidade longitudinal \dot{x}_2 no ciclo limite seja pequeno. Portanto, $\zeta \omega_n \geq \frac{4,6}{t_{s_max}}$, onde t_{s_max} é o tempo de acomodação máximo permitido. Este tempo está relacionado com o máximo erro da velocidade permitido no ciclo limite (ver Seção 6.3.3).
- O tempo de subida deve ser grande suficiente para evitar grandes perturbações na velocidade longitudinal \dot{x}_2 durante o *stance*. Portanto $\omega_n \leq \frac{1,8}{t_{r_min}}$, onde t_{r_min} é o tempo de subida mínimo permitido. Este tempo está relacionado com a máxima perturbação de velocidade permitida (ver Seção 6.3.3).

Para a o modelo com mola no quadril, é considerado um outro modelo linear expresso pela equação (3.34).

$$I'_2 \ddot{\theta}_2 = \tau_s + K_h(\theta_1 - \theta_2) \quad (3.34)$$

Novamente, como na seção anterior, o controlador da eq. (3.25) compensa a força de mola. Portanto, os critérios para a escolha dos ganhos do controlador permanecem os mesmos.

4. CORRIDA DINAMICAMENTE PASSIVA CONTROLADA

A estratégia de controle abordada neste capítulo é baseada no modelo de uma perna simplificado, considerando as elasticidades do quadril e da perna (Seção 2.2).

O princípio de utilizar o movimento passivo do quadril é ilustrado na FIGURA 16. A posição horizontal do pé em relação ao quadril x_{ft} é uma oscilação não forçada e sem atrito da junta do quadril. Assim, esta possui uma resposta senoidal da forma $\hat{\theta} \text{sen}(\omega_h t)$, onde $\hat{\theta}$ é a amplitude da oscilação, ω_h é a frequência da oscilação e t é o tempo. Portanto, a posição x_{ft} obedece a eq. (4.1).

$$x_{ft} = r_0 \text{sen}[\hat{\theta} \text{sen}(\omega_h t)] \quad (4.1)$$

onde r_0 é o comprimento da perna durante o vôo.

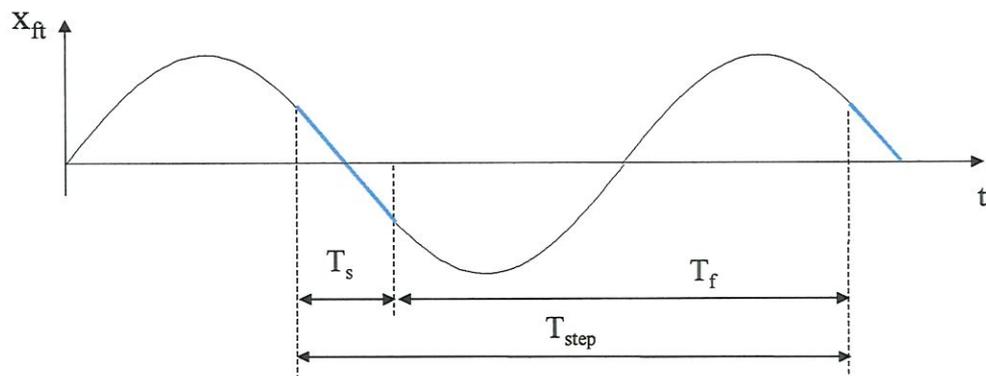


FIGURA 16 - Posição do pé em relação ao quadril x_{ft} , com sua aproximação (curva azul) na fase de *stance*. A curva quase linear durante o *stance* é o princípio de como encontrar as condições iniciais (Seção 4.1.4) necessárias para a locomoção passiva. Na figura são representados os tempos de vôo T_s , de *stance* T_f , e de passo T_{step} .

Na Seção 4.1.4, é mostrado que a escolha apropriada da amplitude de oscilação da perna e o sincronismo com o movimento vertical podem assegurar que o *stance* ocorre durante o período em que x_{ft} é aproximadamente linear, com inclinação

equivalente a velocidade longitudinal do robô. Portanto, a resposta não forçada pode fornecer aproximadamente o movimento correto do quadril durante a locomoção.

4.1. Corrida dinamicamente passiva

Nesta seção, são encontradas as condições iniciais que resultam na corrida dinamicamente passiva. Estas condições são obtidas, dado os parâmetros físicos do robô (massas, inércia, constantes de mola e dimensões da perna) e a velocidade longitudinal desejada. Os movimentos do robô são analisados separadamente. A Seção 4.1.1 aborda a oscilação do quadril, enquanto que a Seção 4.1.2 analisa a oscilação vertical. O efeito do acoplamento destes dois movimentos é estudado na Seção 4.1.3. Finalmente, é apresentada na Seção 4.1.4 a dedução das condições iniciais para a operação puramente passiva. Simulações foram realizadas para a corrida dinamicamente passiva considerando as condições iniciais apresentadas na Seção 4.1.4. Os resultados são apresentados no Capítulo 6 (Seção 6.4). Como os estados nesta seção correspondem à dinâmica passiva, as variáveis possuem o sobrescrito “*” (e.g., θ^* e ϕ^*).

4.1.1. Oscilação do quadril

Como ilustrado na FIGURA 16, o período do passo T_{step} do robô deve ser igual ao período da oscilação do quadril. A frequência natural da oscilação do quadril (perna e corpo) do modelo (Seção 2.2) pode ser deduzida através de suas equações de movimento durante o vôo apresentadas no Apêndice.

$$\omega_h = \sqrt{\frac{k_h}{J_e}} \quad (4.2)$$

onde $J_e = J_b J_1 / (J_b + J_1)$ é o momento de inércia efetivo para a oscilação do quadril. Portanto, o período da oscilação é igual ao período do passo:

$$T_{\text{step}} = \frac{2\pi}{\omega_h} \quad (4.3)$$

Para uma oscilação simétrica do quadril, a mola deste precisa estar em repouso na configuração inicial, $\theta_0^* = \phi_0^* = 0$. Então, dada uma velocidade angular inicial da perna $\dot{\theta}_0^*$, esta é igual à sua amplitude, $\dot{\theta}_0^* = \hat{\theta}^*$. Além disso, as amplitudes da

velocidade angular da perna $\hat{\theta}^*$ e da velocidade angular do corpo $\hat{\phi}^*$ estão relacionadas pela eq. (4.4).

$$\dot{\phi}_0^* = \hat{\phi}^* = -\frac{J_1}{J_b} \hat{\theta}^* \quad (4.4)$$

Estas condições iniciais para as velocidades angulares mantêm o momento angular do sistema nulo durante todo o vôo, o que significa que as oscilações se mantêm simétricas em torno de $\theta_0^* = \phi_0^* = 0$.

4.1.2. Oscilação vertical

Um ciclo de pulo completo inclui as fases de vôo e *stance* como ilustrado na FIGURA 10 do Capítulo 3. Durante a fase de vôo, o movimento do robô é puramente balístico e é descrito pela equação $z(t) = z_{10} + \dot{z}_{10}t - \frac{gt^2}{2}$. Portanto, obtém-se a altura máxima do corpo (ápice) e o tempo de vôo respectivamente:

$$z_{\text{apice}} = \frac{\dot{z}_{10}^2}{2g} + z_{10}, \quad T_f = \frac{2\dot{z}_{10}}{g} \quad (4.5)$$

onde z_{10} é a altura de decolagem e \dot{z}_{10} a velocidade vertical de decolagem.

Durante o *stance*, o centro de massa seguirá um movimento senoidal com uma frequência natural:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m}} \quad (4.6)$$

As equações de movimento para o *stance* e as condições iniciais de contato z_{td} , \dot{z}_{td} podem ser escritas como um modelo massa-mola simplificado (AHMADI, 1998):

$$\begin{cases} \ddot{z} + \omega_1^2 z = \omega_1^2 z_{td} - g \\ z_0 = z_{td}, \dot{z}_0 = \dot{z}_{td} \end{cases} \quad (4.7)$$

A solução para esta equação diferencial ordinária forçada, incluindo as soluções homogênea e particular:

$$z(t) = z_{td} + \frac{g}{\omega_1^2} (\cos(\omega_1 t) - 1) + \frac{\dot{z}_{td}}{\omega_1} \text{sen}(\omega_1 t) \quad (4.8)$$

Para calcular o tempo de *stance* T_s , assume-se que as alturas de decolagem e contato são iguais, o que é válido apenas para o regime. Da condição $z(t = T_s) = z_{td}$, o tempo de *stance* é calculado através da eq. (4.9).

$$T_s = \frac{2}{\omega_1} (\pi - \arctan(-\dot{z}_{td} \omega_1 / g)) \quad (4.9)$$

onde \dot{z}_{td} é negativo. Assumindo que durante o *stance* as forças gravitacionais são pequenas comparadas com as forças de mola, a eq. (4.9) pode ser simplificada em (4.10).

$$T_s \approx \frac{\pi}{\omega_1} \quad (4.10)$$

A expressão (4.10) representa a metade do período da oscilação vertical. Esta mesma simplificação é utilizada no Capítulo 3 e em RAIBERT (1984); RAIBERT & THOMPSON (1989).

4.1.3. Acoplamento entre tempo de *stance* e velocidade longitudinal

O conhecimento preciso do tempo de duração do *stance* é importante pois é a base para o movimento puramente passivo e para o algoritmo de controle proposto na Seção 4.2. Considerando um caso nominal com $\dot{z}_{td} = -2$ m/s e $\omega_1 = 40,57$ rad/s, a eq. (4.9) fornece um tempo de *stance* de $T_s = 0,066$ s, contra $T_s = 0,063$ s utilizando a eq. (4.10). Este erro de 4,5% faz com que a eq. (4.10) seja inadequada como base para o controle. No entanto, mesmo a eq. (4.9) é uma aproximação baseada no movimento puramente vertical.

Simulações para velocidades diferentes mostram que o tempo de *stance* diminui com o aumento da velocidade longitudinal. Segundo AHMADI & BUEHLER (1997), o cálculo exato do tempo de duração do *stance* requer uma solução explícita das equações de movimento do robô. No entanto, esta solução envolve uma equação diferencial não-linear de sexta ordem, o que a torna inviável (AHMADI & BUEHLER, 1997).

Para modelar a interação entre as dinâmicas horizontal e vertical durante o regime, utiliza-se a chamada “rigidez vertical efetiva².” (AHMADI & BUEHLER, 1997; McMAHON & CHENG, 1990). Quando a velocidade longitudinal aumenta, a

²A rigidez vertical pode ser definida como a razão da variação da força vertical pelo deslocamento vertical do sistema durante o *stance*.

rigidez vertical efetiva também aumenta, resultando em um tempo de *stance* menor. As equações (4.9) e (4.10) não consideram este efeito. Portanto, a relação entre tempo de *stance* e velocidade longitudinal é obtida através de simulações, utilizando diferentes velocidades (em regime) ao invés de expressões analíticas aproximadas. Conforme ilustrado na FIGURA 17, os resultados desta relação mostram uma considerável queda no tempo de *stance* quando a velocidade aumenta.

Baseado na frequência ω_1 calculada, a rigidez vertical equivalente da perna k_v pode ser definida através da eq. (4.11).

$$k_v = m\omega_1^2 = m\left(\frac{\pi}{T_s}\right)^2 \quad (4.11)$$

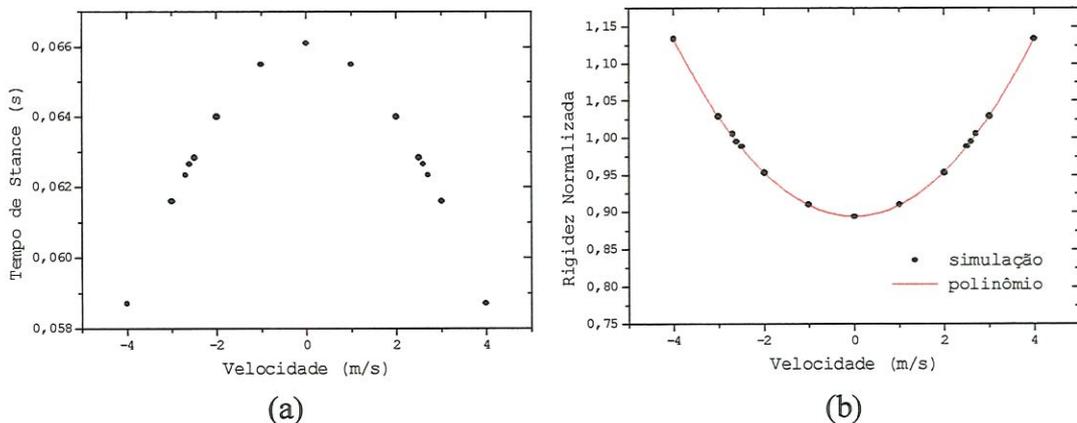


FIGURA 17 - (a) Tempo de duração do *stance* medido em várias corridas (regime). (b) A rigidez normalizada da perna em função da velocidade horizontal no regime. A curva também mostra o ajuste do polinômio quadrático.

O tempo de *stance* foi medido para velocidades diferentes e os resultados são mostrados na FIGURA 17a. A “rigidez normalizada” k_{norm} é definida na expressão (4.12) e pode ser aproximada por um polinômio de segunda ordem.

$$k_{norm} \equiv k_v / k_1 = 0.0149\dot{x}^2 + 0.894 \quad (4.12)$$

A FIGURA 17b demonstra como um polinômio quadrático simples se adequa bem com os dados de k_{norm} . Estes resultados estão coerentes com os resultados encontrados por McMAHON & CHENG (1990) e AHMADI & BUEHLER (1997). Na FIGURA 18, a velocidade longitudinal \dot{x} pode ser substituída pela velocidade média $\bar{\dot{x}}$, definida como:

$$\bar{\dot{x}} = \frac{x_{ft,td} - x_{f,lo}}{T_{s,m}} \approx \frac{2}{T_{s,m}} x_{ft,td} \quad (4.13)$$

onde $T_{s,m}$ é o tempo de *stance* medido e $x_{ft,lo} = -x_{ft,td}$ é assumido (regime).

4.1.4. Seleção dos parâmetros físicos e das condições iniciais

Esta seção descreve como escolher os parâmetros físicos do sistema e as condições iniciais para encontrar uma trajetória ciclo limite para o modelo. Assume-se valores fixos para a massa do robô m , momento de inércia da perna J_1 , momento de inércia do corpo J_b e o comprimento nominal da perna r_0 . Dada a velocidade longitudinal desejada \dot{x}_d e período do passo T_{step} , escolhe-se a constante de mola para o quadril k_h , a constante de mola para a perna k_1 , a velocidade angular inicial da perna $\dot{\theta}_0^*$, a velocidade angular inicial do corpo $\dot{\phi}_0^*$ e altura inicial do corpo z_0^* .

Constante de mola do quadril k_h : A rigidez da mola do quadril é escolhida de maneira que o quadril realize uma oscilação completa durante o período do passo T_{step} . Através da oscilação natural dada pela expressão (4.3), é obtido:

$$\omega_h = \frac{2\pi}{T_{step}} = \sqrt{\frac{k_h}{J_e}} \quad (4.14)$$

De (4.14), encontra-se a rigidez da mola:

$$k_h = \left(\frac{2\pi}{T_{step}} \right)^2 J_e \quad (4.15)$$

onde T_{step} deve ser especificado.

Constante de mola da perna k_1 : A rigidez da mola da perna é escolhida para estabelecer o tempo de *stance* como uma fração do período do passo. O fator de trabalho ρ é definido como a razão entre o tempo de *stance* e o período do passo,

$$\rho = \frac{T_s}{T_{step}} \quad (4.16)$$

O fator de trabalho deve ser escolhido de tal maneira que a fase de *stance* ocorra na parte aproximadamente linear da FIGURA 16. Dada a frequência natural do quadril e o valor de ρ , a constante k_1 pode ser calculada:

$$k_1 = m \left(\frac{\pi}{\rho T_{\text{step}}} \right)^2 \quad (4.17)$$

Apesar da frequência de oscilação do quadril e o período do passo sejam determinados pelos parâmetros físicos do robô, o tempo de *stance* depende da velocidade longitudinal. Este tempo é calculado através da eq. (4.10) como:

$$T_s = \pi \sqrt{\frac{m}{k_1(0.0149\bar{x}^2 + 0.894)}} \quad (4.18)$$

As condições iniciais são escolhidas para acomodar a velocidade longitudinal desejada \dot{x}_d . Algumas das condições iniciais, $\phi_0^* = 0$, $\theta_0^* = 0$, $\dot{z}_0 = 0$, $x_0 = 0$, são conhecidas pois o movimento oscilatório do quadril é simétrico. A velocidade inicial \dot{x}_0 é selecionada como $\dot{x}_0 = \dot{x}_d$. A seguir, é mostrado como selecionar as condições iniciais para a velocidade angular da perna $\dot{\theta}_0^*$, a velocidade angular do corpo $\dot{\phi}_0^*$ e a altura do quadril z_0^* .

Velocidade angular inicial da perna: Em RAIBERT & THOMPSON (1989), a velocidade angular inicial da perna é assumida como equivalente a velocidade no *bottom* $\dot{\theta}_0^* = \dot{x}/r_0$. No entanto, AHMADI & BUEHLER (1997) observaram um comportamento melhor quando a velocidade média foi utilizada. Isto ocorre por duas razões. Primeiramente, a velocidade média é uma aproximação melhor à curva senoidal durante o *stance*. Além disso, a dependência de T_s leva em consideração alguns efeitos de acoplamento entre as dinâmicas vertical e horizontal. Sendo a posição do pé em relação ao quadril descrita por:

$$x_{\text{ft}} = -r_0 \text{sen} \theta^*(t) = -r_0 \text{sen} \left[\hat{\theta}^* \text{sen} \omega_h t \right] \quad (4.19)$$

onde $\hat{\theta}^* = \frac{\dot{\theta}_0^*}{\omega_h}$ e $\omega_h T_{\text{step}} = 2\pi$. E considerando as expressões (4.10) e (4.13), a

velocidade média no *stance* pode ser expressa como:

$$\bar{\dot{x}} = -\frac{2r_0}{T_s} \text{sen} \left[\frac{\theta_0^*}{\omega_h} \text{sen}((1-\rho)\pi) \right] \quad (4.20)$$

Resolvendo a expressão (4.20) para $\dot{\theta}_0^*$ (note novamente que $\dot{\theta}_0^* = \hat{\theta}^*$) a velocidade angular inicial da perna para a corrida dinamicamente passiva é obtida através de:

$$\dot{\theta}_0^* = \hat{\theta}^* = -\frac{\omega_h \arccos(T_s \bar{x} / 2r_0)}{\sin((1-\rho)\pi)} \quad (4.21)$$

Oscilações do corpo: Em regime, o momento angular total é considerado nulo durante o voo. Portanto, o corpo e a perna devem possuir oscilações simétricas com amplitudes determinadas pela razão das inércias (fazendo com que o momento angular total seja zero). Baseado nas equações (4.21) e (4.4), é possível calcular a velocidade angular inicial do corpo como sendo:

$$\dot{\phi}_0^* = -\frac{J_1}{J_b} \dot{\theta}_0^* \quad (4.22)$$

Altura inicial: Na condição inicial, o robô é localizado no ápice z_{apice} que pode ser calculado adicionando a altura do robô no contato z_{td} à mudança de altura durante a fase de voo:

$$z_{\text{apice}} - z_{\text{td}} = \frac{g}{2} \left(\frac{T_f}{2} \right)^2 = \frac{g}{2} (1-\rho)^2 T_{\text{step}}^2 \quad (4.23)$$

O contato ocorre em $t_{\text{td}} = T_f / 2$, e portanto, o ângulo de contato para a corrida passiva é dado por:

$$\theta_{\text{td}}^* = \hat{\theta}^* \sin(\omega_h (1-\rho) T_{\text{step}} / 2) = \hat{\theta}^* \sin((1-\rho)\pi) \quad (4.24)$$

A altura de contato durante a corrida dinamicamente passiva é $z_{\text{td}}^* = r_0 \cos \theta_{\text{td}}^*$ e finalmente a altura inicial pode ser expressa, utilizando as equações (4.23) e (4.24), como:

$$z_{\text{apice}} = \frac{g}{8} (1-\rho)^2 T_{\text{step}}^2 + r_0 \cos \left[\hat{\theta}^* \sin((1-\rho)\pi) \right] \quad (4.25)$$

4.2. Controle baseado na dinâmica passiva

Baseado nas considerações da seção anterior, é possível selecionar as condições iniciais do robô para a operação dinamicamente passiva. Apesar de servir como base para uma corrida eficiente em relação a energia, a corrida passiva não possui uma operação estável. Devido às hipóteses simplificadoras no cálculo das condições iniciais, estimativas imprecisas dos parâmetros do robô ou perturbações externas, o robô perde o equilíbrio um determinado momento.

