



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP

FACULDADE DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE DO PORTO

Sistemas Robóticos de Locomoção Multipernas

Manuel Fernando dos Santos Silva

Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação dos
requisitos do grau de Doutor
em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Dissertação realizada sob a orientação do
Professor Doutor José António Tenreiro Machado,
do Departamento de Engenharia Electrotécnica do Instituto Superior de Engenharia do Porto
e co-orientação do
Professor Doutor António Mendes Lopes,
do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Fevereiro de 2005

Manuel Fernando dos Santos Silva

mfsilva@dee.isep.ipp.pt

mss@dee.isep.ipp.pt

À Paula e ao Tomás

Resumo

Uma parte substancial do planeta Terra é inacessível a todo e qualquer tipo de mecanismo de locomoção através de rodas. De facto, os obstáculos naturais tais como rochas de grandes dimensões, solo solto, ravinas profundas e encostas íngremes conspiram para tornar a locomoção por rolamento ineficaz. As colinas, montanhas, praias, o fundo marinho bem como a Lua e os outros planetas apresentam desafios semelhantes ou superiores ao nível do respectivo terreno.

Em muitos destes terrenos naturais as pernas são perfeitamente adequadas. Elas podem evitar obstáculos de pequenas dimensões efectuando pontos de contacto discretos e evitando pegadas em locais indesejados. Os mecanismos com pernas podem trepar obstáculos e passar sobre valas, transpor descontinuidades do terreno de dimensão comparável à dimensão do corpo do mecanismo, permanecendo nivelados e estáveis.

Os sistemas artificiais de locomoção são estruturas mecânicas com várias pernas que, por sua vez, são constituídas por diversos elos interligados por eixos lineares ou rotacionais. Estes sistemas mecânicos pretendem fazer uma mímica dos sistemas biológicos e, tal como eles, apresentam vantagens face aos veículos convencionais que utilizam rodas ou lagartas já que são capazes de se adaptar facilmente a terrenos muito irregulares. Todavia, estas máquinas exibem fenómenos cinemáticos e dinâmicos de natureza complexa o que torna difícil a sua análise e o seu controlo. Estes factos levam a que o desenvolvimento deste tipo de sistemas só recentemente esteja a ser objecto de atenção.

O trabalho proposto “Sistemas Robóticos de Locomoção Multipernas” insere-se nas correntes actualmente apontadas para o desenvolvimento deste tipo de sistemas. Numa primeira fase o trabalho desenvolve os modelos cinemático e dinâmico para um sistema robótico artificial, quer a partir de uma formulação baseada na física e na matemática, como a partir de uma análise dos fenómenos revelados pelos sistemas biológicos. Uma vez estabelecidos os modelos adequados, numa segunda fase desenvolvem-se algoritmos de planeamento de trajectórias e de controlo da estrutura. Nesta perspectiva, são também

comparadas várias estruturas mecânicas e vários algoritmos de controlo sob os pontos de vista de eficiência energética, facilidade de controlo, rapidez de deslocamento e capacidade de adaptação a diversos tipos de terreno.

Uma vertente estudada neste trabalho foi a análise de esquemas baseados nos “equivalentes” biológicos. Uma outra vertente consistiu na elaboração de modelos conducente a uma caracterização quantitativa dos fenómenos envolvidos. A consideração destes tópicos lançou luz sobre alguns dos aspectos mencionados e, assim, ampliou o conhecimento científico no campo dos sistemas robóticos de locomoção.

Palavras-chaves: Robótica, Locomoção, Modelação Cinemática, Modelação Dinâmica, Simulação, Saturação, Atrito Não Linear, Folga, Controlo, Sistemas de Ordem Fraccionária.

Abstract

A significant part of the Earth is inaccessible to any kind of wheeled mechanism. In fact, natural obstacles like large rocks, loose soil, deep ravines, and steep slopes conspire to render rolling locomotion ineffective. Hills, mountains, shores, seabeds, as well as the moon and other planets present similar terrain challenges.

In many of these natural terrains legs are well-suited. They can avoid small obstacles by making discrete contacts and passing up undesirable footholds. Legged mechanisms can climb over obstacles and step across ditches, surmounting terrain discontinuities of body-scale while staying level and stable.

Artificial locomotion systems are mechanical structures with several legs, being each one constituted by several links connected by prismatic or rotational joints. These mechanisms intend to mimic biologic systems and, as such, present advantages when compared with conventional vehicles that use wheels or tracks, since they can easily adapt to irregular terrains. However, these machines present complex kinematic and dynamic phenomena which make their analysis and control difficult. Due to these facts, only recently has the development of this kind of systems been the subject of attention.

The proposed work “Multi-legged Locomotion Robotic Systems” fits in present day research for the development of this kind of systems. In a first phase the work develops the kinematic and dynamic models for an artificial locomotion system supported by the tools of physics and mathematics, as well as based on an analysis of the phenomena revealed by the biological systems. Once established the adequate models, in a second phase are developed the algorithms for the structure trajectory planning and control. In this perspective, several mechanical structures and control algorithms are compared from the point of view of energy efficiency, control performance, locomotion speed and ability to adapt to several types of terrain.

One of the aspects studied on this work was the analysis of schemes based on the biological “equivalents”. Another aspect consisted on the elaboration of models leading to a

quantitative characterization of the involved phenomena. The consideration of these topics enlightened some of the above mentioned aspects and, therefore, raised the scientific knowledge in the field of locomotion robotic systems.

Keywords: Robotics, Locomotion, Kinematic Modelling, Dynamic Modelling, Simulation, Saturation, Non Linear Friction, Backlash, Control, Fractional Order Systems.

Resumé

Une partie substantielle de la planète Terre est inaccessible à tout type de mécanisme à roues – les obstacles naturels tels que des pierres de grandes dimensions des sols détachés, des ravines profondes et des versants escarpés conspirent pour rendre la locomotion par roulement inefficace. Les collines, les montagnes, les plages, le fond marin ainsi que la Lune et d'autres planètes présentent les mêmes défis au niveau du terrain.

Parmi beaucoup de ces terrains naturels, les jambes sont la solution la mieux adaptée. Elles peuvent éviter des obstacles de petites dimensions en réalisant des points de contact et en évitant les empreintes de pieds dans des lieux indésirables. Les mécanismes ayant des jambes peuvent grimper des obstacles et passer sur des fossés, franchir des discontinuités du terrain de dimensions comparables à la dimension du corps du mécanisme, restant nivelés et stables.

Les systèmes artificiels de locomotion sont des structures mécaniques ayant plusieurs jambes qui sont aussi composées par divers liaisons interliées par des axes linéaires ou rotateurs. Ces systèmes mécaniques prétendent faire une mimique des systèmes biologiques et, eux aussi, présentent des avantages face aux véhicules conventionnels qui utilisent des roues ou des chenilles puisqu'ils sont capables de s'adapter facilement à des terrains très irréguliers.

Cependant, ces machines exhibent des phénomènes cinématiques et dynamiques de nature complexe ce qui rend difficile son analyse et son contrôle. C'est pourquoi le développement de ce type de système mérite depuis peu une attention plus particulière.

Le travail proposé « Systèmes Robotiques de Locomotion Multijambes » s'insère dans les courants actuellement signalés pour le développement de ce type de systèmes. Dans une première phase le travail développe les modèles cinématique et dynamique pour un système robotique artificiel, soit à partir d'une formulation basée dans la physique et dans les mathématiques, soit à partir d'une analyse des phénomènes développés par les systèmes biologiques. Une fois établis les modèles adéquats, dans une deuxième phase se développent des algorithmes de planification de trajectoires et de contrôle de la structure. Dans cette

perspective, on compare aussi plusieurs structures mécaniques et plusieurs algorithmes de contrôle du point de vue de l'efficacité énergétique, de la facilité de contrôle, de la vitesse de déplacement et de la capacité d'adaptation aux différents types de terrains.

L'un des aspects étudié dans ce travail a été l'analyse de schémas sur les « équivalents » biologiques. Un autre aspect a consisté à l'élaboration de modèles menant à une caractérisation quantitative des phénomènes engagés.

La considération de ces topics à fait jour sur quelques aspects mentionnés et, ainsi, a agrandi la connaissance scientifique dans le domaine des systèmes robotiques de locomotion.

Mots-clés: Robotique, Locomotion, Modelage Cinématique, Modelage Dynamique, Simulation, Saturation, Frottement Non Linéaire, Jeu, Contrôle, Systèmes d'Ordre Fractionnaire.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais o facto de me terem possibilitado a realização da Licenciatura e todo o incentivo e apoio que sempre me deram na prossecução dos meus estudos.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor José António Tenreiro Machado, todo o trabalho, tempo e energia que investiu na orientação e coordenação dos trabalhos conducentes à elaboração desta Tese de Dissertação. Agradeço ainda o esforço desenvolvido na leitura e as sugestões de revisão que permitiram o enriquecimento do texto desta Tese. Desejo que se sinta, de alguma forma, realizado com o trabalho aqui apresentado. De igual forma, desejo agradecer ao meu co-orientador, Professor Doutor António Mendes Lopes, o seu auxílio sempre que tal se mostrou necessário, em particular o esforço desenvolvido na leitura do texto desta Tese e pelas suas sugestões de revisão.

Não posso também esquecer todas as trocas de ideias que tive com meus os colegas do ISEP e o óptimo ambiente de trabalho que têm criado. Destes, há que destacar o Ramiro Barbosa, colega de gabinete e o amigo com quem partilhei tantas das dificuldades sentidas ao longo destes quatro anos de trabalho. Um agradecimento especial é também devido ao Lino Figueiredo, à Isabel Jesus e à Cecília Reis. O auxílio da Benedita Malheiro e do Gonçalves Soares, “vizinhos” de gabinete, foi também apreciado. Têm também que ser lembrados alguns dos membros do GRIS, em particular o Filipe Silva, o Fernando Duarte, o Nuno Miguel e o Eduardo Pires que se mostraram sempre disponíveis, do outro lado do telefone ou do correio electrónico, para esclarecerem todas as dúvidas que lhes colocava, nas mais diversas matérias.

Um obrigado ao Mário Ribeiro pela sua companhia em todas as Conferências CLAWAR em que participamos juntos e que jamais será esquecida. Gostava ainda de lembrar os restantes colegas Brasileiros da comunidade CLAWAR nomeadamente o Luiz Martins-Filho, o Jorge Morgado de Góis e o Emílio Moral. É também devido um agradecimento a todos os outros colegas de diferentes nacionalidades que me ajudaram ao longo destes anos, sempre que o solicitei, enviando-me artigos e documentação relativa aos seus trabalhos de

investigação e esclarecendo-me de alguns aspectos menos claros para mim: R. McN. Alexander, J. J. Collins, Johan Ingvast, Hideki Kajima, Martin Liener, Osamu Matsumoto, Kiyotoshi Matsuoka, André Preumont, Jeremy Rayner, Daniela Soares e Kan Yoneda. A todos aqueles que, eventualmente, ficaram esquecidos o meu mais sincero pedido de desculpas.

Durante a realização dos trabalhos conducentes à elaboração desta Tese beneficieei de uma bolsa, ao abrigo do PRODEP III – Medida 5 – Acção 5.3 referente ao concurso 2/5.3/PRODEP/2000, que me garantiu a dispensa do serviço docente durante três anos e que agradeço.

Desejo ainda agradecer às instituições que apoiaram em algum momento a realização dos trabalhos conducentes a esta Tese. Ao ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto agradeço o facto de ter disponibilizado todos os meios materiais ao seu alcance que facilitaram a evolução deste trabalho e os diversos apoios monetários para a participação em várias conferências internacionais. Agradeço também os apoios monetários concedidos pelo ISR-P – Instituto de Sistemas e Robótica Porto e pela Fundação Calouste Gulbenkian com a mesma finalidade.

Por último, é devido um agradecimento muito especial à Paula pela sua paciência, compreensão e apoio durante todo este tempo. Quanto ao Tomás o meu pedido de desculpas por não ter conseguido arranjar o tempo necessário para lhe ler todas as histórias que ele gostaria de ter ouvido.

Índice

Índice	XIII
Índice de Figuras	XIX
Índice de Tabelas	XXVII
Tabela de Acrónimos	XXIX
Simbologia	XXXI
Glossário	XXXIX
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Limitações e Dificuldades de Implementação de Sistemas Artificiais de Locomoção.....	2
1.1.1 Comparação Entre os Sistemas Artificiais e os Sistemas Biológicos.....	2
1.1.2 Projecto.....	3
1.1.3 Controlo.....	4
1.2 Aspectos em Estudo na Área dos Sistemas Artificiais de Locomoção.....	5
1.3 Objectivo do Trabalho.....	6
1.4 Contribuições deste Trabalho.....	9
1.5 Organização e Estrutura da Tese.....	10
Referências	15
Capítulo 2	15
Evolução dos Sistemas Robóticos de Locomoção	15
2.1 Formas Alternativas de Locomoção.....	16
2.1.1 Veículos com Rodas e Lagartas.....	16
2.1.2 Veículos com Locomoção por Pernas.....	17
2.1.2.1 Vantagens dos Veículos com Pernas.....	17
2.1.2.2 Limitações dos Veículos com Pernas.....	19
2.1.3 Veículos com um Corpo Articulado.....	19
2.1.4 Campos de Aplicação.....	20
2.2 Evolução dos Veículos com Pernas.....	22
2.2.1 Primeiras Ideias.....	22
2.2.2 Primeiros Estudos / Implementações.....	25
2.3 Exemplos Actuais de Veículos com Locomoção por Pernas.....	28
2.3.1 Robôs com uma Perna.....	28
2.3.2 Robôs Bípedes.....	31
2.3.3 Robôs com Quatro ou mais Pernas.....	35
2.4 Robôs com Pernas para Aplicações Específicas.....	38
2.4.1.1 Robôs para Inspeção de Tubagens.....	38
2.4.1.2 Robôs Trepadores.....	39
2.5 Linhas de Investigação Seguidas no Desenvolvimento de Sistemas de Locomoção.....	41
2.5.1 Aproximações Biológicas.....	41
2.5.2 Robôs com Mecanismos Simples.....	45
2.5.3 Robôs com Locomoção Mista e Híbrida.....	50

2.5.4 Robôs Aplicados à Área do Entretenimento	53
2.6 Robôs com Características Inovadoras	54
2.7 Conclusões e Perspectivas de Desenvolvimento Futuro	55
Referências	57
Capítulo 3	71
Modelação Cinemática e Dinâmica de Sistemas de Locomoção Multipernas.....	71
3.1 Modelo Cinemático do Sistema de Locomoção Multipernas	72
3.1.1 Descrição do Modelo Cinemático no Caso de Pernas com Dois gdl	72
3.1.2 Padrões de Locomoção Implementados para a Locomoção do Robô Multipernas.....	74
3.1.3 Planeamento da Trajectória do Robô	75
3.2 Modelo Dinâmico do Robô	78
3.2.1 Determinação da Dinâmica Inversa	78
3.2.2 Efeitos Dinâmicos nas Juntas do Robô	79
3.2.3 Modelo do Corpo do Robô	82
3.3 Robô com três gdl por Perna	86
3.3.1 Planeamento da Trajectória do Robô	88
3.3.2 Implementação da Junta do Tornozelo	88
3.4 Modelo de Interação Pé-Solo.....	91
3.5 Aplicação para Simulação da Locomoção.....	92
3.6 Medidas para a Avaliação do Desempenho da Locomoção	93
3.6.1 Índices Cinemáticos	94
3.6.1.1 Análise Face a Perturbações.....	94
3.6.1.2 Medida da Locomobilidade.....	95
3.6.2 Índices Dinâmicos.....	95
3.6.2.1 Densidade de Energia Absoluta Média	96
3.6.2.2 Densidade de Dispersão da Potência Média.....	96
3.6.2.3 Densidade de Potência Perdida	97
3.6.2.4 Força Média na Interface Corpo-Pernas.....	98
3.6.2.5 Pico de Binário no Robô Solicitado pelo Controlador	98
3.6.2.6 Erros Quadráticos Médios entre as Trajectórias Planeadas e Reais	98
3.7 Conclusões e Perspectivas de Trabalho Futuro	99
Referências	103
Capítulo 4	109
Análise Cinemática e Dinâmica de Sistemas de Locomoção Multipernas.....	109
4.1 Introdução.....	110
4.1.1 Aproximações Biológicas	111
4.1.2 Estratégias Evolutivas	112
4.1.3 Projecto Mecânico	114
4.1.4 Optimização de Funções Energéticas.....	115
4.1.5 Outras Aproximações.....	120
4.2 Análise e Optimização dos Parâmetros do Sistema Artificial de Locomoção.....	121
4.2.1 Análise Cinemática	122
4.2.2 Análise Dinâmica.....	126
4.2.3 Conclusões sobre a influência dos parâmetros β , H_B , L_S e F_C	130
4.2.4 Configuração da Perna.....	131
4.2.4.1 Análise Cinemática.....	131
4.2.4.2 Análise Dinâmica	134
4.2.5 Padrões de Locomoção	136
4.2.5.1 Análise Cinemática.....	136
4.2.5.2 Análise Dinâmica	137

4.2.5.3 Potência Mecânica Absoluta Instantânea <i>versus</i> Padrão de Locomoção.....	137
4.2.6 Offset da Trajectória do Pé <i>versus</i> Comprimento dos Elos das Pernas.....	141
4.2.6.1 Análise Cinemática.....	141
4.2.6.2 Análise Dinâmica.....	143
4.2.7 Velocidade Frontal do Corpo do Robô.....	145
4.2.8 Altura do Corpo ao Solo e Comprimento do Passo <i>versus</i> Velocidade Frontal do Corpo do Robô.....	147
4.2.9 Número de Pernas do Robô.....	148
4.3 Aplicação dos Índices Dinâmicos à Locomoção Animal.....	151
4.3.1 Discussão dos Resultados Obtidos.....	154
4.4 Conclusões e Perspectivas de Trabalho Futuro.....	157
Referências.....	161
Capítulo 5.....	167
Arquitecturas e Algoritmos de Controlo para Robôs Multipernas.....	167
5.1 Controlo de Sistemas Robóticos de Locomoção.....	168
5.1.1 Locomoção Passiva.....	170
5.1.2 Ausência de Controlo.....	171
5.1.3 Controlo de Posição / Velocidade.....	172
5.1.4 Controlo de Força e Controlo Híbrido de Posição / Força.....	173
5.1.5 Controladores de Estrutura Variável.....	175
5.1.6 Controlo com Recurso a Computação Inteligente.....	176
5.1.7 Modelo de Controlo Virtual.....	177
5.1.8 Minimização do Impacto do Pé com o Solo.....	178
5.2 Análise e Comparação de Architecturas de Controlo para um Robô Hexápode.....	180
5.2.1 Sintonia dos Controladores.....	181
5.2.2 Parâmetros do Modelo de Simulação.....	182
5.2.3 Architectura de Controlo.....	182
5.2.4 Controlo de Posição e Força de um Robô Hexápode.....	184
5.2.4.1 Modelo de Controlo do Robô.....	185
5.2.4.2 Parâmetros do Sistema e Sintonia dos Controladores.....	186
5.2.4.3 Desempenho Base das Architecturas de Controlo PD-P e PD-P&F.....	187
5.2.4.4 Trajectória do Pé e Saturação dos Actuadores.....	189
5.2.4.5 Parâmetros e Padrão da Locomoção.....	192
5.2.4.6 Propriedades do Solo.....	194
5.2.4.7 Esquema Adaptativo Para os Ganhos do Controlador G_{c2}	196
5.2.4.8 Discussão dos Resultados e Conclusões.....	200
5.3 Controlo de Ordem Inteira e Não Inteira das Juntas das Pernas do Robô.....	201
5.3.1 Architectura de Controlo Adoptada Para as Juntas das Pernas do Robô.....	201
5.3.2 Cálculo da Margem de Fase Baseada no Diagrama de Nyquist.....	202
5.3.3 Sintonia dos Controladores de Ordem Fraccionária.....	204
5.3.4 Comparação de Controladores de Ordem Inteira e Fraccionária.....	204
5.3.4.1 Análise Através dos Índices Dinâmicos.....	206
5.3.4.2 Análise Através da Margem de Fase.....	214
5.3.4.3 Discussão dos Resultados e Conclusões.....	214
5.3.5 Comparação de Controladores de Diferentes Ordens.....	215
5.3.5.1 Análise Através dos Índices de Desempenho.....	215
5.3.5.2 Análise Através da Margem de Fase.....	219
5.3.5.3 Discussão dos Resultados e Conclusões.....	222
5.4 Controlo de um Hexápode com Três gdl por Perna.....	223
5.4.1 Architectura de Controlo Adoptada e Respectiva Sintonia.....	223
5.4.2 Valores dos parâmetros de Controlo da Junta do Tornozelo.....	224
5.4.3 Valor Planeado Óptimo para o Ângulo do Pé com a Horizontal.....	225
5.4.4 Controlo de Ordem Fraccionária do Hexápode com Três gdl por Perna.....	226

5.4.5 Desempenho dos Algoritmos de Ordem Fraccionária	229
5.4.6 Discussão dos Resultados e Conclusões	230
5.5 Conclusões e Perspectivas de Desenvolvimento Futuro.....	231
Referências	235
Capítulo 6	243
Estudo de Padrões de Locomoção Periódicos e Quase-Periódicos Para Robôs com Pernas	243
6.1 Estudo dos Padrões de Locomoção	245
6.1.1 Padrões de Locomoção Periódicos	247
6.1.2 Padrões de Locomoção Não Periódicos.....	250
6.1.3 Optimização dos Padrões de Locomoção	254
6.1.4 Estratégia a Adotar para a Selecção do Local para Colocar os Pés	256
6.2 Adaptação dos Padrões de Locomoção Quadrúpedes e Hexápodes à Velocidade.....	259
6.2.1 Metodologia de Sintonia do Controlador.....	259
6.2.2 Adaptação dos Parâmetros do Padrão de Locomoção à Velocidade de Locomoção de Robôs Hexápodes	261
6.2.3 Adaptação dos Parâmetros do Padrão de Locomoção à Velocidade de Locomoção de Robôs Quadrúpedes	265
6.2.4 Adaptação / Selecção do Padrão de Locomoção à velocidade de Locomoção	269
6.3 Locomoção Recorrendo a Padrões de Locomoção Quase-Periódicos.....	274
6.3.1 Selecção da Estratégia a Adotar para Transpor Obstáculos.....	274
6.3.2 Transposição de um Obstáculo Através da Variação da Altura do Pé ao Solo e do Comprimento do Passo	276
6.3.3 Transposição de um Obstáculo Através da Colocação do Pé Sobre Este	277
6.3.4 Comparação das Duas Estratégias Quando os Obstáculos se Encontram em Localizações Bem Definidas.....	278
6.3.4.1 Estratégia APCP.....	279
6.3.4.2 Estratégia PSO.....	281
6.3.4.3 Comparação das Estratégias APCP e PSO.....	284
6.3.4.4 Variação dos Parâmetros de Locomoção	285
6.3.5 Comparação das Estratégias no Caso de Obstáculos Localizados Aleatoriamente	285
6.3.5.1 Estratégia APCP.....	286
6.3.5.2 Estratégia PSO.....	286
6.3.5.3 Comparação das Estratégias APCP e PSO	287
6.3.6 Controlo do Robô Hexápode Durante a Transposição de Obstáculos	287
6.4 Identificação e Análise das Funções de Transferência do Sistema Robótico de Locomoção	289
6.4.1 Metodologia para a Determinação das Funções de Transferência do Hexápode.....	290
6.4.2 Funções de Transferência do Sistema Robótico de Locomoção Multipernas.....	291
6.5 Conclusões e Perspectivas de Trabalho Futuro	296
Referências	301
Capítulo 7	309
Conclusões, Discussão dos Resultados e Perspectivas de Desenvolvimento Futuro	309
7.1 Principais Conclusões e Discussão dos Resultados.....	310
7.2 Contribuições deste Trabalho	315
7.3 Perspectivas de Desenvolvimento Futuro.....	316
Anexo A.....	319
Padrões de Locomoção Bípedes, Quadrúpedes e Hexápodes	319
A.1 Padrões de Locomoção de Animais Bípedes e Quadrúpedes	319
A.1.1 Padrões de Locomoção de Andar: Pouco ou Nenhum Armazenamento de Energia Elástica	321

A.1.2 Padrões de Locomoção de Corrida Simétricos: Armazenamento de Energia Elástica nas Pernas	321
A.1.3 Padrões de Locomoção de Corrida Assimétricos: Armazenamento de Energia Elástica Frequente no Dorso e nas Pernas	323
A.2 Padrões de Locomoção de Animais Hexápodes	325
A.3 Padrões de Locomoção Artificiais	326
Referências.....	329
Anexo B.....	331
Estratégias Para o Planeamento das Trajectórias de Sistemas Artificiais de Locomoção	331
B.1 Trajectórias de Referência Baseadas na Biologia	332
B.2 Trajectórias de Referência Baseadas em Funções Matemáticas.....	333
B.3 Determinação das Trajectórias de Referência Recorrendo a Algoritmos Genéticos e Redes Neurais	335
B.4 Determinação das Trajectórias de Referência Recorrendo a Índices de Optimização	337
B.5 Trajectórias de Referência Cíclicas nas Juntas dos Robôs	339
B.6 Geração das Trajectórias de Referência Recorrendo a Telecontrolo	339
B.7 Outras Estratégias para a Geração das Trajectórias de Referência	340
Referências.....	343
Anexo C.....	349
Cinemática e Dinâmica de um Robô com Dois gdl Rotacionais nas Pernas	349
C.1 Equações Cinemáticas para um Robô com Dois gdl nas Pernas	349
C.2 Equações das Energias para um Robô com Dois gdl nas Pernas	351
C.3 Equações Dinâmicas para um Robô com Dois gdl nas Pernas	351
Anexo D.....	355
Cinemática e Dinâmica de um Robô com Três gdl Rotacionais nas Pernas.....	355
D.1 Equações Cinemáticas Para um Robô com Três gdl nas Pernas	355
D.2 Equações das Energias Para um Robô com Três gdl nas Pernas	358
D.3 Equações Dinâmicas Para um Robô com Três gdl nas Pernas	360
Referências.....	363
Anexo E.....	365
Modelação do Contacto do Pé com o Solo	365
E.1 Modelação e Simulação de Colisões entre Corpos.....	366
E.2 Modelação da Interação Pé-Solo	367
E.2.1 Modelação Recorrendo às Relações Força-Deformação	367
E.2.2 Modelação Recorrendo a Sistemas Lineares Mola-Amortecedor.....	368
E.2.3 Modelação Recorrendo a Sistemas Não Lineares Mola-Amortecedor	371
E.2.4 Modelos Alternativos para Modelar e Simular a Interação Pé-Solo	374
E.3 Modelos Implementados Para a Simulação da Interação Pé-Solo	375
E.3.1 Modelo Cinemático Linear da Interação Pé-Solo	375
E.3.2 Modelo Cinemático Não Linear da Interação Pé-Solo.....	377
E.3.3 Modelos Dinâmicos Linear e Não Linear da Interação Pé-Solo	378
Referências.....	381

Anexo F	385
Dados Antropométricos dos Seres Vivos	385
F.1 Dados Antropométricos do Ser Humano.....	385
F.2 Dados Antropométricos dos Seres Vivos Considerados nas Experiências	386
Referências	389

Índice de Figuras

Figura 2.1: Gravura de um dos primeiros veículos com pernas.....	22
Figura 2.2: Mecanismo de Chebyshev.....	23
Figura 2.3: Esboço da primeira máquina quadrúpede.....	23
Figura 2.4: Projecto da primeira máquina bípede.....	24
Figura 2.5: Máquina quadrúpede do Barão de Bechtolsheim.....	24
Figura 2.6: Protótipo de um tractor com pernas.....	24
Figura 2.7: O quadrúpede da General Electric.....	26
Figura 2.8: O quadrúpede Phoney Poney.....	27
Figura 2.9: O Big Muskie.....	27
Figura 2.10: Robôs monopés Pogostick (esquerda) e ARL Monopod II (direita).....	30
Figura 2.11: Robôs bípedes WAP-1 (esquerda) e WL-9DR (direita).....	32
Figura 2.12: Honda Humanoid Robot – modelos P3 (esquerda) e ASIMO (direita).....	33
Figura 2.13: Robô humanóide WABIAN.....	34
Figura 2.14: Robô hexápode ASV.....	36
Figura 2.15: Robô octópode DANTE II.....	37
Figura 2.16: Robô hexápode Walking Harvester.....	37
Figura 2.17: Pipe Climbing Robot.....	38
Figura 2.18: Robô para inspecção de tubagens MORITZ.....	39
Figura 2.19: Robôs trepadores RAMR1 (esquerda) e MRWALLSPECT-III (direita).....	40
Figura 2.20: O Lobster Robot que pretende ser uma mímica da lagosta.....	42
Figura 2.21: Robôs hexápodes CWRU II (esquerda) e CWRU III (direita).....	43
Figura 2.22: Robôs hexápodes Boadicea (esquerda) e TUM (direita).....	44
Figura 2.23: Robôs com accionamento reduzido Hyperion (esquerda) e SCOUT-I (direita).....	45
Figura 2.24: Robô hexápode Sprawlita.....	46
Figura 2.25: Robôs com accionamento reduzido RHex (esquerda), Whegs I (centro) e Mini-Whegs (direita).....	48
Figura 2.26: Robô com locomoção mista Gorilla Robot II.....	50
Figura 2.27: Robôs híbridos Biped Type Leg-Wheeled Robot (esquerda) e WorkPartner (direita).....	52
Figura 2.28: Robô híbrido Roller-Walker.....	53
Figura 2.29: Robô híbrido AZIMUT.....	53
Figura 2.30: Robôs para entretenimento: o quadrúpede AIBO (esquerda) e o humanóide QRIO (direita).....	54

Figura 3.1: Vista de cima do robô multipernas onde é possível verificar a distribuição das pernas de ambos os lados do corpo de forma a evitar colisões entre elas.	73
Figura 3.2: Sistema de coordenadas e variáveis que caracterizam as trajetórias de movimento do robô multipernas com dois gdl por perna.....	74
Figura 3.3: O cavalo (à esquerda) apresenta pernas com os joelhos para a frente e o flamingo (à direita) com o joelho para trás.	78
Figura 3.4: Modelo das juntas da perna: a) actuador e transmissão ideais, b) actuador com atrito viscoso e transmissão com flexibilidade, e c) actuador e transmissão com atrito viscoso, flexibilidade e folga.....	80
Figura 3.5: Modelo do corpo do robô e da interação pé-solo no caso de pernas com dois gdl.	83
Figura 3.6: Sistema de coordenadas e variáveis que caracterizam as trajetórias de movimento do robô multipernas com três gdl por perna.	86
Figura 3.7: Diferentes formas de apoiar o pé no solo (da esquerda para a direita): esqueleto da perna traseira do cavalo (ungulígrado), do gato (digitígrado) e do humano (plantígrado).	87
Figura 3.8: IGU da aplicação informática para a simulação de padrões de locomoção para robôs multipernas.	93
Figura 3.9: Trajectórias da anca, do joelho e do pé da perna 1 de um robô hexápode, durante dois passos, quando este se desloca com $\beta = 2/3$	93
Figura 3.10: Representação gráfica da distância entre o centro das elipsóides e as suas intersecções com a tangente à trajectória do pé (E_F).	95
Figura 4.1: $\log(\xi_{\dot{x}})$ e $\log(\xi_{\dot{y}})$ vs. (β, H_B) com $L_S = 1$ m, $F_C = 0,2$ m, PLO.....	123
Figura 4.2: $\log(\xi_{\dot{x}})$ e $\log(\xi_{\dot{y}})$ vs. (β, H_B) com $L_S = 0,2$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.....	123
Figura 4.3: $\log(\xi_{\dot{x}})$ e $\log(\xi_{\dot{y}})$ vs. (β, H_B) com $L_S = 2,0$ m, $F_C = 0,5$ m, PLO.....	124
Figura 4.4: $\log(\xi_{\dot{x}})$ e $\log(\xi_{\dot{y}})$ vs. (L_S, F_C) com $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, PLO.	124
Figura 4.5: L_F e L_B vs. (β, H_B) com $L_S = 0,2$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.....	125
Figura 4.6: L_F e L_B vs. (β, H_B) com $L_S = 1$ m, $F_C = 0,2$ m, PLO.....	126
Figura 4.7: L_F e L_B vs. (β, H_B) com $L_S = 2,0$ m, $F_C = 0,5$ m, PLO.....	126
Figura 4.8: L_F e L_B vs. (L_S, F_C) com $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, PLO.....	126
Figura 4.9: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (β, H_B) com $L_S = 1$ m, $F_C = 0,2$ m, PLO.....	128
Figura 4.10: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (β, H_B) com $L_S = 0,2$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.....	128
Figura 4.11: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (β, H_B) com $L_S = 2,0$ m, $F_C = 0,5$ m, PLO.....	129
Figura 4.12: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (L_S, F_C) com $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, PLO.....	130
Figura 4.13: Representação gráfica da locomoção do robô na situação em que as pernas apresentam uma estrutura similar à dos mamíferos e à das aves com $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.	131
Figura 4.14: $\log(\xi_{\dot{x}})$ e $\log(\xi_{\dot{y}})$ vs. (β, H_B) com $L_S = 1$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.....	132
Figura 4.15: $\log(\xi_{\dot{x}})$ e $\log(\xi_{\dot{y}})$ vs. (L_S, F_C) com $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, PLO.	132
Figura 4.16: L_F e L_B vs. (β, H_B) com $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.....	133

Figura 4.17: L_F e L_B vs. (L_S, F_C) com $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, PLO.....	133
Figura 4.18: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (β, H_B) com $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.....	134
Figura 4.19: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (L_S, F_C) com $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, PLO.....	135
Figura 4.20: L_F vs. (L_S, H_B) com $\beta = 50\%$, $F_C = 0,1$ m, PLO, PLFIMC, PLFICC, PLOI, PLFIMCI e PLFICCI.....	136
Figura 4.21: $\log(E_{av})$ vs. (L_S, H_B) com $\beta = 50\%$, $F_C = 0,1$ m, $V_F = 1$ ms ⁻¹ , PLO, PLFIMC, PLFICC, PLOI, PLFIMCI e PLFICCI.....	137
Figura 4.22: Gráficos de $P_i(t)$ com $\beta = 20,0\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m e $V_F = 1$ ms ⁻¹ , para os padrões PLO, PLFIMC e PLFICC.....	138
Figura 4.23: Gráficos de $P_i(t)$ com $\beta = 33,3\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m e $V_F = 1$ ms ⁻¹ , para os padrões PLO, PLFIMC e PLFICC.....	138
Figura 4.24: Gráficos de $P_i(t)$ com $\beta = 50,0\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m e $V_F = 1$ ms ⁻¹ , para os padrões PLO, PLFIMC e PLFICC.....	138
Figura 4.25: Gráficos de $P_i(t)$ com $\beta = 66,6\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m e $V_F = 1$ ms ⁻¹ , para os padrões PLO, PLFIMC e PLFICC.....	139
Figura 4.26: Gráficos de $P_i(t)$ com $\beta = 80,0\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m e $V_F = 1$ ms ⁻¹ , para os padrões PLO, PLFIMC e PLFICC.....	139
Figura 4.27: Gráficos da potência mecânica absoluta instantânea total dos lados esquerdo ($P_1(t)+P_3(t)+P_5(t)$) e direito ($P_2(t)+P_4(t)+P_6(t)$) do robô para $\beta = 20\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m e $V_F = 1$ ms ⁻¹ , para os padrões PLO, PLFIMC e PLFICC.....	140
Figura 4.28: Gráficos da potência mecânica absoluta instantânea total dos lados esquerdo ($P_1(t)+P_3(t)+P_5(t)$) e direito ($P_2(t)+P_4(t)+P_6(t)$) do robô para $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m e $V_F = 1$ ms ⁻¹ , para os padrões PLO, PLFIMC e PLFICC.....	140
Figura 4.29: $\log(\xi_x)$ e $\log(\xi_y)$ vs. (L_{i1}, O_i) com $\beta = 50\%$, $L_S = 0,2$ m, $H_B = 0,4$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.....	142
Figura 4.30: $\log(\xi_x)$ e $\log(\xi_y)$ vs. (L_{i1}, O_i) com $\beta = 50\%$, $L_S = 0,2$ m, $H_B = 0,7$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.....	142
Figura 4.31: L_F e L_B vs. (L_{i1}, O_i) com $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m, $H_B = 0,9$ m, $V_F = 1$ ms ⁻¹ , PLO.....	142
Figura 4.32: L_F e L_B vs. (L_{i1}, O_i) com $\beta = 50\%$, $L_S = 0,2$ m, $F_C = 0,1$ m, $H_B = 0,4$ m, $V_F = 1$ ms ⁻¹ , PLO.....	143
Figura 4.33: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (L_{i1}, O_i) com $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m, $H_B = 0,9$ m, $V_F = 1$ ms ⁻¹ , PLO.....	143
Figura 4.34: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (L_{i1}, O_i) com $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m, $H_B = 0,9$ m, $V_F = 1$ ms ⁻¹ , PLO.....	145
Figura 4.35: $\min[E_{av}(V_F)]$, $\min[D_{av}(V_F)]$, $\min[T_L(V_F)]$ e $\min[F_L(V_F)]$ com $F_C = 0,01$ m, PLO.....	146
Figura 4.36: $L_S(V_F)$ e $H_B(V_F)$ para $\min(E_{av})$ com $F_C = 0,01$ m, PLO.....	148
Figura 4.37: $\min[E_{av}(V_F)]$, $\min[D_{av}(V_F)]$, $\min[T_L(V_F)]$ e $\min[F_L(V_F)]$, para vários números de pernas $n = \{2, 4, 6, 8, 10\}$, com $F_C = 0,01$ m, PLO.....	149
Figura 4.38: $\min[E_{av}(V_F)]$, $\min[D_{av}(V_F)]$, $\min[T_L(V_F)]$ e $\min[F_L(V_F)]$, para vários números de pernas $n = \{2, 4, 6, 8, 10\}$, com $F_C = 0,01$ m, PLO.....	150
Figura 4.39: $\min[E_{av}(V_F)]$, para vários tipos de animais, com $F_C = 0,01$ m, PLO.....	152
Figura 4.40: $\min[D_{av}(V_F)]$, para vários tipos de animais, com $F_C = 0,01$ m, PLO.....	152
Figura 4.41: $\min[T_L(V_F)]$, para vários tipos de animais, com $F_C = 0,01$ m, PLO.....	153
Figura 4.42: $\min[F_L(V_F)]$, para vários tipos de animais, com $F_C = 0,01$ m, PLO.....	153

Figura 4.43: Gráfico que representa a equação alométrica de Taylor, <i>et al.</i> (1982).....	155
Figura 4.44: Gráfico que representa a equação alométrica de Fedak, <i>et al.</i> (1982).	155
Figura 4.45: Gráfico que representa a equação alométrica de Heglund, <i>et al.</i> (1982).	155
Figura 5.1: Arquitectura de controlo com realimentação da posição e velocidade das trajectórias das ancas do robô e correspondente simulação da locomoção do hexápode, ao longo de 0,3 s, para $L_{i1} = L_{i2} = 0,5$ m, $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,01$ m, $H_B = 1,8$ m, $V_F = 1$ ms ⁻¹ , PLO.	183
Figura 5.2: Arquitectura de controlo com realimentação da posição e velocidade das trajectórias dos pés do robô e correspondente simulação da locomoção do hexápode, ao longo de 1,3 s, para $L_{i1} = L_{i2} = 0,5$ m, $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,01$ m, $H_B = 1,8$ m, $V_F = 1$ ms ⁻¹ , PLO.	183
Figura 5.3: Arquitectura de controlo com realimentação da posição e velocidade das trajectórias das ancas e dos pés do robô e correspondente simulação da locomoção do hexápode, ao longo de 2,0 s, para $L_{i1} = L_{i2} = 0,5$ m, $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,01$ m, $H_B = 1,8$ m, $V_F = 1$ ms ⁻¹ , PLO.	184
Figura 5.4: Arquitectura de controlo PD-P do robô multipernas, somente com realimentação da posição / velocidade.....	185
Figura 5.5: Arquitectura de controlo PD-P&F do robô multipernas, com realimentação de posição / velocidade (anel externo) e da força de contacto do pé (anel interno).	185
Figura 5.6: Erros de seguimento das trajectórias das ancas Δ_{1xH} e Δ_{1yH} vs. t para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	188
Figura 5.7: Erros de seguimento das trajectórias dos pés Δ_{1xF} e Δ_{1yF} vs. t para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	188
Figura 5.8: Binários nas juntas τ_{11m} e τ_{12m} vs. t para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.	188
Figura 5.9: Erros de seguimento das trajectórias das ancas Δ_{1xH} e Δ_{1yH} vs. t para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	189
Figura 5.10: Binários nas juntas τ_{11m} e τ_{12m} vs. t para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.	189
Figura 5.11: Erros de seguimento das trajectórias das ancas Δ_{1xH} e Δ_{1yH} vs. t para as trajectórias cicloidal e sinusoidal dos pés do robô, durante a fase de transferência, adoptando a arquitectura de controlo PD-P&F com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.	190
Figura 5.12: Binários nas juntas τ_{11m} e τ_{12m} vs. t para as trajectórias cicloidal e sinusoidal dos pés do robô, durante a fase de transferência, adoptando a arquitectura de controlo PD-P&F com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.	190
Figura 5.13: E_{av} e ε_{xyH} vs. τ_{ijMax} para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F.....	191
Figura 5.14: F_L e τ_P vs. τ_{ijMax} para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F.	191
Figura 5.15: E_{av} e ε_{xyH} vs. β para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	193
Figura 5.16: E_{av} e ε_{xyH} vs. V_F para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	193
Figura 5.17: E_{av} e ε_{xyH} vs. K_{mult} para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	195
Figura 5.18: F_L e τ_P vs. K_{mult} para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.	195
Figura 5.19: Gráficos de τ_{11m} e Δ_{1yH} vs. t para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $K_{mult} = 4$ e $\tau_{ijMax} \rightarrow \infty$	196
Figura 5.20: E_{av} e ε_{xyH} vs. Kp_j para a arquitectura de controlo PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	197

Figura 5.21: F_L e τ_p vs. Kp_j para a arquitectura de controlo PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	197
Figura 5.22: Arquitectura de controlo PD-P&Fv do robô multipernas, com realimentação de posição / velocidade e da força de contacto do pé e com o esquema de ajuste do ganho da malha directa....	198
Figura 5.23: E_{av} e ε_{xyH} vs. Kp_{jlow} para $\{Kp_{jhigh}, y_{iF0}\} = \{0,9; 0,01\}$, com a arquitectura de controlo PD-P&F e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	199
Figura 5.24: F_L e τ_p vs. Kp_{jlow} para $\{Kp_{jhigh}, y_{iF0}\} = \{0,9; 0,01\}$, com a arquitectura de controlo PD-P&F e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	199
Figura 5.25: Binários τ_{11m} e τ_{12m} vs. t para $\{Kp_{jhigh}, y_{iF0}\} = \{0,9; 0,01\}$, com a arquitectura de controlo PD-P&F e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	199
Figura 5.26: Erros de seguimento das trajectórias das ancas Δ_{1xH} e Δ_{1yH} vs. t para $\{Kp_{jhigh}, y_{iF0}\} = \{0,9; 0,01\}$, com a arquitectura de controlo PD-P&F e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	200
Figura 5.27: Diagrama de blocos MIMO do sistema robótico de locomoção ao nível das juntas das pernas.....	203
Figura 5.28: Binários nos actuadores das juntas τ_{11m} e τ_{12m} vs. t , para os algoritmos de controlo PD ¹ e PD ^{0,5} , considerando juntas ideais e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	206
Figura 5.29: Erros de seguimento das trajectórias das ancas Δ_{1xH} e Δ_{1yH} vs. t , para os algoritmos de controlo PD ¹ e PD ^{0,5} , considerando juntas ideais e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	206
Figura 5.30: E_{av} e ε_{xyH} vs. τ_{ijMax} para os algoritmos de controlo PD ¹ e PD ^{0,5} , considerando juntas ideais.....	207
Figura 5.31: T_L e τ_p vs. τ_{ijMax} para os algoritmos de controlo PD ¹ e PD ^{0,5} , considerando juntas ideais.....	207
Figura 5.32: E_{av} e ε_{xyH} vs. K_{mult} para os algoritmos de controlo PD ¹ e PD ^{0,5} , considerando atrito não linear nas juntas e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	209
Figura 5.33: E_{av} e ε_{xyH} vs. K_{mult} para os algoritmos de controlo PD ¹ e PD ^{0,5} , considerando atrito não linear nas juntas e $\tau_{ijMax} = 200$ Nm.....	209
Figura 5.34: τ_p vs. K_{mult} para os algoritmos de controlo PD ¹ e PD ^{0,5} , considerando atrito não linear nas juntas, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm (esquerda) e $\tau_{ijMax} = 200$ Nm (direita).....	210
Figura 5.35: E_{av} e ε_{xyH} vs. B_{ijm} para os algoritmos de controlo PD ¹ e PD ^{0,5} , considerando atrito nos actuadores e flexibilidade nas transmissões das juntas e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	211
Figura 5.36: E_{av} e ε_{xyH} vs. K_{ijT} para os algoritmos de controlo PD ¹ e PD ^{0,5} , considerando atrito nos actuadores e flexibilidade nas transmissões das juntas e $\tau_{ijMax} = 200$ Nm.....	211
Figura 5.37: D_{av} e ε_{xyH} vs. K_{ijT} para os algoritmos de controlo PD ¹ e PD ^{0,5} , considerando atrito nos actuadores e atrito, folga e flexibilidade nas transmissões das juntas e $\tau_{ijMax} = 100$ Nm.....	213
Figura 5.38: T_L e F_L vs. K_{ijT} para os algoritmos de controlo PD ¹ e PD ^{0,5} , considerando atrito nos actuadores e atrito, folga e flexibilidade nas transmissões das juntas e $\tau_{ijMax} = 100$ Nm.....	213
Figura 5.39: T_L e F_L vs. h_{ij} para os algoritmos de controlo PD ¹ e PD ^{0,5} , considerando atrito nos actuadores e atrito, folga e flexibilidade nas transmissões das juntas e $\tau_{ijMax} = 100$ Nm.....	213
Figura 5.40: E_{av} e F_L vs. ε_{ij} para os algoritmos de controlo PD ¹ e PD ^{0,5} , considerando atrito nos actuadores e atrito, folga e flexibilidade nas transmissões das juntas e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	214
Figura 5.41: Binários nas juntas τ_{11m} e τ_{12m} vs. t para os controladores PD ¹ e PD ^{0,9} considerando juntas ideais e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	216
Figura 5.42: Erros de seguimento das trajectórias das ancas Δ_{1xH} e Δ_{1yH} vs. t , para os controladores PD ¹ e PD ^{0,9} considerando juntas ideais e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	216
Figura 5.43: E_{av} vs. α , considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	217

Figura 5.44: T_L vs. α , considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	217
Figura 5.45: ε_{xyH} vs. α , considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	217
Figura 5.46: E_{av} vs. α , considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 100$ Nm.....	218
Figura 5.47: T_L vs. α , considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 100$ Nm.....	218
Figura 5.48: ε_{xyH} vs. α , considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 100$ Nm.....	218
Figura 5.49: Diagramas de Nyquist para o controlador PD^α , $\alpha = \{0,7; 0,8; 0,9; 1,0\}$, considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	220
Figura 5.50: Diagramas de Nyquist para o controlador PD^α , $\alpha = \{0,7; 0,8; 0,9; 1,0\}$, considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 200$ Nm.....	220
Figura 5.51: Diagramas de Nyquist para o controlador PD^α , $\alpha = \{0,7; 0,8; 0,9; 1,0\}$, considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 100$ Nm.....	220
Figura 5.52: Erros de seguimento das trajectórias dos pés Δ_{1xF} e Δ_{1yF} vs. t , quando o impulso da perturbação ($\delta y_{1F} = 0,01$ m, $\delta t = 0,1$ s) é introduzido no início da fase de transferência do pé, para o controlador PD^α ($\alpha = \{0,7; 0,8; 0,9; 1,0\}$), considerando juntas ideais e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm...	221
Figura 5.53: Erros de seguimento das trajectórias dos pés Δ_{1xF} e Δ_{1yF} vs. t , quando o impulso da perturbação ($\delta y_{1F} = 0,01$ m, $\delta t = 0,1$ s) é introduzido perto do final da fase de transferência do pé, para o controlador PD^α ($\alpha = \{0,7; 0,8; 0,9; 1,0\}$), considerando juntas ideais e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.....	221
Figura 5.54: Erros de seguimento das trajectórias das ancas Δ_{1xH} e Δ_{1yH} vs. t , com a junta do tornozelo actuada de forma activa e passiva, para a arquitectura de controlo PD-P&F e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.	226
Figura 5.55: Binários nas juntas τ_{11m} e τ_{12m} vs. t , com a junta do tornozelo actuada de forma activa e passiva, para a arquitectura de controlo PD-P&F e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.	226
Figura 5.56: Gráficos de ε_{xyH} vs. E_{av} para as diferentes sintonias do controlador $G_{c1}(s)$ de OF, quando se estabelece um compromisso entre a minimização de E_{av} e ε_{xyH} , com $G_{c2} = 0,9$, com as juntas 1 e 2 actuadas através de motores e a junta 3 actuada de forma passiva (esquerda) e todas as juntas actuadas através de motores (direita).	228
Figura 5.57: Erros de seguimento das trajectórias dos pés Δ_{1xF} e Δ_{1yF} vs. t para $\alpha_j = \{0,5; 0,6; 0,7; 0,8\}$, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.	229
Figura 5.58: Erros de seguimento das trajectórias dos pés Δ_{1xF} e Δ_{1yF} vs. t para $\alpha_j = \{0,5; 0,6; 0,7; 0,8\}$, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.	230
Figura 6.1: $\min[E_{av}(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.	261
Figura 6.2: $\min[D_{av}(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.....	262
Figura 6.3: $\min[T_L(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.	262
Figura 6.4: $\min[F_L(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.	262
Figura 6.5: $\beta(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(T_L)$, para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.	263
Figura 6.6: $L_S(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(T_L)$, para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO...	263
Figura 6.7: $H_B(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(T_L)$, para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.	264

Figura 6.8: $L_S(V_F)$ e $H_B(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(D_{av})$, considerando as trajectória planeadas do robô, com $F_C = 0,1$ m, PLO.	264
Figura 6.9: $\min[E_{av}(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.....	266
Figura 6.10: $\min[D_{av}(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.	266
Figura 6.11: $\min[T_L(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.....	267
Figura 6.12: $\min[F_L(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.....	267
Figura 6.13: $\beta(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(T_L)$, para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.	268
Figura 6.14: $L_S(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(T_L)$, para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.	268
Figura 6.15: $H_B(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(T_L)$, para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.	268
Figura 6.16: $L_S(V_F)$ e $H_B(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(D_{av})$, considerando as trajectória planeadas do robô, com $F_C = 0,1$ m, PLO.	269
Figura 6.17: $\min[E_{av}(V_F)]$, $\min[D_{av}(V_F)]$, $\min[T_L(V_F)]$ e $\min[\varepsilon_{\text{synH}}(V_F)]$, para diferentes padrões de locomoção quadrúpede (considerando uma sintonia comum do controlador para todos eles), com $F_C = 0,1$ m.	270
Figura 6.18: $\min[E_{av}(V_F)]$, $\min[D_{av}(V_F)]$, $\min[T_L(V_F)]$ e $\min[F_L(V_F)]$, para diferentes padrões de locomoção quadrúpede (considerando uma sintonia própria do controlador para cada um deles), com $F_C = 0,1$ m.....	272
Figura 6.19: $\min[E_{av}(V_F)]$, $\min[D_{av}(V_F)]$, $\min[T_L(V_F)]$ e $\min[F_L(V_F)]$, considerando as trajectórias planeadas do robô para diferentes padrões de locomoção quadrúpede, com $F_C = 0,1$ m.	273
Figura 6.20: Transposição de um obstáculo recorrendo à estratégia APCP.	276
Figura 6.21: Transposição de um obstáculo recorrendo à estratégia PSO.	278
Figura 6.22: Trajectórias e coordenadas planeadas para o pé do robô, durante a fase de transferência, nas situações em que a trajectória do pé começa e termina sobre o solo (esquerda) e termina sobre um obstáculo (direita).	278
Figura 6.23: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (L_o, H_o) , com $X_o = 2,25$ m, quando se adopta a estratégia APCP, para $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$	279
Figura 6.24: L_{S1} , L_{S2} , L_{S3} e L_{S4} vs. (L_o, H_o) , para $\min(E_{av})$, quando se adopta a estratégia APCP, com $X_o = 2,25$ m, $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$	281
Figura 6.25: F_{C2} e F_{C3} vs. (L_o, H_o) , para $\min(E_{av})$, quando se adopta a estratégia APCP, com $X_o = 2,25$ m, $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$	281
Figura 6.26: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (L_o, H_o) , com $X_o = 2,25$ m, quando se adopta a estratégia PSO, para $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$	282
Figura 6.27: L_{S1} , L_{S2} , L_{S3} e L_{S4} vs. (L_o, H_o) , para $\min(E_{av})$, quando se adopta a estratégia PSO, com $X_o = 2,25$ m, $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$	283
Figura 6.28: F_{C2} e F_{C3} vs. (L_o, H_o) , para $\min(E_{av})$, quando se adopta a estratégia PSO, com $X_o = 2,25$ m, $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$	284
Figura 6.29: Lugar de (L_o, H_o) para a “melhor” estratégia do ponto de vista de E_{av} , D_{av} , T_L e F_L	284
Figura 6.30: $\log(E_{av})$ vs. (L_o, H_o) , com $L_o = 0,05$ m, quando se adoptam as estratégias APCP e PSO, para $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$	286
Figura 6.31: Lugar de (X_o, H_o) para a “melhor” estratégia do ponto de vista de E_{av} , D_{av} , T_L e F_L	287
Figura 6.32: $\log(E_{av})$ vs. (L_o, H_o) , aplicando as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F às juntas do robô quando se adopta a estratégia APCP, com $X_o = 2,25$ m, $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$	288

Figura 6.33: $\log(E_{av})$ vs. (L_o, H_o) , aplicando as arquiteturas de controlo PD-P e PD-P&F às juntas do robô quando se adopta a estratégia PSO, com $X_o = 2,25$ m, $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0$ ms ⁻¹	288
Figura 6.34: Diagrama de blocos adoptado para o cálculo das funções de transferência $G_{xj}(s)$ e $G_{yj}(s)$, $j = 1, 2$	290
Figura 6.35: Funções de Transferência $G_{xj}(\omega)$ e $G_{yj}(\omega)$, $j = 1, 2$, para $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $H_B = 0,9$ m, $F_C = 0,1$ m, $V_F = 1$ ms ⁻¹ , PLO.....	292
Figura 6.36: Gráficos de α_{xj} e α_{yj} vs. β para as Funções de Transferência $G_{xj}(s)$ e $G_{yj}(s)$, $j = 1, 2$	293
Figura 6.37: Gráficos de α_{xj} e α_{yj} vs. K_{multi} para as Funções de Transferência $G_{xj}(s)$ e $G_{yj}(s)$, $j = 1, 2$	293
Figura 6.38: Gráficos de α_{xj} e α_{yj} vs. V_F para as Funções de Transferência $G_{xj}(s)$ e $G_{yj}(s)$, $j = 1, 2$	294
Figura 6.39: Funções de Transferência $G_{xj}(\omega)$ e $G_{yj}(\omega)$, $j = 1, 2$, para $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $H_B = 0,9$ m, $F_C = 0,1$ m, $V_F = 1$ ms ⁻¹ , PLO.....	294
Figura 6.40: Gráficos de α_{xj} e α_{yj} vs. β para as Funções de Transferência $G_{xj}(s)$ e $G_{yj}(s)$, $j = 1, 2$	295
Figura 6.41: Gráficos de α_{xj} e α_{yj} vs. K_{multi} para as Funções de Transferência $G_{xj}(s)$ e $G_{yj}(s)$, $j = 1, 2$	295
Figura 6.42: Gráficos de α_{xj} e α_{yj} vs. V_F para as Funções de Transferência $G_{xj}(s)$ e $G_{yj}(s)$, $j = 1, 2$	295
Figura C.1: Sistema de coordenadas e variáveis que caracterizam as dimensões das pernas de um robô hexápode com dois gdl por perna.....	350
Figura D.1: Sistema de coordenadas e variáveis que caracterizam as dimensões das pernas de um robô hexápode com três gdl por perna.....	356
Figura E.1: Modelo massa-mola-amortecedor da interacção pé-solo.	368
Figura E.2: Evolução temporal da coordenada do pé $y_{1F}(t)$ e da força de reacção do solo $f_{1yF}(t)$ para o caso do modelo cinemático linear de interacção pé-solo, considerando o solo de argila compacta.....	376
Figura E.3: Evolução temporal da coordenada do pé $y_{1F}(t)$ e da força de reacção do solo $f_{1yF}(t)$ para o caso do modelo cinemático não linear de interacção pé-solo, considerando o solo de argila compacta.....	377
Figura E.4: Evolução temporal da coordenada do pé $y_{1F}(t)$ e da força de reacção do solo $f_{1yF}(t)$ para o caso do modelo dinâmico linear de interacção pé-solo, considerando o solo de argila compacta.....	378
Figura F.1: Dimensões do ser humano – segmentos expressos como fracção da altura total, L (Winter, 1990).....	386

Índice de Tabelas

Tabela 3.1: Parâmetros do modelo do corpo do robô	86
Tabela 3.2: Parâmetros do modelo do solo, no caso deste ser considerado de argila compacta	92
Tabela 4.1: Parâmetros do Sistema	122
Tabela 5.1: Parâmetros do Sistema	182
Tabela 5.2: Parâmetros do controlador para $G_{c1}(s)$ e G_{c2} quando se estabelece um compromisso entre a minimização de E_{av} e ε_{xyH} , para cada controlador	186
Tabela 5.3: Parâmetros do controlador para $G_{c1}(s)$ e G_{c2} quando se estabelece um compromisso entre a minimização de E_{av} e ε_{xyH} , para ambos os controladores	187
Tabela 5.4: Coeficientes da aproximação de Padé para $\alpha_j = \{0,5; 0,7; 0,8; 0,9\}$	203
Tabela 5.5: Parâmetros do controlador $G_{c1}(s)$, quando se estabelece um compromisso entre a minimização de E_{av} e ε_{xyH} , com $G_{c2}(s) = 0,9$	205
Tabela 5.6: Parâmetros base para o modelo considerando atrito não linear nas juntas	208
Tabela 5.7: Parâmetros base para o modelo considerando atrito nos actuadores e flexibilidade nas transmissões das juntas	210
Tabela 5.8: Parâmetros base para o modelo considerando atrito nos actuadores e atrito, folga e flexibilidade nas transmissões das juntas	211
Tabela 5.9: Parâmetros do controlador $G_{c1}(s)$ quando se estabelece um compromisso entre a minimização de E_{av} e ε_{xyH} para $G_{c2}(s) = 0,9$	224
Tabela 5.10: Parâmetros do controlador $G_{c1}(s)$ quando se estabelece um compromisso entre a minimização de E_{av} e ε_{xyH} para $G_{c2}(s) = 0,9$, no caso da junta do tornozelo ser actuada de forma passiva	228
Tabela 5.11: Parâmetros do controlador $G_{c1}(s)$ quando se estabelece um compromisso entre a minimização de E_{av} e ε_{xyH} para $G_{c2}(s) = 0,9$, no caso da junta do tornozelo ser actuada de forma activa	228
Tabela 6.1: Parâmetros do sistema	260
Tabela 6.2: Parâmetros do controlador para o caso do robô hexápode	260
Tabela 6.3: Parâmetros do controlador para o caso do robô quadrúpede	265
Tabela 6.4: Parâmetros do controlador do robô quadrúpede quando este se encontra sintonizado para os diferentes padrões de locomoção dos animais quadrúpedes	271
Tabela 6.5: Parâmetros do controlador para $G_{c1}(s)$, com $G_{c2}(s) = 0,9$	291
Tabela A.1: Transição entre padrões de locomoção de animais bípedes e quadrúpedes (Alexander, 1984)	320
Tabela A.2: Padrões de locomoção dos quadrúpedes a baixa velocidade (Alexander, 1984; HTTP#1)	322

Tabela A.3: Padrões de locomoção dos quadrúpedes a média velocidade (Alexander, 1984; HTTP#1).....	323
Tabela A.4: Padrões de locomoção dos quadrúpedes a elevada velocidade (Alexander, 1984; HTTP#1).	324
Tabela A.5: Padrões de locomoção dos hexápodes a diferentes velocidades (Collins e Stewart, 1993; Dutra e Mello, 2001).....	326
Tabela E.1: Módulo de Young de diferentes tipos de solo.....	371
Tabela E.2: Parâmetros do modelo do solo para diferentes tipos de solo.	372
Tabela F.1: Dados antropométricos do ser humano (Winter, 1990).....	387
Tabela F.2: Dados antropométricos dos seres vivos, utilizados na simulação (Fedak, <i>et al.</i> , 1982; Pfeiffer, <i>et al.</i> , 1995; Kram, <i>et al.</i> , 1997).	388

Tabela de Acrónimos

APCP	Altura do Pé ao solo e Comprimento do Passo
ASV	<i>Adaptive Suspension Vehicle</i>
CC	Corrente Contínua
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CMU	<i>Carnegie Mellon University</i>
CWRU	<i>Case Western Reserve University</i>
FT	Função de Transferência
GCP	Gerador Central de Padrões
gdl	Grau(s) de liberdade
IGU	Interface Gráfico com o Utilizador
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MF	Margem de Fase
OP	Sobreealongação percentual máxima (<i>Overshoot</i> Percentual)
P	Proporcional
PD	Proporcional e Derivativo
PD-P	Proporcional e Derivativo com realimentação de Posição
PD-P&F	Proporcional e Derivativo com realimentação de Posição e da Força de contacto do pé do robô com o solo
PD-P&Fv	Proporcional e Derivativo com realimentação de Posição e da Força de contacto do pé do robô com o solo e ganhos Variáveis na malha directa
PI	Proporcional e Integral
PID	Proporcional, Integral e Derivativo

PLFICC	Padrão de Locomoção de Fase Igual e Ciclo Completo
PLFICCI	Padrão de Locomoção de Fase Igual e Ciclo Completo Inverso
PLFIMC	Padrão de Locomoção de Fase Igual e Meio Ciclo
PLFIMCI	Padrão de Locomoção de Fase Igual e Meio Ciclo Inverso
PLO	Padrão de Locomoção Ondulatório
PLOI	Padrão de Locomoção Ondulatório Inverso
PSO	Pé Sobre o Obstáculo
TUM	<i>Technische Universität München</i> (Universidade Técnica de Munique)
WWL	<i>Wheel-With-Legs</i>
ZMP	<i>Zero Moment Point</i>

Simbologia

α	Ordem fraccionária
β	Factor de ocupação
Γ	Vector $(m+2) \times 1$ das forças/binários na perna i ($\Gamma = [f_{ix}, f_{iy}, \tau_{i1}, \tau_{i2}, \tau_{i3}]^T$)
Γ_a	Vector $m \times 1$ dos binários de atrito ($\Gamma_a = [\tau_{i1a}, \tau_{i2a}]^T$)
Γ_{ae}	Vector $m \times 1$ dos binários de atrito estático ($\Gamma_{ae} = [\tau_{i1ae}, \tau_{i2ae}]^T$)
Γ_{ac}	Vector $m \times 1$ dos binários de atrito de Coulomb ($\Gamma_{ac} = [\tau_{i1ac}, \tau_{i2ac}]^T$)
Γ_C	Vector $m \times 1$ dos binários pedidos pelos controladores das juntas ($\Gamma_C = [\tau_{i1C}, \tau_{i2C}]^T$)
Γ_m	Vector $m \times 1$ dos binários dos motores ($\Gamma_m = [\tau_{i1m}, \tau_{i2m}]^T$)
γ	Ângulo de rotação das trajectórias planeadas do pé, durante a fase de transferência, quando é adoptada a estratégia de transposição de obstáculos PSO
Δ_{ij}	Erro entre as trajectórias planeadas e reais na junta j da perna i
Δ_{iyFMax}	Máxima profundidade a que o pé i penetra no solo
$\Delta_{i\eta F}$	Erro de seguimento da trajectória do pé i segundo a direcção η
$\Delta_{i\eta F0}$	Diferença entre as coordenadas actuais do pé i e as coordenadas de colocação do pé i no solo, segundo a direcção η
$\Delta_{i\eta H}$	Erro de seguimento da trajectória da anca i segundo a direcção η
$\Delta_{i'\eta H}$	Diferença entre as trajectórias da anca i e da anca adjacente i' segundo a direcção η
δp	Vector 2×1 das trajectórias cartesianas planeadas do i -ésimo pé perturbadas com ruído branco ($\delta p = [\delta x_{id}, \delta y_{id}]^T$)
$\delta \Gamma_C$	Vector $m \times 1$ dos binários solicitados pelo controlador perturbados com ruído branco ($\delta \Gamma_C = [\delta \tau_{i1C}, \delta \tau_{i2C}]^T$)

$\delta\Theta_d$	Vector $m \times 1$ das trajectórias planeadas nas juntas da i -ésima perna perturbadas com ruído branco ($\delta\Theta_d = [\delta\theta_{i1d}, \delta\theta_{i2d}]^T$)
$\delta\tau_{ijC}$	Binários solicitados na junta j resultantes das perturbações nas trajectórias dos pés da perna i
$\delta\eta_{1F}$	Perturbações resultantes nas trajectórias dos pés da perna 1 segundo a direcção η
ε	Coefficiente de restituição
ε_{ij}	Coefficiente de restituição das colisões na engrenagem da transmissão da junta j da perna i
ε_{xyF}	Índice de desempenho erro quadrático médio de seguimento da trajectória do pé
ε_{xyH}	Índice de desempenho erro quadrático médio de seguimento da trajectória da anca
η	Representa uma das direcções no espaço cartesiano ($\eta = \{x, y\} = \{\text{horizontal, vertical}\}$)
Θ	Vector $(m+2) \times 1$ das coordenadas de posição ($\Theta = [x_{iH}, y_{iH}, \theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}]^T$)
$\dot{\Theta}_{ac}$	Vector $m \times 1$ das velocidades limite do atrito estático ($\dot{\Theta}_{ac} = [\dot{\theta}_{i1ae}, \dot{\theta}_{i2ae}]^T$)
Θ_d	Vector $m \times 1$ das trajectórias pretendidas para as juntas das pernas ($\Theta_d = [\theta_{i1d}, \theta_{i2d}, \theta_{i3d}]^T$)
Θ_m	Vector $m \times 1$ das coordenadas de posição dos motores ($\Theta_m = [\theta_{i1m}, \theta_{i2m}]^T$)
Θ'_m	Vector $m \times 1$ das coordenadas de posição dos motores no instante imediatamente após o impacto ($\Theta'_m = [\theta'_{i1m}, \theta'_{i2m}]^T$)
Θ_T	Vector $m \times 1$ das coordenadas de posição da transmissão ($\Theta_T = [\theta_{i1T}, \theta_{i2T}]^T$)
Θ'_T	Vector $m \times 1$ das coordenadas de posição da transmissão no instante imediatamente após o impacto ($\Theta'_T = [\theta'_{i1T}, \theta'_{i2T}]^T$)
θ_{i3hd}	Ângulo pretendido do pé com a horizontal
θ_{ij}	Coordenada da junta j da perna i
θ_{ijd}	Trajectória pretendida para a junta j da perna i
μ	Coefficiente de atrito
μ_d	Coefficiente de atrito dinâmico

μ_S	Coeficiente de atrito estático
ξ_x	Índice de desempenho da análise face a perturbações segundo a direcção x
ξ_y	Índice de desempenho da análise face a perturbações segundo a direcção y
ρ	Resistência específica
τ_{ijC}	Binário pedido pelo controlador da junta j da perna i
τ_{ij}	Binário na junta j da perna i
τ_{ijMax}	Binário máximo que o actuador da junta j da perna i pode fornecer
τ_{ijm}	Binário efectivo do motor da junta j da perna i
τ_P	Índice de desempenho pico de binário no robô solicitado pelo controlador
ϕ_i	Fase da perna i
Ψ	Cinemática directa
Ψ^{-1}	Cinemática inversa
ω	Frequência angular
B	Coeficiente de atrito viscoso
\mathbf{B}_{av}	Vector $m \times 1$ dos coeficientes de atrito viscoso ($\mathbf{B}_{av} = [B_{i1av}, B_{i2av}]^T$)
\mathbf{B}_m	Matriz diagonal $m \times m$ dos coeficientes de atrito viscoso dos motores ($\mathbf{B}_m = [B_{i1m}, 0; 0, B_{i2m}]^T$)
\mathbf{B}_T	Matriz diagonal $m \times m$ dos coeficientes de atrito viscoso das transmissões ($\mathbf{B}_T = [B_{i1T}, 0; 0, B_{i2T}]^T$)
B_{ijm}	Coeficiente de atrito viscoso do motor da junta j da perna i
B_{ijT}	Coeficiente de atrito viscoso da transmissão da junta j da perna i
$B_{\eta F}$	Coeficiente de atrito viscoso do solo, no modelo linear, segundo a direcção η
$B'_{\eta F}$	Coeficiente de atrito viscoso do solo, no modelo não linear, segundo a direcção η
$B_{\eta H}$	Coeficiente de atrito viscoso do corpo do robô, segundo a direcção η

B_3	Coefficiente de atrito viscoso do sistema mecânico de actuação da junta 3
\mathbf{c}	Vector $(m+2) \times 1$ das forças/binários centrífugos/Coriolis ($\mathbf{c} = [f_{ixCC}, f_{iyCC}, \tau_{1CC}, \tau_{2CC}, \tau_{3CC}]^T$)
D_{av}	Índice de desempenho densidade de dispersão da potência média
d	Distância percorrida pelo robô
E	Consumo total de energia eléctrica
E_{av}	Índice de desempenho densidade de energia absoluta média
E_C	Energia cinética
E_B	Distância entre o centro da elipsóide e a sua intersecção com a tangente à trajectória desejada do corpo
E_F	Distância entre o centro da elipsóide e a sua intersecção com a tangente à trajectória desejada do pé
E_P	Energia potencial
$F\{\}$	Operador da Transformada de Fourier
$f()$	Parte fraccionária de um número real
F_C	Máxima altura da trajectória do pé ao solo
F_{Cp}	Máxima altura da trajectória do pé ao solo no passo p
$f_{i\eta}$	Força na anca da perna i , segundo a direcção η
$f_{i\eta H}$	Força intra-segmentos na anca da perna i , segundo a direcção η
$f_{i\eta F}$	Força de reacção do solo no pé i , segundo a direcção η
F_L	Índice de desempenho força média na interface corpo-pernas
$\mathbf{F}_{\mathbf{RF}}$	Vector 2×1 das forças de reacção que o solo exerce sobre os pés ($\mathbf{F}_{\mathbf{RF}} = [f_{ixF}, f_{iyF}]^T$)
$\mathbf{F}_{\mathbf{RH}}$	Vector $(m+2) \times 1$ das forças intra-segmentos do corpo ($\mathbf{F}_{\mathbf{RH}} = [f_{ixH}, f_{iyH}, 0, 0, 0]^T$)
f_{sc}	Frequência de amostragem do algoritmo de controlo em tempo discreto
f_{sr}	Frequência de amostragem da dinâmica do robô e do ambiente
g	Aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$)

g	Vector $(m+2) \times 1$ das forças/binários gravitacionais ($\mathbf{g} = [f_{ixG}, f_{iyG}, \tau_{i1G}, \tau_{i2G}, \tau_{i3G}]^T$)
G_{xi}	Função de transferência entre as trajectórias dos pés da perna 1 segundo a direcção x e os correspondentes binários solicitados na junta i da mesma perna
G_{yi}	Função de transferência entre as trajectórias dos pés da perna 1 segundo a direcção y e os correspondentes binários solicitados na junta i da mesma perna
H	Matriz $(m+2) \times (m+2)$ das inércias ($\mathbf{H} = [j_{i11}, j_{i12}, j_{i13}, j_{i14}, j_{i15}; j_{i21}, j_{i22}, j_{i23}, j_{i24}, j_{i25}; j_{i31}, j_{i32}, j_{i33}, j_{i34}, j_{i35}; j_{i41}, j_{i42}, j_{i43}, j_{i44}, j_{i45}; j_{i51}, j_{i52}, j_{i53}, j_{i54}, j_{i55}]^T$)
H_B	Altura do corpo ao solo
H_o	Altura do obstáculo
h_{ij}	Abertura da folga da transmissão da junta j da perna i
i	Índice referente à perna do robô (<i>i.e.</i> , $i = \{1, 2, 3, \dots, n\}$)
i'	Perna adjacente à perna i
J	Jacobiano $\mathbf{J} = \partial\boldsymbol{\psi}/\partial\boldsymbol{\Theta}$ ($2 \times (m+2)$)
\mathbf{J}_F^T	Matriz transposta $(m+2) \times 2$ da matriz do Jacobiano
j	Índice referente à junta das pernas do robô (<i>i.e.</i> , $j = \{1, 2, 3\} \equiv \{\text{anca, joelho, tornozelo}\}$)
J_m	Matriz diagonal $m \times m$ das inércias dos motores ($\mathbf{J}_m = [J_{i1m}, 0; 0, J_{i2m}]^T$)
J_T	Matriz diagonal $m \times m$ das inércias das transmissões ($\mathbf{J}_T = [J_{i1T}, 0; 0, J_{i2T}]^T$)
J_{ij}	Inércia do elo j da perna i
J_{ijm}	Inércia do motor da junta j da perna i
J_{ijT}	Inércia da transmissão da junta j da perna i
K	Coefficiente de elasticidade
$K\alpha_j$	Ganho derivativo do controlador fraccionário da junta j
Kd_j	Ganho derivativo do controlador da junta j
K_{mult}	Factor multiplicativo
Kp_j	Ganho proporcional do controlador da junta j

Kp_{jhigh}	Nível alto do ganho proporcional do controlador da junta j
Kp_{jlow}	Nível baixo do ganho proporcional do controlador da junta j
\mathbf{K}_T	Matriz diagonal $m \times m$ dos coeficientes de elasticidade dos motores e das transmissões ($\mathbf{K}_T = [K_{i1T}, 0; 0, K_{i2T}]^T$)
K_{ijT}	Coefficiente de elasticidade da transmissão da junta j da perna i
$K_{\eta F}$	Coefficiente de elasticidade do solo, segundo a direcção η
$K_{\eta H}$	Coefficiente de elasticidade do corpo do robô, segundo a direcção η
K_3	Coefficiente de elasticidade do sistema mecânico de actuação da junta 3
L	Lagrangeano
L_B	Índice de desempenho da locomobilidade do corpo
L_F	Índice de desempenho da locomobilidade do pé
L_{ij}	Comprimento do elo j da perna i
L_o	Largura do obstáculo
L_S	Comprimento do passo
$L_{SMáx}$	Comprimento máximo do passo
L_{Sp}	Comprimento do passo p
L_{it}	Comprimento total da perna i
m	Número de juntas das pernas do robô
M	Massa de um veículo ou animal
M_b	Massa do corpo do robô
M_{ij}	Massa do elo j da perna i
M_{if}	Massa do pé da perna i
M_{Lit}	Massa total da perna i
M_{Rt}	Massa total do robô
n	Número de pernas do robô

N_S	Número total de passos do robô
N_s	Número total de amostras
O_i	Desvio da trajetória do pé i relativamente à anca i
P	Potência máxima do veículo
P_0	Densidade de potência absoluta média
P_i	Potência mecânica absoluta instantânea na perna i
P_t	Potência mecânica absoluta instantânea total
p	Número de ordem do passo do robô
\mathbf{p}_{Ad}	Vector 2×1 das trajetórias cartesianas pretendidas dos tornozelos ($\mathbf{p}_{Ad} = [x_{iAd}, y_{iAd}]^T$)
\mathbf{p}_d	Vector 2×1 das trajetórias cartesianas pretendidas dos pés relativamente às ancas ($\mathbf{p}_d = [x_{id}, y_{id}]^T$)
\mathbf{p}_F	Vector 2×1 das trajetórias cartesianas dos pés ($\mathbf{p}_F = [x_{iF}, y_{iF}]^T$)
\mathbf{p}_{Fd}	Vector 2×1 das trajetórias cartesianas pretendidas dos pés ($\mathbf{p}_{Fd} = [x_{iFd}, y_{iFd}]^T$)
\mathbf{p}'_{Fd}	Vector 2×1 das trajetórias cartesianas pretendidas dos pés quando é adoptada a estratégia de transposição de obstáculos PSO ($\mathbf{p}'_{Fd} = [x'_{iFd}, y'_{iFd}]^T$)
\mathbf{p}_{Hd}	Vector 2×1 das trajetórias cartesianas pretendidas das ancas ($\mathbf{p}_{Hd} = [x_{iHd}, y_{iHd}]^T$)
\mathbf{p}_{Kd}	Vector 2×1 das trajetórias cartesianas pretendidas dos joelhos ($\mathbf{p}_{Kd} = [x_{iKd}, y_{iKd}]^T$)
S_p	Distância entre ancas de pernas sucessivas do mesmo lado do corpo
T	Tempo de ciclo
T_L	Índice de desempenho densidade de potência perdida
t	Tempo
t_s	Tempo de suporte do pé
t_T	Tempo de transferência do pé
u	Número total de segmentos adjacentes à perna i
v	Parâmetro dependente das características do solo

V_F	Velocidade do corpo
V_{max}	Velocidade máxima
x_{iAd}	Trajectórias cartesianas pretendidas dos tornozelos segundo a direcção x
x_{iF}	Coordenada do pé i , segundo a direcção x
x_{iF0}	Coordenada de colocação do pé i no solo, segundo a direcção x
x_{iFd}	Trajectórias cartesianas pretendidas dos pés segundo a direcção x
\dot{x}_{iFn}	Velocidade pretendida do pé i , segundo a direcção x , perturbada com ruído
x_{iHd}	Trajectórias cartesianas pretendidas das ancas segundo a direcção x
x_{iKd}	Trajectórias cartesianas pretendidas dos joelhos segundo a direcção x
X_o	Posição do obstáculo ao longo do eixo x
y_{iAd}	Trajectórias cartesianas pretendidas dos tornozelos segundo a direcção y
y_{iF}	Trajectórias cartesianas do pé segundo a direcção y
y_{iF}	Coordenada do pé i , segundo a direcção y
y_{iF0}	Coordenada de colocação do pé i no solo, segundo a direcção y
y_{iFd}	Trajectórias cartesianas pretendidas dos pés segundo a direcção y
\dot{y}_{iFn}	Velocidade pretendida do pé i , segundo a direcção y , perturbada com ruído
y_{iHd}	Trajectórias cartesianas pretendidas das ancas, segundo a direcção y
y_{iKd}	Trajectórias cartesianas pretendidas dos joelhos, segundo a direcção y

Glossário

Acontecimento num padrão de locomoção: colocação ou levantamento de um pé no solo durante a locomoção.

Andar: um padrão de locomoção é distinguido como andar quando o factor de ocupação de todas as pernas é superior a metade do período do padrão de locomoção. Isto indica que há intervalos de tempo, chamados fases de duplo suporte, em que ambas as pernas de um par se encontram no solo (na fase de suporte).

Centro de pressão: projecção do centro de gravidade sobre o plano do polígono de apoio segundo a direcção da força resultante que actua sobre o dito ponto.

Ciclo de locomoção: sequência de movimentos de pernas e corpo que se repete periodicamente.

Corrida: um padrão de locomoção é distinguido como corrida quando pares de pernas apresentam factores de ocupação inferiores a metade do período do padrão de locomoção. Isto indica que há intervalos de tempo, chamados fases de voo ou balísticas, em que ambas as pernas de um par se encontram fora do solo (na fase de transferência).

Distância entre pernas: distância entre as ancas de duas pernas adjacentes do mesmo lado do corpo.

Estabilidade dinâmica: um robô com locomoção por pernas é dinamicamente estável se o momento causado pela resultante das forças e binários, aplicados sobre o centro de gravidade do robô em torno dos limites do polígono de apoio, é positivo, tomando-se como sentido positivo do vector unitário do eixo de rotação o que percorre o polígono de apoio no sentido horário.

Estabilidade estática: um robô com locomoção por pernas é estaticamente estável num instante de tempo t se, ao manter fixas todas as posições dos seus pés e, simultaneamente, reduzir a zero as velocidades de translação e rotação do sólido rígido resultante, todos os pés que estavam em contacto com o plano de apoio permanecem em contacto com o dito plano.

Factor de ocupação, β : o factor de ocupação de uma perna é a fracção temporal do tempo de ciclo T do padrão de locomoção durante o qual esta se encontra na fase de suporte:
 $\beta = \text{Duração da Fase de Suporte da Perna } i / \text{Tempo de Ciclo da Perna } i$

Fase da perna, ϕ_i : fracção do ciclo temporal, correspondente ao atraso entre o contacto da perna 1 com o solo e o contacto da perna i com o solo.

Fase de suporte ou de apoio: fracção do tempo de ciclo de locomoção, decorrido desde o apoio de um pé do robô até ao seu levantamento, ou seja o período de tempo durante o qual o pé do robô se encontra em contacto com o solo, a suportar o corpo e a empurrá-lo para a frente.

Fase de transferência ou de recuperação: fracção de tempo do ciclo de locomoção, decorrido desde o levantamento de um pé até ao seu apoio, ou seja o período de tempo durante o qual o pé do robô não se encontra em contacto com o solo, mas sim a deslocar-se para a frente para o local do próximo apoio.

Margem de estabilidade: amplitude que quantifica o grau de estabilidade do robô.

Margem de estabilidade dinâmica: o menor dos momentos em torno dos limites do polígono de apoio devido às forças e momentos resultantes que actuam sobre o centro de gravidade do robô, normalizado em relação ao peso do robô.

Margem de estabilidade energética: mínima energia necessária para tombar o robô em torno dos diferentes eixos formados por dois apoios consecutivos sobre o terreno.

Margem de estabilidade estática: a menor das distâncias da projecção vertical do centro de gravidade da máquina aos vértices do polígono de apoio.

Método da projecção do centro de gravidade: um robô de locomoção está num estado estaticamente estável se a projecção horizontal do seu centro de gravidade se encontra dentro do polígono de apoio.

Numeração das pernas: no caso de omissão do índice de qualquer das n pernas (n par), deverá subentender-se a numeração 1, 3, 5, ..., $n - 1$ (*i.e.*, pernas ímpares) do lado esquerdo, e 2, 4, 6, ..., n (*i.e.*, pernas pares) do lado direito, bem como da frente para trás.

Padrão de locomoção: sequência de movimentos dos membros e do corpo de um robô que ocorrem durante um ciclo de locomoção.

Padrão de locomoção de fase igual e ciclo completo: neste padrão de locomoção os acontecimentos de colocação dos pés do veículo de um dos lados do robô estão igualmente distribuídos ao longo de um ciclo completo de locomoção.

Padrão de locomoção de fase igual e meio ciclo: neste padrão de locomoção os acontecimentos de colocação dos pés do veículo de um dos lados do robô estão igualmente distribuídos ao longo de um meio ciclo de locomoção. Devido à simetria do padrão de locomoção, os acontecimentos de colocação dos pés do veículo do outro lado do robô estão distribuídos ao longo da outra metade do ciclo de locomoção.

Padrões de locomoção de fase igual: estes padrões de locomoção distribuem igualmente os acontecimentos de colocação e levantamento dos pés do veículo ao longo de meio, ou um, ciclo de locomoção. Desta forma, as flutuações no consumo energético são minimizadas.

Padrão de locomoção livre: um padrão de locomoção é dito livre se qualquer uma das pernas que não é necessária para suportar o corpo do robô se pode mover em qualquer instante. Os padrões de locomoção livres são aperiódicos, irregulares e pouco comuns nos animais.

Padrão de locomoção ondulatório: um padrão de locomoção é ondulatório se o início da fase de transferência progride sequencialmente ao longo do corpo – a fase de transferência de uma perna inicia-se imediatamente após uma perna adjacente vizinha, mas antes das outras. Esta onda pode-se propagar de trás para a frente ou da frente para trás do corpo do robô, sendo que neste último caso se costuma designar por padrão de locomoção ondulatório inverso. Estes padrões de locomoção maximizam a margem de estabilidade.

Padrões de locomoção directos: nestes padrões de locomoção, a sequência dos acontecimentos de colocação dos pés de cada lado do corpo do veículo inicia-se na perna traseira e avança em direcção à perna da frente.

Padrões de locomoção inversos: nestes padrões de locomoção, a sequência dos acontecimentos de colocação dos pés de cada lado do corpo do veículo inicia-se na perna da frente e avança em direcção à perna se trás.

Padrão de locomoção singular: um padrão de locomoção diz-se singular se duas ou mais pernas iniciam a sua fase de suporte ou a sua fase de transferência simultaneamente.

Padrão de locomoção periódico: um padrão de locomoção é periódico se a fase de suporte de cada perna tem a mesma duração temporal e se cada uma das pernas, durante o seu curso, passar pelos mesmos estados, a intervalos regulares de um período. Caso contrário, o padrão de locomoção diz-se não periódico.

Padrão de locomoção regular: um padrão de locomoção é regular se todas as pernas apresentam o mesmo factor de ocupação.

Padrão de locomoção seguidor-do-líder: o seguidor-do-líder descreve um padrão de locomoção no qual as pernas que não da frente se colocam nas pegadas deixadas vagas pelas pernas da frente. Um exemplo deste padrão de locomoção é usado pelas centopeias.

Padrão de locomoção simétrico: um padrão de locomoção é dito simétrico se o movimento de um par de pernas (direita – esquerda) estiver desfasado exactamente meio período.

Padrão singular: se, durante um ciclo de locomoção, ocorrerem dois ou mais acontecimentos simultâneos.

Passo: um passo é o ciclo de movimento de uma perna individual, partindo de uma posição de referência (geralmente o início da fase de transferência) e passando pela fase de suporte até atingir novamente a posição de referência.

Plano do corpo: plano definido pelos eixos longitudinal e transversal da máquina.

Plano sagital: refere-se ao plano médio do corpo do robô – o plano definido pelo eixo longitudinal do robô e que divide o corpo em duas partes, geralmente simétricas, o lado esquerdo e o lado direito.

Polígono de apoio ou de suporte: polígono convexo formado pela união dos pontos de apoio do robô (pés cujas pernas se encontram na fase de suporte).

Postura do robô: uma postura é uma qualquer configuração específica das juntas do robô de locomoção – um ponto no espaço de configuração das juntas. É uma descrição dos actuadores num sistema de coordenadas interno de referência, por exemplo a posição cartesiana de todas as pernas relativamente ao corpo.

Suporte: é a acção de manter o pé em contacto com o solo e suportar peso.

Tempo de ciclo, T : tempo necessário para completar um ciclo completo de locomoção do robô num padrão de locomoção periódico – cada perna do robô retorna à mesma posição relativa.

Tripé: um tripé é um grupo de três pernas.

Capítulo 1

Introdução

A variedade de animais que se deslocam utilizando pernas é imensa e as suas capacidades de locomoção, quer em terrenos distintos quer em diferentes condições, são fascinantes. Por exemplo, as cabras montesas movem-se sobre encostas rochosas íngremes, os camelos deslocam-se a passo através de areias escaldantes e, na maioria das vezes, soltas, as gazelas saltam e transpõem obstáculos de grandes dimensões e as lagostas e caranguejos deslocam-se no fundo marinho e na zona de rebentação sem serem arrastados pela força das ondas. Os elefantes, com um peso de várias toneladas, andam lentamente através de selvas densas carregando simultaneamente enormes cargas enquanto as formigas, com um peso de gramas, conseguem deslocar cargas muito superiores ao seu peso. Já as aranhas trepam pelas paredes e movem-se perfeitamente nos tectos e as salamandras são capazes de subir superfícies perfeitamente polidas. Não podem esquecer-se ainda as baratas, virtualmente indestrutíveis, que exploram a totalidade do planeta.

Nesta ordem de ideias, poder-se-á colocar a questão de saber se os robôs alguma vez irão conseguir a destreza dos animais. É possível que sim, mas certamente que o farão recorrendo a pernas para se deslocarem e não rolando sobre rodas. Uma parte substancial do planeta Terra é inacessível a todo e qualquer tipo de mecanismo com rodas – os obstáculos naturais, tais como rochas de grandes dimensões, solo solto, ravinas profundas e encostas íngremes conspiram para tornar a locomoção por rolamento ineficaz. Mais de metade da superfície da terra revela-se, assim, impossível de ser atravessada por veículos com rodas ou lagartas. O mesmo acontece no fundo marinho, na Lua e na superfície de outros planetas.

Em muitos destes terrenos naturais, como se viu pelo exemplo dos animais, as pernas são perfeitamente adequadas. Elas permitem evitar obstáculos de pequenas dimensões, efectuando pontos de contacto com o solo discretos e evitando pegadas em locais indesejados. Os mecanismos com pernas podem trepar obstáculos, passar sobre valas e transpor descontinuidades do terreno de dimensão comparável à dimensão do corpo do mecanismo. Estes sistemas variam activamente a altura ao solo, introduzindo um efeito de amortecimento e de desacoplamento entre as irregularidades do terreno e o corpo do robô, o que minimiza o consumo energético, maximiza a estabilidade e torna possível subir e descer encostas com uma inclinação significativa. Os animais fazem isto todos os dias, mas para que seja possível seguir os seus trilhos, os robôs necessitam de pernas. No entanto, existem muitos problemas que necessitam de ser resolvidos até que os robôs atinjam desempenhos comparáveis aos dos animais.

1.1 Limitações e Dificuldades de Implementação de Sistemas Artificiais de Locomoção

Apesar de já se encontrarem em estudo há bastantes anos, os sistemas artificiais de locomoção desenvolvidos até esta data demonstram mobilidade limitada em condições controladas e, de facto, nenhum deles exhibe capacidades que se aproximem das reveladas pelos sistemas biológicos. As razões para esta lenta evolução provêm essencialmente da complexidade do controlo das pernas e da sua coordenação, do limitado conhecimento dos padrões de locomoção e da falta de actuadores e estruturas mecânicas eficientes.

1.1.1 Comparação Entre os Sistemas Artificiais e os Sistemas Biológicos

Quando se comparam os sistemas artificiais de locomoção com pernas, desenvolvidos até ao presente, com os equivalentes sistemas biológicos verifica-se que os primeiros são consideravelmente menos elegantes e menos eficientes, particularmente em terrenos irregulares. Esta situação resulta de vários factores:

- os membros dos animais apresentam um espaço de trabalho superior e algum grau de redundância o que lhes confere uma agilidade superior, permitindo-lhes trepar ou evitar obstáculos que se encontrem muito mais altos do que eles próprios e recuperar a estabilidade quando esta é eventualmente perdida devido à modificação das condições e propriedades do solo;

-
- os membros dos animais possuem sensores tácteis distribuídos, que são utilizados de forma eficiente para evitar obstáculos, seleccionar o local para colocar os pés e adaptar o padrão de locomoção ao terreno (Kaliyamoorthy, *et al.*, 2003);
 - os animais dispõem de um maior número de padrões de locomoção disponíveis e adoptam uma transição contínua entre eles. Os padrões de locomoção dinâmicos oferecem possibilidades ainda maiores no que concerne à recuperação do equilíbrio, à utilização de velocidades elevadas e à transposição de obstáculos (Raibert, 1986);
 - os animais usam uma combinação de previsão do terreno e informação táctil para o controlo do padrão de locomoção.

Nesta ordem de ideias, de seguida analisam-se as principais questões que condicionam o desempenho dos sistemas artificiais de locomoção, e que se encontram actualmente em desenvolvimento. Estas questões podem ser divididas em duas grandes áreas: o projecto e o controlo.

1.1.2 Projecto

Relativamente ao projecto de robôs com pernas existem múltiplas opções que devem ser consideradas. Assim, são de referir o volume de trabalho pretendido para as pernas e a sua eficiência energética, a simplicidade da estrutura, para uma boa fiabilidade mecânica, e a capacidade de vencer grandes obstáculos.

Ao nível da estrutura mecânica do robô deve procurar esclarecer-se qual o número óptimo de pernas. Por um lado, este número deve ser o mais pequeno possível, para diminuir o número de actuadores necessários e o peso do veículo. Por outro lado, desde que os pés não disponham de uma grande área de contacto com o solo, são necessárias pelo menos quatro pernas para o veículo efectuar a locomoção mantendo a estabilidade estática. Este tipo de locomoção é necessário para tarefas que exijam locomoção lenta mas suave, tais como tarefas de inspecção e transporte de cargas pesadas ou frágeis (Song e Waldron, 1989).

Frequentemente procura-se que cada uma das pernas apresente uma estrutura pantográfica, já que com este tipo de estrutura se conseguem movimentos desacoplados e lineares dos pés. Esta característica torna o algoritmo de controlo mais simples e implica um menor custo computacional para calcular a trajectória dos pés.

Ainda relativamente às pernas, uma outra questão relaciona-se com o tipo de actuadores que devem ser adoptados nas juntas. Os actuadores mais utilizados consistem em motores eléctricos rotacionais. No entanto, várias limitações destes actuadores têm vindo a apontar para o desenvolvimento de actuadores lineares que permitam emular o comportamento dos músculos dos seres vivos.

Já ao nível do robô, deve ser equacionado cuidadosamente quais os padrões de locomoção a adoptar pelo veículo. Verifica-se que os padrões de locomoção periódicos permitem aos veículos atingir velocidades de locomoção elevadas com um custo computacional reduzido. Todavia, estes padrões de locomoção não permitem que o robô se desloque em terrenos com irregularidades pronunciadas, perdendo desta forma uma das suas principais potencialidades. Para a locomoção neste tipo de superfícies, torna-se necessário a adopção de padrões de locomoção não periódicos, que implicam maiores custos computacionais, requerendo maiores capacidades de sensorização e acarretando, eventualmente, menores velocidades de locomoção.

1.1.3 Controlo

Ao nível do controlo existem também bastantes questões por resolver, sendo de realçar a forma como deve ser efectuada a coordenação das várias cadeias cinemáticas. Assim, os sinais de comando devem coordenar os múltiplos graus de liberdade (gdl) promovendo uma distribuição adequada das forças nas pernas e mantendo a estabilidade dinâmica.

Os robôs apresentados na subsecção 2.3.3, do Capítulo 2, representam uma classe denominada de robôs com locomoção estática. As suas estruturas são diferentes nos detalhes construtivos mas, todas elas mantêm no chão um número suficiente de pés para manter o centro de gravidade sobre a base de suporte resultante.

A resolução da questão da estabilidade dinâmica é muito importante, uma vez que velocidades elevadas só são alcançadas nessa situação. Quando um sistema se move a uma velocidade apreciável, a geometria (estabilidade estática) não é condição suficiente e a estabilidade dinâmica tem que ser considerada. Apesar de já existirem veículos que conseguem manter a estabilidade dinâmica, o problema situa-se na forma de transição entre a estabilidade estática e a estabilidade dinâmica, ao iniciar ou ao parar o movimento.

Por último, é ainda de referir a utilização de sensores, atendendo às dificuldades em reconhecer as características do terreno, o que torna difícil decidir qual a estratégia na colocação dos “pés”.

1.2 Aspectos em Estudo na Área dos Sistemas Artificiais de Locomoção

A superação das limitações descritas na secção anterior serve de base para o trabalho que tem vindo a ser desenvolvido na área da robótica de locomoção. Relativamente aos sistemas artificiais de locomoção, existem várias linhas de investigação que têm vindo a ser seguidas e que se encontram em aberto no presente. De entre estas destacam-se:

- estudos experimentais dos aspectos energéticos da locomoção e simulações computacionais que permitam conceber modelos de avaliação quer para a locomoção humana e dos animais, quer para o movimento de robôs bípedes e quadrúpedes / hexápodes estaticamente estáveis;
- estudo dos padrões de locomoção dos seres vivos e da sua evolução para vários tipos de terrenos e velocidades;
- determinação de padrões de locomoção óptimos para diferentes condições de locomoção dos sistemas artificiais;
- estudo das técnicas a adoptar para os robôs com pernas terem a capacidade de manter a estabilidade dinâmica; este estudo deverá ter por base as seguintes três questões:
 1. como é que os animais mantêm a estabilidade?
 2. qual o princípio de coordenação dos movimentos durante a locomoção?
 3. como calcular os sinais de controlo para os actuadores das pernas que permitam ao robô manter uma postura fixa, andar ou correr arbitrariamente?
- determinação de modelos matemáticos para um controlo adequado a fim de se atingirem níveis de eficiência semelhantes aos dos sistemas biológicos;
- síntese de algoritmos para determinar as forças / binários a aplicar às pernas / pés do sistema de locomoção de forma a garantir uma dada força resultante;

- estudo de novas técnicas para converter energia (nas suas diferentes formas) em movimento mecânico:
 1. mímicas dos músculos para melhorar o controlo de sistemas pneumáticos;
 2. actuadores piezoeléctricos;
 3. actuadores com efeito de forma memorizada¹;
 4. líquidos hidráulicos com propriedades electroreológicas;
- desenvolvimento de novos actuadores e sensores para a síntese de estruturas mecânicas de locomoção;
- por último, o desenvolvimento de sistemas de locomoção artificiais bípedes, quadrúpedes e hexápodes onde seja possível testar as novas teorias e aproximações desenvolvidas, assim como os novos algoritmos para implementação de padrões de locomoção estáveis, sejam estáticos, sejam dinâmicos, bem como novas arquitecturas e algoritmos para controlar os robôs durante a sua locomoção em condições variáveis.

Posto isto, poder-se-á dizer que o caminho a seguir no estudo da locomoção por pernas aponta no sentido da combinação entre o estudo dos animais e das técnicas que estes adoptam para se deslocarem e da construção de sistemas artificiais de locomoção que implementem os princípios apreendidos.

1.3 Objectivo do Trabalho

Tendo por base as ideias formuladas anteriormente, neste trabalho procura-se compreender melhor quais as estruturas e quais os parâmetros que optimizam a locomoção de um sistema robótico de locomoção multipernas.

Para este efeito formularam-se diversos índices de desempenho, quer cinemáticos, quer dinâmicos, e, tendo por base estes índices, efectuaram-se múltiplas experiências de simulação computacional como forma de compreender como variam os índices propostos com os parâmetros adoptados para a locomoção.

¹ Tradução do termo anglo-saxónico *memory shape alloys*.

Este conjunto de experiências permite determinar o conjunto de parâmetros de locomoção que optimizam os índices de desempenho propostos. Estes parâmetros são depois adoptados nos estudos desenvolvidos neste trabalho.

O estudo acabado de descrever é efectuado em duas fases. Numa primeira fase adopta-se um modelo do robô cujas pernas dispõem de dois gdl, funcionando a extremidade do elo mais afastado da anca do robô como pé. Na segunda fase, verifica-se o efeito da adopção de um modelo com três gdl por perna, no desempenho da locomoção do sistema. Ao nível da estrutura mecânica do sistema artificial de locomoção, a introdução de um terceiro gdl é acompanhado pela introdução de um terceiro elo na estrutura da perna, correspondendo a um pé não pontual na extremidade de cada perna do robô.

Um segundo objectivo deste trabalho consiste na comparação de diferentes arquitecturas e algoritmos de controlo passíveis de serem adoptados nas juntas das pernas de um robô multipernas.

Para o efeito estudam-se diferentes arquitecturas de controlo, cada uma delas apresentando diferentes malhas de realimentação. Começa-se por efectuar o estudo do sistema quando a arquitectura de controlo inclui unicamente uma malha de realimentação de posição / velocidade e, posteriormente, considera-se uma arquitectura de controlo em cascata, adicionando à situação de base uma segunda malha com realimentação da força de contacto do pé com o solo. O efeito da introdução da segunda malha de realimentação é analisado para diferentes condições do solo e diferentes efeitos dinâmicos no accionamento das juntas das pernas, tais como saturação, atrito viscoso, flexibilidade e folgas.

No que se refere ao estudo dos algoritmos de controlo a adoptar, analisa-se o desempenho de controladores de ordem fraccionária no controlo das juntas das pernas de sistemas artificiais de locomoção e compara-se o seu desempenho com o de controladores tradicionais de acção Proporcional, Integral e Derivativa (PID).

Por último, é ainda objectivo deste trabalho o estudo dos padrões de locomoção dos robôs multipernas e a verificação da sua adequação a diferentes condições de locomoção, quer na ausência, quer na presença de obstáculos no trajecto planeado.

Para cumprir este objectivo, inicialmente considera-se que o robô se desloca em terreno perfeitamente regular e sem obstáculos. Para esta situação, adopta-se um conjunto de padrões de locomoção inspirado nos que se encontram na biologia e analisam-se os mais adequados para a locomoção de robôs quadrúpedes e hexápodes, bem como a sua variação, em função da velocidade de locomoção.

Numa segunda fase, considera-se a existência de obstáculos no trajecto do robô e analisa-se qual a melhor de duas estratégias pré-definidas, para que um robô hexápode vença um obstáculo. Este estudo é efectuado para diferentes distâncias do robô ao obstáculo e diferentes características dimensionais do obstáculo em consideração.

Por último, é efectuado o estudo das funções de transferência dos sistemas artificiais de locomoção, assim como da sua variação para diferentes valores dos parâmetros de locomoção, do robô e do solo.

Em todo este trabalho considera-se sempre que o robô se desloca com um padrão de locomoção no sentido directo. Para o robô descrever trajectórias curvas e mudar a direcção de movimento poder-se-iam adoptar duas estratégias: por um lado, seria possível ajustar o comprimento do passo das pernas do lado direito e do lado esquerdo do corpo do robô, de forma a permitir ao robô virar à esquerda ou à direita (a principal limitação desta solução resulta do facto do raio de curvatura ser muito grande); por outro lado, para obter mudanças mais rápidas de direcção seria possível parar o robô e recorrer a um padrão de locomoção específico em que as pernas do lado direito e esquerdo do robô se deslocariam em direcções opostas (Preumont, *et al.*, 1997). Como introdução à problemática de geração de padrões de locomoção para efectuar mudanças de direcção sugere-se a leitura de Santos e Jiménez (1995) e Hugel e Blazevic (1999) e como introdução aos padrões de locomoção omnidireccionais ver, por exemplo, Ma, *et al.* (2002).

1.4 Contribuições deste Trabalho

O cumprimento dos objectivos propostos no trabalho de Doutoramento levou ao desenvolvimento de vários aspectos relacionados com a análise de desempenho, com a arquitectura de controlo e com os padrões de locomoção de sistemas artificiais de locomoção

multipernas. Como principais contribuições do trabalho para esta área são de realçar os aspectos referidos seguidamente:

1. progresso na compreensão dos fenómenos envolvidos na locomoção dos robôs com pernas, nomeadamente na influência dos parâmetros da estrutura mecânica e da arquitectura de controlo;
2. desenvolvimento de um modelo do robô multipernas com corpo segmentado e dispondo de complacência passiva entre cada segmento. A complacência entre cada segmento é implementada recorrendo a um conjunto de sistemas lineares mola-amortecedor em paralelo;
3. utilização de um modelo baseado em sistemas mola-amortecedor em paralelo, em que a componente da força de reacção do solo devida ao atrito é não linear, para efeitos de modelação do contacto do pé do robô com o solo. Os parâmetros adoptados para este modelo são determinados tendo por base estudos de mecânica dos solos;
4. formulação de diversos índices quantitativos, baseados na dinâmica do sistema robô-ambiente e nos erros de seguimento das trajectórias das ancas e dos pés do robô, para a análise do desempenho das estruturas mecânicas de locomoção e das suas arquitecturas de controlo;
5. estudo detalhado da forma como os parâmetros da estrutura mecânica dos robôs com pernas e os seus parâmetros de locomoção influenciam o desempenho do sistema artificial de locomoção;
6. desenvolvimento de arquitecturas de controlo simples e intuitivas, dedicadas ao controlo das juntas das pernas de sistemas robóticos multipernas, focadas nos problemas identificados na locomoção de sistemas artificiais;
7. aplicação de algoritmos de controlo de ordem não inteira no controlo das juntas de sistemas artificiais de locomoção, considerando actuadores com saturação e transmissões com atrito viscoso, flexibilidade e folgas, e comparação do seu desempenho com algoritmos de acção Proporcional e Derivativa (PD) clássicos;

8. estudo dos padrões de locomoção quadrúpedes e hexápodes, frequentemente adoptados pelos animais, e adaptação dos seus parâmetros às diferentes condições de locomoção com que se deparam os robôs com pernas;
9. desenvolvimento de padrões de locomoção quase-periódicos, para ultrapassagem de obstáculos. Implementação de uma estratégia para a selecção destes padrões de locomoção, em função das características dos obstáculos a vencer, tendo por base a minimização de índices de desempenho.

Cada um dos pontos focados anteriormente é abordado no decorrer desta Tese, de acordo com a estrutura descrita na secção seguinte.

1.5 Organização e Estrutura da Tese

Apresentados os objectivos a alcançar, que foram cumpridos durante a realização do Doutoramento, e as principais contribuições deste trabalho, passa-se a descrever a organização desta Tese de Dissertação. A Tese, que se encontra organizada de acordo com a estrutura seguida no desenvolvimento do trabalho realizado, é composta por sete capítulos e seis anexos.

No Capítulo 2 efectua-se uma resenha histórica da evolução dos sistemas robóticos de locomoção, sendo dada uma atenção especial aos sistemas de locomoção quadrúpedes e hexápodes. Grande parte deste capítulo é dedicado aos sistemas actuais, que podem considerar-se como o estado da arte nestas matérias. O Capítulo 2 faz uma apresentação geral do estado da arte dos sistemas robóticos de locomoção. No entanto, todos os capítulos subsequentes iniciam-se com uma secção dedicada ao estado da arte do assunto específico abordado nesse capítulo. Por outro lado, todos os capítulos terminam também com uma secção de referências bibliográficas de forma a organizar as referências o mais perto possível do local no texto onde são referenciadas. Esta estrutura permite ainda, do ponto de vista do autor, tornar cada capítulo como uma estrutura relativamente autónoma.

No Capítulo 3 apresenta-se, numa primeira parte, o modelo desenvolvido para a simulação dos sistemas artificiais de locomoção. O referido modelo é descrito em termos dos seus aspectos cinemáticos e dinâmicos, descrevendo-se com um certo detalhe as trajectórias planeadas para as ancas e pés do robô. É dada uma atenção particular à modelação do corpo

do robô, tendo por base ideias apreendidas com a observação de seres biológicos, e à modelação da interacção dos pés do robô com o solo. Na segunda parte deste capítulo são introduzidos diversos índices cinemáticos e dinâmicos, formulados no decurso do trabalho, que servem de base à análise e comparação do desempenho das estruturas alternativas estudadas durante os trabalhos de Doutoramento.

O Capítulo 4 apresenta a análise cinemática e dinâmica dos sistemas robóticos de locomoção multipernas, para padrões de locomoção periódicos, tendo como objectivo a determinação do conjunto de parâmetros que optimizam vários dos índices de desempenho formulados. Este estudo é desenvolvido tendo por base as trajectórias planeadas para os sistemas artificiais de locomoção. Neste capítulo é ainda efectuada uma comparação entre um conjunto de animais, com distintas características de locomoção, e os sistemas robóticos, tendo como objectivo comparar o desempenho dos sistemas biológicos e mecatrónicos.

Chegados a este ponto, no Capítulo 5 analisa-se o desempenho de diferentes arquitecturas e algoritmos de controlo nas juntas das pernas de um robô hexápode. Começa-se por comparar o desempenho do sistema quando na arquitectura de controlo (que inclui realimentação de posição / velocidade) se acrescenta a realimentação da força de contacto do pé com o solo. O estudo é desenvolvido para diferentes condições do solo e diferentes efeitos dinâmicos no accionamento das juntas das pernas, tais como saturação, atrito viscoso, flexibilidade e folgas. Neste capítulo, analisa-se também o desempenho de controladores de ordem fraccionária no controlo das juntas das pernas de sistemas artificiais de locomoção e compara-se o seu desempenho com o de controladores PD tradicionais. Por último, é ainda verificado o efeito da introdução de um pé, na extremidade de cada perna do robô, no desempenho da locomoção do sistema.

No Capítulo 6, o estudo efectuada no Capítulo 4 sobre padrões de locomoção periódicos é estendido para diferentes velocidades de locomoção do robô e para os padrões de locomoção quase-periódicos. Assim, começa-se por analisar qual o padrão de locomoção, dentro de um conjunto de padrões frequentemente encontrados na biologia, mais adequado para a locomoção de robôs quadrúpedes e hexápodes em função da velocidade de locomoção. Numa segunda fase analisa-se qual a melhor estratégia, dentro de um conjunto de estratégias pré-definidas, para que um robô hexápode vença um obstáculo. Este estudo é efectuada para

diferentes distâncias do robô ao obstáculo e diferentes características dimensionais do obstáculo em consideração. Por último, apresenta-se neste capítulo a análise das funções de transferência dos sistemas artificiais de locomoção. Esta análise é detalhada para diferentes valores dos parâmetros de locomoção, do robô e do solo.

Esta Tese de Dissertação termina no Capítulo 7 com um conjunto de conclusões que assentam no trabalho realizado e onde se deixam ainda algumas reflexões sobre possíveis desenvolvimentos futuros deste trabalho.

Na parte final são ainda apresentados seis anexos onde se detalham alguns tópicos referidos no corpo principal deste trabalho, mas que aí foram aligeirados de forma a não sobrecarregar a sua leitura.

Os Anexos A a E servem, em grande medida, de complemento ao Capítulo 3 desta Tese.

O Anexo A descreve detalhadamente vários padrões de locomoção adoptados por animais bípedes, quadrúpedes e hexápodes quando se deslocam a diferentes velocidades. Os padrões de locomoção aqui descritos foram implementados no modelo de simulação desenvolvido e servem de base ao estudo descrito na primeira parte do Capítulo 6 desta Tese.

No Capítulo 3 é referido que existem diferentes opções para implementar as trajectórias do corpo e dos pés dos sistemas artificiais de locomoção. Algumas das possíveis opções, adoptadas por diferentes robôs com locomoção por pernas, para implementar as trajectórias dos pés durante a fase de transferência são descritas com maior nível de detalhe no Anexo B.

Os Anexos C e D apresentam, respectivamente, as equações detalhas da cinemática e da dinâmica de um robô hexápode com pernas com dois e três gdl.

No Anexo E efectua-se a análise detalhada de uma componente muito importante do modelo de simulação da locomoção, nomeadamente o modelo adoptado para a interacção pé-solo.

Por último, o Anexo F apresenta os dados antropométricos, compilados a partir da literatura, e referentes aos vários seres vivos estudados no Capítulo 4.

Referências

HUGEL, Vincent; BLAZEVIC, Pierre. (1999). “Towards Efficient Implementation of Quadruped Gaits With Duty Factor of 0.75”. In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2360 – 2365.

KALIYAMOORTHY, S.; QUINN, R. D.; ZILL, S. N.. (2003). “Roles of Force Sensors in Hexapod Locomotion”. In: *Proceedings CLAWAR'2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 903 – 910.

MA, Shugen; TOMIYAMA, Takashi; WADA, Hideyuki. (2002). “Omni-Directional Walking of a Quadruped Robot”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2605 – 2612.

PREUMONT, A.; ALEXANDRE, P.; DOROFTEI, I.; GOFFIN, F.. (1997). “A Conceptual Walking Vehicle for Planetary Exploration”. *Mechatronics*. Vol. 7; No. 3; pp. 287 – 296.

RAIBERT, MARC H.. (1986). *Legged Robots that Balance*. The MIT Press.

SANTOS, Pablo González de; JIMÉNEZ, María A.. (1995). “Generation of Discontinuous Gaits for Quadruped Walking Vehicles”. *Journal of Robotic Systems*. Vol. 12; No. 9; pp. 599 – 611.

SONG, Shin-Min; WALDRON, Kenneth J.. (1989). *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*. The MIT Press.

Capítulo 2

Evolução dos Sistemas Robóticos de Locomoção

Este capítulo pretende sintetizar a evolução e apresentar o estado da arte na área dos robôs com locomoção por pernas. Nesta perspectiva, apresenta-se uma breve introdução às diferentes formas possíveis de locomoção em robôs móveis, dando realce às características dos sistemas artificiais de locomoção por pernas, nomeadamente às suas vantagens e limitações. De seguida é efectuada uma resenha histórica destes sistemas, exemplificando com alguns casos particulares frequentemente considerados como marcos na sua evolução. Após esta nota histórica, são examinados alguns dos sistemas actuais, analisando-se o seu desempenho e são apresentadas, na óptica do autor, as áreas de investigação e desenvolvimento que estão a ser seguidas na construção de robôs com pernas. Para terminar este capítulo, e a título de conclusão, descrevem-se alguns problemas ainda existentes assim como algumas questões que permanecem sem resposta nesta área de trabalho.

Por último, convém referir que os sistemas de locomoção artificial referidos neste capítulo são um subconjunto dos sistemas existentes, tendo a escolha dos sistemas referidos sido baseada na sua semelhança com o sistema de simulação analisado no restante trabalho descrito nesta Tese. Não se procurou de forma alguma efectuar um levantamento e descrição exaustiva dos diversos sistemas existentes. Para os interessados sugere-se a consulta da referência [HTTP#1](#).

2.1 Formas Alternativas de Locomoção

Os sistemas robóticos autónomos podem classificar-se, genericamente, em duas grandes áreas:

- robótica de manipulação;
- robótica móvel.

No que concerne à robótica móvel, e relativamente à forma de locomoção a adoptar, torna-se necessário considerar os seguintes aspectos do problema:

- os requisitos da tarefa que o robô deve cumprir;
- as restrições do terreno em que o robô vai operar;
- as limitações dos actuadores adoptados;
- a fonte de alimentação disponível para alimentar o robô e a autonomia energética necessária, tendo em atenção os actuadores e controladores dos equipamentos.

Dadas estas necessárias considerações, existem três configurações fundamentais que podem ser adoptadas para a locomoção de robôs móveis em terra:

- dispositivos rotacionais, tais como rodas e lagartas;
- pernas, similares às que são observadas nos animais;
- estruturas articuladas similares ao corpo das serpentes.

Cada uma destas formas de locomoção apresenta características próprias, o que as torna indicadas para classes particulares de aplicações.

2.1.1 Veículos com Rodas e Lagartas

Na civilização actual a locomoção recorrendo a veículos com rodas é dominante. É tão comum a sua utilização para desempenhar as mais variadas tarefas, que poder-se-á pensar ser esta a única forma possível (ou a forma mais eficaz) de locomoção. Todavia, analisando com algum detalhe as características deste tipo de locomoção, é possível concluir que não será bem assim.

Desde logo convém notar que os veículos com rodas exigem superfícies pavimentadas (ou no mínimo regulares) para se deslocarem, sendo inequívoco que, neste caso, conseguem ser extremamente rápidos e eficientes, ao mesmo tempo que os mecanismos podem ser simples e leves. No entanto, mais de 50% da superfície terrestre é inacessível a veículos tradicionais (com rodas ou com lagartas) (Anon, 1967) tornando-se difícil, ou até impossível, aos veículos com rodas vencer obstáculos e desníveis de grandes dimensões. Mesmo os veículos ditos “todo-o-terreno” não conseguem melhor do que vencer pequenos obstáculos e desníveis à custa de um elevado consumo energético (Bekker, 1960).

Uma alternativa consiste nos veículos dotados de lagartas. Apesar da sua maior mobilidade, em terrenos difíceis também não conseguem ultrapassar muitas das dificuldades encontradas e o seu consumo energético é relativamente elevado.

Aos problemas já referidos, convém acrescentar o facto dos veículos tradicionais deixarem um rasto contínuo no solo, o que em algumas situações é desvantajoso como, por exemplo, do ponto de vista ambiental.

2.1.2 Veículos com Locomoção por Pernas

2.1.2.1 Vantagens dos Veículos com Pernas

Do que acaba de ser exposto, conclui-se que os veículos com locomoção por pernas têm uma maior mobilidade em terrenos naturais, uma vez que estes veículos podem utilizar apoios isolados para cada pé, ao contrário dos sistemas com rodas, que necessitam de uma superfície de suporte contínua. Assim, estes veículos podem andar em terrenos irregulares, variando a configuração das pernas para se adaptarem às irregularidades da superfície e, por outro lado, os pés podem contactar com o solo em pontos seleccionados de acordo com as condições do terreno. Por este motivo, as pernas são sistemas inerentemente adequados para uma locomoção em terrenos irregulares. Quando os veículos se deslocam em superfícies pouco rígidas, tais como solos arenosos, a capacidade de impor pegadas discretas no solo pode também melhorar o consumo energético, uma vez que deformam o terreno numa menor escala do que os veículos com rodas ou com lagartas e, assim, a energia necessária para sair dessas depressões é inferior (Bekker, 1960; Bekker, 1969). Adicionalmente, a área de contacto entre o pé e o solo pode ser realizada de forma a que a pressão de suporte do solo possa ser

reduzida. Mais ainda, a utilização de múltiplos gdl nas juntas das pernas, permite aos veículos com pernas alterar a sua direcção de movimento sem escorregar. Verifica-se também que é possível variar a altura ao solo, introduzindo um efeito de amortecimento e de desacoplamento entre as irregularidades do terreno e o corpo do veículo (e conseqüentemente a sua carga). Ainda no que concerne à locomoção, é também de referir a possibilidade que estes sistemas apresentam de se deslocarem “abraçados” ao terreno em que se deslocam, caso se desloquem, por exemplo, sobre a superfície exterior de tubos, de forma aumentar a sua capacidade de equilíbrio (Kaneko, *et al.*, 2002).

Uma outra vantagem que tem vindo a ser investigada recentemente, prende-se com a tolerância a falhas durante a locomoção estaticamente estável. Uma falha numa das rodas de um veículo com rodas resulta numa severa perda de mobilidade, uma vez que todas as rodas de um veículo desta natureza devem estar permanentemente em contacto com o solo durante a locomoção. No entanto, os veículos com pernas podem apresentar redundância no número de pernas e, portanto, podem manter a estabilidade estática e continuar a sua locomoção mesmo com uma ou mais pernas avariadas (Yang e Kim, 1998; Hirose e Kato, 1998; Lee e Hirose, 2000; Yang, 2003; Spenneberg, *et al.*, 2004).

Por último, deve referir-se que as pernas podem ser utilizadas não só para a locomoção, mas também com o veículo imobilizado. Por exemplo, a parte superior do corpo pode ser actuada activamente enquanto os pés se encontram fixos ao solo, funcionando como uma base de suporte activo para auxiliar o movimento de um manipulador montado no corpo (Nonami e Huang, 2001; Garcia, *et al.*, 2003) ou de uma ferramenta (Ihme, 2003). Em alternativa à montagem de um manipulador no corpo do robô, os robôs multipernas podem ainda recorrer a uma ou mais das suas pernas para a manipulação de objectos, tal como se verifica com alguns seres vivos (vários animais utilizam as suas pernas para segurar, manipular e transportar objectos).

A título de exemplo, Takita, *et al.* (2003) apresentam um robô bípede, cuja estrutura é inspirada nos dinossauros, em que a cauda é utilizada para auxiliar à manutenção do equilíbrio durante a locomoção e passa a ser utilizada para o robô se sentar sobre ela, formando um tripé de apoio estável, durante as tarefas de manipulação que executa com o pescoço. Já Hirose e Kato (1998) propõem a utilização do robô quadrúpede TITAN-VIII na

tarefa de detecção e remoção de minas terrestres, recorrendo para este efeito a uma das pernas do robô, que passa a apresentar a função de braço manipulador, podendo esta ser equipada com um conjunto de diferentes actuadores finais. Também Omata, *et al.* (2002) propõem a utilização de um robô quadrúpede para tarefas de manipulação, em que duas das suas pernas são utilizadas para a locomoção e o corpo e as restantes pernas são utilizadas para a manipulação dos objectos. Takahashi, *et al.* (2000) e Koyachi, *et al.* (2002) apresentam soluções similares às anteriores mas para robôs hexápodes.

As soluções apresentadas têm como vantagem a redução do peso do sistema e o conseqüente aumento da autonomia energética, pois se não fossem adoptadas estas soluções teriam que ser instalados braços sobre o sistema artificial de locomoção destinados unicamente às tarefas de manipulação.

2.1.2.2 Limitações dos Veículos com Pernas

Apesar dos aspectos referidos indicarem a locomoção com pernas como sendo vantajosa face aos veículos com formas de locomoção tradicionais, convém apontar que, no estado actual de desenvolvimento, estes veículos ainda sofrem de grandes limitações, pois exibem baixas velocidades, são difíceis de construir e necessitam de algoritmos de controlo complexos. Além disso, os mecanismos actuais são pesados, pois requerem um grande número de actuadores para mover as pernas com múltiplos gdl, ao que se junta um consumo energético elevado.

2.1.3 Veículos com um Corpo Articulado

Os veículos com um corpo articulado são compostos por vários segmentos corporais, interligados de forma a imitar uma cobra (Hirose, 1993; Nilsson, 1998; Klaassen e Paap, 1999; Kyriakopoulos, *et al.*, 1999; Worst, 1998; Paap, *et al.*, 2000; Streich e Adria, 2004) ou uma centopeia (Long, *et al.*, 2002). Através da coordenação activa do movimento dos segmentos, os veículos com corpo articulado apresentam certas vantagens:

- têm a capacidade de percorrer e atravessar terrenos irregulares e trajectos estreitos, adaptando activamente o seu longo corpo ao perfil do terreno;

- conseguem atravessar valas, endurecendo os servomecanismos das juntas de forma a formarem uma ponte. Conseguem igualmente atravessar, de forma estável, terrenos pantanosos, enfraquecendo os servomecanismos das juntas de forma a distribuir o seu peso por todos os segmentos;
- apresentam uma fiabilidade e facilidade de manutenção elevadas em virtude da estrutura unificada redundante. O segmento avariado pode ser facilmente desconectado e reparado separadamente;
- podem ser transportados facilmente, dividindo o robô nos seus segmentos elementares.

2.1.4 Campos de Aplicação

Quanto aos campos de aplicação dos robôs móveis, independentemente da sua forma de locomoção, pode-se dizer que são indicados para os ambientes que na terminologia anglo-saxónica se designam 3-Ds (*Dirty, Doll, Dangerous*). No fundo são veículos capazes de substituir o ser humano, de forma a evitar colocar em perigo a vida, em todo o tipo de trabalhos perigosos que requeiram fortes medidas de segurança ou em áreas às quais os humanos não possam aceder facilmente.

No caso dos robôs com locomoção por pernas, exemplos destas situações são:

- a exploração de locais remotos:
 1. em vulcões (Wettergreen, *et al.*, 1993);
 2. no espaço ou em planetas (Bares, *et al.*, 1989; Kemurdjian, *et al.*, 1995; Preumont, *et al.*, 1997; Fiorini, 2000; Kubota e Takahashi, 2003);
 3. no fundo marinho (Ayers, *et al.*, 2000a; Ayers, *et al.*, 2000b);
- ambientes hostis ou perigosos:
 1. em centrais nucleares ou locais com elevados níveis de radiação (Konaka, 1991);
 2. em prospecção mineira (Cox, 1970; Roberts, *et al.*, 1999);
 3. em tarefas de desminagem e recolha de munições não detonadas (DeBolt, *et al.*, 1997; Hirose e Kato, 1998; Flannigan, *et al.*, 1998; Ayers, *et al.*, 2000b; Nonami e Huang, 2001; Marques, *et al.*, 2002; Garcia, *et al.*, 2003);

4. em áreas de desastre ou situações de catástrofe (Konaka, 1991; Mae, *et al.*, 2000; Kikuchi, *et al.*, 2003);
5. em operações de busca e salvamento (Mae, *et al.*, 2000);
6. em operações militares (Caldwell e Warren, 2001).

Para além deste tipo de aplicações os veículos com pernas podem também ser utilizados numa grande variedade de tarefas, como sejam (Hirose, 1991; Tsukagoshi, *et al.*, 1997):

- em trabalhos de escavação e construção civil (Hasunuma, *et al.*, 2003);
- no corte e transporte de árvores em florestas (HTTP#2);
- no auxílio a humanos em operações de transporte de cargas (Neuhaus e Kazerooni, 2000; Yokoyama, *et al.*, 2003);
- em aplicações médicas, como seja o caso da colonoscopia (Kim, *et al.*, 2002) e como alternativa às cadeiras de rodas (Takeda, *et al.*, 2001; Sugahara, *et al.*, 2004);
- na área dos serviços, especialmente em aplicações de apoio a pessoas dentro dos edifícios (Sakagami, *et al.*, 2002; Nishiyama, *et al.*, 2003).

Além disso, algumas previsões apontam para a introdução deste tipo de robôs nas habitações, seja dedicados a tarefas domésticas (Sawasaki, *et al.*, 2003), seja como simples companhia. Por último, convém referir o sucesso que alguns robôs com locomoção por pernas têm vindo a apresentar no campo do entretenimento (Fujita, 2000; Kuroki, *et al.*, 2003) e mesmo da educação (Kitano, *et al.*, 2000).

No entanto, no estado de desenvolvimento em que se encontram estes equipamentos, ainda não se pode afirmar que constituam uma alternativa eficaz de locomoção aos veículos com rodas e lagartas, uma vez que ainda permanecem por resolver vários problemas de engenharia.

Após esta breve introdução às diferentes formas possíveis de locomoção em robôs móveis, dando realce às características dos sistemas artificiais de locomoção por pernas, na secção seguinte passa-se a analisar a evolução histórica dos veículos com locomoção por pernas, exemplificando com alguns casos particulares frequentemente considerados como marcos da sua evolução.

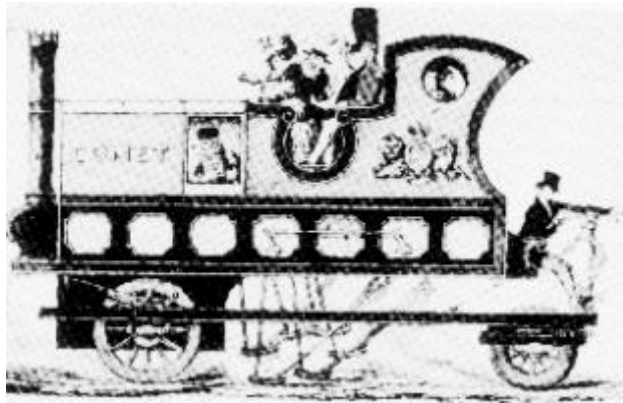


Figura 2.1: Gravura de um dos primeiros veículos com pernas.

2.2 Evolução dos Veículos com Pernas

Apesar de poder pensar-se que se está perante uma ciência “nova”, os primeiros conceitos na área da locomoção com pernas são já bastante antigos.

2.2.1 Primeiras Ideias

As primeiras ideias para implementar veículos com locomoção por pernas datam do século XV. Entre 1495 e 1497 Leonardo da Vinci idealizou o primeiro robô articulado antropomórfico. Este robô era um cavaleiro dotado de armadura, com partes em madeira, couro e bronze, e com accionamento através de cabos (Rosheim, 1997).

Na Figura 2.1 apresenta-se uma gravura de um dos primeiros veículos a apresentar pernas. Neste veículo, baseado numa locomotiva, a transmissão do movimento não seria efectuada pelas rodas mas sim por um conjunto de pernas.

Em 1850, o matemático Russo Chebyshev apresentou um modelo para um sistema de locomoção. Recorria a uma ligação cinemática para mover o corpo ao longo de uma trajectória recta horizontal, enquanto que os pés se moviam para cima e para baixo para trocar o suporte durante a locomoção (Figura 2.2). Ao rodar o braço AB da engrenagem, o ponto M (representando o pé do sistema de locomoção) desloca-se sobre uma trajectória em linha recta durante uma parte do ciclo e sobre uma trajectória em arco durante a restante parte do ciclo (a trajectória de saída). Duas destas engrenagens operam desfasadas de forma que, em qualquer instante, pelo menos uma delas fornece o movimento em linha recta. O corpo (aqui

representado pelo segmento de recta BC) encontra-se sempre suportado pelo pé que se encontra ligado à engrenagem que se desloca segundo a trajectória em linha recta.

Na Figura 2.3 pode ver-se um esboço da primeira máquina quadrúpede, denominada The Mechanical Horse, cujo projecto se deve a L. A. Rygg.

Nesta máquina os estribos funcionavam como pedais e o seu movimento era transmitido às pernas através de um conjunto de engrenagens. Por sua vez, as rédeas permitiam mover a cabeça e as pernas da frente de forma a controlar a direcção do veículo. Esta máquina foi patenteada em 14 de Fevereiro de 1893 mas nunca passou da fase de projecto.

Na Figura 2.4 apresenta-se o projecto da máquina bípede denominada The Steam Man. Este bípede foi projectado por Georges Moore em 1893, mas também nunca foi construído.

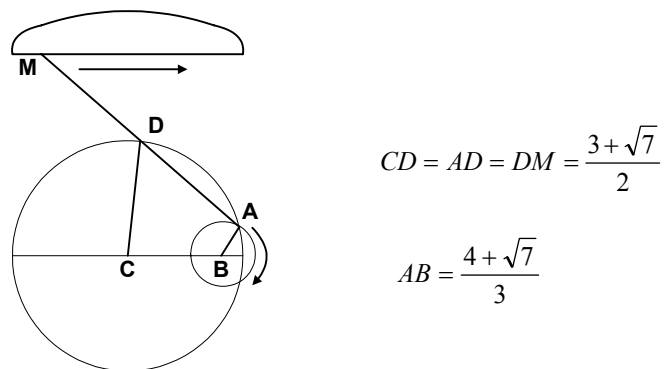


Figura 2.2: Mecanismo de Chebyshev.



Figura 2.3: Esboço da primeira máquina quadrúpede.

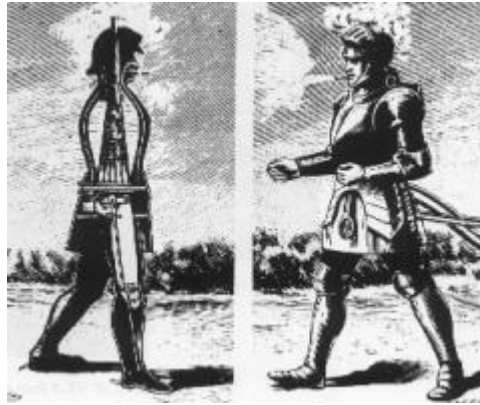


Figura 2.4: Projecto da primeira máquina bípede.

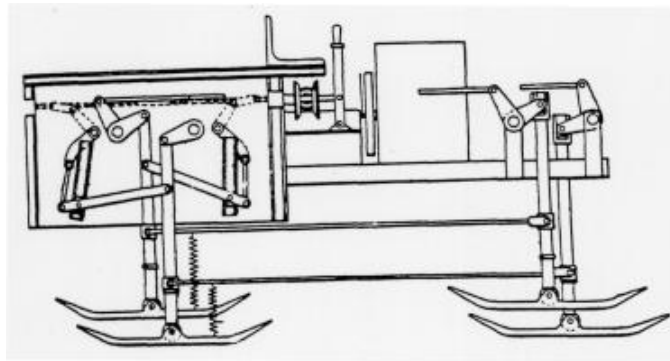


Figura 2.5: Máquina quadrúpede do Barão de Bechtolsheim.

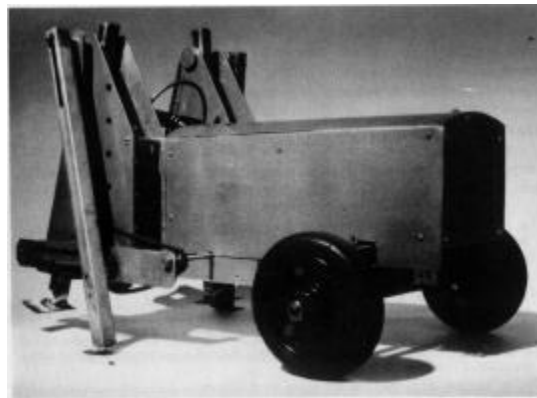


Figura 2.6: Protótipo de um tractor com pernas.

Em 1913 o Barão de Bechtolsheim patenteou uma máquina quadrúpede cujo esquema se apresenta na Figura 2.5. Mais uma vez, não existe qualquer indicação de que esta máquina tenha efectivamente sido construída.

Um exemplo de uma máquina mista (com rodas e com pernas) está representado na Figura 2.6 e data da Primeira Guerra Mundial. Este protótipo foi desenvolvido por Thring, mas nunca terá passado dessa fase.

Como se viu, as ideias anteriores procuravam um mecanismo que permitisse o movimento quando accionado por uma fonte de energia. No entanto, esta aproximação padecia de uma grave limitação: a solução baseada em engrenagens para transmitir o movimento às pernas restringia-se a adoptar um padrão de locomoção constante, com a colocação dos pés no solo a intervalos regulares. Isto não permitia aproveitar uma grande vantagem destes veículos, a saber, a possibilidade de atravessarem terrenos irregulares. Um segundo problema consistia no facto da informação sobre o estado da máquina e do ambiente não ser utilizada no seu controlo.

2.2.2 Primeiros Estudos / Implementações

O primeiro estudo científico documentado da locomoção dos animais deve-se a Eadweard Muybridge, que estudou os padrões de locomoção de cavalos a partir de fotografias de cavalos em trote. Os resultados deste trabalho foram publicados na revista *Scientific American* em 1878. Após este estudo inicial, Muybridge dedicou-se ainda à análise dos padrões de locomoção de quarenta outros mamíferos, incluindo o dos seres humanos.

Em meados da década de 50, do século XX, numerosos grupos de investigação iniciaram o estudo e o desenvolvimento de máquinas com locomoção por pernas de forma sistemática. Cerca de uma década depois, as primeiras máquinas começaram a ser projectadas e construídas por diferentes grupos em laboratórios.

Em 1960 Shigley apresentou um estudo extenso sobre os mecanismos possíveis para implementar a locomoção com pernas (Shigley, 1960). No seu trabalho são propostos vários sistemas que podem ser utilizados em máquinas locomotoras, nomeadamente engrenagens de quatro barras, engrenagens com excêntricos e mecanismos pantográficos. Com base na análise desenvolvida, Shigley construiu um veículo com quatro estruturas rectangulares onde cada uma servia como uma perna. As pernas moviam-se aos pares e o deslocamento era suficientemente pequeno de forma a garantir a estabilidade estática.

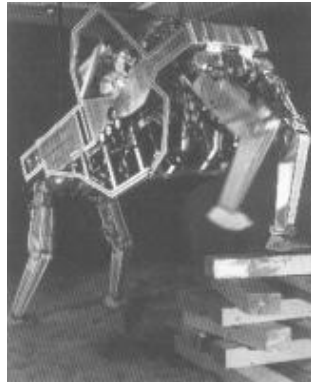


Figura 2.7: O quadrúpede da General Electric.

Também durante os anos 60 a empresa General Space Corporation desenvolveu duas máquinas (com seis e com oito pernas), com o objectivo de aplicar os conceitos da locomoção por pernas a um veículo lunar. O hexápode era alimentado externamente, enquanto que o octópode era totalmente autónomo. Os movimentos das pernas de ambos os veículos eram coordenados por engrenagens com excêntricos e transmitidos por ligações mecânicas. Estes veículos, apesar de cumprirem alguns dos objectivos projectados (por exemplo, o octópode conseguia virar no seu próprio comprimento, através de uma forma de derrapagem controlada), apresentavam uma fraca adaptabilidade ao tipo de terreno devido à falta de gdl necessários (Morrison, 1968).

Um dos primeiros veículos em que era possível adoptar diferentes padrões de locomoção foi o quadrúpede da General Electric (Figura 2.7), desenvolvido por R. Mosher e concluído em 1968 (Liston e Mosher, 1968; Mosher, 1968).

Este veículo, com 3,3 m de altura, 3 m de comprimento e 1400 kg de peso, apresentava quatro pernas com três gdl (um no joelho e dois na anca), sendo cada eixo actuado por um cilindro hidráulico e propulsionado por um motor de combustão interna de 68 kW. O controlo deste veículo dependia de um operador bem treinado para funcionar correctamente. O operador controlava as quatro pernas do veículo através de quatro punhos e pedais que se encontravam hidraulicamente ligados às pernas do robô, com reflexão de força. O controlo do veículo era exigente (doze gdl), pelo que poucas pessoas o conseguiam manobrar, verificando-se que se cansavam ao fim de algum tempo. Apesar da sua aptidão para vencer obstáculos e da sua boa mobilidade em terrenos difíceis, tornou-se claro que era necessário um sistema de controlo por computador.

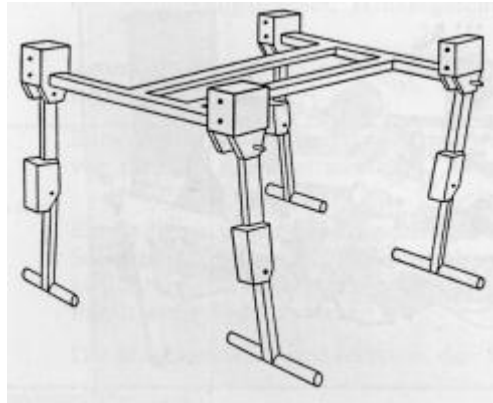


Figura 2.8: O quadrúpede Phoney Poney.



Figura 2.9: O Big Muskie.

Nessa mesma época foi desenvolvido por McGhee e Frank o Phoney Poney (Figura 2.8) (McGhee, 1966; Frank, 1968). Este quadrúpede, concluído em 1966, foi a primeira máquina com pernas a deslocar-se autonomamente sob o controlo de um “computador” e com accionamento eléctrico. Cada perna tinha dois gdl, sendo cada uma das juntas actuada por um motor eléctrico (com alimentação externa) através de um redutor de velocidade. A coordenação das juntas era efectuada através de lógica digital simples e apresentava dois padrões de locomoção diferentes. A sua principal limitação residia no facto de só se deslocar em linha recta, não conseguindo mudar de direcção.

Por último, é de referir o Big Muskie (Figura 2.9), a maior máquina com locomoção por pernas até hoje construída (15.000 toneladas) (Cox, 1970).

Esta máquina, construída pela Bucryus-Erie Co. em 1969, para ser utilizada numa mina de carvão a céu aberto, dispunha de quatro pernas accionadas hidraulicamente. Para se deslocar,

as pernas levantavam o corpo e deslocavam-no de um passo no sentido pretendido, pousando-o de seguida no solo. Se necessário o ciclo repetia-se.

As máquinas vistas anteriormente demonstram alguma mobilidade em condições controladas, mas nenhuma delas exhibe capacidades que se aproximem dos sistemas biológicos. As razões para esta lenta evolução provêm essencialmente da complexidade do controlo das pernas e da sua coordenação, do limitado conhecimento dos padrões de locomoção e da falta de actuadores e estruturas mecânicas eficientes.

2.3 Exemplos Actuais de Veículos com Locomoção por Pernas

Após a análise da evolução inicial dos sistemas robóticos de locomoção e dos problemas que afectavam os primeiros exemplares (e que ainda afectam em maior ou menor grau os veículos existentes) apresenta-se de seguida, com algum detalhe, a sua evolução mais recente, referindo vários veículos existentes actualmente, que podem considerar-se marcos nos sistemas de locomoção artificiais.

A descrição que se segue encontra-se organizada pelo número de pernas dos sistemas de locomoção, iniciando-se pelos sistemas monopés, passando aos sistemas bípedes e por último aos sistemas com quatro ou mais pernas (que se encontram agrupados num só conjunto).

2.3.1 Robôs com uma Perna

No caso de robôs com uma única perna a sua locomoção realiza-se por saltos, sendo por isso também designados robôs de salto. Apesar do exemplo natural mais próximo da locomoção por saltos ser o canguru, este modelo também se aplica a bípedes em corrida, que apresentam alternadamente um ou nenhum pé em contacto com o solo. Estas máquinas mantêm um equilíbrio activo à medida que se deslocam, obtendo assim a estabilidade dinâmica, permitindo compreender melhor as trocas de energia que se verificam ao longo de um ciclo de locomoção e realçando os problemas do balanceamento activo e dinâmico, sem haver a preocupação relativa à coordenação das pernas.

Matsuoka foi o primeiro a construir uma máquina que corria de acordo com estes conceitos, ou seja, onde existem períodos de voo balístico nos quais os pés perdem o contacto com o solo. O seu objectivo foi modelar os saltos repetitivos no humano. Para o efeito

formulou um modelo, consistindo num corpo e numa perna sem massa (para simplificar o problema), e considerou que a duração da fase de suporte era muito curta comparada com a fase de voo balístico. Este padrão de locomoção, no qual quase todo o ciclo é passado na fase de transferência, minimiza a influência da inclinação durante a fase de suporte (Matsuoka, 1979).

Para testar o seu sistema de controlo, Matsuoka construiu uma máquina de salto planar com uma perna. A máquina posicionava-se sobre uma mesa inclinada a 10° com a horizontal, rolando sobre rolamentos. Um solenóide eléctrico fornecia um impulso rápido no pé, de forma que o período de suporte era reduzido. A máquina saltava no local a um ritmo de 1 saltos^{-1} e podia andar para a frente e para trás sobre a mesa.

Raibert também se dedicou a estudar sistemas de locomoção dinâmica e, em 1983, construiu na Carnegie Mellon University (CMU) um robô de salto. Este sistema, constituído por um corpo e por uma única perna, precisava de saltar continuamente de modo a manter o equilíbrio (Raibert, 1986).

O corpo constituía a estrutura principal que transportava os actuadores e a instrumentação necessária para a operação da máquina. A perna podia ser estendida, variando o seu comprimento, e era equipada com molas ao longo do seu eixo. Diversos sensores mediam o ângulo de inclinação do corpo, o ângulo da anca, o comprimento da perna, a tensão na mola da perna e o contacto com o solo. Esta primeira máquina estava limitada a operar no plano e, portanto, só podia mover-se para cima e para baixo, para a frente e para trás, ou rodar no plano. Uma segunda máquina de salto, denominada Pogostick (Figura 2.10), dispunha de uma junta adicional na anca para permitir à perna mover-se para os lados, bem como para a frente e para trás. Em operação, este robô equilibrava-se à medida que ia saltando, deslocando-se a uma velocidade máxima de $2,2 \text{ ms}^{-1}$. Um cabo ligava a máquina à alimentação eléctrica e ao computador de controlo. Para esta máquina, o ciclo de corrida / salto apresentava duas fases: suporte (a perna suporta o peso do corpo e o pé permanece numa localização fixa no solo) e voo (o centro de gravidade desloca-se balisticamente com a perna sem carga e livre de se mover). O seu controlo era implementado por um conjunto pequeno de algoritmos simples (Raibert, 1986). Mais recentemente Raibert e os seus colegas construíram um sistema bípede e um sistema quadrúpede com base nos mesmos algoritmos de controlo (Raibert, 1986).

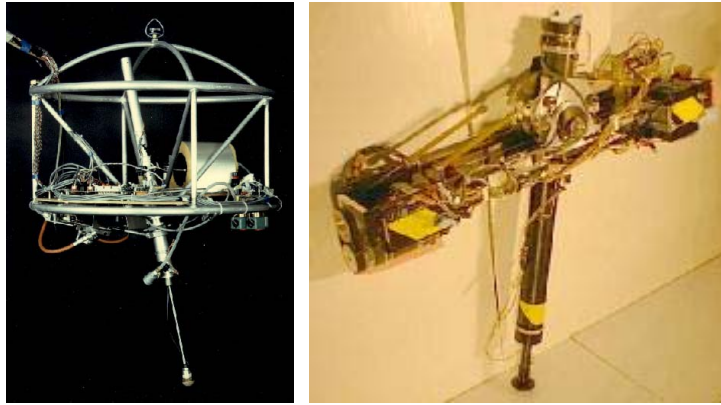


Figura 2.10: Robôs monopés Pogostick (esquerda) e ARL Monopod II (direita).

O ARL Monopod II (Figura 2.10), com dois gdl e accionamento eléctrico, é um exemplo mais recente deste tipo de máquinas. Este robô apresenta duas partes: o corpo (que carrega os sensores e actuadores) e a perna (que permite o deslocamento). O ARL Monopod II dispõe de um motor eléctrico que actua um parafuso sem fim, bem como de um sistema de armazenamento / recuperação de energia através de molas (Buehler, 2001).

Ao contrário dos sistemas acabados de descrever, que dispõem de um gdl prismático na perna, Schwind e Koditschek (1997) apresentam um robô monopé que possui dois gdl rotacionais actuados na perna e o robô de salto desenvolvido por Hyon e Mita (2002) possui três gdl rotacionais na perna, um deles passivo. A configuração adoptada nas pernas destas máquinas de salto representa uma melhor aproximação às pernas dos animais, permitindo desta forma melhorar o estudo da biomecânica das pernas dos seres vivos. Por último, têm vindo a ser desenvolvidos robôs monopés que recorrem ao princípio do salto para a sua locomoção, mas com mecanismos que lhe permitam manter o equilíbrio mesmo quando estão parados, recorrendo a pés com uma geometria especial (Iida, *et al.*, 2002).

À primeira vista pode pensar-se que não existem aplicações práticas para equipamentos com esta configuração. No entanto, a realidade é bem diferente. Estes robôs permitem saltar sobre obstáculos ou posicionar-se em locais onde existam zonas disponíveis para pousar os pés sem haver a preocupação com a estabilidade estática. Por exemplo, é de referir que em 1945 Wallace patenteou um tanque “saltitante” (Wallace, 1942). Segundo ele, o facto de o tanque se deslocar recorrendo a uma única perna, levaria a que tivesse uma trajectória saltitante e errante e daí a dificuldade em ser alvejado.

Uma aplicação potencial deste tipo de robôs consiste na exploração de pequenos corpos celestes (satélites, asteróides, núcleos de cometas), onde os robôs com pernas e com rodas não são capazes de se deslocarem de forma eficaz, devido à reduzida força da gravidade local (Shimoda, *et al.*, 2004). Nesta perspectiva, em 1967 Seifert propôs a utilização de um veículo deste tipo, que denominou de Lunar Pogo, como um meio de locomoção eficiente dos astronautas no solo lunar (Seifert, 1967).

Um exemplo concreto é o veículo ППОП-Φ (Hopper) concebido pelo Russian Mobile Vehicle Engineering Institute (Kemurdjian, *et al.*, 1995). Este robô, com uma massa de 45 kg, era capaz de se deslocar por saltos, realizar experiências científicas e transmitir para a Terra os dados recolhidos e os resultados das experiências através de comunicação por um canal rádio, tendo sido enviado numa missão espacial a Fobos em 1998.

Após ter sido vista a evolução dos robôs monopés, na subsecção seguinte passa-se a analisar a correspondente evolução dos sistemas bípedes.

2.3.2 Robôs Bípedes

A investigação em locomoção bípede tem avançado mais lentamente quando comparada com o caso da locomoção multipernas, devido à dificuldade em estabelecer um controlo estável (Katić e Vukobratović, 2002), uma vez que os robôs bípedes são mais exigentes relativamente à estabilidade dinâmica. Apesar disto, recentemente têm sido conseguidos resultados animadores, de entre os quais se destacam o desenvolvimento de robôs bípedes que atingem a fase de corrida (Nagasaki, *et al.*, 2003).

Desde os finais da década de 60 que a Universidade de Waseda, no Japão, tem desenvolvido uma série de sistemas bípedes controlados por computador. Em 1969 Ichiro Kato desenvolveu o robô bípede WAP-1 (Figura 2.11) no Humanoid Research Laboratory. Para a sua actuação, este robô dispunha de músculos artificiais em borracha, actuados pneumáticamente, e a locomoção bípede era conseguida através da repetição de movimentos ensinados previamente. A maior limitação inicial destas máquinas era a sua baixa velocidade, sendo necessários 90 s para completar um passo. Avanços posteriores permitiram alcançar velocidades próximas da atingida pelo ser humano.

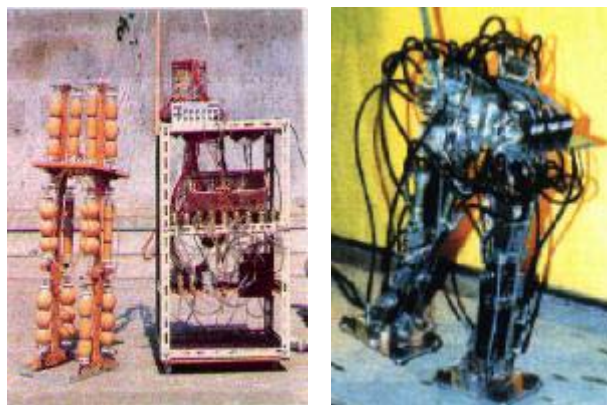


Figura 2.11: Robôs bípedes WAP-1 (esquerda) e WL-9DR (direita).

Já no início da década de 80, Kato e os seus colaboradores construíram o bípede WL-9DR que andava com um padrão de locomoção quase-dinâmico (Ogo, *et al.*, 1980; Kato, *et al.*, 1983). Esta máquina apresentava dez gdl actuados hidraulicamente e dois pés relativamente largos (Figura 2.11).

Este sistema adoptava um modo de locomoção estático, deslocando-se ao longo de uma trajectória pré-planeada, de forma a manter o centro de gravidade dentro da base de suporte fornecida pelo pé de suporte. No entanto, uma vez em cada ciclo de locomoção, a máquina desequilibrava-se temporariamente (inclinando-se para a frente) para que o suporte fosse transferido rapidamente de um pé para o outro. Antes que a transferência se concretizasse, o pé da frente posicionava-se de forma a retornar a máquina passivamente ao equilíbrio, sem necessitar de um controlo activo. Em 1984 esta máquina foi controlada através de um padrão de locomoção quase-dinâmico, demorando cerca de um minuto para executar uma dúzia de passos de 0,5 m (Takanishi, *et al.*, 1985).

Nos dias de hoje existe já uma grande variedade de robôs bípedes com boas capacidades de locomoção e, a maioria deles, apresentam mesmo a forma humanóide.

Um dos robôs bípedes que apresenta melhores capacidades de locomoção é o Honda Humanoid Robot (Figura 2.12). O projecto deste robô iniciou-se em 1986 e as ideias chave adoptadas para o seu desenvolvimento eram “inteligência” e “mobilidade”, pois o robô deveria coexistir e cooperar com os seres humanos, tendo o seu desenvolvimento tido por base os dados retirados da locomoção humana.

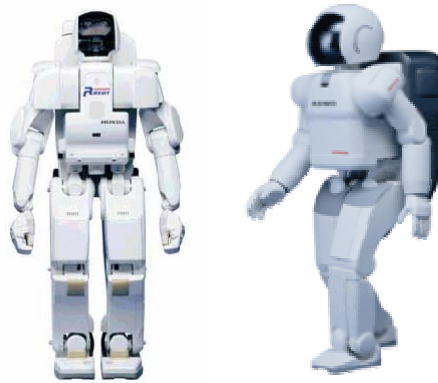


Figura 2.12: Honda Humanoid Robot – modelos P3 (esquerda) e ASIMO (direita).

A ideia da Honda era criar um robô que pudesse ser utilizado na vida diária, ao contrário de um robô desenvolvido para uma aplicação particular, visando a sua introdução nas fábricas (Hirai, *et al.*, 1998). A Honda especificou também três funções que tinham que ser cumpridas: a velocidade de locomoção deveria corresponder à de um ser humano (aproximadamente 3 kmh^{-1}), a estrutura do robô deveria estar preparada para suportar braços com mão e deveria ter a capacidade de subir e descer escadas.

A última versão deste robô, o modelo ASIMO (Advanced Step in Innovative MObility), foi terminado em 2000 e apresenta uma altura de 1,2 m e um peso de 43 kg (HTTP#3). Dispõe de 26 gdl, accionados electricamente, e pode carregar 0,5 kg em cada mão. É um robô completamente autónomo, quer em termos de capacidade de processamento, quer em termos de alimentação (carrega às costas baterias que lhe permitem uma autonomia de 15 minutos).

Sakagami, *et al.* (2002) apresentam uma versão evoluída do modelo ASIMO, preparada para executar tarefas de atendimento a pessoas e acompanhamento de visitas a museus, graças à integração de um conjunto de sensores de visão e audição e a um sistema de reconhecimento de gestos humanos, permitindo a este humanóide a interacção com seres humanos.

O robô bípede WABIAN (WAseda BIpedal humANoid) (Figura 2.13) é outro dos exemplos dos robôs bípedes que têm vindo a ser desenvolvidos no Japão. O objectivo principal do desenvolvimento deste robô consistia na criação de um robô antropomórfico que partilhasse o mesmo espaço de trabalho e que apresentasse padrões de pensamento e comportamento semelhantes ao do ser humano (Yamaguchi e Takanishi, 1998). Pretendia-se

conseguir um robô capaz de interagir com os seres humanos de uma forma natural, nomeadamente ser capaz de falar e apresentar emoções.

Este robô bípede é actuado electricamente, tem 43 gdl, um peso de 136 kg e uma altura de 1,97 m. A cabeça apresenta a capacidade de recolher informação visual (através de um sistema de visão artificial estéreo) e auditiva. A alimentação eléctrica é fornecida externamente estando, no entanto, todo o sistema de processamento e computação integrado no próprio robô (HTTP#3).

Para aumentar ainda mais a semelhança com o ser humano, neste robô as juntas das ancas são actuadas antagonisticamente e com rigidez variável, de uma forma semelhante à actuação das juntas humanas (cada junta humana é actuada por dois ou mais grupos de músculos que apresentam características idênticas a molas não lineares).

Em termos de capacidades de locomoção, este robô é capaz de se deslocar para a frente e para trás, dançar de uma forma dinâmica abanando os braços e as ancas e transportar uma carga, utilizando os seus braços (Yamaguchi, *et al.*, 1999).

O grande incremento que se tem verificado na investigação em locomoção bípede nos últimos anos, em particular no Japão, deve-se em parte à implementação neste país do programa HRP – Humanoid Robotics Program. O objectivo principal deste programa, lançado pelo MITI – Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão entre 1998 e 2002, era similar ao seguido no desenvolvimento do bípede WABIAN.

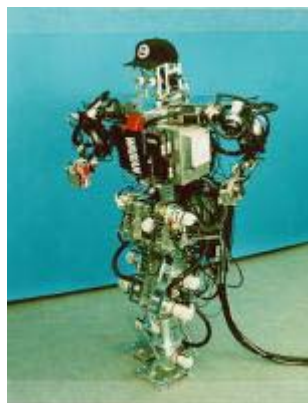


Figura 2.13: Robô humanoíde WABIAN.

Um dos exemplos dos robôs bípedes que têm vindo a ser desenvolvidos no âmbito deste programa é o humanóide HRP-2 (Humanoid Research Project) (Kaneko, *et al.*, 2004). Este robô é capaz de se deslocar em superfícies irregulares, a velocidades de 2/3 da velocidade normal dos humanos, e é capaz de se deslocar atravessando passagens estreitas, modificando para o efeito o seu padrão de locomoção (Kanehiro, *et al.*, 2004). Caso o robô se desequilibre e tombe, para além de a queda ser controlada de forma a minimizar eventuais danos na estrutura, ainda é capaz de se levantar sozinho (Fujiwara, *et al.*, 2003).

No que concerne aos robôs humanóides, convém também referir o robô Kenta, que apresenta a característica de ser totalmente actuado por “tendões” e de possuir uma “coluna vertebral” flexível através da utilização de dez juntas rotacionais (Mizuuchi, *et al.*, 2002).

Por último, é ainda de referir o robô humanóide Johnnie cujo objectivo é conseguir atingir fases de corrida no espaço tridimensional (Pfeiffer, *et al.*, 2003). No entanto, no estado de desenvolvimento em que este robô se encontra ainda só consegue andar a uma velocidade máxima de $2,4 \text{ kmh}^{-1}$ (Lohmeier, *et al.*, 2004).

2.3.3 Robôs com Quatro ou mais Pernas

Após se ter visto o estado actual de desenvolvimento dos robôs bípedes, nesta secção vão ser apresentados os principais resultados do desenvolvimento de sistemas artificiais de locomoção com mais de duas pernas.

Uma vez que a esmagadora maioria dos robôs com pernas já desenvolvidos se inserem nesta categoria, nesta subsecção vão ser referidos unicamente três veículos com pernas que podem ser considerados casos de sucesso, tendo em vista os objectivos de projecto propostos. Nas secções seguintes, em que se abordarão os robôs com pernas para aplicações específicas e as linhas de investigação que se encontram a ser seguidas no desenvolvimento deste tipo de sistemas, serão apresentados vários outros exemplos de sistemas artificiais de locomoção com quatro ou mais pernas.

O primeiro robô a ser referido é o Adaptive Suspension Vehicle (ASV). Este veículo foi desenvolvido na Ohio State University, conjuntamente com a Universidade do Wisconsin e o Environmental Research Institute of Michigan, tendo sido concluído no final de 1985 (Figura 2.14) (Song e Waldron, 1989).



Figura 2.14: Robô hexápode ASV.

O veículo, com um peso de 2720 kg e um comprimento de 5,6 m, apresenta um accionamento hidráulico alimentado a partir de um motor de combustão interna. Para a sua operação é necessário um operador humano que efectua as funções de condução e supervisão do estado do veículo. O operador controla a velocidade e a direcção de locomoção do veículo através de um *joystick*, mas o controlo individual de cada perna é assegurado por um computador central. O ASV dispõe também de um radar óptico para estudar o terreno à sua frente e decidir sobre a colocação dos pés da frente, uma vez que implementa um padrão de locomoção seguidor de líder contínuo.

Como principais características, são de referir uma capacidade de carga de 250 kg, a possibilidade de vencer uma inclinação máxima de 60%, ultrapassar valas com uma largura de 1,8 m, subir degraus verticais com um máximo de 1,65 m, ultrapassar paredes isoladas com uma altura de 1,35 m e atingir uma velocidade máxima de $2,3 \text{ ms}^{-1}$ em terrenos regulares.

Um outro robô que pode ser considerado um caso de sucesso é o DANTE. O Robô DANTE II (Figura 2.15), desenvolvido pelo CMU Field Robotics Center, tem como aplicação a exploração de vulcões, tendo sido utilizado com relativo sucesso na exploração do vulcão do Monte Spurr (Aleutian Range) no Alasca em Julho de 1994 (Bares e Wettergreen, 1999).

Este octópode é accionado electricamente, sendo a alimentação fornecida externamente através de um cabo que serve também de estrutura de comunicações e de cabo de resgate. Assim, o DANTE II é capaz de descer as paredes da cratera de uma forma similar ao *rappel*, a fim de recolher e analisar os gases a altas temperaturas do solo da cratera.



Figura 2.15: Robô octópode DANTE II.



Figura 2.16: Robô hexápode Walking Harvester.

Para além de contribuir para o avanço da vulcanologia, um outro objectivo primário deste robô é demonstrar a possibilidade da exploração robótica de ambientes extremos, tais como os encontrados em superfícies planetárias.

Por último, é de referir o Walking Harvester (Figura 2.16). Este hexápode tem vindo a ser desenvolvido pela Plustech Oy Ltd para trabalhos nas florestas (HTTP#2).

Este veículo dispõe de três gdl em cada perna com accionamento hidráulico, alimentado a partir de um motor diesel, permitindo-lhe alcançar uma velocidade máxima de 1 ms^{-1} . Para a sua condução é necessário um operador humano que controla a máquina através de um *joystick*. Apesar de ainda não se encontrar disponível comercialmente, este protótipo já foi distinguido com vários prémios.

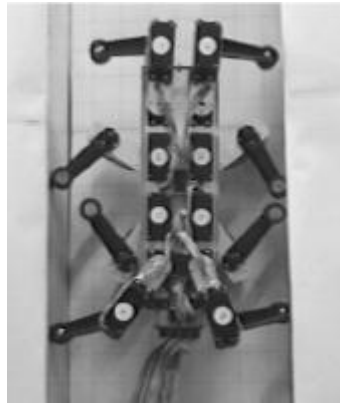


Figura 2.17: Pipe Climbing Robot.

2.4 Robôs com Pernas para Aplicações Específicas

Após terem sido apresentados vários exemplos de sistemas artificiais de locomoção, com diferente número de pernas, passa-se agora a analisar duas áreas para as quais têm sido desenvolvidos robôs com locomoção por pernas com características específicas, caso dos robôs para inspeção de tubagens e dos robôs trepadores.

2.4.1.1 Robôs para Inspeção de Tubagens

Uma área potencial de aplicação de robôs com locomoção por pernas é a inspeção de tubagens. Já existem alguns robôs para a realização destas tarefas, que apresentam locomoção por rodas, por lagartas ou que flutuam no meio onde estão inseridos. No entanto, os sistemas que recorrem a estes meios de locomoção sofrem de problemas relacionados com a falta de tracção e com a dificuldade em ultrapassar obstáculos ou vencer inclinações pronunciadas nas tubagens (Hertzberg, *et al.*, 1998).

Como exemplo de robôs vocacionados para tarefas de inspeção de tubagens e canalizações, recorrendo a pernas para a sua locomoção, pode referir-se o Pipe Climbing Robot (Figura 2.17). Este robô, desenvolvido pela SIEMENS A.G. em 1995, apresenta um accionamento eléctrico, dispondo de oito pernas, cada uma delas com dois gdl.

Para a locomoção, empurra duas pernas opostas contra a superfície interna dos tubos, de forma a ficar preso, e desloca depois o corpo no sentido do movimento. Apesar de apresentar uma velocidade máxima de $0,3 \text{ ms}^{-1}$ só dispõe de uma capacidade de carga de 700 g.

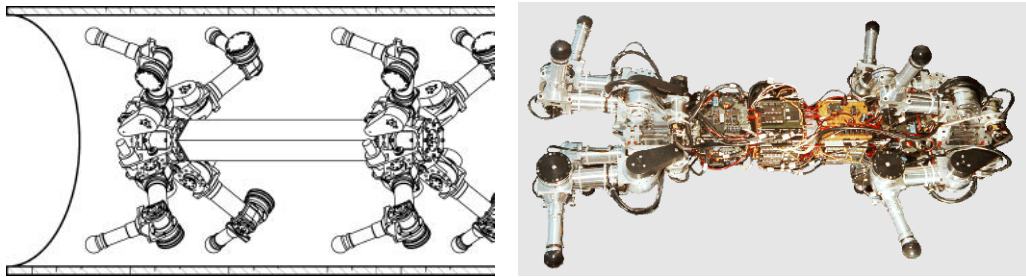


Figura 2.18: Robô para inspeção de tubagens MORITZ.

Também nesta perspectiva, tem vindo a ser desenvolvido na Universidade Técnica de Munique (TUM) o robô MORITZ (Figura 2.18), capaz de trepar pelo interior de tubos com diferentes inclinações (desde a horizontal até à vertical) e com curvas e de ultrapassar diferentes estruturas de junções entre tubos (Zagler e Pfeiffer, 2003).

Este robô apresenta oito pernas (quatro em cada extremo do corpo), dispendo de três gdl, um passivo e dois accionados através de motores CC. O princípio utilizado para a locomoção é idêntico ao do Pipe Climbing Robot. Alcança uma velocidade máxima de $0,1 \text{ ms}^{-1}$ dispendo de uma capacidade de carga de 15 kg.

2.4.1.2 Robôs Trepadores

Uma outra categoria de robôs com locomoção por pernas é a dos robôs trepadores. As motivações para o seu desenvolvimento são múltiplas. Estes robôs podem ser utilizados em tarefas de inspeção técnica e diagnóstico de falhas ou avarias em ambientes perigosos, tais como o exterior de edifícios altos, centrais nucleares ou oleodutos, reservatórios, indústrias químicas, petrolíferas e de gás, aviões, navios, na reparação e manutenção na construção civil, em acções de prevenção e combate a incêndios ou para operações de limpeza em arranha-céus e para transporte de cargas em edifícios (Minor, *et al.*, 2000; Elkmann, *et al.*, 2002).

Alternativas mais simples aos robôs com pernas, para estas aplicações, recorrem geralmente a segmentos deslizantes, com ventosas que se agarram às superfícies, para efectuar a locomoção.

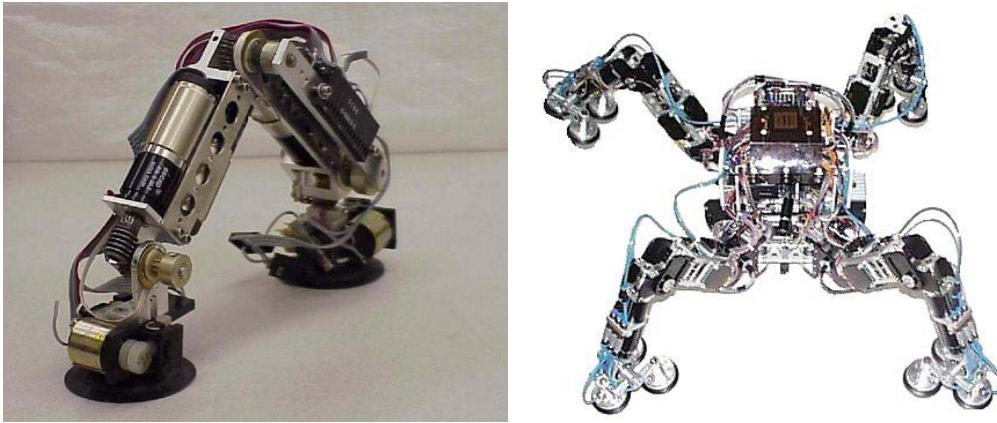


Figura 2.19: Robôs trepadores RAMR1 (esquerda) e MRWALLSPECT-III (direita).

As estruturas com duas a oito pernas são predominantes para a realização destas tarefas. A adoção de um maior número de membros fornece suporte redundante e, frequentemente, aumenta a capacidade de carga e a segurança. Estas vantagens são alcançadas a custo de um aumento da complexidade, tamanho e peso. Logo, quando o tamanho e a eficiência são críticos, uma estrutura com peso e complexidade mínimas é mais adequada. Por estes motivos a estrutura bípede é uma excelente candidata.

De momento existem numerosos robôs bípedes com capacidade para trepar em superfícies com diferentes inclinações (Minor, *et al.*, 2000). A título de exemplo, Tummala, *et al.* (2002) propõem o recurso a um robô bípede trepador para efectuar tarefas de inspecção em superfícies com diferentes inclinações. Este robô, denominado RAMR1 (Reconfigurable Adaptable Miniature Robot) dispõe de pés com ventosas para se agarrar às superfícies onde se desloca (Figura 2.19). A utilização de uma estrutura sub-actuada (o robô apresenta cinco gdl actuados unicamente por três motores) leva a uma reduzida dimensão e a um baixo peso. Além disso, o RAMR1 apresenta não só a capacidade de se deslocar sobre superfícies com diferentes inclinações, mas também a de trepar por paredes e a de andar em tectos.

Como alternativas para segurança e capacidade de carga acrescidas recorre-se tipicamente a quadrúpedes e robôs com maior número de pernas. O controlo destes robôs é mais complicado e têm sido, tipicamente, robôs muito grandes.

Como exemplo de robôs com esta estrutura, apresenta-se na Figura 2.19 o robô MRWALLSPECT-III (Multifunctional Robot for WALL inSPECTion – Version III) (Kang, *et al.*, 2003).

Este robô, projectado para transportar uma câmara de vídeo e uma ferramenta de ultra-sons (destinada a efectuar testes não destrutivos em estruturas industriais), dispõe de quatro pernas. Cada uma delas possui três gdl accionados por motores CC e um gdl passivo, na junta do tornozelo, implementado recorrendo a uma junta esférica.

A força de sucção, para manter o robô agarrado às estruturas em que se desloca, é garantida por três ventosas colocadas em cada pé e dispostas simetricamente, a que se juntam outras seis ventosas colocadas na parte inferior do corpo para auxiliar a sucção. O vácuo para garantir a sucção é gerado por quatro bombas de vácuo que se encontram ligadas em paralelo.

Quanto às suas capacidades de locomoção, este robô está preparado para trepar por paredes e superfícies com diferentes inclinações e para mudar, de forma autónoma, de uma dada superfície para outra (por exemplo, do chão para uma parede e de uma parede para o tecto), sendo capaz de negociar junções de superfícies com a forma côncava ou convexa.

2.5 Linhas de Investigação Seguidas no Desenvolvimento de Sistemas de Locomoção

Depois de apresentadas duas categorias de aplicações para as quais têm vindo a ser desenvolvidos sistemas artificiais de locomoção com características específicas, passa-se a abordar algumas das aproximações que têm vindo a ser seguidas recentemente para a implementação de robôs com locomoção por pernas.

2.5.1 Aproximações Biológicas

Constata-se facilmente que mesmo os robôs mais avançados são francamente inferiores aos homólogos biológicos. A locomoção de um animal é muito mais versátil, eficiente e elegante. Por estes motivos é útil considerar os sistemas biológicos de controlo de forma a aplicar estes mecanismos no controlo das pernas de robôs mecânicos.

Assim, tem vindo a investir-se no desenvolvimento de robôs que sejam mímicas, o mais aproximadas possível de sistemas biológicos. Existem já mímicas mecatrónicas dos mais diversos animais tais como o grilo (Birch, *et al.*, 2000), a lagosta (Ayers, *et al.*, 2000a), a galinha (Mederreg, *et al.*, 2003), o gorila (Kajima, *et al.*, 2003; Davis, *et al.*, 2003) e o cão (Davis, *et al.*, 2003; Peng, *et al.*, 2003). Na Figura 2.20 apresenta-se o Lobster Robot que pretende ser uma mímica da lagosta.

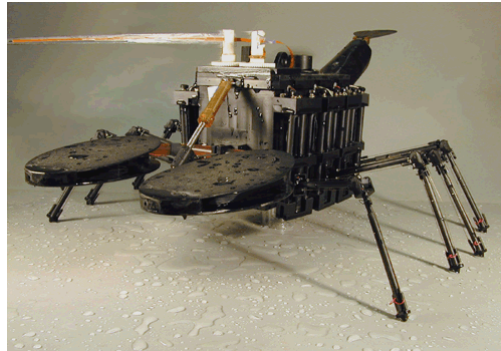


Figura 2.20: O Lobster Robot que pretende ser uma mímica da lagosta.

Outros autores, apesar de não efectuarem mímicas mecatrónicas dos animais, utilizam-nos como inspiração para a construção de robôs. Entre estes são de destacar os sistemas de locomoção baseados nos dinossauros (Takita, *et al.*, 2000; Takita, *et al.*, 2003), na aranha (Schulz, *et al.*, 2001), nas centopeias (Kim, *et al.*, 2002; Long, *et al.*, 2002), no polvo (Nakai, *et al.*, 2002), no veado (Berns, *et al.*, 2003), no escorpião (Klaassen, *et al.*, 2003) e no cão (Iida e Pfeifer, 2004).

Entre os animais que têm vindo a ser “copiados” destacam-se os insectos, nomeadamente o insecto-pau (Cruse, *et al.*, 1991; Pfeiffer, *et al.*, 1995; Kerscher, *et al.*, 2004) e a barata (Binnard, 1995; Nelson, *et al.*, 1997; Nelson e Quinn, 1998). Em particular, o insecto-pau (*Carausius Morosus*) é utilizado como modelo uma vez que se desloca com muita destreza em terreno irregular, apesar de apresentar uma estrutura cinemática bastante simples (Cruse, *et al.*, 1991). A isto, junta-se o facto de também existir disponível uma grande variedade de informação, resultante da investigação biológica, sobre o comportamento e o controlo do insecto-pau, que pode ser utilizada para a execução técnica de sistemas artificiais de locomoção baseados neste animal. Já a barata tem sido escolhida uma vez que apresenta capacidades notáveis de corrida (a barata *Americana Periplaneta* é considerada um dos animais terrestres mais rápidos, recorrendo à relação da velocidade / comprimento do corpo) e de transposição de obstáculos (Cham, *et al.*, 2002), a que se junta o facto de existir um razoável conhecimento sobre a sua biomecânica e o seu controlo.

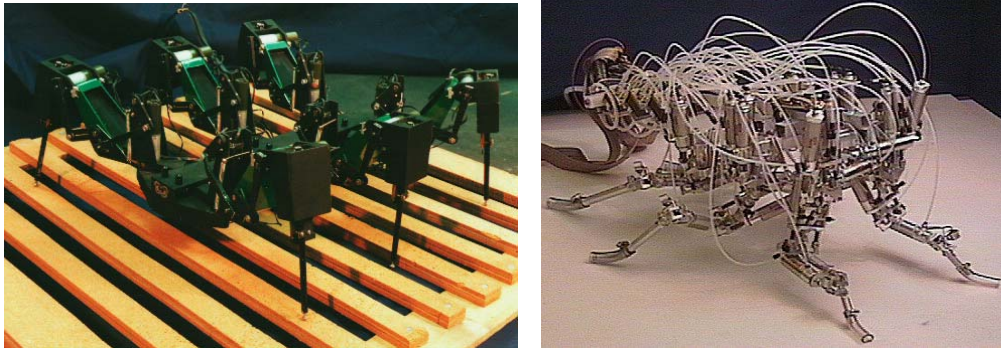


Figura 2.21: Robôs hexápodes CWRU II (esquerda) e CWRU III (direita).

Uma das instituições que tem estado mais activa neste campo é a Case Western Reserve University (CWRU) que já desenvolveu vários protótipos de robôs que pretendem ser cópias mecânicas de insectos. O CWRU Robot II é um desses protótipos e representa uma mímica do insecto-pau (Figura 2.21). Trata-se de um hexápode com três gdl activos rotacionais (accionados através de motores CC) e um gdl passivo translaccional (através de uma mola pré-tensionada) em cada perna. Este robô é capaz de implementar uma variedade de padrões de locomoção, baseados nos dos insectos, e pode atravessar terrenos irregulares utilizando um controlador distribuído baseado nos mecanismos que se pensam ser os responsáveis pela coordenação das pernas no insecto-pau.

Por outro lado, o CWRU Robot III (Nelson, *et al.*, 1997; Nelson e Quinn, 1998) pretende ser uma mímica (escala 17:1) da barata *Blaberus Discoidalis* (Figura 2.21). Este robô apresenta um accionamento através de cilindros pneumáticos de duplo efeito, montados de forma a garantirem forças opostas em cada junta. Ao contrário do CWRU Robot II, cujas pernas são todas iguais, o projecto do CWRU Robot III reflecte o facto de as pernas da barata terem funções e estruturas diferentes. Assim, as pernas dianteiras apresentam cinco gdl, as do meio quatro e as traseiras três gdl.

A CWRU encontra-se agora a desenvolver dois novos protótipos (CWRU Robot IV e CWRU Robot V), também baseados na barata *Blaberus Discoidalis* e com uma configuração semelhante ao modelo anterior, mas com uma actuação pneumática baseada em “actuadores musculares” (actuadores de McKibben ou músculos artificiais de McKibben) (Colbrunn, 2000; Kingsley, *et al.*, 2003). A principal diferença entre estes dois protótipos reside no seu tamanho, sendo o modelo CWRU Robot V maior que os seus antecessores.

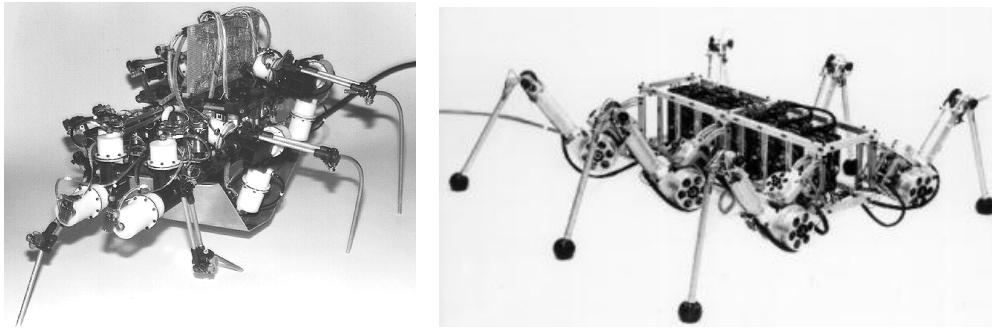


Figura 2.22: Robôs hexápodes Boadicea (esquerda) e TUM (direita).

O Massachusetts Institute of Technology (MIT) tem também desenvolvido robôs baseados em modelos biológicos. O Boadicea (Figura 2.22) foi um dos robôs construídos e apresenta também alguns aspectos baseados na barata *Blaberus Discoidalis* (Binnard, 1995). Este hexápode apresenta três gdl nas pernas traseiras e do meio e dois gdl nas pernas da frente. Todas as pernas apresentam um mecanismo pantográfico e os actuadores consistem em cilindros pneumáticos de duplo efeito.

Um outro exemplo de um robô baseado no insecto-pau é o robô TUM desenvolvido na Universidade Técnica de Munique (Figura 2.22). Este robô hexápode apresenta a geometria e cinemática das pernas, os padrões de locomoção e o sistema de controlo baseados nas pernas do insecto-pau *Carausius Morosus* (Pfeiffer, *et al.*, 1995). Cada perna deste robô executa o planeamento da sua trajectória de uma forma quase autónoma, recorrendo a uma estrutura de controlo hierárquica baseada em três níveis. A coordenação entre as pernas é conseguida através da troca de informação sobre o estado de cada uma delas.