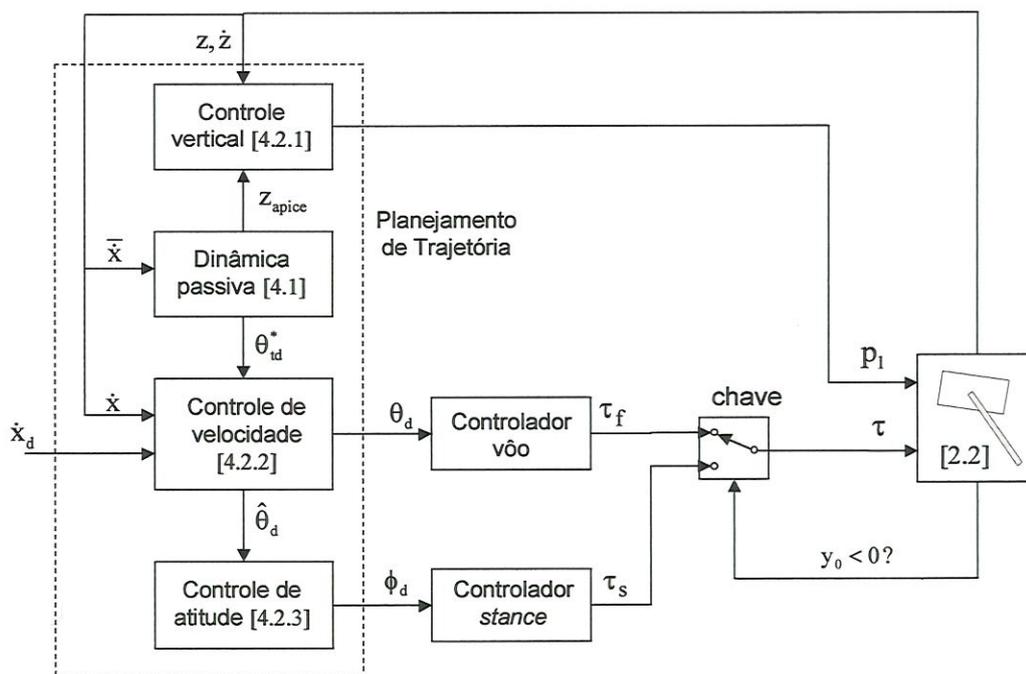


FIGURA 18 – Esquema geral da corrida dinamicamente passiva controlada. O controle é dividido em três tarefas. O bloco de dinâmica passiva calcula a trajetória passiva para velocidade atual do robô. O controle vertical (1) regula os pulos a uma altura determinada pela dinâmica passiva. Durante o voo, o controle de velocidade (2) corrige a trajetória passiva em função do erro da velocidade. Durante o *stance*, o controle de atitude (3) gera uma trajetória para o ângulo do corpo. Os controladores são utilizados para seguir os ângulos gerados pelo planejamento de trajetória. O número entre chaves representa o número da seção que aborda cada bloco.

Como na estratégia apresentada no Capítulo 3, o problema de controle é dividido em três tarefas. Primeiramente, a trajetória passiva é calculada (FIGURA 18) para a velocidade atual do robô. Durante o voo, o controle de velocidade adiciona um termo do erro da velocidade para estabilizar o robô na velocidade longitudinal desejada. Este termo de correção é semelhante ao utilizado na estratégia proposta no Capítulo 3. Durante o *stance*, o controle de atitude gera uma trajetória desejada a ser seguida pelo ângulo do corpo, ao contrário da estratégia do Capítulo 3. No capítulo anterior, o algoritmo estabelecia um ângulo fixo a ser regulado. Finalmente, o controle vertical regula os pulos do robô a uma altura determinada pela dinâmica passiva. Simulações foram realizadas para a corrida dinamicamente passiva controlada e os resultados são apresentados na Seção 6.5 do Capítulo 6.

4.2.1. Controle vertical simplificado

O controle vertical é implementado de maneira similar ao algoritmo apresentado na Seção 3.1. No entanto, por se tratar de um modelo mais simples, sem perdas de energia, a altura dos pulos é controlada através de um ganho proporcional (FIGURA 19).

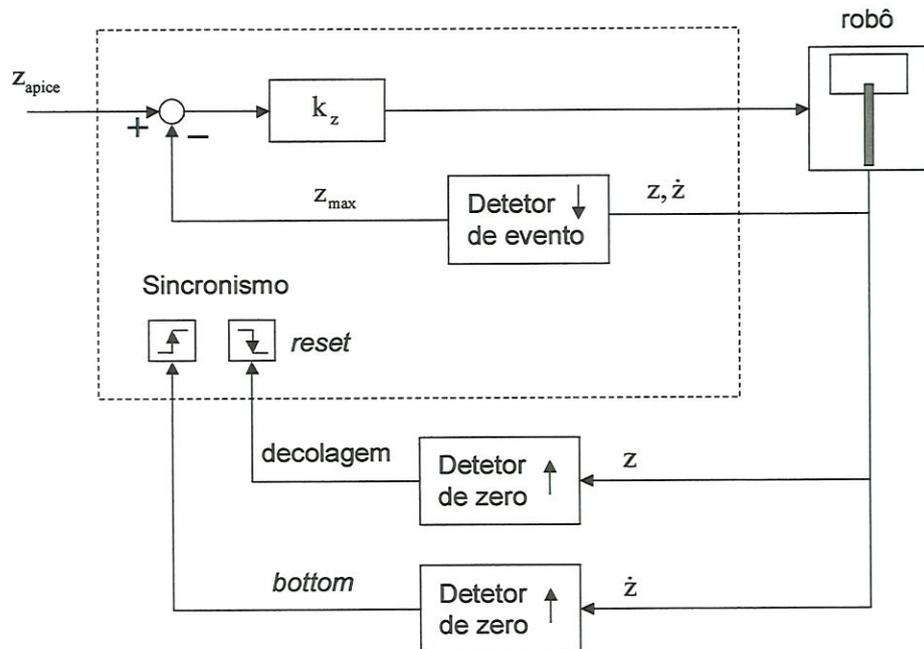


FIGURA 19 - Controle vertical baseado na regulação simples da altura de pulo. A altura máxima z_{max} é medida no instante que ocorre o ápice. Esta altura máxima é subtraída da altura desejada z_{apice} , obtida pelo cálculo da dinâmica passiva. Um ganho proporcional determina então o deslocamento do atuador. Os movimentos do atuador são sincronizados através da identificação dos eventos do robô. O atuador estende-se na posição de bottom e se encurta logo após a decolagem. O número entre parênteses representa o número da equação associada ao bloco.

Conforme mostra a FIGURA 19, o atuador linear da perna é estendido no *bottom* e encurtado logo após a decolagem. A magnitude da atuação é determinada pela eq. (4.26).

$$p_1 = k_z (z_{apice} - z_{max}) \quad (4.26)$$

onde z_{apice} é a altura desejada no ápice obtida através de (4.25) e z_{max} é a altura do último salto.

4.2.2. Tempo de locomoção

Uma locomoção bem sucedida deve ser baseada no acoplamento robusto entre os diferentes graus de liberdade. Este acoplamento é obtido através de uma variável escalar denominada “tempo de locomoção” (AHMADI & BUEHLER, 1997), na qual todas as trajetórias são expressas.

A dinâmica vertical do robô é determinada pela gravidade durante o voo e pelas forças de mola durante o *stance*. Esta dinâmica age como um “marca passo” no qual a oscilação do quadril deve sincronizar-se. No contato, por exemplo, a perna deve estar orientada à um ângulo apropriado θ_{td} . Isto pode ser interpretado como o sincronismo entre um ciclo limite (plano θ e $\dot{\theta}$) e outro (plano z e \dot{z}).

Para alcançar tal sincronização, o tempo não é um parâmetro adequado pois os tempos de duração do voo e do *stance* estão sujeitos a variações durante a corrida. Portanto, é necessário desenvolver uma nova variável, denominada tempo de locomoção, que caracterize o movimento vertical independente das condições de operação (e.g. a altura dos pulos).

O tempo de locomoção η , é definido como uma função que transforma o estado do robô em uma região fixa $\varepsilon = [-1, 1]$, como também relaciona os eventos a números fixos. Esta função pode ser não-linear e não precisa ser linear no tempo. No entanto, para a variável de locomoção ser simples de utilizar, escolhe-se uma função linear no tempo. Isto facilita os termos de diferenciação de η para expressar velocidades e acelerações desejadas.

Portanto, o tempo de locomoção deve satisfazer duas condições para ser utilizado na estratégia de controle. Primeiramente, deve ser uma função escalar η que relaciona a fase de voo no intervalo fixo $[-1, 1]$ entre a decolagem ($\eta_{lo} = -1$) e o contato ($\eta_{td} = 1$). Durante o *stance*, esta variável deve variar de 1 à -1. A segunda condição estabelece que η deve ser uma função com afinidade no tempo. Com estas duas condições, η se torna um parâmetro de sincronização para o planejamento de trajetória. Durante o tempo de voo, o tempo de locomoção é definido como:

$$\eta_f = \frac{-\dot{z}}{\dot{z}_{lo}}; \quad \eta_f: [\dot{z}_{lo} \quad \dot{z}_{td}] \rightarrow [-1 \quad 1] \quad (4.27)$$

A expressão (4.27) satisfaz a primeira condição e a concordância com a segunda condição é também assegurada desde que:

$$\eta_f = -\frac{1}{\dot{z}_{lo}} \left(\dot{z}_{lo} - g \left(t + \frac{T_f}{2} \right) \right) = \frac{g}{\dot{z}_{lo}} \left(t + \frac{T_f}{2} \right) - 1 = \frac{2}{T_f} t = \frac{2}{(1-\rho)T_{step}} t \quad (4.28)$$

Para o stance, a eq. de (4.27) não pode ser utilizada pois não é linear durante o stance. No entanto, não foi encontrada uma função durante o stance que satisfaça as duas condições sem precisar do conhecimento prévio de T_s . Deste modo, o tempo de locomoção, durante o stance, pode ser obtido através da relação da velocidade longitudinal e o tempo de stance:

$$\eta_s = \frac{2}{T_s} t = \frac{2}{\rho T_{step}} t \quad (4.29)$$

que relaciona o intervalo de tempo do stance $(-\frac{T_s}{2}, \frac{T_s}{2})$ com o intervalo $(-1, 1)$. A combinação das variáveis de locomoção no vôo e no stance pode ser utilizada como tempo de locomoção:

$$\eta \equiv \begin{cases} \eta_f & \text{vôo} \\ \eta_s & \text{stance} \end{cases} \quad (4.30)$$

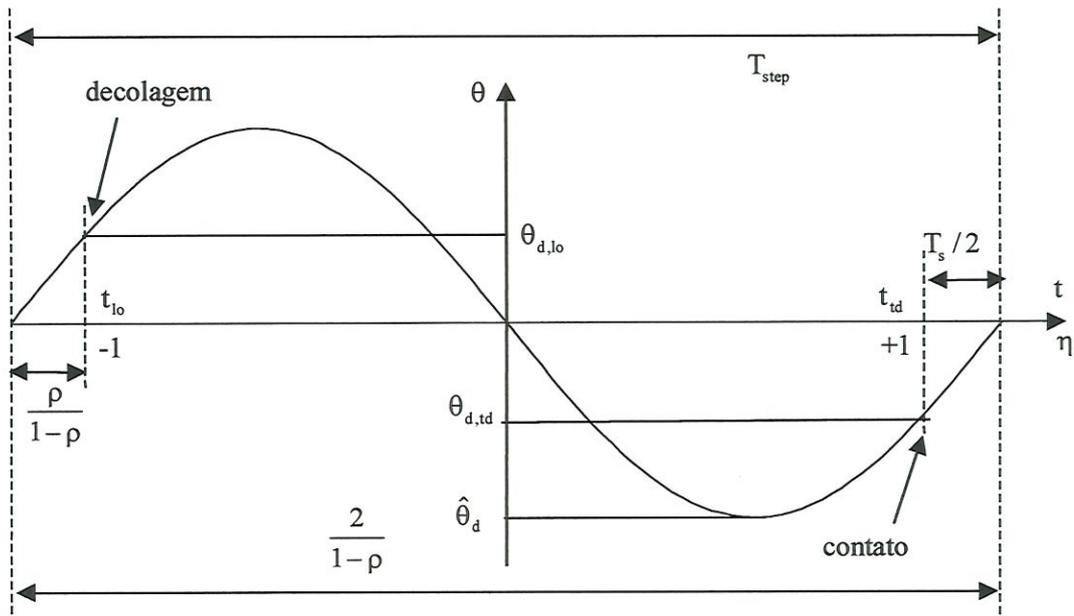


FIGURA 20 - Uma oscilação completa da perna em relação ao tempo e ao tempo de locomoção. Acima do eixo horizontal são mostrados os tempos e abaixo desta linha são mostrados os valores da variável de locomoção.

A FIGURA 20 ilustra uma oscilação completa da perna tanto em função do tempo quanto do tempo de locomoção. Em suma, temos uma quantidade escalar que relaciona ambas as fases (vôo e stance) em um intervalo escalar fixo formando a base para o controle. Os valores da FIGURA 20 são deduzidos das equações (4.28) e (4.29).

4.2.3. Controle de velocidade

Durante o vôo, apenas o atuador do quadril é entrada de controle. Assim, apenas o ângulo da perna, do corpo ou do quadril (ângulo entre a perna e o corpo) pode ser controlado. De maneira similar à estratégia apresentada no Capítulo 3, controla-se o ângulo da perna de tal maneira que a velocidade longitudinal possa ser afetada através do posicionamento do pé no contato.

Primeiramente, dado a velocidade longitudinal atual, obtém-se o ângulo passivo de contato θ_{td}^* através da equação (4.24). O deslocamento do pé em relação ao quadril correspondente é então:

$$x_{f,td}^* = -r_0 \text{sen} \theta_{td}^* \quad (4.31)$$

Neste ponto, a velocidade longitudinal pode ser controlada através do valor desejado, simplesmente adicionando um termo de erro proporcional. Assim, a posição de contato do pé desejada em relação ao quadril é expressa:

$$x_{f,td,d} = x_{f,td}^* + k_{\dot{x}} (\dot{x} - \dot{x}_d) \quad (4.32)$$

A FIGURA 21 ilustra como o termo de correção afeta a posição do pé e o ângulo da perna. A lei de controle (4.32) é expressa em termos do ângulo de contato da perna desejado como:

$$\theta_{d,td} = -\arcsen \left[-\text{sen}(\theta_{td}^*) + \frac{k_{\dot{x}}}{r_0} (\dot{x} - \dot{x}_d) \right] \quad (4.33)$$

A amplitude desejada de oscilação $\hat{\theta}_d$ é portanto determinada através do fator de trabalho ρ :

$$\hat{\theta}_d = \frac{\theta_{d,td}}{\text{sen}(\pi(1 - \rho))} \quad (4.34)$$

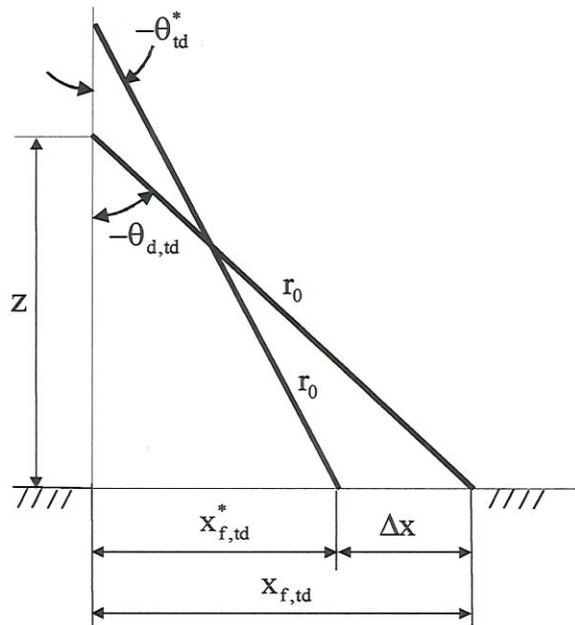


FIGURA 21 - A configuração da perna no contato nos casos neutro e desaceleração. O ponto neutro é dado pelo cálculo da dinâmica passiva expresso por $x_{f,td}^*$. Através de um termo do erro da velocidade, o ponto de contato é modificado de tal maneira que o robô possa ser acelerado ou desacelerado.

A trajetória do ângulo da perna desejada pode ser expressa no domínio do tempo como $\theta_d(t) = \hat{\theta}_d \text{sen}(\omega_h t)$, onde $\hat{\theta}_d$ é a amplitude desejada da oscilação. No entanto, para se obter a sincronização apropriada entre o movimento da perna e a oscilação vertical, esta trajetória é expressa no domínio de η .

$$\theta_d(\eta) = \hat{\theta}_d \text{sen}(\pi(1 - \rho)\eta) \quad (4.35)$$

A FIGURA 22 ilustra como a trajetória desejada do movimento da perna é gerada. Baseado na dinâmica do voo, apresentada na Seção 2.2, o ângulo da perna é seguido através de um controlador baseado na dinâmica inversa (KOIVO, 1989; STOLINE & LI, 1991):

$$\tau_f = -J_1(\ddot{\theta}_d + k_{vf}\dot{e}_\theta + k_{pf}e_\theta) + k_h(\phi - \theta) \quad (4.36)$$

Aplicando a eq. (4.36) nas equações do modelo apresentadas no Apêndice, obtém-se o erro dinâmico $\ddot{e}_\theta + k_{vf}\dot{e}_\theta + k_{pf}e_\theta = 0$, onde $e_\theta = \theta_d - \theta$. Quando o erro de regime é nulo, o torque no atuador τ_f também é nulo. Os ganhos k_{pf} e k_{vf} são escolhidos de tal forma que a resposta do sistema em malha fechada seja mais rápida

que a trajetória desejada (KOIVO, 1989; STOLINE & LI, 1991; FRANKLIN et al., 1995).