Por último, convém referir o robô AirInsect. Este robô, baseado no insecto-pau, apresenta a particularidade de o seu accionamento ser efectuado recorrendo a músculos artificiais de McKibben (Kerscher, *et al.*, 2004). Os músculos artificiais encontram-se dispostos em pares, de acordo com o princípio antagonista, fornecendo desta forma a força necessária para o movimento das juntas. De forma a reduzir o peso do robô ao mínimo, a sua estrutura é construída recorrendo a tubos de fibra de carbono.



Figura 2.23: Robôs com accionamento reduzido Hyperion (esquerda) e SCOUT-I (direita).

2.5.2 Robôs com Mecanismos Simples

Em todas as aplicações robóticas, a complexidade mecânica é uma das maiores fontes de avarias e aumenta consideravelmente o custo.

Assim, e contrariamente aos robôs vistos anteriormente, uma outra linha de investigação, preocupada com os problemas que o grande número de gdl impõem aos robôs com pernas, como sejam os problemas de custo, peso, dificuldade de controlo e falta de fiabilidade, aposta no desenvolvimento de robôs que se afastem das aproximações biológicas, mantendo no entanto o conceito de perna para a locomoção. Esta linha de desenvolvimento aposta na simplicidade mecânica e portanto promove a robustez.

Yoneda (2001) propõe uma teoria sobre este assunto e vários exemplos de robôs que apresentam accionamento reduzido, entre os quais o Hyperion (Figura 2.23). Estes robôs têm provado ser tão ou mais capazes do que os vistos anteriormente, no que diz respeito à capacidade de negociar terrenos difíceis e obstáculos.

Buehler, *et al.* (1998) apresentam um robô quadrúpede, denominado SCOUT-I, com um único gdl por perna (situado na anca e actuado por um servo motor) e que é capaz de andar a direito ou curvar, subir degraus e correr com controlo em malha aberta (Buehler, *et al.*, 1999). Posteriormente foi desenvolvida uma nova versão deste robô, denominado SCOUT-II, em que as pernas passaram a apresentar um outro gdl por perna, sendo este gdl adicional passivo e prismático (Papadopoulos e Buehler, 2000) ou rotacional (Hawker e Buehler, 2000).



Figura 2.24: Robô hexápode Sprawlita.

Outra aproximação que tem vindo a ser seguida inspira-se nos princípios específicos da locomoção animal, mas onde os robôs apresentam unicamente uma mímica funcional dos animais em que se basearam (Quinn, *et al.*, 2002; Cham, *et al.*, 2002; Allen, *et al.*, 2003). De acordo com os autores que defendem esta ideia, não é prático tentar um mapeamento directo entre as morfologias, actuadores ou esquemas de controlo, uma vez que as ferramentas que a biologia utiliza para construir sistemas são fundamentalmente diferentes daquelas que são utilizadas pelos engenheiros. Assim, defendem que deve procurar-se inspiração nos seres biológicos, devem compreender-se os princípios funcionais da locomoção animal que a tornam eficaz e estes devem ser depois correctamente adaptados para serem aplicados ao projecto de robôs.

Como exemplo, verifica-se que as pernas dos animais são complacentes e a eficiência energética resultante permite-lhes andar durante períodos de tempo muito maiores do que se as suas pernas fossem rígidas. A aplicação prática destas ideias na robótica de locomoção não é nova. O CWRU Robot II, o RHex e vários bípedes desenvolvidos por Gill Pratt possuem complacência nas suas pernas. No entanto, os animais apresentam a vantagem de poderem modificar a rigidez dos seus músculos e daí a complacência das suas pernas, de forma que conseguem deslocar-se eficientemente a diferentes velocidades.

Tendo por base estas ideias, Cham, *et al.* (2002) desenvolveram um robô hexápode, denominado Sprawlita (Figura 2.24) que se baseia nos seguintes princípios abstractos da locomoção da barata: postura auto-estabilizadora, funções diferentes para as pernas, estrutura passiva visco-elástica, controlo por avanço em malha aberta e construção integrada.

O robô resultante apresenta seis gdl rotacionais passivos, correspondentes à ligação complacente da anca da perna com o corpo do robô. Por sua vez, cada uma das pernas apresenta um outro gdl, prismático, accionado por um cilindro pneumático. Cada uma destas pernas pode ser rodada, recorrendo a um servomotor, de forma a possibilitar variar a direcção em que a perna exerce força sobre o solo. Desta maneira conseguem-se implementar diferentes funções para as diferentes pernas do robô, tais como travar e acelerar. Toda a construção deste robô é integrada, estando os servomotores, a cablagem e os conectores integrados dentro do corpo. Por seu lado, o corpo foi construído recorrendo às técnicas de fabrico por deposição de material, frequentemente utilizadas para prototipagem rápida.

Graças à utilização destes princípios na sua construção, o robô apresenta uma robustez fora do normal, para robôs desta dimensão, bem como a capacidade de se deslocar em terrenos regulares com uma velocidade próxima dos seis comprimentos do corpo por segundo (Đorđević, *et al.*, 2004). O sistema é também capaz de se deslocar sobre solos muito díspares e em terrenos com obstáculos, sem grande diminuição da velocidade e sem o recurso à adaptação do seu padrão de locomoção.

Uma outra aproximação é defendida por Velimirović, *et al.* (1998). Estes autores propuseram o desenvolvimento de robôs com o recurso a Wheel-With-Legs (WWL) para a locomoção em terrenos difíceis. Estas WWL são o equivalente aos raios de uma roda e, de acordo com estes autores, o uso das WWL representa uma alternativa atractiva uma vez que se trata de uma solução de compromisso, na qual a velocidade de locomoção intrínseca aos sistemas com pernas pode ser aumentada e a capacidade de tracção dos sistemas com rodas pode ser melhorada. Eles abandonam a ideia de imitar a locomoção animal e tentam incorporar as vantagens de ambas as estruturas referidas (pernas e rodas). A grande melhoria passa pela eliminação do movimento oposto das pernas que é necessário na fase de transferência do ciclo de locomoção dos robôs com pernas ordinários.

Uma abordagem ligeiramente diferente é apresentada por Saranli, *et al.* (2001), que juntam a ideia do princípio funcional da locomoção animal com a simplificação da ideia das Wheel-With-Legs. Estes autores descrevem um robô hexápode dinamicamente estável, denominado RHex (Figura 2.25), que só dispõe de seis gdl actuados nas ancas de cada “perna”, e cujo

projecto teve por base as ideias da simplicidade mecânica assim como da autonomia computacional e energética.

Este robô consiste num corpo rígido com seis pernas com complacência, cada uma delas dispondo unicamente de um gdl rotacional independente. Os pontos de junção das pernas assim como as orientações das juntas encontram-se fixas em relação ao corpo e a complacência das pernas é essencialmente no gdl esférico não actuado. Esta configuração permite a utilização de um padrão Trípole na locomoção para a frente e para trás e a simetria do sistema permite operação idêntica com o corpo “de pernas para o ar”.

Apesar da simplicidade do seu projecto, este robô consegue andar, correr e curvar de forma dinamicamente estável, recorrendo a estratégias de controlo em malha aberta, nomeadamente variando a taxa de recirculação das pernas e a estrutura da sincronização entre pernas. Este robô sofreu posteriormente várias evoluções, apresentando actualmente a capacidade de se deslocar em planos inclinados e de adoptar o padrão de locomoção dinâmico *Pronk* (Komsuoğlu, *et al.*, 2001), o que lhe permite atingir velocidades mais elevadas quando comparado com a adopção de padrões de locomoção estaticamente estáveis, bem como subir e descer escadas (Moore, *et al.*, 2002; Campbell e Buehler, 2003).

Quinn, *et al.* (2002) apresentam o robô Whegs I que recorre a um conceito semelhante de locomoção, apesar da implementação apresentar aspectos ligeiramente diferentes (Figura 2.25). O projecto deste robô foi inspirado nos princípios abstractos da locomoção extraídos de estudos efectuados sobre a barata. Os seus seis apêndices, designados Whegs (termo resultante da contracção das palavras *wheel* e *legs*), consistem de três raios igualmente espaçados.



Figura 2.25: Robôs com accionamento reduzido RHex (esquerda), Whegs I (centro) e Mini-Whegs (direita).

As WWL, descritas atrás, podem ser vistas como as precursoras das Whegs, apresentando ambas as tecnologias características e vantagens semelhantes. No entanto, pretendia-se que as WWL tivessem comprimentos variáveis (deveriam ser actuadas individualmente) contrariamente às Whegs, que são passivas.

Os mecanismos que equipam este robô permitem-lhe mover-se sobre diferentes tipos de terreno e ultrapassar pequenos obstáculos de uma forma similar a uma barata. Este robô utiliza unicamente um motor de corrente contínua para a propulsão e dois pequenos servos para a direcção. A utilização de complacência passiva nos seus eixos permite que o seu padrão de locomoção nominal Trípode se adapte a terrenos irregulares e evolua para a co-activação para trepar obstáculos. O controlo básico da locomoção é implementado no seu projecto mecânico. Um benefício desta simplicidade mecânica é que o sistema de controlo também é simplificado. A principal desvantagem é a sua reduzida altura ao solo.

De acordo com os seus autores, o robô Whegs I é mais rápido do que qualquer outro robô com pernas de tamanho similar e pode trepar sobre obstáculos maiores do que veículos com rodas de dimensão similar. No entanto, também apresenta desvantagens, fruto do projecto de um robô com estas simplificações. A existência de três raios por perna impõe dificuldades quando o robô necessita de passar por baixo de obstáculos. Outra preocupação está relacionada com o facto de que a existência de múltiplos raios numa única Whieg podem levar a que estes fiquem enredados em certos tipos de terrenos. Para além disto, o robô não pode mudar a postura do seu corpo ao passo que os insectos fazem bom uso desta característica ao trepar e ao rastejar.

Uma versão posterior deste robô, denominada Whegs II, ultrapassou este problema (Allen, *et al.*, 2003). Este robô possui uma junta de flexão do corpo accionada por um servomotor bidireccional. Esta junta permite ao robô Whegs II implementar dois comportamentos observados nas baratas durante a transposição de obstáculos: por um lado, permite elevar a parte frontal do corpo, em antecipação à subida de um degrau, como forma de permitir às pernas da frente terem um alcance superior na direcção vertical; por outro, permite descer a parte frontal do corpo, após trepar a um obstáculo, como forma de manter o contacto entre as pernas da frente do robô e a superfície superior do obstáculo.



Figura 2.26: Robô com locomoção mista Gorilla Robot II.

Foi também introduzida uma versão miniaturizada deste robô, só com quatro Whegs, denominada Mini-Whegs (Morrey, *et al.*, 2003). Esta última versão apresenta como principais características diferenciadoras relativamente à versão base, o seu tamanho reduzido (9 cm de comprimento) e a capacidade de saltar sobre obstáculos que apresentem alturas até 22 cm (Figura 2.25).

2.5.3 Robôs com Locomoção Mista e Híbrida

Têm também vindo a ser efectuados alguns estudos na área da locomoção mista, isto é, envolvendo robôs que apresentam mais do que uma forma de locomoção alternativa e também na área da locomoção híbrida, ou seja robôs com pernas e cujos pés dispõem de rodas ou lagartas. Através da combinação de dois ou mais tipos de locomoção diferentes, os sistemas móveis apresentam as vantagens inerentes a cada um destes tipos de locomoção.

Relativamente ao primeiro caso, um exemplo concreto é o do Gorilla Robot II (Kajima, *et al.*, 2003) apresentado na Figura 2.26. Este robô, inspirado na locomoção dos primatas, apresenta a possibilidade de se deslocar sobre duas pernas (locomoção bípede), sobre as duas pernas e com os nós dos dedos (locomoção quadrúpede) e ainda de saltar entre pontos suspensos, como se fosse um primata a saltar entre ramos de árvores. Com estas capacidades, este robô pode seleccionar um de entre três possíveis modos de locomoção, dependendo do ambiente em que se encontra.

Quanto ao segundo caso, a locomoção híbrida, foram já referidas na secção 2.1 deste capítulo as vantagens da locomoção com pernas e da locomoção com rodas. Convém lembrar que, de entre os vários tipos de locomoção, a locomoção com rodas é geralmente superior à

locomoção com pernas ou com lagartas, em terrenos planos, dos pontos de vista de eficiência energética e de velocidade de locomoção. No entanto, estes últimos modos de locomoção apresentam um potencial superior para negociar obstáculos.

Assim, o ideal seria dispor de veículos que recorressem a duas, ou mais, destas tecnologias e fossem capazes de as utilizar em função do tipo de terreno em que se deslocam. De acordo com Matsumoto, *et al.* (2002), a combinação de pernas e rodas é potencialmente vantajosa para realizar a locomoção de forma eficiente em superfícies planas e também para negociar irregularidades artificiais, tais como escadas ou degraus. Em superfícies regulares o robô utiliza as rodas como forma de locomoção. Quando necessita de percorrer terrenos irregulares, ou ultrapassar obstáculos, o robô bloqueia as rodas (passando estas a funcionar como as “solas” dos pés) e usa as pernas como forma de locomoção.

O Biped Type Leg-Wheeled Robot (Figura 2.27) é um robô que adota este princípio de locomoção (Matsumoto, *et al.*, 1999). Este robô bípede apresenta duas pernas telescópicas com rodas nas extremidades accionadas electricamente. Durante a locomoção em superfícies planas desloca-se recorrendo às rodas e mantendo a estabilidade estática. Quando encontra obstáculos bloqueia as rodas e passa a deslocar-se utilizando as pernas, adoptando uma estratégia de estabilidade dinâmica. Uma versão evoluída deste robô, apresentada por Matsumoto, *et al.* (2002), apresenta três modos de locomoção: modo de locomoção com quatro rodas, modo de locomoção com duas rodas e modo de locomoção para negociar escadas com aproximadamente a mesma escala das geralmente utilizadas pelos humanos.

Um outro exemplo deste tipo de veículos é apresentado por Ylönen e Halme (2002). Estes autores descrevem o robô híbrido WorkPartner, em que a locomoção pode efectuar-se recorrendo quer a rodas (quando o terreno é relativamente plano), quer a pernas (quando o terreno é muito irregular), aproveitando assim as vantagens de cada um destes meios de locomoção.

Ota, *et al.* (2002) vão ainda mais longe ao apresentarem um robô híbrido com seis gdl e com a capacidade para se deslocar por saltos, com pernas e com rodas e ainda com a capacidade de realizar tarefas com um braço robotizado.



Figura 2.27: Robôs híbridos Biped Type Leg-Wheeled Robot (esquerda) e WorkPartner (direita).

Os sistemas híbridos acabados de ver possuem um problema de monta que consiste no seu peso elevado. Estes veículos híbridos estão equipados com rodas actuadas e sistemas de direcção e travagem. As rodas actuadas são geralmente muito pesadas e de dimensões apreciáveis uma vez que necessitam de actuadores e mecanismos de direcção e travagem. Conclui-se que a instalação destas rodas geralmente aumenta o peso total do veículo (que, já de si, costuma ser grande) limitando a sua versatilidade. Através da instalação de rodas passivas, ou castores, este problema pode ser evitado.

Tendo por base estas ideias, Hirose e Takeuchi (1996) descrevem o robô quadrúpede Roller-Walker, com locomoção híbrida recorrendo a rodas nas extremidades das pernas e no qual, ao contrário dos robôs vistos anteriormente, as rodas não são actuadas. O princípio pelo qual este robô se propulsiona durante a locomoção com rodas é o mesmo dos patinadores.

Como se pode ver na Figura 2.28, o Roller-Walker é um veículo com um mecanismo especial no pé, que se converte numa sola no modo de locomoção com pernas e numa roda no modo de locomoção por patinagem. Em terreno irregular este veículo desloca-se recorrendo às pernas e em terrenos relativamente regulares o veículo recorre às rodas e patina utilizando as suas rodas passivas. Este veículo tem sido progressivamente melhorado e dispõe já da capacidade de curvar enquanto se encontra a patinar (Endo e Hirose, 2000).

Por outro lado, Yokota, *et al.* (2003) propõem um robô quadrúpede híbrido que se desloca recorrendo a pernas e lagartas. Por último, é de referir o robô AZIMUT (Figura 2.29) que apresenta locomoção híbrida, podendo recorrer a rodas, lagartas ou pernas e que, quando

combinadas, permitem a este robô a adoção de diferentes modos de locomoção (Michaud, *et al.*, 2003).

2.5.4 Robôs Aplicados à Área do Entretenimento

Uma das áreas em que os robôs com pernas têm vindo a conhecer bastante divulgação é na área do entretenimento. Um dos exemplares com maior sucesso é o AIBO da SONY (Figura 2.30), um quadrúpede inspirado no cão. Apesar de se tratar de um robô dedicado ao entretenimento é consideravelmente complexo, pois dispõe de um total de 20 gdl e de uma grande variedade de sensores (Fujita e Kitano, 1998).

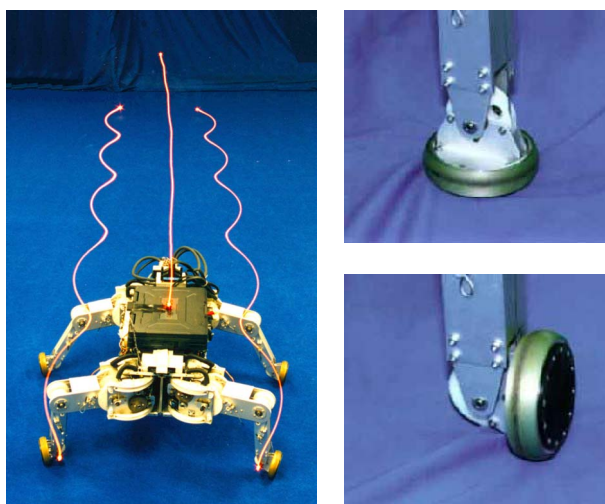


Figura 2.28: Robô híbrido Roller-Walker.

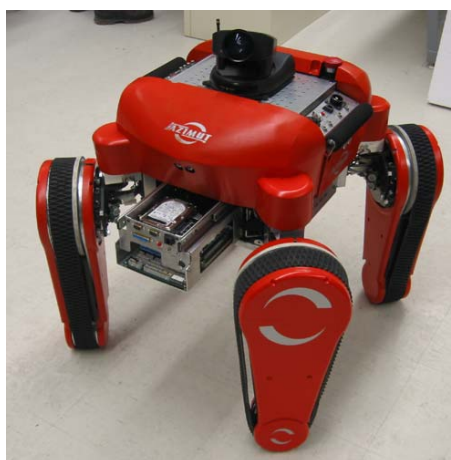


Figura 2.29: Robô híbrido AZIMUT.



Figura 2.30: Robôs para entretenimento: o quadrúpede AIBO (esquerda) e o humanóide QRIO (direita).

A SONY dispõe também de um robô bípede para a área do entretenimento, tendo apresentado em Novembro de 2002 a versão denominada SDR-4X (SONY Dream Robot), entretanto ligeiramente melhorada e rebaptizada em Setembro de 2003 de QRIO – Quest for cuRIOsity (Figura 2.30) ([HTTP#3](http://www.sony.com)). O SDR-4X, apesar de ser um robô de dimensões relativamente reduzidas, comparativamente a outros robôs bípedes desenvolvidos (apresenta uma altura de 58 cm e 6,5 kg de peso), possui 28 gdl distribuídos pelo seu corpo. Na cabeça dispõe de duas câmaras de vídeo CCD (*Charge Coupled Device*) para o sistema de visão artificial estéreo e de sete microfones para o sistema de processamento de som (Kuroki, *et al.*, 2003). O objectivo deste robô é ser um parceiro para o ser humano, capaz de se comportar de forma espontânea e de compreender comandos dados pela voz do dono (Fujita, *et al.*, 2003). Neste robô o padrão de locomoção é gerado em tempo real, o que lhe permite andar em terrenos irregulares, deslocar-se de forma adaptável quando sujeito a uma força externa, cair de forma controlada, recorrendo a movimentos pré-programados para absorver o choque, e levantar-se de novo.

2.6 Robôs com Características Inovadoras

Nas secções anteriores não foram mencionados diversos robôs com locomoção através de pernas, mas que apresentam diversas outras características inovadoras, quer no campo de aplicação a que se destinam, quer na forma como adoptam a locomoção.

Nesta ordem de ideias, podem referir-se os micro-robôs com locomoção por pernas, destinados à realização de tarefas à micro e nano escala (Ambroggi, *et al.*, 1997; Martel, *et*

al., 2001; Bonvilain e Chaillet, 2003), os robôs com locomoção por pernas baseados em sistemas modulares (Støy, *et al.*, 2003; Zhang, *et al.*, 2003; Kurokawa, *et al.*, 2003) e os robôs com locomoção por pernas que se baseiam em estratégias de actuação alternativas, como por exemplo o recurso a actuadores IPCM (Ionic Polymer Metal Composite) (Kim, *et al.*, 2003).

Por seu lado, Nakai, *et al.* (2002) descrevem a implementação de um robô quadrúpede que, em virtude de poder deformar-se, designam de metamórfico. Este robô, cujo princípio de funcionamento é inspirado no polvo, possui pernas construídas numa liga com um baixo ponto de fusão. Quando estas são aquecidas literalmente “derretem”, deformando-se e, deste modo, adaptando-se ao terreno em que se estão a deslocar. Podem mesmo adaptar-se a obstáculos e a objectos que o robô pretende agarrar. Arrefecendo as pernas, estas voltam ao estado rígido e o robô permanece com as pernas na forma dada até entrar num novo ciclo de aquecimento e arrefecimento das pernas.

2.7 Conclusões e Perspectivas de Desenvolvimento Futuro

Do exposto neste capítulo, verifica-se que os sistemas artificiais de locomoção existentes na actualidade apresentam algumas limitações importantes, entre as quais são de destacar a sua reduzida autonomia energética, a falta de capacidade computacional que permita, em tempo real, implementar sistemas de controlo complexos e a comunicação com o robô, sempre que os sistemas de comando e controlo não se encontram no próprio robô a controlar.

Conclui-se ainda que os sistemas de locomoção da nova geração são caracterizados pela optimização dos sistemas existentes: melhores sistemas de actuação (Sugahara, *et al.*, 2003; So, *et al.*, 2003; Hurst, *et al.*, 2004), sistemas sensoriais mais complexos e computadores mais poderosos. No entanto, existe ainda um longo caminho a percorrer até que estes sistemas possuam capacidades comparáveis às dos sistemas biológicos.

Adicionalmente a estas dificuldades de implementação que se têm vindo a sentir, existem ainda algumas questões que permanecem sem resposta, e cuja compreensão poderá contribuir para o aperfeiçoamento destes sistemas. Entre estas são de realçar:

- Como é que os animais mantêm a estabilidade?
- Que mecanismos de controlo utilizam os animais?

- Como obter os sinais de controlo para os actuadores das pernas que permitam ao robô manter uma postura fixa, andar ou correr arbitrariamente?
- Qual o princípio da coordenação dos movimentos durante a locomoção?

Referências

- ALLEN, Thomas J.; QUINN, Roger D.; BACHMANN, Richard J.; RITZMANN, Roy E.. (2003). “Abstracted Biological Principles Applied With Reduced Actuation Improve Mobility of Legged Vehicles”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1370 – 1375.
- AMBROGGI, F. De; FORTUNA, L.; MUSCATO, G.. (1997). “PLIF: Piezo Light Intelligent Flea New Micro-Robots Controlled By Self-Learning Techniques”. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1767 – 1772.
- ANON. (1967). *Logistical Vehicle Off-Road Mobility*. Project TCCO 62-5; U. S. Army Transportation Combat Developments Agency; Fort Eustis, Va..
- AYERS, Joseph; WITTING, Jan; OLCOTT, Chris; MCGRUER, Nicol; MASSA, Donald. (2000a). “Lobster Robots”. In: *Proceedings of the International Symposium on Aqua Biomechanisms*.
- AYERS, Joseph; WITTING, Jan; WILBUR, Cricket; ZAVRACKY, Paul; MCGRUER, Nicol; MASSA, Donald. (2000b). “Biomimetic Robots for Shallow Water Mine Countermeasures”. In: *Proceedings of the Autonomous Vehicles in Mine Countermeasures Symposium*.
- BARES, John E.; WETTERGREEN, David S.. (1999). “DANTE II: Technical Description, Results, and Lessons Learned”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 18; No. 7; pp 621 – 649.
- BARES, John; HEBERT, Martial; KANADE, Takeo; KROTKOV, Eric; MITCHELL, Tom; SIMMONS, Reid; WHITTAKER, William. (1989). “Ambler: An Autonomous Rover for Planetary Exploration”. *IEEE Computer*. Vol. 6; pp. 18 – 26.
- BEKKER, M. G.. (1960). *Off-The-Road Locomotion*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
- BEKKER, M. G.. (1969). *Introduction to Terrain Vehicle Systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
- BERNS, K.; GRIMMINGER, F.; HOCHHOLDINGER, U.; KERSCHER, T.; ALBIEZ, J.. (2003). “Design and Control of a Leg for the Running Machine PANTER”. In: *Proceedings of the ICAR 2003 – 11th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 1737 – 1742.
- BINNARD, MICHAEL B.. (1995). *Design of a Small Pneumatic Walking Robot*. M. Sc. Thesis. Massachusetts Institute of Technology – Department of Mechanical Engineering.

BIRCH, Matthew C.; QUINN, Roger D.; HAHM, Geon; PHILLIPS, Stephen M.; DRENNAN, Barry; FIFE, Andrew; VERMA, Hiten; BEER, Randall D.. (2000). "Design of a Cricket Microrobot". In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1109 – 1114.

BONVILAIN, Agnès; CHAILLET, Nicolas. (2003). "Microfabricated Thermally Actuated Microrobot". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2960 – 2965.

BUEHLER, M.. (2001). "RePaC Design and Control – Cheap and Fast Autonomous Runners". In: *Proceedings CLAWAR'2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 579 – 585.

BUEHLER, M.; BATTAGLIA, R.; COCOSCO, A.; HAWKER, G.; SARKIS, J.; YAMAZAKI, K.. (1998). "SCOUT: A Simple Quadruped That Walks, Climbs and Runs". In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1707 – 1712.

BUEHLER, M.; COCOSCO, A.; YAMAZAKI, K.; BATTAGLIA, R.. (1999). "Stable Open Loop Walking in Quadruped Robots With Stick Legs". In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2348 – 2353.

CALDWELL, D. G.; WARREN, H. A.. (2001). "Is There a Future for Climbing and Walking Robotic Systems in Military Operations?". In: *Proceedings CLAWAR'2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 969 – 977.

CAMPBELL, D.; BUEHLER, M.. (2003). "Stair Descent in the Simple Hexapod 'RHex'". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1380 – 1385.

CHAM, Jorge G.; BAILEY, Sean A.; CLARK, Jonathan E.; FULL, Robert J.; CUTKOSKY, Mark R.. (2002). "Fast and Robust: Hexapedal Robots via Shape Deposition Manufacturing". *International Journal of Robotics Research*. Vol. 21; No. 10 – 11; pp. 869 – 882.

COLBRUNN, Robb William. (2000). *Design and Control of a Robotic Leg with Braided Pneumatic Actuators*. M. Sc. Thesis. Case Western Reserve University – Department of Mechanical and Aerospace Engineering.

COX, W.. (1970). "Big Muskie". *News in Engineering*. Ohio State University; pp. 25 – 27.

CRUSE, Holk; DEAN, Jeffrey; MÜLLER, Uwe; SCHMITZ, Josef. (1991). "The Stick Insect as a Walking Robot". In: *Proceedings of ICAR'91 – Fifth International Conference on Advanced Robotics*; pp. 936 – 940.

DAVIS, S.; TRESADERN, P.; CANDLERLE, J.; TSAGARAKIS, N. G.; DODD, P.; CALDWELL, Darwin G.. (2003). "The Biomimetic Design of 'Soft' Mechatronic Systems". In: *Proceedings of the ICAR 2003 – 11th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 720 – 725.

-
- DEBOLT, Christopher; O'DONNELL, Chris; FREED, Craig; NGUYEN, Tuan. (1997). "The BUGS 'Basic UXO Gathering System' Project for UXO Clearance & Mine Countermeasures". In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 329 – 334.
- DORĐEVIĆ, Goran S.; RAŠIĆ, Milan; SHADMEHR, Reza. (2004). "Locomotion Velocity Parameters of Biologically Inspired Hexapod Robot". In: *Proceedings of IAS-8: the 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems*; pp. 11 – 18.
- ELKMANN, Norbert; FELSCH, Torsten; SACK, Mario; SAENZ, José; HORTIG, Justus. (2002). "Innovative Service Robot Systems for Facade Cleaning of Difficult-to-Access Areas". In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 756 – 762.
- ENDO, Gen; HIROSE, Shigeo. (2000). "Study on Roller-Walker (Multi-Mode Steering Control and Self-Contained Locomotion)". In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2808 – 2814.
- FIORINI, Paolo. (2000). "Ground Mobility Systems for Planetary Exploration". In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 908 – 913.
- FLANNIGAN, W. C.; NELSON, G. M.; QUINN, R. D.. (1998). "Locomotion Controller for a Crab-Like Robot". In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 152 – 156.
- FRANK, A. A.. (1968). *Automatic Control Systems for Legged Locomotion*. USCEE Report No. 273; University of Southern California; Los Angeles, California.
- FUJITA, Masahiro. (2000). "Digital Creatures for Future Entertainment Robotics". In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 801 – 806.
- FUJITA, Masahiro; KITANO, Hiroaki. (1998). "Development of an Autonomous Quadruped Robot for Robot Entertainment". *Autonomous Robots*. Vol. 5; pp 7 – 18.
- FUJITA, Masahiro; KUROKI, Yoshihiro; ISHIDA, Tatsuzo; DOI, Toshi T.. (2003). "Autonomous Behavior Control Architecture of Entertainment Humanoid Robot SDR-4X". In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 960 – 967.
- FUJIWARA, Kiyoshi; KANEHIRO, Fumio; KAJITA, Shuuji; YOKOI, Kazuhito; SAITO, Hajime; HARADA, Kensuke; KANEKO, Kenji; HIRUKAWA, Hirohisa. (2003). "The First Human-Size Humanoid That Can Fall Over Safely and Stan-Up Again". In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1920 – 1926.

GARCIA, E.; ESTREMER, J.; GONZALES DE SANTOS, P.. (2003). "A Control Architecture for Humanitarian-Demining Legged Robots". In: *Proceedings CLAWAR'2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 383 – 390.

HASUNUMA, Hitoshi; NAKASHIMA, Katsumi; KOBAYASHI, Masami; MIFUNE, Fumisato; YANAGIHARA, Yoshitaka; UENO, Takao; OHYA, Kazuhisa; YOKOI, Kazuhito. (2003). "A Tele-Operated Humanoid Robot Drives a Backhoe". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2998 – 3004.

HAWKER, Geoff; BUEHLER, Martin. (2000). "Quadruped Trotting With Passive Knees – Design, Control, and Experiments". In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3046 – 3051.

HERTZBERG, Joachim; CHRISTALLER, Thomas; KIRCHNER, Frank; LICHT, Ulrich; ROME, Erich. (1998). "Sewer Robotics". In: *Proceedings of the 5th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*; pp. 427 – 436.

HIRAI, Kazuo; HIROSE, Masato; HAIKAWA, Yuji; TAKENAKA, Toru. (1998). "The Development of Honda Humanoid Robot". In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1321 – 1326.

HIROSE, Shigeo. (1991). "Three Basic Types of Locomotion in Mobile Robotics". In: *Proceedings of ICAR'91 – Fifth International Conference on Advanced Robotics*; pp. 12 – 17.

HIROSE, Shigeo. (1993). *Biologically Inspired Robots – Snake-Like Locomotors and Manipulators*. Oxford University Press.

HIROSE, Shigeo; KATO, Keisuke. (1998).; "Development of Quadruped Walking Robot with the Mission of Mine Detection and Removal – Proposal of Shape-Feedback Master-Slave Arm –". In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1713 – 1718.

HIROSE, Shigeo; TAKEUCHI, Hiroki. (1996). "Study on Roller-Walker (Basic Characteristics and its Control)". In: *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3265 – 3270.

HURST, Jonathan W.; CHESTNUTT, Joel E.; RIZZI, Alfred A.. (2004). "An Actuator With Physically Variable Stiffness for Highly Dynamic Legged Locomotion". In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 4662 – 4667.

HYON, S. H.; MITA, T.. (2002). "Development of a Biologically Inspired Hopping Robot – "Kenken""; In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3984 – 3991.

IHME, Thomas. (2003). "Posture Control and Distributed Force Sensing for Technical Applications of Walking Robots". In: *Proceedings of the ICAR 2003 – 11th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 1032 – 1037.

IIDA, Fumiya; DRAVID, Raja; PAUL, Chandana. (2002). “Design and Control of a Pendulum Driven Hopping Robot”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2141 – 2146.

IIDA, Fumiya; PFEIFER, Rolf. (2004). “”Cheap” Rapid Locomotion of a Quadruped Robot: Self-Stabilization of Bounding Gait”. In: *Proceedings of IAS-8: the 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems*; pp. 642 – 649.

KAJIMA, Hideki; DOI, Masahiro; HASEGAWA, Yasuhisa; FUKUDA, Toshio. (2003). “Study on Brachiation Controller for the Multi-Locomotion Robot – Redesigning Behavior Controllers –”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1388 – 1393.

KANEHIRO, Fumio; HIRUKAWA, Hirohisa; KANEKO, Kenji; KAJITA, Shuuji; FUJIWARA, Kiyoshi; HARADA, Kensuke; YOKOI, Kazuhito. (2004). “Locomotion Planning of Humanoid Robots to Pass Through Narrow Spaces”. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 604 – 609.

KANEKO, Kenji; KANEHIRO, Fumio; KAJITA, Shuuji; HIRUKAWA, Hirohisa; KAWASAKI, Toshikazu; HIRATA, Masaru; AKACHI, Kazuhiko; ISOZUMI, Takakatsu. (2004). “Humanoid Robot HRP-2”. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1083 – 1090.

KANEKO, Makoto; MIZUNO, Akihiko; HARADA, Kensuke. (2002). “Torque Distribution for Achieving a Hugging Walk”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2613 – 2618.

KANG, Taehun; KIM, Hyungseok; SON, Taeyoung; CHOI, Hyoukryeol. (2003). “Design of Quadruped Walking and Climbing Robot”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 619 – 624.

KATIĆ, Duško; VUKOBRATOVIĆ, Miomir. (2002). “Intelligent Soft-Computing Paradigms for Humanoid Robots”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2533 – 2538.

KATO, T.; TAKANISHI, A.; JISHIKAWA, H.; KATO, I.. (1983). “The Realisation of the Quasi-Dynamic Walking by the Biped Walking Machine”. In: *Proceedings of the Fourth Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*; pp. 341 – 351.

KEMURDJIAN, A. L.; POTIEMKIN, E. K.; MISHKINIUK, V. K.. (1995). “Planet Rovers Today”. In: *Proceedings of ICAR’95 – Seventh International Conference on Advanced Robotics*; pp. 293 – 299.

KERSCHER, T.; ALBIEZ, J.; ZOELLNER, J. M.; DILLMANN, R.. (2004). “AirInsect – A New Innovative Biological Inspired Six-Legged Walking Machine Driven by Fluidic Muscles”. In: *Proceedings of IAS-8: the 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems*; pp. 3 – 10.

KIKUCHI, Fumitaka; OTA, Yusuke; HIROSE, Shigeo. (2003). “Basic Performance Experiments for Jumping Quadruped”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 3378 – 3383.

KIM, Byungkyu; LIM, Hun-Young; KIM, Kyoung-Dae; JEONG, Younkoo; PARK, Jong-Oh. (2002). “A Locomotive Mechanism for a Robotic Colonoscope”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1373 – 1378.

KIM, Byungkyu; RYU, Jaewook; JEONG, Younkoo; TAK, Younghun; KIM, Byungmok; PARK, Jong-Oh. (2003). “A Ciliary Based 8-Legged Walking Micro Robot Using Cast IPCM Actuators”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2940 – 2945.

KINGSLEY, D. A.; QUINN, R. D.; RITZMANN, R. E.. (2003). “A Cockroach Inspired Robot With Artificial Muscles”. In: *Proceedings of the 2003 International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*.

KITANO, Hiroaki; SUZUKI, Sho’ji; AKITA, Junichi. (2000). “RoboCup Jr.: RoboCup for Edutainment”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 807 – 812.

KLAASSEN, B.; LINNEMANN, R.; SPENNEBERG, D.; KIRCHNER, F.. (2003). “Biologically Inspired Robot Design and Modelling”. In: *Proceedings of the ICAR 2003 – 11th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 576 – 581.

KLAASSEN, Bernhard; PAAP, Karl L.. (1999). “GMD-SNAKE2: A Snake-Like Robot Driven by Wheels and a Method for Motion Control”. In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3014 – 3019.

KOMSUOĞLU, Haldun; MCMORDIE, Dave; SARANLI, Uluc; MOORE, Ned; BUEHLER, Martin; KODITSCHKEK, Daniel E.. (2001). “Proprioception Based Behavioral Advances in a Hexapod Robot”. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3650 – 3655.

KONAKA, Motohide. (1991). “National Project on Advanced Robot Technology in Japan”. In: *Proceedings of ICAR’91 – Fifth International Conference on Advanced Robotics*; pp. 24 – 30.

KOYACHI, Noriho; ADACHI, Hironori; SENJO, Naofumi; MURATA, Ryoji; IZUMI, Makoto; HIROSE, Takeshi; ARAI, Tatsuo. (2002). “Control of Walk and Manipulation by a Hexapod With Integrated Limb Mechanism: MELMANTIS-1”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3553 – 3558.

KUBOTA, T.; TAKAHASHI, H.. (2003). “Micro Walking Robot Design for Planetary Exploration”. In: *Proceedings CLAWAR’2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 357 – 364.

KUROKAWA, Haruhisa; KAMIMURA, Akiya; YOSHIDA, Eiichi; TOMITA, Kohji; KOKAJI, Shigeru; MURATA, Satoshi. (2003). “M-TRAN II: Metamorphosis from a Four-Legged Walker to a Caterpillar”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2454 – 2459.

KUROKI, Yoshihiro; FUJITA, Masahiro; ISHIDA, Tatsuzo; NAGASAKA, Ken'ichiro; YAMAGUCHI, Jin'ichi. (2003). “A Small Biped Entertainment Robot Exploring Attractive Applications”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 471 – 476.

KYRIAKOPOULOS, K. J.; MIGADIS, G.; SARRIGEORGIDIS, K.. (1999). “The NTUA Snake: Design, Planar Kinematics and Motion Planning”. *Journal of Robotic Systems*. Vol. 16; No. 1; pp. 37 – 72.

LEE, Yun-Jung; HIROSE, Shigeo. (2000). “Three-Legged Walking for Fault Tolerant Locomotion of a Quadruped Robot with Demining Mission”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 973 – 978.

LISTON, R. A.; MOSHER, R. S.. (1968). “A Versatile Walking Truck”. In: *Transportation Engineering Conference*.

LOHMEIER, Sebastian; LÖFFLER, Klaus; GIENGER, Michael; ULBRICH, Heinz; PFEIFFER, Friedrich. (2004). “Computer System and Control of Biped “Johnnie””. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 4222 – 4227.

LONG, Geoffrey; ANDERSON, Jay; BORENSTEIN, Johann. (2002). “The Kinematic Design of the OmniPede: A New Approach to Obstacle Traversal”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 714 – 719.

MAE, Yasushi; YOSHIDA, Atsushi; ARAI, Tatsuo; INOUE, Kenji; MIYAWAKI, Kunio; ADACHI, Hironori. (2000). “Application of Locomotive Robot to Rescue Tasks”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2083 – 2088.

MARQUES, Lino; RACHKOV, Michael; ALMEIDA, Aníbal T. de. (2002). “Mobile Pneumatic Robot for Demining”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3508 – 3513.

MARTEL, Sylvain; SHERWOOD, Mark; HELM, Chad; QUEVEDO, William Garcia de; FOFONOFF, Timothy; DYER, Robert; BEVILACQUA, John; KAUFMAN, Joshua; ROUSHDY, Omar; HUNTER, Ian. (2001). “Three-Legged Wireless Miniature Robots for Mass-Scale Operations at the Sub-Atomic Scale”. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3423 – 3428.

MATSUMOTO, Osamu; KAJITA, Shuuji; SAIGO, Muneharu; TANI, Kazuo. (1999). “Biped-Type Leg-Wheeled Robot”. *Advanced Robotics*. Vol. 13; No. 3; pp. 235 – 241.

MATSUMOTO, Osamu; KAJITA, Shuuji; KOMORIYA, Kiyoshi. (2002). “Flexible Locomotion Control of a Self-Contained Biped Leg-Wheeled System”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2599 – 2604.

MATSUOKA, K.. (1979). “A Model of Repetitive Hopping Movements in Man”. In: *Fifth World Congress on Theory of Machines and Mechanisms; International Federation for Information Processing*.

MCGHEE, R. B.. (1966). “Finite State Control of Quadruped Locomotion”. In: *Second International Symposium on External Control of Extremities*.

MEDERREG, L.; HUGEL, V.; BONNIN, P.; BLAZEVIC, P.; ABOURACHID, A.; STASSE, O.. (2003). “The RoboCoq Project – Modeling and Design of Bird-Like Robot Equipped With Stabilized Vision”. In: *Proceedings CLAWAR’2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 761 – 768.

MICHAUD, François; LETOURNEAU, Dominic; ARSENAULT, Martin; BERGERON, Yann; CADRIN, Richard; GAGNON, Frédéric; LEGAULT, Marc-Antoine; MILLETTE, Mathieu; PARE, Jean-François; TREMBLAY, Marie-Christine; LEPAGE, Pierre; MORIN, Yan; BISSON, Jonathan; CARON, Serge. (2003). “AZIMUT, A Leg-Track-Wheel Robot”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2553 – 2558.

MINOR, Mark; DULIMARTA, Hans; DANGHI, Girish; MUKHERJEE, Ranjan; TUMMALA, R. Lal; ASLAM, Dean. (2000). “Design, Implementation, and Evaluation of an Under-Actuated Miniature Biped Climbing Robot”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1999 – 2005.

MIZUUCHI, Ikuo; TAJIMA, Ryosuke; YOSHIKAI, Tomoaki; SATO, Daisuke; NAGASHIMA, Koichi; INABA, Masayuki; KUNIYOSHI, Yasuo; INOUE, Hirochika. (2002). “The Design and Control of the Flexible Spine of a Fully Tendon-Driven Humanoid “Kenta””. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2527 – 2532.

MOORE, E. Z.; CAMPBELL, D.; GRIMMINGER, F.; BUEHLER, M. (2002). “Reliable Stair Climbing in the Simple Hexapod ‘RHex’”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2222 – 2227.

MORREY, Jeremy M.; LAMBRECHT, Bram; HORCHLER, Andrew D.; RITZMANN, Roy E.; QUINN, Roger D.. (2003). “Highly Mobile and Robust Small Quadruped Robots”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 82 – 87.

MORRISON, R. A.. (1968). “Iron Mule Train”. In: *Proceedings of the Off-Road Mobility Research Symposium; International Society for Terrain Vehicle Systems*; pp. 381 – 400.

MOSHER, R. S.. (1968). “Test and Evaluation of a Versatile Walking Truck”. In: *Proceedings of the Off-Road Mobility Research Symposium; International Society for Terrain Vehicle Systems*; pp. 359 – 379.

-
- NAGASAKI, Takashi; KAJITA, Shuuji; YOKOI, Kazuhito; KANEKO, Kenji; TANIE, Kazuo. (2003). "Running Pattern Generation and Its Evaluation Using a Realistic Humanoid Model". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1336 – 1342.
- NAKAI, Hiroyuki; KUNIYOSHI, Yasuo; INABA, Masayuki; INOUE, Hirochika. (2002). "Metamorphic Robot Made of Low Melting Point Alloy". In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2025 – 2030.
- NELSON, G. M.; QUINN, R. D.. (1998). "Posture Control of a Cockroach-like Robot". In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 157 – 162.
- NELSON, G. M.; QUINN, R. D.; BACHMANN, R. J.; FLANNIGAN, W. C.; RITZMANN, R. E.; WATSON, J. T.. (1997). "Design and Simulation of a Cockroach-like Hexapod Robot". In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1106 – 1111.
- NEUHAUS, Peter; KAZEROONI, H.. (2000). "Design and Control of Human Assisted Walking Robot". In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 563 – 569.
- NILSSON, Martin. (1998). "Snake Robot Free Climbing". *IEEE Control Systems*. Vol. 18; No. 1; pp. 21 – 26.
- NISHIYAMA, Takashi; HOSHINO, Hiroshi; SAWADA, Kazuya; TOKUNAGA, Yoshihiko; SHINOMIYA, Hirotatsu; YONEDA, Mitsunori; TAKEUCHI, Ikuo; ICHIGE, Yukiko; HATTORI, Shizuko; TAKANISHI, Atsuo. (2003). "Development of User Interface for Humanoid Service Robot System". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2979 – 2984.
- NONAMI, K.; HUANG, Q.-J.. (2001). "Humanitarian Mine Detection Six-Legged Walking Robot COMET-II With Two Manipulators". In: *Proceedings CLAWAR'2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 989 – 996.
- OGO, K.; GANSE, A.; KATO, I.. (1980). "Dynamic Walking of a Biped Walking Machine Aiming at Completion of Steady Walking"; In: *Third Symposium on Theory and Practise of Robots and Manipulators*.
- OMATA, Toru; TSUKAGOSHI, Kazuo; MORI, Osamu. (2002). "Whole Quadruped Manipulation". In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2028 – 2033.
- OTA, Yusuke; YONEDA, Kan; TAMAKI, Tatsuya; HIROSE, Shigeo. (2002). "A Walking and Wheeled Hybrid Locomotion With Twin-Frame Structure Robot". In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2645 – 2651.
-

PAAP, K. L.; CHRISTALLER, T.; KIRCHNER, F.. (2000). “A Robot Snake to Inspect Broken Buildings”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2079 – 2082.

PAPADOPOULOS, Didier; BUEHLER, Martin. (2000). “Stable Running in a Quadruped Robot With Compliant Legs”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 444 – 449.

PENG, S.; LAM, C. P.; COLE, G. R.. (2003). “A Biologically Inspired Four Legged Walking Robot”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2024 – 2030.

PFEIFFER, F.; LÖFFLER, K.; GIENGER, M.. (2003). “Humanoid Robots”. In: *Proceedings CLAWAR'2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 505 – 516.

PFEIFFER, F.; ELTZE, J.; WEIDEMANN, H.-J.. (1995). “The TUM-Walking Machine”. *Intelligent Automation and Soft Computing*. Vol. 1; No. 3; pp. 307 – 323.

PREUMONT, A.; ALEXANDRE, P.; DOROFTEI, I.; GOFFIN, F.. (1997). “A Conceptual Walking Vehicle for Planetary Exploration”. *Mechatronics*. Vol. 7; No. 3; pp. 287 – 296.

QUINN, Roger D.; OFFI, John T.; KINGSLEY, Daniel A.; RITZMANN, Roy E.. (2002). “Improved Mobility Through Abstracted Biological Principles”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2652 – 2657.

RAIBERT, Marc H.. (1986). *Legged Robots that Balance*. The MIT Press.

ROBERTS, Jonathan M.; CORKE, Peter I.; WINSTANLEY, Graeme J.. (1999). “Development of a 3500-Tonne Field Robot”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 18; No. 7; pp. 739 – 752.

ROSHEIM, Mark E.. (1997). “In the Footsteps of Leonardo”. *IEEE Robotics & Automation Magazine*. Vol. 4; No. 2; pp. 12 – 14.

SAKAGAMI, Yoshiaki; WATANABE, Ryuji; AOYAMA, Chiaki; MATSUNAGA, Shinichi; HIGAKI, Nobuo; FUJIMURA, Kikuo. (2002). “The Intelligent ASIMO: System Overview and Integration”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2478 – 2483.

SARANLI, Uluç; BUEHLER, Martin; KODITSCHKEK, Daniel E.. (2001). “RHex – A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 20; No. 7; pp. 616 – 631.

- SAWASAKI, Naoyuki; NAKAJIMA, Toshiya; SHIRAIISHI, Atsushi; NAKAMURA, Shinya; WAKABAYASHI, Kiyoshi; SUGAWARA, Yusuke. (2003). "Application of Humanoid Robots to Building and Home Management Services". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2992 – 2996.
- SCHULZ, S.; PYLATIUK, C.; BRETTHAUER, G.. (2001). "Walking Machine With Compliant Joints". In: *Proceedings CLAWAR'2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 231 – 236.
- SCHWIND, William J.; KODITSCHKEK, Daniel E.. (1997). "Characterisation of Monoped Equilibrium Gaits". In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1986 – 1992.
- SEIFERT, H. S.. (1967). "The Lunar Pogo Stick". *Journal of Spacecraft and Rockets*. Vol. 4; No. 7; pp. 941 – 943.
- SHIGLEY, J. E.. (1960). *The Mechanics of Walking Vehicles*. Land Locomotion Laboratory Report No. LL-71; U.S. Army Tank-Automotive Command; Warren, Michigan.
- SHIMODA, Shingo; WINGERT, Andreas; TAKAHASHI, Kei; KUBOTA, Takashi; NAKATANI, Ichiro. (2004). "Hopping Direction Controllability for Small Body Exploration Robot". In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2987 – 2992.
- SO, Byung Rok; YI, Byung-Ju; KIM, Wheekuk; OH, Sang-Rok; PARK, Jongil; KIM, Young Soo. (2003). "Design of a Redundantly Actuated Leg Mechanism". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 4348 – 4353.
- SONG, Shin-Min; WALDRON, Kenneth J.. (1989). *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*. The MIT Press.
- SPENNEBERG, Dirk; MCCULLOUGH, Kevin; KIRCHNER, Frank. (2004). "Stability of Walking in a Multilegged Robot Suffering Leg Loss". In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2159 – 2164.
- STØY, K.; SHEN, W.-M.; WILL, P.. (2003). "Implementing Configuration Dependent Gaits in a Self-Reconfigurable Robot". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3828 – 3833.
- STREICH, Hermann; ADRIA, Oliver. (2004). "Software Approach for the Autonomous Inspection Robot MAKRO". In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3411 – 3416.
- SUGAHARA, Yusuke; ENDO, Tatsuro; LIM, Hun-Ok; TAKANISHI, Atsuo. (2003). "Control and Experiments of a Multi-Purpose Bipedal Locomotor With Parallel Mechanism". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 4342 – 4347.

SUGAHARA, Yusuke; LIM, Hun-Ok; HOSOBATA, Takuya; MIKURIYA, Yutaka; SUNAZUKA, Hiroyuki; TAKANISHI, Atsuo. (2004). “Realization of Dynamic Human-Carrying Walking by a Biped Locomotor”. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3055 – 3060.

TAKAHASHI, Yuuya; ARAI, Tatsuo; MAE, Yasushi; INOUE, Kenji; KOYACHI, Noriho. (2000). “Development of Multi-Limb Robot With Omnidirectional Manipulability and Mobility”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2012 – 2017.

TAKANISHI, A.; ISHIDA, M.; YAMAZAKI, Y.; KATO, I. (1985). “The Realization of Dynamic Walking by the Biped Walking Robot wl-10rd”. In: *Proceedings of the 1985 IEEE International Conference on Advanced Robotics*; pp. 459 – 466.

TAKEDA, Y.; HIGUCHI, M.; FUNABASHI, H.; OKI, Y.; SHIMIZU, K.. (2001). “Development of a Walking Chair – Fundamental Investigations for Realizing a Practical Walking Chair”. In: *Proceedings CLAWAR’2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 1037 – 1044.

TAKITA, Kensuke; HODOSHIMA, Ryuichi; HIROSE, Shigeo. (2000). “Fundamental Mechanism of Dinosaur-Like Robot TITRUS-II Utilizing Coupled Drive”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1670 – 1675.

TAKITA, Kensuke; KATAYAMA, Toshio; HIROSE, Shigeo. (2003). “Development of Dinosaur-like Robot TITRUS – The Efficacy of the Neck and Tail of Miniature Dinosaur-Like Robot TITRUS-III”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2466 – 2471.

TSUKAGOSHI, Hideyuki; HIROSE, Shigeo; YONEDA, Kan. (1997). “Maneuvering Operations of a Quadruped Walking Robot on a Slope”. *Advanced Robotics*. Vol. 11; No. 4; pp. 359 – 375.

TUMMALA, R. Lal; MUKHERJEE, Ranjan; XI, Ning; ASLAM, Dean; DULIMARTA, Hans; XIAO, Jizhong; MINOR, Mark; DANGHI, Girish. (2002). “Climbing the Walls”. *IEEE Robotics and Automation Magazine*. Vol. 9; No. 4; pp. 10 – 19.

VELIMIROVIĆ, Andrija; VELIMIROVIĆ, Maja; HUGEL, Vincent; ILES, Amine; BLAZEVIĆ, Pierre. (1998). “A New Architecture of Robot With “Wheels-With-Legs” (WWL)”. In: *Proceedings of the AMC’98 – 5th International Workshop on Advanced Motion Control*; pp. 434 – 439.

WALLACE, H. W.. (1942). “Jumping Tank Vehicle”; Patent Number 2,371,368.

WETTERGREEN, David; THORPE, Chuck; WHITTAKER, Red. (1993). “Exploring Mount Erebus by Walking Robot”. *Robotics and Autonomous Systems*. Vol. 11; No. 3 – 4; pp. 171 – 185.

WORST, Rainer. (1998). “Robotic Snakes”. In: *Proceedings of the Third German Workshop on Artificial Life*; pp. 113 – 126.

YAMAGUCHI, Jin'ichi; SOGA, Eiji; INOUE, Sadatoshi; TAKANISHI, Atsuo. (1999). "Development of a Bipedal Humanoid Robot – Control Method of Whole Body Cooperative Dynamic Biped Walking". In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 368 – 374.

YAMAGUCHI, Jin'ichi; TAKANISHI, Atsuo. (1998). "Development of a Leg Part of a Humanoid Robot – Design of a Biped Walking Robot Having Antagonistic Driven Joints Using a Nonlinear Spring Mechanism". *Advanced Robotics*. Vol. 11; No. 6; pp. 633 – 652.

YANG, Jung-Min. (2003). "Fault-Tolerant Gait Generation for Locked Joint Failures". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*; pp. 2237 – 2242.

YANG, Jung-Min; KIM, Jong-Hwan. (1998). "A Strategy of Optimal Fault Tolerant Gait for the Hexapod Robot in Crab Walking". In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1695 – 1700.

YLÖNEN, Sami J.; HALME, Aarne J.. (2002). "WorkPartner – Centaur Like Service Robot". In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 727 – 732.

YOKOTA, S.; KOBAYASHI, H.; KAWABATA, K.. (2003). "Development of Mobile System Using Leg-Type Crawler for Rough Terrain". In: *Proceedings CLAWAR'2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 301 – 307.

YOKOYAMA, Kazuhiko; HANDA, Hiroyuki; ISOZUMI, Takakatsu; FUKASE, Yutaro; KANEKO, Kenji; KANEHIRO, Fumio; KAWAI, Yoshihiro; TOMITA, Fumiaki; HIRUKAWA, Hirohisa. (2003). "Cooperative Works by a Human and a Humanoid Robot". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2985 – 2991.

YONEDA, K. (2001). "Design of Non-Bio-Mimetic Walker With Fewer Actuators". In: *Proceedings CLAWAR'2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 115 – 126.

ZAGLER, Andreas; PFEIFFER, Friedrich. (2003). "'MORITZ' a Pipe Crawler for Tube Junctions". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2954 – 2959.

ZHANG, Ying; YIM, Mark; ELDERSHAW, Craig; DUFF, Dave; ROUFAS, Kimon. (2003). "Phase Automata: A Programming Model of Locomotion Gaits for Scalable Chain-Type Modular Robots". In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2442 – 2447.

HTTP#1. "The Walking Machine Catalogue". <http://www.walking-machines.org/>

HTTP#2. “Plustech Walking Technology”. <http://www.plustech.fi/Walking1.html>

HTTP#3. “Android World”. <http://www.androidworld.com/index.htm>

Capítulo 3

Modelação Cinemática e Dinâmica de Sistemas de Locomoção Multipernas

Os robôs com pernas permitem a locomoção em terrenos inacessíveis a outros tipos de veículos, uma vez que não necessitam de uma superfície de suporte contínua. No entanto, os requisitos em termos de coordenação das pernas e do seu controlo impõem dificuldades acrescidas relativamente às encontradas nos robôs com rodas. Estes aspectos têm vindo a merecer um grande interesse e, de forma a estudá-los, têm sido adoptadas várias estratégias. Uma possibilidade é projectar e construir robôs com pernas e desenvolver estudos baseados nos protótipos. Uma perspectiva alternativa consiste no desenvolvimento de modelos de simulação de robôs com pernas que sirvam de base à investigação. Esta segunda aproximação apresenta várias vantagens, nomeadamente custos de desenvolvimento mais reduzidos e um menor tempo para implementar eventuais modificações. Por estes motivos, foram desenvolvidos diferentes modelos de simulação que têm vindo a ser utilizados para o estudo, projecto, optimização, análise de padrões de locomoção e desenvolvimento de algoritmos de controlo para sistemas de locomoção artificiais.

Seguindo esta linha de raciocínio, neste capítulo descreve-se o modelo de simulação implementado para sistemas de locomoção multipernas (e vários padrões de locomoção) que serve de base para a realização desta Tese. Esta ferramenta permite o estudo da configuração óptima do sistema e do tipo de movimentos que levam a uma melhor implementação

mecânica (Silva, *et al.*, 2001; Silva, *et al.*, 2002a; Silva, *et al.*, 2002b). Adicionalmente, este modelo de simulação é também utilizado para estudar o controlo das juntas das pernas, considerando atrito viscoso, flexibilidade e folga (Silva, *et al.*, 2003a; Silva, *et al.*, 2003b). Assim, o movimento pretendido para o robô é descrito por diversas variáveis de locomoção, identificadas como relevantes para o efeito. Por sua vez, as juntas e as transmissões das pernas podem apresentar diversos fenómenos dinâmicos, nomeadamente saturação não linear, atrito viscoso, flexibilidade e folga. Adicionalmente, o corpo do robô é dividido em vários segmentos de forma a emular o comportamento da coluna vertebral de um animal. Quanto à interacção entre os pés do robô e o solo esta é modelada através de um sistema mola-amortecedor não linear em paralelo, cujos parâmetros são determinados tendo por base os estudos em mecânica dos solos. Para concluir, apresentam-se um conjunto de índices, cinemáticos e dinâmicos, formulados no âmbito deste trabalho, tendo em vista analisar e comparar o desempenho de sistemas robóticos de locomoção multipernas.

Tendo presente estes factos, este capítulo está organizado da seguinte forma. A secção um descreve o modelo cinemático do robô, incluindo os possíveis padrões de locomoção e o planeamento das suas trajectórias. Na secção dois apresenta-se o modelo dinâmico do robô que inclui a determinação da dinâmica inversa, os efeitos dinâmicos nas juntas e o modelo segmentado do corpo do robô. De seguida, na secção três, apresentam-se as alterações aos modelos cinemático e dinâmico do robô no caso do sistema apresentar três gdl por perna. Segue-se, na secção quatro, o modelo de interacção entre os pés do robô e o solo. Nas secções cinco e seis, descreve-se a implementação computacional do modelo desenvolvido e apresentam-se os vários índices cinemáticos e dinâmicos que servem de base à análise de desempenho do sistema e dos algoritmos de controlo. Por último, a secção sete apresenta em linhas gerais as principais conclusões do capítulo e algumas ideias para trabalho futuro.

3.1 Modelo Cinemático do Sistema de Locomoção Multipernas

3.1.1 Descrição do Modelo Cinemático no Caso de Pernas com Dois gdl

Neste trabalho considera-se um sistema de locomoção multipernas longitudinal com n pernas ($n \geq 2$ e n par) igualmente distribuídas de ambos os lados do corpo do robô. As pernas ímpares situam-se do lado esquerdo do corpo do robô e as pernas pares do lado direito (Figura

3.1). Todas as pernas são numeradas consecutivamente da parte da frente do robô para a sua parte de trás. Cada uma das pernas do modelo pode apresentar características diferenciadoras face às outras, implementadas através de diferentes valores para os parâmetros que as caracterizam, uma vez que o desempenho do sistema varia com as suas características.

Quanto ao número de gdl das pernas optou-se por duas hipóteses alternativas. Numa primeira situação cada uma delas apresenta dois gdl, correspondendo a duas juntas rotacionais, uma na anca e outra no joelho (*i.e.*, $j = \{1, 2\} \equiv \{\text{anca, joelho}\}$), como pode ser visto na Figura 3.2. Posteriormente adoptaram-se pernas com três gdl para o sistema artificial de locomoção. Este segundo caso será detalhado na secção 3.3.

Independentemente do número de gdl por perna, o movimento é descrito por meio de um sistema de coordenadas do mundo. O modelo cinemático inclui: o tempo de ciclo T , o factor de ocupação β , o tempo de transferência do pé $t_T = (1-\beta)T$, o tempo de suporte do pé $t_S = \beta T$, o comprimento do passo L_S , a distância entre as ancas de pernas sucessivas do mesmo lado do corpo S_P , a altura do corpo ao solo H_B , a máxima altura da trajectória do pé ao solo F_C , os comprimentos dos elos j da i -ésima perna L_{ij} e o desvio das trajectórias dos pés relativamente às ancas O_i ($i = 1, \dots, n$). Adicionalmente, considera-se uma trajectória periódica para cada pé, sendo a velocidade do corpo constante e igual a $V_F = L_S / T$.

Nas experiências desenvolvidas supõe-se que as pernas se encontram mecanicamente afastadas entre si, no plano transversal ao da locomoção, de forma a que nunca ocorram colisões entre elas (Figura 3.1). Apesar disso, nos algoritmos computacionais encontra-se implementada uma restrição ao movimento das pernas, de forma a evitar colisões entre pernas adjacentes do mesmo lado do corpo durante a locomoção.

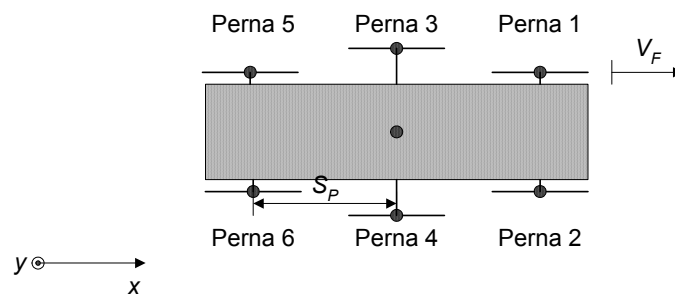


Figura 3.1: Vista de cima do robô multipernas onde é possível verificar a distribuição das pernas de ambos os lados do corpo de forma a evitar colisões entre elas.

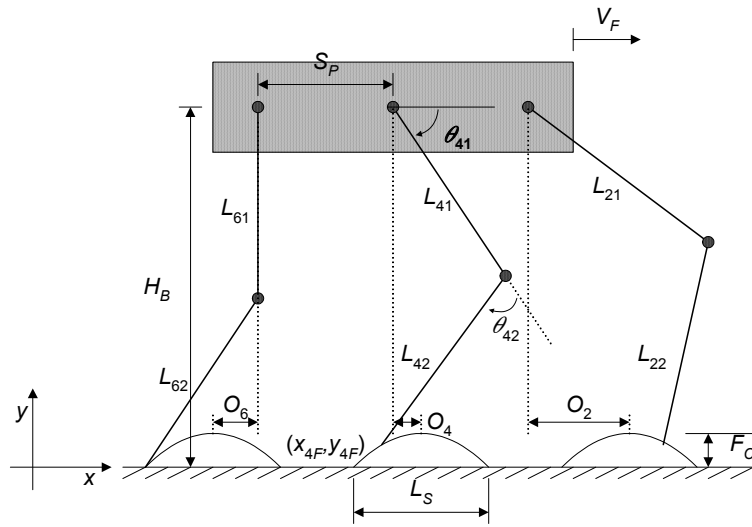


Figura 3.2: Sistema de coordenadas e variáveis que caracterizam as trajetórias de movimento do robô multipernas com dois gdl por perna.

A implementação da restrição ao movimento das pernas para que estas não colidam entre si prevê a utilização de uma de duas estratégias. A primeira passa por espaçar as pernas adjacentes do mesmo lado do corpo de uma distância superior à soma do comprimento das pernas em questão. Matematicamente esta situação é descrita pela seguinte expressão:

$$S_p > L_{i1} + L_{i2} + L_{i'1} + L_{i'2} \quad (3.1)$$

sendo i' a perna adjacente à perna i .

Caso esta situação não se verifique, então torna-se necessário que o comprimento máximo do passo do robô ($L_{SMáx}$), supondo que todas as pernas do robô têm o mesmo comprimento, seja:

$$L_{SMáx} \leq S_p \quad \wedge \quad L_{SMáx} \leq 2\sqrt{(L_{i1} + L_{i2})^2 - H_B^2} \quad (3.2)$$

3.1.2 Padrões de Locomoção Implementados para a Locomoção do Robô Multipernas

Os padrões de locomoção descrevem sequências descontínuas de movimentos das pernas, alternando entre fases de transferência e suporte. No modelo de simulação consideram-se os padrões de locomoção Ondulatório, Fase Igual e Meio Ciclo, Fase Igual e Ciclo Completo, Ondulatório Inverso, Fase Igual e Meio Ciclo Inverso e Fase Igual e Ciclo Completo Inverso

{PLO, PLFIMC, PLFICC, PLOI, PLFIMCI, PLFICCI} (Song e Waldron, 1989). Adicionalmente consideram-se também diversos padrões de locomoção frequentemente observados nos animais quadrúpedes quando estes se deslocam a diferentes velocidades. Estes padrões de locomoção encontram-se detalhados no Anexo A.

Dado um padrão de locomoção e um factor de ocupação β particulares, é possível calcular, para a perna i , a correspondente fase ϕ_i , os instantes de tempo em que a perna sai e regressa ao contacto com o solo e a correspondente trajectória cartesiana da extremidade da perna do robô (que deve ser executada durante o intervalo de tempo de transferência do pé t_T) (Song e Waldron, 1989). Tendo por base estes dados, o gerador de trajectória é responsável por produzir um movimento que sincroniza e coordena as pernas.

3.1.3 Planeamento da Trajectória do Robô

No que diz respeito ao movimento dos pés do robô durante a fase de transferência, as trajectórias devem ser realizadas de forma a evitar colisões com o solo e com quaisquer obstáculos que se possam encontrar na vizinhança do robô.

Para resolver este problema têm sido propostas diferentes estratégias. Quando o projecto do robô é uma mímica de um animal, uma solução frequentemente adoptada consiste na cópia das trajectórias dos pés do animal. Outra estratégia, bastante adoptada, considera que as trajectórias dos pés do robô, no espaço cartesiano, são baseadas em diferentes funções matemáticas. A trajectória dos pés durante a fase de transferência pode ainda ser optimizada recorrendo a índices matemáticos. Outros autores adoptaram dinâmica balística durante a fase de transferência (*i.e.*, não há aplicação de binário aos actuadores das juntas durante este período) para definir as trajectórias de referência dos pés dos sistemas artificiais de locomoção. No Anexo B descrevem-se detalhadamente várias destas possíveis estratégias para planear as trajectórias dos pés do robô.

Motivados pelos métodos acabados de referir e detalhados no Anexo B, implementam-se neste trabalho duas trajectórias espaço-temporais alternativas para os pés do robô durante a fase de transferência, nomeadamente uma função cicloidal (3.3a) em que o levantamento e colocação dos pés no solo é efectuado segundo a direcção vertical e uma função sinusoidal

(3.3b) em que a trajectória é horizontal nestes locais. Por exemplo, considerando que a fase de transferência começa no instante $t = 0$ s para a perna 1, tem-se $\mathbf{p}_{Fd}(t) = [x_{iFd}(t), y_{iFd}(t)]^T$:

$$\mathbf{p}_{Fd}(t) = \begin{bmatrix} V_F \left[t - \frac{T}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right] \\ \frac{F_C}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right] \end{bmatrix} \quad (3.3a)$$

$$\mathbf{p}_{Fd}(t) = \begin{bmatrix} \left(\frac{t_T}{T}\right) \left[\left(\frac{L_S t}{t_T}\right) - \frac{L_S}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right] \\ \frac{2F_C t'}{T} - \frac{F_C}{2\pi} \sin\left(\frac{4\pi t'}{T}\right) \end{bmatrix}, \quad t' = \begin{cases} t, & 0 \leq t < T/2 \\ T-t, & T/2 \leq t < T \end{cases} \quad (3.3b)$$

Durante a fase de suporte, o pé encontra-se no solo e permanece numa posição fixa (idealmente, supondo que não há escorregamento do pé), ajudando a empurrar o corpo, sendo as coordenadas da posição do pé dadas pela seguinte expressão:

$$\mathbf{p}_{Fd}(t) = [V_F T \quad 0]^T \quad (3.4)$$

Cada uma das duas trajectórias alternativas do pé, durante a fase de transferência, pode ser efectuada adoptando um perfil de aceleração em degrau, em polinómio cúbico ou em polinómio de quinto grau.

Foi demonstrado que a cicloide é superior à função sinusoidal, uma vez que melhora o seguimento das trajectórias das ancas e dos pés, minimizando em simultâneo os correspondentes binários nas juntas (Silva, *et al.*, 2003b). Para diferentes perfis de aceleração das trajectórias dos pés estes resultados não sofrem alterações significativas.

Tendo por base estudos em biomecânica, Hodgins (1996) conclui que as perturbações que ocorrem nos instantes dos impactos dos pés com o solo podem ser reduzidas diminuindo a velocidade relativa entre os pés e o solo nos instantes de contacto. Esta estratégia, frequentemente denominada de harmonização da velocidade ao solo, parece estar de acordo com as conclusões de Jiménez e Santos (1997), também referidas no Anexo B. Este facto parece justificar o motivo pelo qual a trajectória cicloidal dos pés do robô é superior à sinusoidal. Como consequência, neste trabalho adopta-se por defeito, e sempre que nada for

dito em contrário, durante a fase de transferência de cada ciclo de locomoção, a trajectória pretendida para os pés do robô de acordo com a função cicloidal (3.3a).

O corpo do robô, e conseqüentemente as ancas das pernas, são supostas terem um movimento horizontal com uma velocidade frontal constante e igual a V_F . Portanto, para a perna i as coordenadas cartesianas da anca da perna são dadas por $\mathbf{p}_{Hd}(t) = [x_{iHd}(t), y_{iHd}(t)]^T$:

$$\mathbf{p}_{Hd}(t) = [V_F t \quad H_B]^T \quad (3.5)$$

O algoritmo para o planeamento do movimento de locomoção aceita como entrada as trajectórias cartesianas pretendidas dos pés $\mathbf{p}_{Fd}(t) = [x_{iFd}(t), y_{iFd}(t)]^T$ e das ancas $\mathbf{p}_{Hd}(t) = [x_{iHd}(t), y_{iHd}(t)]^T$ do robô e, através de um algoritmo de cinemática inversa Ψ^{-1} , gera as correspondentes trajectórias das juntas $\Theta_d(t) = [\theta_{i1d}(t), \theta_{i2d}(t)]^T$, caso o robô apresente dois gdl por perna ou $\Theta_d(t) = [\theta_{i1d}(t), \theta_{i2d}(t), \theta_{i3d}(t)]^T$ caso sejam três os gdl por perna:

$$\mathbf{p}_d(t) = [x_{id}(t) \quad y_{id}(t)]^T = \mathbf{p}_{Hd}(t) - \mathbf{p}_{Fd}(t) \quad (3.6a)$$

$$\mathbf{p}_d(t) = \Psi[\Theta_d(t)] \Rightarrow \Theta_d(t) = \Psi^{-1}[\mathbf{p}_d(t)] \quad (3.6b)$$

$$\dot{\Theta}_d(t) = \mathbf{J}^{-1}[\dot{\mathbf{p}}_d(t)], \quad \mathbf{J} = \frac{\partial \Psi}{\partial \Theta} \quad (3.6c)$$

Na resolução das equações da cinemática inversa existe a possibilidade de seleccionar a solução correspondente ao joelho para a frente ou joelho para trás, de forma a que a simulação permita implementar ambos os modelos de pernas existentes nos seres vivos. Como se pode observar na Figura 3.3, as pernas com os joelhos para a frente são comuns nos mamíferos (caso do cavalo) ao invés da estrutura com o joelho para trás comum nas aves (caso do flamingo). Mais ainda, são detectadas as singularidades cinemáticas que ocorrem quando qualquer uma das pernas se encontra totalmente esticada ou dobrada, de acordo com as expressões:

$$\theta_{i2d}(t) = 0^\circ \vee \theta_{i2d}(t) = \pm 180^\circ, \quad \forall \theta_{i1d}(t) \quad (3.7)$$



Figura 3.3: O cavalo (à esquerda) apresenta pernas com os joelhos para a frente e o flamingo (à direita) com o joelho para trás.

No Anexo C são apresentadas as expressões completas da cinemática directa e inversa de um robô com dois gdl rotacionais nas pernas.

De forma a evitar os efeitos do impacto e do atrito com o solo, na fase de planeamento das trajectórias são impostas velocidades nulas aos pés do robô, nos instantes de levantamento e contacto destes com o solo, assegurando também a continuidade da velocidade.

3.2 Modelo Dinâmico do Robô

3.2.1 Determinação da Dinâmica Inversa

De forma a determinar as equações da dinâmica inversa do sistema robótico de locomoção multipernas adoptou-se o método de Lagrange ((3.8a) e (3.8b)):

$$L = E_C - E_P \quad (3.8a)$$

$$\Gamma = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\Theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \Theta} \quad (3.8b)$$

Este formalismo requer o cálculo das energias cinéticas (E_C) e potenciais (E_P) do corpo, dos elos e dos pés de todas as pernas do robô, para determinar o Lagrangeano (L). As expressões detalhadas destas energias encontram-se apresentadas no Anexo C, para o caso de robôs com dois gdl por perna. Outros métodos alternativos para determinar a dinâmica inversa do robô são os descritos, por exemplo, por Perrin, *et al.* (1997), Barreto, *et al.* (1998), Lee, *et al.* (1998), McMillan e Orin (1998) e Featherstone e Orin (2000).

As trajectórias planeadas para as juntas do robô constituem os sinais de referência para o sistema de controlo do robô. De forma a simular a locomoção, é também formulado o seguinte modelo da dinâmica inversa do robô:

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{H}(\mathbf{\Theta})\ddot{\mathbf{\Theta}} + \mathbf{c}(\mathbf{\Theta}, \dot{\mathbf{\Theta}}) + \mathbf{g}(\mathbf{\Theta}) - \mathbf{F}_{RH} - \mathbf{J}_F^T(\mathbf{\Theta})\mathbf{F}_{RF} \quad (3.9)$$

sendo $\mathbf{\Gamma} = [f_{ix}, f_{iy}, \tau_{i1}, \tau_{i2}]^T$ ($i = 1, \dots, n$) o vector das forças / binários e $\mathbf{\Theta} = [x_{iH}, y_{iH}, \theta_{i1}, \theta_{i2}]^T$ o vector das coordenadas de posição, caso o robô apresente dois gdl por perna. No caso de serem três gdl por perna, o vector das forças / binários é dado por $\mathbf{\Gamma} = [f_{ix}, f_{iy}, \tau_{i1}, \tau_{i2}, \tau_{i3}]^T$ ($i = 1, \dots, n$) e o vector das coordenadas de posição por $\mathbf{\Theta} = [x_{iH}, y_{iH}, \theta_{i1}, \theta_{i2}, \theta_{i3}]^T$. $\mathbf{H}(\mathbf{\Theta})$ é a matriz das inércias e $\mathbf{c}(\mathbf{\Theta}, \dot{\mathbf{\Theta}})$ e $\mathbf{g}(\mathbf{\Theta})$ são os vectores das forças / binários centrífugos / Coriolis e gravitacionais, respectivamente. A matriz $\mathbf{J}_F^T(\mathbf{\Theta})$, de dimensão $(m+2) \times 2$, é a transposta da matriz do Jacobiano do robô, \mathbf{F}_{RH} é o vector de dimensão $(m+2) \times 1$ das forças intra-segmentos do corpo do robô e \mathbf{F}_{RF} é o vector de dimensão 2×1 das forças de reacção que o solo exerce sobre os pés do robô. Consequentemente, estas forças \mathbf{F}_{RF} consideram-se nulas durante a fase de transferência do pé do robô. No Anexo C são apresentadas as expressões completas da dinâmica de um robô com dois gdl rotacionais nas pernas.

Durante a simulação do sistema, a equação (3.9) é integrada numericamente através do método de Runge-Kutta (Machado e Galhano, 1995).

3.2.2 Efeitos Dinâmicos nas Juntas do Robô

No modelo de simulação, considera-se que os actuadores das juntas não são ideais, exibindo uma limitação do binário que podem fornecer (*i.e.*, uma saturação dos actuadores) dada por:

$$\tau_{ijm} = \begin{cases} \tau_{ijC} & , \quad |\tau_{ijm}| \leq \tau_{ijMax} \\ \text{sgn}(\tau_{ijC})\tau_{ijMax} & , \quad |\tau_{ijm}| > \tau_{ijMax} \end{cases} \quad (3.10)$$

onde, para a perna i e junta j , τ_{ijC} é o binário pedido pelo controlador, τ_{ijMax} é o máximo binário que o actuador pode fornecer e τ_{ijm} é o binário efectivo do motor.

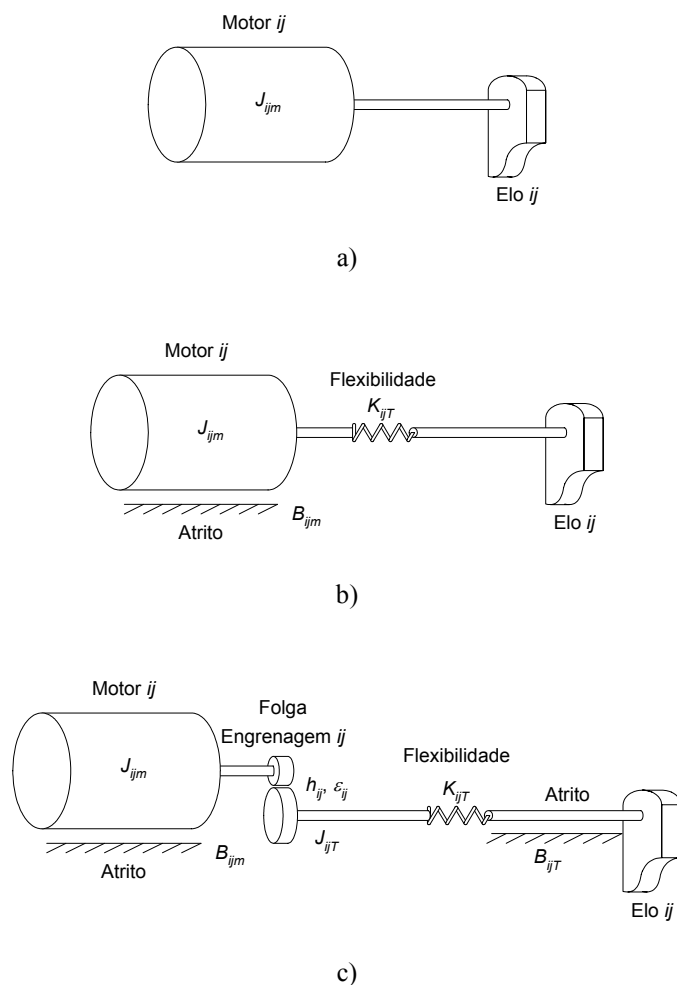


Figura 3.4: Modelo das juntas da perna: a) actuador e transmissão ideais, b) actuador com atrito viscoso e transmissão com flexibilidade, e c) actuador e transmissão com atrito viscoso, flexibilidade e folga.

A simulação também suporta diferentes efeitos dinâmicos nas juntas implementados através de níveis de detalhe do modelo distintos.

Num primeiro nível de modelação, considera-se que os actuadores e as transmissões das juntas são ideais, tal como apresentado na Figura 3.4a. Depois, num segundo nível de modelação, considera-se a existência de atrito não linear nas juntas das pernas do robô sendo o binário de atrito dado por:

$$\tau_{ija} = \begin{cases} \tau_{ijae} & , \left| \dot{\theta}_{ij} \right| \leq \dot{\theta}_{ijae} \\ \text{sgn}(\dot{\theta}_{ij}) \tau_{ijac} + B_{ijav} \dot{\theta}_{ij} & , \left| \dot{\theta}_{ij} \right| > \dot{\theta}_{ijae} \end{cases} \quad (3.11)$$

em que $\mathbf{\Gamma}_a = [\tau_{i1a}, \tau_{i2a}]^T$ ($i = 1, \dots, n$) é o vector $m \times 1$ dos binários de atrito, $\mathbf{\Gamma}_{ae} = [\tau_{i1ae}, \tau_{i2ae}]^T$ ($i = 1, \dots, n$) é o vector $m \times 1$ dos binários de atrito estático, $\mathbf{\Gamma}_{ac} = [\tau_{i1ac}, \tau_{i2ac}]^T$ ($i = 1, \dots, n$) é o vector $m \times 1$ dos binários de atrito de Coulomb, $\dot{\mathbf{\Theta}}_{ae} = [\dot{\theta}_{i1ae}, \dot{\theta}_{i2ae}]^T$ é o vector $m \times 1$ das velocidades limite do atrito estático e $\mathbf{B}_{av} = [B_{i1av}, B_{i2av}]^T$ ($i = 1, \dots, n$) é o vector $m \times 1$ dos coeficientes de atrito viscoso.

De seguida, considera-se que as transmissões das juntas não são ideais, apresentando flexibilidade (Figura 3.4b) que pode ser descrita por:

$$\mathbf{\Gamma}_m = \mathbf{J}_m \ddot{\mathbf{\Theta}}_m + \mathbf{B}_m \dot{\mathbf{\Theta}}_m + \mathbf{K}_T (\mathbf{\Theta}_m - \mathbf{\Theta}) \quad (3.12a)$$

$$\mathbf{K}_T (\mathbf{\Theta}_m - \mathbf{\Theta}) = \mathbf{H}(\mathbf{\Theta}) \ddot{\mathbf{\Theta}} + \mathbf{c}(\mathbf{\Theta}, \dot{\mathbf{\Theta}}) + \mathbf{g}(\mathbf{\Theta}) - \mathbf{F}_{RH} - \mathbf{J}_F^T(\mathbf{\Theta}) \mathbf{F}_{RF} \quad (3.12b)$$

sendo $\mathbf{\Gamma}_m = [\tau_{i1m}, \tau_{i2m}]^T$ ($i = 1, \dots, n$) o vector $m \times 1$ dos binários dos motores, $\mathbf{\Theta}_m = [\theta_{i1m}, \theta_{i2m}]^T$ o vector $m \times 1$ das coordenadas de posição dos motores e \mathbf{J}_m , \mathbf{B}_m e \mathbf{K}_T são, respectivamente, as matrizes diagonais $m \times m$ das inércias, dos coeficientes de atrito viscoso e de elasticidade dos motores e das transmissões.

Finalmente, num quarto nível de detalhe do modelo, considera-se que as transmissões das juntas também incluem folga (Figura 3.4c) o que provoca a ocorrência de impactos na engrenagem. A abordagem clássica à modelação do fenómeno da folga é de natureza cinemática, entrando somente em linha de conta com a abertura h_{ij} e desprezando os fenómenos de impacto. No entanto, neste trabalho recorre-se a um modelo dinâmico para modelar o efeito da folga considerando o efeito dos impactos.

Uma forma frequente de descrever choques entre corpos com as características das engrenagens é através do recurso à regra de Newton (Brogliato, 1996; Blazejczyk-Okolewska, *et al.*, 1999). Esta regra relaciona as velocidades relativas imediatamente antes e após a colisão através do coeficiente de restituição (ε). Este coeficiente, cujo valor varia no intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$, é determinado de forma experimental e o seu valor depende do material dos corpos em colisão.

Através do coeficiente de restituição é também possível exprimir a quantidade de energia cinética perdida na colisão (Blazejczyk-Okolewska, *et al.*, 1999). No caso da colisão ser perfeitamente elástica, o valor do coeficiente de restituição é $\varepsilon = 1$, querendo isto significar que nenhuma energia é perdida na colisão dos dois corpos. No outro extremo tem-se o caso das colisões perfeitamente inelásticas, em que $\varepsilon = 0$. Isto significa que a colisão provoca a deformação permanente dos corpos em colisão, após o que os dois corpos se movem juntos.

Tendo por base o exposto, as colisões que ocorrem na engrenagem obedecem ao princípio da conservação do momento, e à regra de Newton, levando a:

$$\mathbf{\Gamma}_m = \mathbf{J}_m \ddot{\mathbf{\Theta}}_m + \mathbf{B}_m \dot{\mathbf{\Theta}}_m \quad (3.13a)$$

$$\dot{\theta}'_{ijm} = \frac{\dot{\theta}_{ijT} J_{ij} (1 + \varepsilon_{ij}) + \dot{\theta}_{ijm} (J_{ijm} - \varepsilon_{ij} J_{ij})}{J_{ij} + J_{ijm}} \quad (3.13b)$$

$$\dot{\theta}'_{ijT} = \frac{\dot{\theta}_{ijT} (J_{ij} - \varepsilon_{ij} J_{ijm}) + \dot{\theta}_{ijm} J_{ijm} (1 + \varepsilon_{ij})}{J_{ij} + J_{ijm}} \quad (3.13c)$$

$$\mathbf{K}_T (\mathbf{\Theta}_T - \mathbf{\Theta}) = \mathbf{H}(\mathbf{\Theta}) \ddot{\mathbf{\Theta}} + \mathbf{c}(\mathbf{\Theta}, \dot{\mathbf{\Theta}}) + \mathbf{g}(\mathbf{\Theta}) - \mathbf{F}_{RH} - \mathbf{J}_F^T(\mathbf{\Theta}) \mathbf{F}_{RF} \quad (3.13d)$$

onde, para a perna i e junta j , $0 \leq \varepsilon_{ij} \leq 1$ é o coeficiente de restituição, θ_{ijT} e θ_{ijm} são, respectivamente, as coordenadas de posição da transmissão e do motor no instante imediatamente antes do impacto e θ'_{ijT} e θ'_{ijm} são as correspondentes coordenadas de posição no instante imediatamente após o impacto, J_{ij} e J_{ijm} são as inércias das ligações das pernas e dos motores, respectivamente, e $\mathbf{\Theta}_T = [\theta_{i1T}, \theta_{i2T}]^T$ é o vector $m \times 1$ das coordenadas de posição da transmissão.

3.2.3 Modelo do Corpo do Robô

A Figura 3.5 apresenta o modelo dinâmico adoptado para o corpo do sistema artificial de locomoção (neste caso representa-se um robô hexápode) e para a interacção pé-solo. Este modelo segmentado, considerando complacência entre os diversos segmentos adjacentes, foi adoptado para o corpo do robô, uma vez que todos os animais vertebrados que se deslocam

com pernas recorrem a uma coluna vertebral que permite suportar a locomoção com maior estabilidade (Witte, *et al.*, 2001).

Este modelo é consistente com a biomecânica dos animais, uma vez que é reconhecido que estes usam a complacência dos músculos e dos tendões para se deslocarem de uma forma mais eficiente (Alexander, 1990). Existem também estudos em biomecânica que apontam para esta estrutura. Por exemplo, o ouriço cacheiro apresenta músculos na omoplata que aparentemente actuam como sistemas mola-amortecedor. Esta estrutura biomecânica absorve parte da energia que se gera durante o contacto do pé com o solo e devolve essa energia pouco antes do levantamento do pé do solo (Villanova, *et al.*, 2000).

Vários outros autores seguiram esta mesma linha de raciocínio. Alguns robôs com pernas também adoptam uma estrutura similar à de uma coluna vertebral, se bem que com menor número de gdl do que os animais em que são inspirados. Berns, *et al.* (1998) implementaram no robô quadrúpede BISAM um corpo principal constituído por quatro segmentos, estando estes ligados entre si e às pernas do robô através de cinco gdl rotacionais accionados.

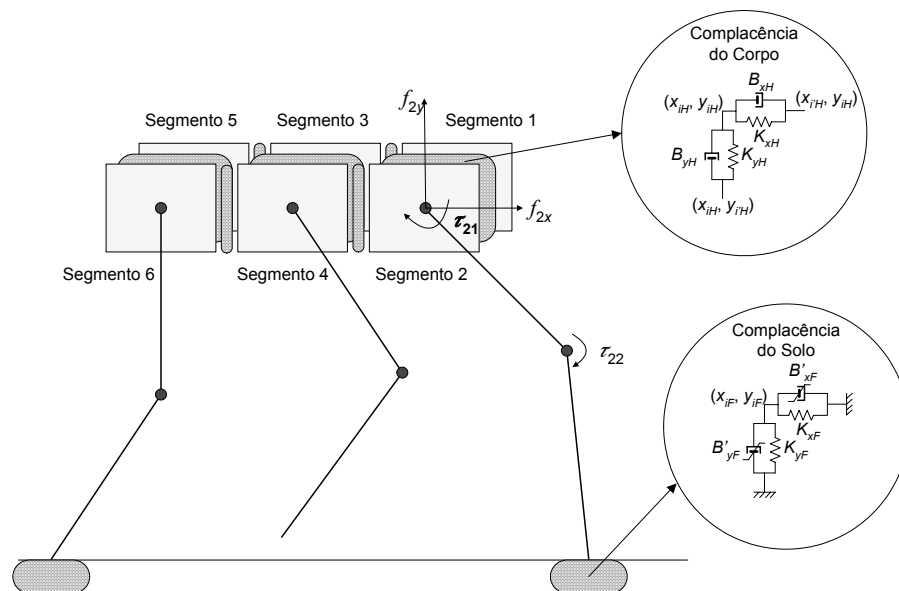


Figura 3.5: Modelo do corpo do robô e da interação pé-solo no caso de pernas com dois gdl.

Também o robô IOAN apresenta uma estrutura deste tipo (Preumont, *et al.*, 1997). Este robô hexápode possui um corpo dividido em três partes, cada uma delas possuindo duas pernas, encontrando-se os diferentes segmentos do corpo ligados entre si através de juntas rotacionais. Cada uma destas juntas é actuada por dois servomotores e dispõe de sensores de binário. Esta arquitectura permite implementar uma complacência activa no corpo do robô através do recurso à realimentação de força no algoritmo de controlo. Esta estrutura particular permite melhorar a agilidade deste robô permitindo que o seu corpo siga o perfil do terreno em que se desloca e possibilitando recuperar de uma situação em que o robô fique “de pernas para o ar”.

Allen, *et al.* (2003) recorrem aos princípios abstractos da locomoção da barata para o desenvolvimento do robô Whegs II. Este robô possui uma junta de flexão do corpo accionada por um servomotor bidireccional. Esta junta permite ao robô Whegs II implementar dois comportamentos observados nas baratas quando estas se encontram a ultrapassar obstáculos. Por um lado, permite elevar a parte frontal do corpo, em antecipação à subida de um degrau, como forma de permitir às pernas da frente terem um alcance superior na direcção vertical. Por outro lado, permite descer a parte frontal do corpo, após trepar a um obstáculo, de forma a manter o contacto entre as pernas da frente do robô e a superfície superior do obstáculo.

No campo dos robôs bípedes, convém referir que o robô Kenta apresenta a característica de ser totalmente actuado por “tendões” e de possuir uma “coluna vertebral” flexível através da utilização de dez juntas rotacionais actuadas (Mizuuchi, *et al.*, 2002).

Nestes casos acabados de apresentar as ligações entre os diferentes segmentos do corpo do robô são actuadas. No entanto, existem outros casos em que se recorre a ligações passivas entre os segmentos adjacentes.

Berkemeier (1998) propôs um modelo de um quadrúpede em que a ligação das pernas ao corpo do robô é efectuado por um sistema paralelo mola-amortecedor linear. No seu modelo os actuadores das juntas encontram-se em série com o sistema mola-amortecedor, tal como os músculos se encontram ligados em série com os tendões nos animais (Alexander, 1990). O robô quadrúpede de Zhifeng, *et al.* (2003) recorre a um gdl passivo na junta da anca, actuado por uma mola, de forma a permitir melhorar a acomodação do robô às irregularidades do terreno. Ishiguro, *et al.* (2003) encontram-se a desenvolver um robô multipernas em que o

corpo se encontra dividido em segmentos, cada um deles com duas pernas, sendo a ligação entre os diversos segmentos efectuada através de molas mecânicas com um comportamento não linear. Variando as características de não linearidade das molas, conseguem fazer o robô apresentar diferentes desempenhos.

Por último é de referir que na construção do robô hexápode *Sprawlita*, baseado nos princípios abstractos da locomoção da barata, Cham, *et al.* (2002) adoptaram seis gdl rotacionais passivos, correspondentes à ligação complacente da anca da perna com o corpo do robô.

Pelos motivos acabados de descrever, no presente estudo o corpo do robô é dividido em n segmentos idênticos (cada um com massa $M_b n^{-1}$) correspondendo cada um destes segmentos a uma anca do robô que se encontra ligada aos segmentos vizinhos através de um modelo mola-amortecedor linear descrito pelas seguintes equações:

$$f_{ixH} = \sum_{i'=1}^u \left(-K_{xH} \Delta_{i'xH} - B_{xH} \dot{\Delta}_{i'xH} \right) \quad (3.14a)$$

$$\Delta_{i'xH} = x_{iH} - x_{i'H}, \dot{\Delta}_{i'xH} = \dot{x}_{iH} - \dot{x}_{i'H}$$

$$f_{iyH} = \sum_{i'=1}^u \left(-K_{yH} \Delta_{i'yH} - B_{yH} \dot{\Delta}_{i'yH} \right) \quad (3.14b)$$

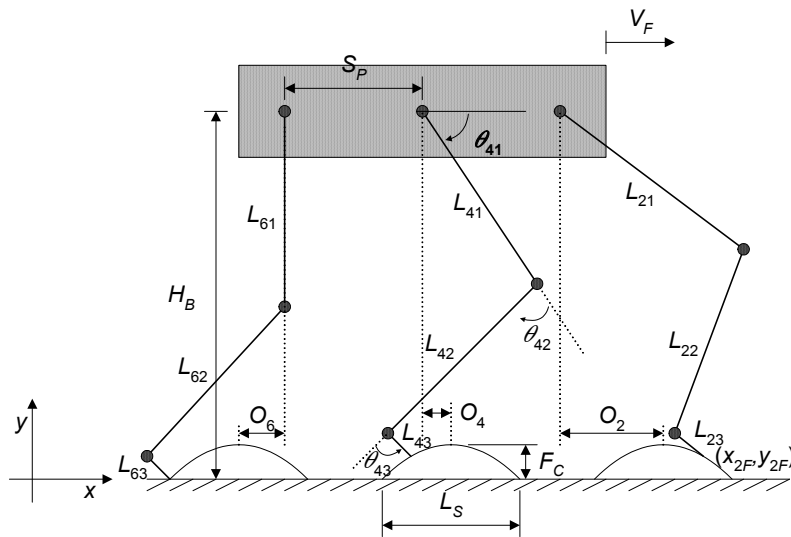
$$\Delta_{i'yH} = y_{iH} - y_{i'H}, \dot{\Delta}_{i'yH} = \dot{y}_{iH} - \dot{y}_{i'H}$$

sendo $(x_{i'H}, y_{i'H})$ as coordenadas das ancas e u o número total de segmentos adjacentes à perna i , respectivamente.

No que diz respeito à definição dos valores numéricos para os parâmetros das equações (3.14a) e (3.14b) têm sido propostos diferentes métodos. Villanova, *et al.* (2000) propõem que os parâmetros das juntas passivas do modelo do ouriço-cacheiro, implementadas através de sistemas lineares mola-amortecedor, devam ser tal que as trajectórias simuladas sejam similares às reais. Por outro lado, Bhat (2003) apresenta um modelo dinâmico de um ser humano em que os diversos segmentos do corpo são unidos por sistemas lineares mola-amortecedor. O conjunto de valores dos parâmetros para estes sistemas é identificado a partir de testes em seres humanos.

Tabela 3.1: Parâmetros do modelo do corpo do robô.

K_{xH}	10^5 Nm^{-1}
B_{xH}	10^3 Nsm^{-1}
K_{yH}	10^4 Nm^{-1}
B_{yH}	10^2 Nsm^{-1}

**Figura 3.6:** Sistema de coordenadas e variáveis que caracterizam as trajetórias de movimento do robô multipernas com três gdl por perna.

Neste estudo, os parâmetros $B_{\eta H}$ e $K_{\eta H}$ ($\eta = \{x, y\}$) nas direções {horizontal, vertical}, respectivamente, são definidos de forma a que o comportamento do corpo seja similar ao que se espera ocorrer num animal vivo (Tabela 3.1).

3.3 Robô com três gdl por Perna

Em alternativa à estrutura básica apresentada anteriormente consideram-se pernas com três gdl por perna (Figura 3.6), correspondendo a três juntas rotacionais, uma na anca, outra no joelho e uma última no tornozelo (*i.e.*, $j = \{1, 2, 3\} \equiv \{\text{anca, joelho, tornozelo}\}$).

Este modelo foi implementado numa segunda fase do trabalho uma vez que, como se pode ver na Figura 3.7, independentemente da forma como apoiam o pé no solo durante a locomoção, os mamíferos dispõem de pernas com três gdl (três segmentos) (Witte, *et al.*, 2001).

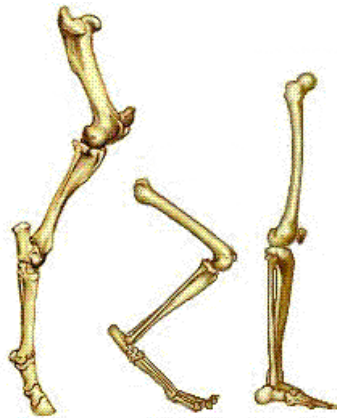


Figura 3.7: Diferentes formas de apoiar o pé no solo (da esquerda para a direita): esqueleto da perna traseira do cavalo (unguligrado), do gato (digitigrado) e do humano (plantigrado).

Os seres humanos apoiam a totalidade da planta do pé no solo, começando pelo calcanhar até aos dedos, sendo por isso designados de plantígrados. Existem outras duas formas de apoiar o pé no solo para suportar o corpo. Animais como os cavalos, as vacas e os antílopes apoiam unicamente os extremos dos seus dedos no solo. Os seus cascos correspondem às unhas dos humanos, tendo ambos evoluído a partir de garras. Estes animais são designados por unglígrados. Por último, existem os mamíferos digitígrados, tais como os cães e os gatos, que apoiam os dedos dos pés e as correspondentes unhas totalmente no solo, mas a palma dos pés assim como o tornozelo estão claramente afastados do solo.

Para além destes aspectos, os pés parecem ter uma grande importância na locomoção dos seres vivos. De acordo com Hardt (1999), no caso da locomoção humana, as principais contribuições dos pés parecem ser a minimização das colisões com o solo no final da fase de transferência da perna, a introdução de binários nos tornozelos e a imposição de uma força vertical, produzida à medida que o calcanhar abandona o solo. O resultado combinado destas acções parece ser o de que as forças verticais de descolagem ajudam a prevenir a saturação de binários nos actuadores, suavizam o movimento de locomoção e reduzem a energia consumida, enquanto que o efeito da actuação do tornozelo suaviza o movimento de locomoção e distribui de uma forma mais equilibrada os binários de entrada necessários entre as juntas da anca, do joelho e do tornozelo. Este autor acrescenta ainda que a flexibilidade da junta do tornozelo do ser humano torna o pé facilmente complacente, o que reduz o impacto provocado pelo contacto do pé com o solo durante a locomoção. Isto também permite a obtenção de um contacto firme entre a planta do pé e o solo.

Estas ideias são corroboradas e complementadas por Takemura, *et al.* (2003). Estes autores afirmam que o pé humano apresenta não só a capacidade de suporte do corpo, mas também uma importante função na entrada de informação, funcionando como sensor de contacto com o solo, e na saída de informação, ao executar o controlo do equilíbrio quer durante a locomoção quer quando parado.

3.3.1 Planeamento da Trajectória do Robô

Aquando da existência de um pé (*i.e.*, o robô apresenta três gdl por perna) e da funcionalidade que se pretende atingir com a sua utilização, é necessário considerar uma variável adicional, nomeadamente o ângulo pretendido do pé com a horizontal θ_{i3hd} . De acordo com o valor imposto para o ângulo θ_{i3hd} o robô pode andar em bicos de pés ($\theta_{i3hd} < 0^\circ$), pode apoiar a planta do pé em simultâneo no solo ($\theta_{i3hd} = 0^\circ$) ou pode andar sobre os calcanhares ($\theta_{i3hd} > 0^\circ$).

Para esta arquitectura de perna, o corpo do robô apresenta igualmente um movimento horizontal com uma velocidade frontal constante e igual a V_F . No entanto, em função do valor do ângulo pretendido do pé com a horizontal torna-se necessário ajustar a altura do corpo ao solo. Assim, neste caso, se se considerar que o robô anda em bicos de pés ($\theta_{i3hd} < 0^\circ$), para a perna i as coordenadas cartesianas da anca da perna são dadas por $\mathbf{p}_{Hd}(t) = [x_{iHd}(t), y_{iHd}(t)]^T$:

$$\mathbf{p}_{Hd}(t) = \begin{bmatrix} V_F t & H_B + L_{i3} \text{sen}(\theta_{i3hd}) \end{bmatrix}^T \quad (3.15)$$

O algoritmo para o planeamento do movimento de locomoção aceita como entrada as trajectórias cartesianas pretendidas dos pés $\mathbf{p}_{Fd}(t) = [x_{iFd}(t), y_{iFd}(t)]^T$ e das ancas $\mathbf{p}_{Hd}(t) = [x_{iHd}(t), y_{iHd}(t)]^T$ do robô e, através de um algoritmo de cinemática inversa Ψ^{-1} , gera as correspondentes trajectórias das juntas $\Theta_d(t) = [\theta_{i1d}(t), \theta_{i2d}(t), \theta_{i3d}(t)]^T$, caso sejam três os gdl por perna. No Anexo D são apresentadas as expressões completas da cinemática directa e inversa de um robô com três gdl rotacionais nas pernas.

3.3.2 Implementação da Junta do Tornozelo

Para além das funções descritas anteriormente, os pés parecem ter ainda outras funções. Hardt (1999) acrescenta que a flexibilidade da junta do tornozelo do ser humano torna o pé facilmente complacente, o que reduz o impacto provocado pelo seu contacto com o solo

durante a locomoção, permitindo também obter um contacto firme entre a planta do pé e o solo. Uma outra vantagem da complacência nas juntas das pernas, resulta na auto-adaptabilidade a terrenos irregulares.

No caso dos animais, os pés parecem ter funções semelhantes, se bem que os detalhes construtivos sejam algo diferentes. Por exemplo, alguns animais recorrem a pés com almofadas complacentes para reduzir as forças de impacto com o solo e prevenir a ocorrência de vibrações, em que o pé repetidamente abandona e retorna ao contacto com o solo antes de estabilizar o contacto (Alexander, 1990).

Tendo por base a inspiração biológica, uma forma frequentemente adoptada nos robôs com pernas, para minimizar os problemas de impacto da perna com o solo e para aumentar o coeficiente de atrito da zona de contacto do pé com o solo, passa por colocar na extremidade das pernas do robô dispositivos passivos com propriedades elásticas e que permitam melhorar estas características. Tipicamente são utilizados pés construídos em borracha ou materiais similares, muitas vezes apresentando formas de fácil substituição, permitindo a utilização de dispositivos específicos para diferentes condições do terreno (Neuhaus e Kazerooni, 2000; Park e Kwon, 2001; Zonfrilli, *et al.*, 2002). Estes elementos complacentes são eficazes na redução das forças e binários no instante de contacto do pé com o solo, de acordo com Hirose, *et al.* (1997).

Nos sistemas naturais pode referir-se ainda que o ouriço-cacheiro apresenta um pé passivo que aparentemente pode ser modelizado com um sistema mola-amortecedor (Villanova, *et al.*, 2000). Mais ainda, dispõe de músculos na omoplata que, aparentemente, actuam como sistemas mola-amortecedor, absorvendo parte da energia que se gera durante o contacto do pé com o solo e devolvendo-a pouco antes da saída seguinte do pé do solo (Villanova, *et al.*, 2000). A complacência nas juntas das pernas pode também ser encontrada, por exemplo, na aranha (Schulz, *et al.*, 2001).

Da mesma forma, diversos autores adoptam juntas actuadas através de sistemas mola-amortecedor, em paralelo, de forma a que através da variação dos parâmetros de elasticidade das juntas conseguem emular até certo ponto estas características dos músculos dos seres vivos e, assim, aumentar a adaptabilidade dos robôs a terrenos irregulares (Hyon e Mita, 2002; Fukuoka, *et al.*, 2003; Zhang, *et al.*, 2003). Outra solução, complementar da anterior,

passa por adoptar molas nas juntas do tornozelo de forma a que o pé do robô apresente complacência e seja capaz de absorver choques com o solo.

Como exemplos, Luo, *et al.* (2001) desenvolveram um robô quadrúpede, a que deram o nome de Animal Robot, com dois gdl rotacionais em cada perna, e colocaram na extremidade das pernas (*i.e.*, nos pés deste robô) uma mola para absorver os impactos com o solo. O quadrúpede AIBO, da SONY, apresenta um pé com um gdl passivo e que é mantido na sua posição através de uma mola. O contacto com o solo é virtualmente pontual e estabelecido através de uma semiesfera de borracha localizada debaixo do calcanhar (Zonfrilli, *et al.*, 2002). Por último, Iida e Pfeifer (2004) apresentam um robô quadrúpede, baseado no cão e com três gdl por perna, onde a junta do tornozelo é passiva e actuada por molas mecânicas. Desta forma, introduzem uma certa complacência nas pernas deste robô, que permite diminuir a amplitude da força de impacto dos pés com o solo.

Estas soluções são também frequentes nos robôs bípedes, recorrendo-se a diferentes soluções mecânicas para a sua implementação. Yi (1997) refere o desenvolvimento de um robô bípede com a junta do tornozelo passiva e com a possibilidade de acomodação ao solo, através do recurso a molas e restrições mecânicas no projecto desta junta. Spenneberg e Kirchner (2001) propõem a utilização de uma mola no elo extremo da perna do robô de forma a amortecer o contacto com o solo. Recorrendo a uma medida do deslocamento, esta mola permite também determinar a força a que está sujeito o pé do robô. Outra solução mecânica passa por equipar a sola dos pés dos robôs com uma camada de borracha, conforme foi adoptada nos robôs bípedes Honda P2 (Hirai, *et al.*, 1998), HRP-2L (Nagasaki, *et al.*, 2003) e Johnnie (Gienger, *et al.*, 2000). Posteriormente os pés deste último robô foram melhorados, passando a ser constituídos por duas placas metálicas paralelas, separadas por um elemento amortecedor. Este elemento, para além de absorver os choques do pé com o solo, tem também por função fazer a ponte durante o intervalo de tempo que decorre desde o impacto até à resposta do controlador (Pfeiffer, *et al.*, 2003). Kwon e Park (2003) adoptam no seu bípede pés equipados com um sistema mecânico composto por molas lineares e não lineares e amortecedores não lineares para acomodarem o impacto dos pés com o solo.

Pelos motivos acabados de apresentar, e tendo por base a inspiração biológica, na realização deste trabalho considera-se que a junta do tornozelo do robô ($j = 3$) pode ser

actuada quer mecanicamente (junta passiva) quer através de um motor (junta activa). No caso de ser actuada de forma passiva, supõe-se que existe um sistema mola-amortecedor rotacional ligando os elos L_{i2} e L_{i3} da perna. Esta impedância mecânica mantém o ângulo entre os dois elos e impõe um binário na junta dado por (para a perna i):

$$\begin{aligned}\tau_{i3m} &= K_3 \Delta_{i3} + B_3 \dot{\Delta}_{i3} \\ \Delta_{i3} &= \theta_{i3d}(t) - \theta_{i3}(t), \dot{\Delta}_{i3} = \dot{\theta}_{i3d}(t) - \dot{\theta}_{i3}(t)\end{aligned}\tag{3.16}$$

onde, τ_{i3m} é o binário na junta, K_3 e B_3 são os coeficientes de elasticidade e de atrito viscoso e θ_{i3d} e θ_{i3} são as trajectórias planeadas e reais na junta. As expressões completas da dinâmica de um robô com três gdl rotacionais nas pernas encontram-se apresentadas no Anexo D.

3.4 Modelo de Interação Pé-Solo

O contacto dos pés do robô com o solo pode ser analisado através de diferentes pontos de vista, conduzindo a modelos distintos. Um método considera as relações exactas entre a força e a deformação do solo. Outro método, sob restrições particulares, passa pela utilização de modelos aproximados da deformação do solo baseados nos estudos de mecânica dos solos.

Neste trabalho recorre-se à segunda aproximação. Tal como descrito no Anexo E, adopta-se uma estratégia mista, ou seja, modeliza-se o contacto do i -ésimo pé do robô com o solo através de uma mola linear com coeficiente de elasticidade $K_{\eta F}$ e um atrito não linear com coeficiente de amortecimento viscoso $B'_{\eta F}$ ($\eta = \{x, y\}$) nas direcções {horizontal, vertical}, respectivamente (Figura 3.5).

Para simplificar a complexidade do problema assumiram-se as seguintes condições:

- o contacto entre o pé do robô e o ambiente (o solo) é um contacto pontual;
- o ambiente no qual o robô colide é uma superfície imóvel e que pode sofrer deformações.

Assumindo um contacto pontual, não existe qualquer binário presente quando o pé do robô contacta com o ambiente. Logo, só as forças necessitam de ser consideradas, levando a:

Tabela 3.2: Parâmetros do modelo do solo, no caso deste ser considerado de argila compacta.

K_{x_F}	1302152,0 Nm ⁻¹
B'_{x_F}	2364932,0 Nsm ⁻¹
K_{y_F}	1705199,0 Nm ⁻¹
B'_{y_F}	2706233,0 Nsm ⁻¹
ν	0,9

$$f_{ixF} = -K_{x_F} \Delta_{ixF0} - B'_{x_F} (-\Delta_{iyF0}) \dot{\Delta}_{ixF0} \quad (3.17a)$$

$$\Delta_{ixF0} = x_{iF} - x_{iF0}, \dot{\Delta}_{ixF0} = \dot{x}_{iF} - \dot{x}_{iF0}$$

$$f_{iyF} = -K_{y_F} \Delta_{iyF0} - B'_{y_F} (-\Delta_{ixF0})^{\nu} \dot{\Delta}_{iyF0} \quad (3.17b)$$

$$\Delta_{iyF0} = y_{iF} - y_{iF0}, \dot{\Delta}_{iyF0} = \dot{y}_{iF} - \dot{y}_{iF0}$$

sendo x_{iF} e y_{iF} as coordenadas actuais do pé i , x_{iF0} e y_{iF0} as coordenadas de colocação do pé i no solo e ν um parâmetro dependente das características do solo.

No caso de o solo ser de argila compacta os parâmetros deste modelo são os apresentados na Tabela 3.2.

3.5 Aplicação para Simulação da Locomoção

Tendo por base o modelo acabado de descrever, foi implementado um conjunto de algoritmos recorrendo a diferentes ferramentas computacionais. O sistema de simulação inclui uma interface gráfica com o utilizador (IGU) apresentada na Figura 3.8. Esta IGU, implementada em MATLAB, apresenta os valores de vários parâmetros do robô e da locomoção, o diagrama do padrão de locomoção (Song e Waldron, 1989), uma animação da locomoção do robô e as trajectórias do corpo, dos joelhos e dos pés do robô (Figura 3.9). No entanto, os algoritmos numéricos do modelo de simulação encontram-se implementados na linguagem de programação Microsoft C/C++ para diminuir a carga computacional. Os resultados da simulação são gravados em ficheiros (em formato texto) que são lidos pela aplicação de IGU de forma a gerar os relatórios gráficos.

Em todas as simulações, o algoritmo de controlo em tempo discreto é avaliado com uma frequência de amostragem $f_{sc} = 2,0$ kHz e a dinâmica do robô e do ambiente são calculadas com uma frequência de amostragem $f_{sr} = 20,0$ kHz.

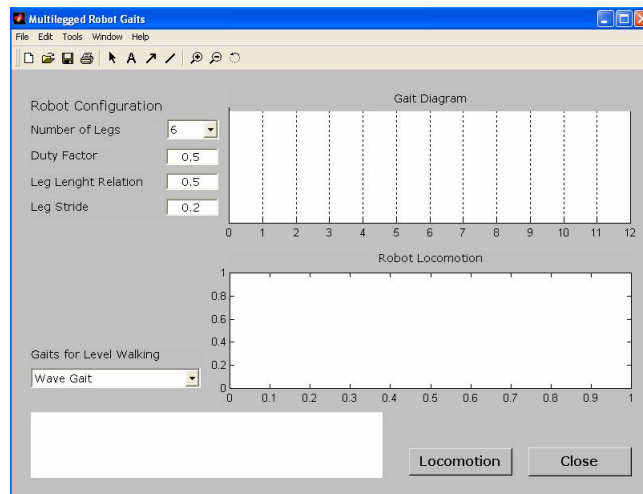


Figura 3.8: IGU da aplicação informática para a simulação de padrões de locomoção para robôs multipernas.

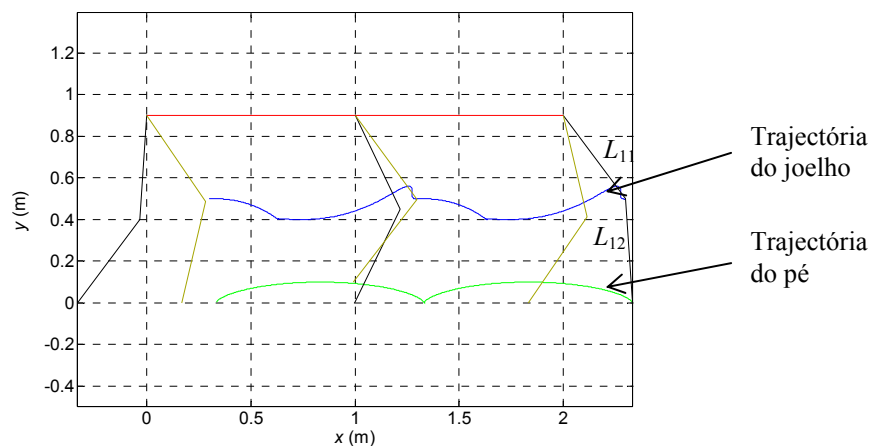


Figura 3.9: Trajectórias da anca, do joelho e do pé da perna 1 de um robô hexápode, durante dois passos, quando este se desloca com $\beta = 2/3$.

3.6 Medidas para a Avaliação do Desempenho da Locomoção

Para avaliar o funcionamento do sistema e possibilitar a comparação entre diferentes estratégias e parâmetros é necessário recorrer a medidas de desempenho. Assim, nesta secção formulam-se, em termos matemáticos, várias medidas globais do desempenho do sistema num sentido médio. O objectivo é verificar se é possível encontrar uma correlação, durante a locomoção do robô, entre os diferentes pontos de vista. Estas medidas de desempenho agrupam-se em dois conjuntos, a saber, índices cinemáticos e índices dinâmicos, consoante recorrem ao modelo cinemático ou ao modelo dinâmico do robô para o seu cálculo.

3.6.1 Índices Cinemáticos

Nesta subsecção desenvolvem-se os índices adoptados no decurso do trabalho para analisar a locomoção do robô de um ponto de vista cinemático.

3.6.1.1 Análise Face a Perturbações

A essência da locomoção consiste na deslocação suave da secção superior do corpo, tendo presentes algumas restrições quanto ao tempo necessário para executar o referido movimento.

Em muitos casos práticos o sistema apresenta forças perturbantes internas ou externas. Assim, foi implementada uma aproximação denominada “análise face a perturbações” para determinar de que forma é que o modelo do robô se comporta perante variações da trajectória. Em primeiro lugar, as trajectórias das juntas são calculadas recorrendo ao algoritmo da cinemática inversa. De seguida, os vectores com as acelerações angulares nas juntas são “corrompidos” adicionando-lhes ruído de pequena amplitude. Para simplificar, o sinal de ruído é “construído” recorrendo-se a uma distribuição uniforme, com valor médio nulo. Como resultado, as trajectórias das juntas das pernas (e as trajectórias cartesianas dos pés do robô, considerando que as ancas mantêm a trajectória correcta) sofrem uma distorção e afastam-se da trajectória desejada. Calculando a cinemática directa do mecanismo, determinam-se dois índices baseados na média estatística do erro quadrático médio:

$$\xi_x = \frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} \sqrt{\frac{1}{T} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int_0^T [\dot{x}_{iFn}(t) - \dot{x}_{iFd}(t)]^2 dt} \quad [\text{ms}^{-1}] \quad (3.18a)$$

$$\xi_y = \frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} \sqrt{\frac{1}{T} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \int_0^T [\dot{y}_{iFn}(t) - \dot{y}_{iFd}(t)]^2 dt} \quad [\text{ms}^{-1}] \quad (3.18b)$$

em que N_S é o número total de passos para efeitos de cálculo da média, \dot{x}_{iFd} e \dot{x}_{iFn} são as i -ésimas amostras das velocidades horizontais, desejada e corrompida com ruído, no pé do robô, respectivamente, \dot{y}_{iFd} e \dot{y}_{iFn} são as i -ésimas amostras das velocidades verticais, desejada e corrompida com ruído, no pé do robô, respectivamente. A perturbação estocástica penaliza o desempenho do sistema e o objectivo passa por minimizar ambos os índices ξ_x e ξ_y .

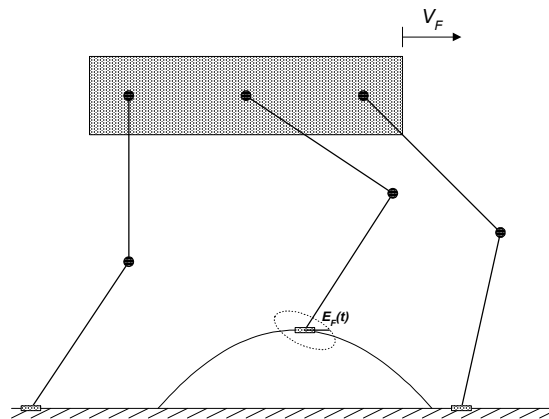


Figura 3.10: Representação gráfica da distância entre o centro das elipsóides e as suas intersecções com a tangente à trajectória do pé (E_F).

3.6.1.2 Medida da Locomobilidade

A motivação para o desenvolvimento do índice de locomobilidade é aplicar os conceitos de manipulabilidade de um braço robotizado (Yoshikawa, 1990) à locomoção multipernas. Esta medida do desempenho pode ser expressa através da matriz Jacobiano.

No presente caso, os índices globais são calculados efectuando a média das distâncias entre os centros das (pequenas) elipsóides e as suas intersecções com as tangentes às trajectórias desejadas, quer do pé (E_F), como se mostra na Figura 3.10, quer do corpo do robô (E_B), durante um ciclo completo de locomoção T , dando origem ao índice de locomobilidade do pé (L_F) e do corpo (L_B), respectivamente:

$$L_F = \frac{1}{T} \int_0^T E_F(t) dt \quad [\text{m}] \quad (3.19a)$$

$$L_B = \frac{1}{T} \int_0^T E_B(t) dt \quad [\text{m}] \quad (3.19b)$$

Nesta perspectiva, a trajectória mais adequada é a que maximiza L_F e L_B .

3.6.2 Índices Dinâmicos

Nesta subsecção apresentam-se os índices formulados e utilizados no decurso do trabalho para analisar a locomoção do robô do ponto de vista dinâmico, para o que se recorre ao seu modelo dinâmico. Assim, formulam-se cinco medidas globais do desempenho do mecanismo

estudado de um ponto de vista médio, nomeadamente os índices $\{E_{av}, D_{av}, T_L, F_L, \tau_P\}$ baseados na dinâmica do sistema robô-solo e o índice $\{\varepsilon_{xyH}\}$ baseado nos erros de seguimento da trajectória da anca do robô.

3.6.2.1 Densidade de Energia Absoluta Média

A medida chave nesta análise é a densidade de energia absoluta média por distância percorrida E_{av} . Este índice é calculado considerando que não se verifica recuperação de energia pelos actuadores quando estes se encontram a desenvolver trabalho negativo, isto é, considerando que se toma o valor absoluto da potência mecânica. Este raciocínio tem por base a constatação de que nos seres biológicos a energia que está envolvida no movimento dos membros, através da actuação muscular, não tem a possibilidade de ser recuperada durante os intervalos de tempo em que se efectua trabalho negativo. Assim, a nível biológico, o planeamento de trajectórias promove somente um sentido no fornecimento de nutrientes.

Sabe-se que numa determinada junta j (cada perna tem m juntas) e perna i (o robô tem n pernas), a potência mecânica é o produto do binário desenvolvido pelo actuador pela velocidade angular. Como consequência, o índice global E_{av} é obtido efectuando a média da energia mecânica absoluta consumida ao longo da distância percorrida d :

$$E_{av} = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \int_0^T |\tau_{ij}(t) \dot{\theta}_{ij}(t)| dt \quad [\text{Jm}^{-1}] \quad (3.20)$$

sendo τ_{ij} o binário motor e $\dot{\theta}_{ij}$ a velocidade angular da junta em consideração. Portanto, um bom desempenho do sistema requer a minimização de E_{av} .

3.6.2.2 Densidade de Dispersão da Potência Média

Embora minimizar a potência pareça ser um aspecto importante, podem ocorrer consumos de potência muito elevados e quase instantâneos. Nestes casos, apesar de o valor médio poder ser muito pequeno os picos podem ser fisicamente irrealizáveis. Assim, um índice alternativo é o desvio padrão por metro que avalia a variabilidade (ou dispersão) da potência ao longo de um ciclo completo T e da distância percorrida d :

$$D_{av} = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [P_i(t) - P_0]^2 dt} \quad [\text{Wm}^{-1}] \quad (3.21a)$$

$$P_i(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \quad [\text{W}] \quad (3.21b)$$

$$P_i(t) = \sum_{j=1}^m |\boldsymbol{\tau}_{ij}(t) \dot{\boldsymbol{\theta}}_{ij}(t)| \quad [\text{W}] \quad (3.21c)$$

$$P_0 = \frac{E_{av}}{T} d_1, \quad \text{com } d_1 = 1 \text{ m} \quad [\text{W}] \quad (3.21d)$$

sendo P_i a potência mecânica absoluta instantânea na perna i e P_t a potência mecânica absoluta instantânea total. Por seu lado, P_0 é a densidade de potência absoluta média envolvida na deslocação de 1 m e $P_i(t) - P_0$ representa o desvio instantâneo face a esse valor. Pode tomar-se outro valor para P_0 , ou seja, outra constante em relação à qual são medidos os desvios. Por exemplo, pode tomar-se o valor médio da potência mecânica instantânea total ao longo do ciclo de locomoção, considerando a bidireccionalidade dos fluxos de energia nos actuadores. No entanto, por uma questão de consistência no trabalho optou-se por utilizar para o cálculo deste índice um termo baseado em E_{av} ¹.

Deste ponto de vista, a trajectória mais adequada é, também, a que minimiza D_{av} .

3.6.2.3 Densidade de Potência Perdida²

Outra estratégia de optimização alternativa para um sistema actuado consiste em T_L , a densidade de potência perdida nos actuadores das juntas por distância percorrida d . Deste

¹ Esta questão é semelhante à encontrada na estatística, com a variância $V = \frac{1}{N} \sum_i (x_i - \mu)^2$. Tomar a média

aritmética μ corresponde somente a minimizar V pois $\forall c \in \mathbb{R}$ tem-se $\frac{1}{N} \sum_i (x_i - c)^2 = \frac{1}{N} \sum_i (x_i - \mu)^2 + (c - \mu)^2$.

Também no caso da equação (3.21a) verificou-se que outros valores da constante P_0 não alteravam qualitativamente a forma do gráfico (Silva, *et al.*, 2001; Silva, *et al.*, 2002a; Silva, *et al.*, 2002b).

² Este índice, denominado Densidade de Potência Perdida, apresenta este nome uma vez que é calculado tendo por base uma definição associada à potência perdida em actuadores eléctricos; contudo, as suas dimensões não são as de uma potência, mas sim as de uma força, tendo como unidade o Newton (N).

ponto de vista, pode-se definir o índice densidade de potência perdida por unidade de comprimento como:

$$T_L = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \int_0^T [\tau_{ij}(t)]^2 dt} \quad [\text{N}] \quad (3.22)$$

Mais uma vez, a trajectória mais adequada é aquela que minimiza o índice T_L .

3.6.2.4 Força Média na Interface Corpo-Pernas³

Uma quarta possível estratégia de otimização considera as forças que ocorrem nas ancas do robô por distância percorrida d e tempo despendido no percurso T . O índice força média nas ancas por unidade de comprimento é definido como:

$$F_L = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n \int_0^T \left\{ [f_{ix}(t)]^2 + [f_{iy}(t)]^2 \right\} dt} \quad [\text{Nm}^{-1}] \quad (3.23)$$

A melhor trajectória é a que minimiza F_L .

3.6.2.5 Pico de Binário no Robô Solicitado pelo Controlador

Uma vez que os índices anteriores capturam, principalmente, o comportamento de baixa frequência do sistema, define-se o índice τ_p que mede os picos de binário no robô solicitados pelo controlador quando responde a fenómenos de alta frequência, tais como os impactos do pé com o solo:

$$\tau_p = \max |\tau_{ijC}(t)| \quad [\text{N}] \quad (3.24)$$

3.6.2.6 Erros Quadráticos Médios entre as Trajectórias Planeadas e Reais

No que diz respeito aos erros de seguimento das trajectórias das ancas e dos pés definiram-se os índices:

³ Tal como no caso do índice anterior, este tem por nome Força Média na Interface Corpo-Pernas uma vez que o seu cálculo é baseado nas forças que surgem nas ancas do robô, mas as suas dimensões são as de uma força por metro, tendo por unidades o Nm^{-1} .

$$\mathcal{E}_{xyH} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} (\Delta_{ixH}^2 + \Delta_{iyH}^2)} \quad [\text{m}] \quad (3.25a)$$

$$\Delta_{ixH} = x_{iHd}(k) - x_{iH}(k), \Delta_{iyH} = y_{iHd}(k) - y_{iH}(k)$$

$$\mathcal{E}_{xyF} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{k=1}^{N_s} (\Delta_{ixF}^2 + \Delta_{iyF}^2)} \quad [\text{m}] \quad (3.25b)$$

$$\Delta_{ixF} = x_{iFd}(k) - x_{iF}(k), \Delta_{iyF} = y_{iFd}(k) - y_{iF}(k)$$

sendo N_s o número total de amostras para efeitos de média, d indica as i -ésimas amostras da posição pretendida e os índices $\{x, y\}$ e $\{H, F\}$ representam as coordenadas {horizontal, vertical} na {anca, pé}, respectivamente.

Em todos os casos a optimização do desempenho requer a minimização de cada índice.

3.7 Conclusões e Perspectivas de Trabalho Futuro

Neste capítulo apresentou-se um modelo de simulação para sistemas de locomoção multipernas com corpo segmentado. Esta ferramenta é a base para o estudo da configuração do sistema e do tipo de movimentos que levam a uma melhor implementação mecânica, bem como para o teste das arquitecturas e dos algoritmos de controlo ao nível das juntas das pernas.

O modelo para a locomoção do robô inclui o planeamento da trajectórias dos pés, para diferentes padrões de locomoção periódicos, a cinemática e a dinâmica, dispondo cada perna de dois ou três gdl. Para além disto, as interacções entre o pé do robô e o solo são também consideradas.

Através da implementação de modelos dos actuadores e das transmissões das juntas das pernas que incluem fenómenos dinâmicos, tais como saturação, atrito viscoso, folga e flexibilidade, é possível estimar a forma como os controladores do robô respondem a uma deterioração das características dos actuadores e transmissões.

A simulação da locomoção do robô é efectuada adoptando-se, para o efeito, a linguagem de programação C/C++ devido à sua eficiência computacional. No entanto, a interface gráfica

com o utilizador recorre a uma aplicação desenvolvida em MATLAB, sendo a troca de dados entre os dois módulos efectuada através do recurso a ficheiros.

Para analisar o desempenho cinemático do sistema de locomoção multipernas foram formuladas duas medidas quantitativas, nomeadamente a análise face a perturbações e a medida da locomobilidade. A análise face a perturbações tende a ser um método elegante, se bem que exigente do ponto de vista computacional. As suas características aleatórias parecem ser particularmente adequadas para avaliar o papel das diferentes variáveis no processos de locomoção. Por outro lado, a medida da locomobilidade captura a amplificação geométrica entre as juntas das pernas e as trajectórias dos pés ou do corpo.

No que concerne à análise do desempenho dinâmico do sistema foram definidos cinco índices quantitativos baseados na dinâmica do sistema robô-solo (a densidade de energia absoluta média, a densidade de dispersão da potência média, a densidade de potência perdida, a força média na interface corpo-pernas e, por último, o pico de binário no robô solicitado pelo controlador) e um índice baseado nos erros de seguimento da trajectória da anca do robô (os erros quadráticos médios entre as trajectórias planeadas e reais).

Apesar de o modelo desenvolvido incluir as principais características envolvidas na locomoção de sistemas artificiais multipernas, existem aspectos que são susceptíveis de melhoramento. Entre os aspectos que se prevê modificar, incluem-se os seguintes:

- desenvolver uma versão ligeiramente mais sofisticada do modelo de interacção do pé com o solo. Assim, poderá considerar-se a hipótese de haver escorregamento do pé quando a força de reacção do solo, segundo a direcção horizontal, ultrapassa o limite da máxima força de atrito estático, tal como referido na subsecção E.2.2 do Anexo E (nas expressões (E.4) e (E.5));
- incluir nas pernas ou nos pés do robô mecanismos que permitam o armazenamento de energia durante o impacto do pé com o solo e a sua restituição pouco antes de a perna iniciar a fase de transferência;
- modificar a forma de actuação das juntas das pernas, possibilitando incluir actuadores lineares. Poderão incluir-se modelos recorrendo a conjuntos de dois actuadores por

- junta, com efeitos agonista-antagonista, como se verifica com o comportamento dos músculos ao accionarem as juntas dos sistemas biológicos;
- passar de um modelo 2½D para um verdadeiro modelo 3D. Desta forma, poderá analisar-se a locomoção do robô não só no plano sagital, mas também no plano transversal, de forma a ser possível estudar mais profundamente a deslocação em terrenos não estruturados.

Referências

- ALEXANDER, R. McN.. (1990). “Three Uses for Springs in Legged Locomotion”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 9; No. 2; pp. 53 – 61.
- ALLEN, Thomas J.; QUINN, Roger D.; BACHMANN, Richard J.; RITZMANN, Roy E.. (2003). “Abstracted Biological Principles Applied With Reduced Actuation Improve Mobility of Legged Vehicles”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1370 – 1375.
- BARRETO, João Pedro; TRIGO, A.; MENEZES, P.; DIAS, J.; ALMEIDA, A. T. de. (1998). “FBD – The Free Body Diagram Method. Kinematic and Dynamic Modelling of a Six Leg Robot”. In: *Proceedings of the AMC’98 – 5th International Workshop on Advanced Motion Control*; pp. 423 – 428.
- BERKEMEIER, Matthew D.. (1998). “Modeling the Dynamics of Quadrupedal Running”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 17; No. 9; pp. 971 – 985.
- BERNS, K.; ILG, W.; DECK, M.; DILLMANN, R.. (1998). “The Mammalian-Like Quadrupedal Walking Machine BISAM”. In: *Proceedings of the AMC’98 – 5th International Workshop on Advanced Motion Control*; pp. 429 – 433.
- BHAT, Rama B.. (2003). “Dynamic Response of Whole Body System Subjected to Walking Generated Excitation”. In: *Proceedings of DECT’03 – ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*; VIB-48487.
- BLAZEJCZYK-OKOLEWSKA, Barbara; CZOLCZYNSKI, Krzysztof; KAPITANIAK, Tomasz; WOJEWODA, Jerzy. (1999). *Chaotic Mechanics in Systems With Impacts and Friction*. World Scientific Series on Nonlinear Science. Series A. Vol 36. World Scientific.
- BROGLIATO, Bernard. (1996). *Nonsmooth Impact Mechanics – Models, Dynamics and Control*. Lecture Notes in Control and Information Sciences 220. Springer-Verlag.
- CHAM, Jorge G.; BAILEY, Sean A.; CLARK, Jonathan E.; FULL, Robert J.; CUTKOSKY, Mark R.. (2002). “Fast and Robust: Hexapedal Robots via Shape Deposition Manufacturing”. *The International Journal of Robotics Research*; Vol. 21; No. 10 – 11; pp. 869 – 882.
- FEATHERSTONE, Roy; ORIN, David. (2000). “Robot Dynamics: Equations and Algorithms”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 826 – 834.

- FUKUOKA, Y.; KIMURA, H.; HADA, Y.; TAKASE, K.. (2003). “Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot ‘Tekken’ on Irregular Terrain Using a Neural System Model”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2037 – 2042.
- GIENGER, M.; LÖFFLER, K.; PFEIFFER, F.. (2000). “A Biped Robot That Jogs”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3334 – 3339.
- HARDT, Michael. (1999). *Multibody Dynamical Algorithms, Numerical Optimal Control, With Detailed Studies in the Control of Jet Engine Compressors and Biped Walking*. PhD. Thesis. Electrical Engineering – UCSD. La Jolla, CA.
- HIRAI, Kazuo; HIROSE, Masato; HAIKAWA, Yuji; TAKENAKA, Toru. (1998). “The Development of Honda Humanoid Robot”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1321 – 1326.
- HIROSE, Shigeo; YONEDA, Kan; TSUKAGOSHI, Hideyuki. (1997). “TITAN VII: Quadruped Walking and Manipulating Robot on a Steep Slope”. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 494 – 500.
- HODGINS, Jessica K.. (1996). “Three-Dimensional Human Running”. In: *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3271 – 3276.
- HYON, S. H.; MITA, T.. (2002). “Development of a Biologically Inspired Hopping Robot – “Kenken””; In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3984 – 3991.
- IIDA, Fumiya; PFEIFER, Rolf. (2004). ““Cheap” Rapid Locomotion of a Quadruped Robot: Self-Stabilization of Bounding Gait”. In: *Proceedings of IAS-8: the 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems*; pp. 642 – 649.
- ISHIGURO, Akio; ISHIMARU, Kazuhisa; HAYAKAWA, Koji; KAWAKATSU, Toshihiro. (2003). “How Should Control and Body Dynamics be Coupled? – A Robotic Case Study –”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1727 – 1732.
- JIMÉNEZ, María A.; SANTOS, P. González de. (1997). “Terrain-Adaptive Gait for Walking Machines”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 16; No. 3; pp. 320 – 339.
- KWON, Ohung; PARK, Jong Hyeon. (2003). “Gait Transitions for Walking and Running of Biped Robots”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1350 – 1355.
- LEE, Kwang-Pyo; KOO, Tae-Wan; YOON, Yong-San. (1998). “Real-Time Dynamic Simulation of Quadruped Using Modified Velocity Transformation”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1701 – 1706.

-
- LUO, Ren C.; PHANG, S. H. Henry; SU, Kuo L.. (2001). “Multilevel Multisensor Based Decision Function for Intelligent Animal Robot”. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 4226 – 4231.
- MACHADO, J. A. T.; GALHANO, A. M. S. F.. (1995). “Evaluation of Manipulator Direct Dynamics Using Customized Runge-Kutta Methods”. *SAMS – Journal Systems Analysis-Modelling-Simulation*. Vol. 17; pp. 229 – 239.
- MCMILLAN, Scott; ORIN, David E.. (1998). “Forward Dynamics of Multilegged Vehicles Using the Composite Rigid Body Method”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 464 – 470.
- MIZUUCHI, Ikuo; TAJIMA, Ryosuke; YOSHIKAI, Tomoaki; SATO, Daisuke; NAGASHIMA, Koichi; INABA, Masayuki; KUNIYOSHI, Yasuo; INOUE, Hirochika. (2002). “The Design and Control of the Flexible Spine of a Fully Tendon-Driven Humanoid “Kenta””. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2527 – 2532.
- NAGASAKI, Takashi; KAJITA, Shuuji; YOKOI, Kazuhito; KANEKO, Kenji; TANIE, Kazuo. (2003). “Running Pattern Generation and Its Evaluation Using a Realistic Humanoid Model”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1336 – 1342.
- NEUHAUS, Peter; KAZEROONI, H.. (2000). “Design and Control of Human Assisted Walking Robot”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 563 – 569.
- PARK, Jong Hyeon; KWON, Ohung. (2001). “Reflex Control of Biped Robot Locomotion on a Slippery Surface”. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 4134 – 4139.
- PERRIN, B.; CHEVALLEREAU, C.; VERDIER, C.. (1997). “Calculation of the Direct Dynamic Model of Walking Robots: Comparison Between Two Methods”. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1088 – 1093.
- PFEIFFER, F.; LÖFFLER, K.; GIENGER, M.. (2003). “Humanoid Robots”. In: *Proceedings CLAWAR’2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 505 – 516.
- PREUMONT, A.; ALEXANDRE, P.; DOROFTEI, I.; GOFFIN, F.. (1997). “A Conceptual Walking Vehicle for Planetary Exploration”. *Mechatronics*. Vol. 7; No. 3; pp. 287 – 296.
- SCHULZ, S.; PYLATIUK, C.; BRETTHAUER, G.. (2001). “Walking Machine With Compliant Joints”. In: *Proceedings CLAWAR’2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 231 – 236.

SILVA, M. F.; MACHADO, J. A. Tenreiro; LOPES, A. Mendes. (2001). “Energy Analysis of Multi-Legged Locomotion Systems”. In: *Proceedings CLAWAR'2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 143 – 150.

SILVA, M. F.; MACHADO, J. A. Tenreiro; LOPES, A. Mendes. (2003a). “Cascade Control of a Hexapod Robot”. In: *Proceedings CLAWAR'2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 163 – 170.

SILVA, Manuel F.; MACHADO, J. A. Tenreiro; LOPES, António M.. (2002a). “Performance Analysis of Multi-Legged Systems”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2234 – 2239.

SILVA, Manuel F.; MACHADO, J. A. Tenreiro; LOPES, António M.. (2002b). “Power Analysis of Multi-Legged Systems”. In: *Proceedings b'02 – 15th IFAC World Congress on Automatic Control*.

SILVA, Manuel F.; MACHADO, J. A. Tenreiro; LOPES, António M.. (2003b). “Position / Force Control of a Walking Robot”. *Machine Intelligence and Robotic Control*. Vol. 5; No. 2; pp. 33 – 44.

SONG, Shin-Min; WALDRON, Kenneth J.. (1989). *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*. The MIT Press.

SPENNEBERG, Dirk; KIRCHNER, Frank. (2001). “An Approach Towards Autonomous Outdoor Walking Robots”. In: *Proceedings of the ICAR 2001 – 10th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 485 – 490.

TAKEMURA, Hiroshi; KHIAT, Adbelaziz; IWAMA, Hiroya; UEDA, Jun; MATSUMOTO, Yoshio; OGASAWARA, Tsukasa. (2003). “Study of the Toes Role in Human Walk by Toe Elimination and Pressure Measurement System”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*; pp. 2569 – 2574.

VILLANOVA, J.; GUINOT, J.-C.; NEVEU, P.; GASC, J.-P.. (2000). “Quadrupedal Mammal Locomotion Dynamics 2D Model”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1785 – 1790.

WITTE, H.; HACKERT, R.; FISCHER, M. S.; ILG, W.; ALBIEZ, J.; DILLMANN, R.; SEYFARTH, A.. (2001). “Design Criteria for the Leg of a Walking Machine Derived by Biological Inspiration from Quadrupedal Mammals”. In: *Proceedings CLAWAR'2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 63 – 68.

YI, Yeon Young. (1997). “Locomotion of a Biped Robot With Compliant Ankle Joints”. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 199 – 204.

YOSHIKAWA, Tsuneo. (1990). *Foundations of Robotics – Analysis and Control*. The MIT Press.

ZHANG, Z. G.; FUKUOKA, Y.; KIMURA, H.. (2003). “Adaptive Running of a Quadruped Robot on Irregular Terrain Based on Biological Concepts”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2043 – 2048.

ZHIFENG, Cheng; XIULI, Zhang; HAOJUN, Zheng; LIYAO, Zhao. (2003). “The CPG-based Bionic Quadruped System”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*; pp. 1828 – 1833.

ZONFRILLI, Fabio; ORIOLO, Giuseppe; NARDI, Daniele. (2002). “A Biped Locomotion Strategy for the Quadruped Robot Sony ERS-210”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2768 – 2774.

Capítulo 4

Análise Cinemática e Dinâmica de Sistemas de Locomoção Multipernas

Neste capítulo apresenta-se o estudo da configuração mecânica e dos padrões de locomoção periódicos de sistemas de locomoção multipernas, a partir dos seus modelos cinemático e dinâmico.

O objectivo consiste na avaliação do desempenho do sistema durante a locomoção e na determinação do melhor conjunto de parâmetros do robô que minimizam uma determinada função de custo. Para alcançar este objectivo, recorre-se ao modelo de simulação para sistemas de locomoção multipernas desenvolvido no âmbito deste trabalho e apresentado no capítulo anterior. Tal como referido, o movimento pretendido para o robô é especificado em termos de várias variáveis da locomoção, como sejam o padrão de locomoção, o factor de ocupação, a altura do corpo do robô ao solo, o comprimento do passo, a distância entre ancas do mesmo lado do corpo do robô, a máxima altura a que o robô levanta o pé do solo, os comprimentos dos elos das pernas do robô, o desvio horizontal entre a anca e o pé do robô quando este se encontra na sua posição mais elevada, as massas do corpo, das pernas e dos pés do robô e o tempo de ciclo. Nesta perspectiva, foram formuladas e apresentadas no capítulo anterior várias medidas, quer cinemáticas, quer dinâmicas, do desempenho do sistema robótico de locomoção. Recorde-se que ao nível cinemático formularam-se os índices da análise face a perturbações nas trajectórias dos pés do robô, que medem a sensibilidade das

trajectórias cartesianas dos pés a perturbações nas variáveis das juntas, e os índices da locomobilidade das trajectórias do corpo e das pernas do robô, que fornecem uma indicação da facilidade mecânica para implementar as trajectórias pretendidas para o corpo e para os pés do robô. Ao nível dinâmico implementaram-se seis medidas do desempenho, a saber, a densidade de energia absoluta média durante a locomoção, a densidade de dispersão da potência média, a densidade de potência perdida nos actuadores das juntas, a força média na interface entre o corpo e as pernas, o pico de binário solicitado pelo controlador aos actuadores das juntas do robô e os erros quadráticos médios entre as trajectórias planeadas e reais, sendo todos estes índices avaliados ao longo do ciclo de locomoção.

Várias experiências de simulação, baseadas nos algoritmos desenvolvidos, revelam a configuração do sistema e os tipos de movimentos que levam a uma melhor implementação mecânica, para um dado modo de locomoção, do ponto de vista dos índices propostos.

Tendo presente estes factos, este capítulo encontra-se organizado da seguinte forma. A secção um apresenta uma introdução às estratégias e critérios que têm vindo a ser utilizados tendo como objectivo final a melhoria da eficiência dos robôs com pernas. Na secção dois apresenta-se a análise detalhada e a optimização dos parâmetros do sistema artificial de locomoção. De seguida, na secção três, aplicam-se os índices dinâmicos à locomoção animal tendo em vista efectuar a comparação do seu desempenho com o dos sistemas artificiais. Por último, a secção quatro apresenta em linhas gerais as principais conclusões do capítulo e algumas linhas de investigação que se encontram em aberto nesta área de trabalho.

4.1 Introdução

Como referido no Capítulo 2, os robôs com pernas apresentam vantagens significativas sobre os veículos tradicionais, sendo que a maior dessas vantagens será seguramente o facto de permitirem a locomoção em terrenos inacessíveis a outros tipos de veículos, uma vez que não necessitam de uma superfície de suporte contínua.

No entanto, no presente estado de desenvolvimento dos sistemas artificiais de locomoção, existem vários aspectos que têm necessariamente que ser melhorados e optimizados, quer durante a fase de projecto dos sistemas, quer posteriormente durante a sua operação. Efectivamente têm sido propostas e aplicadas a estes sistemas diferentes estratégias de

optimização, seja durante a sua fase de projecto e construção, seja durante a sua exploração (nomeadamente, no que concerne à selecção do padrão de locomoção a utilizar e na sua adaptação às condições do terreno e da locomoção). Entre os critérios seguidos por diferentes autores incluem-se índices baseados na eficiência energética, na estabilidade, na velocidade, no conforto, na mobilidade e no impacto sobre o ambiente.

Posto isto, na subsecção seguinte analisam-se várias das estratégias e critérios que têm vindo a ser utilizados tendo como objectivo final a melhoria da eficiência dos sistemas artificiais de locomoção.

4.1.1 Aproximações Biológicas

Uma vez que os robôs com locomoção por pernas são inspirados nos animais observados na natureza, uma abordagem frequente ao seu projecto e construção passa por efectuar uma mímica mecatrónica do animal que se pretende replicar, quer em termos de dimensões físicas, quer mesmo em termos de características como sejam o padrão de locomoção e o accionamento dos membros. Tendo em vista este objectivo efectuem-se estudos aprofundados sobre a locomoção e sobre a anatomia dos animais a replicar. Por vezes verifica-se também a realização de trabalhos conjuntos de investigadores das áreas da robótica e da biologia e zoologia (Laksanacharoen, *et al.*, 2000; Witte, *et al.*, 2001a; Witte, *et al.*, 2001b). No Capítulo 2 desta Tese, na subsecção 2.5.1, foram apresentados vários exemplos de robôs que têm sido desenvolvidos tendo por base esta aproximação.

Esta aproximação é também muito seguida no projecto e desenvolvimento de robôs bípedes e humanóides. Os projectistas destes sistemas vão buscar grande parte da sua inspiração aos seres humanos, como o comprovam diversos exemplares que apresentam características similares às dos seres humanos, nomeadamente no número de gdl e nas dimensões físicas. Entre os inúmeros exemplos desta aproximação podem referir-se:

- o humanóide WABIAN cujo tamanho e gama de movimento das juntas é baseado num humano adulto (Yamaguchi e Takanishi, 1998);
- o bípede desenvolvido por Caldwell, *et al.* (1997), para testar o accionamento recorrendo a músculos artificiais pneumáticos, que apresenta dimensões antropomórficas;

- o robô BIP que apresenta os parâmetros cinemáticos e dinâmicos próximos dos valores antropomórficos de um humano com 1,70 m de altura e 90 kg de massa (Espiau, *et al.*, 1997);
- o modelo P2 do Honda Humanoid Robot que, numa versão inicial, apresentava as dimensões, a localização das juntas, as suas gamas de movimento e o centro de gravidade equivalente ao da perna humana (Hirai, *et al.*, 1998);
- o robô BIP2000 que apresenta os parâmetros cinemáticos e dinâmicos próximos dos valores antropomórficos de um humano com 1,80 m de altura (Espiau e Sardain, 2000);
- o Robian II, com as dimensões e pesos aproximadas às do homem Europeu médio (Gravez, *et al.*, 2002);
- o Johnnie, que apresenta uma geometria correspondente à do homem (Lohmeier, *et al.*, 2004).

4.1.2 Estratégias Evolutivas

As estratégias evolutivas são uma forma alternativa de imitar a natureza. Assim, não se copiam directamente as características dos animais, mas copia-se o processo que a natureza concebe para a sua geração e na sua evolução.

Uma possibilidade para implementar esta ideia passa por recorrer a algoritmos genéticos como motor para a geração da estrutura de robôs (Farritor, *et al.*, 1996; Leger, 2000). Nestas aplicações efectua-se uma aproximação modular do projecto. Existe uma biblioteca de componentes elementares, tais como juntas actuadas, elos, engrenagens, fontes de alimentação, entre outros. Diversos destes elementos são combinados entre si de forma a originarem diferentes estruturas. As diversas estruturas geradas são avaliadas, recorrendo a funções de aptidão pré-definidas, e recombinadas entre si recorrendo aos algoritmos genéticos. Finalmente, o processo de selecção dá origem a um sistema robótico que representa o melhor projecto para uma dada aplicação.

Estas aplicações informáticas apresentam a possibilidade de uma fácil reconfiguração, sendo passíveis de serem aplicadas na geração de sistemas robóticos para situações muito distintas (Farritor, *et al.*, 1996; Leger, 2000). Na literatura encontram-se também descritos

trabalhos em que se recorre a estratégias evolutivas tendo em vista a optimização da estrutura de um robô em particular. De seguida apresentam-se alguns exemplos desta aproximação.

Juárez-Guerrero, *et al.* (1998) desenvolveram um robô bípede recorrendo às estratégias evolutivas. O objectivo final era fazer evoluir a estrutura de um robô bípede, equipado com uma cauda passiva para auxiliar a manter o equilíbrio, que conseguisse implementar um padrão de locomoção simples ($\beta = 50\%$) e cumprisse um conjunto de restrições, a saber: dimensões mínimas e máximas, binário motor máximo, comprimento do passo inferior a 30 cm, elevação máxima do pé inferior a 5 cm e peso máximo do robô inferior a 30 kg. O robô obtido foi construído e verificou-se a sua adequação à tarefa proposta. Para além do mecanismo de locomoção, o processo seguido por estes autores permitiu ainda optimizar a distância do centro de massa do robô à sua cauda, o comprimento da cauda e a área dos pés.

O recurso a algoritmos genéticos para optimizar a estrutura de um robô bípede é também adoptado por Ishiguro, *et al.* (2002). Pretende-se que o robô seja capaz de se deslocar de forma passiva num plano inclinado e através de juntas actuadas em superfícies planas. Numa primeira fase, são optimizados os parâmetros do corpo do robô, suposto passivo, recorrendo a um algoritmo genético. Depois da estrutura do robô estar optimizada, estes autores recorrem a um outro algoritmo genético para optimizar os parâmetros de um controlador baseado em geradores centrais de padrões (GCP).

Contrariamente aos exemplos acabados de descrever, onde a estrutura e o sistema de controlo dos robôs são optimizados separadamente, Lipson e Pollack (2000) propõem o desenvolvimento de robôs com locomoção por pernas, recorrendo a algoritmos genéticos, mas gerando simultaneamente a estrutura mecânica e o algoritmo de controlo. A solução apresentada por estes autores apresenta ainda a particularidade de os robôs serem fabricados por métodos de prototipagem rápida e depois de cumprirem a sua função serem reciclados.

Também Endo, *et al.* (2002a, 2002b) recorrem a um algoritmo genético para optimizar simultaneamente a estrutura e o sistema de controlo do robô bípede humanoíde PINO. Para iniciarem o processo de optimização (a evolução da estrutura do robô) recorrem a um modelo baseado numa estrutura multi-elos. O resultado da evolução da estrutura do robô é, numa primeira fase, o comprimento óptimo dos elos (Endo, *et al.*, 2002a) e, numa segunda fase, o posicionamento e orientação óptima dos servomotores (Endo, *et al.*, 2002b). Relativamente ao

sistema de controlo, recorrem a duas arquitecturas diferentes: uma baseada numa rede neuronal estruturada em camadas e outra baseada em osciladores neuronais. O algoritmo genético adoptado por estes autores é multi-objectivo e implementado em duas fases. Numa primeira fase, a função objectivo é baseada na distância percorrida pelo robô. Os vinte melhores robôs encontradas nesta fase, são a população inicial da segunda fase, em que o algoritmo genético tem como funções objectivo índices baseados na eficiência energética e na estabilidade da locomoção do robô. De acordo com estes autores, esta estratégia apresenta vantagens sobre a estratégia tradicional, na qual o sistema de controlo para um dado robô é desenvolvido recorrendo a um algoritmo genético, tendo por base uma estrutura previamente definida (Endo, *et al.*, 2003).

A principal crítica que se pode efectuar à aproximação ao projecto baseada em estratégias evolutivas reside na sua convergência, ou seja, na incerteza sobre se se obtém uma solução devido à elevada complexidade necessária para serem de utilidade prática. Como exemplo de um trabalho que está a ser implementado pode-se referir o robô desenvolvido por Endo e Maeno (2003).

4.1.3 Projecto Mecânico

As aproximações ao projecto de sistemas artificiais de locomoção, vistas nas duas subsecções anteriores, baseiam-se nas estratégias encontradas na natureza. Todavia, é importante não esquecer que os robôs com pernas são máquinas pelo que os primeiros aspectos a considerar na fase de projecto destes robôs devam ser a correcta implementação do ponto de vista mecânico e físico.

No seguimento desta linha de raciocínio, Habumuremyi e Doroftei (2001) apresentam as características de várias estruturas passíveis de serem utilizadas nas pernas de sistemas artificiais de locomoção. Por seu lado, Hirose e Arikawa (2000) apresentam um conjunto de conceitos a serem adoptados aquando do projecto de veículos com pernas tendo em vista maximizar a potência desenvolvida no sistema (recorrendo ao conceito de actuação acoplada) e maximizar a eficiência energética (através do recurso ao conceito de desacoplamento gravítico dos actuadores). A técnica do desacoplamento gravítico dos actuadores foi implementada em vários robôs (Koyachi, *et al.*, 1991; Senta, *et al.*, 1995; Genta e Amati,

2001). De referir que o conceito de desacoplamento gravítico dos actuadores pode ser implementada nos robôs com pernas não só aquando do seu projecto, mas também através da adopção e manutenção de uma postura adequada durante a locomoção (Hirose e Arikawa, 2000).

Em certas situações são também adoptadas aproximações ao projecto dos robôs tendo por base conhecimentos empíricos das áreas da mecânica e da física. Nestes casos o projecto dos equipamentos é efectuado tendo como objectivo minimizar alguma situação penalizadora para o desempenho do robô em questão (Hirose, *et al.*, 1997; Yamaguchi e Takanishi, 1998).

Um outro método alternativo para a optimização da estrutura deste tipo de robôs, baseado em investigações no campo da biologia (Alexander, 1990), passa pela utilização de pernas equipadas com actuadores que introduzam complacência nas juntas. Desta forma torna-se possível armazenar e libertar a energia cinética e potencial das pernas e do corpo do robô, durante as diferentes fases do ciclo de locomoção. Raby e Orin (1999) recorrem a esta aproximação num robô hexápode passivo. O robô dispõe de pernas com dois gdl, um rotacional na anca e um prismático no joelho, dispondo cada uma destas juntas de uma mola para permitir a existência de uma certa complacência nas juntas. Através da optimização dos parâmetros da locomoção deste robô passivo, concluem que a energia que é necessário injectar no robô para manter a locomoção periódica é muito reduzida.

4.1.4 Optimização de Funções Energéticas

No que diz respeito aos pontos fracos dos sistemas artificiais de locomoção, um dos mais sérios problemas com que se debatem os projectistas prende-se com a optimização do consumo energético.

Verifica-se que a eficiência da locomoção dos robôs existentes é muito fraca quando comparada com os animais vivos bem como com a locomoção através de rodas. A título de exemplo, refira-se que Kajita, *et al.* (2002) efectuaram um estudo de simulação do padrão de locomoção de corrida do robô humanóide HRP1 tendo concluído que, para o padrão de locomoção estudado, o robô necessitaria de actuadores 28 a 56 vezes mais potentes do que os que dispunha o humanóide real. Para além disto, estimaram também que o consumo

energético seria cerca de 10 vezes superior ao de um humano adoptando o mesmo padrão de locomoção.

No entanto, prevê-se que no futuro a locomoção através de pernas artificiais venha a ser uma das formas de transporte mais eficientes do ponto de vista energético. Isto implica que este aspecto seja alvo de grande atenção no desenvolvimento deste tipo de sistemas, nomeadamente através do recurso a critérios de optimização durante as fases de projecto, construção e exploração, até porque este influencia a escolha da estrutura mecânica, do sistema de propulsão e do sistema de alimentação.

Adicionalmente, existe uma hipótese importante que parece explicar a maioria dos movimentos das pernas e do corpo durante a locomoção humana. Esta hipótese afirma que durante a locomoção os humanos controlam a actividade dos músculos, movimentando os vários segmentos do corpo, de forma a que a energia metabólica necessária para percorrerem uma determinada distância seja minimizada (Neuhaus e Kazerooni, 2000). Constata-se também que a maioria dos animais com locomoção por pernas optimiza a eficiência energética em detrimento da suavidade do movimento (Alexander, 1984).

Tendo por base estas ideias, diversos autores efectuaram estudos de optimização da estrutura de sistemas artificiais de locomoção, e do seu padrão de locomoção, tendo por base critérios energéticos. Na continuação desta subsecção analisam-se alguns trabalhos que abordam a optimização da estrutura de robôs com pernas tendo por base estes critérios. A optimização das trajectórias e do padrão de locomoção destes veículos, recorrendo a esta abordagem, é vista no Anexo B.

Um índice que é frequentemente utilizado para analisar e comparar o desempenho de robôs com pernas é a resistência específica (ρ). Este índice, introduzido inicialmente por Gabrielli e Von Kármán (1950) para efectuar a comparação da eficiência da locomoção de diferentes tipos de veículos, é definido como:

$$\rho = \frac{P}{MgV_{\max}} \quad (4.1)$$

sendo P a potência máxima do veículo, M a sua massa, g a aceleração da gravidade e V_{max} a máxima velocidade que este consegue alcançar. A resistência específica pode ser definida alternativamente por (Lasa e Buehler, 2001):

$$\rho(V_F) = \frac{P(V_F)}{MgV_F} \quad (4.2)$$

em função da velocidade de deslocamento V_F .

Este índice tem sido utilizado para o estudo de diferentes tipos de robôs na forma apresentada em (4.1), ou na forma alternativa (4.2). Este índice é adoptado para estudar a variação de desempenho de um robô bípede passivo quando se introduz complacência nas suas juntas (Linde, 1998). É também utilizado para comparar o desempenho do robô hexápode RHex ao ultrapassar obstáculos (Saranli, *et al.*, 2001) e ao subir e descer escadas (Moore, *et al.*, 2002; Campbell e Buehler, 2003). Por último, é ainda utilizado por Lasa e Buehler (2001) para analisarem o desempenho do robô quadrúpede com actuação reduzida SCOUT-II.

Alguns autores têm vindo a defender que, contrariamente ao recurso à potência mecânica para calcular a resistência específica (utilizada na maioria das aplicações deste índice), esta deve ser calculada recorrendo à potência eléctrica para se poderem considerar várias perdas significativas de energia que existem nos sistemas (Saranli, *et al.*, 2001; Lasa e Buehler, 2001; Campbell e Buehler, 2003). Isto dá origem a outra definição alternativa para a resistência específica (Linde, 1998; Moore, *et al.*, 2002):

$$\rho = \frac{E}{Mgd} \quad (4.3)$$

em que E representa o consumo total de energia eléctrica para um deslocamento linear d .

Para provarem a sua afirmação, Lasa e Buehler (2001) calculam as potências mecânica e eléctrica do robô SCOUT-II, sendo a potência eléctrica cerca de 10 vezes superior à potência mecânica. Este resultado é também reflectido na resistência específica, que estes autores determinam recorrendo às duas potências calculadas.

Uma utilização ligeiramente diferente deste índice é efectuada por Lapshin (1995). Este autor estima o consumo energético de veículos com pernas que se deslocam ao longo de trajectórias rectas, recorrendo a padrões de locomoção estaticamente estáveis. Os resultados são comparados com os consumos energéticos de outros veículos e animais, recorrendo a um índice baseado na resistência específica (4.1). Para efectuar esta análise recorre a modelos simplificados do consumo energético em robôs com pernas. Assim, considera que o consumo energético nestes veículos se divide em três parcelas independentes (ou seja, os consumos para suportar o peso do veículo, para a geração da tracção e para fazer as pernas oscilarem relativamente ao corpo). De acordo com as conclusões do seu trabalho Lapshin afirma que, do ponto de vista energético, o robô deve andar com um valor reduzido de β , a perna deve deslocar-se com uma aceleração e desaceleração em degrau durante a fase de transferência, o comprimento do passo deve ser mínimo ($L_s \rightarrow 0$) e a altura do corpo ao solo deve ser máxima ($H_b \rightarrow L_1+L_2$).

Uma aproximação similar a esta é apresentada por Zhoga (1998). Este autor analisa o consumo energético de um sistema octópode, deduzindo as equações para o seu consumo energético a partir do modelo dinâmico, e compara-o com os consumos energéticos de máquinas de dimensões equivalentes, mas recorrendo a rodas e a lagartas para a sua locomoção. Apresenta também resultados da variação do consumo energético do sistema em função de diferentes características do solo e do raio de curvatura e da velocidade com que executa os movimentos curvilíneos.

Também Briskin, *et al.* (2003) adoptam para a optimização e análise de desempenho do robô Walking Chassis for Multipurposes o consumo energético calculado a partir do modelo dinâmico.

Já Pedroche, *et al.* (2003) vão ainda mais longe e apresentam um modelo detalhado do consumo energético de robôs com pernas baseado nos modelos dinâmicos do robô e dos actuadores (incluindo as partes eléctrica e mecânica). Este modelo é depois aplicado de forma a analisar a influência da configuração da perna, do corpo do robô, da trajectória do pé e do perfil da sua velocidade no consumo energético do robô quadrúpede SILO4.

Gregorio, *et al.* (1997) recorrem ao binário máximo necessário para o motor da anca como forma de projectarem os parâmetros da transmissão desta junta num robô monopé. Numa

segunda fase, utilizam o valor absoluto da potência mecânica instantânea na junta da anca do robô monopé, e o seu integral, assim como o índice resistência específica, para analisarem o desempenho deste robô quando se desloca a diferentes velocidades e adoptando diferentes trajectórias da anca. No seu trabalho, estes autores efectuam ainda uma comparação da resistência específica do seu robô, com a de outros veículos com pernas, rodas e lagartas e com a de alguns seres vivos.

Marhefka e Orin (1997) simulam um robô hexápode com uma estrutura tipo insecto e três gdl por perna, que se desloca com o recurso a um padrão de locomoção estaticamente estável, para estudarem a forma como os parâmetros de locomoção afectam o consumo energético. Como critério de optimização recorreram à minimização da potência consumida ao longo um ciclo completo de locomoção. Em resultado do seu estudo apresentam um conjunto de regras para estabelecerem a velocidade, os locais de colocação dos pés no solo, a altura do corpo ao solo, o factor de ocupação e o comprimento do passo, a aplicar durante a geração do padrão de locomoção de forma a maximizar a economia energética. Posteriormente estes autores apresentaram uma evolução do seu trabalho onde utilizam como critério de optimização a minimização da potência fornecida aos actuadores de cada junta das pernas do robô recorrendo, para o efeito, à optimização das forças nos pés (Marhefka e Orin, 1998). Neste estudo são apresentadas diferentes metodologias para efectuar a distribuição optimizada da força pelas pernas do robô e comparados os resultados obtidos com a aplicação de cada uma delas.

Zielińska (2000) e Zielińska, *et al.* (2001) determinam os parâmetros óptimos do projecto de um robô hexápode (comprimentos dos elos das pernas, dimensões do corpo e estrutura da perna) e dos seus actuadores (binário e factor de redução da engrenagem) tendo como objectivo minimizar os consumos energéticos dos motores das juntas do robô estimados a partir das forças de reacção do solo previstas nos pés do robô.

Wollherr, *et al.* (2002) recorrem a simulação numérica, baseada nos modelos dinâmicos completos do robô, e à minimização de dois índices dinâmicos para efectuarem o projecto de um pequeno robô humanóide com 17 gdl. O principal objectivo destes autores é a selecção dos motores e das engrenagens a utilizar nas juntas do robô. Para este efeito impõem que as trajectórias do robô sejam as que requerem energia mínima, sendo um dos índices de

desempenho a minimizar baseado no quadrado dos binários e o outro baseado no valor total da potência mecânica nas juntas do robô. Para os diferentes modelos em estudo, o problema do controlo óptimo durante um passo do robô foi resolvido numericamente de forma a obter as trajectórias com as soluções em termos de velocidades e acelerações.

4.1.5 Outras Aproximações

Para além dos vários critérios para efectuar a optimização da estrutura de robôs com pernas referidos nas subsecções anteriores, têm também sido utilizados esporadicamente outras aproximações. Nesta subsecção abordam-se algumas delas.

Koyachi, *et al.* (1997) desenvolveram um robô hexápode, denominado MELMANTIS-1, cujas pernas também podem assumir a função de manipuladores. Para o projecto deste robô hexápode, e de um outro baseado neste e denominado MELMANTIS-2, recorreram ao estudo da variação das elipsóides de manipulabilidade (Yoshikawa, 1990) com um conjunto de parâmetros do mecanismo da perna / braço do robô.

As elipsóides de manipulabilidade foram ainda utilizadas para o desenvolvimento do robô MEL HORSE II. Este robô, cujo princípio construtivo e de funcionamento é baseado no cavalo e no dinossauro, pode comportar-se como um bípede ou como um quadrúpede. As pernas da frente e de trás apresentam características diferentes e, para o seu projecto, Takeuchi (1999) recorre a um índice baseado no índice de manipulabilidade de Yoshikawa (1990).

Também Kang, *et al.* (2003) recorrem ao índice de manipulabilidade de Yoshikawa (1990), durante o projecto do robô trepador MRWALLSPECT-III, como função de optimização para determinar o comprimento óptimo dos elos das pernas.

Shoval, *et al.* (1999) desenvolveram um robô quadrúpede, apresentando cada perna quatro gdl. Este robô tem como objectivo deslocar-se no interior de tubagens e túneis, em que as paredes tenham um coeficiente de atrito nulo. O seu modo de locomoção consiste em fixar os pés nas paredes do túnel e, durante esta fase, avançar o corpo na direcção de movimento pretendida. Seguidamente, com o corpo imóvel, levanta uma das pernas e posiciona-a mais à frente, repetindo o ciclo. Para o seu projecto, nomeadamente para determinar a largura do corpo, o comprimento total de cada uma das pernas e o raio total, estes autores recorreram a

considerações geométricas, nomeadamente à necessidade da dimensão central do corpo ser inferior à menor dimensão do túnel onde o robô se vai deslocar e ao facto de que a largura do corpo mais o dobro do comprimento das pernas ter que ser maior que a maior dimensão entre as paredes do túnel, para possibilitar que o robô alcance as paredes do túnel com as pernas. Quanto ao raio do robô, este foi seleccionado de forma a que as regiões alcançáveis pelos pés do robô formem uma área contínua ao longo do túnel em que o robô se deve deslocar.

Kim, *et al.* (2000) propõem a utilização de um índice, baseado no somatório dos quadrados dos binários estáticos dos actuadores das juntas, para otimizar os comprimentos dos elos da estrutura de um robô bípede. O numerador deste índice de desempenho refere-se à quantidade de binário estático necessária durante a fase de suporte único e o denominador é a distância percorrida num passo. Portanto, o índice de desempenho pode ser considerado fisicamente como o binário estático necessário por distância percorrida.

Uma outra estratégia para a optimização de sistemas artificiais de locomoção foi aplicada por Liu e Howard (2003) a robôs do tipo caranguejo, tendo por base o volume de trabalho cinemático. No seu trabalho analisam as diferentes configurações cinemáticas alternativas para as pernas do robô, apresentando as respectivas restrições, e identificam as melhores configurações (e os parâmetros geométricos correspondentes) que maximizam o volume de trabalho cinemático.

4.2 Análise e Optimização dos Parâmetros do Sistema Artificial de Locomoção

Após a introdução, onde foram apresentadas diversas abordagens à optimização dos parâmetros construtivos e de locomoção de robôs com pernas, nesta secção apresentam-se os resultados de um conjunto de experiências de simulação tendo por base o modelo de simulação e os índices introduzidos no Capítulo 3. Estas experiências pretendem estimar a influência de diversos parâmetros durante a locomoção de um robô multipernas recorrendo a diversos padrões de locomoção periódicos e comparar também os índices de desempenho formulados. O objectivo é verificar se é possível encontrar uma correlação entre os diferentes pontos de vista durante a locomoção do robô.

Tabela 4.1. Parâmetros do Sistema.

Parâmetros do modelo do robô		Parâmetros da locomoção	
n	6	β	50%
S_P	1,0 m	L_S	1,0 m
L_{ij}	0,5 m	H_B	0,9 m
O_i	0,0 m	F_C	0,1 m
M_b	88,0 kg	V_F	1,0 ms ⁻¹
M_{ij}	1,0 kg		
M_{if}	0,1 kg		

Durante as experiências examina-se o papel do padrão de locomoção *versus* β , L_S , H_B e F_C , considerando os valores dos parâmetros do modelo do robô e da locomoção apresentados na Tabela 4.1.

Este estudo começa considerando a situação em que o robô apresenta a perna com o joelho para a frente, como é comum nos mamíferos, adoptando o padrão de locomoção PLO. De seguida examina-se a variação dos índices para outra estrutura da perna, com o joelho para trás como é comum nas aves, e com a adopção de diferentes padrões de locomoção periódicos.

Devido ao elevado número de parâmetros e valores, nas próximas subsecções apresentam-se os valores óptimos cruzando várias combinações distintas para o caso da locomoção com o PLO.

4.2.1 Análise Cinemática

Começa-se por analisar a variação dos índices cinemáticos com os parâmetros factor de ocupação (β) *versus* altura do corpo ao solo (H_B) para diferentes valores do comprimento do passo (L_S) e da máxima altura do pé ao solo (F_C).

Para o padrão de locomoção ondulatório a análise das perturbações revela que os índices ξ_x e ξ_y aumentam com β (Figura 4.1). Este efeito é mais acentuado para valores de β acima dos 90%. Já no que concerne à variação com H_B os resultados obtidos com os dois índices são contraditórios. É visível, em particular para reduzidos valores de β , que ξ_x aumenta com H_B contrariamente a ξ_y que diminui.

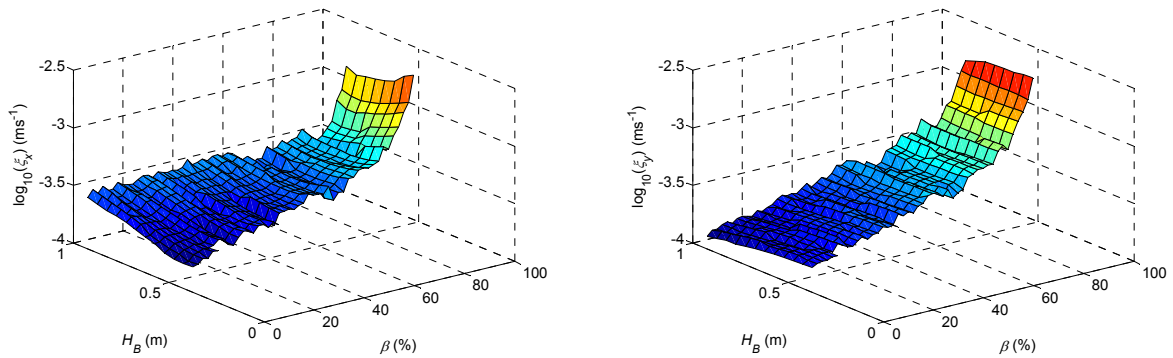


Figura 4.1: $\log(\xi_x)$ e $\log(\xi_y)$ vs. (β, H_B) com $L_S = 1$ m, $F_C = 0,2$ m, PLO.

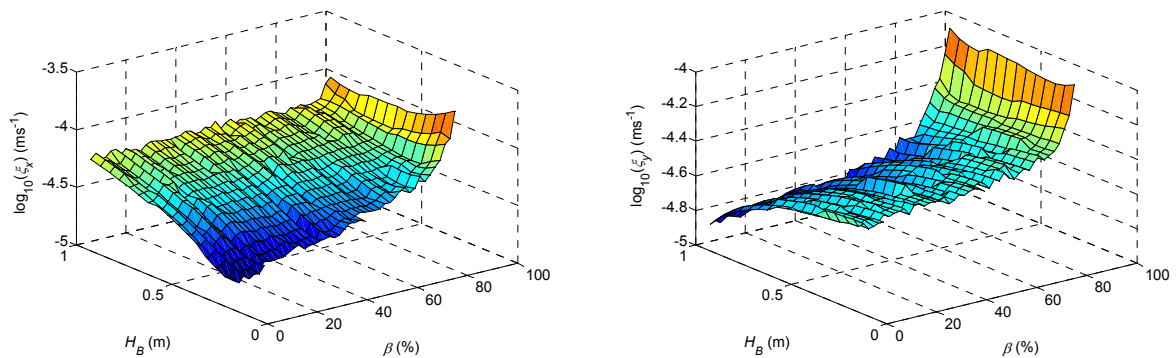


Figura 4.2: $\log(\xi_x)$ e $\log(\xi_y)$ vs. (β, H_B) com $L_S = 0,2$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.

Estes resultados mantêm-se para valores inferiores de L_S e de F_C . A título de exemplo, apresentam-se na Figura 4.2 gráficos de ξ_x e ξ_y equivalentes aos da Figura 4.1 para diferentes valores de L_S e de F_C . Já para valores de L_S e de F_C elevados, o índice ξ_x passa também a apresentar uma diminuição com H_B , mantendo o índice ξ_y o seu padrão de variação, como se pode verificar da observação da Figura 4.3. No entanto, é de referir que à medida que os valores de L_S e de F_C aumentam, diminui o intervalo admissível de variação dos parâmetros β e H_B .

Relativamente à variação destes índices com os parâmetros L_S e F_C , a Figura 4.4 mostra que tanto ξ_x com ξ_y aumentam fortemente com L_S e ligeiramente com F_C . A variação apresentada na Figura 4.4 mantém-se para diferentes valores de β e H_B .

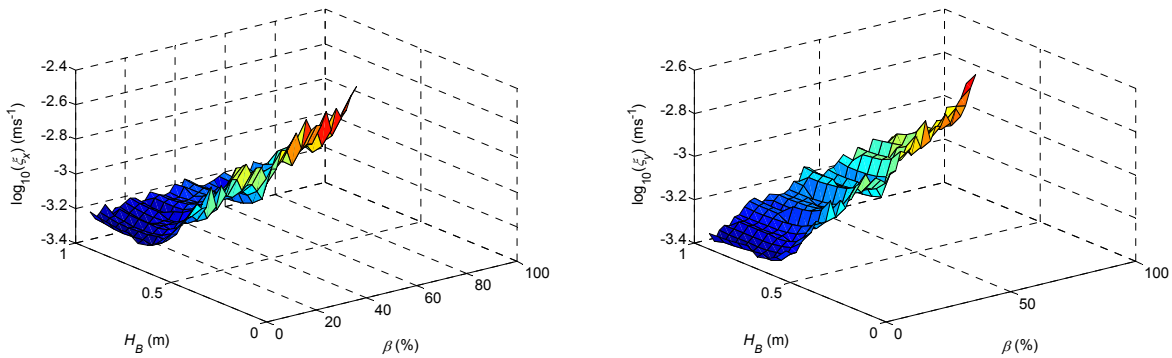


Figura 4.3: $\log(\xi_x)$ e $\log(\xi_y)$ vs. (β, H_B) com $L_S = 2,0$ m, $F_C = 0,5$ m, PLO.

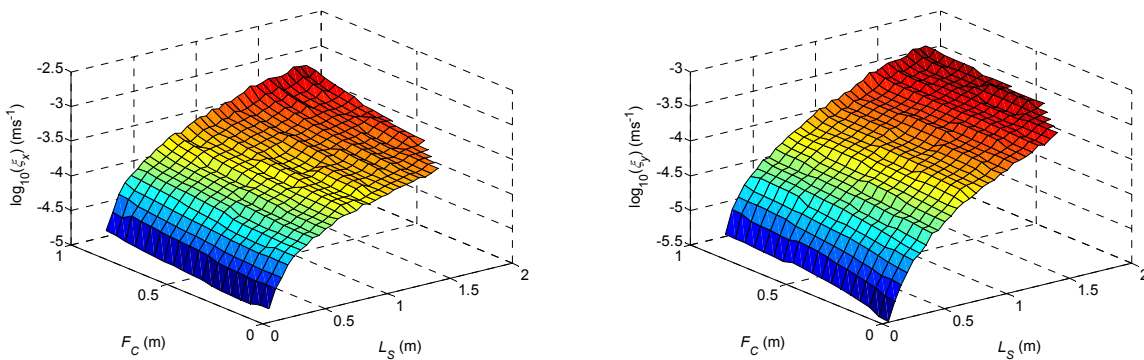


Figura 4.4: $\log(\xi_x)$ e $\log(\xi_y)$ vs. (L_S, F_C) com $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, PLO.