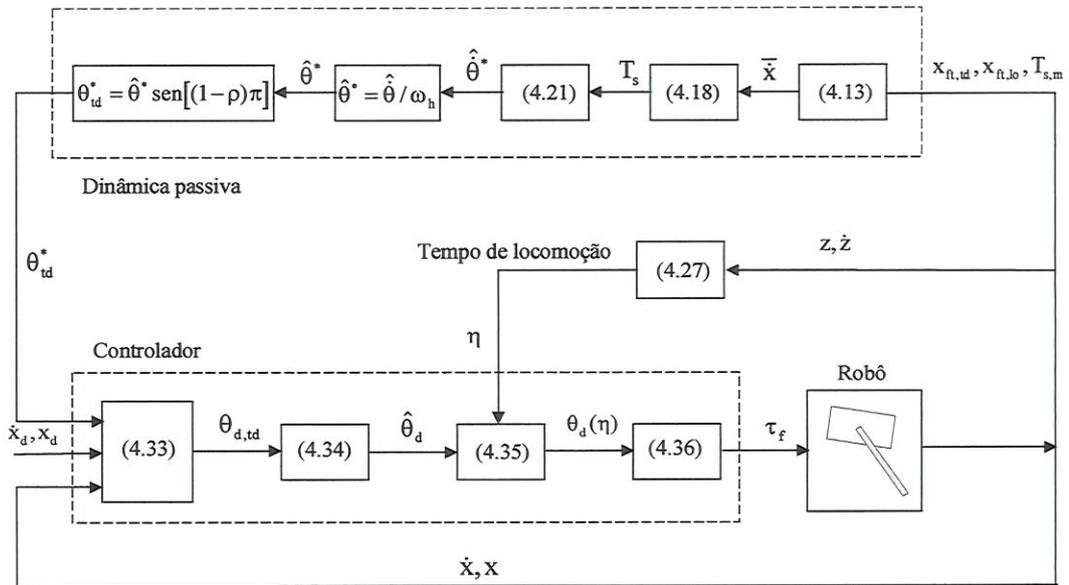


FIGURA 22 - Controle de velocidade durante o vôo. O cálculo da dinâmica passiva gera o ângulo de contato desejado. Este ângulo é somado com um termo de erro da velocidade, resultando em um novo ângulo de contato desejado. Este novo ângulo é então transformado na trajetória desejada em função do tempo de locomoção. Esta trajetória é então seguida pelo controlador baseado na dinâmica inversa do modelo. O número nos blocos estão relacionados ao número das equações.

4.2.4. Controle de atitude

Como na estratégia de controle apresentada no Capítulo 3, durante o *stance*, o atuador do quadril controla o ângulo do corpo ϕ . Porém, neste caso existe uma trajetória desejada para o ângulo do corpo baseada na dinâmica passiva do modelo. Ao contrário do controle de atitude do Capítulo 3 onde existia apenas um ângulo fixo a ser alcançado.

A amplitude da oscilação do corpo $\hat{\phi}_d$ é determinada através do momento angular que deve ser mantido igual a zero, como determinado pela operação dinamicamente passiva. Portanto, a amplitude da oscilação desejada do corpo é proporcional a amplitude do ângulo da perna, $\hat{\phi}_d = -J_b / J_1 \hat{\theta}_d$.

O ângulo do corpo desejado no contato ($\eta_s = 1$) é $\phi_{d,td}$ e possui a mesma magnitude, porém com sinal negativo na decolagem ($\eta_s = -1$). Assim, $\phi_d(\eta_s)$ é calculado como:

$$\phi_d = -\hat{\phi}_d \text{sen}(\omega_h t) = -\hat{\phi}_d \text{sen}\left(\frac{2\pi}{T_{\text{step}}} \frac{T_s}{2} \eta_s\right) = -\hat{\phi}_d \text{sen}(\pi \rho \eta_s) \quad (4.37)$$

Novamente, o controlador utiliza a dinâmica inversa para seguir a trajetória desejada para o ângulo do corpo. Baseado nas equações de movimento do robô durante o *stance* (Apêndice), o controlador é da forma:

$$\tau_s = J_b (\ddot{e}_\phi + k_{vs} \dot{e}_\phi + k_{ps} e_\phi) + k_h (\phi - \theta) \quad (4.38)$$

A aplicação deste controlador resulta no erro dinâmico $\ddot{e}_\phi + k_{vs} \dot{e}_\phi + k_{ps} e_\phi = 0$, onde $e_\phi = \phi_d - \phi$. Quando o erro de regime é nulo, o deslocamento do atuador τ_s também é nulo. Os valores dos ganhos k_{ps} e k_{vs} são calculados através dos mesmos critérios utilizados na seção anterior.

As simulações foram realizadas utilizando esta estratégia de controle no modelo simplificado (Seção 2.2). No entanto, foram observados alguns problemas na implementação deste algoritmo para modelo mais completo (Seção 2.1). Estes problemas são discutidos na Seção 6.5 do Capítulo 6. Assim, foi desenvolvida uma nova estratégia para o modelo da Seção 2.1 também baseada na dinâmica passiva. Esta estratégia é apresentada no Capítulo 5.

5. CONTROLE COM REDUÇÃO DA ENERGIA CONSUMIDA

A estratégia apresentada neste capítulo é uma extensão do algoritmo apresentado no Capítulo 3. Esta estratégia tem como objetivo reduzir a energia consumida pelo atuador do quadril. Para isto, uma mola torsional de rigidez K_H é adicionada ao quadril do modelo apresentado na Seção 2.1. Como este modelo, com os mesmos parâmetros físicos, é o mesmo utilizado na estratégia apresentada por RAIBERT (1984, 1986), é possível realizar comparações de desempenho e energia entre os dois algoritmos.

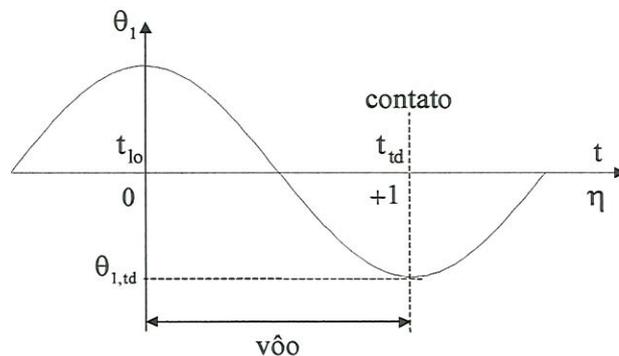


FIGURA 23- Oscilação ideal do ângulo da perna θ_1 durante a fase de vôo. Esta oscilação é obtida através da dinâmica passiva do quadril. A trajetória deve ser de tal forma que no contato o ângulo assuma o valor $\theta_{1,td}$. Acima do eixo horizontal, são mostrados os tempos e abaixo desta linha, são mostrados os valores da variável de locomoção.

Como na estratégia apresentada no Capítulo 3, este algoritmo controla a velocidade através do posicionamento do pé durante o vôo e a atitude através da atuação do quadril durante o *stance*. No entanto, para o controle de velocidade, não é estabelecido um valor desejado para o ângulo de contato da perna. Ao contrário, é gerada uma trajetória para o ângulo da perna de forma que no contato, este assuma o valor desejado.

A idéia central desta estratégia é baseada no movimento passivo do quadril, como ilustrado pela FIGURA 23. Baseado no modelo simplificado, a frequência natural da oscilação do quadril é dada aproximadamente pela eq. (5.1).

$$\omega_H \cong \sqrt{\frac{K_H}{I_e}} \quad (5.1)$$

onde $I_e = I'_1 I'_2 / (I'_1 + I'_2)$ é o momento de inércia efetivo e os termos $I'_1 = I_1 + M_1 r_1^2$ e $I'_2 = I_2 + M_2 r_2^2$ são os momentos de inércia em relação ao quadril. Considerando o tempo de vôo aproximadamente igual ao tempo de *stance*, a constante de mola é escolhida de tal maneira que o período de sua oscilação seja igual ao tempo de duração do passo, T_{step} . Portanto, a constante de mola K_H é dada por:

$$K_H = \left(\frac{2\pi}{T_{step}} \right)^2 I_e \quad (5.2)$$

Conforme mostra a FIGURA 23, para a perna atingir o solo com ângulo de contato desejado $\theta_{1,td}$, a oscilação do quadril deve estar sincronizada com o movimento vertical. Para alcançar tal sincronização, é utilizado a variável de tempo de locomoção η (AHMADI & BUEHLER, 1997b) definida no Capítulo 4 (Seção 4.2.2). Porém, neste caso, esta variável relaciona a fase de vôo no intervalo fixo $[0 \ 1]$ entre a decolagem ($\eta_{lo} = 0$) e o contato ($\eta_{td} = 1$). Portanto, o tempo de locomoção é definido durante o vôo como:

$$\eta = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\dot{y}_2}{\dot{y}_{2,lo+}} \right); \quad \eta: [\dot{y}_{2,lo+} \ \dot{y}_{2,td-}] \rightarrow [0 \ 1] \quad (5.3)$$

Durante o vôo, conforme ilustra a FIGURA 24, o ângulo de contato desejado da perna é obtido através das expressões apresentadas no Capítulo 3. Utilizando o tempo de locomoção obtido pela eq. (5.3) e as equações (3.23) e (3.17), a trajetória do ângulo da perna durante o vôo é definida como:

$$\theta_{1,d} = \theta_{1,td} \cos(\pi\eta) \quad (5.4)$$

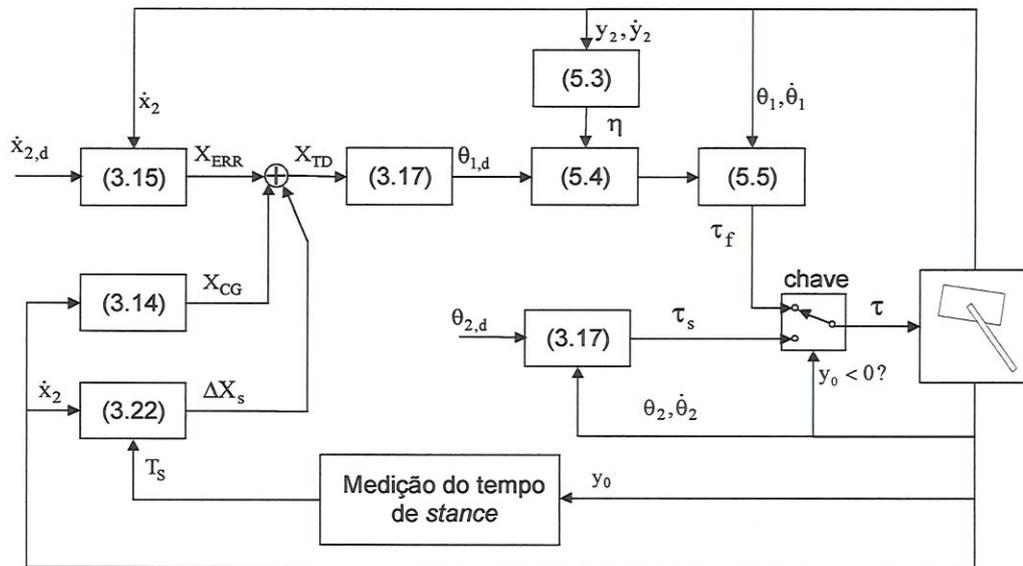


FIGURA 24 – Estratégia para o controle horizontal. Baseia-se em encontrar uma posição de contato do pé durante o vôo como sugerido por Raibert. Porém, para atingir este ângulo desejado, uma trajetória é gerada considerando o movimento passivo do quadril. Durante o *stance*, um servo linear controla a atitude do robô. O número entre parênteses representa o número da equação associada ao bloco.

Para realizar esta trajetória, é utilizado um controlador baseado na dinâmica inversa do sistema simplificado. O mesmo sistema (eq. 3.31) foi utilizado no Capítulo 3 para o projeto dos controladores. O controlador baseado na dinâmica inversa é comumente utilizado em robôs manipuladores (KOIVO, 1989) e é expresso pela eq. (5.5).

$$\tau = -I'_1 (\ddot{\theta}_{1,d} + K_{pf} e_{\theta_1} + K_{vf} \dot{e}_{\theta_1}) - K_H (\theta_1 - \theta_2) \quad (5.5)$$

onde $e_{\theta_1} = \theta_{1,d} - \theta_1$ é o erro do ângulo da perna e K_{pf} , K_{vf} são os ganhos do controlador durante a fase de vôo. Os ganhos são escolhidos de tal forma que a resposta do controlador seja mais rápida que a trajetória desejada. Os valores dos ganhos são listados no Apêndice. Conforme mostra a FIGURA 24, o controle de atitude é realizado utilizando a mesma estratégia do Capítulo 3 (método 2).

Simulações foram realizadas para esta estratégia e os resultados são apresentados no Capítulo 6 (seções 6.6 e 6.7). Este capítulo também compara esta estratégia e a apresentada no Capítulo 3 em relação ao desempenho e a energia consumida pelo quadril.

6. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados das simulações realizadas para as estratégias de controle apresentadas nos capítulos 3, 4 e 5. Os valores numéricos utilizados nos modelos estão listados no Apêndice. Todas as simulações foram realizadas utilizando o Simulink[®] 2.1 (SIMULINK USERS GUIDE, 1997) da Mathworks. O Simulink é um *software* para modelamento, simulação e análise de sistemas dinâmicos.

Os resultados estão organizados da seguinte forma. Na Seção 6.1, são mostrados os resultados do controle vertical abordado na Seção 3.1 do Capítulo 3. A Seção 6.2 apresenta os resultados do controle horizontal, comparando os dois métodos propostos na Seção 3.2. Na Seção 6.3, são apresentados os resultados da validação dos modelos lineares utilizados no projeto dos controladores. Nesta seção são apresentados os resultados de desempenho dos controladores para o vôo e o *stance*. Os resultados da corrida dinamicamente passiva, abordada no Capítulo 4, são apresentados na Seção 6.4. A estratégia de controle baseada na corrida dinamicamente passiva é então apresentada na Seção 6.5. A Seção 6.6 apresenta os resultados da estratégia abordada no Capítulo 5. Finalmente, na Seção 6.7, são apresentados os resultados do consumo de energia para as estratégias dos capítulos 3 e 5 e estes resultados são comparados.

Em todas as simulações foram utilizados métodos de integração de passo variável. Para as simulações do modelo com perdas de energia (seções 6.1, 6.2, 6.3, 6.6 e 6.7), foi utilizado o método de integração com rigidez numérica (SHAMPINE & REICHEL, 1998). Para as simulações do modelo simplificado (seções 5.4 e 5.5), foi utilizado o método de integração Dormand-Prince (DORMAND & PRINCE, 1980).

6.1. Controle Vertical através da compensação das perdas de energia

Esta seção apresenta os resultados e análise do controle vertical apresentado no Capítulo 3 (Seção 3.1). Para a análise do controle vertical, foi utilizado o modelo da Seção 2.1 considerando apenas seu movimento vertical, ou seja, não há movimento do quadril. Em todas as simulações, o instante que a perna é recolhida ocorre logo que esta deixa o solo (decolagem). Foram realizados basicamente dois testes. O primeiro teste avalia a capacidade do controle vertical de iniciar os pulos do robô a partir do repouso. O segundo teste avalia a capacidade do algoritmo de regular o pulo para alturas diferentes.

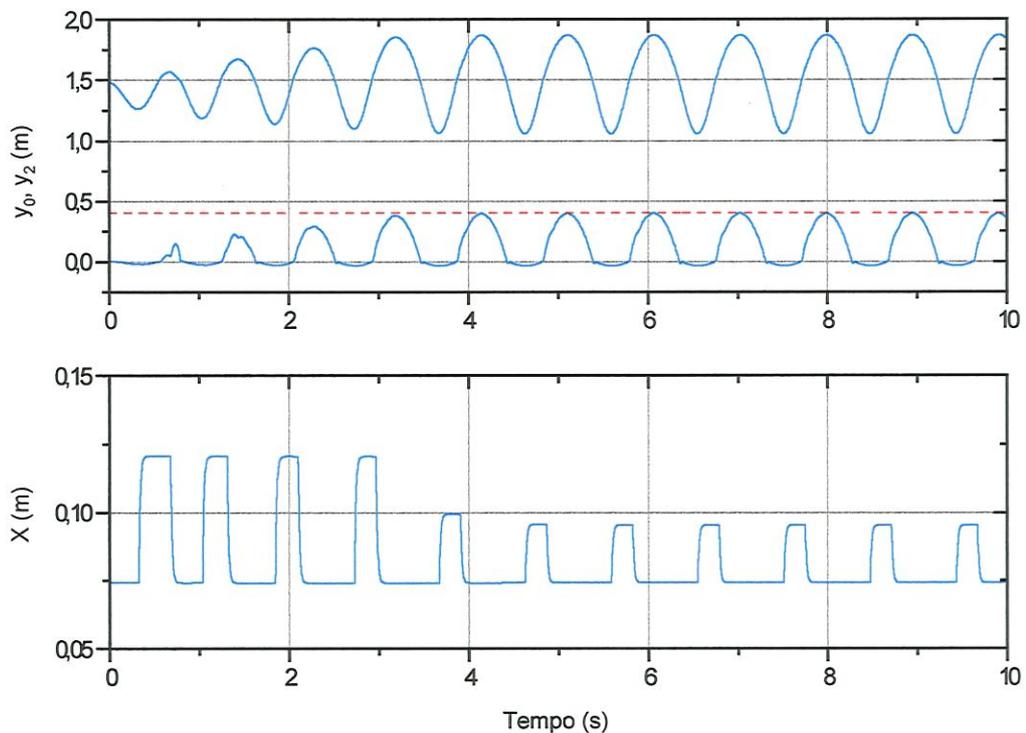


FIGURA 25 - Controle vertical. Iniciando-se do repouso, a energia vertical foi aumentada até a altura desejada ser atingida. A altura é regulada através do atuador de posição que atua em série com a mola de perna. A altura é estabilizada em 6 pulos. Curva mais acima - altura do quadril. Curva do meio - altura do pé. Curva mais abaixo - comprimento do atuador da perna.

As figuras 25 e 26 ilustram os resultados do primeiro teste. Na FIGURA 25, são mostrados as alturas do pé y_0 e do corpo y_2 e o comprimento do atuador x , durante 10 segundos de simulação. Iniciando do repouso, o controle vertical age em cada pulo, através do atuador de posição, até que a energia vertical atinja o valor

necessário para manter a altura desejada ($H_d = 0,4$ m). Como o atuador é limitado por χ_{\max} , a energia que pode ser adicionada em cada ciclo é limitada. Portanto, foi necessário um certo número de pulos para que o robô alcançasse a altura desejada. A FIGURA 25 demonstra que a altura é estabilizada em 6 pulos. Os dados da altura do pé demonstraram que o erro de regime para este caso é de 1,17 %.