Uma vez que o objectivo passa por minimizar os índices das perturbações, pela análise das Figuras 4.1 – 4.4 somos levados a afirmar que a locomoção deve ser efectuada com valores reduzidos dos parâmetros β , L_S e F_C . No que diz respeito aos valores adequados para o parâmetro H_B , estas experiências iniciais não são conclusivas.

De seguida vamos repetir esta análise recorrendo aos índices da locomobilidade do corpo e do pé.

Da análise das Figuras 4.5 – 4.7 conclui-se que os índices de locomobilidade apresentam variações diferentes com os parâmetros β e H_B . Relativamente a L_F conclui-se que este diminui fortemente com β , mas varia ligeiramente com H_B , apresentando valores mais elevados para valores da altura do corpo do robô ao solo próximos do máximo, independentemente dos valores dos parâmetros L_S e F_C em consideração.

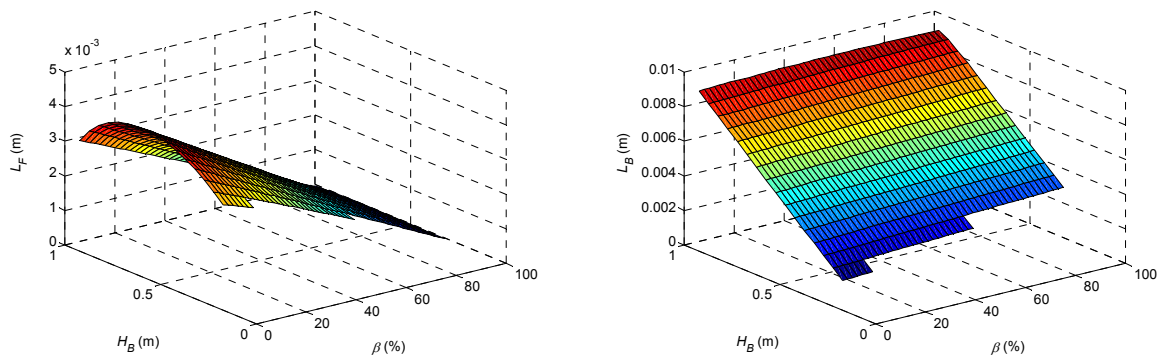


Figura 4.5: L_F e L_B vs. (β, H_B) com $L_S = 0,2$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.

Por seu lado o índice L_B , apresenta um padrão de variação mais complexo. Assim, para valores do comprimento do passo reduzidos, o índice L_B aumenta fortemente com H_B e ligeiramente com β , como pode ser visto na Figura 4.5. Para valores de L_S superiores, o comportamento deste índice é mais complexo. À medida que o valor do parâmetro L_S aumenta, L_B passa a diminuir com H_B para valores elevados de β . De igual forma, à medida que L_S aumenta, o índice L_B passa a diminuir com β para valores elevados de H_B . Esta variação torna-se mais forte com o aumento de L_S , como se pode observar nas Figuras 4.6 e 4.7, e é independente do valor do parâmetro F_C em consideração.

No que diz respeito à variação dos índices de locomobilidade com os parâmetros L_S e F_C , a Figura 4.8 mostra que L_F apresenta uma variação algo complexa com estes parâmetros. Assim, para valores de $F_C > 0,5$ m o índice L_F permanece praticamente invariante com o aumento deste parâmetro mas diminui acentuadamente com L_S . Já para valores de F_C inferiores, este índice apresenta um máximo muito pronunciado para valores de $L_S \approx 1,0$ m. Quanto ao índice L_B verifica-se que este diminui fortemente com L_S e ligeiramente com F_C . A variação apresentada na Figura 4.8 mantém-se para diferentes valores de β e H_B .

Sendo o objectivo maximizar os índices de locomobilidade, da análise das Figuras 4.5 – 4.8 é possível concluir que o robô deve andar com o corpo numa posição relativamente elevada, excepto para o caso de a locomoção adoptar um valor elevado de β . Para além disso, os passos devem ser curtos (L_S reduzido) e o pé deve permanecer junto ao solo ($F_C \approx 0$ m).

Estes resultados estão de acordo com os obtidos anteriormente através da análise face a perturbações.

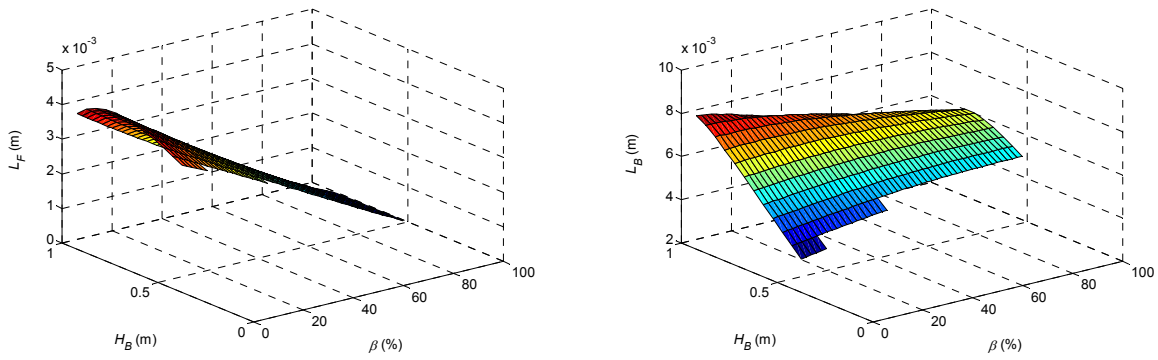


Figura 4.6: L_F e L_B vs. (β, H_B) com $L_S = 1$ m, $F_C = 0,2$ m, PLO.

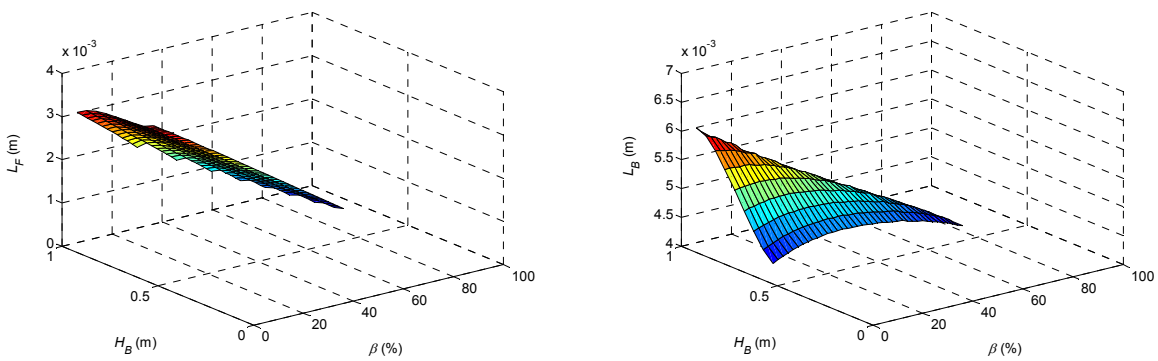


Figura 4.7: L_F e L_B vs. (β, H_B) com $L_S = 2,0$ m, $F_C = 0,5$ m, PLO.

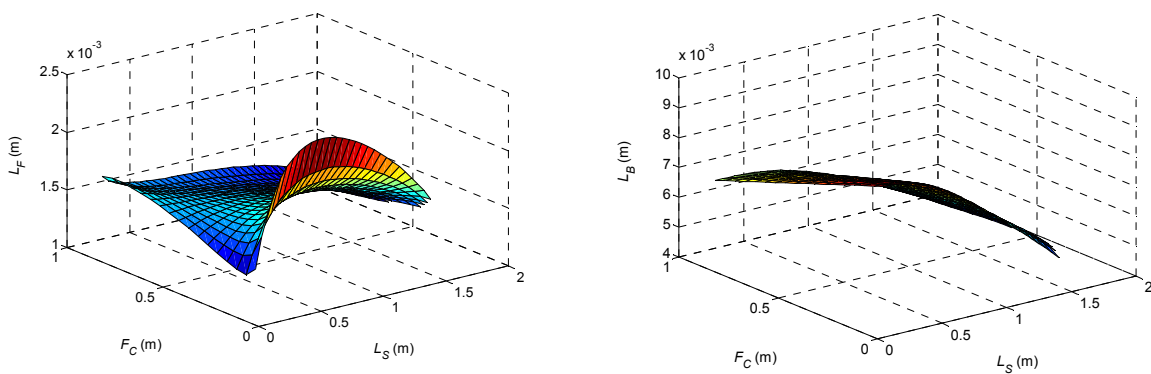


Figura 4.8: L_F e L_B vs. (L_S, F_C) com $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, PLO.

4.2.2 Análise Dinâmica

A análise efectuada na subsecção anterior vai agora ser repetida para o caso de se considerar os índices dinâmicos. Tendo em vista o cálculo destes índices, após planear as trajectórias das

juntas é calculada a dinâmica inversa de forma a mapear a cinemática em consumos energéticos. O modelo simplificado da dinâmica inversa do robô é da forma:

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{H}(\mathbf{\Theta})\ddot{\mathbf{\Theta}} + \mathbf{c}(\mathbf{\Theta}, \dot{\mathbf{\Theta}}) + \mathbf{g}(\mathbf{\Theta}) \quad (4.4)$$

sendo $\mathbf{\Gamma} = [f_{ix}, f_{iy}, \tau_{i1}, \tau_{i2}]^T$ o vector das forças / binários, $\mathbf{\Theta} = [x_{iH}, y_{iH}, \theta_{i1}, \theta_{i2}]^T$ o vector das coordenadas de posição, $\mathbf{H}(\mathbf{\Theta})$ a matriz das inércias e $\mathbf{c}(\mathbf{\Theta}, \dot{\mathbf{\Theta}})$ e $\mathbf{g}(\mathbf{\Theta})$ são os vectores das forças / binários centrífugos / Coriolis e gravitacionais, respectivamente.

Neste caso, e uma vez que estamos a trabalhar com as trajectórias planeadas da locomoção do robô, não faz sentido recorrer aos índices τ_p , que mede os picos de binário solicitados pelo controlador aos actuadores do robô, e ε_{xyH} , que mede os erros de seguimento das trajectórias das ancas.

A Figura 4.9 apresenta os gráficos de $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (β, H_B) . Da sua análise, concluímos que os gráficos de $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$ e $\log(T_L)$ apresentam uma forma semelhante, aumentando de forma monótona com β e diminuindo / aumentando ligeiramente com H_B para valores de β reduzidos / elevados. O gráfico de $\log(D_{av})$ apresenta a particularidade de mostrar claramente a ocorrência de um mínimo deste índice para $\beta = 16\%$ e $H_B = 0,9$ m. Quanto ao índice F_L , este apresenta uma variação ligeiramente diferente dos restantes. Assim, F_L é quase invariante com o parâmetro H_B excepto para valores de β elevados, onde apresenta uma ligeira diminuição. No que concerne à sua variação com o factor de ocupação, este índice apresenta um mínimo para valores de $\beta \approx 88\%$.

Para valores inferiores do comprimento do passo e da máxima altura a que o robô eleva o pé do solo, os gráficos de $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (β, H_B) não apresentam mudanças significativas no seu aspecto. Como se pode observar na Figura 4.10, e tal como no caso anterior, os gráficos de $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$ e $\log(T_L)$ revelam uma forma semelhante, aumentando de maneira monótona com β e variando ligeiramente com H_B , mostrando cada um deles um mínimo para $H_B \approx 0,65$ m. O gráfico correspondente ao índice F_L continua a apresentar uma variação ligeiramente diferente da dos gráficos referentes aos outros índices, mantendo-se praticamente invariante com o parâmetro H_B e revelando um mínimo, não tão pronunciado como anteriormente, para valores de $\beta \approx 80\%$.

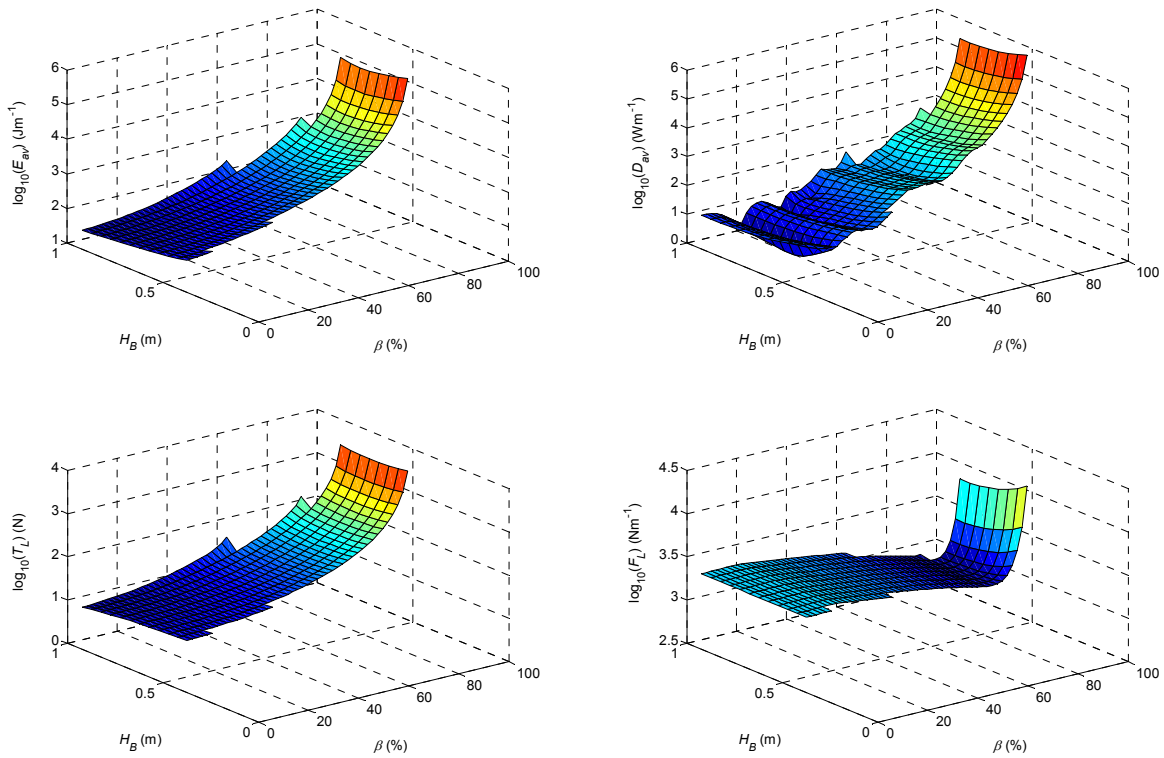


Figura 4.9: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (β, H_B) com $L_S = 1$ m, $F_C = 0,2$ m, PLO.

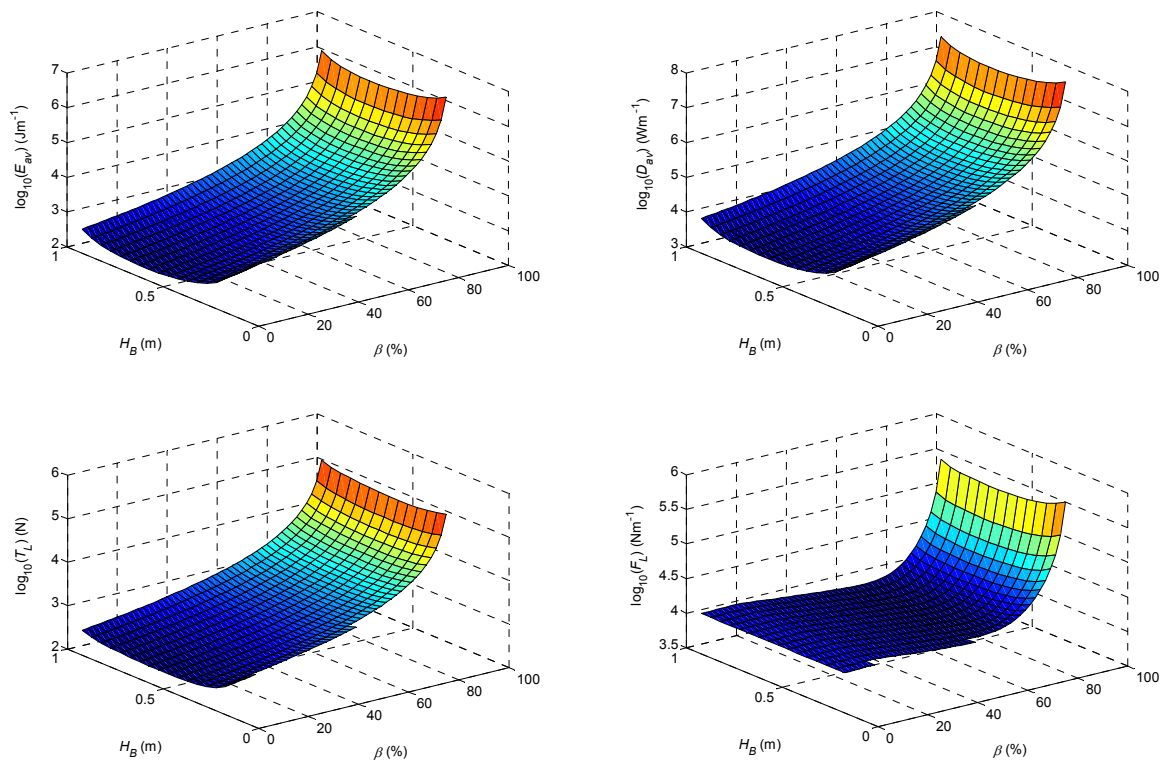


Figura 4.10: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (β, H_B) com $L_S = 0,2$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.

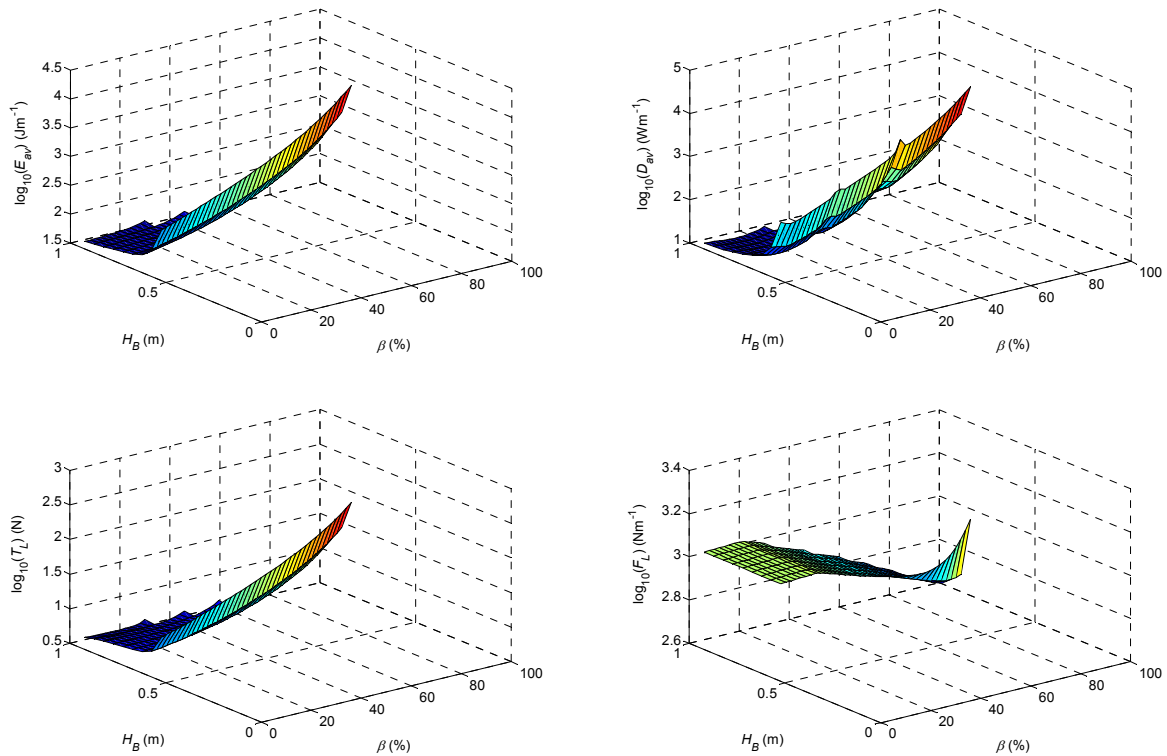


Figura 4.11: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (β, H_B) com $L_S = 2,0$ m, $F_C = 0,5$ m, PLO.

Já no caso de adotarmos valores superiores do comprimento do passo L_S e da máxima altura a que o robô eleva o pé do solo F_C os gráficos de $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (β, H_B) revelam mudanças mais significativas na sua forma. Como se pode observar na Figura 4.11, e tal como nos casos anteriores, os gráficos de $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$ e $\log(T_L)$ aumentam de forma monótona com β . No entanto, ao contrário dos casos anteriores, a diminuição destes índices com H_B é agora monótona. O gráfico correspondente a F_L volta a mostrar uma variação ligeiramente diferente da dos gráficos referentes aos outros índices, mantendo-se praticamente invariante para valores reduzidos de β . Para valores superiores deste parâmetro, este índice diminui de forma monótona com β e com H_B .

Por último, a Figura 4.12 mostra a variação dos índices dinâmicos com os parâmetros L_S e F_C . Conclui-se que os resultados são coerentes, uma vez que todos os índices diminuem com o parâmetro L_S e aumentam com F_C . Esta variação mantém-se para diferentes valores de β e H_B .

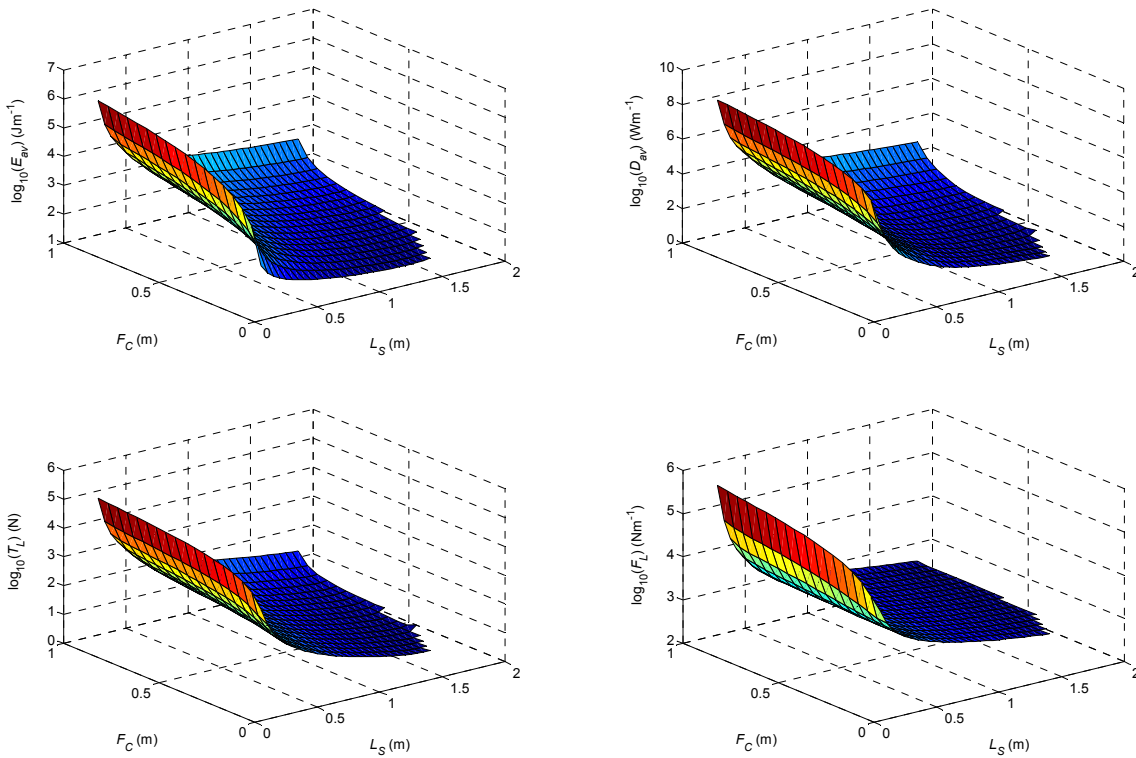


Figura 4.12: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (L_S, F_C) com $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, PLO.

Uma vez que o objectivo passa por minimizar os valores dos índices dinâmicos durante a locomoção, conclui-se da análise das Figuras 4.9 – 4.12 que o sistema artificial de locomoção deve andar com o corpo numa posição elevada ($H_B \approx 0,9$ m), que os passos devem ser compridos ($L_S \approx 3,0$ m) e que o pé deve permanecer junto ao solo ($F_C \approx 0$ m). Relativamente ao factor de ocupação β a adoptar, uma vez que índice F_L é o único que aponta para a utilização de um valor elevado, considera-se que será indicado a utilização de um valor reduzido deste parâmetro.

4.2.3 Conclusões sobre a influência dos parâmetros β , H_B , L_S e F_C

A título de conclusão, e comparando todas as experiências anteriores, verifica-se que os resultados obtidos através dos índices cinemáticos estão de acordo com os obtidos recorrendo aos índices dinâmicos. Assim, pode-se estabelecer um compromisso para otimizar o padrão de locomoção ondulatório, ocorrendo a melhor situação para $\beta \approx 2\%$, $0,9 \leq H_B \leq 0,95$ m, $2,5 \leq L_S \leq 3,0$ m e $F_C \approx 0$ m, considerando $L_{i1} = L_{i2} = 0,5$ m, $O_i = 0$ m e $V_F = 1$ ms⁻¹ (este valor de β corresponde ao robô a estar a “correr” e não a “andar”).

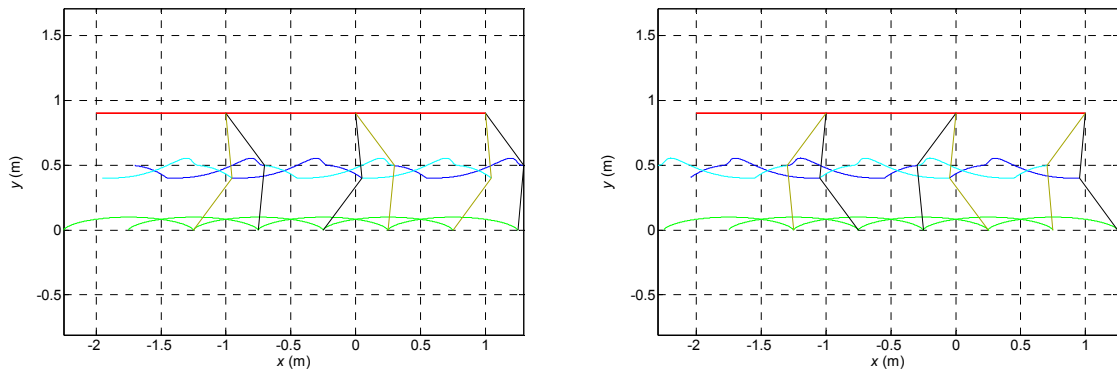


Figura 4.13: Representação gráfica da locomoção do robô na situação em que as pernas apresentam uma estrutura similar à dos mamíferos e à das aves com $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.

Estes resultados parecem estar também de acordo com algumas observações biológicas. De facto, relativamente ao valor óptimo do parâmetro F_C , é de referir que Neuhaus e Kazerooni (2000) efectuaram um estudo da trajetória do pé dos humanos durante a fase de transferência, baseando-se nos registos fotográficos efectuados por Muybridge, e concluíram que para diferentes tipos de terreno, as trajetórias dos pés mantêm-se muito perto do solo, independentemente do sexo do sujeito em estudo.

4.2.4 Configuração da Perna

De seguida efectua-se um novo conjunto de experiências para uma configuração alternativa da perna do robô. Em particular, na determinação da cinemática inversa selecciona-se a solução correspondente ao joelho para trás, de forma a que o robô hexápode apresente pernas similares às do flamingo (Figura 4.13).

4.2.4.1 Análise Cinemática

Mais uma vez inicia-se este estudo com a apresentação da variação dos índices cinemáticos com os parâmetros factor de ocupação β versus altura do corpo ao solo H_B para diferentes valores do comprimento do passo L_S e da máxima altura do pé ao solo F_C . Da Figura 4.14, correspondente à análise através dos índices face a perturbações, conclui-se que a variação com estes parâmetros é semelhante à da solução em que o robô apresenta o joelho para a frente. No entanto, deve-se realçar que, neste caso, os índices das perturbações apresentam um valor relativamente elevado para valores reduzidos do parâmetro altura do corpo ao solo.

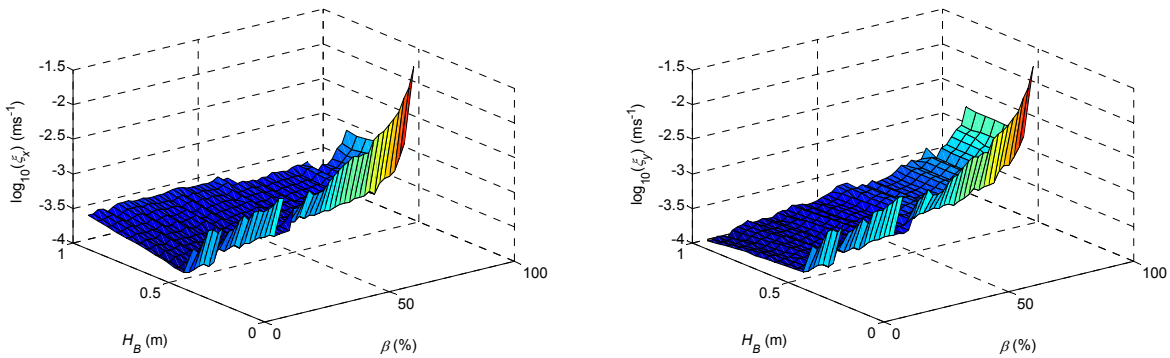


Figura 4.14: $\log(\xi_x)$ e $\log(\xi_y)$ vs. (β, H_B) com $L_S = 1$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.

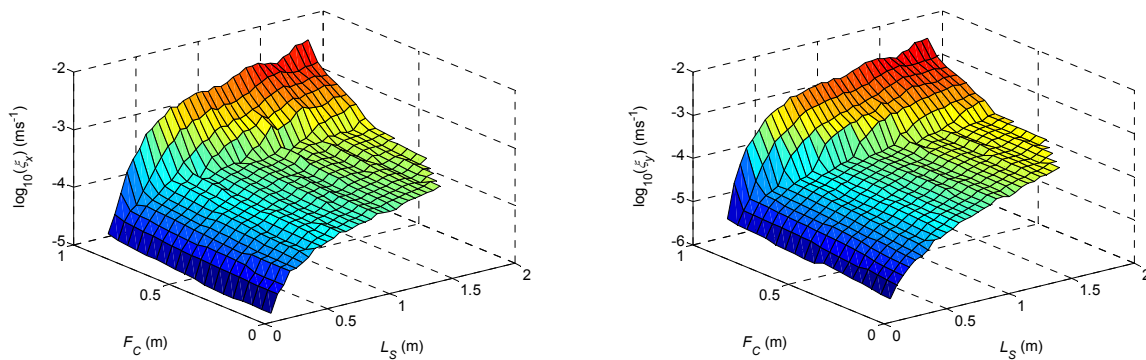


Figura 4.15: $\log(\xi_x)$ e $\log(\xi_y)$ vs. (L_S, F_C) com $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, PLO.

No tocante à variação destes índices com os parâmetros L_S e F_C (Figura 4.15) conclui-se que, também neste caso, os resultados correspondentes são semelhantes aos da solução em que o robô apresenta o joelho para a frente.

De seguida passa-se a analisar a variação dos índices de locomobilidade com estes parâmetros de locomoção.

A variação dos índices com os parâmetros factor de ocupação *versus* altura do corpo ao solo (Figura 4.16) permitem concluir que esta é semelhante à da situação em que o robô apresenta uma estrutura da perna tipo mamífero, para quaisquer valores dos parâmetros L_S e F_C em consideração.

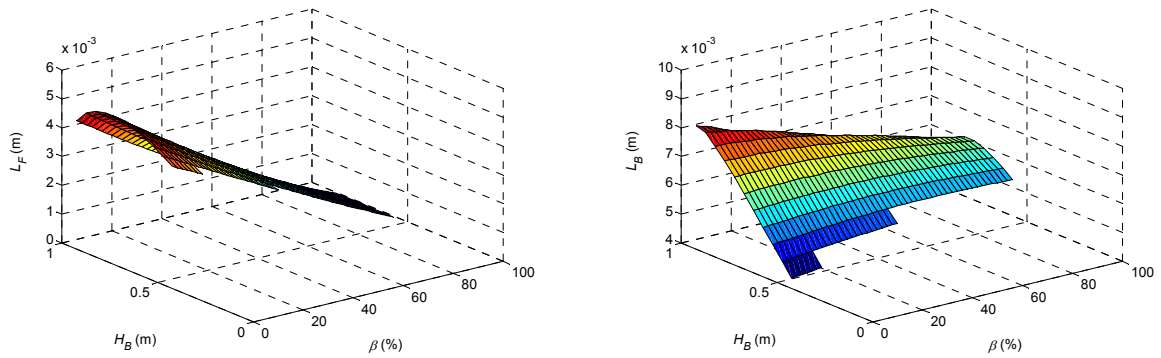


Figura 4.16: L_F e L_B vs. (β, H_B) com $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.

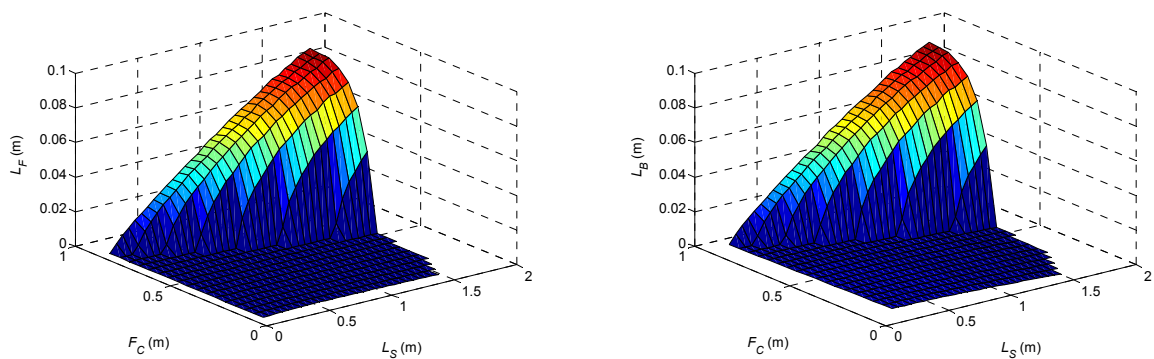


Figura 4.17: L_F e L_B vs. (L_S, F_C) com $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, PLO.

No que respeita à sua variação com os parâmetros L_S e F_C , a Figura 4.17 mostra que L_F e L_B apresentam o mesmo tipo de variação, nomeadamente que aumentam com F_C e L_S . A variação encontrada nesta figura mantém-se para diferentes valores de β e H_B . Aqui reside a principal diferença face à situação em que a perna apresenta uma estrutura similar à dos mamíferos, ou seja, de acordo com os resultados dos índices de locomobilidade, é preferível o robô deslocar-se com um valor elevado para F_C .

Na subsecção seguinte repete-se a análise aqui desenvolvida mas do ponto de vista dos índices dinâmicos.

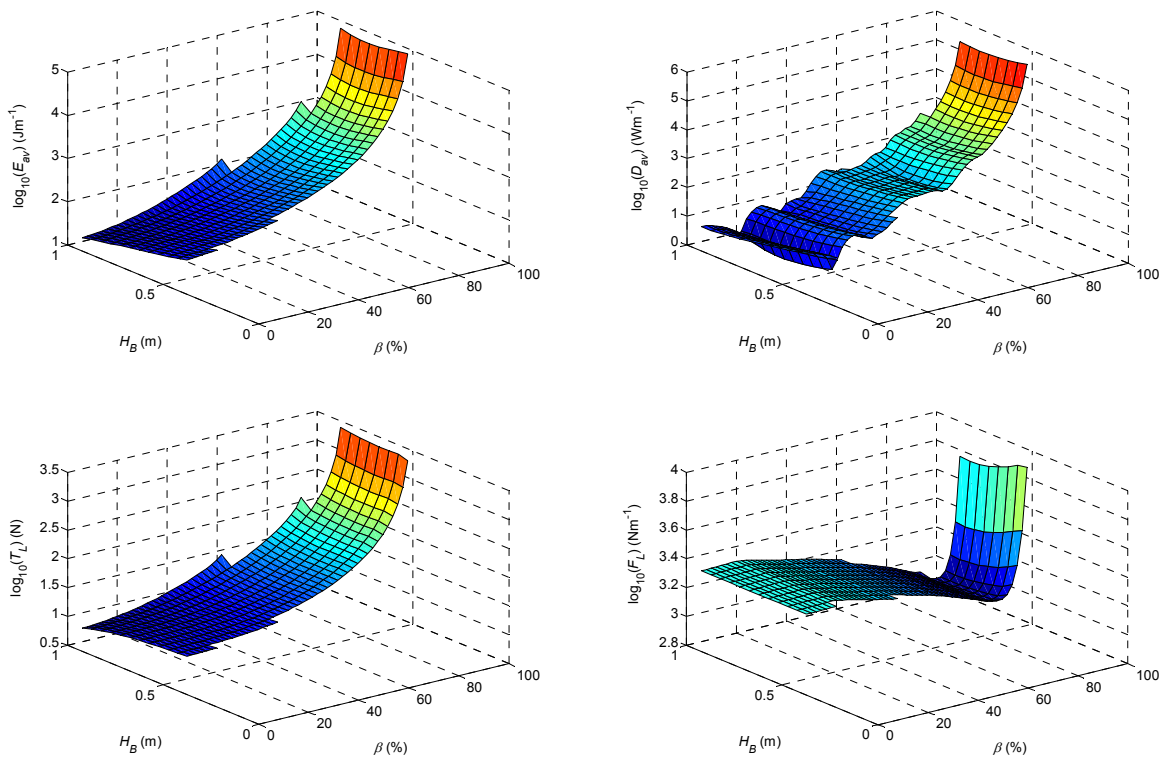


Figura 4.18: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (β, H_B) com $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.

4.2.4.2 Análise Dinâmica

A Figura 4.18 apresenta os gráficos de $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (β, H_B) . Conclui-se que os índices apresentam uma forma semelhante aos da situação em que o robô apresenta as pernas com a estrutura tipo mamífero. Verifica-se que os gráficos de $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$ e $\log(T_L)$ aumentam de forma monótona com β e diminuem ligeiramente com H_B . Além disso, o gráfico de $\log(D_{av})$ apresenta a particularidade de mostrar claramente a ocorrência de um mínimo deste índice para $\beta = 16\%$ e $H_B = 0,9$ m, tal como anteriormente constatado. Por último, também aqui o índice F_L apresenta uma variação ligeiramente diferente da dos outros índices, sendo praticamente invariante com o parâmetro H_B , excepto para valores de β elevados onde apresenta uma ligeira diminuição. No que concerne à sua variação com o factor de ocupação, o gráfico referente a este último índice apresenta um mínimo para valores de $\beta \approx 88\%$.

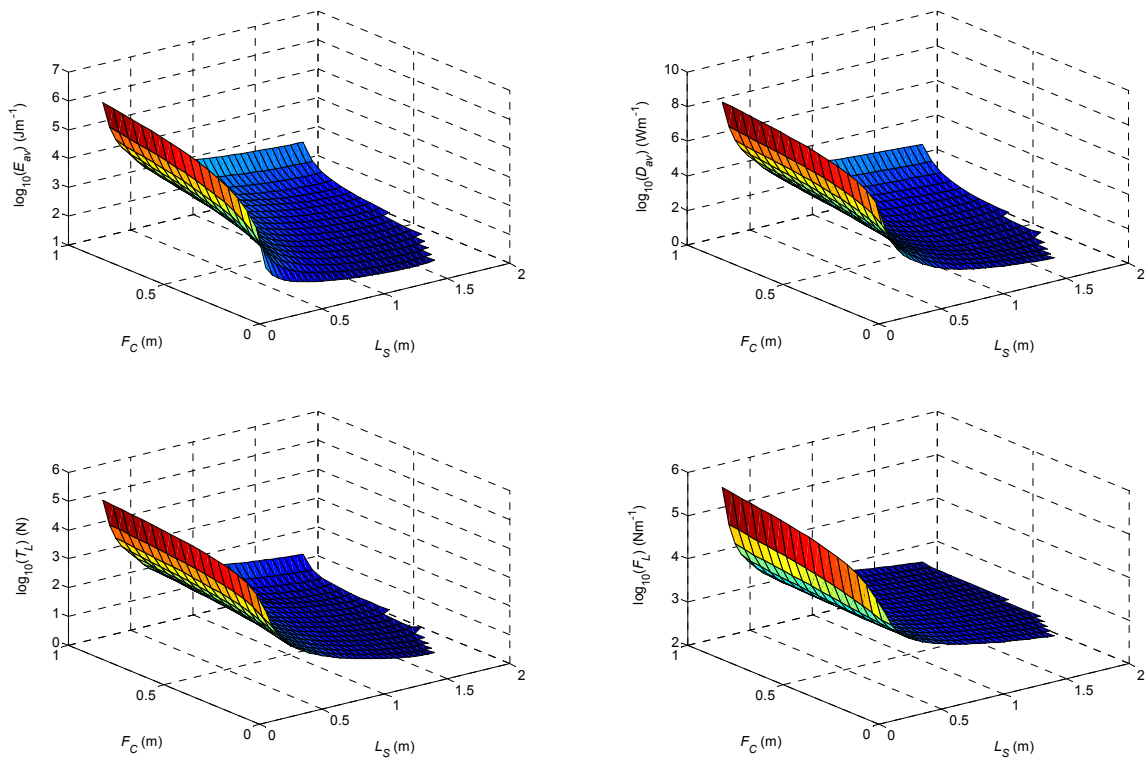


Figura 4.19: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (L_S, F_C) com $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, PLO.

Por último, a Figura 4.19 mostra a variação dos índices dinâmicos com L_S e F_C . Os resultados são coerentes, uma vez que todos os índices diminuem com o parâmetro L_S e aumentam com F_C , e a variação mantém-se para diferentes valores de β e H_B . Comparando estes gráficos com os da Figura 4.12 (relativos à situação em que o robô apresenta a estrutura das pernas tipo mamífero) conclui-se que são aproximadamente idênticos.

Uma vez que o objectivo passa por minimizar os valores dos índices dinâmicos durante a locomoção, conclui-se das Figuras 4.18 e 4.19 que também para esta estrutura da perna o sistema artificial de locomoção deve andar com o corpo numa posição elevada, os passos devem ser compridos e o pé deve permanecer junto ao solo. Relativamente ao factor de ocupação a adoptar, uma vez que índice F_L é o único que aponta para a utilização de um valor elevado, considera-se que será indicado a utilização de um valor reduzido deste parâmetro.

As experiências efectuadas nesta secção não são conclusivas no que concerne à melhor posição do joelho relativamente à anca.

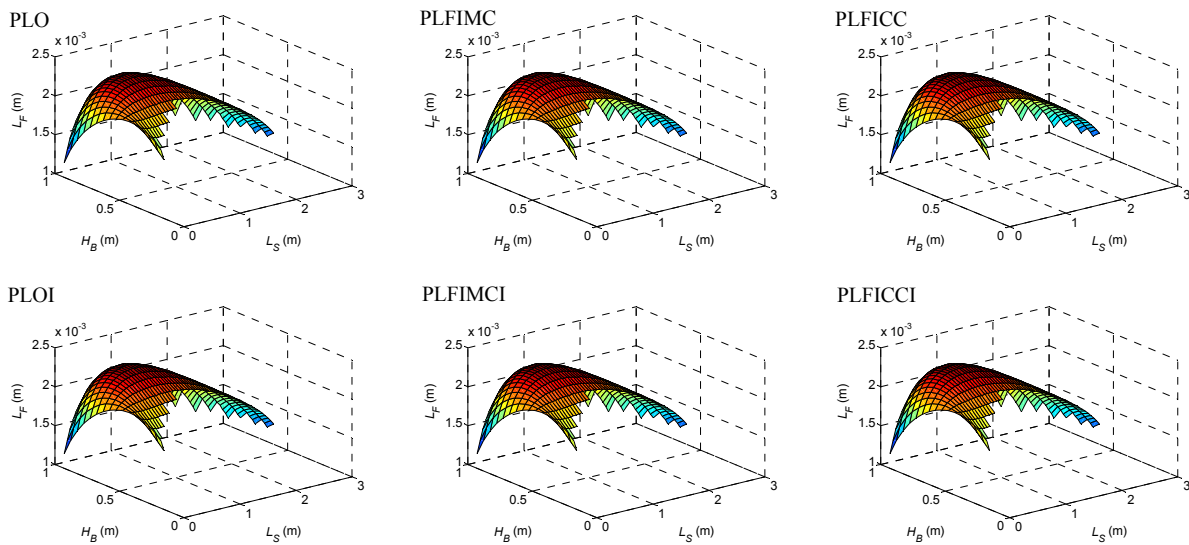


Figura 4.20: L_F vs. (L_S, H_B) com $\beta = 50\%$, $F_C = 0,1$ m, PLO, PLFIMC, PLFICC, PLOI, PLFIMCI e PLFICCI.

4.2.5 Padrões de Locomoção

O estudo que tem vindo a ser desenvolvido foi extendido para os diferentes padrões de locomoção periódicos em consideração, nomeadamente o PLFIMC, o PLFICC, o PLOI, o PLFIMCI e o PLFICCI. Com este objectivo em mente foram repetidas as experiências de simulação efectuadas nas subsecções 4.2.1 e 4.2.2, para todos estes padrões de locomoção e analisados os resultados obtidos.

4.2.5.1 Análise Cinemática

Relativamente à análise através dos índices cinemáticos, conclui-se que a forma dos gráficos não varia de forma significativa com o tipo de padrão de locomoção adoptado. Concretamente, para os outros padrões de locomoção periódicos a variação do desempenho com os parâmetros β , H_B , L_S e F_C é semelhante.

Por exemplo, a Figura 4.20 apresenta os gráficos de L_F para os vários padrões de locomoção em consideração. Comparando os vários gráficos desta figura, constata-se que estes são idênticos, apresentando um máximo para $L_S = 0,75$ m e $H_B = 0,75$ m, e que a influência dos diferentes parâmetros é a mesma para os diferentes padrões de locomoção.

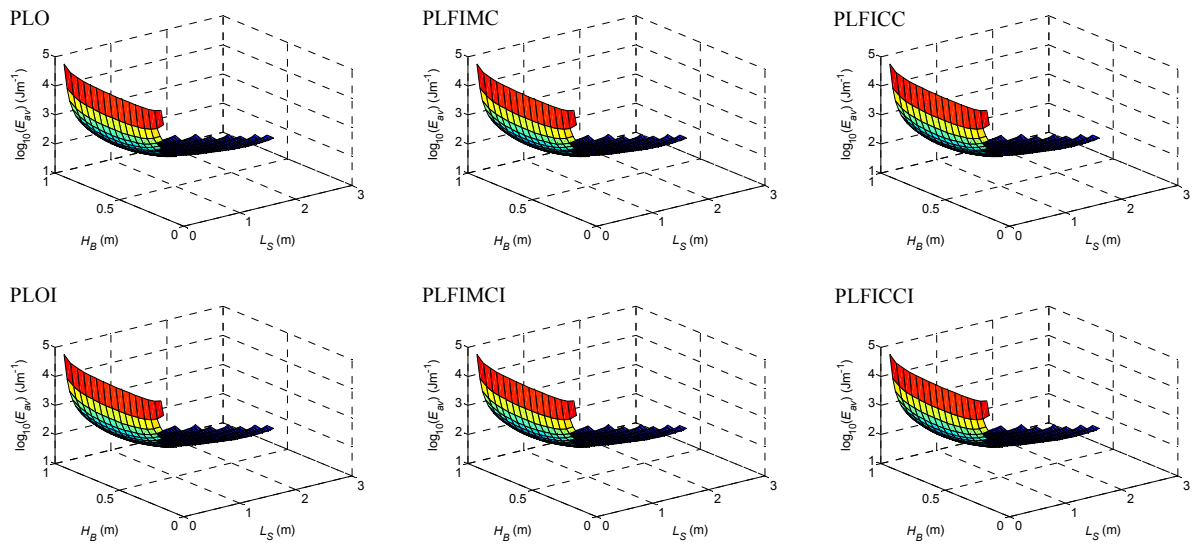


Figura 4.21: $\log(E_{av})$ vs. (L_S, H_B) com $\beta = 50\%$, $F_C = 0,1$ m, $V_F = 1$ ms⁻¹, PLO, PLFIMC, PLFICC, PLOI, PLFIMCI e PLFICCI.

4.2.5.2 Análise Dinâmica

No que diz agora respeito à análise através dos índices dinâmicos, conclui-se que, tal como para o caso da análise através dos índices cinemáticos, a forma dos gráficos não varia de forma significativa com o tipo de padrão de locomoção adoptado. Mais ainda, verifica-se que a variação dos índices dinâmicos propostos com os parâmetros β , H_B , L_S e F_C é semelhante (Figura 4.21). Portanto, torna-se necessário uma análise complementar (e um ou mais índices) de forma a comparar o desempenho dos diferentes padrões de locomoção periódicos estudados.

4.2.5.3 Potência Mecânica Absoluta Instantânea versus Padrão de Locomoção

Devido às razões apresentadas, de seguida avalia-se o desempenho através da potência mecânica absoluta instantânea total $P_t(t)$ (Eq. (3.21a)), ao longo de um período do ciclo de locomoção do robô, para diversos padrões de locomoção periódicos.

De acordo com este raciocínio, e através da análise das Figuras 4.22 – 4.26 que apresentam gráficos de $P_t(t)$ para diferentes valores do factor de ocupação, conclui-se que os padrões de locomoção PLFIMC e PLFICC requerem picos de $P_t(t)$ inferiores aos do padrão PLO.

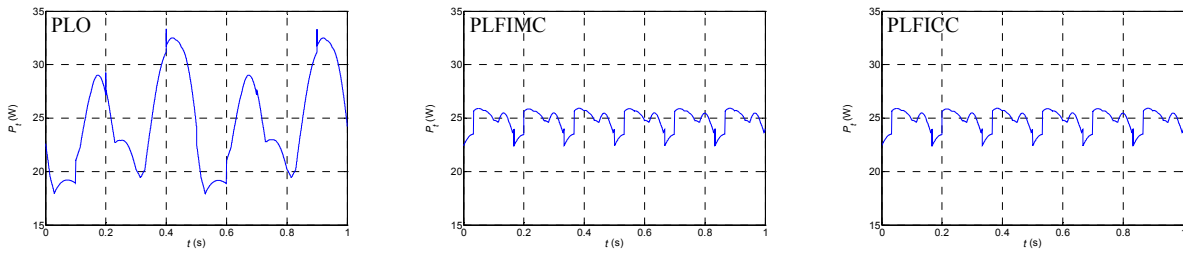


Figura 4.22: Gráficos de $P_t(t)$ com $\beta = 20,0\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m e $V_F = 1$ ms⁻¹, para os padrões PLO, PLFIMC e PLFICC.

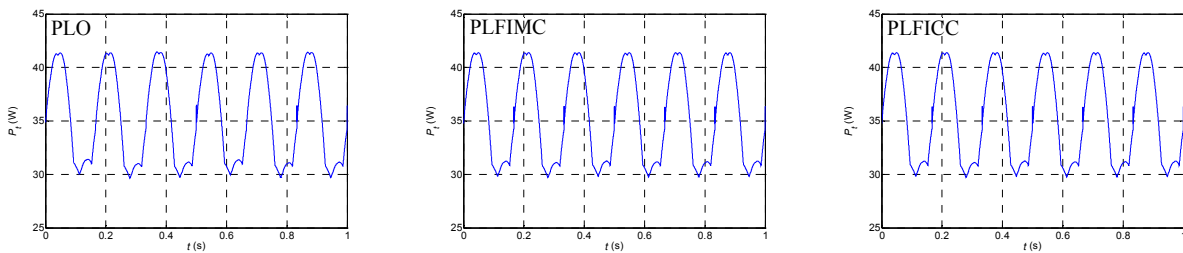


Figura 4.23: Gráficos de $P_t(t)$ com $\beta = 33,3\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m e $V_F = 1$ ms⁻¹, para os padrões PLO, PLFIMC e PLFICC.

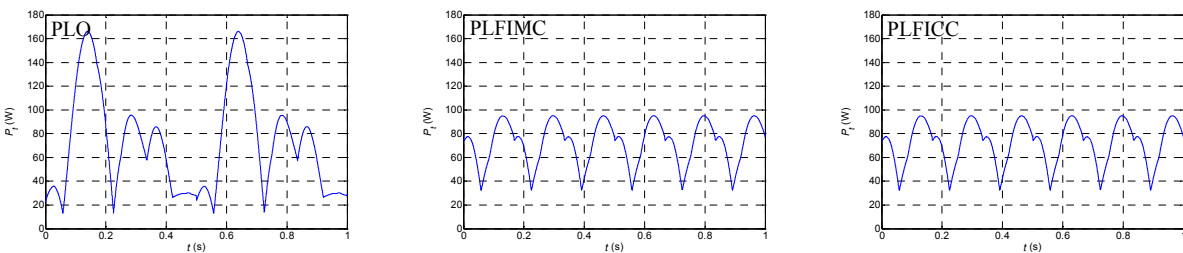


Figura 4.24: Gráficos de $P_t(t)$ com $\beta = 50,0\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m e $V_F = 1$ ms⁻¹, para os padrões PLO, PLFIMC e PLFICC.

Para dois valores particulares do factor de ocupação, nomeadamente para $\beta = 33,3\%$ (Figura 4.23) e $\beta = 66,6\%$ (Figura 4.25), verifica-se que todos os padrões de locomoção estudados apresentam curvas de $P_t(t)$ idênticas e que $P_t(t)$ aumenta com β . Este resultado era de esperar uma vez que com o aumento do valor do factor de ocupação o robô dispõe de menos tempo para efectuar a transferência da perna e, assim, necessita de o executar com velocidade superior, aumentando consequentemente o consumo energético.

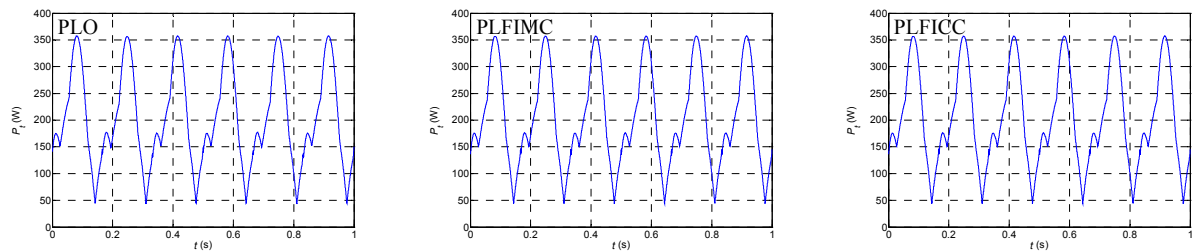


Figura 4.25: Gráficos de $P_i(t)$ com $\beta = 66,6\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m e $V_F = 1$ ms⁻¹, para os padrões PLO, PLFIMC e PLFICC.

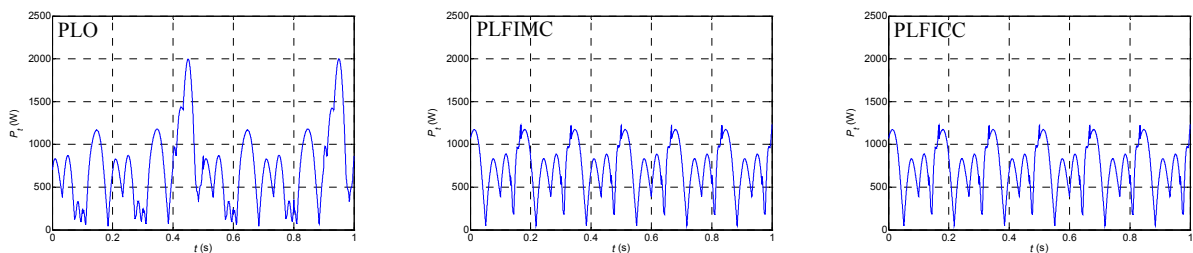


Figura 4.26: Gráficos de $P_i(t)$ com $\beta = 80,0\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m e $V_F = 1$ ms⁻¹, para os padrões PLO, PLFIMC e PLFICC.

Repetindo o estudo para os padrões de locomoção inversos (PLOI, PLFIMCI e PLFICCI), constata-se que $P_i(t)$ é similar ao dos correspondentes padrões directos. Assim, conclui-se que o PLO é menos eficiente do que os padrões PLFIMC e PLFICC, do ponto de vista de uma fonte de energia autónoma.

Por outro lado, comparando as somas da potência mecânica absoluta instantânea para as pernas dos lados esquerdo ($P_1(t)+P_3(t)+P_5(t)$) e direito ($P_2(t)+P_4(t)+P_6(t)$) do robô, conclui-se que todos os padrões de locomoção apresentam requisitos iguais, mas que o PLFICC apresenta picos de consumo inferiores. Esta situação é notória para valores de $\beta < 60,0\%$ (Figuras 4.27 e 4.28). Para valores superiores do factor de ocupação verifica-se que as somas da potência mecânica absoluta instantânea para os lados direito e esquerdo do robô são aproximadamente iguais, para os diferentes padrões de locomoção em estudo, sendo o PLFIMC o que apresenta picos superiores destes valores. Adicionalmente, deste ponto de vista tanto os padrões de locomoção directos, como os inversos, apresentam requisitos semelhantes.

Por último, foram comparadas as somas da potência mecânica absoluta instantânea para as pernas da frente ($P_1(t)+P_2(t)$), do meio ($P_3(t)+P_4(t)$) e de trás ($P_5(t)+P_6(t)$) do robô hexápode.

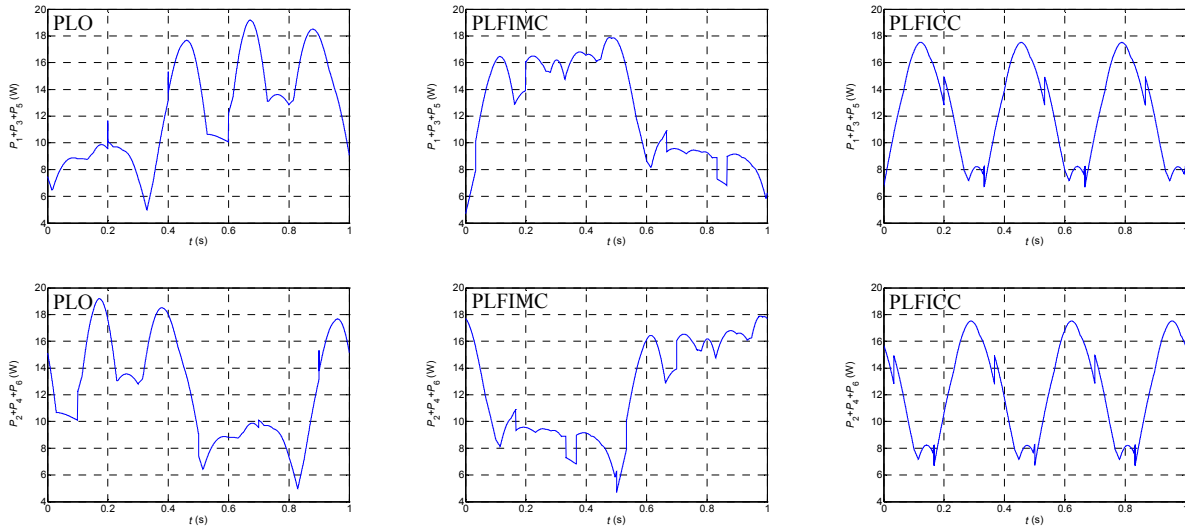


Figura 4.27: Gráficos da potência mecânica absoluta instantânea total dos lados esquerdo ($P_1(t)+P_3(t)+P_5(t)$) e direito ($P_2(t)+P_4(t)+P_6(t)$) do robô para $\beta = 20\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m e $V_F = 1$ ms⁻¹, para os padrões PLO, PLFIMC e PLFICC.

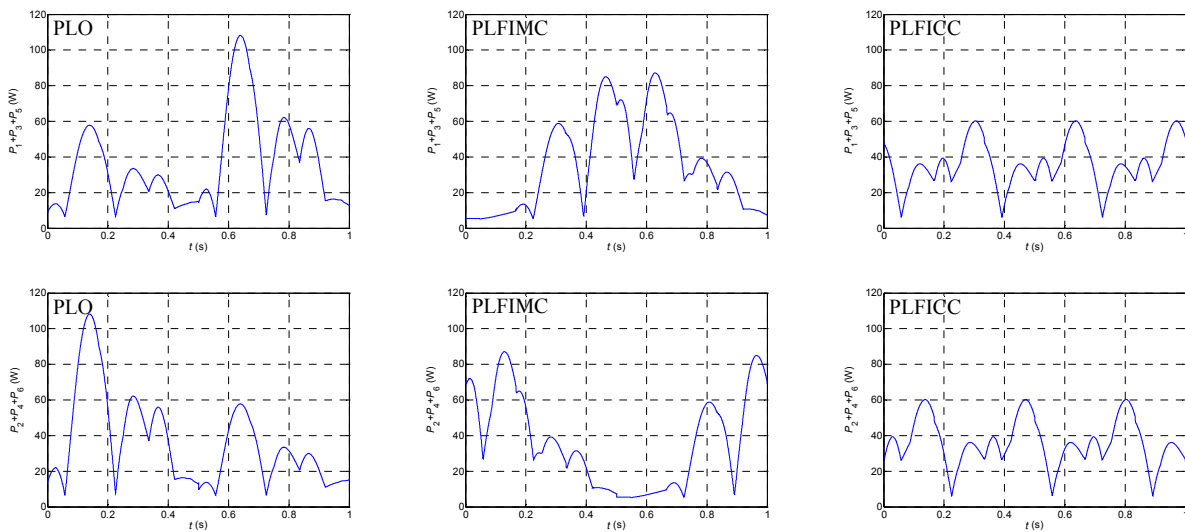


Figura 4.28: Gráficos da potência mecânica absoluta instantânea total dos lados esquerdo ($P_1(t)+P_3(t)+P_5(t)$) e direito ($P_2(t)+P_4(t)+P_6(t)$) do robô para $\beta = 50\%$, $H_B = 0,9$ m, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m e $V_F = 1$ ms⁻¹, para os padrões PLO, PLFIMC e PLFICC.

Conclui-se que, nesta perspectiva, não existe qualquer diferença entre os padrões de locomoção, uma vez que todos eles apresentam curvas das somas de $P_i(t)$ com a mesma forma mas com um desfaseamento entre si. Este resultado é o esperado uma vez que cada perna efectua uma trajectória igual e os padrões em estudo são padrões simétricos, logo com um desfaseamento de meio período entre as pernas de cada lado do corpo do robô.

4.2.6 Offset da Trajectória do Pé *versus* Comprimento dos Elos das Pernas

Nas experiências anteriores não se variaram os comprimentos dos elos e as massas das pernas do robô, mantendo-se com os valores $L_{i1} = L_{i2} = 0,5$ m e $M_{i1} = M_{i2} = 1,0$ kg para $O_i = 0,0$ m.

Nesta secção estuda-se a influência destes parâmetros sobre os índices cinemáticos e dinâmicos. Assim, estabelece-se um comprimento e uma massa total das pernas constante e igual a $L_{it} = L_{i1} + L_{i2} = 1,0$ m e $M_{Lit} = M_{i1} + M_{i2} = 2,0$ kg, e varia-se a relação entre os dois elos, fazendo $M_{ij} = (L_{ij} / L_{it})M_{Lit}$ ($i = 1, \dots, 6; j = 1, 2$).

4.2.6.1 Análise Cinemática

Nesta ordem de ideias começa-se pela análise do comportamento dos índices cinemáticos face a perturbações, ξ_x e ξ_y , para diferentes valores dos parâmetros de locomoção. Relativamente ao índice ξ_x verifica-se (Figura 4.29) que, para valores reduzidos de H_B e L_S , é preferível que o robô possua pernas com valores reduzidos de L_{i1} e ande com os pés deslocados para trás face à anca ($O_i < -0,5$ m). Por seu lado, o índice ξ_y aponta para que o robô apresente pernas com valores iguais de L_{i1} e L_{i2} e ande com os pés alinhados face à anca ($O_i \approx 0,0$ m). À medida que H_B aumenta o índice ξ_x (Figura 4.30) indica como óptimo um robô com valores elevados de L_{i1} e uma locomoção com os pés deslocados para trás face à anca ($O_i < -0,5$ m). Quanto ao índice ξ_y , o seu comportamento mantém-se, tal como descrito.

Realizando uma análise similar através dos índices de locomobilidade L_F e L_B , conclui-se que os resultados são consistentes entre si (Figura 4.31). Verifica-se que $L_F(O_i, L_{i1})$ e $L_B(O_i, L_{i1})$ apresentam valores máximos para comprimentos dos elos das pernas $L_{i1} \approx 0,5$ m e um desvio entre o pé e a anca do robô $O_i \approx 0,0$ m. Além disso, é também possível concluir que L_F e L_B diminuem fortemente / ligeiramente para valores de L_{i1} / O_i afastados destes. Estes resultados são também invariantes com os diferentes parâmetros de locomoção excepto para o caso de a altura do corpo ao solo se manter num valor reduzido (Figura 4.32). Nesta situação, verifica-se que os valores máximos de L_F e L_B se mantêm próximos de $L_{i1} \approx 0,5$ m mas, de acordo com o índice L_F , a trajectória do pé do robô deve-se deslocar para a frente ou para trás face à anca ($O_i \neq 0,0$ m).

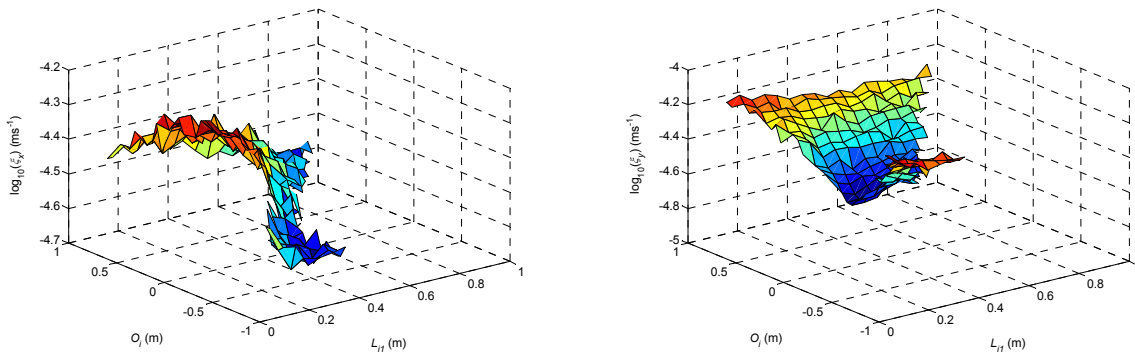


Figura 4.29: $\log(\xi_x)$ e $\log(\xi_y)$ vs. (L_H, O_i) com $\beta = 50\%$, $L_S = 0,2$ m, $H_B = 0,4$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.

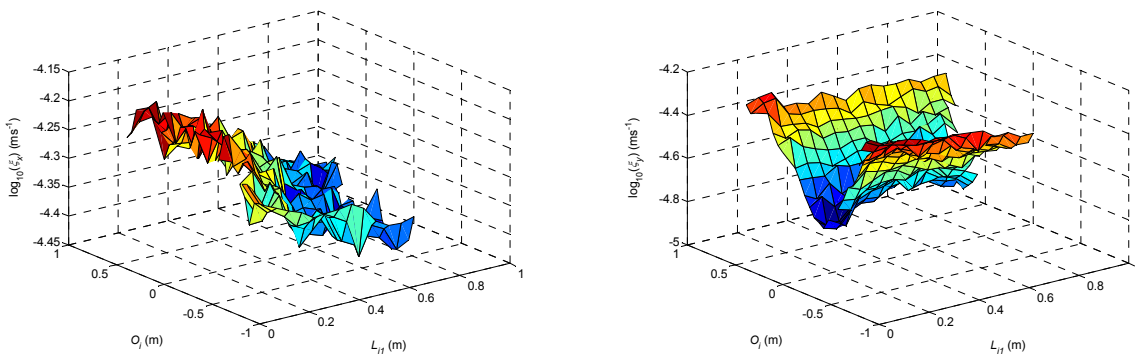


Figura 4.30: $\log(\xi_x)$ e $\log(\xi_y)$ vs. (L_H, O_i) com $\beta = 50\%$, $L_S = 0,2$ m, $H_B = 0,7$ m, $F_C = 0,1$ m, PLO.

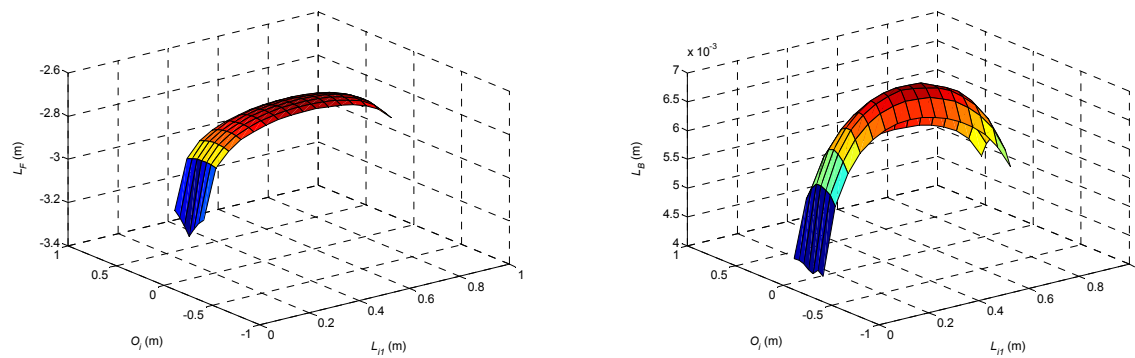


Figura 4.31: L_F e L_B vs. (L_H, O_i) com $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m, $H_B = 0,9$ m, $V_F = 1$ ms^{-1} , PLO.

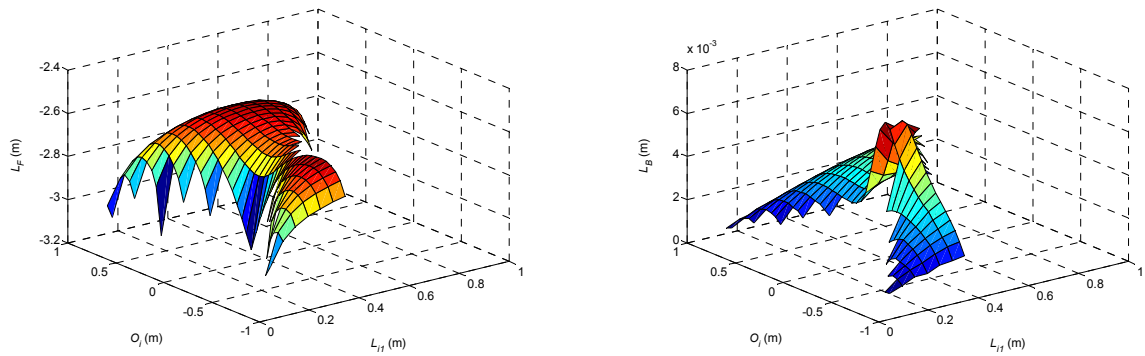


Figura 4.32: L_F e L_B vs. (L_{i1}, O_i) com $\beta = 50\%$, $L_S = 0,2$ m, $F_C = 0,1$ m, $H_B = 0,4$ m, $V_F = 1$ ms⁻¹, PLO.

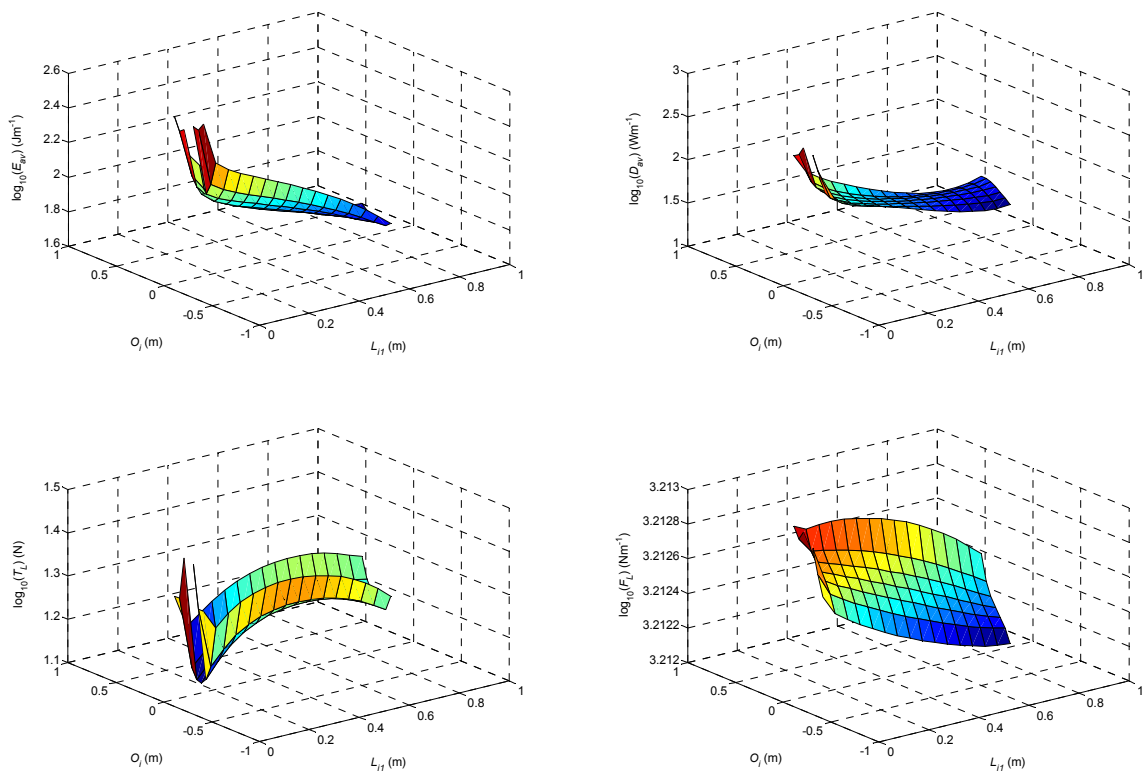


Figura 4.33: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (L_{i1}, O_i) com $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m, $H_B = 0,9$ m, $V_F = 1$ ms⁻¹, PLO.

4.2.6.2 Análise Dinâmica

O estudo é agora completado analisando a influência dos parâmetros L_{i1} e O_i através do recurso aos índices dinâmicos. Na Figura 4.33 apresentam-se alguns dos resultados para uma situação particular da locomoção. Conclui-se que os gráficos de $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$ e $\log(T_L)$

apresentam comportamentos similares no que concerne à sua variação em função de O_i (os três apresentam valores mínimos quando a locomoção se efectua com $O_i \approx 0,0$ m). Todavia, no que diz respeito à sua variação com L_{i1} os seus comportamentos são antagónicos. Assim, a locomoção deveria ser efectuada com valores próximos do máximo, na perspectiva de E_{av} , com valores próximos de $L_{i1} \approx 0,7$ m, na perspectiva de D_{av} , e com valores reduzidos, na perspectiva de T_L . Por seu lado, o índice F_L apresenta uma variação monótona em todo o intervalo estudado, indicando como óptima a locomoção efectuada com valores mínimo / máximo dos parâmetros O_i / L_{i1} , respectivamente.

Constata-se que os resultados obtidos são invariantes com os diferentes parâmetros de locomoção em estudo (β , H_B , L_S e F_C). Sintetizando os resultados anteriores, resulta como compromisso da análise efectuada através dos diferentes índices que a locomoção deve ser efectuada com valores de $L_{i1} \approx 0,5$ m e $O_i \approx 0,0$ m.

A análise é, de seguida, extendida para o caso em que se supõe que a massa dos segmentos das pernas permanece constante (contrariamente ao caso anterior em que variava de forma proporcional ao seu comprimento). Assim, estabelece-se um comprimento e uma massa total das pernas constante e igual a $L_{it} = L_{i1} + L_{i2} = 1,0$ m e $M_{Lit} = M_{i1} + M_{i2} = 2,0$ kg enquanto se varia a relação entre os dois elos, fazendo neste caso $M_{ij} = 1,0$ kg ($i = 1, \dots, 6; j = 1, 2$).

Os gráficos de $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$ e $\log(T_L)$ (Figura 4.34) revelam variações similares e conclui-se que a locomoção é mais eficiente para valores reduzidos de $L_{i1} \approx 0,2$ m e $O_i \approx 0,0$ m. Tal como no caso anterior, o índice F_L apresenta uma variação monótona em todo o intervalo estudado, indicando como óptima a locomoção efectuada com valores mínimo / máximo dos parâmetros O_i / L_{i1} , respectivamente.

Mais uma vez, observa-se que os resultados obtidos são invariantes com os parâmetros de locomoção β , H_B , L_S e F_C em estudo.

Sintetizando estes dados, conclui-se que é possível estabelecer um compromisso entre os resultados da análise efectuada através dos diferentes índices segundo a qual a locomoção deve ser efectuada com valores de $L_{i1} \approx 0,2$ m e $O_i \approx 0,0$ m.

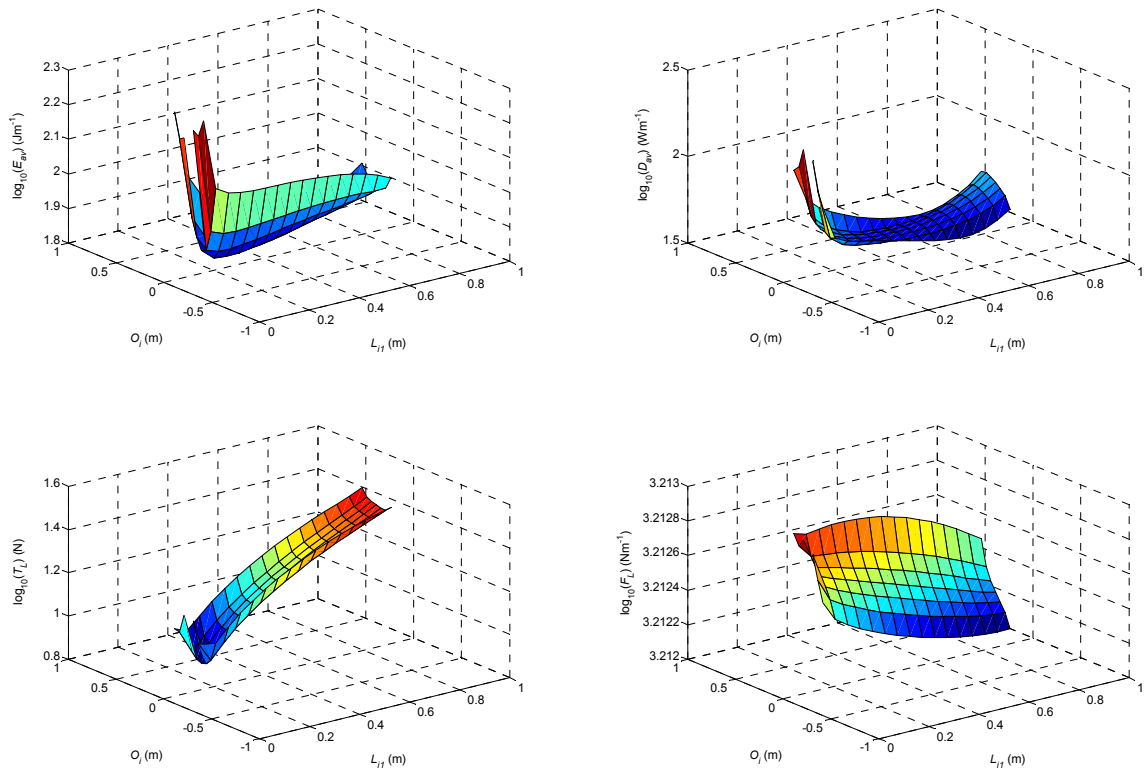


Figura 4.34: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (L_{if}, O_i) com $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,1$ m, $H_B = 0,9$ m, $V_F = 1$ ms⁻¹, PLO.

Estes resultados parecem estar de acordo com os estudos da biologia, e especificamente no que diz respeito aos mamíferos, pois verifica-se que os mamíferos possuem pernas com segmentos de aproximadamente o mesmo comprimento (Witte, *et al.*, 2001a). Por outro lado, os últimos resultados estão também de acordo com os estudos da biologia de Kram, *et al.* (1997). De acordo com estes autores, a massa das pernas deve estar concentrada o mais perto possível das ancas de forma a tornar a locomoção o mais eficiente possível.

4.2.7 Velocidade Frontal do Corpo do Robô

Após se terem determinado os valores óptimos para os parâmetros da estrutura do robô e do seu padrão de locomoção, pode-se estudar o efeito de outros parâmetros, nomeadamente a sua velocidade de deslocação V_F , uma vez que os parâmetros considerados anteriormente parecem ter uma grande importância na velocidade de locomoção dos robôs com pernas (Cham, *et al.*, 2002).

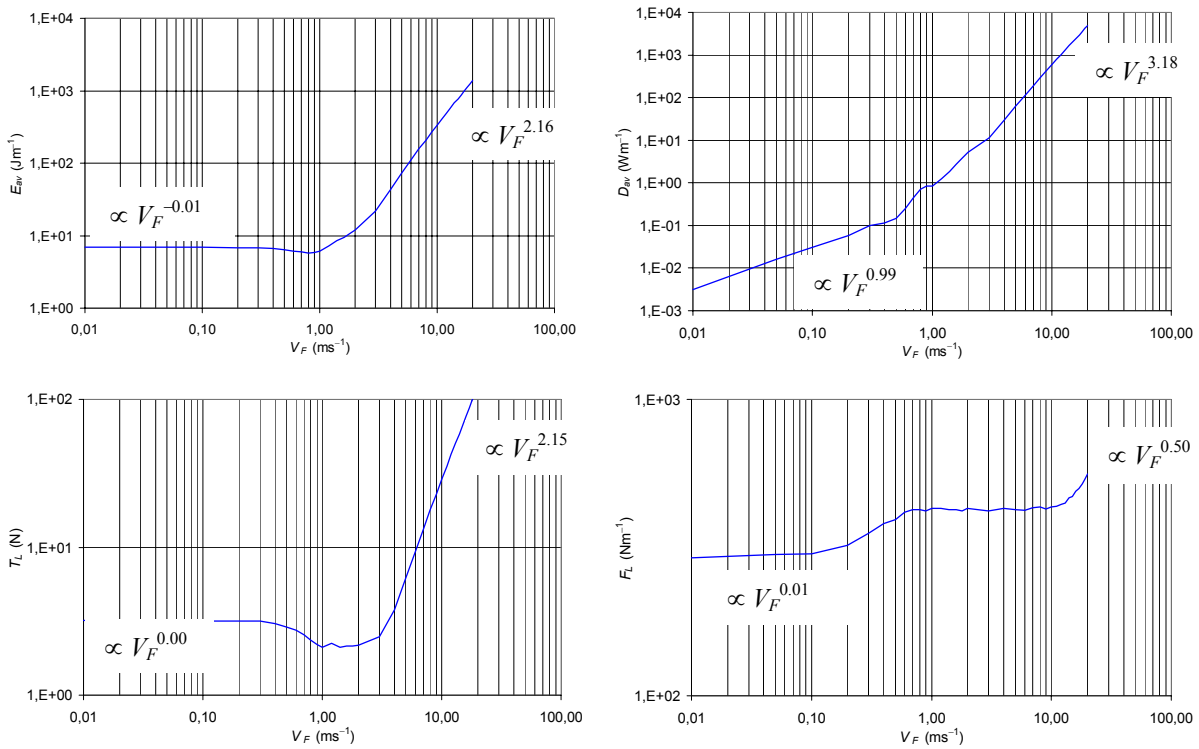


Figura 4.35: $\min[E_{av}(V_F)]$, $\min[D_{av}(V_F)]$, $\min[T_L(V_F)]$ e $\min[F_L(V_F)]$ com $F_C = 0,01$ m, PLO.

Com este objectivo em mente, realiza-se um conjunto de experiências tendo em vista determinar os valores mínimos dos índices dinâmicos, para diferentes velocidades do sistema artificial de locomoção, e capturam-se os valores dos parâmetros β , H_B e L_S para os quais se obtêm os valores mínimos dos índices dinâmicos. Quanto ao valor de F_C , foi mantido fixo ($F_C = 0,01$ m) ao longo das experiências seguintes, uma vez que todos os resultados anteriores apontam para que este seja o valor óptimo deste parâmetro.

A Figura 4.35 mostra a evolução de $\min[E_{av}(V_F)]$, $\min[D_{av}(V_F)]$, $\min[T_L(V_F)]$ e $\min[F_L(V_F)]$, respectivamente. Esta figura revela que $\min[E_{av}]$ aumenta com V_F . Além disso, encontra-se $\min[E_{av}] \propto V_F^{-0,01}$ para baixas velocidades e $\min[E_{av}] \propto V_F^{2,16}$ para altas velocidades. Para velocidades médias, este gráfico apresenta uma zona de transição na gama de velocidades $0,4 < V_F < 3,0$ ms^{-1} com um mínimo para $V_F \approx 0,8$ ms^{-1} .

O gráfico para $\min[D_{av}]$ apresenta uma variação similar. Para baixas velocidades temos $\min[D_{av}] \propto V_F^{0,99}$ enquanto que para altas velocidades temos $\min[D_{av}] \propto V_F^{3,18}$. Para velocidades médias, o gráfico apresenta uma zona de transição na gama de velocidades $0,2 < V_F < 3,0$ ms^{-1} .

No que concerne a $\min[T_L]$ temos também uma variação semelhante, sendo $\min[T_L] \propto V_F^{0,00}$ para baixas velocidades e $\min[T_L] \propto V_F^{2,15}$ para altas velocidades. Para este índice, as transições ocorrem na gama de velocidades $0,3 < V_F < 4,0 \text{ ms}^{-1}$ e, neste caso, temos um mínimo para $V_F \approx 1,0 \text{ ms}^{-1}$.

O gráfico para $\min[F_L]$ apresenta uma variação ligeiramente diferente, com dois patamares distintos. Adicionalmente tem-se $\min[F_L] \propto V_F^{0,01}$ para baixas velocidades e $\min[F_L] \propto V_F^{0,50}$ para altas velocidades. Para este índice, as transições de baixas para médias e médias para altas velocidades ocorrem, respectivamente, para $V_F \approx 0,3 \text{ ms}^{-1}$ e $V_F \approx 10,0 \text{ ms}^{-1}$.

A principal conclusão a tirar dos gráficos da Figura 4.35 prende-se com a observação de que os valores mínimos dos índices dinâmicos E_{av} , D_{av} e T_L têm uma ligeira variação na gama $0,01 < V_F < 2,0 \text{ ms}^{-1}$, após o que os seus valores aumentam de acordo com as expressões indicadas. Assim, a locomoção efectuada nesta gama de velocidades apresenta um desempenho aproximadamente constante. No entanto, com a geometria do robô considerada para a realização destas experiências, caso se opte por efectuar a locomoção a velocidades mais elevadas verifica-se uma degradação forte do seu desempenho. Além disso, constata-se que a locomoção apresenta um óptimo de eficiência se for efectuada a velocidades próximas do intervalo $0,8 < V_F < 1,0 \text{ ms}^{-1}$, de acordo com os resultados obtidos através dos índices E_{av} e T_L .

4.2.8 Altura do Corpo ao Solo e Comprimento do Passo *versus* Velocidade Frontal do Corpo do Robô

A Figura 4.36 mostra a evolução de $L_S(V_F)$ e $H_B(V_F)$ para os valores mínimos de E_{av} . Desta figura conclui-se que para $V_F \leq 3 \text{ ms}^{-1}$ L_S (H_B) aumenta (diminui) com V_F desde $L_S = 1,0 \text{ m}$ ($H_B = 0,95 \text{ m}$) até $L_S = 4,5 \text{ m}$ ($H_B = 0,6 \text{ m}$). Adicionalmente, $L_S(V_F)$ e $H_B(V_F)$ apresentam uma variação similar para os valores mínimos dos índices D_{av} , T_L e F_L .

Estes resultados complementam as conclusões anteriores, expressas nas secções 4.2.1 e 4.2.2, relativas à escolha dos parâmetros de locomoção como forma de otimizar a locomoção. Eles demonstram que o comprimento do passo e da altura do corpo ao solo devem ser adaptadas à velocidade de locomoção do robô e não permanecer fixos em determinados valores.

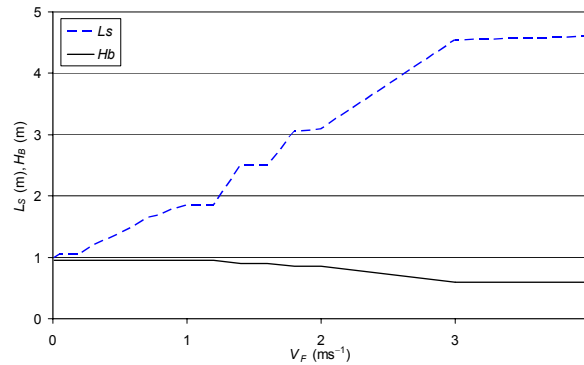


Figura 4.36: $L_S(V_F)$ e $H_B(V_F)$ para $\min(E_{av})$ com $F_C = 0,01$ m, PLO.

Relativamente ao valor do factor de ocupação, apesar de não se apresentar nenhum gráfico da sua variação, verifica-se que para a gama de velocidades em estudo e independentemente do índice dinâmico considerado, este deve permanecer sempre num valor reduzido ($\beta \approx 2\%$). Isto significa que a situação óptima, do ponto de vista dos índices considerados, corresponde ao robô se encontrar a correr ($\beta < 50\%$).

4.2.9 Número de Pernas do Robô

Os estudos efectuados até este ponto tiveram por base um sistema artificial de locomoção hexápode. De seguida procura-se determinar se existe um número óptimo de pernas do robô (n) que deva ser adoptado para a locomoção em função da velocidade. Para este efeito, consideram-se duas alternativas.

Uma primeira opção passa por estabelecer que a massa das pernas é constante e, por consequência, a massa total do robô (M_{Rt}) varia com o número total de pernas (n):

$$M_{Rt} = M_b + \sum_{i=1}^n (M_{i1} + M_{i2}), \quad M_{i1} = M_{i2} = 1,0 \text{ kg} \quad (4.5)$$

sendo M_b a massa do corpo do robô.

A Figura 4.37 mostra que E_{av} aumenta proporcionalmente com n . Para o índice T_L obtemos conclusões idênticas, enquanto que D_{av} e F_L só aumentam com n para valores elevados da velocidade, como pode ser visto na mesma figura.

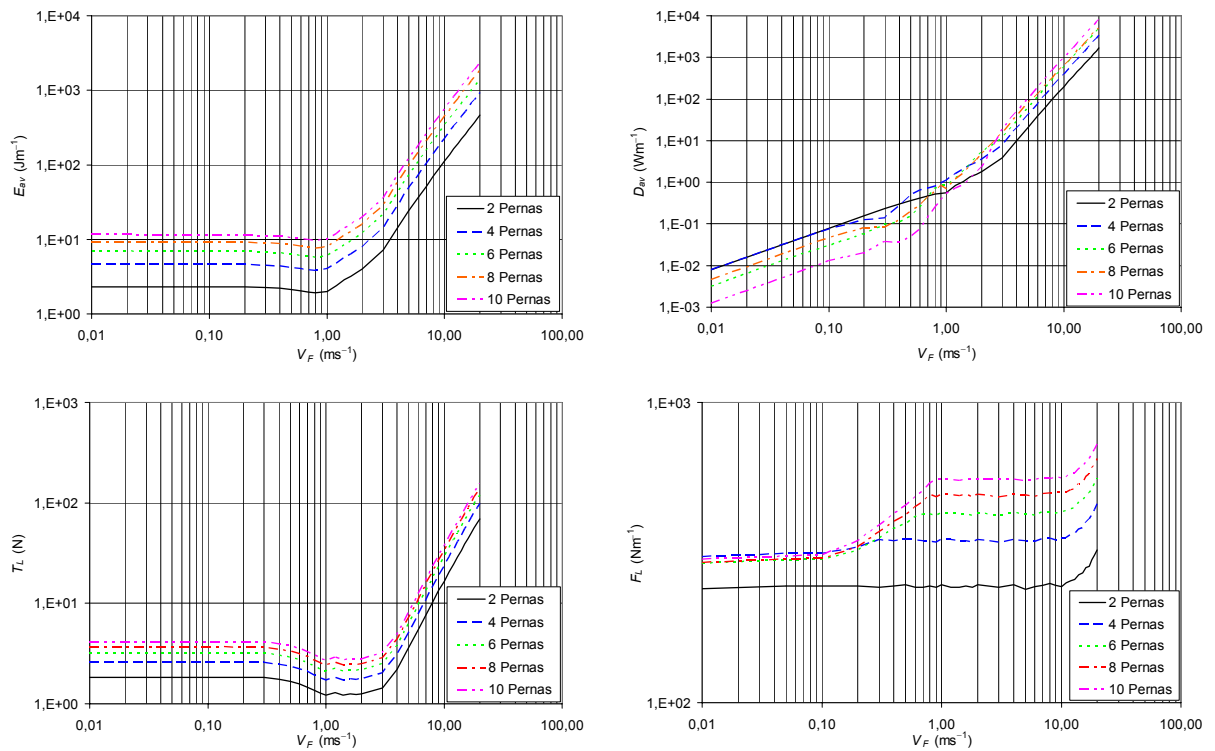


Figura 4.37: $\min[E_{av}(V_F)]$, $\min[D_{av}(V_F)]$, $\min[T_L(V_F)]$ e $\min[F_L(V_F)]$, para vários números de pernas $n = \{2, 4, 6, 8, 10\}$, com $F_C = 0,01$ m, PLO.

Conclui-se que, do ponto de vista dos índices E_{av} e T_L , a forma mais eficiente de realizar a locomoção, independentemente da velocidade, é recorrendo a robôs bípedes. Ainda de acordo com os resultados expressos por estes índices, a locomoção efectuada por robôs com dez pernas é a mais ineficiente. Já os resultados obtidos através dos índices D_{av} e F_L apontam no sentido de existirem gamas de velocidades onde cada uma das estruturas é mais eficiente.

Uma segunda opção para a comparação passa por considerar que a massa total do robô (M_{Rt}) é constante:

$$M_{Rt} = M_b + \sum_{i=1}^n (M_{i1} + M_{i2}), \quad M_{Rt} = 100,0 \text{ kg} \quad (4.6)$$

Neste caso as massas das pernas variam com n , de acordo com a expressão (Taylor, *et al.*, 1982; Fedak, *et al.*, 1982; Heglund, *et al.*, 1982):

$$\frac{(M_{i1} + M_{i2})}{M_{Rt}} = 0,35e^{-0,47n}, \quad M_{i1} = M_{i2}, \quad \forall i \quad (4.7)$$

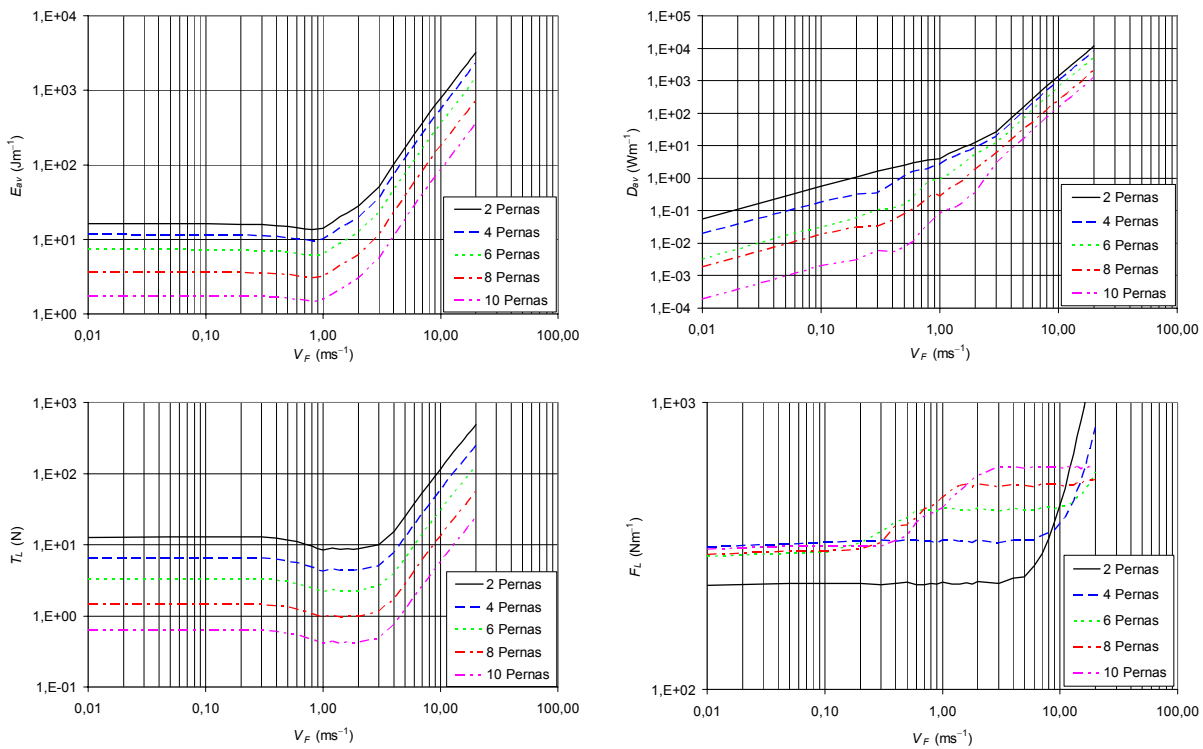


Figura 4.38: $\min[E_{av}(V_F)]$, $\min[D_{av}(V_F)]$, $\min[T_L(V_F)]$ e $\min[F_L(V_F)]$, para vários números de pernas $n = \{2, 4, 6, 8, 10\}$, com $F_C = 0,01$ m, PLO.

A Figura 4.38 mostra que E_{av} diminui de forma proporcional com n . Como se pode ver, os índices D_{av} e T_L apresentam uma variação similar a E_{av} , ao passo que F_L revela uma variação mais complexa, apontando no sentido das diferentes estruturas terem eficiências óptimas em diferentes gamas de velocidades.

Estes últimos resultados estão de acordo com os estudos da biologia desenvolvidos por Kram, *et al.* (1997). De acordo com estes autores, quanto menor for a massa das pernas menor é a energia cinética dispendida, quando os animais se deslocam a velocidades relativamente elevadas, situação em que necessitam de movimentar as pernas com alta frequência.

Comparando estas últimas experiências, podemos estabelecer um compromisso para otimizar o padrão de locomoção ondulatório. Assim, o robô deve andar (de facto, ele deve “correr”, uma vez que $\beta < 50\%$) com uma velocidade $V_F \approx 1 \text{ ms}^{-1}$ e a massa do robô deve estar concentrada no corpo, enquanto que as pernas devem ser o mais leves possíveis. Caso as pernas tenham todas a mesma massa deve-se optar pelo sistema de locomoção com o menor número de pernas.

4.3 Aplicação dos Índices Dinâmicos à Locomoção Animal

Com o objectivo de analisar o desempenho dos sistemas artificiais comparativamente aos seres vivos, aplicam-se os índices dinâmicos formulados neste trabalho à locomoção de um conjunto de animais. A sua locomoção foi simulada recorrendo ao modelo desenvolvido neste trabalho, mas considerando as dimensões físicas encontradas em estudos nas áreas da biologia e da zoologia. Os dados antropométricos utilizados nas diversas simulações efectuadas encontram-se no Anexo F, tendo os dados para o ser humano sido compilados a partir de (Winter, 1990) e para os outros animais de (Fedak, *et al.*, 1982; Kram, *et al.*, 1997; Pfeiffer, *et al.*, 1995).

Os gráficos com os diferentes índices (Figuras 4.39 – 4.42) são consistentes e as diversas curvas, que representam cada um dos animais individualmente, são na maioria das situações paralelas entre si não permitindo extrair conclusões gerais sobre a gama de velocidades a que cada animal apresenta um melhor desempenho.

Estes gráficos demonstram que existe uma variação dos índices que depende da massa total do corpo do animal em causa, sendo esta quase independente do número de pernas do animal. Verifica-se também que os seres vivos com menor massa e menor número de pernas apresentam valores inferiores dos índices dinâmicos, tal como se encontrou para o caso dos sistemas artificiais de locomoção.

Por último, procura-se determinar se os índices dinâmicos poderão representar fielmente o que se verifica no mundo natural e em que medida o fazem. Para o efeito, representa-se nas Figuras 4.43 – 4.45 os resultados das equações alométricas propostas por Taylor, *et al.* (1982), Fedak, *et al.* (1982) e Heglund, *et al.* (1982), em função da velocidade de locomoção e para quatro valores da massa dos animais, que se consideram representativas da gama de valores que tem vindo a ser estudada.

As equações alométricas apresentadas por Taylor, *et al.* (1982), Fedak, *et al.* (1982) e Heglund, *et al.* (1982) relacionam uma determinada forma de potência, consumida durante a locomoção de um animal a velocidade constante, com a sua massa.

No caso da equação de Taylor, *et al.* (1982) considera-se a relação entre a taxa de consumo da energia metabólica durante a locomoção ($P_{metabolica} = \dot{E}_{metabolica}$) com a massa do animal em consideração (M). A relação proposta por este autor é a seguinte:

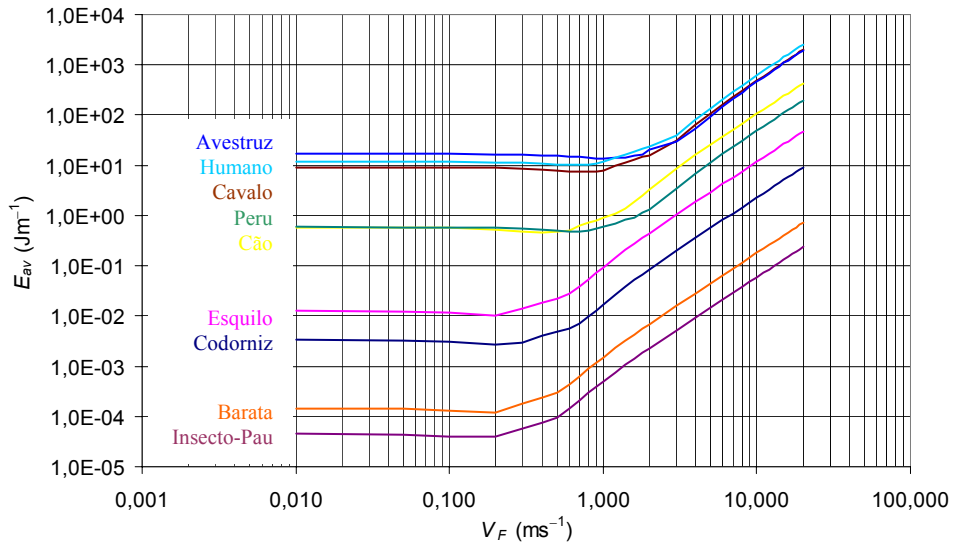


Figura 4.39: $\min[E_{av}(V_F)]$, para vários tipos de animais, com $F_C = 0,01$ m, PLO.

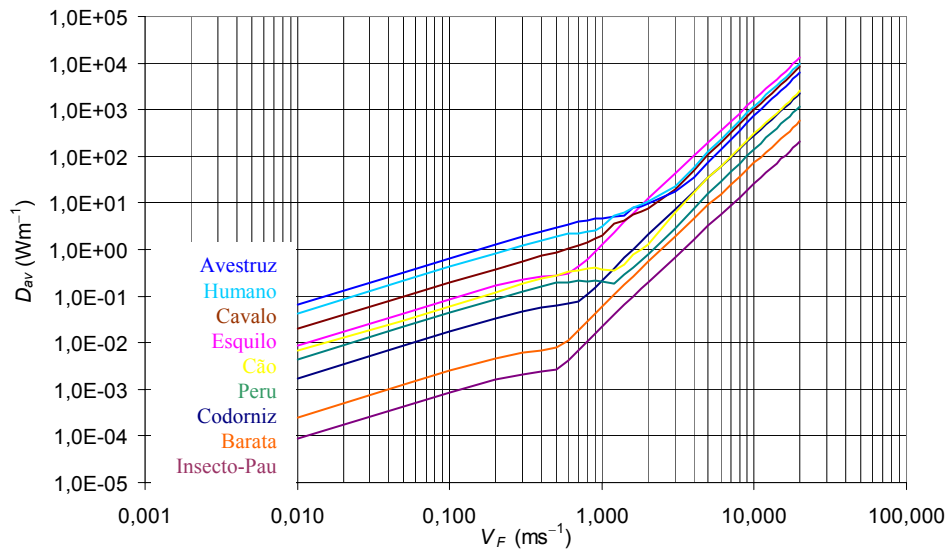


Figura 4.40: $\min[D_{av}(V_F)]$, para vários tipos de animais, com $F_C = 0,01$ m, PLO.

$$\frac{\dot{E}_{metabolica}}{M} = 10,7M^{-0,316}V_F + 6,03M^{-0,303} \quad (4.8)$$

sendo V_F a velocidade constante de deslocamento do animal e a taxa de consumo da energia metabólica durante a locomoção expressa em Watt (W).

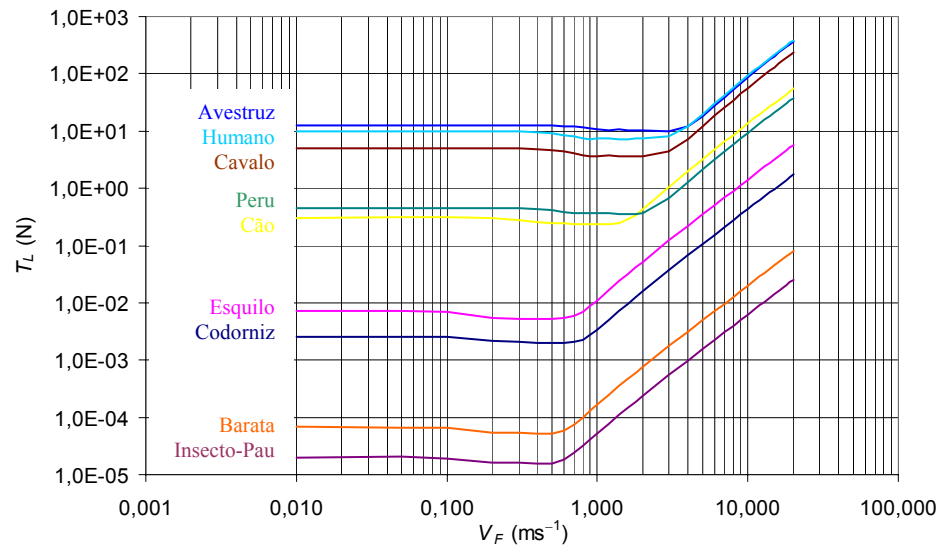


Figura 4.41: $\min[T_L(V_F)]$, para vários tipos de animais, com $F_C = 0,01$ m, PLO.

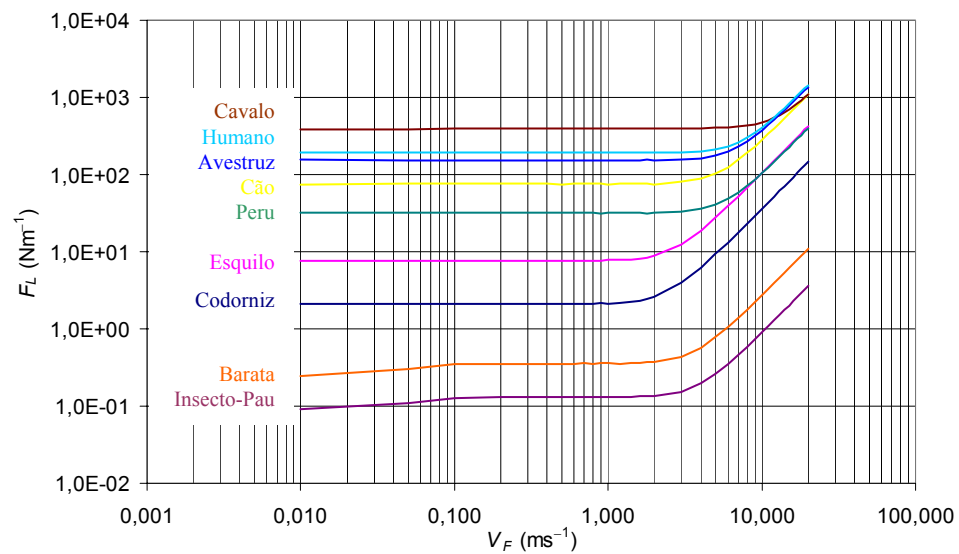


Figura 4.42: $\min[F_L(V_F)]$, para vários tipos de animais, com $F_C = 0,01$ m, PLO.

No caso de Fedak, *et al.* (1982), a equação alométrica que propõem relaciona a taxa de variação da energia cinética dos membros e corpo de um animal ($P_{KE,tot} = \dot{E}_{KE,tot}$) com a sua massa, de acordo com:

$$\frac{\dot{E}_{KE,tot}}{M} = 0,478V_F^{1,53} \quad (4.9)$$

Por último, Heglund, *et al.* (1982) relacionam a potência necessária para levantar e reacelerar o centro de massa do animal ($P_{CM,tot} = \dot{E}_{CM,tot}$) com a massa do seu corpo através da seguinte expressão:

$$\frac{\dot{E}_{CM,tot}}{M} = 0,685V_F + 0,072 \quad (4.10)$$

Verifica-se experimentalmente que estas equações são válidas para animais com características muito diferentes bem como numa gama de valores da sua massa corporal muito larga.

Os gráficos resultantes do cálculo destas expressões na gama de velocidades $0,01 < V_F < 20,0 \text{ ms}^{-1}$, para quatro valores da massa do animal ($M = \{0,1; 1,0; 10,0; 100,0\}$ kg) são apresentados nas Figuras 4.43 – 4.45, respectivamente para as equações (4.8), (4.9) e (4.10).

Comparando estes resultados com os da Figura 4.35 e das Figuras 4.39 – 4.42, verifica-se que a forma dos gráficos de E_{av} e T_L é semelhante à das curvas alométricas de Taylor, *et al.* (1982) e Heglund, *et al.* (1982), mas que os valores das assíntotas são diferentes.

4.3.1 Discussão dos Resultados Obtidos

De acordo com os resultados obtidos a partir do modelo de simulação, verifica-se que as curvas correspondentes a cada um dos animais, apresentadas nas Figuras 4.39 – 4.42 (para os diferentes índices considerados), são na maioria das situações paralelas entre si, não permitindo extrair conclusões gerais sobre a gama de velocidades a que cada animal apresenta um melhor desempenho.

Por outro lado, as curvas que representam as equações alométricas para diferentes massas do corpo dos animais (Figuras 4.43 – 4.45), são também paralelas entre si, dando a entender que os índices formulados retratam de forma fiel este aspecto da realidade.

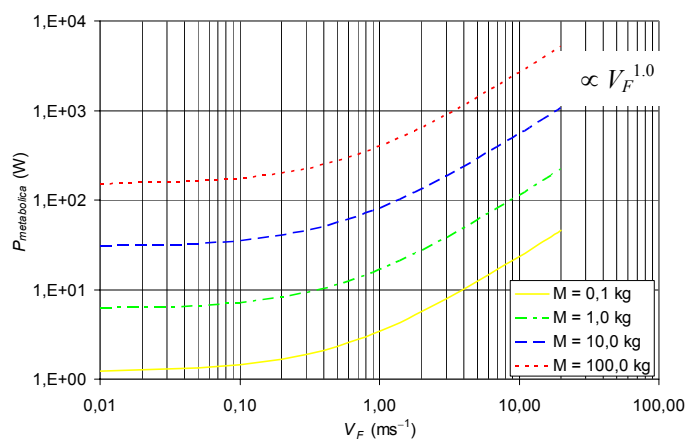


Figura 4.43: Gráfico que representa a equação alométrica de Taylor, *et al.* (1982).

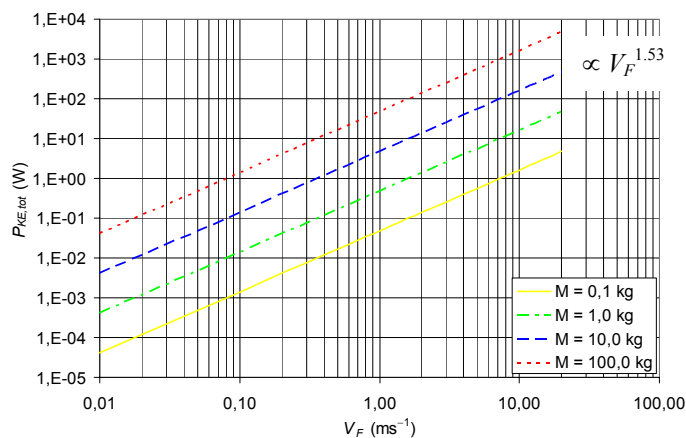


Figura 4.44: Gráfico que representa a equação alométrica de Fedak, *et al.* (1982).

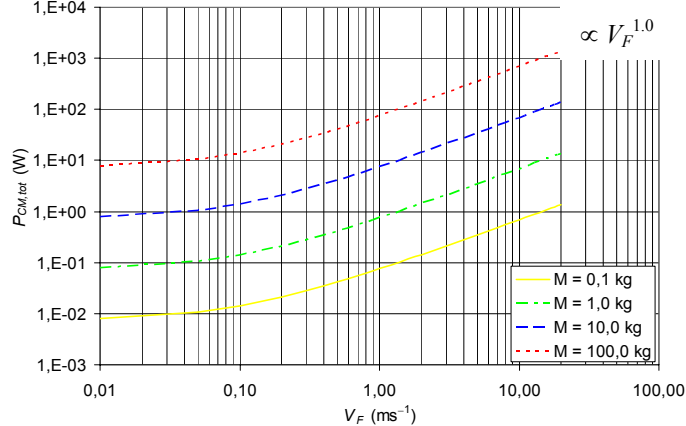


Figura 4.45: Gráfico que representa a equação alométrica de Heglund, *et al.* (1982).

A diferença entre as observações na natureza e os resultados obtidos com o modelo de simulação poderão ser explicados da seguinte forma. Para velocidades elevadas os animais passam dos padrões de locomoção de “andar” para os de “corrida”. A “corrida” permite alcançar velocidades mais elevadas do que o “andar”, e explora a dinâmica para negociar pegadas muito espaçadas (horizontal ou verticalmente). Durante a corrida uma máquina (ou um animal) exhibe períodos de voo durante os quais o contacto com o solo é completamente perdido. Geralmente, a corrida é um fenómeno dinâmico no qual as forças inerciais são significativas e o equilíbrio é alcançado através de meios activos, e não através do equilíbrio estático.

De facto, é reconhecido que durante a corrida existe um aumento do consumo energético para acelerar e desacelerar o centro de massa do corpo do animal, que se encontra ligado à fase balística do voo (Lapshin, 1995). No entanto, verifica-se que a principal parcela do consumo energético, para velocidades elevadas, prende-se com a manutenção do movimento oscilatório das pernas. Os animais reduzem esta parcela do consumo de energia passando a modos dinâmicos de locomoção e à corrida, o que lhes permite aumentar a duração relativa da fase de transferência da perna (diminuindo o valor do factor de ocupação β). Adicionalmente os animais usam as propriedades elásticas dos músculos e dos tendões para recuperação de energia durante a locomoção. Os efeitos elásticos são normalmente significativos e podem ser explorados para o armazenamento cíclico de energia; isto é sabido ocorrer e contribuir para melhorar o desempenho nos sistemas biológicos. Estes efeitos não estão considerados no modelo apresentado.

Para além do acabado de expor, as diferenças obtidas entre os desempenhos dos seres vivos e das simulações com o modelo, podem dever-se a um grande número de factores. Desde logo, um factor que parece ser mais provável encontra-se relacionado com o facto de o modelo que se utilizou não entrar em linha de conta com todos os efeitos presentes na locomoção dos seres biológicos. Entre eles podem referir-se os seguintes:

- os actuadores das juntas, supostos rotacionais no nosso modelo, são diferentes dos existentes nos seres vivos, que são lineares resultantes da combinação de músculos e tendões;

- nos animais, particularmente a velocidades médias e elevadas, os músculos e os tendões comportam-se como sistemas mola-amortecedor em paralelo. Assim, têm a capacidade de armazenar energia potencial, resultante do impacto do pé com o solo, e transformar essa energia em energia cinética, que é devolvida imediatamente antes do pé abandonar o solo para iniciar a nova fase de transferência (Alexander, 1990);
- nos seres vivos, o centro de massa não se encontra no centro geométrico do corpo do animal mas sim, frequentemente, deslocado para a frente do centro geométrico (Kram, *et al.*, 1997);
- nos seres vivos, especialmente naqueles com mais de 4 pernas, as funções das pernas são claramente diferenciadas (as pernas do meio destinam-se a suportar o peso do corpo, as da frente a direccionar o animal e as de trás a empurrar o corpo) (Kram, *et al.*, 1997). Algumas experiências exploratórias realizadas, considerando que todas as pernas poderiam apresentar comprimentos dos elos e desvios face à anca diferentes, apontam no sentido de as pernas traseiras do hexápode permanecerem esticadas e com os pés deslocados para trás face à anca, ao contrário das pernas do meio e da frente (um pouco à semelhança do que se passa nalguns insectos).

4.4 Conclusões e Perspectivas de Trabalho Futuro

Neste capítulo foram comparados vários aspectos cinemáticos e dinâmicos de sistemas artificiais de locomoção multipernas exibindo padrões de locomoção periódicos. Através da simulação de diferentes condições de movimento, estimou-se a forma como o robô responde a uma diversidade de variáveis como sejam o padrão de locomoção, o factor de ocupação, a altura do corpo do robô ao solo, o comprimento do passo, a máxima altura a que o robô levanta o pé do solo, os comprimentos relativos dos elos das pernas do robô, o desvio horizontal entre a anca e o pé do robô quando este se encontra na sua posição mais elevada, a velocidade de locomoção, o número de pernas e as massas do corpo, das pernas e dos pés do robô.

Para analisar o desempenho cinemático do sistema de locomoção multipernas foram formuladas duas medidas quantitativas, nomeadamente a análise face a perturbações e a medida da locomobilidade. A análise face a perturbações tende a ser um método elegante, se

bem que exigente do ponto de vista computacional. As suas características aleatórias parecem ser particularmente adequadas para avaliar o papel das diferentes variáveis no processos de locomoção. Por outro lado, a medida da locomobilidade captura a amplificação geométrica entre as juntas das pernas e as trajectórias dos pés ou do corpo.

Ao nível das medidas de desempenho dinâmico, utilizaram-se quatro medidas quantitativas, a saber, a densidade de energia absoluta média durante a locomoção, a densidade de dispersão da potência média, a densidade de potência perdida nos actuadores das juntas e a força média na “interface” entre o corpo e as pernas, sendo todos estes índices avaliados ao longo do ciclo de locomoção

Através da análise dos resultados das simulações, foram tiradas diversas conclusões sobre o melhor conjunto de parâmetros do robô e da locomoção para diferentes condições de deslocamento. Comparando as experiências, concluiu-se também que os resultados obtidos através dos índices cinemáticos estão de acordo com aqueles obtidos através dos índices dinâmicos. Além disso, os resultados de diversas experiências de simulação efectuadas com o recurso ao modelo do sistema artificial de locomoção estão de acordo com resultados experimentais obtidos a partir do estudo da locomoção dos seres biológicos.

Apesar de a nossa atenção ter sido centrada na locomoção no plano sagital, recorrendo a padrões de locomoção periódicos, certos aspectos da locomoção não são necessariamente capturados pelos índices propostos.

Assim, no próximo capítulo são abordados os efeitos da interacção entre os pés do robô e o solo e incorpora-se no modelo de simulação um módulo que descreve as características do solo. As forças de contacto e de reacção nos pés do robô vão permitir obter indicações adicionais sobre o comportamento de sistemas artificiais de locomoção quadrúpedes e hexápodes.

Posteriormente, no Capítulo 6 são apresentados resultados de experiências efectuadas para diferentes padrões de locomoção periódicos frequentemente adoptados pelos seres biológicos na natureza considerando os efeitos da interacção entre os pés do robô e o solo.

Para além disto, no Capítulo 6 são introduzidas melhorias no modelo de simulação, de forma a permitir incorporar neste terrenos mais irregulares, onde os sistemas de locomoção

por pernas devem vir a entrar na realidade. Para esses terrenos são apresentados novos conceitos para o planeamento de trajectórias e estratégias de ultrapassagem de obstáculos, sendo também aí efectuada a análise do desempenho dos veículos com locomoção por pernas quando recorrem a estes padrões de locomoção quase periódicos.

Como matérias cujo estudo e investigação merecem um aprofundamento adicional, deixam-se aqui as seguintes perspectivas de trabalho futuro:

- avaliar o desempenho dos robôs no caso de as trajectórias planeadas das ancas não serem horizontais e efectuadas a velocidade constante, como considerado neste trabalho. Assim, as ancas poderão exhibir uma certa oscilação como se verifica nos sistemas biológicos, uma vez que, de acordo com Alexander (1984), a maioria dos animais com locomoção por pernas optimiza a eficiência energética em detrimento da suavidade do movimento;
- prosseguir a análise do desempenho dos sistemas artificiais de locomoção no caso dos pares de pernas (da frente, do meio e de trás) do hexápode possuírem diferentes dimensões e diferentes desvios entre o pé e a anca do robô, tal como se verifica nos animais e, muito em particular, nos insectos (Kram, *et al.*, 1997);
- estudar o desempenho dos robôs no caso de as trajectórias das juntas não serem calculadas a partir da cinemática inversa, tendo por base as trajectórias pretendidas para as ancas e para as pernas dos robôs, mas alternativamente serem determinadas por geradores centrais de padrões, uma vez que neste caso o conteúdo harmónico das trajectórias nas juntas será menor;
- avaliar o desempenho dos robôs no caso de o sistema de accionamento das pernas dispor de mecanismos que permitam o armazenamento de energia durante o impacto do pé com o solo e a sua restituição pouco antes de a perna iniciar a fase de transferência (Hyon e Mita, 2002; Fukuoka, *et al.*, 2003; Palmer, *et al.*, 2003; Zhang, *et al.*, 2003);
- analisar o desempenho dos robôs no caso de os actuadores não serem supostos rotacionais, mas sim lineares, e os modelos desenvolvidos recorrerem a conjuntos de dois actuadores por junta, com efeitos agonista-antagonista, como se verifica com o comportamento dos músculos ao accionarem as juntas dos sistemas biológicos;

- relativamente à situação anterior testar ainda o desempenho dos modelos no caso dos actuadores lineares apresentarem comportamentos similares aos dos músculos artificiais, como sejam actuadores musculares pneumáticos (baseados nos músculos de McKibben) (Tsagarakis e Caldwell, 2000), actuadores com efeito de forma memorizada ou polímeros artificiais ou ainda músculos naturais (Winters e Stark, 1987), para os quais também já existem certos modelos (Makssoud, *et al.*, 2004).

Referências

- ALEXANDER, R. McN.. (1984). “The Gaits of Bipedal and Quadrupedal Animals”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 3; No. 2; pp. 49 – 59.
- ALEXANDER, R. McN.. (1990). “Three Uses for Springs in Legged Locomotion”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 9; No. 2; pp. 53 – 61.
- BRISKIN, E. S.; CHERNYSHEV, V. V.; MALOLETOV, A. V.. (2003). “On Conception of Walking Machines Designing”. In: *Proceedings of the ICAR 2003 – 11th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 1763 – 1768.
- CALDWELL, Darwin G.; MEDRANO-CERDA, G. A.; BOWLER, C. J.. (1997). “Investigation of Bipedal Robot Locomotion Using Pneumatic Muscle Actuators”. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 799 – 804.
- CAMPBELL, D.; BUEHLER, M.. (2003). “Stair Descent in the Simple Hexapod ‘RHex’”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1380 – 1385.
- CHAM, Jorge G.; BAILEY, Sean A.; CLARK, Jonathan E.; FULL, Robert J.; CUTKOSKY, Mark R.. (2002). “Fast and Robust: Hexapedal Robots via Shape Deposition Manufacturing”. *International Journal of Robotics Research*. Vol. 21; No. 10 – 11; pp. 869 – 882.
- ENDO, Ken; YAMASAKI, Fuminori; MAENO, Takashi; KITANO, Hiroaki. (2002a). “A Method for Co-Evolving Morphology and Walking Pattern of Biped Humanoid Robot”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2775 – 2780.
- ENDO, Ken; MAENO, Takashi; KITANO, Hiroaki. (2002b). “Co-Evolution of Morphology and Walking Pattern of Biped Humanoid Robot Using Evolutionary Computation – Consideration of Characteristic of the Servomotors”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2678 – 2683.
- ENDO, Ken; MAENO, Takashi; KITANO, Hiroaki. (2003). “Co-Evolution of Morphology and Walking Pattern of Biped Humanoid Robot Using Evolutionary Computation – Evolutionary Designing Method and its Evaluation”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 340 – 345.
- ENDO, Ken; MAENO, Takashi. (2003). “Co-Evolution of Morphology and Walking Pattern of Biped Humanoid Robot Using Evolutionary Computation – Designing the Real Robot”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1362 – 1367.

ESPIAU, Bernard; THE BIP TEAM. (1997). "BIP: A Joint Project for the Development of an Anthropomorphic Biped Robot". In: *Proceedings of ICAR '97 – 8th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 267 – 272.

ESPIAU, B.; SARDAIN, P.. (2000). "The Anthropomorphic Biped Robot BIP2000". In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3997 – 4002.

FARRITOR, Shane; DUBOWSKY, Steven; RUTMAN, Nathan; COLE, Jeffrey. (1996). "A Systems-Level Modular Design Approach to Field Robotics". In: *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2890 – 2895.

FEDAK, M. A.; HEGLUND, N. C.; TAYLOR, C. R.. (1982). "Energetics and Mechanics of Terrestrial Locomotion: II. Kinetic Energy Changes of the Limbs and Body as a Function of Speed and Body Size in Birds and Mammals". *Journal of Experimental Biology*. Vol. 79; pp. 23 – 40.

FUKUOKA, Y.; KIMURA, H.; HADA, Y.; TAKASE, K.. (2003). "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot 'Tekken' on Irregular Terrain Using a Neural System Model". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2037 – 2042.

GABRIELLI, G.; VON KÁRMÁN, TH.. (1950). "What Price Speed? Specific Power Required for Propulsion of Vehicles". *Mechanical Engineering*. pp. 775 – 781.

GENTA, G.; AMATI, N.. (2001). "Planar Motion Hexapod Walking Machines – A New Configuration". In: *Proceedings CLAWAR '2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 619 – 626.

GRAVEZ, F.; MOHAMED, B.; OUEZDOU, F. B.. (2002). "Dynamic Simulation of a Humanoid Robot With Four DOFs Torso". In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 511 – 516.

GREGORIO, Pedro; AHMADI, Mojtaba; BUEHLER, Martin. (1997). "Design, Control, and Energetics of an Electrically Actuated Legged Robot". *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part B: Cybernetics*. Vol. 27; No. 4; pp. 626 – 634.

HABUMUREMYI, J.-C.; DOROFTEI, I.. (2001). "Mechanical Design and MANFIS Control of a Leg for a New Demining Walking Robot". In: *Proceedings CLAWAR '2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 457 – 464.

HEGLUND, N. C.; CAVAGNA, G. A.; TAYLOR, C. R.. (1982). "Energetics and Mechanics of Terrestrial Locomotion: III. Energy Changes of the Centre of Mass as a Function of Speed and Body Size in Birds and Mammals". *Journal of Experimental Biology*. Vol. 79; pp. 41 – 56.

HIRAI, Kazuo; HIROSE, Masato; HAIKAWA, Yuji; TAKENAKA, Toru. (1998). "The Development of Honda Humanoid Robot". In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1321 – 1326.

- HIROSE, Shigeo; YONEDA, Kan; TSUKAGOSHI, Hideyuki. (1997). “TITAN VII: Quadruped Walking and Manipulating Robot on a Steep Slope”. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 494 – 500.
- HIROSE, Shigeo; ARIKAWA, Keisuke. (2000). “Coupled and Decoupled Actuation of Robotic Mechanisms”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 33 – 39.
- HYON, S. H.; MITA, T.. (2002). “Development of a Biologically Inspired Hopping Robot – “Kenken””; In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3984 – 3991.
- ISHIGURO, Akio; KAWASUMI, Kenta; FUJII, Akinobu. (2002). “Increasing Evolvability of a Locomotion Controller Using a Passive-Dynamic-Walking Embodiment. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2581 – 2586.
- JUÁREZ-GUERRERO, J.; MUÑOZ-GUTIÉRREZ, S.; MAYOL CUEVAS, W. W.. (1998). “Design of a Walking Machine Structure Using Evolutionary Strategies”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*; pp. 1427 – 1432.
- KAJITA, Shuuji; NAGASAKI, Takashi; YOKOI, Kazuhito; KANEKO, Kenji; TANIE, Kazuo. (2002). “Running Pattern Generation for a Humanoid Robot”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2755 – 2761.
- KANG, Taehun; KIM, Hyungseok; SON, Taeyoung; CHOI, Hyoukryeol. (2003). “Design of Quadruped Walking and Climbing Robot”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 619 – 624.
- KIM, Sung-Hoon; OH, Jun-Ho; LEE, Ki-Hoon. (2000). “Design of 4 Joints 3 Links Biped Robot and its Gaits”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1155 – 1160.
- KOYACHI, Noriho; ADACHI, Hironori; NAKAMURA, Tatsuya; NAKANO, Eiji. (1991). “Stair-Climbing Control of Self-Contained Hexapod With Semi-Fixed Gait”. In: *Proceedings of ICAR’91 – Fifth International Conference on Advanced Robotics*; pp. 747 – 752.
- KOYACHI, Noriho; ARAI, Tatsuo; ADACHI, Hironori; MURAKAMI, Akira; KAWAI, Ken. (1997). “Mechanical Design of Hexapods With Integrated Limb Mechanism: MELMANTIS-1 and MELMANTIS-2”. In: *Proceedings of ICAR’97 – 8th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 273 – 278.
- KRAM, R.; WONG, B.; FULL, R. J.. (1997). “Three-Dimensional Kinematics and Limb Kinetic Energy of Running Cockroaches”. *The Journal of Experimental Biology*. Vol. 200; pp.1919 – 1929.

LAKSANACHAROEN, Sathaporn; POLLACK, Alan J.; NELSON, Gabriel M.; QUINN, Roger D.; RITZMANN, Roy E.. (2000). "Biomechanics and Simulation of Cricket for Microrobot Design". In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1088 – 1094.

LAPSHIN, V. V.. (1995). "Energy Consumption of a Walking Machine. Model Estimations and Optimization". In: *Proceedings of ICAR '95 – Seventh International Conference on Advanced Robotics*; pp. 420 – 425.

LASA, Martin de; BUEHLER, Martin. (2001). "Dynamic Compliant Quadruped Walking". In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3153 – 3158.

LEGER, Chris. (2000) *DARWIN2K – An Evolutionary Approach to Automated Design for Robotics*. Kluwer Academic Publishers.

LINDE, Richard Quint van der. (1998). "Active Leg Compliance for Passive Walking". In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2339 – 2344.

LIPSON, H.; POLLACK, J. B.. (2000). "Towards Continuously Reconfigurable Self-Designing Robots". In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1761 – 1766.

LIU, A.; HOWARD, D.. (2003). "The Geometric Design of Crab-Like CLAWAR Machines with Good Workspace Characteristics". In: *Proceedings CLAWAR '2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 275 – 282.

LOHMEIER, Sebastian; LÖFFLER, Klaus; GIENGER, Michael; ULBRICH, Heinz; PFEIFFER, Friedrich. (2004). "Computer System and Control of Biped "Johnnie"". In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 4222 – 4227.

MAKSSOUD, Hassan El; GUIRAUD, David; POIGNET, Philippe. (2004). "Mathematical Muscle Model for Functional Electrical Stimulation Control Strategies". In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1282 – 1287.

MARHEFKA, Duane W.; ORIN, David E.. (1997). "Gait Planning for Energy Efficiency in Walking Machines". In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 474 – 480.

MARHEFKA, Duane W.; ORIN, David E.. (1998). "Quadratic Optimization of Force Distribution in Walking Machines". In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 477 – 483.

MOORE, E. Z.; CAMPBELL, D.; GRIMMINGER, F.; BUEHLER, M. (2002). "Reliable Stair Climbing in the Simple Hexapod 'RHex'". In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2222 – 2227.

-
- NEUHAUS, Peter; KAZEROONI, H.. (2000). “Design and Control of Human Assisted Walking Robot”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 563 – 569.
- PALMER, Luther R.; ORIN, David E.; MARHEFKA, Duane W.; SCHMIEDLER, James P.; WALDRON, Kenneth J.. (2003). “Intelligent Control of an Experimental Articulated Leg for a Galloping Machine”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3821 – 3827.
- PEDROCHE, T. A. Guardabrazo; RUIZ, M. A. Jimenez; SANTOS, P. Gonzalez de. (2003). “A Detailed Power Consumption Model for Walking Robots”. In: *Proceedings CLAWAR 2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 235 – 242.
- PFEIFFER, F.; ELTZE, J.; WEIDEMANN, H.-J.. (1995). “The TUM-Walking Machine”. *Intelligent Automation and Soft Computing*. Vol. 1; No. 3; pp. 307 – 323.
- RABY, Eric Y.; ORIN, David E.. (1999). “Passive Walking With Leg Compliance for Energy Efficient Multilegged Vehicles”. In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1702 – 1707.
- SARANLI, Uluç; BUEHLER, Martin; KODITSCHKEK, Daniel E.. (2001). “RHex – A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 20; No. 7; pp. 616 – 631.
- SENTA, Y.; EMURA, T.; NOGUCHI, Y.; HIRAKI, M.; ARAKAWA, A.. (1995). “Trotting Gait of a Quadruped Robot Using Parallel Crank-Slider Mechanism”. In: *Proceedings of ICAR '95 – Seventh International Conference on Advanced Robotics*; pp. 406 – 411.
- SHOVAL, Shraga; RIMON, Elon; SHAPIRO, Amir. (1999). “Design of a Spider-Like Robot for Motion With Quasistatic Force Constraints”. In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1377 – 1383.
- TAKEUCHI, Hiroki. (1999). “Development of “MEL HORSE””. In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1057 – 1062.
- TAYLOR, C. R.; HEGLUND, N. C.; MALOIJ, G. M. O.. (1982). “Energetics and Mechanics of Terrestrial Locomotion: I. Metabolic Energy Consumption as a Function of Speed and Body Size in Birds and Mammals”. *Journal of Experimental Biology*. Vol. 79; pp. 1 – 21.
- TSAGARAKIS, N.; CALDWELL, Darwin G.. (2000). “Improved Modelling and Assessment of Pneumatic Muscle Actuators”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3641 – 3646.
- WINTER, David A.. (1990). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. John Wiley & Sons.

WINTERS, J. M.; STARK, L.. (1987). "Muscle Models: What Is Gained and What Is Lost by Varying Model Complexity". *Biological Cybernetics*. Vol. 55; pp. 403 – 420.

WITTE, H.; HACKERT, R.; FISCHER, M. S.; ILG, W.; ALBIEZ, J.; DILLMANN, R.; SEYFARTH, A.. (2001a). "Design Criteria for the Leg of a Walking Machine Derived by Biological Inspiration from Quadrupedal Mammals". In: *Proceedings CLAWAR'2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 63 – 68.

WITTE, Hartmut; HACKERT, Rémi; LILJE, Karin E.; SCHILLING, Nadja; VOGES, Danja; KLAUER, Gertrud; ILG, Winfried; ALBIEZ, Jan; SEYFARTH, André; GERMANN, Daniel; HILLER, Manfred; DILLMANN, Rüdiger; FISCHER, Martin S.. (2001b). "Transfer of Biological Principles into the Construction of Quadruped Walking Machines". In: *Proceedings of the Second International Workshop on Robot Motion and Control*; pp. 245 – 249.

WOLLHERR, Dirk; HARDT, Michael; BUSS, Martin; STRYK, Oscar von. (2002). "Actuator Selection and Hardware Realization of a Small and Fast-Moving, Autonomous Humanoid Robot". In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2491 – 2496.

YAMAGUCHI, Jin'ichi; TAKANISHI, Atsuo. (1998). "Development of a Leg Part of a Humanoid Robot – Design of a Biped Walking Robot Having Antagonistic Driven Joints Using a Nonlinear Spring Mechanism". *Advanced Robotics*. Vol. 11; No. 6; pp. 633 – 652.

YOSHIKAWA, Tsuneo. (1990). *Foundations of Robotics – Analysis and Control*. The MIT Press.

ZHANG, Z. G.; FUKUOKA, Y.; KIMURA, H.. (2003). "Adaptive Running of a Quadruped Robot on Irregular Terrain Based on Biological Concepts". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2043 – 2048.

ZHOGA, V. V.. (1998). "Computation of Walking Robots Movement Energy Expenditure". In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 163 – 168.

ZIELIŃSKA, Teresa. (2000). "Efficiency Analysis in the Design of Walking Machines". *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. Vol. 38; No. 3; pp. 693 – 705.

ZIELIŃSKA, T.; CHOONG, K. C.; HENG, J.. (2001). "Actuating System of Six-Legged Walking Machine". In: *Proceedings CLAWAR'2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 611 – 618.

Capítulo 5

Arquitecturas e Algoritmos de Controlo para Robôs Multipernas

Os requisitos para a coordenação e controlo das pernas de sistemas artificiais de locomoção impõem dificuldades para além das encontradas nos robôs com rodas, uma vez que os objectivos a alcançar com o controlo de um robô de locomoção multipernas são múltiplos. De entre eles, destacam-se o controlo da altura da trajectória do corpo (das ancas), a manutenção da estabilidade postural do corpo, a estabilização da velocidade de progressão do sistema, a adequada colocação da perna livre no local adequado e a passagem de suporte entre as pernas.

Nos animais que se deslocam utilizando pernas estes problemas encontram-se perfeitamente resolvidos. A sua capacidade de preservar ou ajustar o seu ciclo natural de locomoção a vários tipos de superfície e a várias condições de carga deverá ser o objectivo último para um sistema de controlo de um sistema artificial de locomoção que seja robusto e perfeito.

Assim, o sistema de controlo utilizado deverá ser suficientemente robusto para tratar das não linearidades, eliminar as perturbações devidas a vários factores externos e alcançar um controlo aceitável na presença de erros de modelação. Deverá também assegurar a regulação do movimento em condições de estabilidade e eficiência energética.

Posto isto, neste capítulo abordam-se inicialmente duas arquitecturas diferentes para o controlo das juntas das pernas de sistemas artificiais de locomoção. A segunda destas arquitecturas difere da primeira por incluir uma malha de realimentação da força de reacção do solo sobre o pé que se encontra na fase de suporte. O fulcro destas arquitecturas de controlo é um algoritmo proporcional e derivativo. De seguida é analisada a influência da utilização de um algoritmo de ordem não inteira sobre a locomoção do robô.

Por fim, aplicam-se as arquitecturas e algoritmos de controlo estudados a um hexápode, com pernas com três gdl, e estuda-se a aplicabilidade destas soluções para robôs com esta estrutura das pernas.

Tendo presente estes factos, este capítulo encontra-se organizado da seguinte forma. A secção um apresenta uma introdução às metodologias utilizadas para o controlo de sistemas artificiais de locomoção. Na secção dois apresenta-se o estudo do desempenho das arquitecturas de controlo, com e sem realimentação da força de contacto pé-solo, com a variação de diferentes parâmetros de locomoção e para diferentes características do solo. De seguida, na secção três, estende-se o estudo da arquitectura de controlo com realimentação da força do pé a algoritmos de controlo de ordem não inteira. Segue-se, na secção quatro, o estudo do desempenho desta arquitectura de controlo quando aplicada a robôs com três gdl por perna. Por último, na secção cinco apresentam-se as principais conclusões retiradas dos estudos desenvolvidos neste capítulo e algumas perspectivas para trabalho futuro na área do controlo de sistemas robóticos de locomoção.

5.1 Controlo de Sistemas Robóticos de Locomoção

A arquitectura de controlo de robôs com pernas é frequentemente hierárquica, apresentando os seguintes níveis:

- navegação e planeamento, a um nível superior;
- controlo do padrão de locomoção, ao nível intermédio;
- controlo da trajectória da perna, no nível inferior.

O nível superior não é significativamente diferente do que é observado nos robôs com rodas. O nível intermédio coordena o movimento das pernas e, com esta finalidade, podem ser utilizadas três estratégias diferentes (Alexandre e Preumont, 1996):

- supervisão central com regras fixas (por exemplo, padrões de locomoção regulares);
- coordenação das pernas baseada em sinais de controlo trocados entre as pernas, duplicando os comportamentos observados nos insectos, por vezes denominada de coordenação neurobiológica (Chiel, *et al.*, 1992; Cruse, *et al.*, 1995; Ferrell, 1995; Pfeiffer, *et al.*, 1995; Flannigan, *et al.*, 1998; Nelson e Quinn, 1999; Cruse, *et al.*, 2001; Arena e Fortuna, 2002);
- controlo baseado em regras dentro de um conjunto finito de estados das pernas (padrões de locomoção livres). Para além da sua grande flexibilidade no que concerne a mudanças de direcção da locomoção, os padrões de locomoção livres também podem suportar a locomoção com pernas danificadas.

Algumas das soluções existentes para implementar o nível superior e intermédio serão abordadas com maior detalhe no capítulo seguinte, dedicado ao estudo dos padrões de locomoção periódicos e quase-periódicos de robôs com pernas.

O controlo da trajectória da perna e dos motores das juntas, implementado a um nível inferior, pode tipicamente ser distribuído ao nível da perna (arquitectura de controlo descentralizada), mas é necessário alguma ligação ao nível intermédio para suportar, por exemplo, informação táctil (de forma a evitar obstáculos) e para o controlo da inclinação (ou postura) do robô. Este será o nível abordado neste capítulo.

Para efectuar o controlo das trajectória das pernas existem duas aproximações situadas em extremos do espectro. Por um lado existem os sistemas de locomoção passivos, sem actuação e sem controlo, cuja locomoção é explicada do ponto de vista mecânico. No outro extremo do espectro encontram-se as aproximações que realçam os aspectos do controlo e da actuação. Nestes casos, o ciclo de locomoção é normalmente alcançado através do planeamento das trajectórias pretendidas para as juntas e controlando o movimento do sistema robótico ao longo dessas trajectórias.

Nesta ordem de ideias, de seguida descrevem-se algumas das diferentes abordagens que têm vindo a ser adoptadas para o controlo das trajectórias da pernas (nível inferior). É de realçar, porém, que algumas delas encontram-se relacionadas com as do nível intermédio.

5.1.1 Locomoção Passiva

Poder-se-á afirmar que a forma mais simples de controlo, é a ausência de controlo. Existe uma classe de sistemas artificiais de locomoção para os quais a locomoção é um modo dinâmico natural. Uma vez colocada num plano inclinado e iniciada a sua locomoção, uma máquina deste tipo vai estabelecer um padrão de locomoção estável, sem necessitar de controlo activo ou fornecimento de energia, deslocando-se unicamente pela força da gravidade.

Para estes sistemas de locomoção, ditos passivos, a interpretação e análise física da locomoção são directas, sendo facilmente calculados o seu ciclo de locomoção, a sua estabilidade e a sua sensibilidade a variações dos parâmetros. A essência destes trabalhos está no desenvolvimento de modelos mecânicos que realçam a interacção entre a gravidade, a inércia e os impactos em planos inclinados, minimizando o papel do controlo e da actuação.

Fruto das vantagens que estes sistemas de locomoção apresentam, tais como o reduzido, ou mesmo nulo, consumo de energia, o facto de serem mecanicamente simples e apresentarem um peso reduzido (uma vez que não são actuados) e, por último, exibirem uma locomoção “natural”, têm vindo a ser extensivamente estudados. Este estudo tem incidido fortemente nos sistemas bípedes (McGeer, 1990; Garcia, *et al.*, 1998; Goswami, *et al.*, 1998; Howell e Baillieul, 1998) havendo também estudos sobre a locomoção passiva de sistemas quadrúpedes (McGeer, 1990; Smith e Berkemeier, 1997) e octópodes (Osuka e Kirihara, 2000).

No entanto, as capacidades dos robôs com locomoção puramente passiva, que se deslocam em planos inclinados sem necessitarem de actuação externa são bastante limitadas. Uma vez que o padrão de locomoção passivo é determinado pela frequência natural do sistema mecânico, e esta é determinada por uma correcta escolha da geometria e cinemática do robô, a mudança do ciclo limite só pode ser conseguida através da aplicação de uma força ou binário adicional ou através da alteração activa dos parâmetros intrínsecos do sistema (Linde, 1998). De acordo com este autor, o parâmetro intrínseco mais plausível de ser alterado é a

elasticidade das juntas. O seu ajuste activo possibilita adicionar ou retirar energia ao sistema, modificar a sua frequência natural e dar ao sistema protecção contra forças de perturbação de valor elevado (Linde, 1998).

Uma vez claramente compreendidos os modelos, pode ser introduzida uma pequena quantidade de energia no sistema para permitir a locomoção em superfícies planas. Pode também ser implementado algum algoritmo simples de controlo para aumentar a sua estabilidade. Assim, ultimamente tem-se evoluído no sentido de tentar controlar a locomoção em superfícies horizontais de robôs bípedes actuados impondo-se, para o efeito, binários nas suas juntas, tendo por base os princípios da locomoção passiva e os conceitos de campo gravítico virtual e de campo de velocidade passivo (Asano, *et al.*, 2002; Suzuki e Furuta, 2002; Yamasaki, *et al.*, 2002). Os estudos anteriores foram generalizados para o caso de sistemas tri-dimensionais (Spong e Bullo, 2002; Kinugasa, 2003; Tedrake, *et al.*, 2004).

5.1.2 Ausência de Controlo

Existem também autores que defendem que a locomoção pode ser efectuada sem a necessidade de controlo, mas de forma distinta da anterior. Neste caso, optam por controlo das juntas em malha aberta, sem a necessidade de realimentação.

Por exemplo, Ringrose (1997) afirma que os movimentos de corrida podem ser auto estabilizadores, ou seja, que o projecto adequado da estrutura e do movimento podem fazer com que o robô automaticamente recupere de pequenas perturbações, mesmo que não as consiga detectar. Este autor apresenta resultados que comprovam que os robôs monopés, bípedes e quadrúpedes podem correr sem necessidade de realimentação (sem sensorização) e sem controlo. Para tal, basta controlar de forma correcta e em malha aberta os actuadores dos robôs. Estes tendem a anular todas as pequenas perturbações que surjam ao longo do seu ciclo de locomoção.

Mombaur, *et al.* (2001) apresentam um robô bípede, controlado em malha aberta, e que dispõe de dois gdl rotacionais actuados por perna. Este robô é capaz de se deslocar em terrenos planos, de uma forma similar à locomoção humana, actuado nas juntas da anca e do joelho. Para que isto seja possível os parâmetros do robô e os binários aplicados às juntas (periódicos) são optimizados, de acordo com uma estratégia em dois passos descrita por estes

autores, de forma a se atingir uma solução óptima que permita a locomoção em malha aberta. Este sistema é robusto a pequenas perturbações das suas trajectórias sem necessitar de tomar quaisquer medidas para as eliminar.

Posteriormente, Mombaur, *et al.* (2002) aplicaram estas mesmas ideias a um robô saltitante monopé. Este sistema é dinamicamente estável, sem necessitar de realimentação para o controlo e sem necessitar de um pé circular (recorre a um pé pontual) ao contrário do robô de Ringrose (1997). No entanto, por este motivo, o robô, apesar de ser dinamicamente estável, não apresenta uma posição estaticamente estável de descanso.

5.1.3 Controlo de Posição / Velocidade

Apesar da diversidade de aproximações existentes para a geração e controlo do padrão de locomoção, o controlo ao nível da junta dos robôs com pernas é geralmente implementado através de um simples algoritmo do tipo PID aplicado ao controlo das trajectórias de referência das juntas e com realimentação de posição ou de posição e velocidade. Esta aproximação tem sido utilizada no controlo das juntas das pernas de diversos robôs bípedes (Huang, *et al.*, 2000; Minor, *et al.*, 2000; Zhao, *et al.*, 2002), quadrúpedes (Papadopoulos e Buehler, 2000; Zonfrilli, *et al.*, 2002; Conte, *et al.*, 2003; Zhifeng, *et al.*, 2003) e hexápodes (Chiel, *et al.*, 1992; Pfeiffer, *et al.*, 1995).

Para a mesma aplicação, têm sido também extensivamente utilizados os algoritmos de controlo PD. Entre os diversos exemplos da sua adopção, podem-se referir a sua aplicação a robôs bípedes (Gravez, *et al.*, 2002; Guihard e Gorce, 2002; Kajita, *et al.*, 2002; Wollherr, *et al.*, 2002) e quadrúpedes (Marhefka e Orin, 2000; Saranlı, *et al.*, 2001; Fukuoka, *et al.*, 2003; Kang, *et al.*, 2003). Já Yi (1997) recorre a um controlador PI para controlar os ângulos das juntas de um robô bípede. Por último, Kanehiro, *et al.* (1999) propõem controlar as juntas de um robô bípede, em que os actuadores são servomotores, através de um controlador proporcional em série com um limitador de binário imposto aos actuadores.

Por outro lado, Lee *et al.* (1998) modelizam um robô quadrúpede e assumem que os binários de controlo determinados pelo método do binário calculado são aplicados às juntas das pernas. O ganho derivativo é obtido de forma que se consiga alcançar um amortecimento crítico.

Por último, Park e Kim (1998) recorrem a um controlador híbrido, baseado no método do binário calculado, para controlar as juntas das pernas de um robô bípede. O controlador aplica uma lei baseada no método do binário calculado distinta, consoante a perna do robô se encontra na fase de suporte ou na fase de transferência. Durante a fase de transferência o binário de entrada a ser aplicado às juntas é calculado tendo por base o erro de seguimento das trajectórias das juntas, enquanto que durante a fase de suporte o binário de entrada a ser aplicado às juntas da perna do robô é calculado tendo por base o erro cartesiano da trajectória do pé que se encontra na fase de suporte.

5.1.4 Controlo de Força e Controlo Híbrido de Posição / Força

Verifica-se que a perna de um robô que seja controlada unicamente em posição poderá mover-se no ar, sem exercer quaisquer forças sobre o corpo do robô que ajudem a suportá-lo, ou exercer uma força excessiva relativamente às outras pernas que se encontram em contacto com o solo, isto no caso da locomoção em terrenos irregulares.

Zielinska (2001) aborda estes problemas que se colocam durante a locomoção de um robô multipernas, e que são ultrapassados recorrendo a controlo de força. Afirma que o controlo de força é necessário para aumentar a capacidade dos robôs com pernas se adaptarem a terrenos irregulares e a diferentes tipos de solos, uma vez que:

- na locomoção em terrenos complexos, pode surgir a necessidade de controlar as componentes horizontais das forças de contacto, de forma a que estas permaneçam dentro dos cones de atrito;
- a correcta distribuição das forças pelas pernas do robô leva à minimização da possibilidade de escorregamento dos pés;
- na locomoção sobre terrenos moles, torna-se necessário controlar as cargas que as pernas efectuam sobre o solo devido à sua penetração no solo;
- permite introduzir complacência activa, possibilitando uma distribuição de forças de reacção óptima entre as várias pernas e compensar o afundamento diferente entre elas quando o robô se desloca em solo mole;

- permite evitar obstáculos locais através da implementação de acções reflexivas ou seguimento de contornos (por exemplo, ao subir de forma autónoma escadas).

Para ultrapassar alguns destes problemas, Alexandre, *et al.* (1996) recorrem a realimentação de força no controlo do robô hexápode Silex, possibilitando a implementação de complacência activa neste veículo.

Nelson e Quinn (1999) sugerem e demonstram no robô CWRU Rob III um algoritmo para controlar a postura de um robô hexápode com múltiplos gdl redundantes. O algoritmo apresentado por estes autores evita o cálculo da cinemática inversa através da geração de comandos de força em avanço¹ para manter quer a postura estática, quer para gerar o movimento do corpo. Ao fazer isto, também provam que o conjunto de pernas que controla a postura pode ser reduzido a uma simples representação de centro-de-pressão, ou de forma equivalente, a um modelo instantâneo de perna virtual.

Uma aproximação que tem sido seguida por vários autores considera a utilização de controlo híbrido nas pernas dos robôs. Esta arquitectura permite, segundo os autores, suprimir localmente as perturbações introduzidas pelas irregularidades desconhecidas no terreno.

Tsai, *et al.* (1997) recorrem a um controlador híbrido de posição e força para controlar os actuadores das pernas de um robô quadrúpede. Este controlador efectua o controlo PID de posição enquanto a perna se encontra na fase de transferência e comuta para controlo de força quando a perna está na fase de suporte. O controlo da força exercida pelo pé, durante o contacto com solo, é baseado em lógica difusa. Para efectuarem a correcta distribuição da força, pelos vários pés do robô que se encontram a suportar o corpo, recorrem a uma estrutura de redes neuronais (Tsai e Lee, 1998).

Song, *et al.* (1999) descrevem um controlador híbrido de posição / força para controlar os actuadores das pernas de sistemas artificiais de locomoção. Porém, a arquitectura de controlo proposta possui uma malha directa com a dinâmica directa do sistema, de forma a implementarem de certa forma controlo em avanço. Uma aproximação similar a esta foi aplicada no controlo de um robô hexápode aplicado a tarefas de desminagem (Uchida, *et al.*, 2000).

¹ Tradução do termo anglo-saxónico *feedforward*.

Palis, *et al.* (2001) apresentam o controlo de força / impedância de um robô hexápode de forma a estabelecer o contacto dos pés do robô com o solo sem quaisquer oscilações, mantendo uma força de contacto pré-determinada. A arquitectura de controlo utilizada por estes autores consta de uma malha interna de controlo de posição, no espaço cartesiano, havendo depois uma outra malha externa que, em função da força de contacto, altera a referência de posição da malha interna de forma a que o robô adapte a sua posição cartesiana de contacto do pé com o solo. O comportamento desejado para a impedância durante o contacto do pé com o solo é estabelecido sintonizando o controlador de força / impedância recorrendo a lógica difusa. Por sua vez, o impacto com o ambiente e as características deste (em termos de rigidez e amortecimento) é detectado recorrendo a métodos de identificação baseados em redes neuronais.

Nonami e Huang (2001) recorrem a controlo híbrido neuronal de posição e de força para controlarem a locomoção de um robô afecto a tarefas de desminagem e que, portanto, tem a necessidade de se deslocar em terrenos irregulares. Esta arquitectura de controlo recorre a uma rede neuronal para aprender o binário que deve ser aplicado às juntas das pernas, em função do sinal de realimentação que vai recebendo.

Estas arquitecturas de controlo têm também vindo a ser aplicadas a robôs bípedes (Fujimoto, *et al.*, 1998; Silva, 2001).

5.1.5 Controladores de Estrutura Variável

O controlo de estrutura variável é uma das aproximações mais importantes para tratar sistemas com grandes incertezas, não linearidades e perturbações externas limitadas. Isto porque, nestes controladores não é necessária uma modelação exacta, uma vez que o controlo é baseado no conhecimento das incertezas ou limites de variação do modelo do sistema. Daí que também tem sido aplicado no controlo de sistemas artificiais de locomoção.

Martins-Filho, *et al.* (2003) afirmam que no controlo PD existem problemas de sintonia devido ao compromisso entre a sobreelongação e o erro em regime permanente. Estes problemas são ainda acentuados devido ao facto de não existir um ponto de operação específico em torno do qual efectuar a sintonia do controlador, uma vez que o ponto de operação é determinado, entre outros, pelo padrão de locomoção, velocidade do robô e

interacção entre o pé e o solo. Por outro lado, a implementação de controladores PD com ganhos não lineares variáveis tem uma implementação complexa nos microcontroladores geralmente utilizados para efectuar o controlo a baixo nível. Para ultrapassarem estas dificuldades estes autores recorrem ao controlo de estrutura variável para controlarem a posição das juntas das pernas de um robô quadrúpede e efectuam a comparação desta solução com a que recorre a algoritmos PD.

Durante a comparação das duas diferentes estratégias de controlo, os autores procuraram um compromisso no que concerne à estabilidade do sistema (ausência de oscilações nas pernas) e ao tempo de resposta. As experiências que efectuaram demonstraram que o controlo de estrutura variável permite uma maior robustez à variação de parâmetros e elimina o erro em regime permanente. Apresenta, no entanto, uma complexidade de implementação superior (uma vez que são necessários dados das várias variáveis de estado) e não elimina uma oscilação no binário, que apesar de não afectar o erro de posição, impõe um esforço adicional na estrutura mecânica da perna do robô.

Esta aproximação, recorrendo a controladores de estrutura variável, tem sido adoptada por outros autores no controlo de robôs com pernas. Por exemplo, Uchida e Nonami (2003) recorrem ao controlo de estrutura variável para efectuar o controlo da inclinação e da orientação do corpo de um robô hexápode afecto a tarefas de desminagem.

A utilização de esquemas de controlo de estrutura variável tem também sido utilizada no controlo de robôs bípedes (Ephanov e Hurmuzlu, 1997; Manamani, *et al.*, 1997; Plestan e Laghrouche, 2003).

5.1.6 Controlo com Recurso a Computação Inteligente

No mundo real, torna-se difícil a quem projecta os sistemas artificiais de locomoção prever as alterações no ambiente em os robôs vão ter que desempenhar as suas tarefas. Desta forma, os veículos com pernas, não têm geralmente nenhum conhecimento em avanço sobre o ambiente que os rodeia e também não sabem como completar as tarefas que lhes foram atribuídas. Assim, tem sido defendida a utilização de sistemas de controlo baseados em computação inteligente, como uma das possibilidades para que os robôs colocados em ambientes desconhecidos se possam auto-ajustar.

Habumuremyi e Doroftei (2001) propõem o recurso a um controlador que designam de MANFIS para as juntas de um robô hexápode aplicado a tarefas de desminagem. Este controlador MANFIS consta de uma combinação de redes neuronais e de lógica difusa (controlador ANFIS) aplicada a cada junta de cada perna do robô hexápode.

Conte, *et al.* (2003) recorrem a controladores PID para controlarem as juntas das ancas e dos joelhos das pernas do robô quadrúpede QUADRO. Implementam também, como parte da arquitectura deste robô, um nível de supervisão, em lógica difusa, que é responsável por alterar a sintonia de alguns destes controladores PID (os ganhos proporcionais dos controladores das juntas das ancas), em tempo real, em função das tarefas e do terreno em que o robô se movimenta e que implementa assim uma certa forma de adaptação às condições de trabalho variáveis. A acção deste nível de supervisão depende do erro de seguimento das trajectórias planeadas e da sua derivada, melhorando o desempenho dos controladores através da compensação dos problemas mecânicos que possam surgir e respondendo, dentro de certos limites, às não linearidades do sistema. Nas experiências que efectuaram ao funcionamento deste sistema, os autores reportam uma diminuição das oscilações do sistema e um aumento da precisão tendo como contrapartidas um aumento do peso computacional e do tempo de resposta do sistema.

5.1.7 Modelo de Controlo Virtual

O modelo de controlo virtual é uma “linguagem” para descrever comportamentos baseados em interacções de forças. Esta técnica de controlo recorre a simulações de componentes mecânicos virtuais para gerar binários (ou forças) reais nos actuadores. Estes binários das juntas provocam o mesmo efeito que os componentes virtuais provocariam, caso existissem, desta forma criando a ilusão que os componentes simulados se encontram ligados ao robô real. Estes componentes podem incluir, entre outros, molas, amortecedores e sistemas mola-amortecedor em paralelo.

Este modelo de controlo foi aplicado a robôs bípedes (Pratt, *et al.*, 1997) e a robôs hexápodes (Torres, 1996). Posteriormente foi melhorado com a inclusão de algoritmos de aprendizagem (baseado na aprendizagem por recompensa) para gerar os parâmetros de

locomoção adequados para a perna que se encontra na fase de transferência (Chew e Pratt, 2000).

5.1.8 Minimização do Impacto do Pé com o Solo

Verifica-se que, quando o pé (da perna que se encontra na fase de transferência) estabelece o contacto inicial com o solo, pode surgir uma força de impacto de valor relativamente elevado. Estas forças de impacto podem provocar danos no robô e no meio que o rodeia e podem levar os pés do robô a oscilar entre os estados de contacto / não contacto ou mesmo levar os robôs à instabilidade. Consta-se ainda que quanto maior a velocidade maiores são as forças, em particular na locomoção dinâmica, devido ao baixo valor de β . Os impactos com o solo são também bastante sentidos no caso do solo ser irregular. Berns, *et al.* (2001) afirmam que durante a locomoção dos robôs o contacto não previsto do pé com o solo ou com um obstáculo pode provocar uma perturbação séria do movimento ou mesmo danificar partes do mecanismo destas máquinas.

Este problema tem sido referido para a locomoção de robôs com várias topologias, inclusive para robôs bípedes passivos (Linde, 1998), e para os animais. Para a sua resolução têm sido propostas várias soluções, sejam baseadas em sistemas mecânicos passivos (algumas das quais descritas na subsecção 3.3.2), sejam baseadas no controlo activo dos actuadores das juntas.

De forma a controlar os impactos activamente, os robôs devem estar equipados com sensores, controladores e actuadores com elevada largura de banda e com actuadores de potência significativa. Exemplos desta aproximação são os casos do robô octópode K²T (Flannigan, *et al.*, 1998) e do robô humanóide SONY SDR (Ishida e Kuroki, 2004), que dispõem de sensores de força nos pés para determinar as forças de interacção pé-solo. No entanto, esta possível solução apresenta custos muito elevados.

Procurando inspiração na biologia, constata-se que os animais efectuem a absorção de parte do impacto recorrendo aos seus músculos e tendões que apresentam propriedades elásticas (Alexander, 1990). Todavia, na maioria dos robôs com pernas não existe a complacência dos músculos que os animais usam activamente para a locomoção (Seyfarth e Geyer, 2002).

Uma exceção a este panorama é apresentada por Berns, *et al.* (2001). Estes autores afirmam que mesmo que estejam implementados conceitos de controlo com complacência activa é muito difícil cobrir os problemas de impacto, especialmente no caso de movimentos rápidos. Daí que tenham adoptado na construção do robô hexápode Airbug actuadores musculares pneumáticos que já possuem de raiz complacência passiva.

Relativamente ao controlo do robô, e nomeadamente no que diz respeito à eliminação dos problemas provocados pelo impacto dos pés com o solo, diversos autores têm também proposto soluções inspiradas na biologia. Park e Chung (2000) afirmam que na locomoção humana típica, os músculos das pernas são repetidamente contraídos e relaxados, dependendo da fase em que se encontra o padrão de locomoção, resultando desta estratégia contactos com o solo muito suaves. Recorrendo à mesma ideia estes autores adoptaram, para um robô bípede, um controlo baseado no método do binário calculado para a perna que se encontra na fase de suporte e um controlo baseado na impedância para a perna que se encontra na fase de transferência, modulando os parâmetros do controlador de impedância em função da fase do ciclo de locomoção em que se encontra a perna controlada (aumentam o coeficiente de amortecimento na fase final da transferência da perna de forma a absorver a energia do impacto). Adicionalmente impõem referências de posição e de velocidade vertical nulas, após o instante inicial de contacto do pé com o solo ser detectado, independentemente da trajectória de referência do pé. Por último, recorrem ainda a solas de borracha nos pés do robô bípede que estão a controlar. Desta forma conseguem contactos estáveis e suaves com o solo.

Linde (1998) propõe a variação da rigidez e do amortecimento das juntas das pernas, num robô bípede passivo, de forma a ultrapassar este problema, bem como a oscilação na junta da anca, que se verifica devido à propagação de forças impulsivas que ocorrem com as colisões dos pés com o solo.

Ihme e Deutscher (2001) adoptam uma lei de controlo com complacência activa nas juntas das pernas de um sistema artificial de locomoção multipernas como forma de ultrapassar, entre outros, este problema.

Sung, *et al.* (2003) referem o problema dos impactos do pé com o solo no final da fase de transferência. Segundo estes autores, e de acordo com os estudos da biomecânica, os humanos adaptam a rigidez das suas pernas de acordo com as características do solo em que se

deslocam. Tendo por base esta ideia, eles implementam um robô saltitante, que recorre a uma estrutura com complacência passiva e activa, e demonstram que é possível diminuir o efeito das colisões dos pés com o solo através da redução da rigidez da estrutura.

Sugahara, *et al.* (2003) propõem a utilização de um sistema de controlo da complacência virtual, baseado em posição, de forma a reduzir as forças de contacto que surgem quando o pé de um robô bípede termina a fase de transferência. Este sistema de controlo permite a um robô bípede deslocar-se num terreno irregular, cujas características o robô desconhece, sem que as forças que surgem devido ao impacto do pé com o solo façam o robô desequilibrar-se.

5.2 Análise e Comparação de Arquitecturas de Controlo para um Robô Hexápode

Em termos genéricos a função de um controlador é gerar as acções correctoras que permitam realizar uma tarefa desejada de acordo com as especificações do projecto. No caso dos sistemas artificiais de locomoção algumas destas tarefas limitam-se ao movimento do robô no espaço livre, enquanto outras requerem a interacção deste com o ambiente. Assim, a concretização da locomoção de forma eficiente requer do controlador do sistema robótico a tomada em consideração dos seguintes aspectos:

- estabilidade postural;
- acomodação ao solo;
- capacidade de adaptação ao ambiente;
- eficiência energética.

Mais ainda, é preciso combinar vários mecanismos de controlo, simultaneamente, de acordo com a fase do ciclo de locomoção.

Neste trabalho, e tal como em Silva (2001), optou-se por uma aproximação baseada na implementação de estruturas de controlo simples, de forma a valorizar (e a revelar) as características dinâmicas intrínsecas do sistema, em detrimento de um controlador sofisticado que tende a “forçar” o comportamento desejado. Nesta ordem de ideias, a abordagem seguida insere-se naquilo a que se convencionou chamar de controlo “clássico” em contraponto aos algoritmos “avançados” (por exemplo, algoritmos adaptativos, com aprendizagem, de estrutura variável e outros).

No Capítulo 4 viu-se que, do ponto de vista energético, o padrão de locomoção preferencial é o PLFICC. No entanto, neste capítulo adopta-se para a locomoção do robô (em todas as experiências excepto quando for claramente explicitado o contrário) o padrão PLO com $\beta = 50\%$. Esta selecção prende-se com o facto deste ser o padrão de locomoção hexápode, de entre os implementados, que garante a maior margem de estabilidade estática quando a locomoção se desenrola em terrenos planos (Song e Waldron, 1989).

Em todas as experiências efectuadas considera-se também que o robô está a deslocar-se à velocidade nominal e que assim permanece durante todo o decurso da simulação. Desta forma, não se consideram os instantes de aceleração inicial e de desaceleração final, isto é, quando o robô parte ou quando o robô termina a locomoção, situações onde se encontra imobilizado. Uma possível solução para a implementação destas fases da locomoção é proposta por Hugel, *et al.* (2000).

A análise seguinte é baseada nos índices formulados e apresentados no Capítulo 3 deste trabalho, medindo as propriedades dinâmicas do robô e do terreno, bem como os erros de seguimento das trajectórias das ancas e dos pés durante a locomoção. Assim, são efectuadas várias simulações, baseadas no modelo desenvolvido, que mostram o desempenho dos diferentes algoritmos de controlo na perspectiva dos índices propostos.

5.2.1 Sintonia dos Controladores

Para sintonizar os diferentes algoritmos de controlo adopta-se um método sistemático, testando uma grelha de várias combinações possíveis de parâmetros de sintonia e avaliando a correspondente resposta temporal. Adicionalmente, durante a sintonia dos diferentes controladores consideram-se actuadores das juntas do robô de elevado desempenho, entrando dificilmente em saturação e com um binário máximo de $\tau_{ijMax} = 400$ Nm (na equação (3.10)).

Uma vez que a essência da locomoção passa por deslocar, de forma suave, o corpo do robô de um local para outro, com algumas restrições em termos de tempo de execução do movimento e procurando minimizar a energia necessária para efectuar o movimento, selecciona-se, para cada controlador, o conjunto de parâmetros que resulta do estabelecimento de um compromisso no que concerne à minimização simultânea dos índices de desempenho E_{av} (3.20) e ε_{xyH} (3.25a), durante um passo completo da locomoção do robô.

Tabela 5.1: Parâmetros do Sistema.

Parâmetros do modelo do robô			
S_P	1,0 m	O_i	0,0 m
L_{ij}	0,5 m, $j = 1, 2$	L_{i3}	0,1 m
M_b	88,0 kg		
M_{ij}	1,0 kg, $j = 1, 2$	M_{if}	0,1 kg
K_{xH}	10^5 Nm^{-1}	K_{yH}	10^4 Nm^{-1}
B_{xH}	10^3 Nsm^{-1}	B_{yH}	10^2 Nsm^{-1}
B_{ijm}	$10,0 \text{ Nmrad}^{-1}\text{s}$		
J_{i1m}	$3,75 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	J_{i2m}	$6,25 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$
K_{ijT}	10^5 Nmrad^{-1}	B_{ijT}	$10,0 \text{ Nmrad}^{-1}\text{s}$
h_{ij}	$1,0 \times 10^{-3} \text{ rad}$	ε_{ij}	0,8
J_{i1T}	$1,875 \times 10^{-3} \text{ kgm}^2$	J_{i2T}	$3,125 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$
Parâmetros da locomoção		Parâmetros do solo	
β	50 %	K_{xF}	$1302152,0 \text{ Nm}^{-1}$
L_S	1,0 m	K_{yF}	$1705199,0 \text{ Nm}^{-1}$
H_B	0,9 m	B'_{xF}	$2364932,0 \text{ Nsm}^{-1}$
F_C	0,1 m	B'_{yF}	$2706233,0 \text{ Nsm}^{-1}$
V_F	$1,0 \text{ ms}^{-1}$	ν	0,9

5.2.2 Parâmetros do Modelo de Simulação

Para efeitos de simulação do sistema consideram-se os parâmetros do modelo do robô, da locomoção e do solo (supondo que o robô se desloca num solo de argila compacta) apresentados na Tabela 5.1.

5.2.3 Arquitectura de Controlo

A primeira opção a considerar, em termos de controlo do sistema artificial de locomoção, prende-se com a arquitectura genérica de controlo e com o fecho da malha de realimentação. Neste trabalho foram consideradas inicialmente três opções para implementar a arquitectura de controlo.

A primeira opção para o controlo do robô passa por efectuar o controlo das trajectórias das ancas no espaço cartesiano, tal como se encontra representado na Figura 5.1. Verifica-se que, nesta situação, apesar de o robô seguir aproximadamente a trajectória planeada para as ancas, os pés descrevem trajectórias bastante diferentes do planeado (praticamente são arrastados pelo solo) impossibilitando que a locomoção se efectue de uma forma correcta.

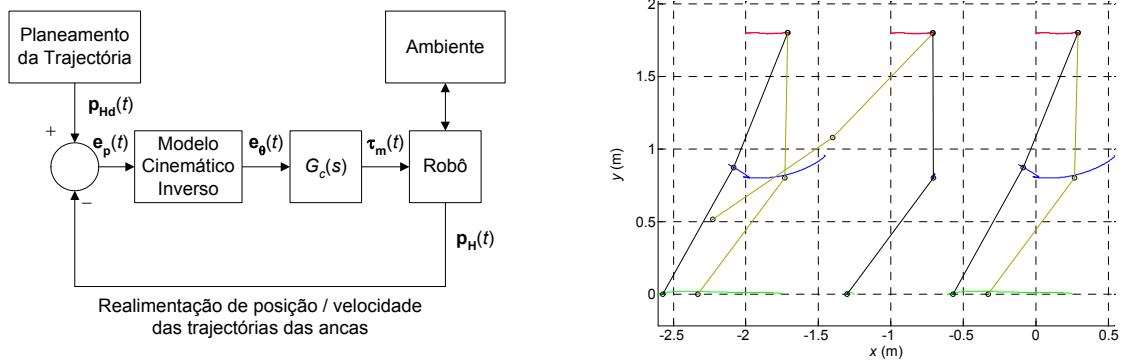


Figura 5.1: Arquitectura de controlo com realimentação da posição e velocidade das trajectórias das ancas do robô e correspondente simulação da locomoção do hexápode, ao longo de 0,3 s, para $L_{i1} = L_{i2} = 0,5$ m, $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,01$ m, $H_B = 1,8$ m, $V_F = 1$ ms⁻¹, PLO.

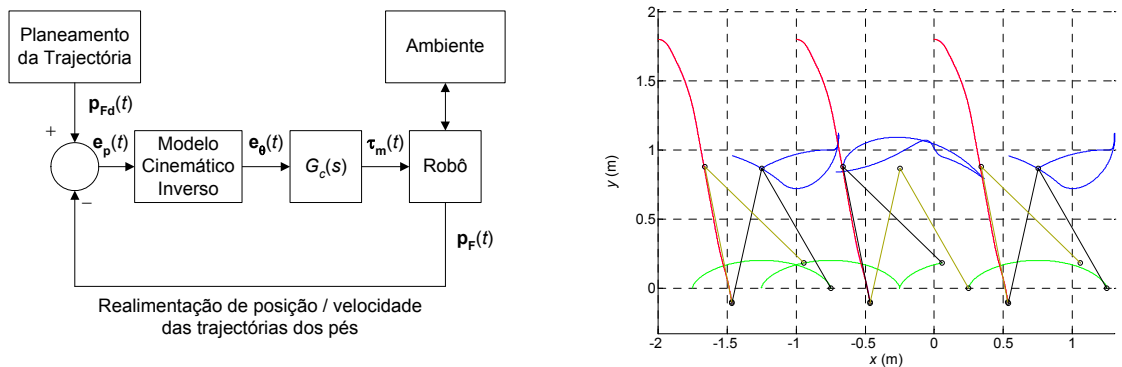


Figura 5.2: Arquitectura de controlo com realimentação da posição e velocidade das trajectórias dos pés do robô e correspondente simulação da locomoção do hexápode, ao longo de 1,3 s, para $L_{i1} = L_{i2} = 0,5$ m, $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,01$ m, $H_B = 1,8$ m, $V_F = 1$ ms⁻¹, PLO.

Uma situação semelhante verifica-se quando se opta por efectuar o controlo das trajectórias dos pés no espaço cartesiano, de acordo com o diagrama de blocos apresentado na Figura 5.2. Verifica-se que, neste caso, o robô cumpre a trajectória planeada para os pés com erros aceitáveis, mas as ancas descrevem trajectórias bastante diferentes do planeado (caiem no solo) impossibilitando a locomoção.

Do exposto conclui-se que é necessário efectuar simultaneamente o controlo das trajectórias das ancas e dos pés do sistema artificial de locomoção. Assim, implementou-se numa primeira fase a arquitectura de controlo apresentada na Figura 5.3. Como se pode verificar pela simulação representada, esta arquitectura de controlo permite que o robô se movimente de forma estável e com erros de pequena amplitude face às trajectórias planeadas.

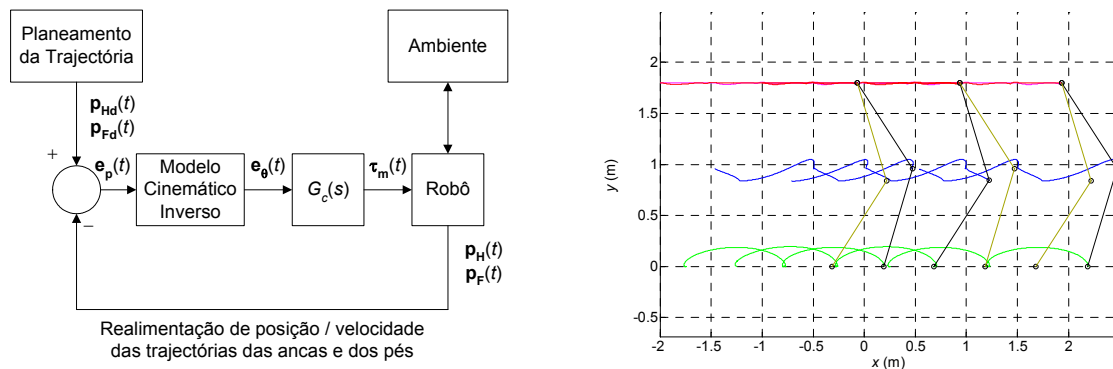


Figura 5.3: Arquitectura de controlo com realimentação da posição e velocidade das trajectórias das ancas e dos pés do robô e correspondente simulação da locomoção do hexápode, ao longo de 2,0 s, para $L_{i1} = L_{i2} = 0,5$ m, $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $F_C = 0,01$ m, $H_B = 1,8$ m, $V_F = 1$ ms⁻¹, PLO.