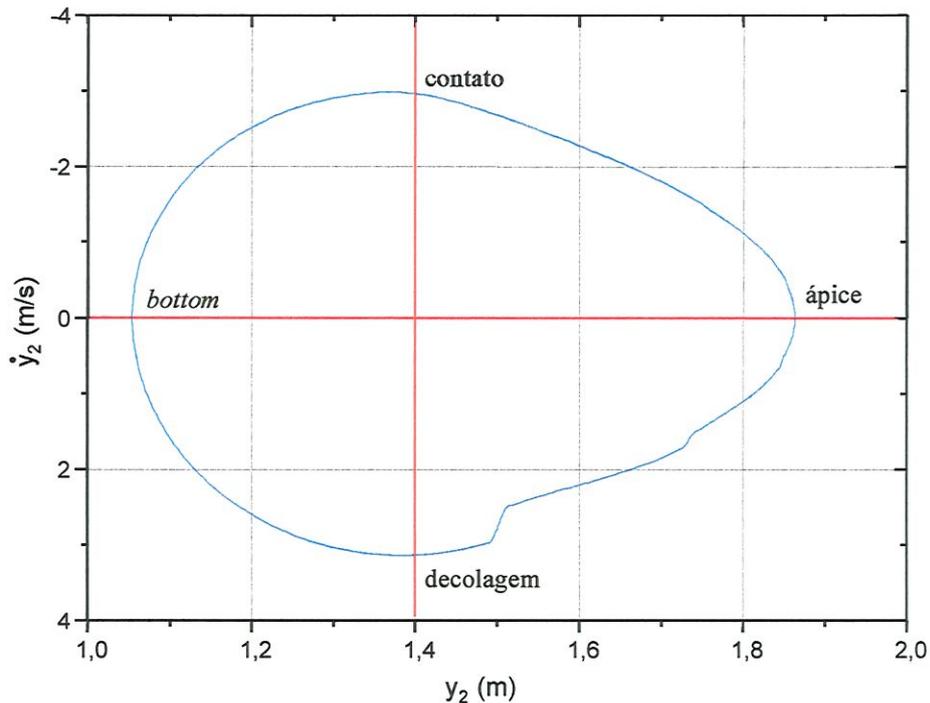


FIGURA 26 - Plano de fase para o controle vertical. Quatro eventos de sincronização são indicados onde a curva cruza os eixos em vermelho. Os dados mostram a simulação do sistema em regime para a altura desejada $H_d = 0,4$ m. A parte não suave entre a decolagem e o ápice indica a vibração amortecida que ocorre quando o fim de curso é atingido.

Na FIGURA 26, é mostrado, através do plano de fase, o ciclo limite do primeiro teste após 5 segundos de simulação. Através desta figura, durante a fase de voo, é observada uma trajetória parabólica devido a aceleração da gravidade. Durante o *stance*, é observada uma trajetória harmônica devido a mola. A figura também destaca os quatro eventos que ocorrem durante o ciclo do pulo (Seção 3.1).

A FIGURA 27 mostra os resultados do segundo teste. Nesta figura, são apresentados 80 segundos de simulação, com uma seqüência de pulos na qual a altura desejada é ajustada durante a simulação. A figura também mostra, como discutido no Capítulo 3, que o atuador da perna pode remover a energia do sistema

para reduzir a altura do pulo ($t = 25$ e 45 s). Comparando os instantes 45 e 65 s, é possível observar como a altura é reduzida. No instante 45 s, além das perdas de energia inerentes ao sistema, o controle também retira energia do sistema. No instante 65 s, o controle está desativado, e assim, o robô perde altura apenas devido as perdas de energia. No instante 45 s, a altura é reduzida mais rapidamente, e portanto, é mostrado a eficiência do controle também para diminuir a altura do pulo.

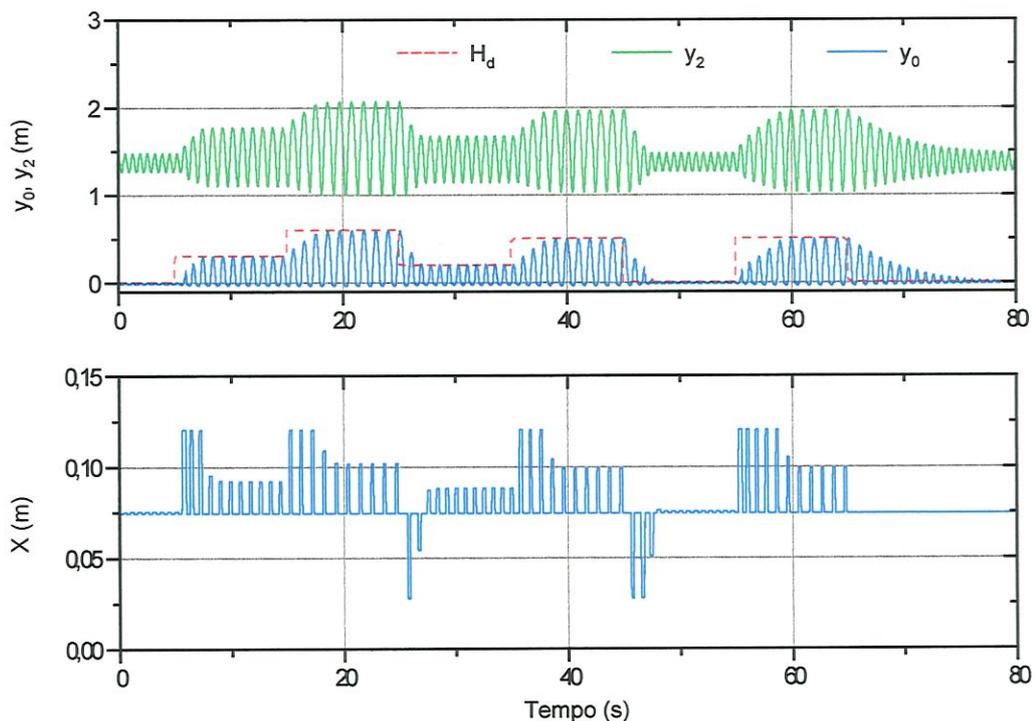


FIGURA 27 - Sequência de pulos verticais. Os instantes de tempo $t = 5, 15, 25, 35, 45, 55, 65$ s com as respectivas alturas desejadas (curva vermelha) $H = 0,3; 0,6; 0,2; 0,5; 0; 0,5; 0$. No instante 65 s, o controle é desativado. A curva mais acima – altura do quadril. Curva do meio – altura do pé. A curva mais abaixo – deslocamento do atuador da perna.

Para o modelo restrito ao movimento vertical, o algoritmo obteve um resultado satisfatório, pois além de estabilizar a altura do pulo, o erro de regime se apresentou pequeno. O maior erro observado foi de 2,36 % para a altura desejada de $H_d = 0,6$ m. No entanto, para velocidades diferentes de zero, este erro aumenta consideravelmente. Para $H_d = 0,3$ m, por exemplo, obtém-se um erro de regime de até 13,67% (2 m/s). Isto ocorre pois o controle vertical considera apenas a energia vertical do sistema. Quando o robô se locomove a uma determinada velocidade longitudinal, este também possui energia horizontal.

6.2. Controle Horizontal - velocidade e atitude

Esta seção apresenta os resultados da simulação da estratégia de controle horizontal proposta no Capítulo 3. As seções 6.2.1 e 6.2.2 apresentam os resultados de cada um dos métodos abordados na Seção 3.2.

6.2.1. Método 1 - posicionamento do pé

A FIGURA 28 mostra os resultados de uma simulação utilizando o algoritmo de posicionamento do pé apresentado na Seção 3.2.1. Neste caso, a velocidade desejada é nula e um erro do ângulo do corpo é introduzido como condição inicial.

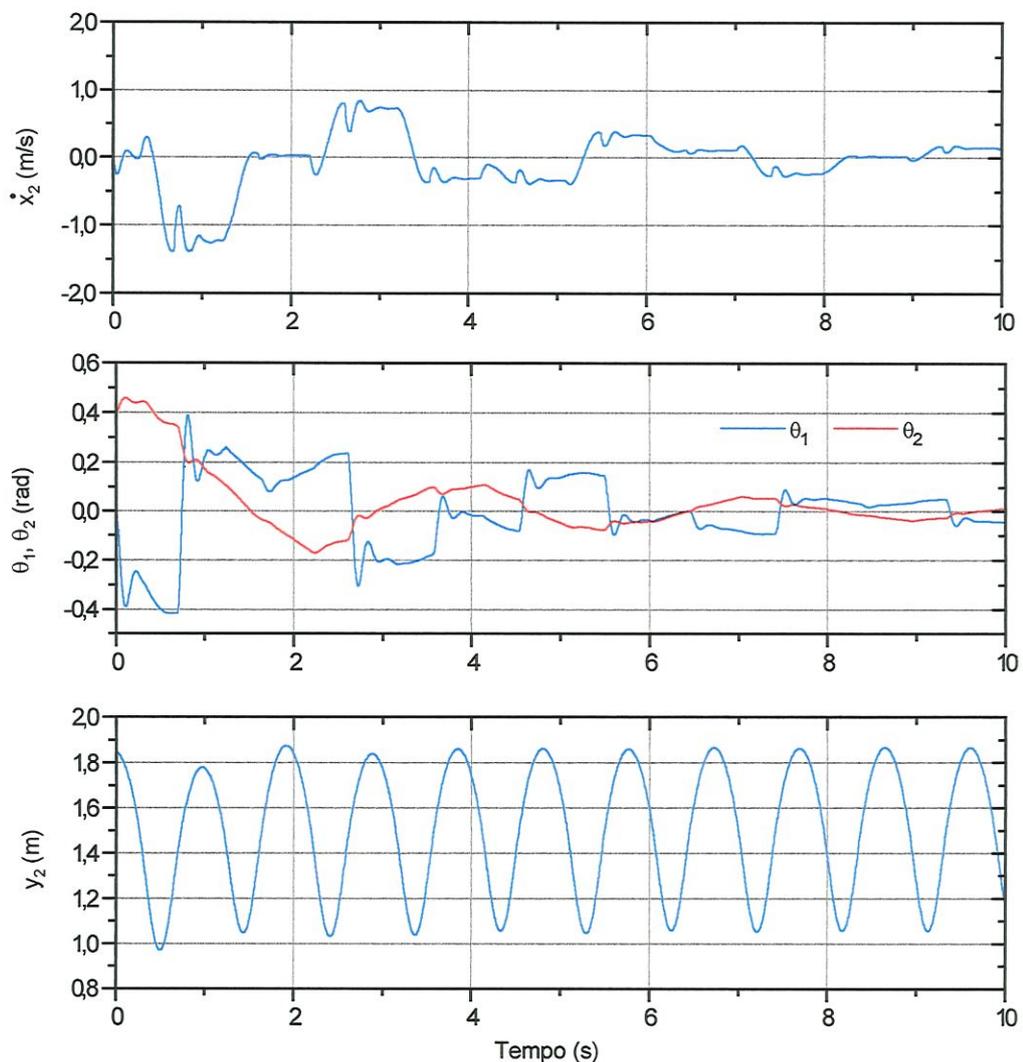


FIGURA 28 - Controle horizontal utilizando o método 1. O erro inicial da atitude do corpo é de 0,4 radianos. Os erros dos estados se aproximam a zero em aproximadamente 9,5 segundos. $K_1 = 0,2$; $K_2 = 0,3$; $K_3 = 0,3$.

Os dados da FIGURA 28 mostram a correção deste erro de atitude. O erro inicial do ângulo do corpo θ_2 é de 0,4 radianos e foi corrigido em aproximadamente 9,5 segundos.

Uma desvantagem observada neste algoritmo é que não foi possível controlar o movimento horizontal do robô para velocidades diferentes de zero. A velocidade de locomoção é limitada pois o movimento da perna é restrito durante o *stance* pelo ângulo fixo do quadril.

Esta deficiência no algoritmo sugere a utilização de um método que possa ser aplicado para velocidades não nulas. A seção seguinte apresenta os resultados do segundo método que tem como objetivo suprir as deficiências do método 1.

6.2.2. Método 2 - posicionamento do pé e controle de atitude

As figuras 29, 30 e 31 mostram os resultados de simulações utilizando algoritmo proposto pelo método 2 da Seção 3.2.2.

Para comparar com o método 1, é realizada uma simulação com as mesmas condições iniciais da simulação apresentada na seção anterior. A FIGURA 29 mostra os resultados desta simulação onde a velocidade desejada é nula e o erro do ângulo do corpo θ_2 é de 0,4 radianos. Os dados da FIGURA 29 mostram que a correção do erro de atitude ocorreu em aproximadamente 6 segundos. Outras simulações foram realizadas com condições iniciais diferentes e os resultados obtidos foram similares.

Comparando os resultados das figuras 28 e 29, foi observado que o método 2 apresenta um desempenho melhor sobre o método 1. O método 2 estabiliza o sistema quase duas vezes mais rápido que o método 1. Isto ocorre pois o método 2 controla a velocidade durante o vôle e a atitude durante o *stance*. O mesmo não ocorre no método 1, que controla as duas variáveis apenas com o posicionamento do pé durante o vôle.

Para o método 2, foram também realizadas simulações envolvendo velocidades diferentes de zero. Como no controle vertical, basicamente dois testes foram realizados. O primeiro teste avalia a capacidade do sistema de atingir uma determinada velocidade a partir do repouso ($\dot{x}_2 = 0$). O segundo teste avalia a capacidade do sistema de regular sua velocidade longitudinal para diferentes valores desejados.

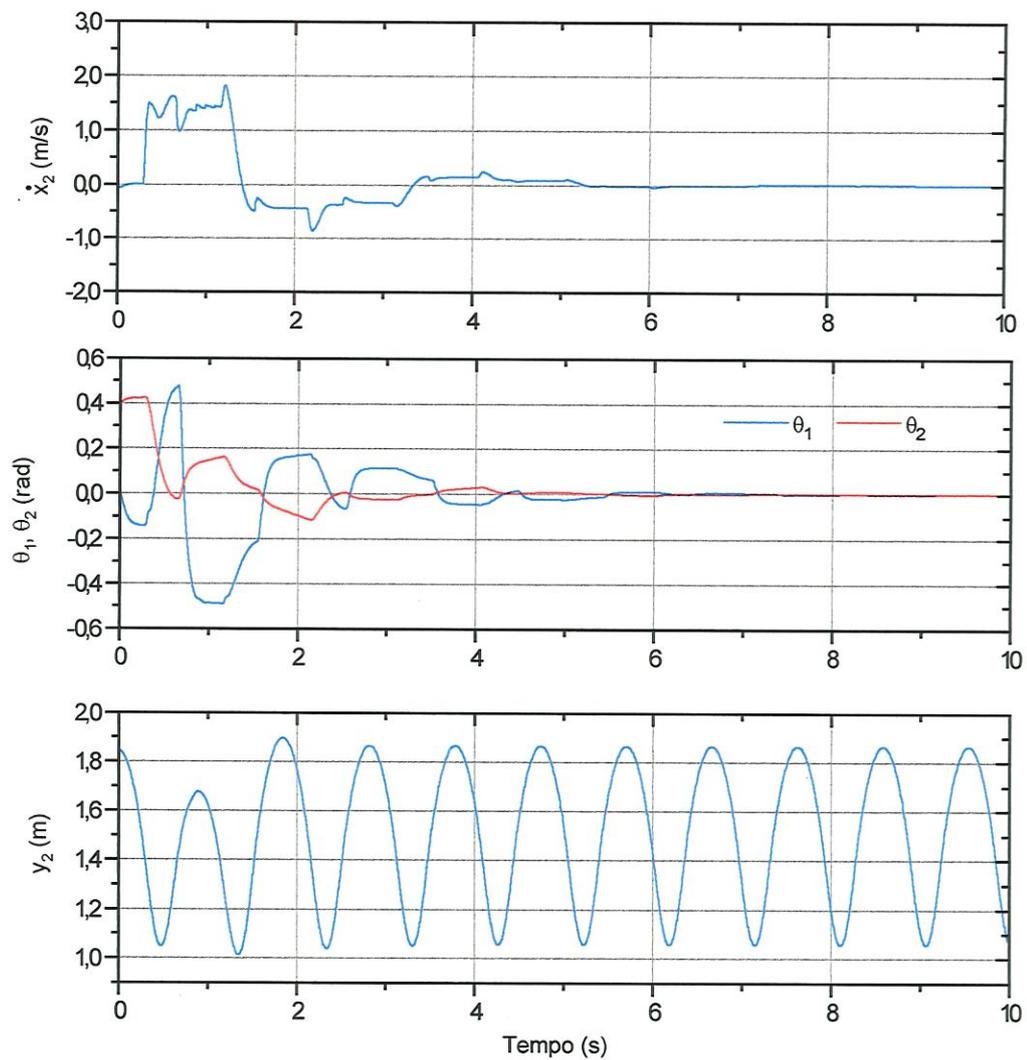


FIGURA 29 - Controle horizontal utilizando o método 2. O erro inicial da atitude do corpo é 0,4 radianos. Os erros dos estados se aproximam de zero em aproximadamente 6 segundos. $K_1 = 0,1$; $K_2 = 0$; $K_3 = 0$.

A FIGURA 30 mostra os resultados da simulação para o primeiro teste. Iniciando o robô do repouso ($\dot{x}_2 = 0$), com postura vertical e pulando com altura de 0,3 m, é estabelecida uma velocidade desejada $\dot{x}_{2,d} = 1\text{ m/s}$. Os dados da FIGURA 30 mostram que o robô atinge a velocidade desejada em aproximadamente 3,5 segundos. Durante o regime, a velocidade varia entre 0,76 e 1,23 m/s.



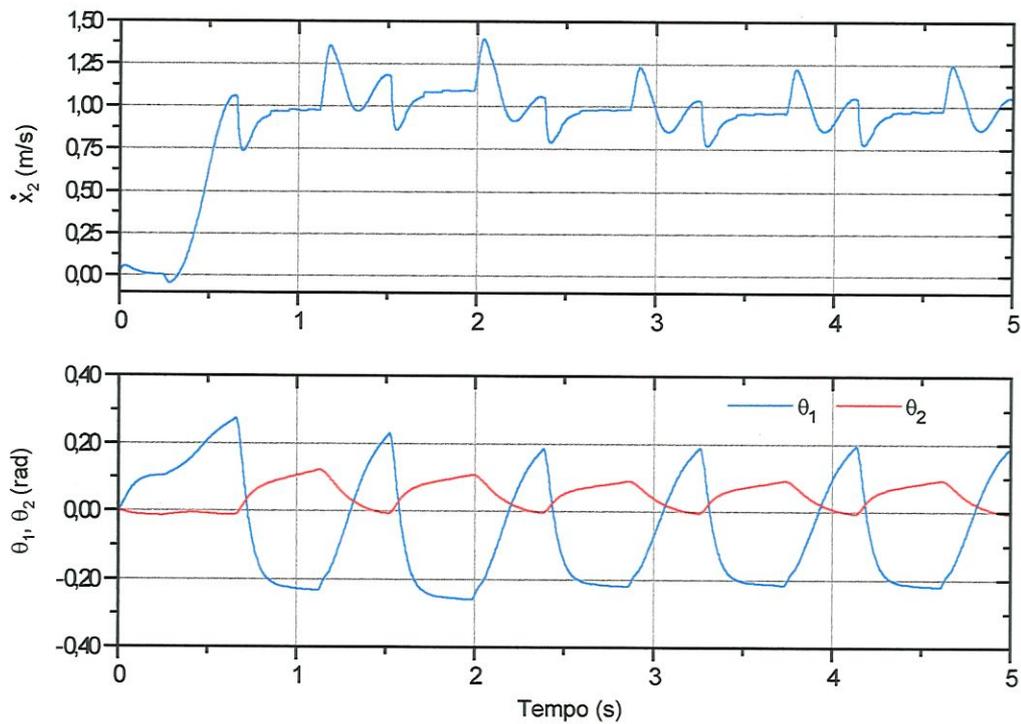


FIGURA 30 - Controle horizontal utilizando o método 2. Resposta do sistema para o degrau de velocidade longitudinal desejada $\dot{x}_{2,d} = 1\text{m/s}$. A resposta do sistema é de aproximadamente 3,5 segundos. $K_1 = 0,1$; $K_2 = 0$; $K_3 = 0$.