Esta primeira aproximação à arquitectura de controlo serve de base ao trabalho desenvolvido de seguida. No entanto, nas secções seguintes será melhorada, nomeadamente através da inclusão de uma segunda malha de realimentação das forças de contacto dos pés com o solo e da variação do ganho da malha directa em função da altura dos pés do robô face ao solo. Mais tarde, estuda-se o efeito da adopção de um algoritmo de ordem não inteira para o controlo deste sistema.

5.2.4 Controlo de Posição e Força de um Robô Hexápode

Nesta subsecção são comparadas duas arquitecturas de controlo das juntas das pernas do robô, nomeadamente um algoritmo clássico proporcional e derivativo com realimentação de posição (PD-P) e um novo controlador em cascata, envolvendo malhas de realimentação de posição e força (PD-P&F). Para o caso da arquitectura PD-P&F é também implementado um esquema “adaptativo” que varia o ganho na malha directa de força de acordo com a evolução do passo do robô.

O objectivo do estudo é verificar o desempenho das duas arquitecturas de controlo e a influência da realimentação da força do pé na estabilidade do sistema e na sua robustez face a características variáveis do solo. Várias experiências de simulação mostram o desempenho superior da arquitectura de controlo com realimentação da força do pé e com um esquema de ajuste do ganho na malha directa de força durante a fase de suporte, que minimiza os índices propostos, particularmente em situações com actuadores apresentando saturação.

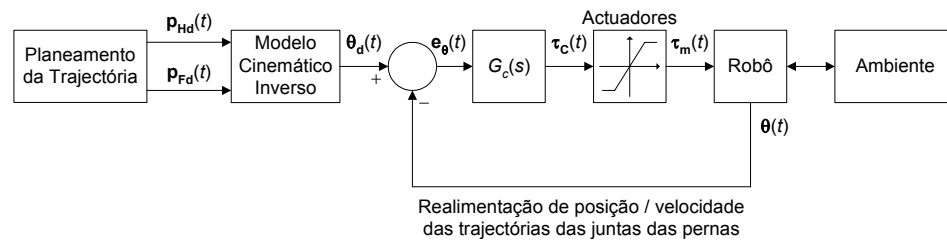


Figura 5.4: Arquitectura de controlo PD-P do robô multipernas, somente com realimentação da posição / velocidade.

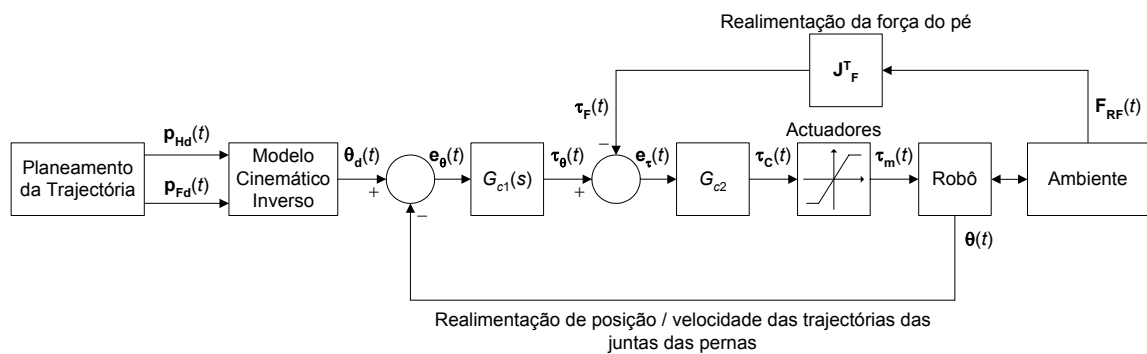


Figura 5.5: Arquitectura de controlo PD-P&F do robô multipernas, com realimentação de posição / velocidade (anel externo) e da força de contacto do pé (anel interno).

5.2.4.1 Modelo de Controlo do Robô

A arquitectura de controlo genérica adoptada para o sistema de locomoção multipernas está apresentada na Figura 5.4. O planeamento das trajectórias é efectuado no espaço cartesiano mas, ao contrário do descrito na secção anterior, o controlo é realizado no espaço das juntas, o que implica a introdução do modelo cinemático inverso na malha directa. As trajectórias de referência nas juntas são geradas recorrendo às expressões (C.1) e (C.2) e (D.1 – D.7) apresentadas de forma detalhada nos Anexos C e D, respectivamente, para os casos de robôs com dois e três gdl por perna.

O algoritmo base PD-P considera unicamente uma realimentação de posição / velocidade e, em consequência, a série de G_{c1} e G_{c2} pode ser substituída por um único bloco. A arquitectura base é melhorada com a introdução de uma segunda malha de realimentação interna com informação da força de interacção pé-solo PD-P&F (Figura 5.5). Neste caso, G_{c1} e G_{c2} encontram-se numa estrutura em cascata na malha de controlo directa.

Para o controlador $G_{c1}(s)$ adopta-se um algoritmo PD de posição / velocidade:

$$G_{c1j}(s) = Kp_j + Kd_j s, \quad j = 1, 2 \quad (5.1)$$

sendo Kp_j e Kd_j os ganhos proporcional e derivativo da junta j , respectivamente. Para G_{c2} considera-se um simples controlador P. Adicionalmente, consideram-se duas arquitecturas de controlo, nomeadamente uma simples com realimentação da posição / velocidade da junta (PD-P) e uma em cascata com realimentação da posição / velocidade da junta e da força de contacto pé-solo (PD-P&F).

Os controladores adoptados são do tipo PD, uma vez que nas diversas experiências efectuadas nunca se verificou que a inclusão de um termo Integral (I) melhorasse o controlo do sistema em estudo. Na realidade, esta constatação está de acordo com Kim, *et al.* (2000) que apresentam uma justificação para o facto de o controlo PID não resultar nos robôs com locomoção por pernas.

5.2.4.2 Parâmetros do Sistema e Sintonia dos Controladores

Conforme foi descrito na subsecção 5.3.1, os controladores são sintonizados recorrendo a um método sistemático assumindo que os actuadores das juntas do robô são praticamente ideais. O estabelecimento de um compromisso no que concerne à minimização simultânea dos índices de desempenho E_{av} (3.20) e ε_{xyH} (3.25a), leva aos parâmetros do controlador $G_{c1}(s)$ apresentados na Tabela 5.2 e a um controlador proporcional G_{c2} com ganho $Kp_j = 1,0$ ou $Kp_j = 0,9$, respectivamente para os casos PD-P ou PD-P&F.

Tabela 5.2: Parâmetros do controlador para $G_{c1}(s)$ e G_{c2} quando se estabelece um compromisso entre a minimização de E_{av} e ε_{xyH} , para cada controlador.

			PD-P	PD-P&F
$G_{c1}(s)$	Junta $j = 1$	Kp_1	1000,0	1500,0
		Kd_1	100,0	300,0
	Junta $j = 2$	Kp_2	4500,0	4000,0
		Kd_2	20,0	10,0
G_{c2}	Junta $j = 1$	Kp_1	1,0	0,9
	Junta $j = 2$	Kp_2	1,0	0,9
Índices de Desempenho		E_{av}	275,42	373,74
		ε_{xyH}	1,25	0,73

5.2.4.3 Desempenho Base das Arquitecturas de Controlo PD-P e PD-P&F

Nesta subsecção desenvolve-se um conjunto de experiências de simulação para comparar o desempenho dos controladores durante a locomoção adoptando o PLO, considerando que o robô se desloca numa superfície perfeitamente horizontal e plana.

No caso da locomoção em terrenos com obstáculos o robô deve adaptar o seu padrão de locomoção ao ambiente. Se o número de obstáculos é pequeno, então a locomoção pode ser efectuada utilizando um padrão de locomoção quase-periódico, para o qual o planeamento da trajectória pode ser implementado usando os algoritmos descritos na secção 6.3. No caso de terrenos mais irregulares, foram propostos alguns algoritmos de planeamento de trajectórias como se verá na secção 6.1 do capítulo seguinte.

Através da análise dos gráficos das Figuras 5.6 e 5.7 conclui-se que a arquitectura de controlo PD-P&F melhora o seguimento das trajectórias das ancas e dos pés (e apresenta um menor valor para o índice ε_{xyH}) mas ao custo de binários nas juntas superiores (Figura 5.8) e de valores mais elevados para E_{av} , F_L e τ_P .

De forma a efectuar uma comparação equilibrada entre as duas arquitecturas de controlo, nomeadamente com a variação dos parâmetros da locomoção e do ambiente, estabelece-se um compromisso no que diz respeito à minimização de E_{av} e ε_{xyH} , para ambos os controladores. Assim, adoptam-se para $G_{c1}(s)$ os parâmetros apresentados na Tabela 5.3 e mantém-se o valor do ganho proporcional Kp_j do controlador G_{c2} .

Tabela 5.3: Parâmetros do controlador para $G_{c1}(s)$ e G_{c2} quando se estabelece um compromisso entre a minimização de E_{av} e ε_{xyH} , para ambos os controladores.

			PD-P	PD-P&F
$G_{c1}(s)$	Junta $j = 1$	Kp_1	2000,0	8000,0
		Kd_1	0,0	60,0
	Junta $j = 2$	Kp_2	2500,0	500,0
		Kd_2	60,0	40,0
G_{c2}	Junta $j = 1$	Kp_1	1,0	0,9
	Junta $j = 2$	Kp_2	1,0	0,9
Índices de Desempenho		E_{av}	370,74	363,49
		ε_{xyH}	1,44	1,44

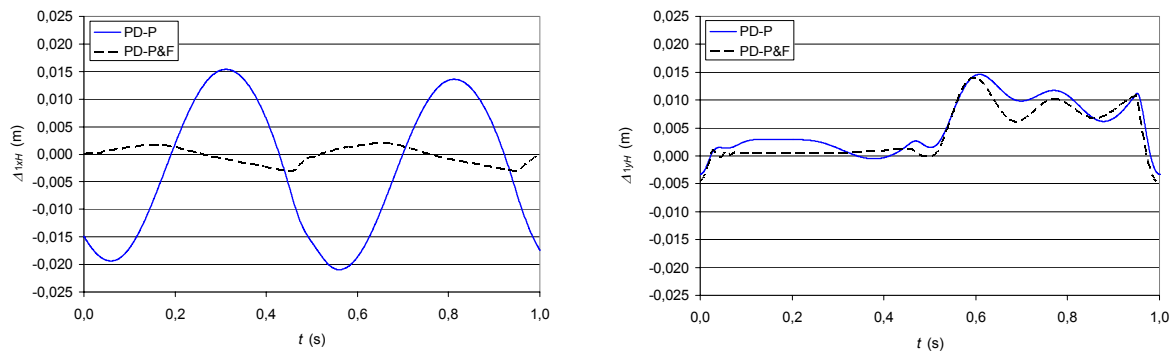


Figura 5.6: Erros de seguimento das trajetórias das ancas Δ_{1xH} e Δ_{1yH} vs. t para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

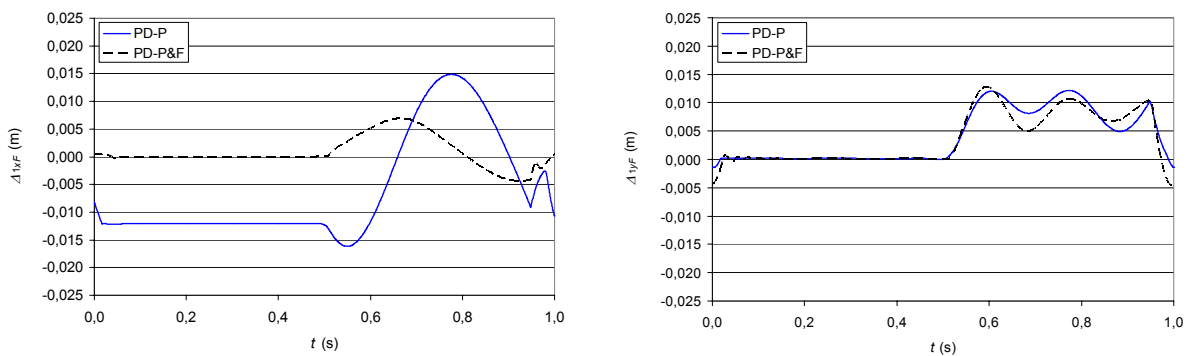


Figura 5.7: Erros de seguimento das trajetórias dos pés Δ_{1xF} e Δ_{1yF} vs. t para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

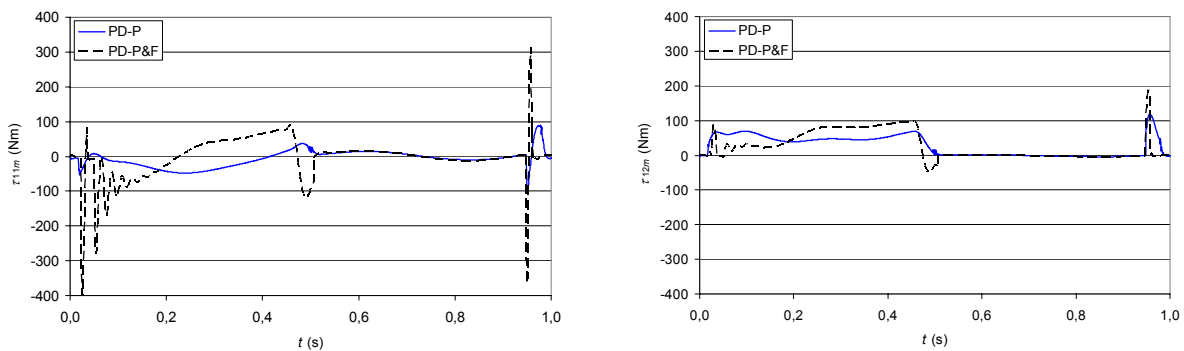


Figura 5.8: Binários nas juntas τ_{11m} e τ_{12m} vs. t para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

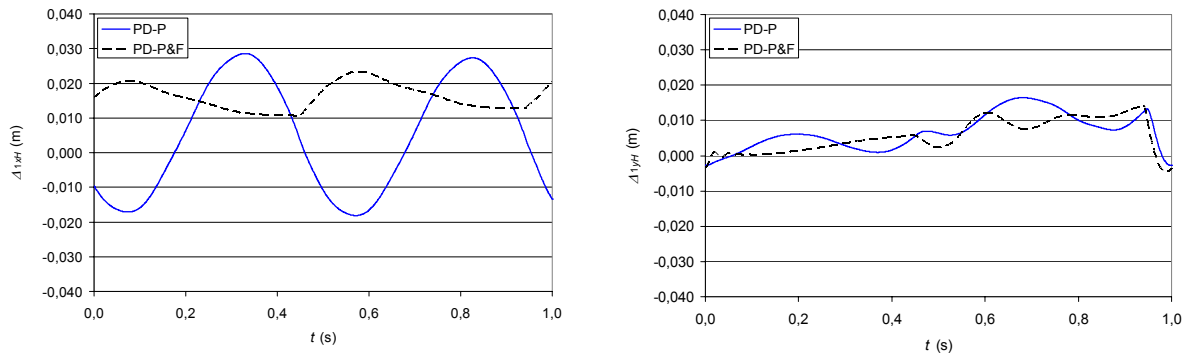


Figura 5.9: Erros de seguimento das trajetórias das ancas Δ_{1xH} e Δ_{1yH} vs. t para as arquiteturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

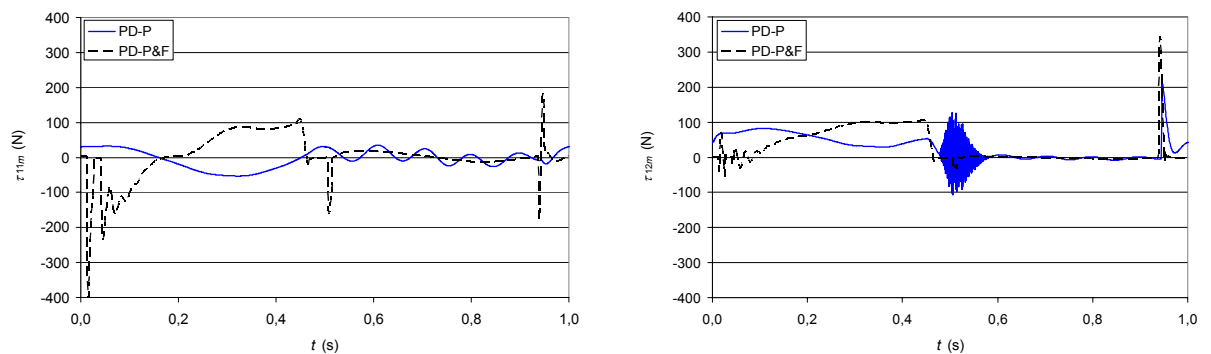


Figura 5.10: Binários nas juntas τ_{11m} e τ_{12m} vs. t para as arquiteturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

Para este novo conjunto de parâmetros dos controladores conclui-se mais uma vez que a arquitectura PD-P&F melhora o seguimento das trajetórias das ancas (Figura 5.9), apresentado valores ligeiramente superiores para os binários nas juntas (Figura 5.10), comparativamente à arquitectura PD-P. No caso do controlo PD-P o binário na junta τ_{12m} apresenta uma oscilação considerável nos instantes do impacto do pé com o solo (que ocorrem por volta de $t = 0.5$ s) e uma oscilação mais subtil enquanto o pé se encontra na fase de suporte ($0.5 \text{ s} < t < 1.0 \text{ s}$).

5.2.4.4 Trajetória do Pé e Saturação dos Actuadores

Com os parâmetros do sistema e do controlador apresentados respectivamente nas Tabelas 5.1 e 5.3, avaliam-se as duas trajetórias alternativas para os pés do robô durante a fase de transferência $\mathbf{p}_{Fd}(t)$, nomeadamente as funções cicloidal (3.3a) e sinusoidal (3.3b).

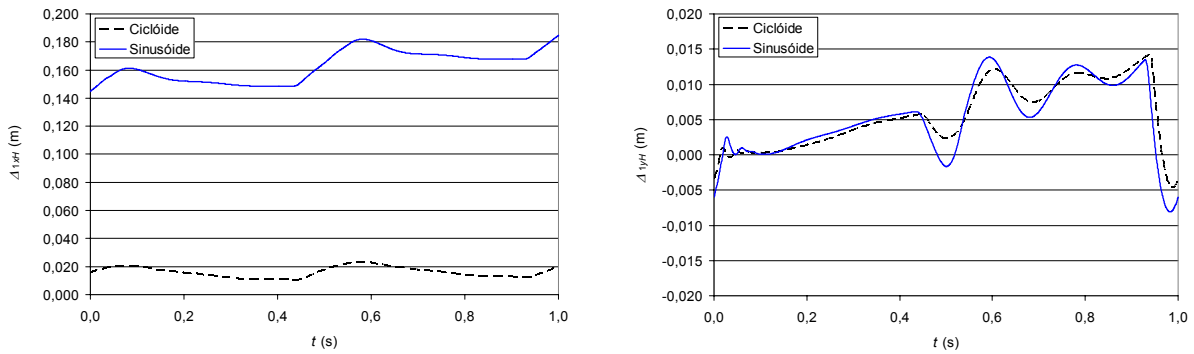


Figura 5.11: Erros de seguimento das trajectórias das ancas Δ_{1xH} e Δ_{1yH} vs. t para as trajectórias cicloidial e sinusoidal dos pés do robô, durante a fase de transferência, adoptando a arquitectura de controlo PD-P&F com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

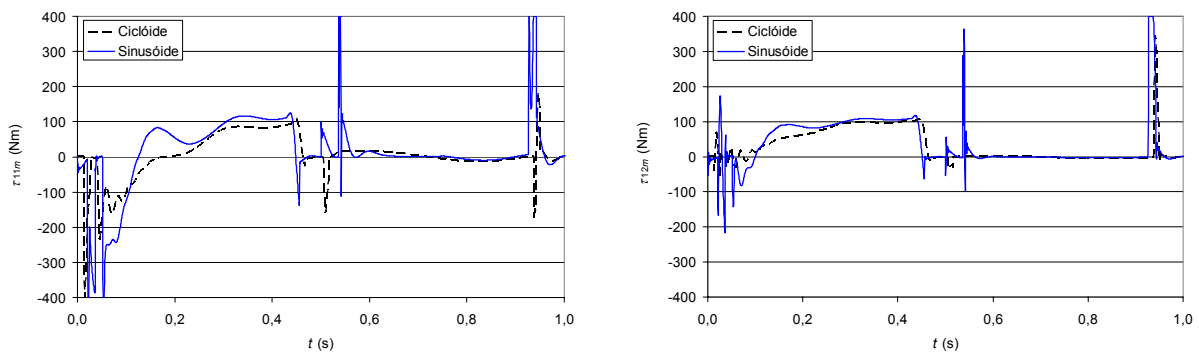


Figura 5.12: Binários nas juntas τ_{11m} e τ_{12m} vs. t para as trajectórias cicloidial e sinusoidal dos pés do robô, durante a fase de transferência, adoptando a arquitectura de controlo PD-P&F com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

Das Figuras 5.11 e 5.12 é possível concluir que a trajectória do pé, durante a fase de transferência, de acordo com a função cicloidial é superior, porque melhora o seguimento das trajectórias das ancas, minimizando, simultaneamente, os binários nas juntas. Para além disto, no caso de se adoptar a função sinusoidal para implementar a trajectória do pé durante a fase de transferência, os binários nas juntas apresentam picos de elevada amplitude nos instantes de levantamento e colocação dos pés no solo, o que pode ser observado para τ_{11m} , nos instantes $t \approx 0,05$, $t \approx 0,5$ e $t \approx 0,95$ s, na Figura 5.12. Estes picos são devidos a um certo arrastamento dos pés no solo provocados pela forma da função sinusoidal. Para diferentes perfis de aceleração das trajectórias dos pés estes gráficos não sofrem alterações significativas. Tendo por base esta conclusão, no seguimento deste trabalho adopta-se a trajectória cicloidial para implementar a fase de transferência dos pés do robô durante os testes dos algoritmos de controlo.

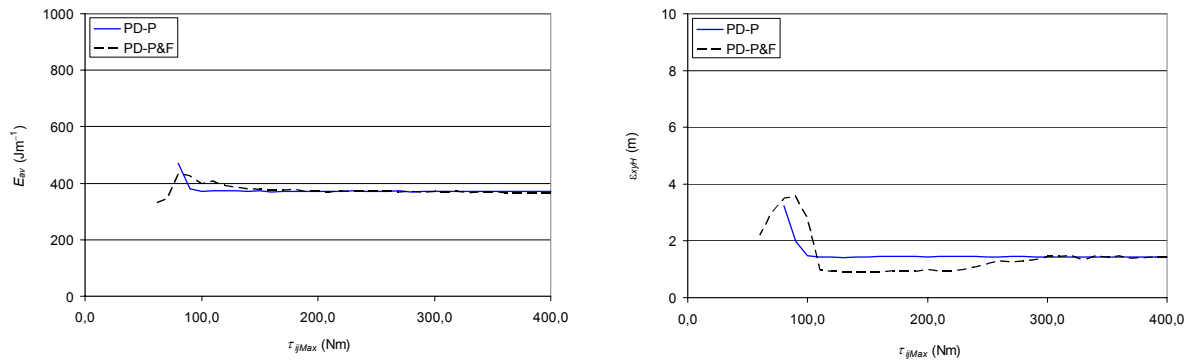


Figura 5.13: E_{av} e ϵ_{xyH} vs. τ_{ijMax} para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F.

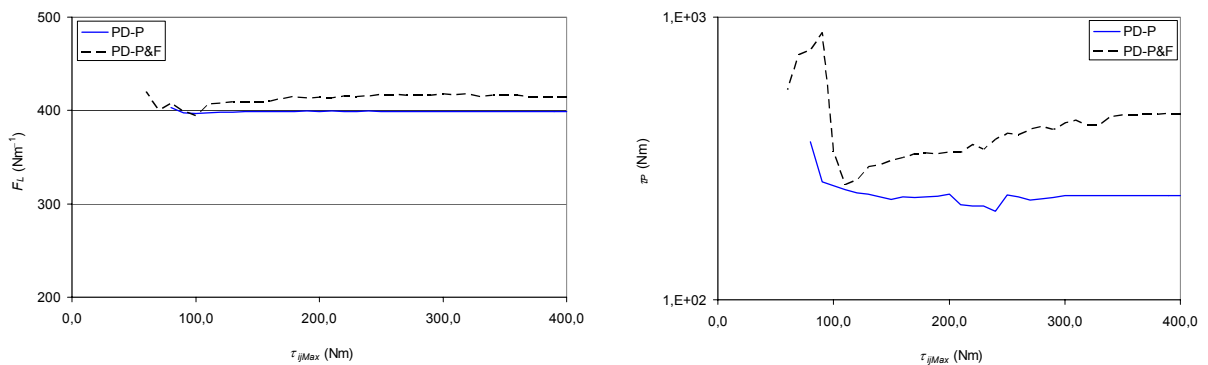


Figura 5.14: F_L e τ_P vs. τ_{ijMax} para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F.

Outro aspecto importante a ter em atenção é a acção necessária para o actuador. Portanto, decidiu-se testar o desempenho de ambos os controladores quando se varia o nível de saturação dos actuadores τ_{ijMax} . A arquitectura de controlo PD-P&F apresenta valores de ϵ_{xyH} menores para valores de $\tau_{ijMax} > 100$ Nm. Por outro lado, ambos os controladores apresentam valores similares de E_{av} neste intervalo. No caso do nível de saturação dos actuadores ser elevado ($\tau_{ijMax} < 100$ Nm) os dois algoritmos têm dificuldades em controlar a locomoção do robô e, como consequência, os valores dos índices ϵ_{xyH} e E_{av} aumentam fortemente, sendo este efeito ligeiramente maior no caso do controlador PD-P&F (Figura 5.13).

Durante as colisões dos pés com o solo, nos instantes de colocação dos pés no solo, ocorrem elevadas forças de contacto que se propagam através das pernas do robô, levando a valores elevados do índice F_L . Para além disso, essas forças de contacto são realimentadas na malha de força do controlador levando a valores elevados do índice τ_P , para o esquema PD-P&F. Por este motivo, a arquitectura de controlo PD-P apresenta valores inferiores para

os índices F_L e τ_P em todo o intervalo de τ_{ijMax} (Figura 5.14), o mesmo sucedendo com o índice T_L , não apresentado aqui por motivos de espaço.

5.2.4.5 Parâmetros e Padrão da Locomoção

Um aspecto importante, que necessita de ser investigado, é a influência dos parâmetros de locomoção. Portanto, as duas arquitecturas de controlo são testadas para variações do factor de ocupação β , da velocidade de locomoção do robô V_F e do padrão de locomoção.

O factor de ocupação foi variado dentro do intervalo capaz de manter a locomoção estável ($2\% \leq \beta \leq 86\%$) e verifica-se que existem duas zonas distintas:

- para valores de $\beta < 50\%$, os índices dinâmicos E_{av} , D_{av} , T_L e F_L são inferiores no caso da arquitectura PD-P;
- para valores de $\beta > 50\%$, é a arquitectura PD-P&F que garante os valores mais baixos destes índices.

Já o comportamento dos índices τ_P e ε_{xyH} é uniforme em todo o intervalo de β em análise. Verifica-se que a arquitectura PD-P garante o menor valor de τ_P e a arquitectura PD-P&F a de ε_{xyH} .

A evolução descrita é idêntica para todos os valores de τ_{ijMax} analisados. Na Figura 5.15 é possível ver o comportamento dos índices E_{av} e ε_{xyH} vs. β . Estes resultados mantêm-se para diferentes níveis de saturação dos actuadores das juntas.

A mudança de comportamento dos índices de desempenho para o valor de $\beta \approx 50\%$ deve-se ao facto deste valor ser a fronteira entre o andar e o correr. Para valores $\beta < 50\%$ o robô encontra-se a correr, o que implica fases de voo, com a conseqüente “queda” no solo no final da transferência dos pés. Este fenómeno provoca o aumento dos impactos com o solo, afectando os binários nas juntas e provocando a realimentação das forças de contacto através da malha de força do controlador, o que se reflecte nos índices dinâmicos.

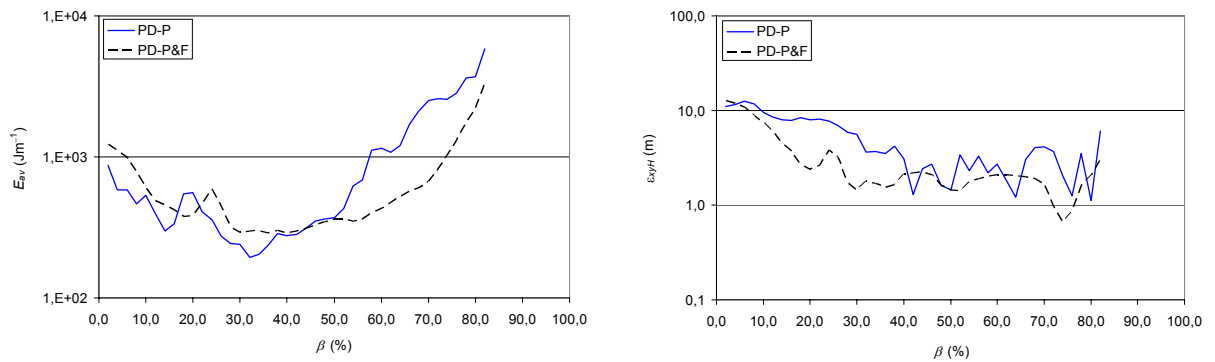


Figura 5.15: E_{av} e ϵ_{xyH} vs. β para as arquiteturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

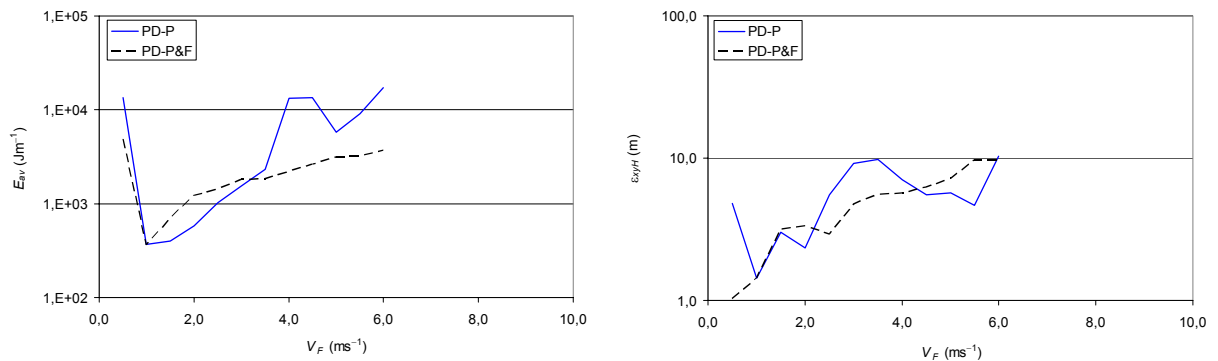


Figura 5.16: E_{av} e ϵ_{xyH} vs. V_F para as arquiteturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

No que diz respeito à variação da velocidade do robô, os resultados foram analisados para $0,5 \text{ ms}^{-1} < V_F < 6,0 \text{ ms}^{-1}$. O esquema de controlo PD-P&F apresenta os menores valores para ϵ_{xyH} para valores de $V_F < 4,0 \text{ ms}^{-1}$. No que diz respeito aos índices dinâmicos, para $\tau_{ijMax} > 100$ Nm, o seu comportamento é semelhante, obtendo-se desempenhos superiores para o esquema PD-P&F se $V_F < 1,0 \text{ ms}^{-1}$ ou $V_F > 3,0 \text{ ms}^{-1}$ e para a arquitectura PD-P se $1,0 \text{ ms}^{-1} < V_F < 3,0 \text{ ms}^{-1}$ (como pode ser visto na Figura 5.16 para os casos de E_{av} e ϵ_{xyH}).

Quanto aos padrões de locomoção, foi testado o desempenho dos controladores para os padrões PLFIMC, PLFICC, PLOI, PLFIMCI e PLFICCI (Song e Waldron, 1989), para os valores do factor de ocupação capazes de manter a locomoção estável ($2\% \leq \beta \leq 80\%$). Os resultados mostram que, para ambos os esquemas de controlo, o melhor desempenho é conseguido com o padrão de locomoção ondulatório (tanto do ponto de vista dos índices dinâmicos como dos erros de seguimento das trajectórias), sendo os resultados muito parecidos aos do padrão Ondulatório Inverso. No que diz respeito aos outros quatro padrões,

os índices de desempenho são similares para todos eles. Este resultado pode também dever-se ao facto de o controlador ter sido sintonizado enquanto o robô se deslocava recorrendo ao PLO. Por questões de tempo e de espaço, não se procedeu a novas sintonias do controlador para outros padrões de locomoção.

5.2.4.6 Propriedades do Solo

Tendo por base as experiências apresentadas anteriormente examinam-se ambas as arquitecturas de controlo para diferentes propriedades do solo. Numa primeira fase começa-se por considerar o controlador PD-P e diferentes valores de K_{xF} , B'_{xF} , K_{yF} , B'_{yF} , de forma a verificar a sua influência sobre os índices propostos, tomando actuadores nas juntas quase ideais (*i.e.*, sem saturação) tais que $\tau_{ijMax} = 400$ Nm. Numa segunda fase as experiências são repetidas para o caso da arquitectura de controlo PD-P&F.

Para o efeito, os valores de K_{xF} , B'_{xF} , K_{yF} e B'_{yF} são multiplicados simultaneamente por um factor multiplicativo (K_{mult}). O intervalo considerado para os parâmetros do modelo do solo permite simular o comportamento de solos de dureza crescente, desde a turfa até à gravilha. Para parâmetros do solo semelhantes aos do cimento e da madeira, ambos os algoritmos apresentam dificuldades para controlar a locomoção do robô com os parâmetros adoptados, devido aos impactos que surgem durante a colocação dos pés no solo. Neste caso existem duas opções: pode-se encontrar uma outra sintonia para o controlador ou podem-se equipar os pés do robô com um dispositivo que absorva os choques (como visto na subsecção 3.3.2).

As medidas de desempenho *versus* o factor multiplicativo dos parâmetros do solo, em relação à experiência base, são apresentadas nas Figuras 5.17 e 5.18. Do ponto de vista do índice E_{av} , conclui-se que a arquitectura de controlo PD-P&F é preferível para valores dos parâmetros do solo quatro vezes superiores aos valores de base (solos duros). Para valores inferiores, ambas as arquitecturas apresentam desempenho semelhante. Por seu lado, os erros de seguimento das trajectórias das ancas (medidas através do índice ε_{xyH}) são menores quando se adopta a arquitectura de controlo PD-P&F, para valores dos parâmetros do solo:

- abaixo dos adoptados na experiência base (solos moles);
- quatro vezes superiores aos valores de base dos parâmetros (solos duros).

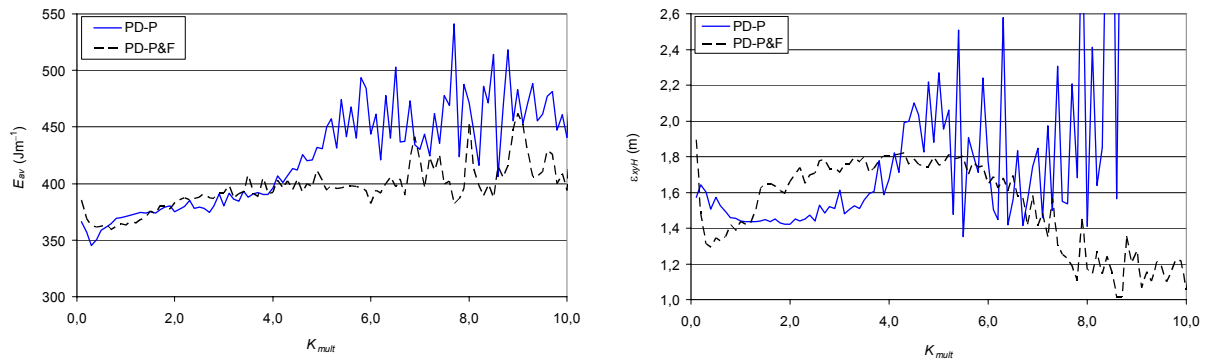


Figura 5.17: E_{av} e ϵ_{xyH} vs. K_{mult} para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

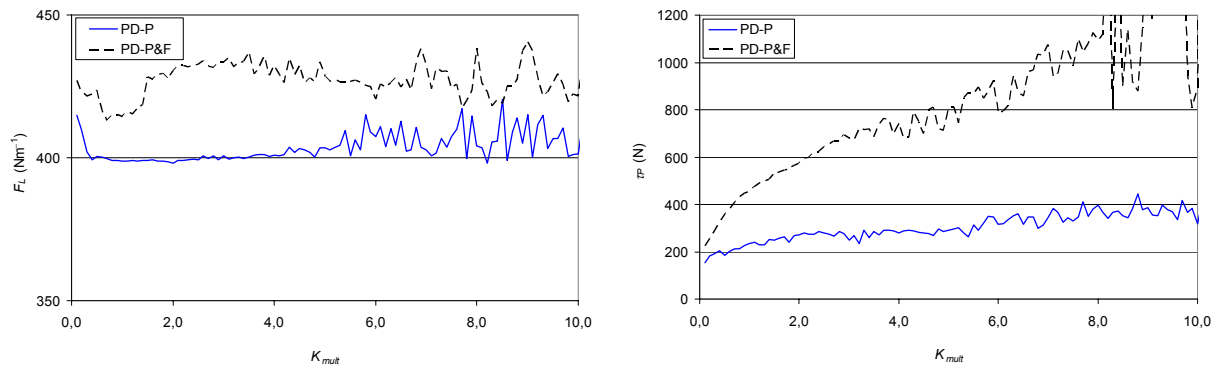


Figura 5.18: F_L e τ_P vs. K_{mult} para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

Nestes casos, a arquitectura de controlo PD-P encontra problemas para controlar correctamente o sistema.

No que concerne aos índices T_L , F_L e τ_P encontra-se que eles são mais elevados no caso da arquitectura de controlo PD-P&F para todos os tipos de solo.

Para níveis moderados de saturação dos actuadores (por exemplo, $\tau_{ijMax} = 150$ Nm), obtêm-se conclusões semelhantes.

No caso de forte saturação dos actuadores (por exemplo, $\tau_{ijMax} < 140$ Nm) os índices mostram uma grande degradação do desempenho, com dificuldades quer para o esquema PD-P&F quer para o PD-P. No entanto, esta situação não é realista uma vez que corresponde a condições operacionais necessitando de binários muito mais elevados do que os estabelecidos pelo nível de saturação. Por outro lado, quando se dispõe de actuadores de elevado desempenho ($\tau_{ijMax} > 400$ Nm) o esquema PD-P&F revela problemas de estabilidade, particularmente em terrenos duros (valores dos parâmetros do solo acima de 100% dos

valores base) devido aos impulsos de realimentação de força durante os impactos dos pés com o solo (Figura 5.19). Mesmo assim, esta arquitectura efectua uma filtragem destes impulsos e verifica-se que as oscilações sentidas na anca são de amplitude inferior às que se obtêm com o esquema PD-P (Figura 5.19). No entanto, este caso também não é totalmente correcto uma vez que considera actuadores ideais dispondo de binário e largura de banda infinitos.

Em conclusão, a realimentação da força do pé parece essencial para um desempenho de controlo robusto durante a locomoção em terrenos com características dinâmicas variáveis.

5.2.4.7 Esquema Adaptativo Para os Ganhos do Controlador G_{c2}

Nas subsecções anteriores foram demonstradas as vantagens de um controlador em cascata, com controlo PD de posição e realimentação da força do pé, comparativamente a um esquema clássico com, unicamente, realimentação de posição. Nesta subsecção desenvolve-se um melhoramento do algoritmo, variando o ganho da malha directa de força de acordo com a evolução do passo do robô.

Um primeiro aspecto que deve ser avaliado para o esquema PD-P&F é o efeito de G_{c2} no seu desempenho. As Figuras 5.20 – 5.21 mostram que um valor elevado do ganho proporcional K_{p_j} ($j = 1, 2$) leva a valores reduzidos de E_{av} , ε_{xyH} e F_L mas, por outro lado, degrada o índice τ_p . Apesar de não se encontrar representado, por motivos de espaço, os índices D_{av} e T_L apresentam uma variação similar a E_{av} . Mais ainda, ganhos elevados em G_{c2} levam a grandes impactos do pé com o solo que se propagam através do anel de controlo até aos actuadores, conforme foi mencionado anteriormente.

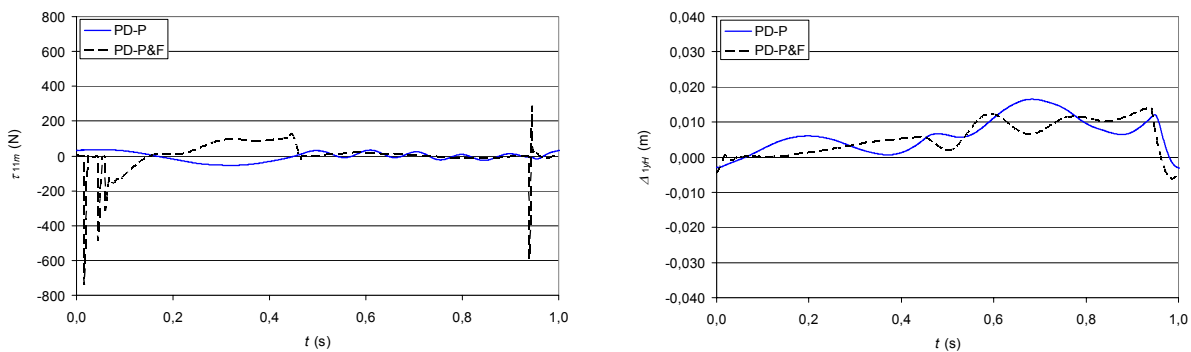


Figura 5.19: Gráficos de τ_{11m} e Δ_{1yH} vs. t para as arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, com $K_{mult} = 4$ e $\tau_{ijMax} \rightarrow \infty$.

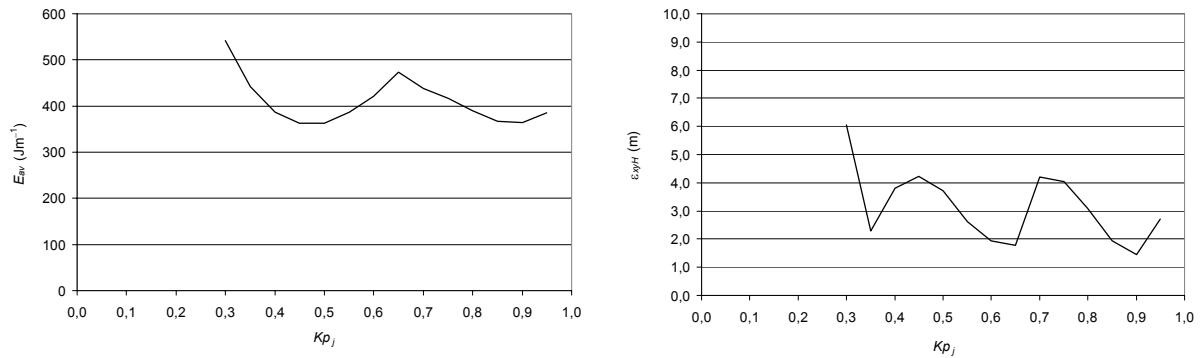


Figura 5.20: E_{av} e ϵ_{xyH} vs. Kp_j para a arquitectura de controlo PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

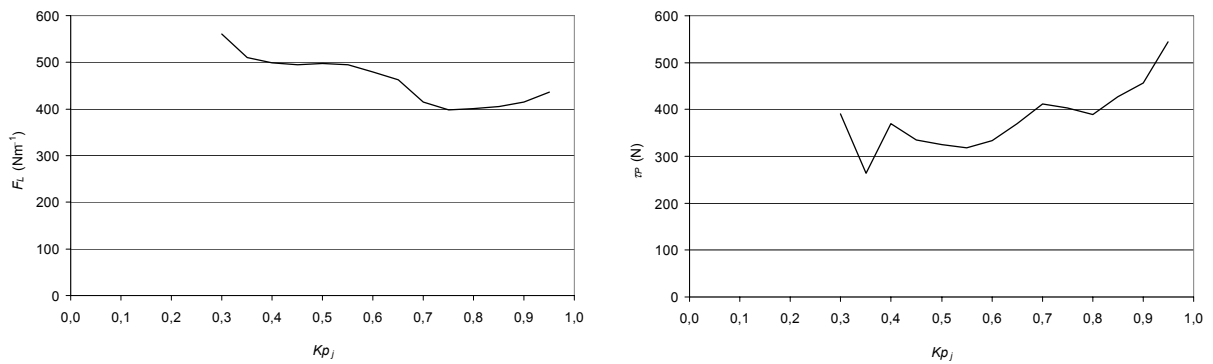


Figura 5.21: F_L e τ_p vs. Kp_j para a arquitectura de controlo PD-P&F, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

Este problema tem sido referido para a locomoção de vários sistemas com pernas, como se viu na subsecção 5.1.8, onde são também apresentadas diversas estratégias seguidas para a sua resolução.

Tendo presentes estes factos estabelece-se uma política de variação do ganho de forma a que este varie adaptativamente de acordo com a posição relativa entre o pé e o solo. A ideia consiste em reduzir os ganhos proporcionais Kp_j ($j = 1, 2$), do controlador G_{c2} , antes dos instantes de contacto dos pés com o solo e aumentá-los novamente após estes terem saído do solo.

A variação do ganho directo pretende também modelar um efeito verificado nos seres vivos. De facto as juntas humanas são actuadas por dois ou mais grupos de músculos antagonistas possuindo características de molas não lineares. Foi também reportado que a elasticidade muscular dos gatos, quando a andar, é ajustada em diferentes valores durante as fases de transferência e de suporte (Yamaguchi, *et al.*, 1998). A tensão e elasticidade (rigidez)

dos músculos são elevadas durante a fase de suporte e são reduzidas durante a fase de transferência.

A nova arquitectura de controlo do sistema robótico de locomoção multipernas (PD-P&Fv) é apresentada na Figura 5.22. Para $G_{c1}(s)$ adopta-se o algoritmo PD de posição / velocidade, enquanto para G_{c2} se considera um simples controlador P, com ganho Kp_j , que é variado de acordo com um esquema descrito de seguida.

As Figuras 5.23 – 5.24 mostram os índices E_{av} , ε_{xyH} , F_L e τ_P versus os valores dos ganhos Kp_j do controlador G_{c2} quando os pés se encontram na fase de suporte (Kp_{jlow}). Durante a fase de transferência dos pés o valor destes ganhos é $Kp_{jhigh} = 0,9$. A comutação entre as fases de suporte e de transferência é efectuada quando a distância dos pés ao solo é $y_{iF0} = 0,01$ m.

As Figuras 5.23 e 5.24 mostram que o aumento do ganho proporcional, até $Kp_{jlow} = 0,9$, leva a um melhor seguimento das trajectórias das ancas e a uma melhoria dos índices E_{av} e F_L mas, por outro lado, a uma degradação do índice τ_P (Figura 5.24).

Tendo por base a análise destes gráficos, de seguida encontra-se uma situação de compromisso. Um esquema adaptativo, tal que $Kp_j(y_{iF}) = Kp_{jlow}$ se $y_{iF} \leq y_{iF0}$ ou $Kp_j(y_{iF}) = Kp_{jhigh}$ se $y_{iF} > y_{iF0}$ para $\{Kp_{jlow}, Kp_{jhigh}, y_{iF0}\} = \{0,4; 0,9; 0,01\}$ leva a um bom compromisso entre os erros de seguimento das trajectórias das ancas e os índices dinâmicos, como pode ser visto nas Figuras 5.25 – 5.26.

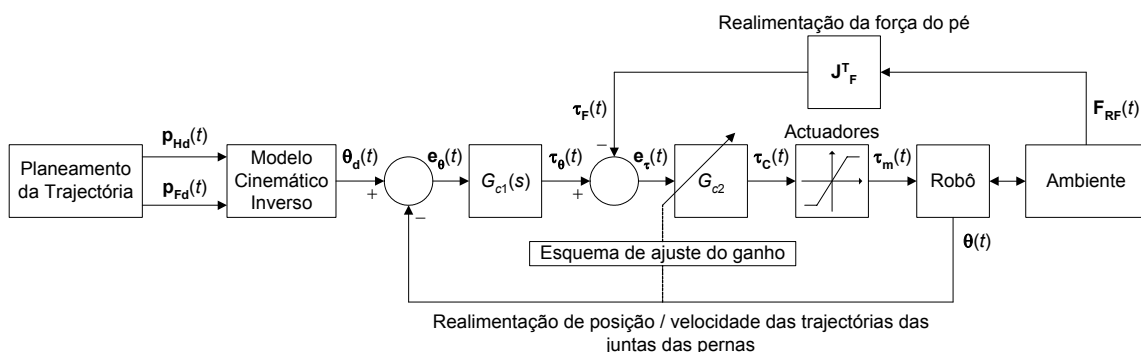


Figura 5.22: Arquitectura de controlo PD-P&Fv do robô multipernas, com realimentação de posição / velocidade e da força de contacto do pé e com o esquema de ajuste do ganho da malha directa.

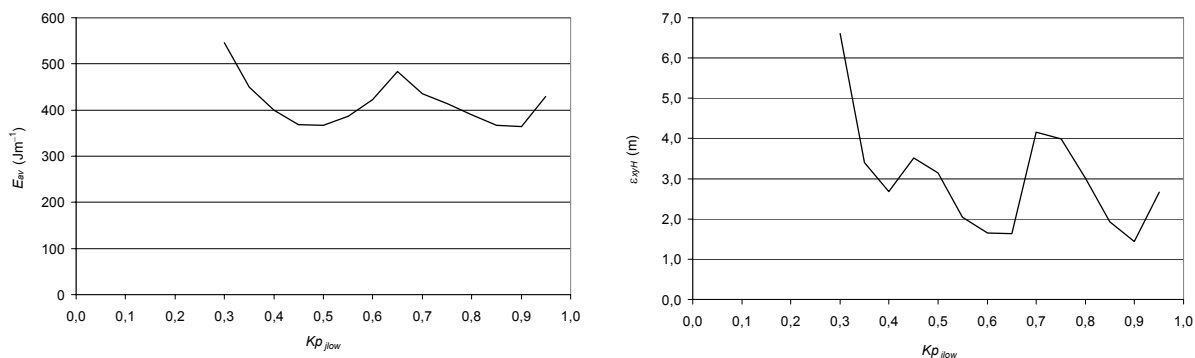


Figura 5.23: E_{av} e E_{xyH} vs. Kp_{jlow} para $\{Kp_{jhigh}, y_{iF0}\} = \{0,9; 0,01\}$, com a arquitetura de controle PD-P&F e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

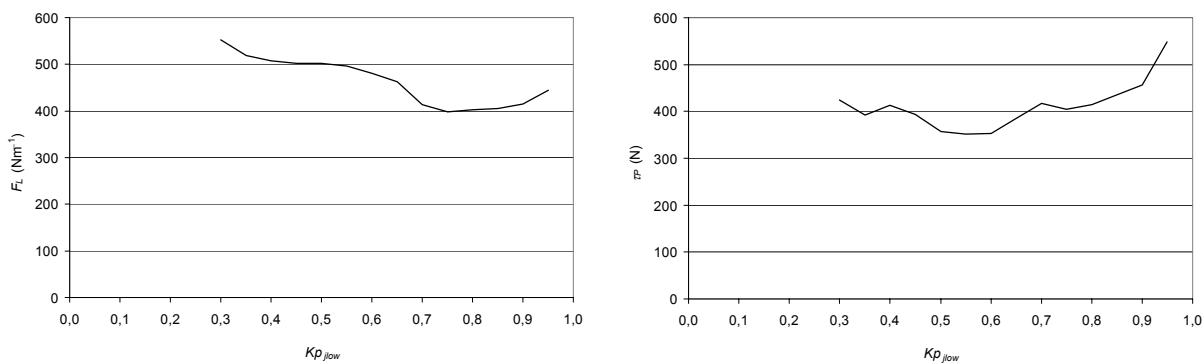


Figura 5.24: F_L e τ_p vs. Kp_{jlow} para $\{Kp_{jhigh}, y_{iF0}\} = \{0,9; 0,01\}$, com a arquitetura de controle PD-P&F e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

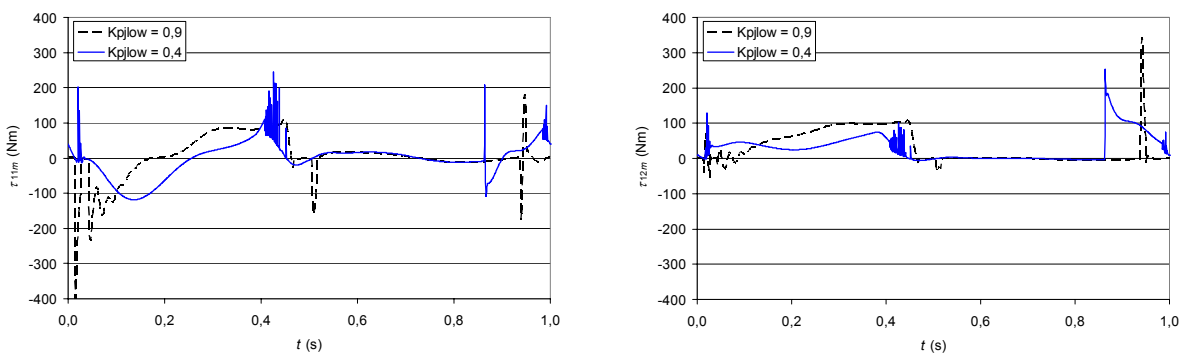


Figura 5.25: Binários τ_{11m} e τ_{12m} vs. t para $\{Kp_{jhigh}, y_{iF0}\} = \{0,9; 0,01\}$, com a arquitetura de controle PD-P&F e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

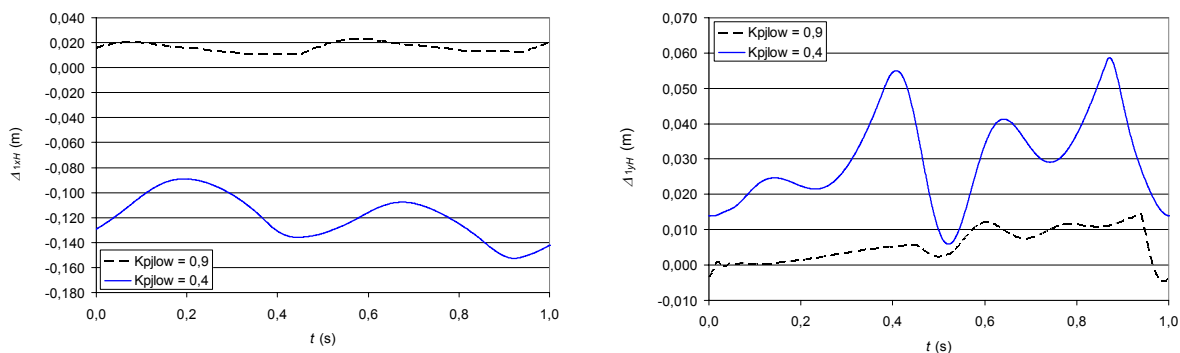


Figura 5.26: Erros de seguimento das trajectórias das ancas Δ_{1xH} e Δ_{1yH} vs. t para $\{K_{p_{jhigh}}, y_{iF0}\} = \{0,9; 0,01\}$, com a arquitectura de controlo PD-P&F e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

Foram ainda estudadas outras soluções para minimizar os efeitos dos elevados valores das forças de impacto do pé com o solo. Nomeadamente, analisou-se o efeito da introdução de uma saturação e de um filtro passa-baixo na malha de realimentação da força do pé. Os resultados obtidos com estas soluções não se mostraram tão encorajadores. Verifica-se que os melhores resultados são obtidos com o esquema adaptativo, descrito acima, e que a utilização dum bloco de filtragem na malha de realimentação de força leva aos piores desempenhos.

Em conclusão, a malha de realimentação de força com uma redução dos ganhos proporcionais na malha directa durante a fase de suporte, parece essencial para estabelecer um controlo robusto durante a locomoção e, simultaneamente, permitir a acomodação aos fenómenos de interacção pé-solo.

5.2.4.8 Discussão dos Resultados e Conclusões

Nesta secção comparou-se o desempenho de algoritmos de controlo PD com realimentação de posição ou posição e força, em robôs hexápodes, para vários parâmetros de locomoção. Mais ainda, avaliou-se a forma como as diferentes arquitecturas de controlo respondem a actuadores não ideais nas juntas, nomeadamente com saturação, e propriedades dinâmicas do solo variáveis.

As experiências mostram que a arquitectura de controlo PD-P&F (controlador em cascata) é superior ao esquema de controlo clássico PD-P, do ponto de vista dos índices propostos. Além disso, as simulações mostram que o controlador em cascata, com a realimentação da força pé-solo e uma redução dos ganhos proporcionais na malha directa de força durante a fase de suporte (PD-P&Fv), consegue desempenhos superiores.

5.3 Controlo de Ordem Inteira e Não Inteira das Juntas das Pernas do Robô

A aplicação da teoria do cálculo fraccionário à robótica encontra-se ainda num estágio embrionário, mas os progressos recentes nesta área têm mostrado aspectos promissores para desenvolvimentos futuros (Machado e Azenha, 1998; Silva, *et al.*, 2003; Ferreira e Machado, 2003). Assim, após ter-se visto que a arquitectura PD-P&F é preferível face à PD-P, nesta secção estuda-se a utilização de vários controladores em $G_{c1}(s)$, comparando-se algoritmos de ordem inteira e de ordem fraccionária (OF). O objectivo é estudar o desempenho do algoritmo Proporcional e Derivativo de ordem inteira (PD¹) comparativamente aos esquemas de OF (PD ^{α} , $\alpha \in \mathfrak{R}$).

O comportamento dos algoritmos de controlo é analisado para situações onde os accionamentos das juntas apresentam saturação, atrito viscoso, flexibilidade e folga. O desempenho da locomoção é avaliada, não somente através dos índices dinâmicos que têm vindo a ser utilizados, mas também através da margem de fase determinada a partir do traçado de Nyquist.

Diversas simulações revelam o desempenho superior do controlador de ordem fraccionária, em termos da margem de fase, seja para o caso de variação do ganho devido à saturação dos actuadores, seja para o caso de transmissões nas juntas não ideais (devido a atrito viscoso e flexibilidade) sem variação significativa dos índices de desempenho.

5.3.1 Arquitectura de Controlo Adoptada Para as Juntas das Pernas do Robô

A arquitectura de controlo genérica adoptada para o robô hexápode encontra-se representada na Figura 5.5 (PD-P&F) onde se avalia o efeito de diferentes algoritmos de controlo em $G_{c1}(s)$. Assim, para este controlador adopta-se quer um algoritmo PD de ordem inteira, quer um de OF, enquanto que para $G_{c2}(s)$ se considera um simples controlador proporcional (P).

Para o caso de ordem inteira adopta-se um algoritmo PD¹, tal como indicado na equação (5.2), enquanto que para o caso de OF se adopta um algoritmo proporcional e derivativo PD ^{α} definido como:

$$G_{c1j}(s) = Kp_j + K\alpha_j s^{\alpha_j}, \quad \alpha_j \in \mathfrak{R}, \quad j = 1, 2 \quad (5.2)$$

onde Kp_j e $K\alpha_j$ são, respectivamente, os ganhos proporcional e derivativo, α_j é a ordem de diferenciação fraccionária e j a junta. Portanto, o algoritmo clássico PD¹ na equação (5.2) ocorre quando $\alpha_j = 1,0$ ao passo que se obtém para $\alpha_j = 0,0$ um controlador P.

No que diz respeito à equação (5.2) deve-se referir que a definição matemática de uma derivada de ordem fraccionária tem sido objecto de várias aproximações diferentes (Machado, 1997). Por exemplo, as equações (5.3) e (5.4), representam as definições de Laplace (para condições iniciais nulas) e de Grünwald-Letnikov da derivada fraccionária de ordem α do sinal $x(t)$.

$$D^\alpha[x(t)] = L^{-1}\{s^\alpha X(s)\} \quad (5.3a)$$

$$D^\alpha[x(t)] = \lim_{h \rightarrow 0} \left[\frac{1}{h^\alpha} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k \Gamma(\alpha+1)}{\Gamma(k+1)\Gamma(\alpha-k+1)} x(t-kh) \right] \quad (5.3b)$$

onde Γ é a função gama e h é o incremento de tempo.

Neste trabalho, para implementar o algoritmo de OF (5.2), é adoptada uma aproximação de Padé discreta de quarta ordem no numerador e denominador ($a_{ij}, b_{ij} \in \mathfrak{R}, j = 1,2$) resultando uma equação no domínio z do tipo (Chen e Moore, 2002; Barbosa, *et al.*, 2004):

$$G_{C1j}(z) \approx K_{\alpha_j} \sum_{u=0}^{u=4} a_{ij} z^{-u} \Big/ \sum_{u=0}^{u=4} b_{ij} z^{-u} \quad (5.4)$$

onde K_{α_j} é o ganho do controlador.

A Tabela 5.4 apresenta os coeficientes da aproximação de Padé para os casos relevantes para os estudos apresentados nesta secção ($\alpha_j = \{0,5; 0,7; 0,8; 0,9\}$).

5.3.2 Cálculo da Margem de Fase Baseada no Diagrama de Nyquist

Para além dos índices dinâmicos que têm vindo a ser utilizados, nesta secção considera-se como medida do desempenho do controlador a margem de fase (MF) baseada no traçado de Nyquist. Uma vez que este sistema MIMO apresenta acoplamento entre as variáveis das

juntas das pernas, adopta-se o diagrama de blocos da Figura 5.27 para a sua representação aproximada².

Tabela 5.4: Coeficientes da aproximação de Padé para $\alpha_j = \{0,5; 0,7; 0,8; 0,9\}$.

$\alpha_j = 0.5$	a_{ij0}	1.00000000000000	b_{ij0}	1.00000000000000
	a_{ij1}	-2.25000000000000	b_{ij1}	-1.75000000000000
	a_{ij2}	1.68750000000000	b_{ij2}	0.93750000000000
	a_{ij3}	-0.46875000000000	b_{ij3}	-0.15625000000000
	a_{ij4}	0.03515625000000	b_{ij4}	0.00390625000000
$\alpha_j = 0.7$	a_{ij0}	1.00000000000000	b_{ij0}	1.00000000000000
	a_{ij1}	-2.34999999999996	b_{ij1}	-1.64999999999996
	a_{ij2}	1.86321428571421	b_{ij2}	0.81321428571424
	a_{ij3}	-0.55896428571424	b_{ij3}	-0.11746428571427
	a_{ij4}	0.04751196428571	b_{ij4}	0.00176196428571
$\alpha_j = 0.8$	a_{ij0}	1.00000000000000	b_{ij0}	1.00000000000000
	a_{ij1}	-2.40000000000002	b_{ij1}	-1.60000000000002
	a_{ij2}	1.95428571428576	b_{ij2}	0.75428571428574
	a_{ij3}	-0.60800000000003	b_{ij3}	-0.10057142857144
	a_{ij4}	0.05472000000000	b_{ij4}	0.00100571428571
$\alpha_j = 0.9$	a_{ij0}	1.00000000000000	b_{ij0}	1.00000000000000
	a_{ij1}	-2.45000000000019	b_{ij1}	-1.55000000000019
	a_{ij2}	2.04750000000040	b_{ij2}	0.69750000000022
	a_{ij3}	-0.65975000000025	b_{ij3}	-0.08525000000006
	a_{ij4}	0.06267625000005	b_{ij4}	0.00042625000000

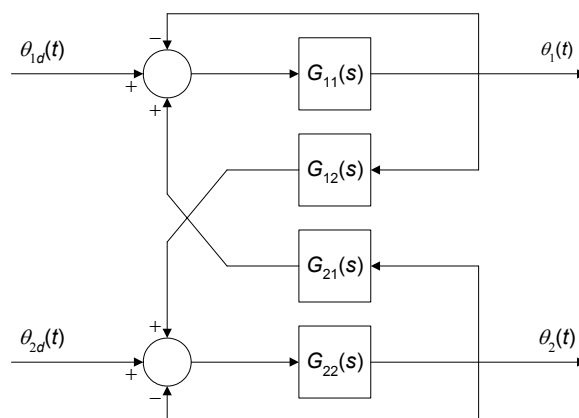


Figura 5.27: Diagrama de blocos MIMO do sistema robótico de locomoção ao nível das juntas das pernas.

² Foi também experimentado um diagrama de blocos em que os acoplamentos entre as variáveis das juntas das pernas eram por avanço, mas os resultados, em termos da determinação da MF, eram mais fracos.

A equação característica correspondente ($G(j\omega)$) resulta:

$$G(j\omega) = 1 + G_{11} + G_{22} + G_{11}G_{22} - G_{11}G_{12}G_{21}G_{22} \quad (5.5)$$

em que G_{12} e G_{21} representam as funções de transferência correspondentes aos acoplamentos por realimentação entre as posições das juntas das pernas.

5.3.3 Sintonia dos Controladores de Ordem Fraccionária

O primeiro passo é a sintonia dos controladores, para o que se recorre à estratégia referida na subsecção 5.2.1. Tal como nas situações anteriores, durante a sintonia dos controladores consideram-se juntas ideais e actuadores quase ideais (o binário máximo dos actuadores em (3.10) é $\tau_{ijMax} = 400$ Nm). Neste processo, toma-se inicialmente o intervalo $-2,0 \leq \alpha_j \leq 1,0$ para a ordem fraccionária. No entanto, verifica-se que para $-2,0 \leq \alpha_j \leq -1,1$ o controlador PD^α é instável pelo que, na realidade, só se usa o intervalo $-1,0 \leq \alpha_j \leq 1,0$.

Seleccionando o conjunto de parâmetros que resulta de um compromisso entre a minimização dos índices de desempenho E_{av} (3.20) e ε_{xyH} (3.25a), obtém-se os valores apresentados na Tabela 5.5, para um controlador proporcional G_{c2} com ganho $Kp_j = 0,9$ ($j = 1, 2$). Da análise dos resultados, conclui-se que para $-1,0 \leq \alpha_j \leq 0,3$ o desempenho do controlador é fraco, com o robô a apresentar grandes erros de seguimento das trajectórias durante a locomoção.

Tendo por base estes valores dos parâmetros dos controladores, nas subsecções seguintes desenvolve-se um conjunto de simulações para comparar o desempenho dos controladores durante a locomoção com o padrão PLO aquando da existência de diferentes fenómenos dinâmicos nas juntas das pernas do hexápode.

5.3.4 Comparação de Controladores de Ordem Inteira e Fraccionária

De forma a efectuar uma comparação adequada dos algoritmos PD^1 e PD^α , e para reduzir a extensão da análise, só se considera aqui o caso $\alpha_j = 0,5$, uma vez que é em redor deste valor que se obtêm as sintonias dos controladores com o melhor valor dos índices E_{av} e ε_{xyH} (Tabela 5.5). Para esta situação, os controladores PD^1 e $PD^{0,5}$ apresentam valores semelhantes de E_{av} e

ε_{xyH} , sendo os binários nos actuadores das juntas (Figura 5.28) e os erros de seguimento das trajectórias das ancas (Figura 5.29) praticamente iguais.

Com estas sintonias, analisa-se o desempenho do sistema para os três tipos de fenómenos dinâmicos nas juntas, nomeadamente o atrito viscoso, a flexibilidade e a folga. Portanto, consideram-se primeiro transmissões das juntas ideais e, posteriormente, generaliza-se o modelo incluindo atrito viscoso, flexibilidade e folga. O desempenho dos dois controladores é avaliado para os três casos, do ponto de vista dos índices dinâmicos propostos, considerando diferentes níveis de saturação. Numa primeira fase, considera-se o controlador PD¹ e diferentes valores de τ_{ijMax} , de forma a observar a sua influência sobre os índices de desempenho e, numa segunda fase, repetem-se as experiências para o caso do controlador PD^{0,5}.

Tabela 5.5: Parâmetros do controlador $G_{c1}(s)$, quando se estabelece um compromisso entre a minimização de E_{av} e ε_{xyH} , com $G_{c2}(s) = 0,9$.

Ordem Fraccionária	Junta $j = 1$		Junta $j = 2$		Índices de Desempenho	
	Kp_1	$K\alpha_1$	Kp_2	$K\alpha_2$	E_{av}	ε_{xyH}
$\alpha_j = -1,0$	5000,0	0,0	1000,0	60,0	816,51	1,11
$\alpha_j = -0,9$	2500,0	6000,0	800,0	800,0	703,51	0,98
$\alpha_j = -0,8$	3000,0	0,0	1000,0	1000,0	752,72	0,89
$\alpha_j = -0,7$	2500,0	750,0	750,0	800,0	766,05	1,04
$\alpha_j = -0,6$	3000,0	500,0	1250,0	200,0	982,83	0,92
$\alpha_j = -0,5$	2000,0	1000,0	1000,0	0,0	742,00	0,93
$\alpha_j = -0,4$	3000,0	500,0	750,0	200,0	852,49	0,97
$\alpha_j = -0,3$	3500,0	500,0	750,0	0,0	675,03	1,03
$\alpha_j = -0,2$	2500,0	250,0	750,0	200,0	909,47	1,25
$\alpha_j = -0,1$	3000,0	500,0	1000,0	0,0	728,19	1,19
$\alpha_j = 0,0$	3600,0	0,0	800,0	0,0	700,52	1,09
$\alpha_j = 0,1$	0,0	4500,0	0,0	500,0	491,62	0,93
$\alpha_j = 0,2$	5000,0	3000,0	0,0	500,0	488,06	0,95
$\alpha_j = 0,3$	7000,0	0,0	0,0	500,0	441,78	0,97
$\alpha_j = 0,4$	10000,0	10000,0	0,0	1000,0	380,74	0,70
$\alpha_j = 0,5$	8000,0	6500,0	2000,0	500,0	379,68	0,74
$\alpha_j = 0,6$	2000,0	7000,0	4000,0	0,0	391,66	0,71
$\alpha_j = 0,7$	8000,0	4000,0	4000,0	0,0	386,49	0,70
$\alpha_j = 0,8$	2000,0	1500,0	4000,0	0,0	391,62	0,73
$\alpha_j = 0,9$	5000,0	1000,0	5000,0	0,0	398,61	0,76
$\alpha_j = 1,0$	1500,0	300,0	4000,0	10,0	373,74	0,73

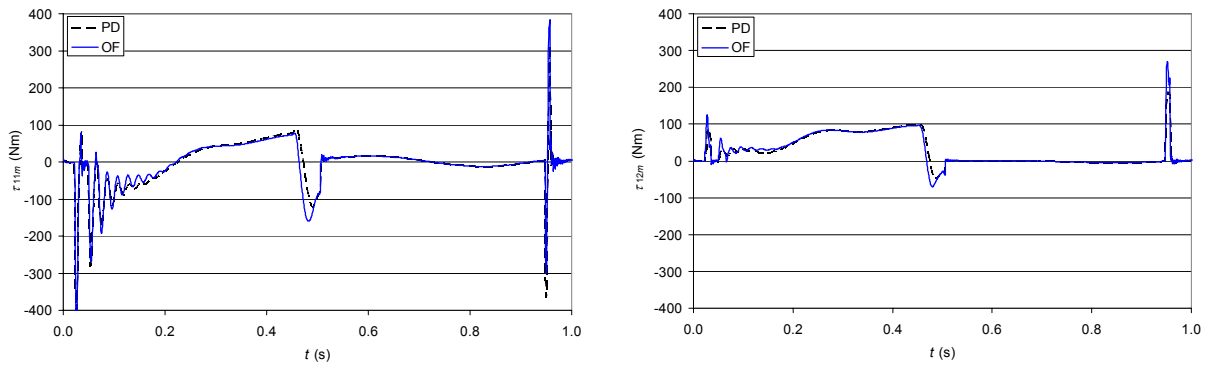


Figura 5.28: Binários nos actuadores das juntas τ_{11m} e τ_{12m} vs. t , para os algoritmos de controlo PD¹ e PD^{0,5}, considerando juntas ideais e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

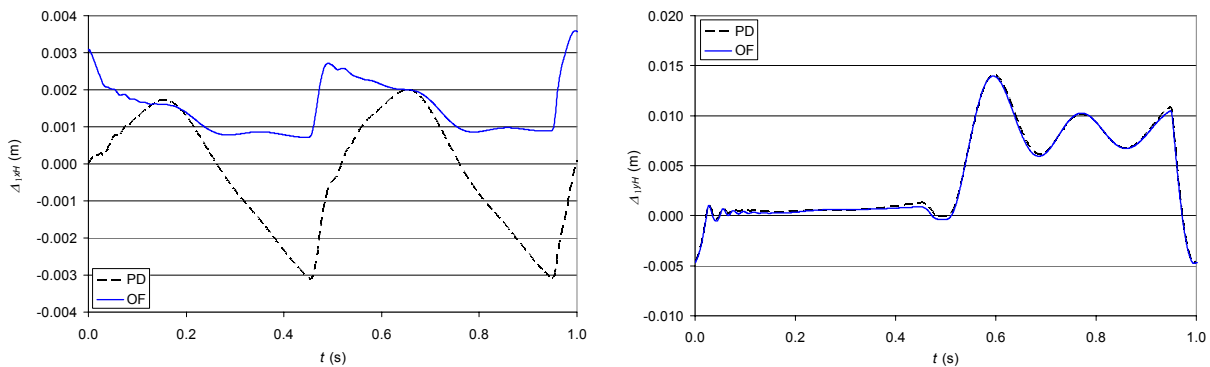


Figura 5.29: Erros de seguimento das trajectórias das ancas Δ_{1xH} e Δ_{1yH} vs. t , para os algoritmos de controlo PD¹ e PD^{0,5}, considerando juntas ideais e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

5.3.4.1 Análise Através dos Índices Dinâmicos

A variação dos índices de desempenho E_{av} , ε_{xyH} , T_L e τ_P com τ_{ijMax} encontra-se representada nas Figuras 5.30 e 5.31, para o caso da transmissão ideal.

Como apreciação global pode afirmar-se que cada um dos controladores apresenta zonas de desempenho onde é superior, do ponto de vista de cada um dos índices utilizados. No caso de saturação forte dos actuadores (*i.e.*, $\tau_{ijMax} < 150$ Nm) os índices apresentam uma forte degradação, com dificuldades para ambos os algoritmos PD¹ e PD^{0,5}. Por outro lado, como seria de esperar, os erros de seguimento das trajectórias das ancas (e também os dos pés) do robô variam inversamente com o máximo binário dos actuadores.

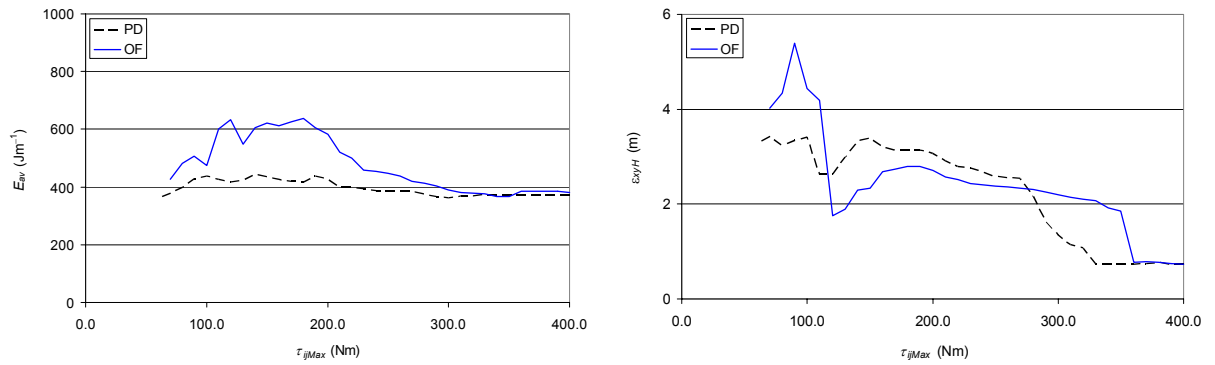


Figura 5.30: E_{av} e ϵ_{xyH} vs. τ_{ijMax} para os algoritmos de controlo PD¹ e PD^{0,5}, considerando juntas ideais.

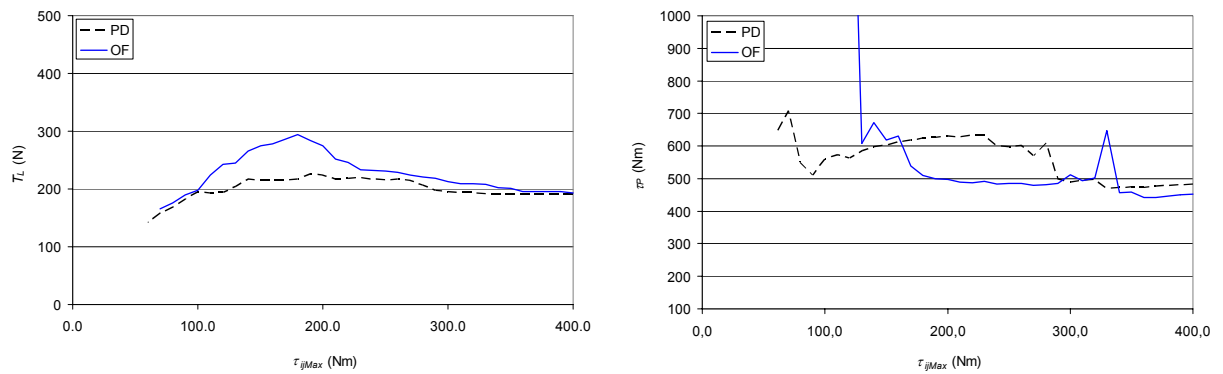


Figura 5.31: T_L e τ_P vs. τ_{ijMax} para os algoritmos de controlo PD¹ e PD^{0,5}, considerando juntas ideais.

Analisando em detalhe a situação de juntas ideais, verifica-se que do ponto de vista de E_{av} e T_L , o algoritmo PD¹ é o preferível para $G_{c1}(s)$, em toda a gama de variação τ_{ijMax} analisada. Estes índices não apresentam variação significativa para níveis moderados de saturação (*i.e.*, $\tau_{ijMax} > 200$ Nm) mostrando um ligeiro aumento, mais acentuado para o PD^{0,5}, para $100 < \tau_{ijMax} < 200$ Nm.

Por outro lado, os índices de desempenho ϵ_{xyH} e τ_P mostram uma variação mais complexa com τ_{ijMax} . Para níveis moderados de saturação (*i.e.*, $120 < \tau_{ijMax} < 280$ Nm) o algoritmo PD^{0,5} é superior ao esquema PD¹, quando se analisa o desempenho através de ϵ_{xyH} . Já o índice τ_P aponta como óptimo a utilização do controlador PD¹ para situações de forte saturação dos actuadores (*i.e.*, $\tau_{ijMax} < 120$ Nm) e a utilização do controlador PD^{0,5} no restante intervalo de τ_{ijMax} em análise.

Tabela 5.6: Parâmetros base para o modelo considerando atrito não linear nas juntas.

Parâmetros do modelo do robô			
τ_{ijae}	1,0 Nm	τ_{ijac}	0,5 Nm
$\dot{\theta}_{ijae}$	0,001 rads ⁻¹	B_{ijav}	0,1 Nmrad ⁻¹ s

No caso de saturação forte dos actuadores (*i.e.*, $\tau_{ijMax} < 120$ Nm) estes índices apresentam uma forte degradação (bem patente no gráfico de ε_{xyH}), com dificuldades para ambos os algoritmos, mas de forma mais acentuada no caso do esquema PD^{0,5}. No entanto, esta situação não é realista uma vez que corresponde a condições de operação que solicitam níveis de binário muito superiores aos estabelecidos pelo nível de saturação.

Os índices D_{av} e F_L apresentam um comportamento muito aproximado, em todo o intervalo de τ_{ijMax} estudado e, por motivos de espaço, não são representados.

A segunda situação consiste no modelo dos actuadores incluir um atrito não linear, conforme descrito pela expressão (3.11). Considera-se os valores indicados na Tabela 5.6 para os parâmetros de base deste modelo, nomeadamente, para os binários de atrito estático τ_{ijae} , os binários de atrito de Coulomb τ_{ijac} , as velocidades limite do atrito estático $\dot{\theta}_{ijae}$ e os coeficientes de atrito viscoso B_{ijav} ($i = 1, \dots, n; j = 1, 2$).

O desempenho de ambos os controladores é avaliado na situação em que se variam os valores dos parâmetros que especificam as características do atrito não linear, face aos valores de base. Para o efeito, os valores de τ_{ijae} , τ_{ijac} e B_{ijav} , são multiplicados simultaneamente por um factor (K_{mult}), mantendo-se fixo o valor da velocidade limite do atrito estático $\dot{\theta}_{ijae}$, e considerando diferentes níveis de saturação.

O controlador PD^{0,5} apresenta valores de E_{av} praticamente idênticos em toda a gama de variação de K_{mult} que mantém a locomoção estável. Por seu lado, para os índices D_{av} , T_L , F_L e ε_{xyH} este controlador garante melhor desempenho em toda a gama de K_{mult} , sendo a diferença entre os dois esquemas de controlo menos pronunciada para valores reduzidos de τ_{ijMax} . As Figuras 5.32 e 5.33, que apresentam a variação dos índices E_{av} e ε_{xyH} , respectivamente para os casos de $\tau_{ijMax} = 400$ Nm e $\tau_{ijMax} = 200$ Nm, ilustram o que acaba de ser apontado. Da sua observação conclui-se, também, que o algoritmo de controlo PD^{0,5} mantém a estabilidade do sistema numa gama mais alargada de valores do coeficiente multiplicativo K_{mult} .

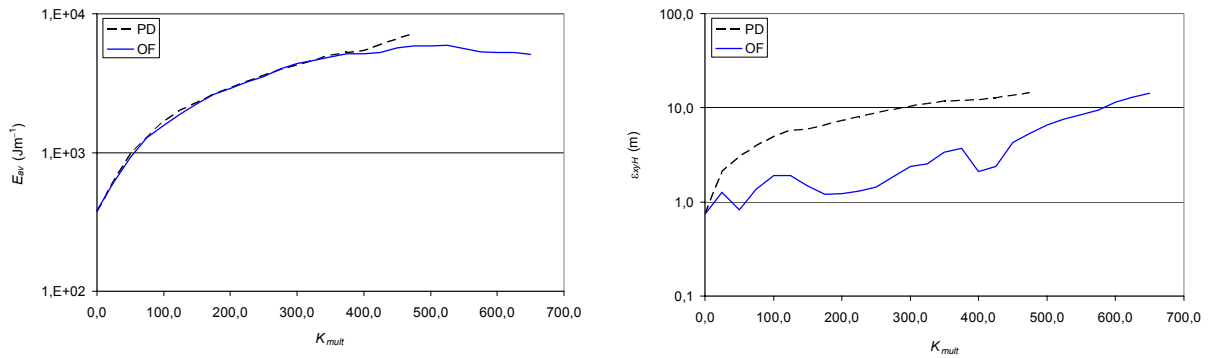


Figura 5.32: E_{av} e ε_{xyH} vs. K_{mult} para os algoritmos de controlo PD¹ e PD^{0,5}, considerando atrito não linear nas juntas e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

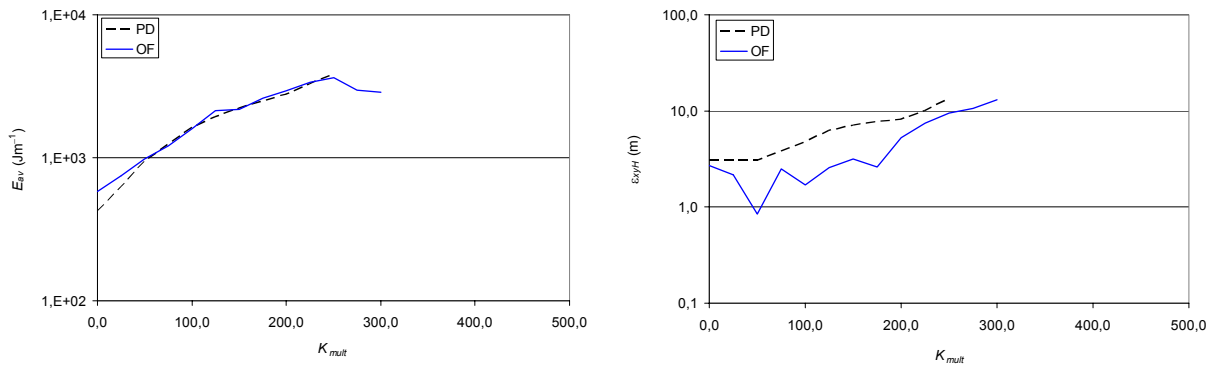


Figura 5.33: E_{av} e ε_{xyH} vs. K_{mult} para os algoritmos de controlo PD¹ e PD^{0,5}, considerando atrito não linear nas juntas e $\tau_{ijMax} = 200$ Nm.

Quanto ao índice τ_P , este mostra um comportamento mais complexo (Figura 5.34). Do ponto de vista de τ_P , o controlador PD^{0,5} é preferível para valores baixos dos binários de atrito, enquanto que o de ordem inteira PD¹ deve ser adoptado quando estes valores são elevados. O valor limite de K_{mult} para o qual muda o desempenho relativo entre os dois algoritmos, na perspectiva de τ_P , é tanto menor quanto maior o nível de saturação dos actuadores.

De seguida, para além de se considerar que os actuadores incluem atrito viscoso, considera-se que também as transmissões das juntas são não ideais, apresentando flexibilidade, tal como descrito nas expressões (3.12a) e (3.12b). Os valores base dos parâmetros deste modelo, nomeadamente, os coeficientes de atrito viscoso (B_{ijm}) e de elasticidade (K_{ijT}) dos motores e das transmissões e para as inércias dos actuadores e transmissões (J_{ijm}) ($i = 1, \dots, n; j = 1, 2$), são os indicados na Tabela 5.7.

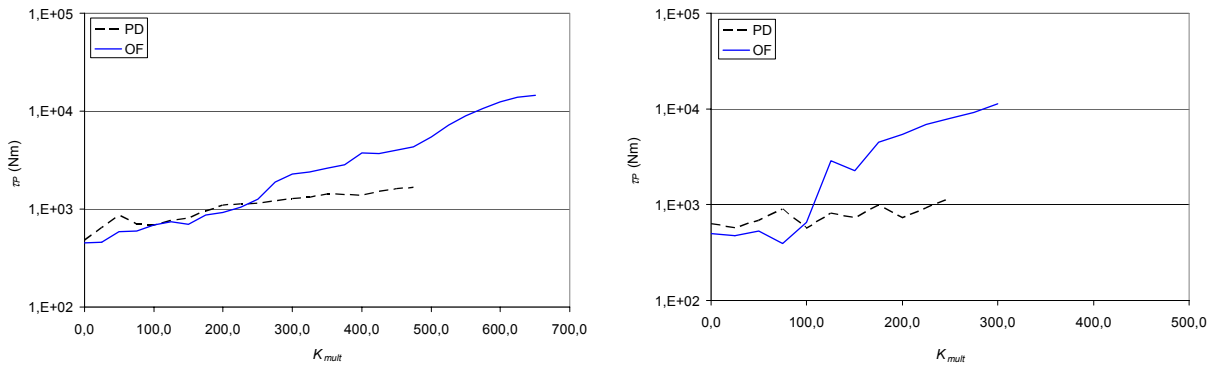


Figura 5.34: τ_p vs. K_{mult} para os algoritmos de controlo PD¹ e PD^{0,5}, considerando atrito não linear nas juntas, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm (esquerda) e $\tau_{ijMax} = 200$ Nm (direita).

Tabela 5.7: Parâmetros base para o modelo considerando atrito nos actuadores e flexibilidade nas transmissões das juntas.