A FIGURA 31 mostra os resultados do segundo teste. Iniciando o robô novamente do repouso ($\dot{x}_2 = 0$), com postura vertical e pulando com altura de 0,3 m, é estabelecida uma seqüência de velocidades desejadas. Os dados da FIGURA 31 mostram que o robô possui um desempenho satisfatório para velocidades longitudinais de até 2 m/s.

Em suma, os resultados, obtidos nas simulações dos dois métodos, mostraram que o método 2 é o mais adequado para o controle horizontal. Além de estabilizar o sistema mais rápido, este método possui a capacidade de controlar a velocidade longitudinal para valores diferentes. De maneira geral, os resultados também se mostraram condizentes com os resultados apresentados em RAIBERT (1984).

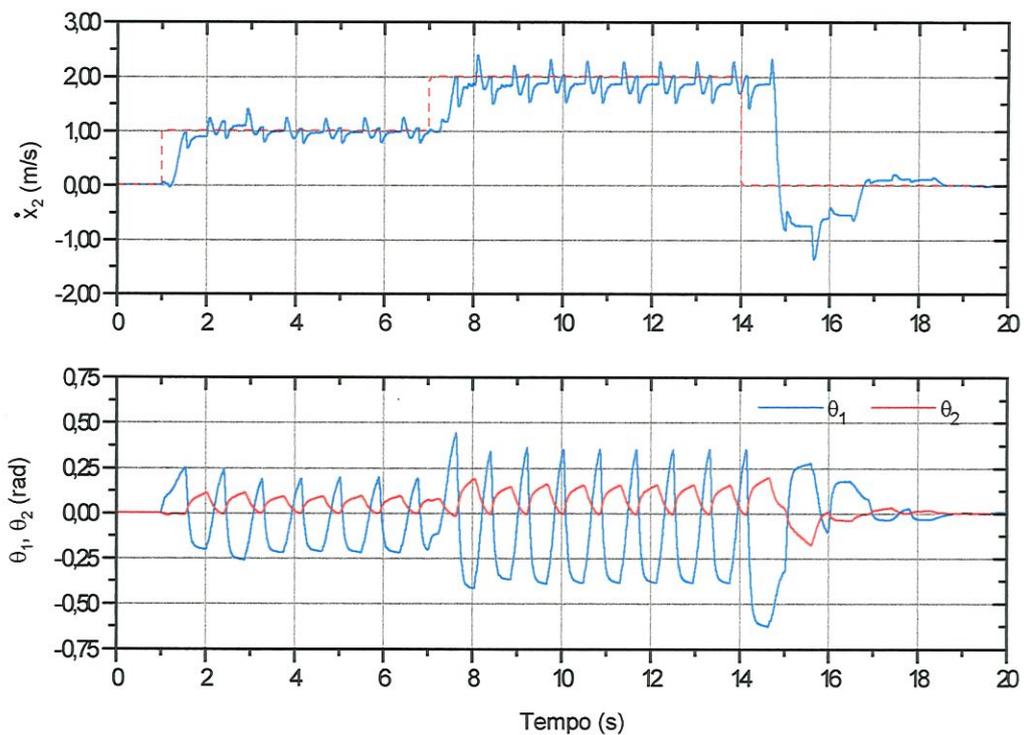


FIGURA 31 - Controle horizontal utilizando o método 2. Seqüência de velocidades longitudinais desejadas. Os instantes de tempo $t = 1, 7, 14$ s com as respectivas velocidades desejadas (curva vermelha) $\dot{x}_{2,d} = 1, 2; 0$ m/s. $K_1 = 0,1$; $K_2 = 0$; $K_3 = 0$.

6.3. Validação e desempenho dos controladores

Esta seção apresenta os resultados dos controladores utilizados na estratégia de controle do Capítulo 3 (seções 3.2 e 3.3). A Seção 6.3.1 apresenta a validação dos modelos lineares utilizados como base para o projeto dos controladores. Na Seção 6.3.2, são apresentados os resultados de desempenho dos controladores com os ganhos calculados através dos critérios da Seção 3.3. Finalmente, na Seção 6.3.3, demonstra-se como os parâmetros de desempenho dos controladores influenciam no desempenho da velocidade longitudinal.

6.3.1. Validação dos modelos lineares utilizados no projeto dos controladores

Com a finalidade de validar os modelos lineares utilizados na Seção 3.3, foram propostos dois testes para as fases de voo e de *stance*.

A FIGURA 32 ilustra a simulação realizada com o objetivo de validar o modelo linear proposto durante a fase de voo. Primeiramente, as condições iniciais do robô são calculadas de tal maneira que este esteja em posição vertical e a uma determinada altura. A altura inicial do robô deve ser grande o suficiente para permitir que o ângulo desejado seja alcançado antes deste tocar o solo.

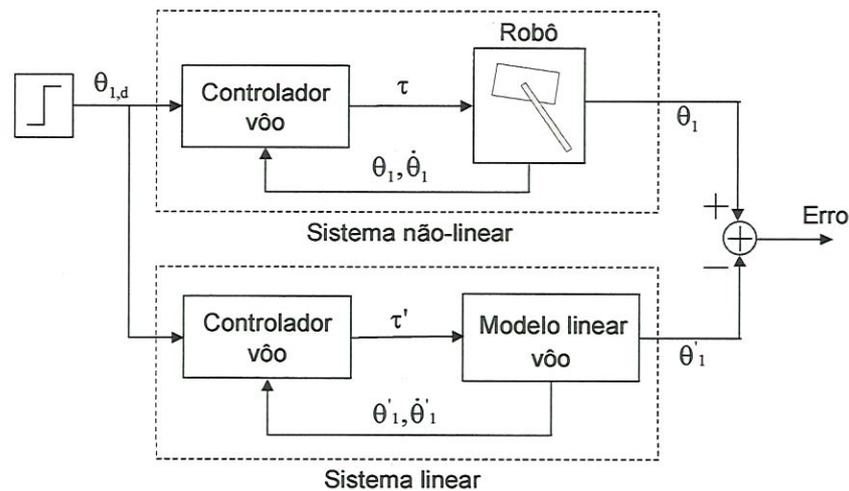


FIGURA 32 – Simulação para validar o modelo linear durante o voo. Dois sistemas são simulados simultaneamente. Os dois sistemas possuem o mesmo controlador. O sistema linear utiliza o modelo linear como planta, enquanto o sistema não-linear utiliza o modelo do robô.

Conforme mostra a FIGURA 32, dois sistemas são simulados simultaneamente. O sistema não-linear consiste de um controlador linear (PD) proposto na Seção 3.2 e do modelo do robô (Seção 2.1). O sistema linear é composto do mesmo controlador PD e do modelo linear apresentado na Seção 3.3. Uma entrada degrau é introduzida à ambos sistemas como ângulo da perna desejado $\theta_{1,d}$. Finalmente, a saída de cada sistema (θ_1, θ'_1) é comparada e os resultados são apresentados na FIGURA 33. Esta figura mostra os ângulos (θ_1, θ'_1) dos dois sistemas e o erro, que descreve a diferença entre as duas saídas. O erro se mostrou menor que 0,26 % do valor desejado.

O controlador utilizado na simulação possui tempo de resposta de 0,3 segundos e amortecimento crítico. No entanto, foram utilizados vários ganhos para o controlador, obtendo resultados semelhantes. Desta forma, a aproximação linear foi

validada, permitindo assim utilizá-la como base para o projeto do controlador durante o voo.

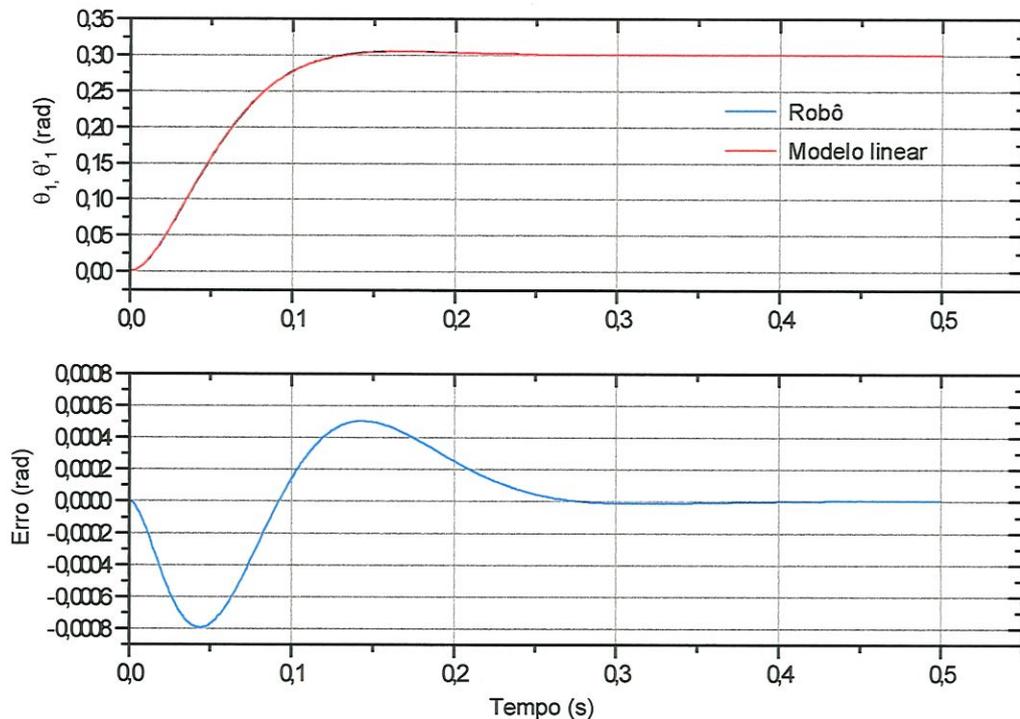


FIGURA 33 –Validação do modelo linear durante o voo. O ângulo desejado é de 0,3 radianos. No gráfico superior, a curva azul θ_1 representa o modelo do robô e a curva vermelha θ'_1 representa o modelo linear durante o voo. No gráfico inferior, o erro representa a diferença entre os ângulos θ_1 e θ'_1 .

Para a fase de *stance*, é utilizado um outro teste para validar o sistema. Neste caso, o sistema linear no *stance* é simulado simultaneamente com a estratégia apresentada no Capítulo 3 (método 2). Para isto, o modelo linear deve possuir a mesma condição inicial que o robô, quando este entra em contato com o solo. A entrada desejada do sistema linear é nula, como no sistema não-linear.

A FIGURA 34 ilustra os resultados obtidos para este método de validação. Esta figura mostra os ângulos do corpo (θ_2, θ'_2) dos dois sistemas e o erro entre estes. Como na validação durante o voo, o controlador utilizado na simulação possui tempo de resposta de 0,3 segundos e amortecimento crítico. Para este caso, o erro se mostrou inferior a 5% do valor inicial.

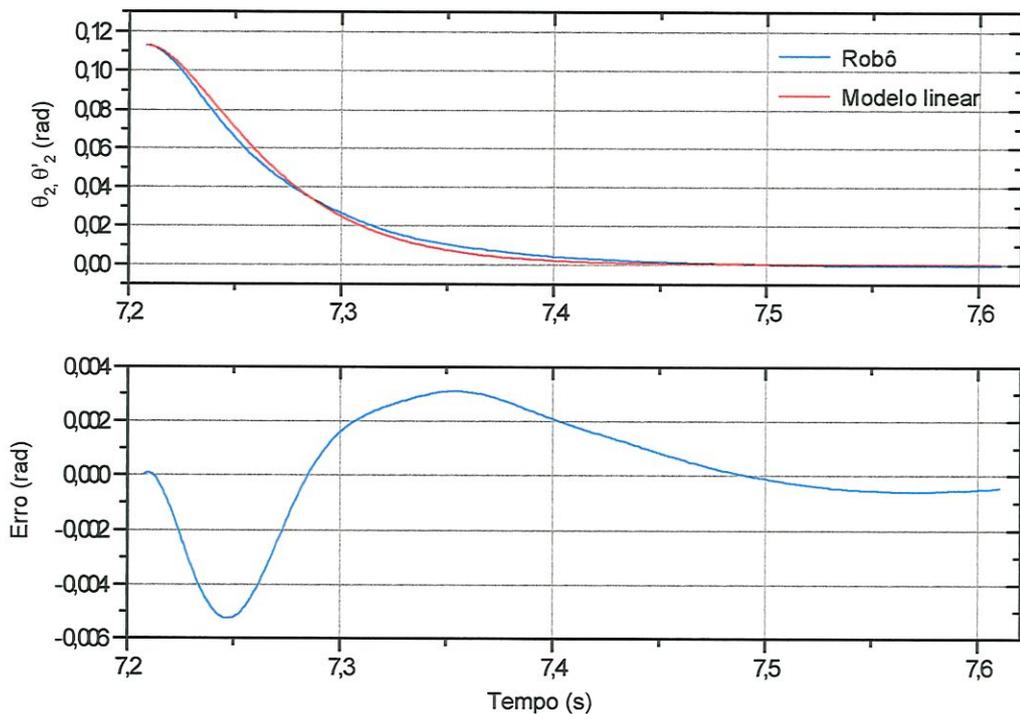


FIGURA 34 - Validação do modelo linear para o *stance*. No gráfico superior, a curva azul θ_2 representa o modelo do robô e a curva vermelha θ'_2 representa o modelo linear no *stance*. No gráfico inferior, o erro representa a diferença entre os ângulos θ_2 e θ'_2 .

Outros ganhos foram utilizados para o controlador e apresentaram resultados similares. Portanto, os resultados validam a aproximação linear realizada, permitindo utilizar o modelo linear, apresentado na Seção 3.3, como base para o projeto de controladores do robô durante o *stance*.

6.3.2. Desempenho do controlador

Esta seção apresenta os resultados dos controladores utilizados pela estratégia de controle do Capítulo 3 (método 2). Os valores dos parâmetros dos controladores são listados no Apêndice. A FIGURA 35 apresenta o desempenho do controlador durante a fase de vôo. Nesta figura, são mostradas os ângulos atual θ_1 e desejado $\theta_{1,d}$ da perna e o erro do controlador. É interessante observar que o ângulo desejado não é constante durante o vôo. Este ângulo depende da velocidade longitudinal e do ângulo do corpo (Seção 3.2) que são variáveis dinâmicas.

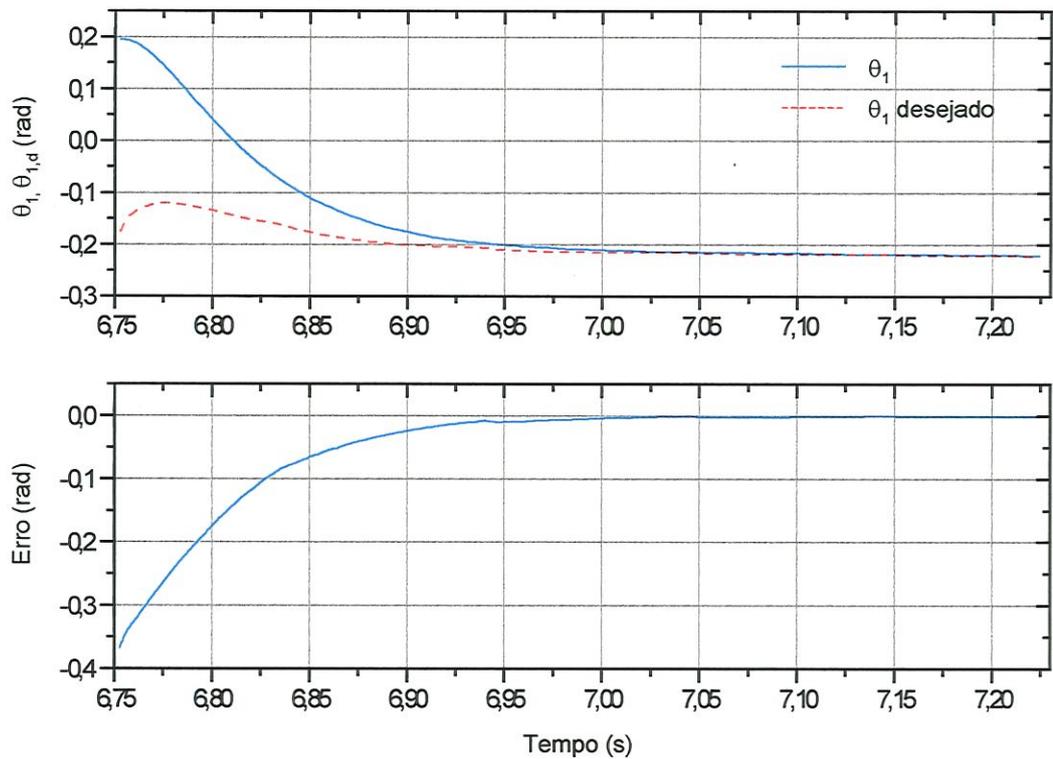


FIGURA 35 – Desempenho do controlador durante o vôo. No gráfico superior, são mostrados os ângulos da perna atual θ_1 e desejado $\theta_{1,d}$. O gráfico inferior mostra o erro do ângulo da perna.

A FIGURA 36 mostra os resultados do controlador durante a fase de *stance*. Apesar de apresentar um sobre-sinal de 6,53%, o controlador corrige a atitude e atende os critérios estabelecidos na Seção 3.3. De maneira geral, o desempenho dos dois controladores são bem próximos do projetado e atendem os critérios de desempenho estabelecidos na Seção 3.3. Estes resultados validam novamente a metodologia adotada.

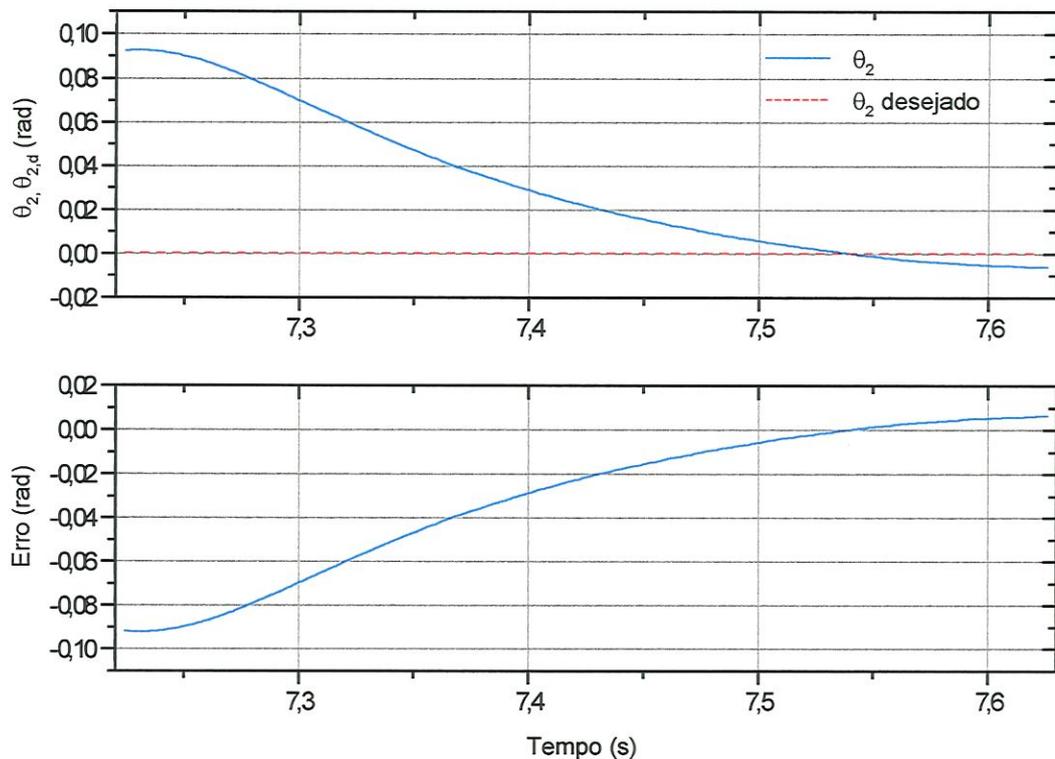


FIGURA 36 - Desempenho do controlador durante o *stance*. No gráfico superior, são mostrados os ângulos do corpo atual θ_2 e desejado $\theta_{2,d}$. O gráfico inferior mostra o erro do ângulo do corpo.

6.3.3. Influência dos controladores na velocidade longitudinal

Além de analisar o desempenho dos controladores em relação aos ângulos desejados, é também necessário verificar como este controlador influencia no desempenho geral do sistema. Como o objetivo da estratégia de controle é regular a velocidade longitudinal, foi realizado diversas simulações para avaliar a influência dos parâmetros de desempenho do controlador sobre a velocidade longitudinal.

A FIGURA 37 mostra um detalhe da FIGURA 30, definindo as fases de voo e *stance*. Nesta figura também é definido os termos de perturbação e erro de regime (ciclo limite) para a velocidade longitudinal. É interessante observar que durante o voo, o robô possui velocidade \dot{x}_2 praticamente constante. Esta velocidade constante é atingida tão rápido quanto o ângulo da perna desejado for alcançado.

Durante o *stance*, a influência do controlador é maior. Observa-se, através das simulações, que a redução no tempo de subida do controlador gera um aumento na perturbação da velocidade (FIGURA 37). Por outro lado, quanto maior o tempo de acomodação do controlador, maior o erro de regime da velocidade (FIGURA 37).

Desta maneira, é necessário projetar um controlador rápido suficiente para não causar grandes erros de regime, e ao mesmo tempo lento o suficiente para não causar grandes perturbações. O resultado destas simulações são consideradas como critérios no projeto do controladores, apresentados na Seção 3.3. Para o controlador, utilizado nas simulações, foi observado (FIGURA 37) uma perturbação de 0,24 m/s e erro de regime de 0,028 m/s.

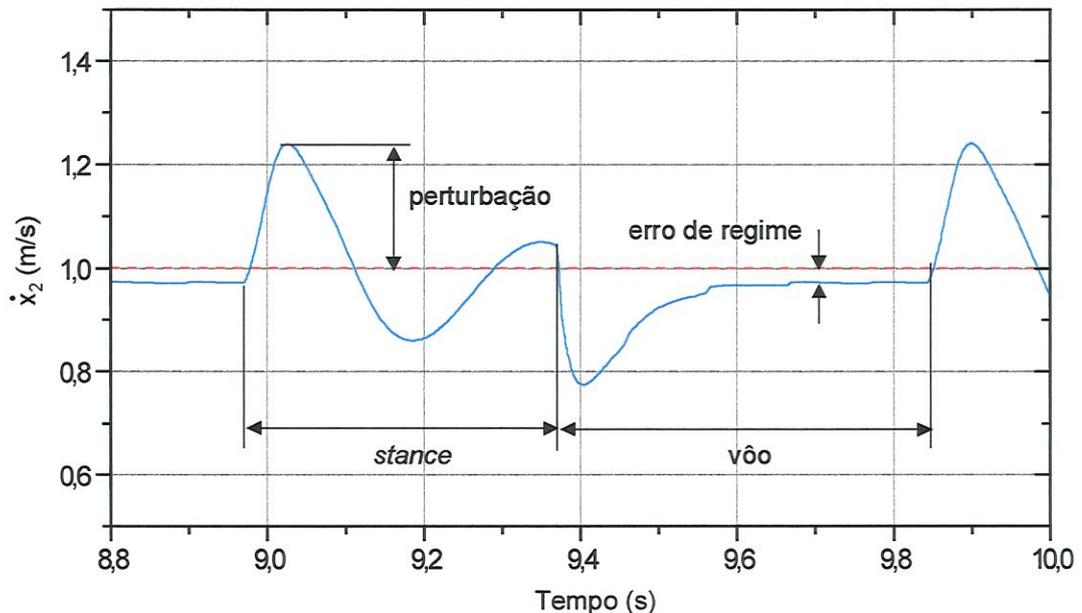


FIGURA 37 – Velocidade longitudinal e a definição dos parâmetros de desempenho geral. O erro de regime é definido quanto a velocidade durante o vôo se afasta da desejada. A perturbação é definida como a variação máxima da velocidade, em relação ao valor desejado, durante o *stance*. As fases de vôo e *stance* são também mostradas na figura.

6.4. Corrida dinamicamente passiva

A corrida dinamicamente passiva foi estudada utilizando o modelo simplificado da Seção 2.2. Dado as condições iniciais descritas no Capítulo 4, o robô pode se locomover por vários ciclos sem a utilização de atuadores.

A FIGURA 38 mostra os resultados das simulações realizadas para velocidades longitudinais 1, 2 e 3 m/s. Esta figura demonstra que as condições iniciais foram calculadas precisamente na Seção 4.1 para que o robô executa-se um número considerável de ciclos. Foi observado que embora o robô perca o equilíbrio, quanto menor a velocidade longitudinal, maior é o tempo que o sistema permanece em

equilíbrio. Isto ocorre pois as hipóteses assumidas são menos exatas para velocidades mais altas. Os parâmetros físicos do modelo utilizado nas simulações estão listados no Apêndice.

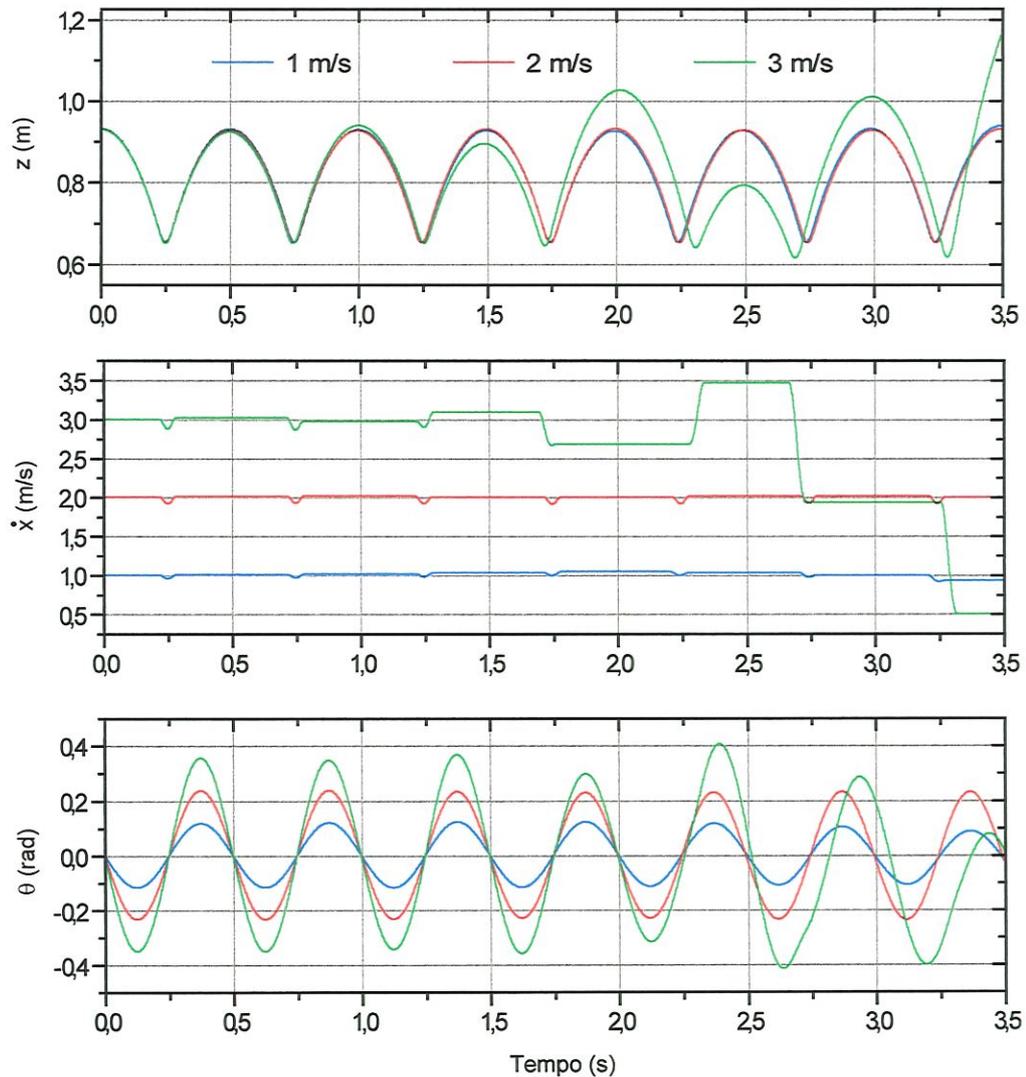


FIGURA 38 - Corrida dinamicamente passiva. Simulação para as velocidades longitudinais 1 m/s, 2 m/s e 3 m/s, utilizando as condições iniciais apropriadas. A figura mostra a altura do corpo z , a velocidade longitudinal \dot{x} e o ângulo da perna θ . Todas as corridas são instáveis e um dado momento, o robô perde o equilíbrio.

Foi observado, através da FIGURA 38, que apenas as amplitudes das oscilações da perna e do corpo precisam ser modificadas para acomodar a velocidade longitudinal desejada. Portanto, a oscilação natural do quadril pode servir de base para definir uma trajetória desejada no controle. Os resultados se mostraram condizentes com os apresentados por AHMADI & BUEHLER, 1997.

6.5. Controle da corrida dinamicamente passiva

Esta seção mostra os resultados do controle baseado na dinâmica passiva apresentado no Capítulo 4. A FIGURA 39 mostra 10 segundos de simulação para as velocidades desejadas de 1, 2 e 3 m/s. As condições iniciais do robô são as mesmas utilizadas na simulação da seção anterior.

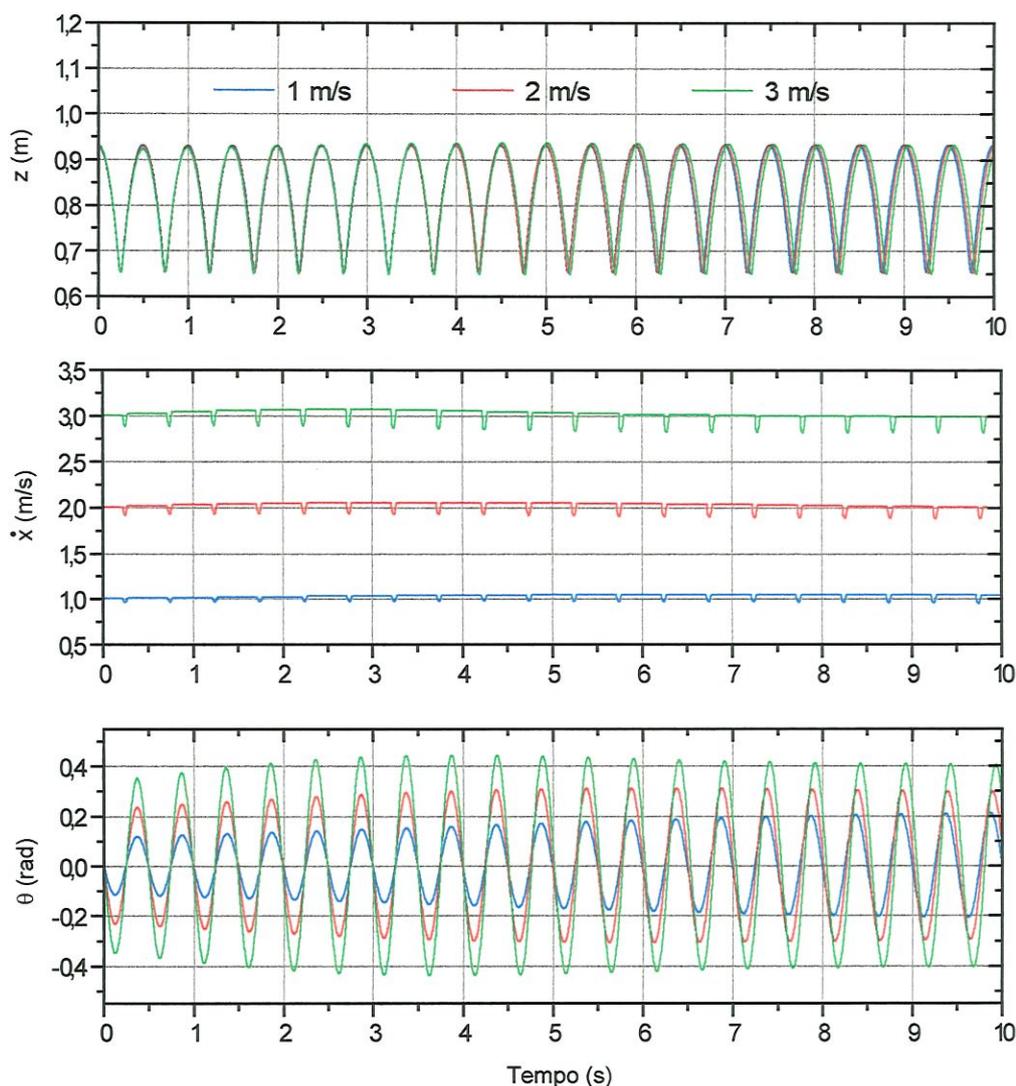


FIGURA 39 - Corrida dinamicamente passiva controlada. Simulação para as velocidades longitudinais 1 m/s, 2 m/s e 3 m/s utilizando a estratégia de controle a partir das condições iniciais apropriadas. A figura mostra a altura do corpo z , a velocidade longitudinal \dot{x} e o ângulo da perna θ . Todas as corridas são estáveis.

Comparando com os resultados apresentados na FIGURA 38, pode-se observar que o robô se locomove sem cair mesmo depois dos 3,5 segundos. Neste caso, os

desvios da velocidade \dot{x} são corrigidos pela estratégia de controle que mantém a velocidade do robô constante.

As figuras 40 e 41 apresentam os resultados de desempenho do controlador utilizado por esta estratégia para a velocidade de 2 m/s. A FIGURA 40 mostra o ângulo da perna θ e o erro do controlador durante 1 segundo de simulação. Pode-se observar, através desta figura, que o erro do ângulo da perna aumenta durante o *stance* pois neste período este ângulo não é controlado. Mesmo não controlando a trajetória do ângulo durante todo o ciclo, o erro permanece menor que 0,0043 radianos, apenas 1,43% da amplitude da trajetória desejada.

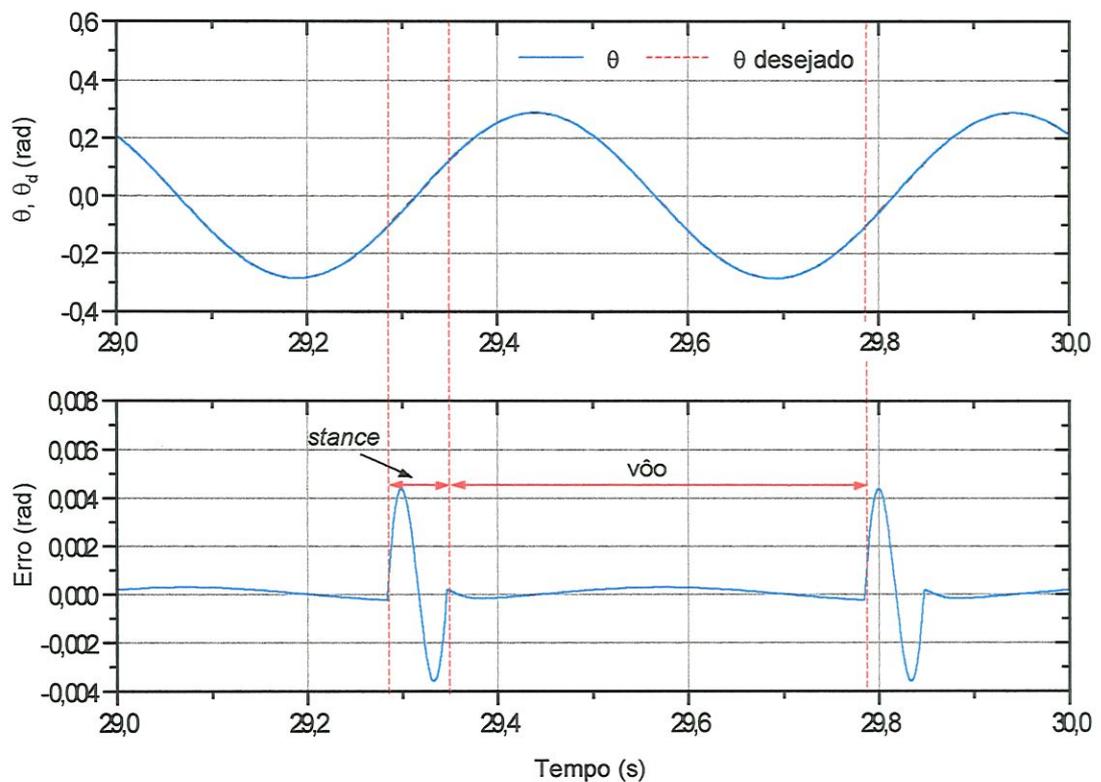


FIGURA 40 – Desempenho do controlador durante o voo. No gráfico superior, são mostrados os ângulos da perna atual θ e desejado θ_d . Note que as curvas estão sobrepostas. O gráfico inferior mostra o erro do controlador. As fase de voo e *stance* são indicadas na figura.

A FIGURA 41 mostra o ângulo do corpo ϕ e o erro do controlador durante 1 segundo de simulação. Nesta figura, pode-se observar uma oscilação do erro do ângulo do corpo. Durante o voo, o erro aumenta pois não está sendo controlado. Durante o *stance*, o erro tende a zero quando o controle atitude é ativado. O erro do ângulo do corpo permanece menor que 0,004 radianos, 13,33% da amplitude da

trajetória desejada. Neste caso, o erro é maior pois o tempo de *stance*, quando o ângulo do corpo está sendo controlado, é menor que o tempo de vôo.

Apesar destes resultados serem satisfatórios, o algoritmo apresenta alguns problemas. Como discutido no Capítulo 4, a amplitude do ângulo da perna é corrigida através de um termo do erro da velocidade longitudinal. No entanto, quando este termo de correção é grande negativamente, a amplitude do ângulo da perna desejado se torna negativa. Desta maneira, durante o *stance*, a perna se movimenta no sentido contrário ao movimento longitudinal do robô, fazendo com que este perca o equilíbrio.

Este problema foi observado nas simulações realizadas para avaliar a capacidade do algoritmo em seguir diferentes velocidades partindo do repouso ($\dot{x} = 0$). Limitando a trajetória do ângulo da perna para apenas amplitudes positivas, o algoritmo se mostrou muito lento na correção da velocidade longitudinal.

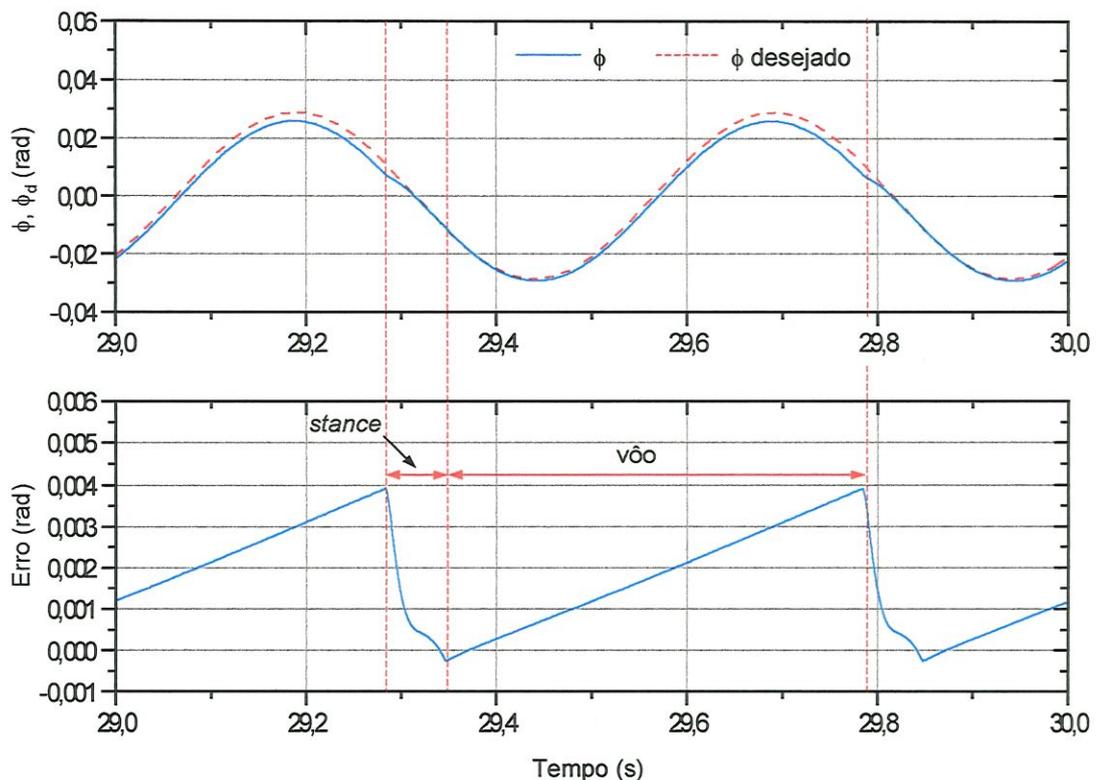


FIGURA 41 – Desempenho do controlador durante o *stance*. No gráfico superior, são mostrados os ângulos do corpo atual ϕ e desejado ϕ_d . O gráfico inferior mostra o erro do ângulo do controlador. As fase de vôo e *stance* são indicadas na figura.

Além deste problema, existem outros na implementação do algoritmo no modelo mais completo apresentado na Seção 2.1. Foi observado, através de

simulações, que as forças de contato entre a perna e o solo influenciam consideravelmente o movimento oscilatório da perna. Desta maneira, o ângulo da perna não descreve uma trajetória aproximadamente linear durante o período de *stance*, comprometendo assim o controle do robô.

Portanto, foi necessário desenvolver uma nova estratégia que pudesse ser aplicada no modelo da Seção 2.1, utilizando sua dinâmica passiva. Esta estratégia foi abordada no Capítulo 5 e os resultados são apresentados na Seção 6.6.

6.6. Desempenho do controle com redução no consumo de energia

Esta seção apresenta os resultados da simulação realizada para avaliar o desempenho da estratégia abordada no Capítulo 5.

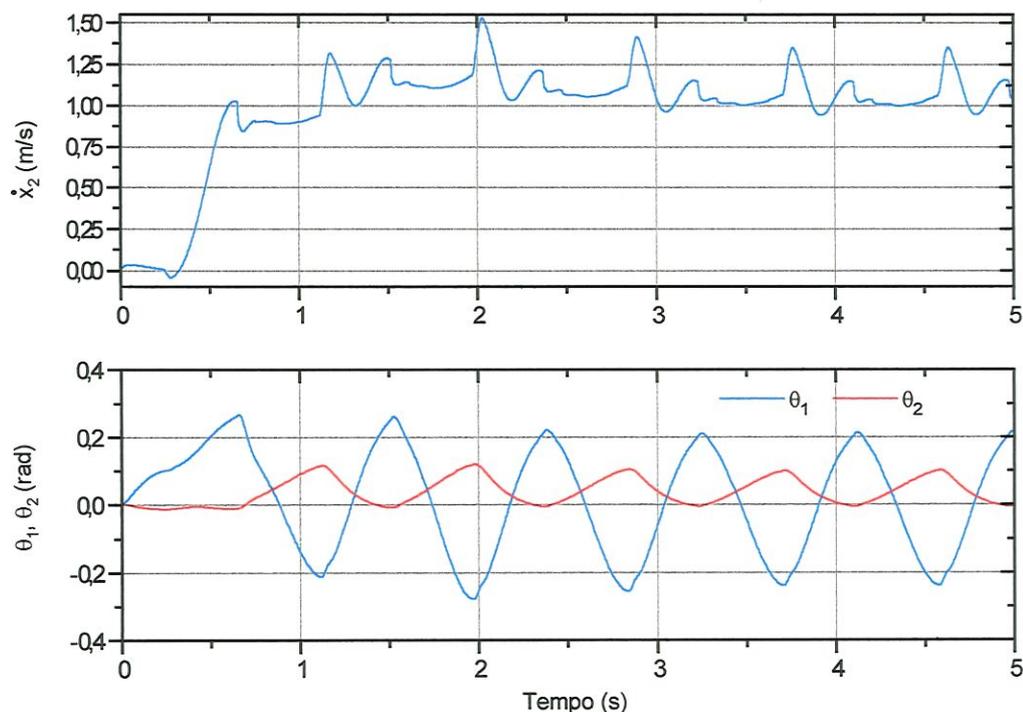


FIGURA 42 - Controle horizontal utilizando a estratégia baseada na dinâmica passiva do quadril. Resposta do sistema para o degrau de velocidade longitudinal desejada $\dot{x}_{2,d} = 1\text{m/s}$. A resposta do sistema é de aproximadamente 3,5 segundos. $K_1 = 0,1$; $K_2 = 0$; $K_3 = 0$.

A simulação consiste em aplicar uma entrada degrau ao sistema (velocidade desejada) que se encontra inicialmente em repouso ($\dot{x}_2 = 0$). Como se trata do mesmo teste (Seção 6.2.2) realizado para o algoritmo do Capítulo 3, com as mesmas

condições iniciais e o mesmo modelo com exceção da mola no quadril, é possível comparar ambos algoritmos.

A FIGURA 42 mostra a velocidade longitudinal \dot{x}_2 e os ângulos da perna θ_1 e do corpo θ_2 . Iniciando o robô do repouso ($\dot{x}_2 = 0$), com postura vertical e pulando com altura de 0,3 m, é estabelecida uma velocidade desejada $\dot{x}_{2,d} = 1$ m/s. Os dados da FIGURA 42 mostram que o robô atinge a velocidade desejada em aproximadamente 3,5 segundos. Durante o regime, a velocidade varia entre 0,93 e 1,35 m/s. Simulações mostraram que a velocidade longitudinal pode ser controlada até 2 m/s. Comparando estes resultados com os apresentados na FIGURA 30, pode-se observar que o desempenho dos algoritmos apresentados nos capítulos 3 e 5 são semelhantes.

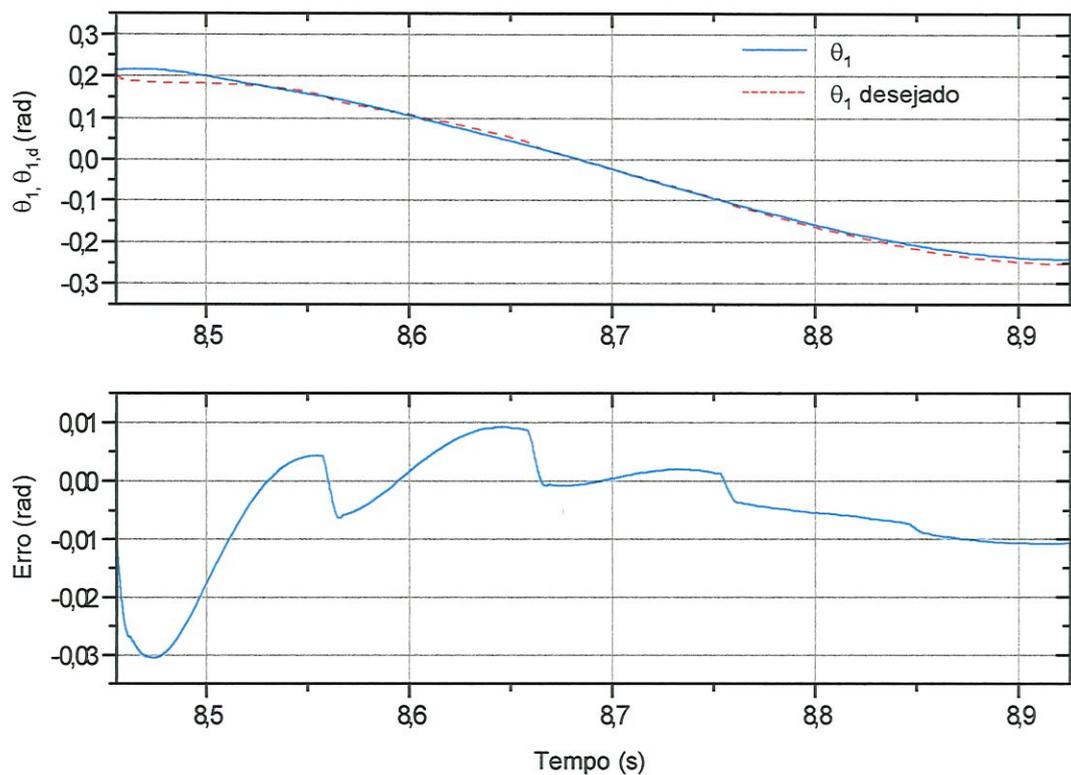


FIGURA 43 – Desempenho do controlador durante o voo utilizado na estratégia baseada na dinâmica passiva do quadril. No gráfico superior, são mostrados os ângulos da perna atual θ_1 e desejado $\theta_{1,d}$. O gráfico inferior mostra o erro do ângulo da perna.

A FIGURA 43 mostra o desempenho do controlador, durante a fase de voo, utilizado na estratégia do Capítulo 5. Nesta figura são mostradas os ângulos atual θ_1

e desejado $\theta_{1,d}$ da perna e o erro do controlador. Os dados da figura demonstram que o erro é inferior à 0,032 radianos. Desta maneira, o controlador baseado na dinâmica inversa simplificada do modelo é validado.

6.7. Energia consumida pelo atuador do quadril

Esta seção apresenta os resultados da energia consumida pelo atuador do quadril para as estratégias apresentadas nos capítulos 3 (estratégia 1) e 5 (estratégia 2). Os resultados são comparados para avaliar quantitativamente a eficiência do algoritmo proposto no Capítulo 5.

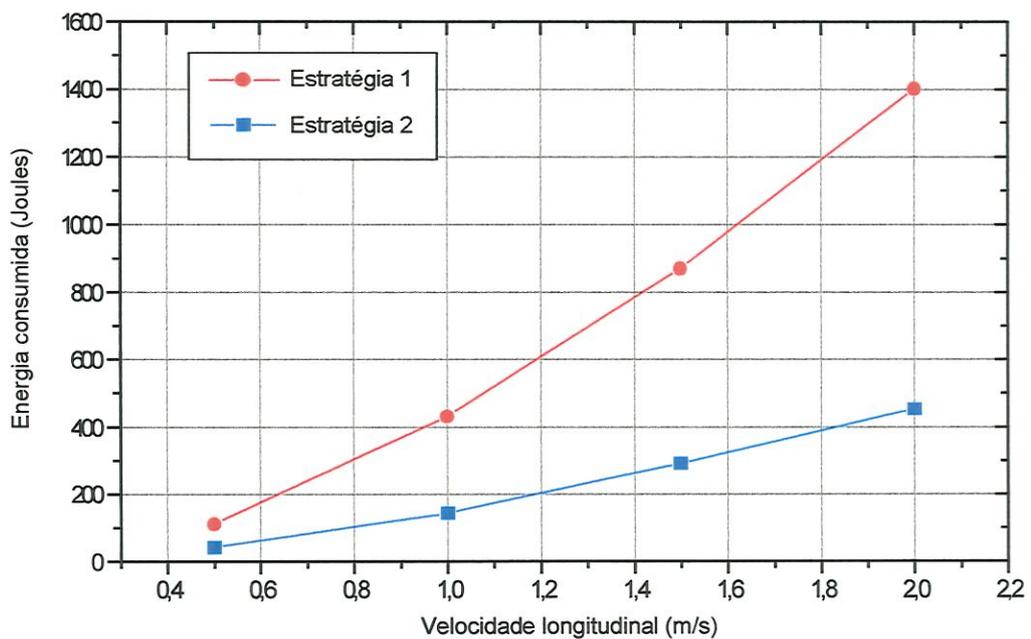


FIGURA 44 - Energia consumida pelo atuador do quadril no controle horizontal, utilizando as estratégias 1 e 2. Os dados representam 10 segundos de simulação durante o regime.

A FIGURA 44 mostra a energia consumida pelo quadril, durante 10 segundos, no regime para velocidades de 0,5 à 2 m/s. Pode-se observar, para ambas as curvas, um crescimento exponencial no consumo de energia conforme o aumento da velocidade. No entanto, os dados da figura demonstram que com a estratégia 2, houve uma redução de aproximadamente 67 % na energia consumida em relação à primeira estratégia.

A FIGURA 45 mostra a energia consumida pelo atuador do quadril durante 10 segundos para as fases de vôo e *stance* separadamente. Os dados da figuras 44 e 45 demonstram que para a estratégia 1, a energia consumida durante o vôo representa aproximadamente 75% da energia de todo ciclo. Estes resultados serviram de motivação para o desenvolvimento da estratégia 2 abordada no Capítulo 5.

Os dados da FIGURA 45 também mostraram que, durante o vôo, a redução de energia obtida com a estratégia 2 é de aproximadamente 87,6%. Durante o *stance*, esta redução de energia é pequena. Isto ocorre pois as duas estratégias controlam da mesma forma a atitude durante o *stance*.

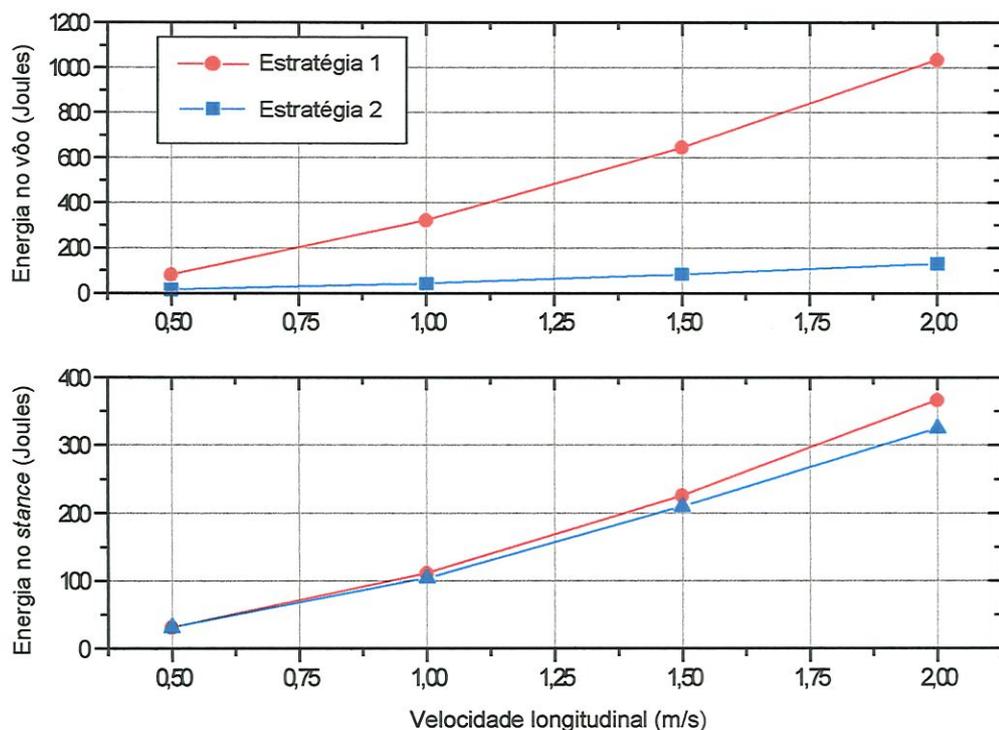


FIGURA 45 - Energia consumida pelo atuador do quadril no controle horizontal, utilizando as estratégias 1 e 2. Os gráficos superior e inferior mostram a energia consumida nas fases de vôo e *stance* respectivamente. Os dados representam 10 segundos de simulação durante o regime.

7. CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

Nesta dissertação, foi proposto um novo algoritmo para controlar um robô de uma perna. Esta estratégia tem como objetivo, reduzir a energia consumida pelo atuador do quadril. Para desenvolver este algoritmo, duas estratégias foram estudadas de maneira que as vantagens e desvantagens de cada uma pudesse ser avaliada. A nova estratégia de controle utiliza partes de cada algoritmo.

O Capítulo 3 apresenta a estratégia desenvolvida inicialmente por Raibert. O algoritmo e o modelo utilizados servem de base de comparação para outros algoritmos, pois foram validados extensivamente através de simulações e robôs experimentais. Para controlar a velocidade e a atitude, esta estratégia posiciona o pé durante o voo, influenciando a velocidade longitudinal. Durante o *stance*, o algoritmo controla a atitude do corpo. O algoritmo apresenta um desempenho satisfatório no controle da velocidade longitudinal do robô até 2 m/s. É interessante ressaltar que os resultados obtidos neste trabalho mostraram-se condizentes com os apresentados em RAIBERT (1984). No entanto, utilizando esta estratégia, o atuador do quadril consome muita energia, sendo 75 % desta consumida durante o voo. Esta desvantagem motiva o desenvolvimento de uma estratégia que possa reduzir este consumo de energia.

Neste contexto, uma estratégia baseada na dinâmica passiva (Capítulo 4) tenta suprir esta desvantagem. Para isso, utiliza-se um modelo mais simplificado com uma mola torsional no quadril. Foi mostrado, através deste modelo, que é possível encontrar condições iniciais apropriadas para que o robô se locomova por vários ciclos sem atuadores. Esta locomoção é denominada corrida dinamicamente passiva. Como a corrida dinamicamente passiva é sempre instável, uma estratégia de controle é utilizada para corrigir as variações da velocidade longitudinal. Esta estratégia utiliza a dinâmica passiva para obter as trajetórias desejadas dos ângulos da perna, do corpo e da altura do robô. Os resultados mostraram que a velocidade longitudinal

pode ser controlada partindo das condições iniciais apropriadas. No entanto, o algoritmo apresentou problemas para ser implementado no modelo mais completo utilizado por Raibert. As forças de contato com o solo têm influência considerável no movimento da perna durante o *stance*. Desta forma, o algoritmo não apresenta tolerância para tais perturbações, o que o torna inviável.

Portanto, foi desenvolvido um novo algoritmo que combina as vantagens dos dois algoritmos: reduz a energia consumida e utiliza o modelo mais completo, com mola no quadril. Este algoritmo é uma extensão da estratégia proposta por Raibert, utilizando o princípio da dinâmica passiva. Neste caso, durante o voo, é gerada uma trajetória desejada para o ângulo da perna, baseada na dinâmica passiva do quadril. Os resultados mostraram que é possível controlar o robô com desempenho semelhante à estratégia abordada por Raibert. Além disso, observou-se uma redução de 67 % na energia consumida pelo atuador do quadril.

Desta maneira, a grande contribuição do algoritmo está na capacidade de controlar a velocidade longitudinal com desempenho satisfatório e redução de energia considerável.

Contudo, o sistema apresenta alguns pontos complementares, a serem desenvolvidos para aperfeiçoar seu funcionamento. Estes pontos ficam como proposta para futuros trabalhos e são listados abaixo:

- Avaliar a robustez das estratégias apresentadas nos capítulos 3 e 5 para variações paramétricas. Aplicar outros tipos de controladores mais robustos.
- Construir um protótipo de um robô de uma perna restrito ao plano para validar a nova estratégia de controle proposta.
- Desenvolver algoritmos que possam controlar velocidades longitudinais mais altas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMADI, M.; BUEHLER, M. (1995). A Control Strategy for Stable Passive Running. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION. Pittsburgh, 1995. Proceedings. Piscataway, p.152-7.
- AHMADI, M.; BUEHLER M. (1997a). Preliminary Experiments with an Actively Tuned Passive Dynamic Running Robot. In: *Experimental Robotics V*. Springer Verlag.
- AHMADI, M.; BUEHLER, M. (1997b). Stable Control of a Simulated One-Legged Running Robot with Hip and Leg Compliance. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, v.13, n.1, p.96-104.
- AHMADI, M. (1998). *Stable control of one-legged robot exploiting passive dynamics*. Montréal. 145p. Ph.D. Thesis – McGill University.
- ALEXANDER, R. McN. et al. (1982). The role of tendon elasticity in the locomotion of the camel. *Journal of Zoology: Proceedings of Zoological Society of London*. v.198, p.293-313.
- ALEXANDER, R. McN. et al. (1985). Elastic structures in the back and their role in galloping in some mammals. *Journal of Zoology: Proceedings of Zoological Society of London*, v.207, p.467-82.
- ALEXANDER, R. McN. (1990). Three uses for springs in legged locomotion. *International Journal on Robotics Research*, v.9, n.2, p.53-61.
- BHATT, V.; KOECHLING, J. C. Experimental and analytical results for limping in a hopping robot. (1993). In: ASME WINTER ANNUAL MEETING. New Orleans, 1993. Proceedings. New York. p.321-32.



- DIMERY, N. J.; ALEXANDER, R. McN.; KER, R. F. (1986). Elastic extension of leg tendons in locomotion of horses. *Journal of Zoology: Proceedings of Zoological Society of London*. v.210, p.415-25.
- DORMAND, J. R.; PRINCE, P. J. (1980). A family of embedded Runge-Kutta formulae. *Journal Computational and Applied Mathematics*, v. 6, p. 19-26.
- FRANCOIS, C.; SAMSON, C. (1994). Running with constant energy. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION. San Diego, 1994. Proceedings. Piscataway, p.131-6.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; ABBAS E. (1995). *Feedback control of dynamic systems*, Addison-Wesley.
- GREGORIO, P.; AHMADI, M.; BUEHLER, M. (1994). Experiments with an Electrically Actuated Planar Hopping Robot. In: YOSHIKAWA, T.; MIYAZAKI, F., ed. *Experimental Robotics III*, In: Lecture Notes in Control and Information Sciences 200. p.269-81, Springer Verlag.
- GREGORIO, P.; AHMADI, M.; BUEHLER M. (1997). Design, Control, and Energetics of an Electrically Actuated Legged Robot. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v.27, n.4.
- HODGINS, J.; KOECHLING, J.; RAIBERT, M. H. (1986). Running experiments with a planar biped. *Third International Symposium on Robotics Research*, G. Giralt, M. Ghallab (eds.). Cambridge, MIT Press.
- KODITSCHKEK, D. E.; BUHLER, M. (1991). Analysis of a simplified hopping robot. *International Journal of Robotics Research*, v.10, n.6, p.587-605, Dec.
- KOIVO, A. J. (1989). *Fundamentals for control of robotic manipulators*, New York, John Wiley & sons, Inc.
- LEBAUDY, A.; PROSSER J.; KAM, M. (1993) Control algorithms for a vertically-constrained one-legged hoping machine. In: IEEE CONFERENCE ON DECISION AND CONTROL. Proceedings. p.2688-93.

- McGEER, T. (1989). *Passive bipedal running*. Simon Fraser University, Centre for Systems Science. (Report n.IS-TR-89-02).
- McGEER, T. Passive dynamic walking (1990). *International Journal on Robotics Research*, v.9, n.2, p.62-82.
- M'CLOSKEY, R. T.; BURDICK, J. W.; VAKAKIS, A. F. (1990). On the periodic motions of simple hopping robots. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS. Los Angeles, 1990. Proceedings. Piscataway, p.771-7.
- M'CLOSKEY, R. T.; BURDICK, J. W. (1991). An analytical study of simple hopping robots with vertical and forward motion. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 2. Sacramento, 1991. Proceedings. Piscataway, p.1392-97.
- McMAHON, T. A. (1985). The role of compliance in mammalian running gaits. *Journal of Experimental Biology*, v.115, p.263-82.
- McMAHON, T. A.; CHENG, G. C. (1990). The mechanics of running: how does stiffness couple with speed? *Journal Biomechanics*, v.23, p.65-78.
- MICHALSKA, H.; AHMADI, M.; BUEHLER, M. (1996). " Vertical Motion Control of a Hopping Robot. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION. Minneapolis, 1996. Proceedings. Piscataway.
- OSTROWSKI, J.P.; BURDICK, J.W. (1993). Designing feedback algorithms for controlling the periodic motions of legged robots. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION. Atlanta, 1993. Proceedings. Piscataway, p.260-6.
- RAD, H.; GREGORIO, P.; BUEHLER, M. (1993). Design, Modeling and Control of a Hopping Robot. In: IEEE/RSJ CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, Yokohama, 1995. Proceedings. Piscataway, p. 1778-85.

- RAIBERT, M. H. (1984). Hopping in legged systems – Modeling and simulation for the 2D one-legged case. *IEEE Transactions Systems, Man, and Cybernetics*, v.14, n.3, p.451-63.
- RAIBERT, M. H.; WIMBERLY F. C. (1984). Tabular control of balance in a dynamic legged system. *IEEE Transactions Systems, Man, and Cybernetics*, v.14, n.2, p.334-39.
- RAIBERT, M. H.; BROWN, H. B., Jr.; CHEPPONIS, M. (1984). Experiments in balance with a 3D one-legged hopping machine. *International Journal of Robotics Research*, v.3, p.75-92.
- RAIBERT, M. H.; BROWN, H. B., Jr. (1984). Experiments in balance with 2D one-legged hopping machine. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, v.106, p.75-81.
- RAIBERT, M. H. (1986). *Legged robots that balance*, Cambridge, MIT Press.
- RAIBERT, M. H.; CHEPPONIS, M.; BROWN, H. B. Jr. (1986). Running on four legs as though they were one. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, v.2, p. 70-82.
- RAIBERT, M. H.; THOMPSON, C. M. (1989). Passive Dynamic Running. *Experimental Robotic I*, p.74-83.
- RINGROSE R. P. (1997). *Self-stabilizing running*. Cambridge. Ph.D. Thesis – Massachusetts Institute of Technology.
- SCHWIND, W. J.; KODITSCHKE, D. E. Control of forward velocity for a simplified planar hopping robot. (1995). In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION. Nagoya, 1995. Proceedings. Piscataway, p.691-6.
- SHAMPINE, L. F.; REICHEL, M. W. (1997). The Matlab ODE suite. Mathworks Inc., 24 Prime Park Way, Natick, MA, USA.

-
- SIMULINK USERS GUIDE. (1997). Mathworks Inc., 24 Prime Park Way, Natick, MA, USA.
- STOLINE, J. E.; LI, W. (1991). *Applied nonlinear control*, Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- TODD, D. J. (1985). *Walking machines: an introduction to legged robots*, London, Kogan Page Ltd.
- VAKAKIS, A. F.; BURDICK, J. W.; CAUGHEY, T. K. (1991). 'Interesting' strange attractor in the dynamics of a hopping robot. *International Journal of Robotics Research*, v.10, n.6, p.606-18, Dec.

APÊNDICE

EQUAÇÕES E VALORES NUMÉRICOS DOS MODELOS UTILIZADOS

A. EQUAÇÕES E VALORES NUMÉRICOS DOS MODELOS UTILIZADOS

Neste apêndice são mostradas as equações dos dois modelos apresentados no capítulo 2. A seções A1 e A2 apresentam as equações dos modelos abordados nas seções 2.1 e 2.2 respectivamente.

A1. Equações do modelo do robô de uma perna

As equações do modelo da seção 2.1 foram deduzidas através do diagrama de corpo livre para a perna e o corpo utilizando o princípio de d'Alembert. Esta dedução foi utilizada em RAIBERT (1984). Para perna, obtém-se as equações de movimento:

$$M_1 \ddot{y}_1 = F_y - F_T \cos(\theta_1) + F_N \sin(\theta_1) - M_1 g \quad (A1.1)$$

$$M_1 \ddot{x}_1 = F_x - F_T \sin(\theta_1) - F_N \cos(\theta_1) \quad (A1.2)$$

$$I_1 \ddot{\theta}_1 = -F_x r_1 \cos(\theta_1) + F_y r_1 \sin(\theta_1) - F_N (w - r_1) - \tau(t) \quad (A1.3)$$

Para o corpo, obtém-se as equações de movimento:

$$M_2 \ddot{y}_2 = F_T \cos(\theta_1) - F_N \sin(\theta_1) - M_2 g \quad (A1.4)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 = F_T \sin(\theta_1) + F_N \cos(\theta_1) \quad (A1.5)$$

$$I_2 \ddot{\theta}_2 = F_T r_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) - F_N r_2 \cos(\theta_2 - \theta_1) + \tau(t) \quad (A1.6)$$

Das relações cinemáticas do modelo, obtém-se:

$$\dot{y}_1 = \dot{y}_0 - r_1 (\dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) + \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_1)) \quad (A1.7)$$

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_0 - r_1 (\dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) - \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_1)) \quad (A1.8)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_2 = & \dot{y}_0 + \dot{w} \cos(\theta_1) - w \ddot{\theta}_1 \sin(\theta_1) - w \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_1) \\ & - r_2 (\ddot{\theta}_2 \sin(\theta_2) + \dot{\theta}_2^2 \cos(\theta_2)) - 2 \dot{w} \dot{\theta}_1 \sin(\theta_1) \end{aligned} \quad (A1.9)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}_2 = & \ddot{x}_0 + \ddot{w} \text{sen}(\theta_1) + w\ddot{\theta}_1 \cos(\theta_1) - w\dot{\theta}_1^2 \text{sen}(\theta_1) \\ & + r_2(\ddot{\theta}_2 \cos(\theta_2) - \dot{\theta}_2^2 \text{sen}(\theta_2)) + 2\dot{w}\dot{\theta}_1 \cos(\theta_1) \end{aligned} \quad (\text{A1.10})$$

onde:

(x_0, y_0) : Coordenadas do pé em relação ao eixo inercial.

(x_1, y_1) : Coordenadas da perna em relação ao eixo inercial.

(x_2, y_2) : Coordenadas do corpo em relação ao eixo inercial.

F_x, F_y : Forças horizontal e vertical no pé.

F_T, F_N : Forças atuando no quadril entre a perna e o corpo. F_T atua tangente à perna, e F_N atua perpendicular à perna.

Este conjunto de equações pode ser expresso em termos das variáveis de configuração $\theta_1, \theta_2, x_0, y_0, w$ eliminado x_1, y_1, x_2, y_2, F_N , e F_T . Representando o sistema da forma $M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) = F(q, \dot{q})$, onde $q = [\theta_1 \ \theta_2 \ x_0 \ y_0 \ w]^T$ é a variável de configuração, $M(q)$ é a matriz de massa, $V(q, \dot{q})$ representa os termos de Coriolis, $G(q)$ representa as forças gravitacionais e $F(q, \dot{q})$ representa os termos de elasticidade, amortecimento e torques aplicados:

$$M = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1)(M_2 W w + I_1) & M_2 r_2 W \cos(\theta_2) & M_2 W & 0 & M_2 W \text{sen}(\theta_1) \\ -\text{sen}(\theta_1)(M_2 W w + I_1) & -M_2 r_2 W \text{sen}(\theta_2) & 0 & M_2 W & M_2 W \cos(\theta_1) \\ \cos(\theta_1)(M_1 r_1 W - I_1) & 0 & M_1 W & 0 & 0 \\ -\text{sen}(\theta_1)(M_1 r_1 W - I_1) & 0 & 0 & M_1 W & 0 \\ -\cos(\theta_2 - \theta_1)I_1 r_2 & I_2 W & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A1.11})$$

$$V = \begin{bmatrix} -WM_2 \left[\dot{\theta}_1^2 W \text{sen}(\theta_1) - 2\dot{\theta}_1 \dot{w} \cos(\theta_1) + r_2 \dot{\theta}_2^2 \text{sen}(\theta_2) + r_1 \dot{\theta}_1^2 \text{sen}(\theta_1) \right] \\ -WM_2 \left[\dot{\theta}_1^2 W \cos(\theta_1) + 2\dot{\theta}_1 \dot{w} \text{sen}(\theta_1) + r_2 \dot{\theta}_2^2 \cos(\theta_2) + r_1 \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_1) \right] \\ -WM_1 r_1 \dot{\theta}_1^2 \text{sen}(\theta_1) \\ -WM_1 r_1 \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_1) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A1.12})$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ WM_2g \\ 0 \\ WM_1g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (A1.13)$$

$$F = \begin{bmatrix} -r_1F_x \cos^2(\theta_1) + \cos(\theta_1)r_1F_y \sin(\theta_1) + F_k W \sin(\theta_1) - \cos(\theta_1)\tau \\ r_1F_x \cos(\theta_1) \sin(\theta_1) - r_1F_y \sin^2(\theta_1) + F_k W \cos(\theta_1) + \sin(\theta_1)\tau \\ W[-F_k \sin(\theta_1) + F_x] - \cos(\theta_1)[F_y r_1 \sin(\theta_1) - F_x r_1 \cos(\theta_1) - \tau] \\ W[-F_k \cos(\theta_1) + F_y] + \sin(\theta_1)[F_y r_1 \sin(\theta_1) - F_x r_1 \cos(\theta_1) - \tau] \\ W[F_k r_2 \sin(\theta_2 - \theta_1) + \tau] - r_2 \cos(\theta_2 - \theta_1)[r_1 F_y \sin(\theta_1) - r_1 F_x \cos(\theta_1) - \tau] \end{bmatrix} \quad (A1.14)$$

onde:

$$W = w - r_1 \quad (A1.15)$$

$$F_k = \begin{cases} K_L(k_0 - w + \chi) & \text{se } (k_0 - w + \chi) > 0 \\ K_{L2}(k_0 - w + \chi) - B_{L2}\dot{w} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (A1.16)$$

$$F_x = \begin{cases} -K_G(x_0 - x_{TD}) - B_G\dot{x}_0 & \text{se } y_0 < 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (A1.17)$$

$$F_y = \begin{cases} -K_G y_0 - B_G \dot{y}_0 & \text{se } y_0 < 0 \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (A1.18)$$

Para o caso da variação do modelo com mola torsional no quadril, o torque gerado pela mola é adicionado ao torque gerado pelo atuador. Assim, o termo τ é substituído por $\tau + K_h(\theta_1 - \theta_2)$ e portanto, um novo vetor $F(q, \dot{q})$ é obtido. Os valores dos parâmetros do modelo utilizado nas simulações são mostrados na TABELA A1.

TABELA A1 - Nomenclatura e valores numéricos dos parâmetros utilizados nas simulações das estratégias de controle dos capítulos 3 e 5.

Símbolo	Descrição	Valores Nominais
g	Aceleração gravitacional	$9,81 \text{ m/s}^2$
M_1	Massa da perna	1 kg
I_1	Inércia da perna	1 kg.m^2
r_1	Distância do centro de massa da perna ao quadril	0,5 m
M_2	Massa do corpo	10 kg
I_2	Inércia do corpo	10 kg.m^2
r_2	Distância do centro de massa do corpo ao quadril	0,4 m
K_h	Rigidez da mola do quadril	$58,747 \text{ N.m/rad}$
K_L	Rigidez da mola da perna	10^3 N/m
k_0	Comprimento máximo da perna	1 m
K_{pf}	Ganho proporcional do controlador no <i>stance</i>	1234 N.m/rad
K_{vf}	Ganho derivativo controlador no <i>stance</i>	$62,842 \text{ N.m.s/rad}$
K_{ps}	Ganho proporcional do controlador no vôo	1272 N.m/rad
K_{vs}	Ganho derivativo do controlador no vôo	$145,77 \text{ N.m.s/rad}$
K_{L2}	Rigidez do fim de curso	10^5 N/m
B_{L2}	Amortecimento do fim de curso	125 N.s/m
K_G	Rigidez do solo	10^4 N/m
B_G	Amortecimento do solo	75 N.s/m

A2. Equações do modelo do robô de uma perna simplificado

As equações do modelo da seção 2.2 foram deduzidas através do método de Lagrange. As equações de movimento descrevem os quatro graus de liberdade durante o vôo em (A2.1).

$$\begin{aligned}
 \ddot{x} &= 0 \\
 \ddot{z} &= 0 \\
 J_1 \ddot{\theta} &= k_h (\phi - \theta) - \tau \\
 J_b \ddot{\phi} &= -k_h (\phi - \theta) + \tau
 \end{aligned} \tag{A2.1}$$

e em (A2.2), os três graus de liberdade durante o *stance*.

$$\begin{aligned}
 m\ddot{r} &= -mg \cos(\theta) + m\dot{r}\dot{\theta}^2 + k_l (r_0 - r + p_l) \\
 (J_1 + m\dot{r}^2) \ddot{\theta} &= k_h (\phi - \theta) - 2m\dot{r}\dot{\theta} + mgr \sin(\theta) - \tau \\
 J_b \ddot{\phi} &= -k_h (\phi - \theta) + \tau
 \end{aligned} \tag{A2.2}$$

Os valores dos parâmetros do modelo utilizado nas simulações são mostrados na TABELA A2.

TABELA A2 - Nomenclatura e valores numéricos utilizados nas simulações da corrida dinamicamente passiva e da corrida dinamicamente passiva controlada.

Símbolo	Descrição	Valores Nominais
g	Aceleração gravitacional	9,81 m/s ²
J_b	Inércia do corpo	2,5 kg.m ²
J_l	Inércia da perna	0,25 kg.m ²
k_h	Rigidez de mola do quadril	35,89 N.m/rad
k_l	Rigidez de mola da perna	27793 N/m
m_b	Massa do corpo	10 kg
m_l	Massa da perna	1 kg
m	Massa total ($m_b + m_l$)	11 kg
r_0	Comprimento máximo da perna	0,7 m
T_{step}	Período do passo	0.5 s
ρ	Fator de trabalho	0,125
k_x	Ganho de correção da velocidade	0,2
k_{ps}	Ganho proporcional do seguidor no <i>stance</i>	631,66 N.m/rad
k_{vs}	Ganho derivativo do seguidor no <i>stance</i>	50,27 N.m.s/rad
k_{pf}	Ganho proporcional do seguidor no vôo	631,66 N.m/rad
k_{vf}	Ganho derivativo do seguidor no vôo	50,27 N.m.s/rad