Parâmetros do modelo do robô			
B_{ijm}	10,0 Nmrad ⁻¹ s	K_{ijT}	10 ⁵ Nmrad ⁻¹
J_{i1m}	$3,75 \times 10^{-3}$ kgm ²	J_{i2m}	$6,25 \times 10^{-4}$ kgm ²

O desempenho de ambos os controladores é avaliado em dois casos. No primeiro caso, é variado o valor de B_{ijm} mantendo os restantes parâmetros do modelo fixos. No segundo caso, analisa-se o comportamento do sistema face à variação de K_{ijT} , mantendo todos os outros parâmetros iguais ao seu valor de base. Estes dois casos em análise são repetidas considerando diferentes níveis de saturação dos motores das juntas.

Para o primeiro caso em estudo, o algoritmo PD¹ apresenta os valores inferiores de todos os índices dinâmicos, no intervalo de variação de B_{ijm} em que a locomoção se efectua de forma estável. A situação contrária verifica-se para o índice ε_{xyH} , como pode ser visto na Figura 5.35. O comportamento descrito mantém-se para diferentes níveis de saturação dos actuadores das juntas.

Quanto ao segundo caso, relativo à variação de K_{ijT} , constata-se que o sistema apresenta o mesmo comportamento que face à variação de B_{ijm} (e que foi descrito no parágrafo anterior). Isto pode ser observado na Figura 5.36 que mostra (a título de exemplo) a variação dos índices E_{av} e ε_{xyH} com K_{ijT} considerando $\tau_{ijMax} = 200$ Nm.

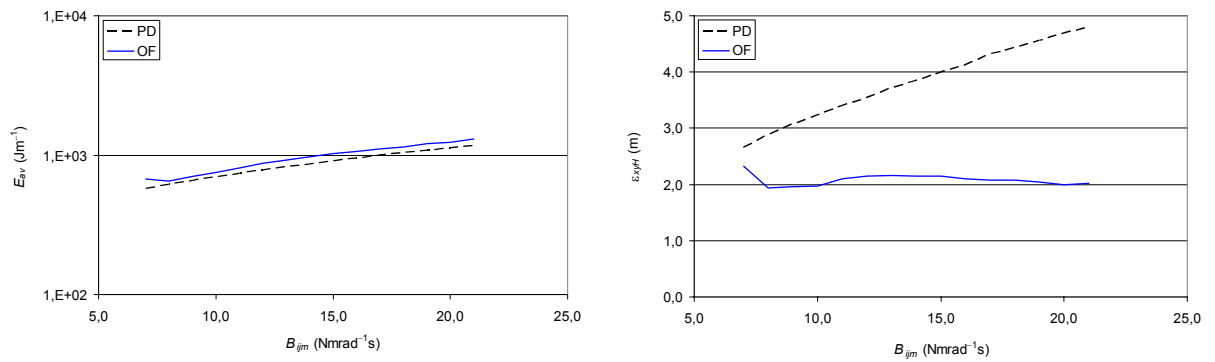


Figura 5.35: E_{av} e ε_{xyH} vs. B_{ijm} para os algoritmos de controlo PD¹ e PD^{0,5}, considerando atrito nos actuadores e flexibilidade nas transmissões das juntas e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

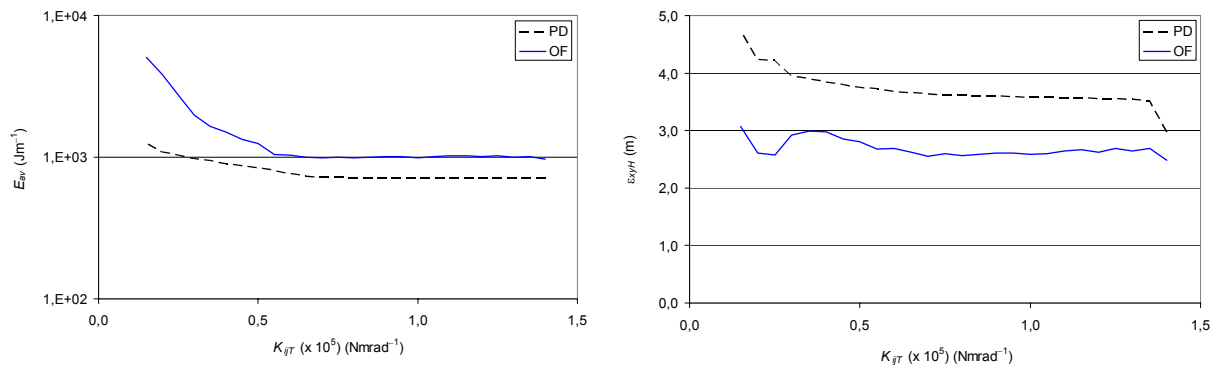


Figura 5.36: E_{av} e ε_{xyH} vs. K_{ijT} para os algoritmos de controlo PD¹ e PD^{0,5}, considerando atrito nos actuadores e flexibilidade nas transmissões das juntas e $\tau_{ijMax} = 200$ Nm.

Num quarto conjunto de experiências considera-se que o modelo dos actuadores e das transmissões das juntas inclui atrito viscoso, flexibilidade e folga, tal como descrito nas expressões (3.13a) a (3.13d). Os valores base dos parâmetros deste modelo, nomeadamente, os coeficientes de atrito viscoso dos motores (B_{ijm}) e das transmissões (B_{ijT}) e de elasticidade das transmissões (K_{ijT}), as inércias dos actuadores (J_{ijm}) e das transmissões (J_{ijT}), a folga (h_{ij}) e o coeficiente de restituição (ε_{ij}) ($i = 1, \dots, n; j = 1, 2$), são os indicados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Parâmetros base para o modelo considerando atrito nos actuadores e atrito, folga e flexibilidade nas transmissões das juntas.

Parâmetros do modelo do robô			
B_{ijm}	10,0 Nmrads ⁻¹ s	J_{i2m}	$6,25 \times 10^{-4}$ kgm ²
J_{i1m}	$3,75 \times 10^{-3}$ kgm ²	B_{ijT}	10,0 Nmrads ⁻¹ s
K_{ijT}	10^5 Nmrads ⁻¹	ε_{ij}	0,8
h_{ij}	$1,0 \times 10^{-3}$ rad	J_{i2T}	$3,125 \times 10^{-4}$ kgm ²
J_{i1T}	$1,875 \times 10^{-3}$ kgm ²		

O comportamento das arquitecturas de controlo PD de ordens inteira e fraccionária, é analisado para três casos. No primeiro destes, varia-se o valor dos coeficientes de elasticidade das transmissões (K_{ijT}). De seguida, estuda-se o comportamento do sistema face à variação da abertura da folga (h_{ij}). No terceiro caso analisa-se o desempenho do sistema para diferentes valores do coeficiente de restituição (ε_{ij}). Para cada um dos casos anteriores, durante a realização das experiências mantêm-se os restantes parâmetros do modelo fixos. Estes três casos são repetidos considerando diferentes níveis de saturação dos motores das juntas.

Para o primeiro caso, o controlador PD¹ apresenta valores inferiores dos índices de desempenho E_{av} e τ_P e valores superiores de ε_{xyH} (Figura 5.37), quando comparado com o controlador PD^{0,5}, em todo o intervalo de variação da flexibilidade K_{ijT} , independentemente do nível de saturação dos actuadores. Já os restantes índices apresentam um comportamento diferente do que ocorreu quando não se considerou folga nas transmissões das juntas. Assim, do ponto de vista dos índices D_{av} , T_L e F_L o controlador PD¹ é preferível para reduzidos valores do coeficiente de elasticidade K_{ijT} , e o algoritmo PD^{0,5} para valores elevados deste parâmetro, como pode ser visto nas Figuras 5.37 e 5.38. O mesmo é dizer que o controlador de ordem inteira é superior quando as transmissões das juntas apresentam flexibilidade acentuada. No entanto, o valor limite de K_{ijT} , para o qual se assiste a esta mudança de desempenho relativo, varia com o índice considerado, sendo mais elevado para o caso de D_{av} e mais reduzido para F_L .

O desempenho relativo dos controladores, com a variação de K_{ijT} , é similar para diferentes valores de τ_{ijMax} , do ponto de vista das diferentes medidas de desempenho consideradas nesta análise.

A mesma conclusão é válida para toda a gama de valores da largura da folga h_{ij} (Figura 5.39) que mantêm a locomoção estável.

A variação dos índices de desempenho com o coeficiente de restituição ε_{ij} conduz a conclusões ligeiramente diferentes. Analisando o desempenho através dos índices E_{av} , D_{av} e T_L , conclui-se que o algoritmo de controlo PD¹ é o melhor em todo o intervalo de variação de ε_{ij} , como pode ser visto na Figura 5.40 (para E_{av}). Já do ponto de vista de F_L e ε_{xyH} conclui-se que se deve recorrer ao controlador PD^{0,5}. Por seu lado, o índice τ_P mostra comportamentos muito aproximados para os dois algoritmos de controlo.

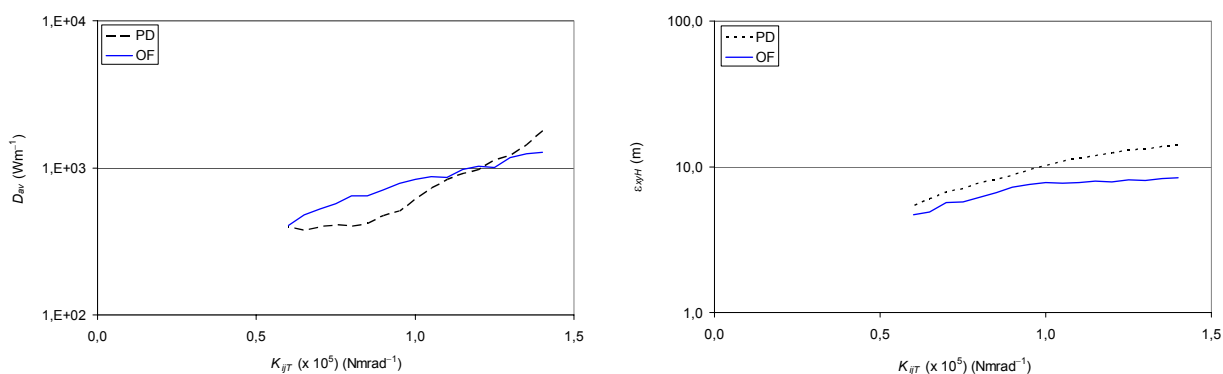


Figura 5.37: D_{av} e ε_{xyH} vs. K_{ijT} para os algoritmos de controlo PD¹ e PD^{0,5}, considerando atrito nos actuadores e atrito, folga e flexibilidade nas transmissões das juntas e $\tau_{ijMax} = 100$ Nm.

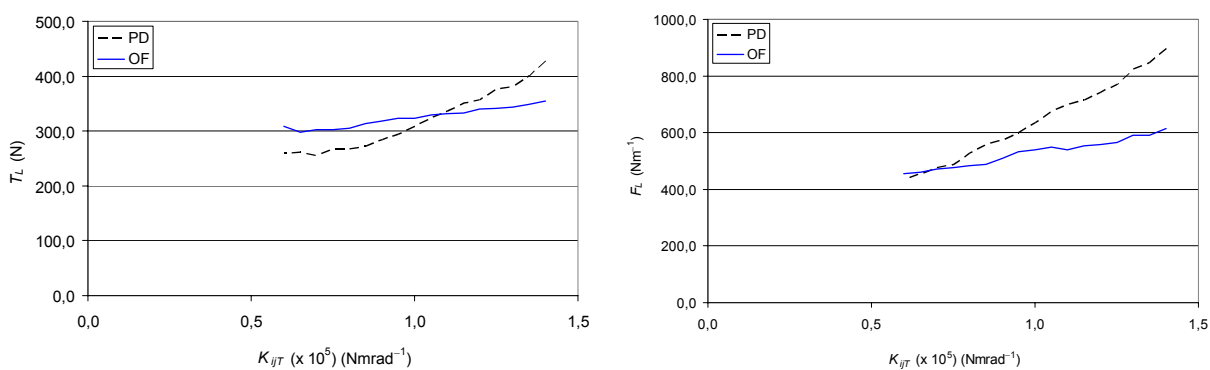


Figura 5.38: T_L e F_L vs. K_{ijT} para os algoritmos de controlo PD¹ e PD^{0,5}, considerando atrito nos actuadores e atrito, folga e flexibilidade nas transmissões das juntas e $\tau_{ijMax} = 100$ Nm.

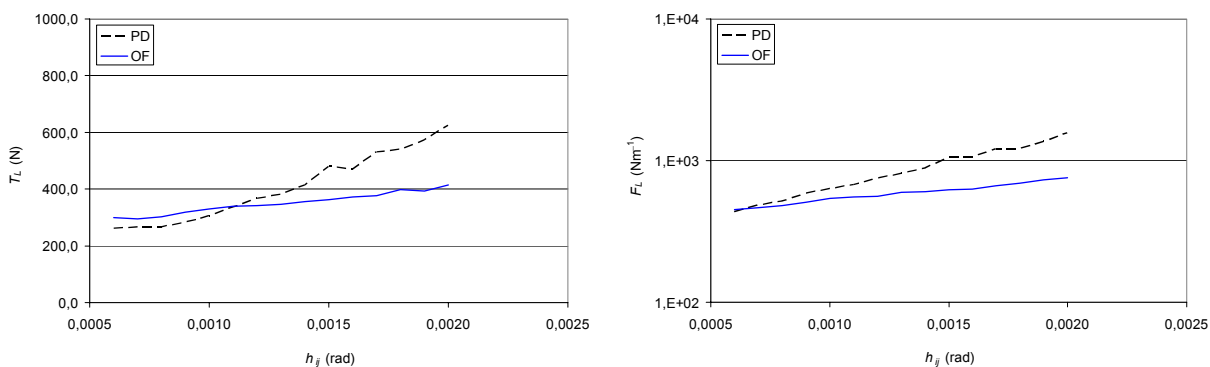


Figura 5.39: T_L e F_L vs. h_{ij} para os algoritmos de controlo PD¹ e PD^{0,5}, considerando atrito nos actuadores e atrito, folga e flexibilidade nas transmissões das juntas e $\tau_{ijMax} = 100$ Nm.

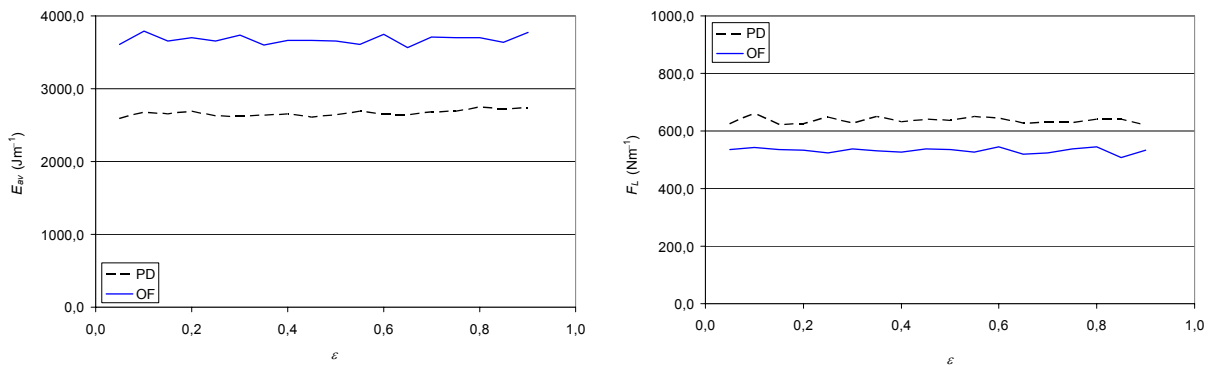


Figura 5.40: E_{av} e F_L vs. ε_{ij} para os algoritmos de controlo PD¹ e PD^{0,5}, considerando atrito nos actuadores e atrito, folga e flexibilidade nas transmissões das juntas e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

5.3.4.2 Análise Através da Margem de Fase

Apesar de não ser aqui apresentado, por limitações de espaço, verifica-se que a MF, calculada através do Diagrama de Nyquist, é superior para o caso do controlador de ordem inteira PD¹ nas situações de juntas ideais, juntas com saturação não linear e transmissões das juntas com flexibilidade. O desempenho relativo das duas implementações do controlador $G_{c1}(s)$, mantém-se considerando diferentes níveis de saturação.

No caso de se considerar que o modelo inclui atrito nos actuadores e atrito, folga e flexibilidade nas transmissões das juntas, não foi possível calcular a MF uma vez que os diagramas obtidos apresentavam muito ruído.

5.3.4.3 Discussão dos Resultados e Conclusões

Das experiências anteriores conclui-se que o controlador de ordem inteira PD¹ apresenta resultados superiores ao algoritmo de ordem fraccionária PD^{0,5}, do ponto de vista dos índices dinâmicos, na grande maioria das situações em que existe saturação dos actuadores e fenómenos dinâmicos nas juntas e transmissões. Já o controlador de ordem fraccionária garante, para as mesmas situações, erros inferiores de seguimento das trajectórias das ancas. Isto significa que, embora sintonizados para um desempenho semelhante numa situação ideal, cada um destes algoritmos apresenta, em condições reais de operação, desempenhos superiores quando se pretendem minimizar os efeitos dinâmicos ou os erros de seguimento das trajectórias.

No que concerne à margem de fase, o controlador de ordem inteira garante valores superiores desta métrica para as diversas situações analisadas.

5.3.5 Comparação de Controladores de Diferentes Ordens

Nesta subsecção estende-se o estudo dos algoritmos de controlo proporcionais e derivativos de ordem inteira e fraccionária, para a situação em que apresentam diferentes valores da ordem fraccionária.

Para facilitar a comparação, no caso do controlador PD^α utilizam-se para os ganhos valores idênticos aos estabelecidos para o caso do algoritmo PD^1 de ordem inteira (Tabela 5.5). Começa-se por considerar o intervalo $-2,0 \leq \alpha_j \leq 1,0$ para a ordem fraccionária, mas verifica-se que para $-2,0 \leq \alpha_j \leq -0,1$ o controlador PD^α (com ganhos iguais da sintonia para PD^1) é instável. Além disso, para $0,1 \leq \alpha_j \leq 0,3$ o desempenho do controlador é fraco, com o robô a apresentar grandes erros de seguimento das trajectórias durante a locomoção pelo que, de seguida, os valores de α_j ficam limitados ao intervalo $0,4 \leq \alpha_j \leq 1,0$.

Com estes parâmetros do controlador, analisa-se o desempenho do sistema para as diferentes implementações do algoritmo de controlo, considerando simultaneamente os efeitos dinâmicos nas juntas das pernas. Numa primeira fase, começa-se por estudar o caso das transmissões das juntas serem ideais e, depois, aumenta-se o modelo incluindo flexibilidade, de forma a observar a sua influência sobre as medidas de desempenho. Numa segunda fase, repetem-se as experiências com valores inferiores de τ_{ijMax} , para estudar o efeito de níveis crescentes de saturação dos actuadores. Por limitações de espaço, não é apresentado aqui o estudo para a situação em que as transmissões apresentam folga.

5.3.5.1 Análise Através dos Índices de Desempenho

Nesta subsecção, estuda-se o sistema do ponto de vista dos índices de desempenho dinâmicos formulados no Capítulo 3. Como anteriormente, começa-se por considerar transmissões ideais nas juntas, com um valor de $\tau_{ijMax} = 400$ Nm, e analisa-se o desempenho do sistema sob o controlo do algoritmo PD^α para diferentes valores de α_j .

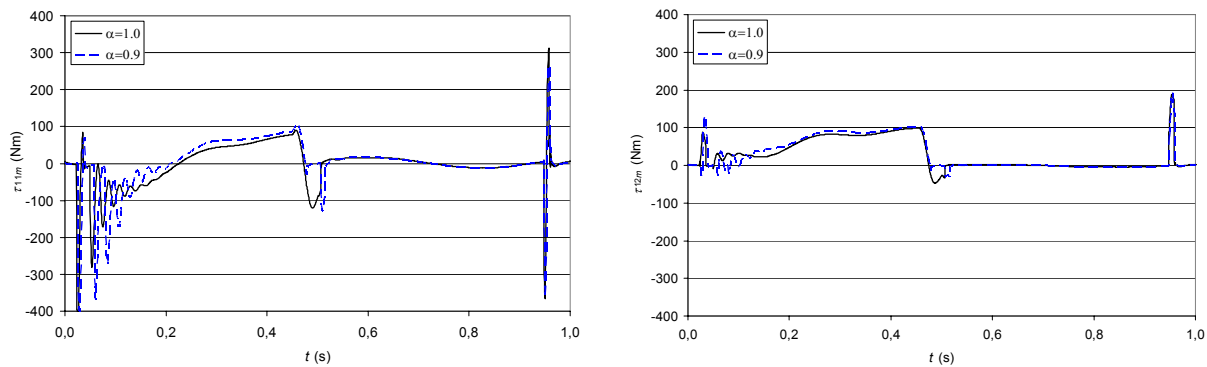


Figura 5.41: Binários nas juntas τ_{11m} e τ_{12m} vs. t para os controladores PD^1 e $PD^{0,9}$ considerando juntas ideais e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

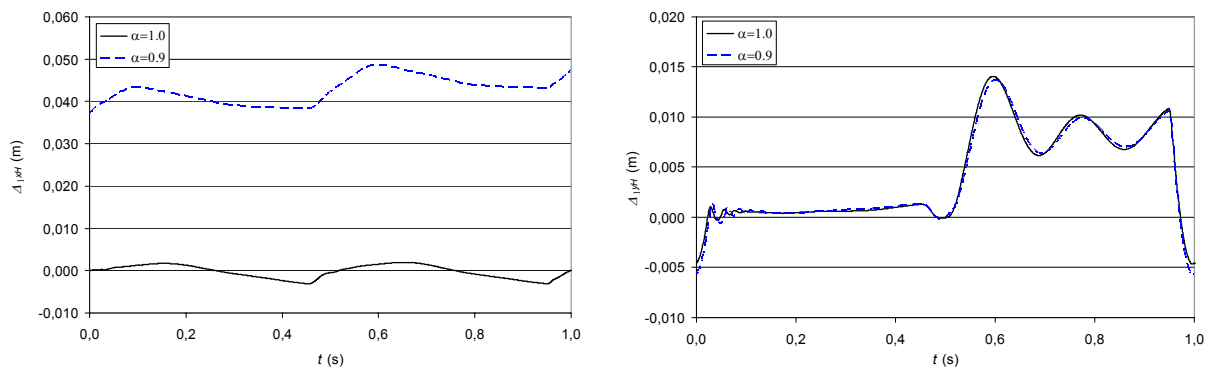


Figura 5.42: Erros de seguimento das trajetórias das ancas Δ_{1xH} e Δ_{1yH} vs. t , para os controladores PD^1 e $PD^{0,9}$ considerando juntas ideais e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

Para esta situação, o controlador clássico PD^1 apresenta curvas de binário nos motores de amplitude e oscilação ligeiramente menores, quando comparado com o controlador $PD^{0,9}$. Além disso, o algoritmo PD^1 apresenta erros de seguimento das trajetórias das ancas Δ_{1xH} inferiores, sendo os valores de Δ_{1yH} similares. Estes resultados encontram-se ilustrados nas Figuras 5.41 e 5.42. Para os outros valores de α_j as curvas de binário revelam oscilações de maior amplitude e maiores erros de seguimento das trajetórias das ancas.

Quando se consideram juntas com atrito viscoso e flexibilidade, o algoritmo $PD^{0,9}$ proporciona os menores valores dos erros de seguimento das trajetórias Δ_{1xH} , independentemente do valor de τ_{ijMax} . No que concerne às outras variáveis, os melhores resultados são obtidos com o algoritmo clássico PD^1 .

Para valores inferiores do nível de saturação dos motores, o desempenho do algoritmo PD^α fraccionário degrada-se de forma significativa quando comparado com o esquema PD^1 .

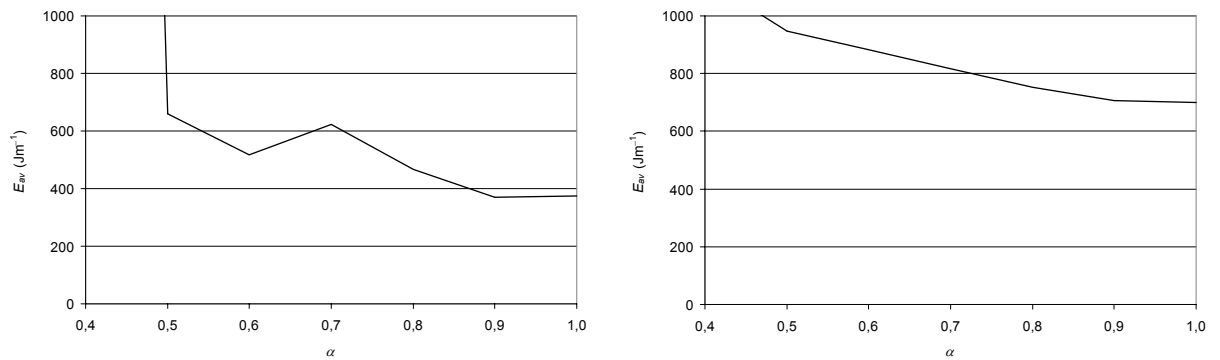


Figura 5.43: E_{av} vs. α , considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

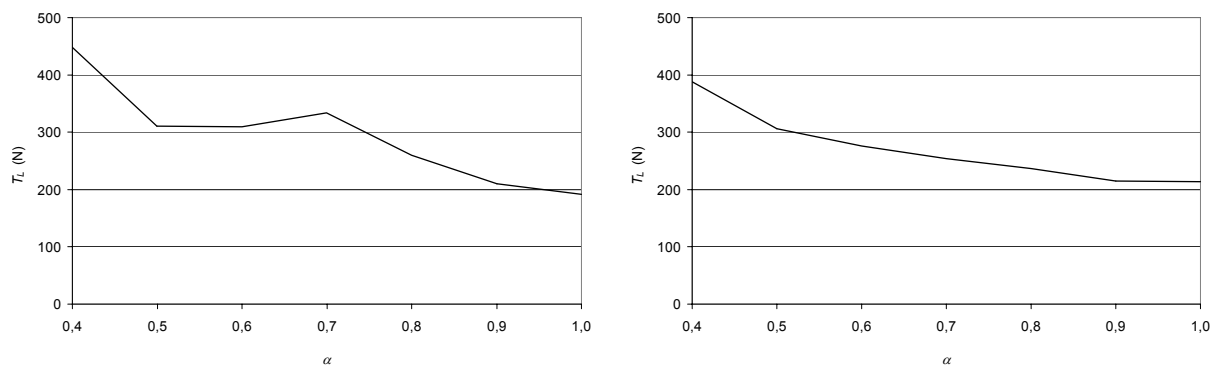


Figura 5.44: T_L vs. α , considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

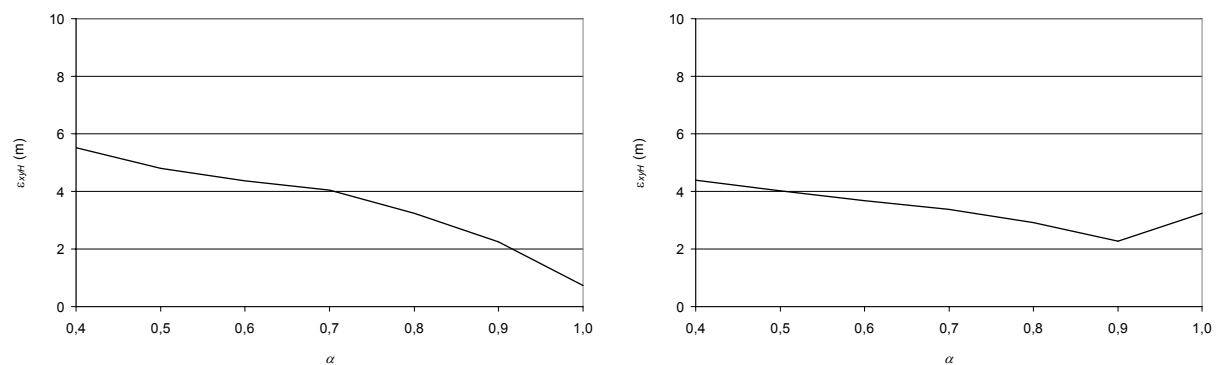


Figura 5.45: ϵ_{xyH} vs. α , considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

Estes resultados encontram-se também reflectidos nos índices de desempenho. As Figuras 5.43 – 5.45 (lado esquerdo) ilustram os índices de desempenho E_{av} , T_L e ϵ_{xyH} versus α no caso de juntas com transmissões ideais. Conclui-se que os índices E_{av} e T_L não apresentam

variações significativas para valores de $\alpha \approx 1,0$, quando se tem $\tau_{ijMax} = 400$ Nm. No que diz respeito ao índice ε_{xyH} existe uma degradação para valores de $\alpha < 1,0$.

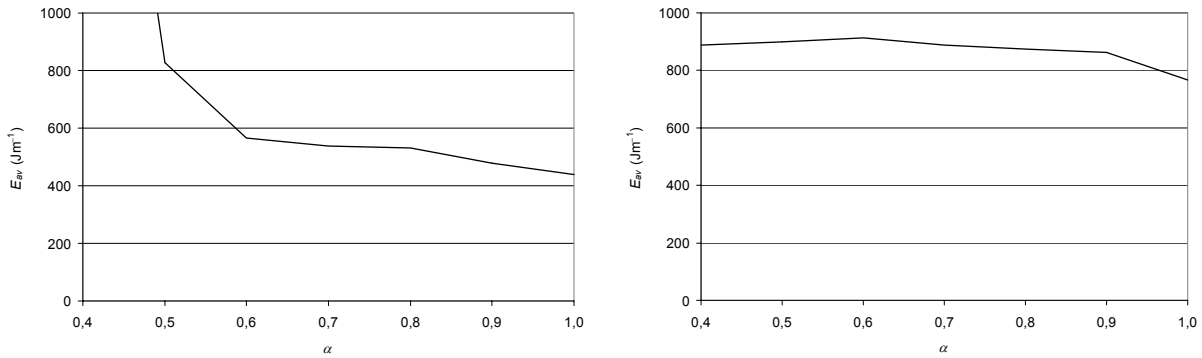


Figura 5.46: E_{av} vs. α , considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 100$ Nm.

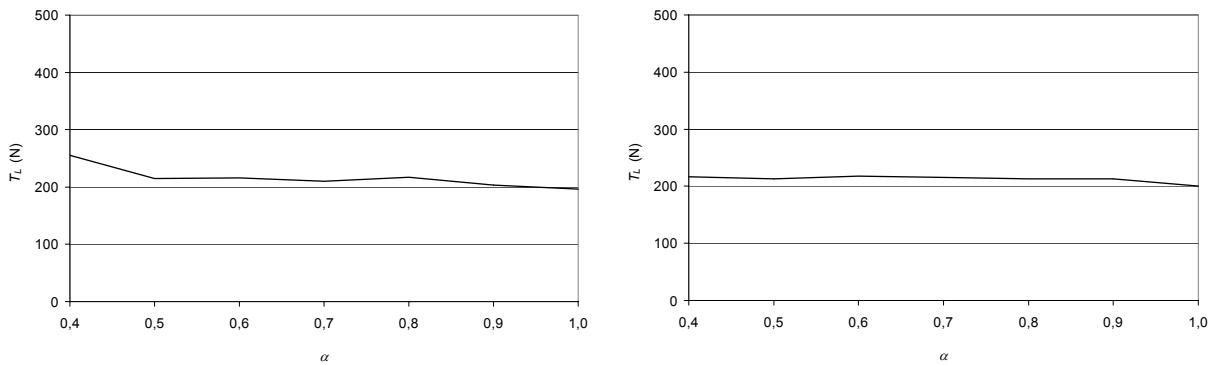


Figura 5.47: T_L vs. α , considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 100$ Nm.

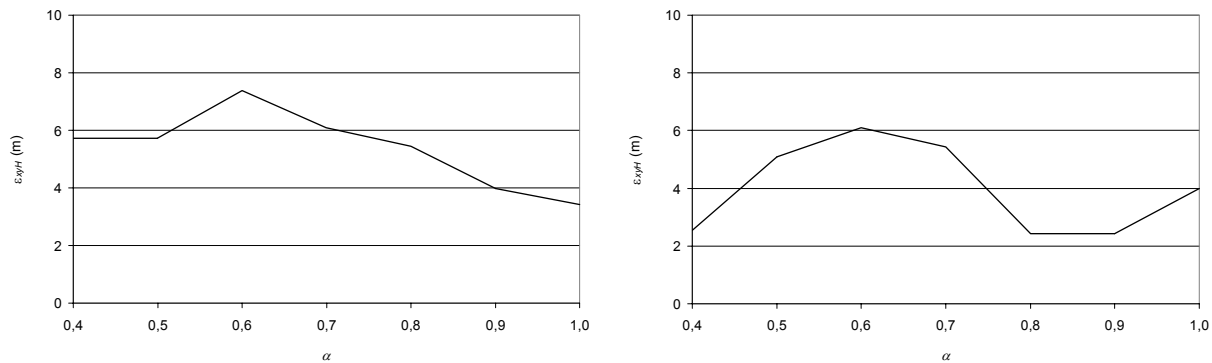


Figura 5.48: ε_{xyH} vs. α , considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 100$ Nm.

Quando as juntas apresentam atrito viscoso e flexibilidade, conclui-se que E_{av} e T_L não apresentam variações significativas para valores de $\alpha \approx 1,0$, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm. No que diz respeito ao índice ε_{xyH} existe um mínimo para valores de $\alpha \approx 0,9$ (ver os gráficos do lado direito das Figuras 5.43 – 5.45).

No caso de saturação forte dos actuadores (*i.e.*, $\tau_{ijMax} = 100$ Nm), todos os índices se degradam quando comparados com a situação base (Figuras 5.46 – 5.48).

Quando se tem juntas ideais, os índices apresentam valores superiores para valores inferiores de α . Se as juntas apresentam atrito viscoso e flexibilidade, conclui-se que E_{av} e T_L não apresentam variação significativa com α mas que ε_{xyH} apresenta um mínimo para valores de $0,8 < \alpha < 0,9$.

5.3.5.2 Análise Através da Margem de Fase

A Figura 5.49 mostra os diagramas de Nyquist para os diferentes valores da ordem fraccionária do controlador PD^α , $\alpha_j = \{0,7; 0,8; 0,9; 1,0\}$, com juntas ideais (lado esquerdo) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (lado direito), considerando $\tau_{ijMax} = 400$ Nm. Para o caso de transmissões ideais nas juntas das pernas do robô, é possível observar que a MF é máxima para a implementação do controlador $PD^{0,9}$. Comparando com o controlador clássico PD^1 a MF é também superior para o algoritmo $PD^{0,8}$.

Os diagramas de Nyquist correspondentes a níveis crescentes de saturação encontram-se representados nas Figuras 5.50 e 5.51, nomeadamente para $\tau_{ijMax} = 200$ Nm e $\tau_{ijMax} = 100$ Nm. Da sua análise é possível concluir que no caso de transmissões ideais nas juntas, do ponto de vista da MF, o desempenho relativo das diferentes implementações do controlador permanece inalterado.

Para juntas com atrito viscoso e flexibilidade a situação é relativamente diferente. Quando se consideram actuadores quase ideais (*i.e.*, $\tau_{ijMax} = 400$ Nm) a implementação do controlador fraccionário PD^α ($0,7 \leq \alpha_j \leq 0,9$) apresenta uma MF melhor que a do algoritmo inteiro PD^1 (ver Figura 5.49 (lado direito)). Para níveis moderados da saturação (*i.e.*, $\tau_{ijMax} \leq 200$ Nm) observa-se que a MF relativa das diferentes implementações do controlador não apresenta variações significativas (ver Figura 5.50 (lado direito)). Da Figura 5.51 (lado direito) pode

concluir-se que, no caso de saturação forte dos actuadores (*i.e.*, $\tau_{ijMax} \leq 100$ Nm), os diagramas de Nyquist apresentam uma deterioração significativa, indicando dificuldades de estabilidade para todos os algoritmos de controlo testados.

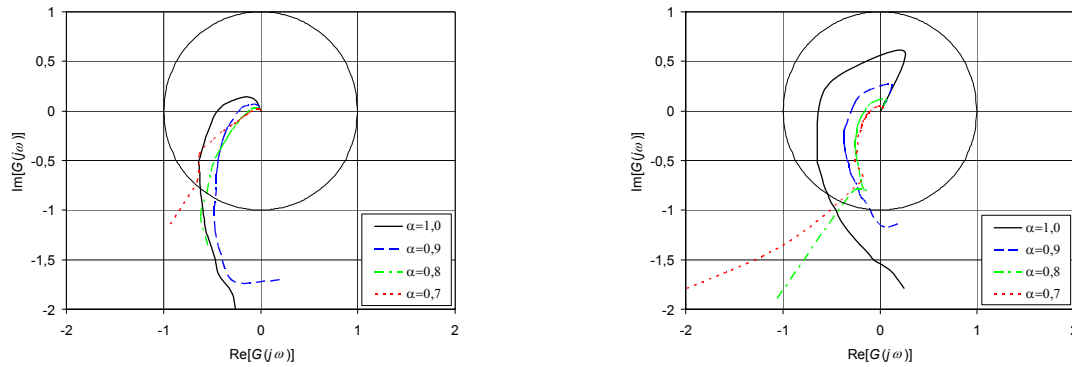


Figura 5.49: Diagramas de Nyquist para o controlador PD^α , $\alpha = \{0,7; 0,8; 0,9; 1,0\}$, considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

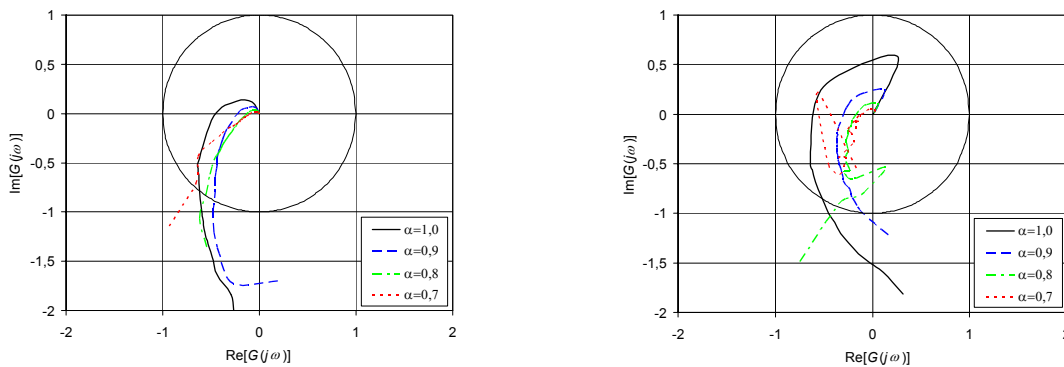


Figura 5.50: Diagramas de Nyquist para o controlador PD^α , $\alpha = \{0,7; 0,8; 0,9; 1,0\}$, considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 200$ Nm.

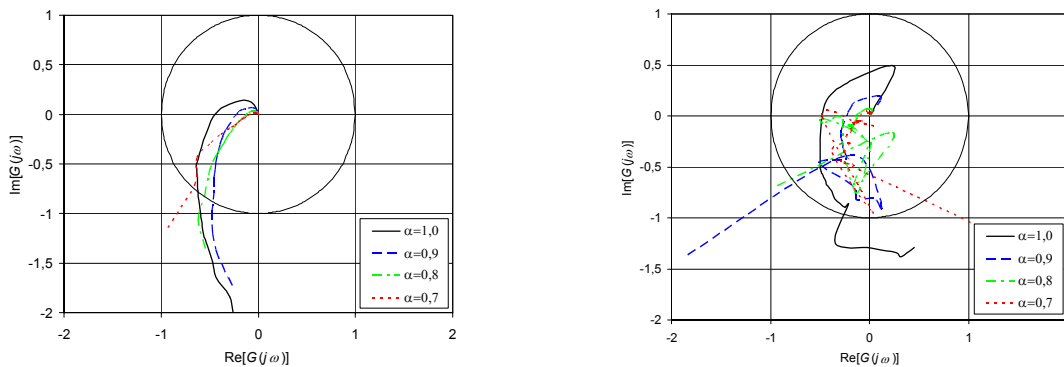


Figura 5.51: Diagramas de Nyquist para o controlador PD^α , $\alpha = \{0,7; 0,8; 0,9; 1,0\}$, considerando juntas ideais (à esquerda) e juntas com atrito viscoso e flexibilidade (à direita), com $\tau_{ijMax} = 100$ Nm.

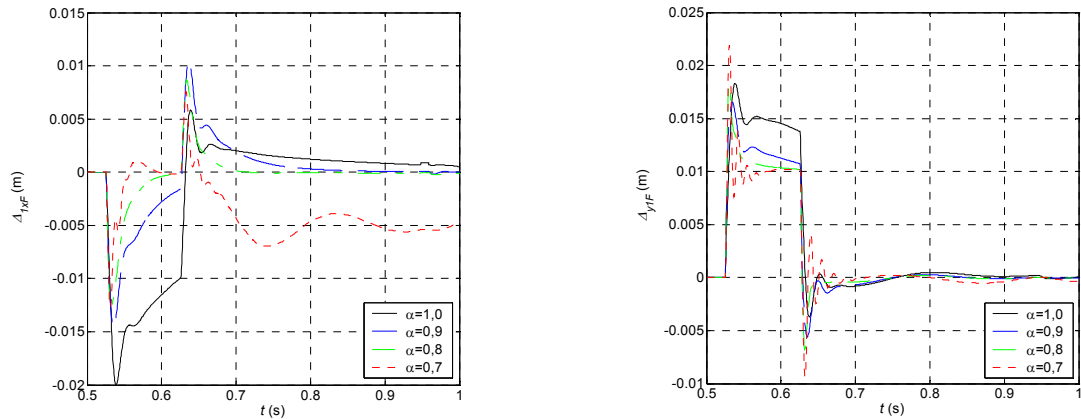


Figura 5.52: Erros de seguimento das trajetórias dos pés Δ_{1xF} e Δ_{1yF} vs. t , quando o impulso da perturbação ($\delta y_{1F} = 0,01$ m, $\delta t = 0,1$ s) é introduzido no início da fase de transferência do pé, para o controlador PD $^\alpha$ ($\alpha = \{0,7; 0,8; 0,9; 1,0\}$), considerando juntas ideais e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

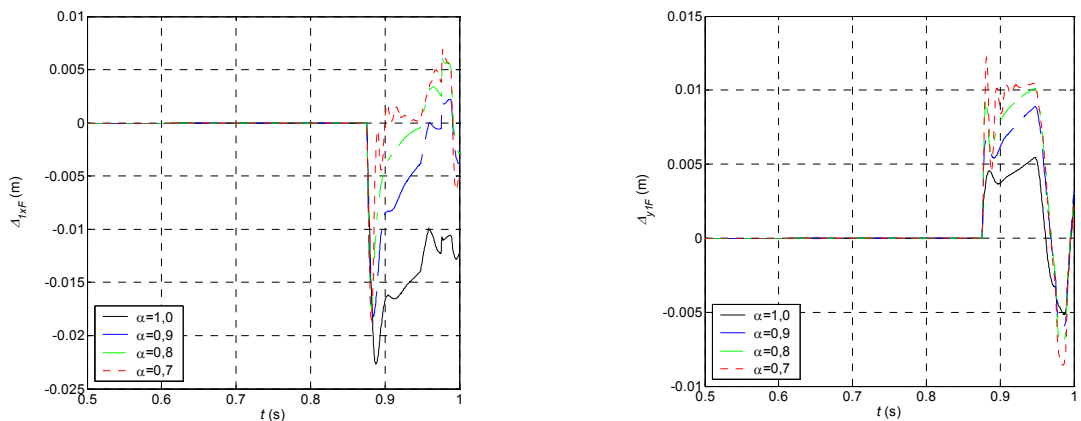


Figura 5.53: Erros de seguimento das trajetórias dos pés Δ_{1xF} e Δ_{1yF} vs. t , quando o impulso da perturbação ($\delta y_{1F} = 0,01$ m, $\delta t = 0,1$ s) é introduzido perto do final da fase de transferência do pé, para o controlador PD $^\alpha$ ($\alpha = \{0,7; 0,8; 0,9; 1,0\}$), considerando juntas ideais e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

De forma a validar os resultados da resposta em frequência estuda-se a resposta temporal. Assim, aplica-se um impulso de amplitude $\delta y_{1F} = 0,01$ m, com duração $\delta t = 0,1$ s, na trajetória de referência do pé do robô. O erro resultante na trajetória do pé do robô é de seguida analisado de forma a determinar a sobreelongação percentual máxima (OP) da resposta à entrada impulso, para as diferentes situações em estudo.

A OP das trajetórias resultantes do pé apresenta valores diferentes em função do instante de tempo em que é aplicado o impulso. Para o caso de juntas ideais com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm, observa-se nas Figuras 5.52 e 5.53 os erros nas trajetórias resultantes dos pés $\Delta x_{1F}(t)$ e

$\Delta y_{1F}(t)$, para as diferentes ordens do algoritmo de controlo, quando o impulso é introduzido, respectivamente no início ou no final da fase de transferência.

Para o caso em que a perturbação é introduzida no início da fase de transferência do pé (Figura 5.52) é possível concluir que os algoritmos de controlo PD^{0,8} / PD^{0,9} apresentam a OP inferior na trajectória do pé Δx_{1F} / Δy_{1F} , respectivamente. Para esta situação, o algoritmo de controlo PD^{0,8} apresenta as melhores características de seguimento da trajectória, para ambas as trajectórias.

Quando a perturbação em pulso é introduzida perto do final da fase de transferência do pé, os resultados são relativamente diferentes. Neste caso (Figura 5.53) vê-se que o algoritmo de controlo PD^{0,8} / PD^{1,0} apresenta a menor OP na trajectória do pé Δx_{1F} / Δy_{1F} , respectivamente. Para esta situação, o algoritmo de controlo PD^{0,8} revela novamente as melhores características de seguimento da trajectória, para ambas as trajectórias.

Para diferentes valores do nível de saturação dos motores e juntas com atrito viscoso e flexibilidade o comportamento é similar.

As diferentes respostas dos controladores são devidas ao facto de se estar em presença de um sistema não linear e acoplado. Portanto, conclui-se que os diagramas de Nyquist apresentam uma indicação “média” dos desempenhos dos controladores ao longo de um ciclo completo de locomoção, consistindo numa fase de suporte (em que os pés se encontram no solo a suportar o peso do robô) e uma fase de transferência (correspondendo aos movimentos dos pés no ar para a sua nova posição).

5.3.5.3 Discussão dos Resultados e Conclusões

As duas perspectivas alternativas para medir o desempenho do sistema (*i.e.*, índices dinâmicos *vs.* MF e OP) levam a conclusões algo distintas. Esta diferença deve-se a duas razões principais. Por um lado, como referido na subsecção 5.3.5.2, o sistema é não linear o que leva a comportamentos diferentes de acordo com as condições adoptadas para analisar o seu desempenho. Por outro lado, a margem de fase apresenta uma indicação da estabilidade, enquanto os índices de desempenho utilizados fornecem uma indicação média da dinâmica da locomoção ao longo de vários passos.

Analisando os resultados das simulações anteriores, conclui-se que o controlador PD^α , para $0,8 \leq \alpha_j \leq 0,9$, apresenta resultados superiores quando se está em presença de saturação dos actuadores e fenómenos dinâmicos nas juntas. Isto significa que o algoritmo PD^α é mais robusto em condições de operação reais do que o algoritmo clássico de ordem inteira PD^1 que mostra maiores limitações de estabilidade.

5.4 Controlo de um Hexápode com Três gdl por Perna

Nesta secção estuda-se o desempenho de controladores de ordem inteira e fraccionária quando aplicados no controlo da juntas das pernas de um hexápode, no caso de este apresentar três gdl por perna (o modelo para esta situação encontra-se descrito na secção 3.3). O planeamento das trajectórias para sistemas artificiais de locomoção com três gdl por perna foi também abordado no Capítulo 3 (secção 3.3.1). Um conjunto de experiências mostra a influência das diferentes sintonias do controlador sobre os índices de desempenho propostos e no seguimento das trajectórias das ancas e dos pés. O desempenho do sistema é analisado para dois casos: duas juntas das pernas são actuadas por motores e a junta do tornozelo é actuada por um sistema mecânico passivo e as três juntas das pernas são actuadas na sua totalidade através de motores. As simulações mostram o desempenho superior do controlador, na situação em que todas as juntas são actuadas por motores.

5.4.1 Arquitectura de Controlo Adoptada e Respectiva Sintonia

A arquitectura de controlo genérica adoptada para o robô hexápode encontra-se representada na Figura 5.5 (PD-P&F). Inicialmente, adopta-se para o controlador $G_{c1}(s)$ um algoritmo PD^1 de posição / velocidade:

$$G_{c1j}(s) = Kp_j + Kd_j s, \quad j = 1, 2, 3 \quad (5.6)$$

sendo Kp_j e Kd_j os ganhos proporcional e derivativo da junta j , respectivamente. Para G_{c2} considera-se um simples controlador P com ganho $Kp_j = 0.9$ ($j = 1, 2, 3$).

Tabela 5.9: Parâmetros do controlador $G_{c1}(s)$ quando se estabelece um compromisso entre a minimização de E_{av} e ε_{xyH} para $G_{c2}(s) = 0,9$.

Actuação da Junta $j = 3$			
Actuação passiva		Actuação activa	
Kp_1	8000	Kp_1	8000
Kd_1	60	Kd_1	60
Kp_2	500	Kp_2	500
Kd_2	40	Kd_2	40
K_3	5,0	Kp_3	100,0
B_3	2,5	Kd_3	2,5

Como descrito na subsecção 5.2.1, o controlador é sintonizado considerando que os actuadores das juntas do robô são praticamente ideais (o binário máximo considerado na equação (3.10) é $\tau_{ijMax} = 400$ Nm). Para as juntas $j = 1, 2$ adoptam-se os parâmetros que vêm a ser utilizados para esta arquitectura de controlo, no caso de o robô dispor de dois gdl por perna (Tabela 5.3). A situação que estabelece um compromisso no que concerne à minimização simultânea de E_{av} e ε_{xyH} , leva aos parâmetros do controlador $G_{c1}(s)$, para a junta $j = 3$ apresentados na Tabela 5.9.

Nesta subsecção foi necessário aumentar a frequência de amostragem para a realização das simulações, nomeadamente devido ao caso do modelo com as três juntas actuadas por motores, uma vez que se constatou que com os valores que vinham a ser considerados o controlador divergia. Assim, o algoritmo de controlo em tempo discreto é avaliado com uma frequência de amostragem $f_{sc} = 10,0$ kHz e a dinâmica do robô e do ambiente são calculadas com uma frequência de amostragem $f_{sr} = 100,0$ kHz.

5.4.2 Valores dos parâmetros de Controlo da Junta do Tornozelo

A primeira observação que se efectuou prende-se com os valores a adoptar para os parâmetros do sistema de actuação da junta do tornozelo ($j = 3$).

Começa-se por considerar que as juntas 1 e 2 das pernas são actuadas através de motores e a junta 3 é actuada de forma mecânica passiva. Para este caso analisa-se a locomoção do hexápode com a variação dos parâmetros K_3 e B_3 . De seguida, considera-se que a junta 3 é também actuada através de um motor, e repete-se o procedimento para os parâmetros Kp_3 e Kd_3 .

Para o caso em que a junta do tornozelo é actuada de forma mecânica passiva, verifica-se que para valores de $K_3 \approx 0,0$ Nm o pé salta quando toca no solo. Aumentando o valor deste parâmetro, nomeadamente para $K_3 \approx 0,1$ Nm, não se verifica oscilação do pé do robô mas, em contrapartida, no final da fase de transferência a planta do pé toca no solo após o calcanhar. Para valores de K_3 superiores (e.g., $K_3 \approx 3,0$ Nm) constata-se que o pé apresenta pouca oscilação e que, no final da fase de transferência, a parte da frente toca no solo após o calcanhar. Para valores de K_3 muito elevados (e.g., $K_3 \approx 1000,0$ Nm) o robô anda em “bicos de pés” (o calcanhar nunca toca no solo) mas as trajectórias do calcanhar e da frente do pé passam a apresentar muita oscilação. Em cada uma das situações anteriores, os comportamentos descritos são relativamente independentemente dos valores encontrados para B_3 . O valor deste parâmetro foi unicamente escolhido tendo em vista otimizar o amortecimento das oscilações sentidas no pé.

Independentemente dos valores escolhidos para os parâmetros do sistema de actuação da junta 3, conclui-se que a solução com as três juntas actuadas é superior, apresentando menores valores para os índices E_{av} e ε_{xyH} e garantindo menores valores para os erros de seguimento das trajectórias da ancas (Figura 5.54) e para os binários nas juntas (Figura 5.55).

5.4.3 Valor Planeado Óptimo para o Ângulo do Pé com a Horizontal

Nesta subsecção avalia-se a forma como a locomoção do robô é influenciada com o valor planeado do ângulo do pé com a horizontal (θ_{i3hd}).

No caso da junta do tornozelo ser actuada de forma passiva, os valores óptimos para este valor situam-se em redor de $-15^\circ < \theta_{i3hd} < 0^\circ$, do ponto de vista da minimização dos índices dinâmicos E_{av} e ε_{xyH} . Verifica-se que para valores tais que $\theta_{i3hd} > -15^\circ$ o calcanhar estabelece contacto com o solo, no final fase de transferência, antes da frente do pé. Para evitar esta situação é necessário diminuir o valor planeado do ângulo do pé com a horizontal. No entanto, este aumento implica também o aumento do valor do parâmetro K_3 , o que leva a um aumento da oscilação do pé. Para valores de θ_{i3hd} inferiores a este a ponta do pé estabelece o contacto inicial com o solo e, posteriormente, o calcanhar também toca o solo. Durante a fase de suporte, verifica-se que o robô apoia toda a planta do pé no solo. Para este tipo de actuação da junta 3 a locomoção permanece estável para $\theta_{i3hd} > -65^\circ$.

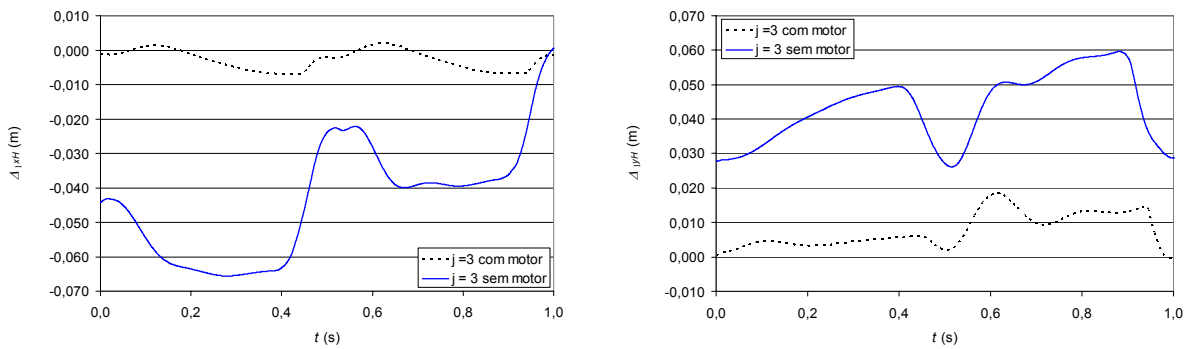


Figura 5.54: Erros de seguimento das trajectórias das ancas Δ_{1xH} e Δ_{1yH} vs. t , com a junta do tornozelo actuada de forma activa e passiva, para a arquitectura de controlo PD-P&F e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

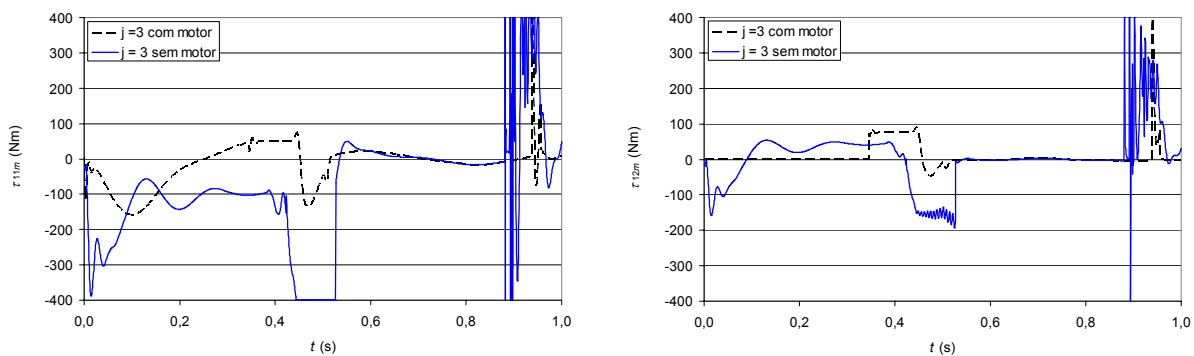


Figura 5.55: Binários nas juntas τ_{11m} e τ_{12m} vs. t , com a junta do tornozelo actuada de forma activa e passiva, para a arquitectura de controlo PD-P&F e $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

Na situação em que as três juntas das pernas são actuadas através de motores o comportamento é ligeiramente diferente. Verifica-se que para valores $\theta_{i3hd} < -5^\circ$, no final da fase de transferência o calcanhar estabelece contacto com o solo antes da frente do pé e assim permanece durante toda a fase de suporte. Nesta situação, o desempenho da locomoção, medido através de E_{av} e ε_{xyH} , apresenta um crescimento suave para os limites do intervalo $-5^\circ < \theta_{i3hd} < -45^\circ$, com um mínimo para $\theta_{i3hd} \approx -15^\circ$. Para valores de $\theta_{i3hd} < -100^\circ$ a locomoção torna-se instável.

5.4.4 Controlo de Ordem Fraccionária do Hexápode com Três gdl por Perna

Neste estudo avalia-se o efeito da utilização de diferentes algoritmos de controlo de OF em $G_{c1}(s)$. Assim, para este controlador adopta-se um algoritmo PD^α, enquanto que para $G_{c2}(s)$ se considera um simples controlador P com ganho $Kp_j = 0.9$ ($j = 1, 2, 3$).

Para o algoritmo de OF tem-se:

$$G_{c1j}(s) = Kp_j + K\alpha_j s^{\alpha_j}, \quad \alpha_j \in \mathfrak{R}, \quad j=1,2,3 \quad (5.7)$$

em que Kp_j e $K\alpha_j$ são, respectivamente, os ganhos proporcional e derivativo e α_j e a ordem fraccionária, para a junta j .

Tal como na secção anterior, para implementar o algoritmo de OF (5.7), é adoptada uma aproximação de Padé discreta de quarta ordem no numerador e denominador ($a_{ij}, b_{ij} \in \mathfrak{R}$, $j=1, 2, 3$) resultando, no domínio z , uma equação do tipo da apresentada em (5.5). Mais ainda, adoptam-se para $G_{c1}(s)$ os parâmetros que estabelecem um compromisso no que concerne à minimização simultânea de E_{av} e ε_{xyH} , fazendo $\theta_{i3hd} = -15^\circ$.

Começa-se por se considerar que as juntas 1 e 2 das pernas são actuadas através de motores e a junta 3 é actuada de forma mecânica passiva. Para este caso sintonizam-se os controladores de OF das juntas para diferentes valores da ordem fraccionária α_j no intervalo $-0,9 < \alpha_j < +0,9$. Depois, considera-se que a junta 3 é também actuada através de um motor, e repete-se o procedimento de sintonia dos controladores *versus* α_j . Os parâmetros do controlador são apresentados nas Tabelas 5.10 e 5.11, respectivamente para os casos da junta do tornozelo ser actuada de forma passiva e de forma activa.

O gráfico apresentado do lado esquerdo da Figura 5.56 apresenta a melhor sintonia do controlador para diferentes valores de α_j quando a junta 3 é actuada de forma mecânica passiva. Verifica-se que o valor de $\alpha_j = 0,5$ apresenta a melhor situação de compromisso no que diz respeito à minimização simultânea de E_{av} e ε_{xyH} . Para valores de $\alpha_j = \{0,6; 0,7; 0,8\}$ os valores de ε_{xyH} são similares e ligeiramente superiores do que o correspondente valor para $\alpha_j = 0,5$. Quanto aos valores de E_{av} , o mínimo é obtido para $\alpha_j = 0,8$.

No lado direito da mesma figura apresenta-se um gráfico similar para o caso de todas as juntas serem actuadas através de motores. Tal como para o caso anterior, observa-se que o valor de $\alpha_j = 0,5$ apresenta a melhor situação de compromisso no que se refere à minimização simultânea de E_{av} e ε_{xyH} . Para valores de $\alpha_j = \{0,6; 0,7; 0,8\}$ os valores de E_{av} e ε_{xyH} são ligeiramente superiores.

Tabela 5.10: Parâmetros do controlador $G_{c1}(s)$ quando se estabelece um compromisso entre a minimização de E_{av} e ε_{xyH} para $G_{c2}(s) = 0,9$, no caso da junta do tornozelo ser actuada de forma passiva.

Ordem Fraccionária	Junta $j = 1$		Junta $j = 2$		Junta $j = 3$	
	Kp_1	Ka_1	Kp_2	Ka_2	K_3	B_3
$\alpha_j = 0,4$	10000,0	3200,0	800,0	300,0	2,0	0,5
$\alpha_j = 0,5$	15000,0	6000,0	1000,0	600,0	0,5	2,0
$\alpha_j = 0,6$	2500,0	800,0	300,0	100,0	1,0	2,0
$\alpha_j = 0,7$	2000,0	500,0	400,0	100,0	0,5	0,5
$\alpha_j = 0,8$	2000,0	400,0	300,0	100,0	4,0	3,5

Tabela 5.11: Parâmetros do controlador $G_{c1}(s)$ quando se estabelece um compromisso entre a minimização de E_{av} e ε_{xyH} para $G_{c2}(s) = 0,9$, no caso da junta do tornozelo ser actuada de forma activa.

Ordem Fraccionária	Junta $j = 1$		Junta $j = 2$		Junta $j = 3$	
	Kp_1	Ka_1	Kp_2	Ka_2	Kp_3	Ka_3
$\alpha_j = 0,4$	8000,0	2900,0	900,0	400,0	100,0	80,0
$\alpha_j = 0,5$	15000,0	7200,0	1000,0	800,0	150,0	240,0
$\alpha_j = 0,6$	600,0	150,0	250,0	40,0	100,0	15,0
$\alpha_j = 0,7$	600,0	150,0	150,0	15,0	80,0	15,0
$\alpha_j = 0,8$	500,0	80,0	200,0	30,0	80,0	10,0

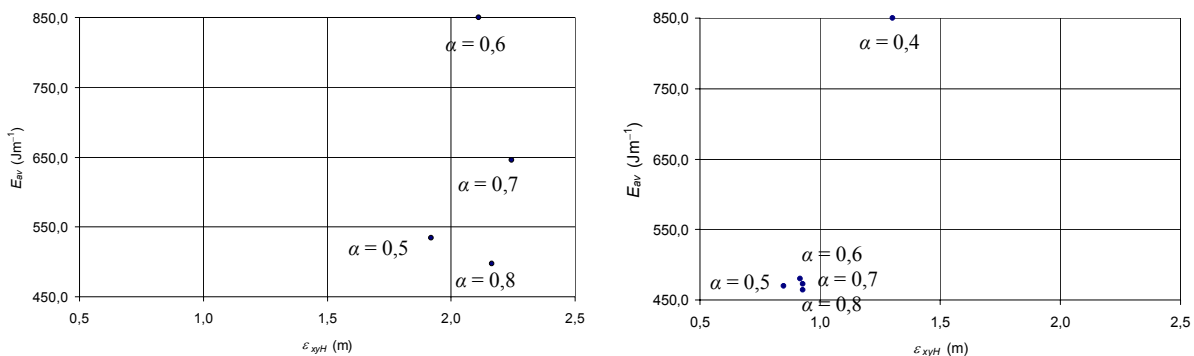


Figura 5.56: Gráficos de ε_{xyH} vs. E_{av} para as diferentes sintonias do controlador $G_{c1}(s)$ de OF, quando se estabelece um compromisso entre a minimização de E_{av} e ε_{xyH} , com $G_{c2} = 0,9$, com as juntas 1 e 2 actuadas através de motores e a junta 3 actuada de forma passiva (esquerda) e todas as juntas actuadas através de motores (direita).

Para valores de $\alpha_j = \{0,1; 0,2; 0,3; 0,4\}$ os resultados são muito fracos e para $-0,9 < \alpha_j < -0,1$ e $\alpha_j = 0,9$, a locomoção do hexápode torna-se instável. Para além disto, comparando os dois gráficos da Figuras 5.56 conclui-se que a melhor situação corresponde às juntas das pernas serem todas actuadas através de motores (como já se havia concluído anteriormente para o caso do controlador de ordem inteira).

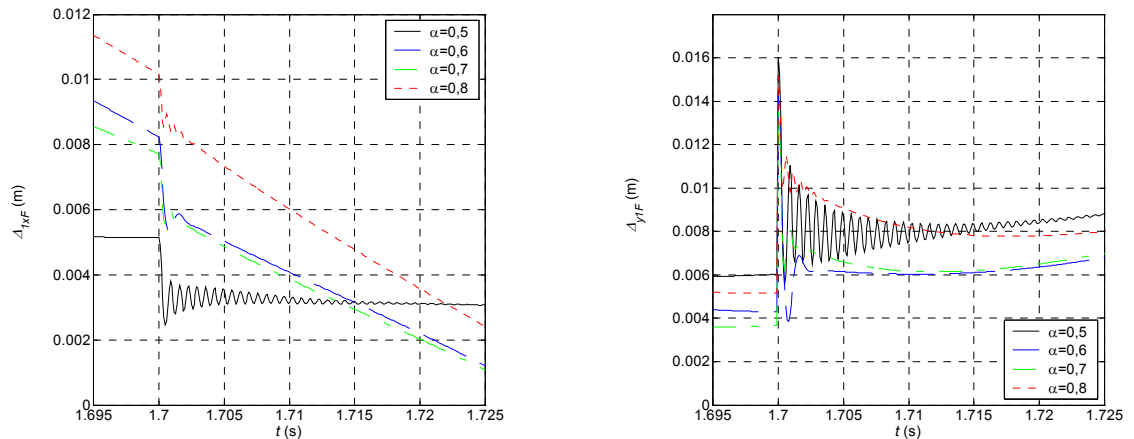


Figura 5.57: Erros de seguimento das trajectórias dos pés Δ_{1xF} e Δ_{1yF} vs. t para $\alpha_j = \{0,5; 0,6; 0,7; 0,8\}$, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

5.4.5 Desempenho dos Algoritmos de Ordem Fraccionária

Nesta subsecção apresentam-se os resultados de um conjunto de simulações efectuadas tendo em vista analisar o comportamento das diferentes sintonias dos controladores de OF durante a locomoção com o padrão PLO à velocidade V_F .

Para uma melhor compreensão dos diferentes algoritmos de OF, no caso da junta 3 ser actuada através de um motor, analisa-se a resposta temporal a uma perturbação em degrau, de amplitude $\Delta_{1yFd} = 0,01$ m, na trajectória cartesiana $y_{1Fd}(t)$ planeada para o pé.

A Figura 5.57 apresenta os gráficos de Δ_{1xF} e Δ_{1yF} versus t para os valores da ordem fraccionária em estudo ($\alpha_j = \{0,5; 0,6; 0,7; 0,8\}$). Esta figura mostra que a sobreelongação é semelhante para todos os valores de α_j considerados. No entanto, para $\alpha_j = 0,5$ tem-se o maior tempo de estabelecimento, enquanto para $\alpha_j = 0,6$ tem-se o menor.

Uma vez que o objectivo de um sistema artificial de locomoção é andar em terrenos naturais, de seguida testa-se a resposta dos diferentes controladores face a diferentes propriedades do solo. A Figura 5.58 ilustra a evolução temporal de Δ_{1xF} e Δ_{1yF} versus α_j quando o solo é de argila solta (os parâmetros do modelo do solo para esta situação são apresentados no Anexo E). Através da comparação dos gráficos desta figura com os da figura anterior, conclui-se que as respostas dos controladores são muito semelhantes, significando isto que estes algoritmos são robustos a variações nas características do solo.

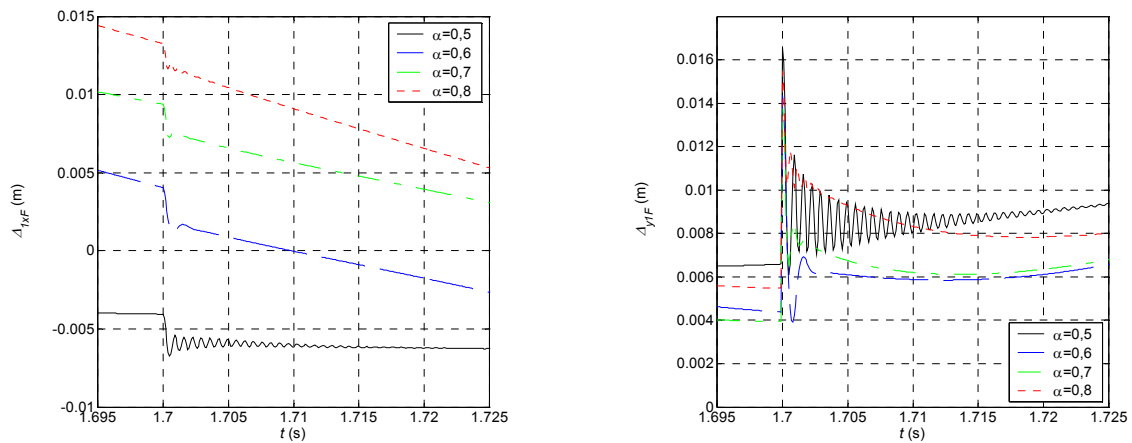


Figura 5.58: Erros de seguimento das trajectórias dos pés Δ_{1xF} e Δ_{1yF} vs. t para $\alpha_j = \{0,5; 0,6; 0,7; 0,8\}$, com $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

5.4.6 Discussão dos Resultados e Conclusões

As experiências efectuadas permitem concluir que no caso de a junta $j = 3$ ser actuada de forma passiva, através de um sistema mola-amortecedor em paralelo, o coeficiente de elasticidade deste sistema define em grande medida as características da locomoção. O outro parâmetro com forte influência na locomoção é o ângulo θ_{i3hd} . O efeito dos valores destes parâmetros sobre o desempenho do sistema foi analisado de forma a determinar os mais adequados a cada situação.

Os resultados anteriores mostram que, independentemente de se efectuar o controlo das pernas do robô com um controlador $G_{c1}(s)$ de ordem inteira ou fraccionária, a solução com as três juntas actuadas é superior face à situação em que a anca do tornozelo é actuada de forma passiva. Mais ainda, verifica-se que os algoritmos de controlo de ordem inteira e ordem fraccionária apresentam desempenhos similares para a situação de base da locomoção.

Vale a pena referir que no caso de a junta três ser mecanicamente actuada, o robô coloca primeiro a ponta do seu pé no solo, seguido pelo calcanhar. Ambos permanecem neste estado durante a fase de suporte do pé e, como consequência, o robô desloca-se suportando o peso do seu corpo no elo L_{i3} . Pelo contrário, quando todas as juntas são actuadas através de motores, durante a fase de suporte do pé, o robô desloca-se nas pontas dos pés. Por outras palavras, o hexápode suporta o seu peso na extremidade do elo L_{i3} .

Do ponto de vista biológico, ambos os casos são importantes. Portanto, torna-se necessário efectuar estudos adicionais para compreender melhor a forma como este comportamento se altera com os parâmetros de locomoção.

5.5 Conclusões e Perspectivas de Desenvolvimento Futuro

Neste capítulo abordou-se o problema do controlo das juntas de sistemas artificiais de locomoção multipernas. Antes de se descrever o trabalho desenvolvido, apresentou-se um conjunto de informação relativa ao estado da arte na área das estratégias e arquitecturas de controlo para robôs com locomoção por pernas. Apesar de não pretender ser um trabalho exaustivo, abordaram-se os principais aspectos que estão envolvidos nesta área de trabalho e apresentaram-se os exemplos mais significativos que têm vindo a ser desenvolvidos.

A análise do desempenho das diferentes arquitecturas e respectivos algoritmos de controlo foi efectuada recorrendo a medidas quantitativas, baseadas na dinâmica do sistema robô-ambiente e nos erros de seguimento das trajectórias das ancas e dos pés do robô, apresentadas no Capítulo 3.

As experiências efectuadas mostraram que a arquitectura de controlo PD-P&F é superior ao esquema de controlo clássico PD-P, do ponto de vista dos índices de desempenho propostos.

De seguida comparou-se o desempenho de controladores de ordem inteira e fraccionária para o controlo das juntas das pernas de hexápodes. Através da implementação de modelos dos actuadores e das transmissões das juntas das pernas incorporando características dinâmicas, tais como saturação não ideal, atrito viscoso, flexibilidade e folga, estimou-se a forma como os controladores do robô respondem a actuadores e transmissões não ideais e à degradação das características dos actuadores.

As experiências mostram que a implementação do controlador PD^α de ordem fraccionária é superior ao algoritmo de ordem inteira PD¹, do ponto de vista da robustez, o mesmo é dizer, quando os modelos incorporam condições de operação reais e fenómenos dinâmicos.

Por último foi efectuada a comparação do desempenho de diferentes algoritmos OF aplicados ao controlo das juntas das pernas de sistemas artificiais de locomoção hexápodes,

com três gdl por perna, considerando os casos da junta do tornozelo ser actuada quer através de uma combinação linear mola-amortecedor em paralelo, quer através de um motor.

Neste estudo foi também considerada, para efeitos de comparação de desempenho, a resposta da perna a uma perturbação em degrau na trajectória do pé. As experiências mostraram que o algoritmo de controlo OF para a situação de $\alpha_j \approx 0.5$, em que o robô hexápode possui todas as juntas actuadas através de motores, apresenta o melhor desempenho.

No trabalho apresentado focou-se a análise dinâmica em padrões de locomoção periódicos, considerando actuadores com saturação e transmissões com atrito viscoso, flexibilidade e folgas. Obviamente que muitos aspectos da locomoção não foram necessariamente capturados pelas medidas propostas. Como consequência, o trabalho futuro nesta área vai-se debruçar sobre o refinamento dos modelos implementados de forma a incorporar outras características dos actuadores dos robôs e das transmissões das juntas (Lasa e Buehler, 2001).

Encontram-se a ser desenvolvidos estudos adicionais de forma a projectar novas arquitecturas de controlo incluindo algoritmos de controlo mais sofisticados. Como ideias para trabalho futuro, deixam-se aqui os seguintes pontos:

- analisar o comportamento e o desempenho da locomoção do robô, no caso deste possuir três gdl por perna, e se adoptar um controlo com redução dos ganhos da malha directa. Nesta situação, o controlador deverá reduzir os valores dos ganhos da malha directa sempre que a ponta do pé entra em contacto com o solo e deverá manter esses valores enquanto qualquer parte do pé se mantiver em contacto com o solo;
- verificar o desempenho do mecanismo com pernas, no caso deste ser controlado através dum sistema com redução do ganho da malha directa em função do instante do ciclo de locomoção, mas adoptando um algoritmo de controlo OF para os blocos de controlo $G_{c1}(s)$ e $G_{c2}(s)$;
- generalizar a utilização de controladores de ordem fraccionária para o caso em que existe um termo integral de ordem não inteira resultando um algoritmo do tipo $PI^\lambda D^\alpha$, $(0,0 < \lambda \leq 1,0; 0,0 < \alpha \leq 1,0)$

- testar uma arquitectura de controlo em avanço (*feedforward*) uma vez que os passos são repetitivos e a locomoção não muda muito de um passo para o seguinte;
- pelos mesmas razões, testar uma arquitectura de controlo com aprendizagem;
- testar um controlador multifrequência (*multirate*) para a situação em que o robô apresenta três gdl por perna.

Referências

- ALEXANDER, R. McN.. (1990). “Three Uses for Springs in Legged Locomotion”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 9; No. 2; pp. 53 – 61.
- ALEXANDRE, Paul; PARVAIS, Thomas; PREUMONT, André; BAUDOIN, Yvan. (1996). “Implementation of Force Feedback for the Control of a Walking Machine”. In: *Proceedings of the Third International Conference on Motion and Vibration Control*.
- ALEXANDRE, Paul; PREUMONT, André. (1996). “On the Gait Control of a Six-Legged Walking Machine”. *International Journal of Systems Science*. Vol. 27; No. 8; pp. 713 – 721.
- ARENA, Paolo; FORTUNA, Luigi. (2002). “Analog Cellular Locomotion Control of Hexapod Robots”. *IEEE Control Systems Magazine*. Vol. 22; No. 6; pp. 21 – 36.
- ASANO, Fumihiko; YAMAKITA, Masaki; KAMAMICHI, Norihiro; LUO, Zhi-Wei. (2002). “A Novel Gait Generation for Biped Walking Robots Based on Mechanical Energy Constraint”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2637 – 2644.
- BARBOSA, R. S.; TENREIRO MACHADO, J. A.; FERREIRA, I. M.. (2004). “Least-squares Design of Digital Fractional-order Operators”. In: *Proceedings FDA’04 – First IFAC Workshop on Fractional Differentiation and its Applications*; pp. 434 – 439.
- BERNS, K.; ALBIEZ, J.; KEPPLIN, V.; HILLENBRAND, C.. (2001). “Airbug – Insect-Like Machine Actuated by Fluidic Muscle”. In: *Proceedings CLAWAR’2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 237 – 244.
- CHEN, Y. Q.; MOORE, K. L.. (2002). “Discretization Schemes for Fractional-order Differentiators and Integrators”. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications*. Vol. 49; No. 3; pp. 363 – 367.
- CHEW, Chee-Meng; PRATT, Gill A.. (2000). “A General Control Architecture for Dynamic Bipedal Walking”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3990 – 3996.
- CHIEL, Hillel J.; BEER, Randall D.; QUINN, Roger D.; ESPENSCHIED, Kenneth S.. (1992). “Robustness of a Distributed Neural Network Controller for Locomotion in a Hexapod Robot”. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Vol. 8; No. 3; pp. 293 – 303.
- CONTE, G.; SCARADOZZI, D.; SUARDI, A.. (2003). “Control Architecture for a Prototypal Legged Robot”. In: *Proceedings CLAWAR’2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 127 – 134.

CRUSE, H.; BARTLING, C.; CYMBALYUK, G.; DEAN, J.; DREIFERT, M.. (1995). "A Modular Artificial Neural Net for Controlling a Six-Legged Walking System". *Biological Cybernetics*. Vol. 72; pp. 421 – 430.

CRUSE, H.; DÜRR, V.; SCHMITZ, J.. (2001). "Control of Hexapod Walking – a Decentralized Solution Based on Biological Data"; In: *Proceedings CLAWAR 2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 79 – 86.

EPHANOV, Anton; HURMUZLU, Yildirim. (1997). "Generating Pathological Gait Patterns Via the Use of Robotic Locomotion Models". In: *Proceedings of the 1997 European Control Conference*.

FERREIRA, N. M. Fonseca; MACHADO, J. A. Tenreiro. (2003). "Fractional-Order Hybrid Control of Robotic Manipulators". In: *Proceedings of ICAR 2003 – 11th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 393 – 398.

FERRELL, Cynthia. (1995). "A Comparison of Three Insect Inspired Locomotion Controllers". *Robotics and Autonomous Systems*. Vol. 16; No. 2 – 4; pp. 135 – 159.

FLANNIGAN, W. C.; NELSON, G. M.; QUINN, R. D.. (1998). "Locomotion Controller for a Crab-Like Robot". In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 152 – 156.

FUJIMOTO, Yasutaka; OBATA, Satoshi; KAWAMURA, Atsuo. (1998). "Robust Biped Walking With Active Interaction Control Between Foot and Ground". In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2030 – 2035.

FUKUOKA, Y.; KIMURA, H.; HADA, Y.; TAKASE, K.. (2003). "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot 'Tekken' on Irregular Terrain Using a Neural System Model"; In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2037 – 2042.

GARCIA, Mariano; CHATTERJEE, Anindya; RUINA, Andy. (1998). "Speed, Efficiency, and Stability of Small-Slope 2-D Passive Dynamic Bipedal Walking". In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2351 – 2356.

GOSWAMI, Ambarish; THUILOT, Benoit; ESPIAU, Bernard. (1998). "A Study of the Passive Gait of a Compass-Like Biped Robot: Symmetry and Chaos". *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 17; No. 12; pp. 1282 – 1301.

GRAVEZ, F.; MOHAMED, B.; OUEZDOU, F. B.. (2002). "Dynamic Simulation of a Humanoid Robot With Four DOF's Torso". In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 511 – 516.

GUIHARD, M.; GORCE, P.. (2002). "Dynamic Control of Bipedes Using Ankle and Hip Strategies". In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2587 – 2592.

-
- HABUMUREMYI, J.-C.; DOROFTEI, I. (2001). “Mechanical Design and MANFIS Control of a Leg for a New Demining Walking Robot”. In: *Proceedings CLAWAR’2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 457 – 464.
- HOWELL, G. W.; BAILLIEUL, J. (1998). “Simple Controllable Walking Mechanisms Which Exhibit Bifurcations”. In: *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*; pp. 3027 – 3032.
- HUANG, Qiang; KANEKO, Kenji; YOKOI, Kazuhito; KAJITA, Shuuji; KOTOKU, Tetsuo; KOYACHI, Noriho; ARAI, Hirohiko; IMAMURA, Nobuaki; KOMORIYA, Kiyoshi; TANIE, Kazuo. (2000). “Balance Control of a Biped Robot Combining Off-Line Pattern With Real-Time Modification”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3346 – 3352.
- HUGEL, Vincent; BONNIN, Patrick; BLAZEVIC, Pierre. (2000). “Speed Control for Quadruped Using Duty Factor”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 985 – 990.
- IHME, T.; DEUTSCHER, M. (2001). “Design and Control Aspects for Six-Legged Walking Robots to Realize Adaptation to the Environment”. In: *Proceedings CLAWAR’2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 627 – 634.
- ISHIDA, Tatsuzo; KUROKI, Yoshihoro. (2004). “Development of Sensor System of a Small Biped Entertainment Robot”. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 648 – 653.
- KAJITA, Shuuji; NAGASAKI, Takashi; YOKOI, Kazuhito; KANEKO, Kenji; TANIE, Kazuo. (2002). “Running Pattern Generation for a Humanoid Robot”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2755 – 2761.
- KANEHIRO, Fumio; INABA, Masayuki; INOUE, Hirochika. (1999). “Action Acquisition Framework for Humanoid Robots Based on Kinematics and Dynamics Adaptation”. In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1038 – 1043.
- KANG, Taehun; KIM, Hyungseok; SON, Taeyoung; CHOI, Hyoukryeol. (2003). “Design of Quadruped Walking and Climbing Robot”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 619 – 624.
- KIM, Dong-Jun; KIM, Kab Il; ZHENG, Yuan F.; SUN, Zengqi; SUN, Fuchun. (2000). “Design of Small Power Biped Robot by Load Sharing of Walking Gait”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3359 – 3364.
- KINUGASA, Tetsuya. (2003). “Stability Analysis of Passive Walking of Biped EMU With Attitude Control of Body”. In: *Proceedings of ICAR 2003 – 11th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 1600 – 1605.

LASA, Martin de; BUEHLER, Martin. (2001). “Dynamic Compliant Quadruped Walking”. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3153 – 3158.

LEE, Kwang-Pyo; KOO, Tae-Wan; YOON, Yong-San. (1998). “Real-Time Dynamic Simulation of Quadruped Using Modified Velocity Transformation”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1701 – 1706.

LINDE, Richard Quint van der. (1998). “Active Leg Compliance for Passive Walking”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2339 – 2344.

LUO, Ren C.; PHANG, S. H. Henry; SU, Kuo L.. (2001). “Multilevel Multisensor Based Decision Function for Intelligent Animal Robo”. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 4226 – 4231.

MACHADO, J. A. Tenreiro. (1997). “Analysis and Design of Fractional-Order Digital Control Systems”. *SAMS - Journal Systems Analysis-Modeling-Simulation*. Vol. 27; No. 2 – 3; pp. 107 – 122.

MACHADO, J. A. Tenreiro; AZENHA, Abílio. (1998). “Fractional-Order Hybrid Control of Robot Manipulators”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*; pp. 788 – 793.

MANAMANI, N.; GAUTHIER, N. Nadjar; M’SIRDI, N. K.. (1997). “Sliding Mode Control for a Pneumatic Robot Leg”. In: *Proceedings of the 1997 European Control Conference*.

MARHEFKA, Duane W.; ORIN, David E.. (2000). “Fuzzy Control of Quadrupedal Running”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3063 – 3069.

MARTINS-FILHO, L. de S.; SILVINO, J. L.; RESENDE, P.; ASSUNÇÃO, T. C.. (2003). “Control of Robotic Leg Joints – Comparing PD and Sliding Mode Approaches”. In: *Proceedings CLAWAR’2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 147–153.

MCGEER, Tad. (1990). “Passive Dynamic Walking”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 9; No. 2; pp. 62 – 82.

MINOR, Mark; DULIMARTA, Hans; DANGHI, Girish; MUKHERJEE, Ranjan; TUMMALA, R. Lal; ASLAM, Dean. (2000). “Design, Implementation, and Evaluation of an Under-Actuated Miniature Biped Climbing Robot”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1999 – 2005.

- MOMBAUR, Katja D.; BOCK, Hans Georg; SCHLÖDER, Johannes P.; LONGMAN, Richard W.. (2001). “Human-Like Actuated Walking That is Asymptotically Stable Without Feedback”. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 4128 – 4133.
- MOMBAUR, Katja D.; LONGMAN, Richard W.; BOCK, Hans Georg; SCHLÖDER, Johannes P.. (2002). “Stable One-Legged Hopping Without Feedback and With a Point Foot”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3978 – 3983.
- NELSON, Gabriel M.; QUINN, Roger D.. (1999). “Posture Control of a Cockroach-like Robot”. *IEEE Control Systems*. Vol. 19; No. 2; pp. 9 – 14.
- NEUHAUS, Peter; KAZEROONI, H.. (2000). “Design and Control of Human Assisted Walking Robot”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 563 – 569.
- NONAMI, K.; HUANG, Q.-J.. (2001). “Humanitarian Mine Detection Six-Legged Walking Robot COMET-II With Two Manipulators”. In: *Proceedings CLAWAR’2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 989 – 996.
- OSUKA, K.; KIRIHARA, K.. (2000). “Motion Analysis and Experiments of Passive Walking Robot Quartet II”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3052 – 3056.
- PALIS, F.; RUSIN, V.; SCHNEIDER, A.. (2001). “Adaptive Impedance/Force Control of Legged Robot Systems”. In: *Proceedings CLAWAR’2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 323 – 329.
- PAPADOPOULOS, Didier; BUEHLER, Martin. (2000). “Stable Running in a Quadruped Robot With Compliant Legs”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 444 – 449.
- PARK, Jong H.; KIM, Kyoung D.. (1998). “Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3528 – 3533.
- PARK, Jong Hyeon; CHUNG, Hoam. (2000). “Hybrid Control of Biped Robots to Increase Stability in Locomotion”. *Journal of Robotic Systems*. Vol. 17; No. 4; pp. 187 – 197.
- PFEIFFER, F.; ELTZE, J.; WEIDEMANN, H.-J.. (1995). “The TUM-Walking Machine”. *Intelligent Automation and Soft Computing*. Vol. 1; No. 3; pp. 307 – 323.
- PLESTAN, F.; LAGHROUCHE, S.. (2003). “Sliding Mode Controller for the Walking of a Biped Robot – Arbitrary Order Sliding Mode Approach”. In: *Proceedings CLAWAR’2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 181 – 188.

PRATT, Jerry; DILWORTH, Peter; PRATT, Gill. (1997). “Virtual Model Control of a Bipedal Walking Robot”. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 193 – 198.

RINGROSE, Robert. (1997). “Self-Stabilizing Running”. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 487 – 493.

SARANLI, Uluç; BUEHLER, Martin; KODITSCHKEK, Daniel E.. (2001). “RHex – A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 20; No. 7; pp. 616 – 631.

SEYFARTH, A.; GEYER, H.. (2002). “Natural Control of Spring-Like Running – Optimised Self-Stabilization”. In: *Proceedings CLAWAR’2002 – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 81 – 85.

SILVA, Filipe Miguel Teixeira Pereira da. (2001). *Análise Dinâmica e Controlo de Sistemas Robóticos de Locomoção Bípede*. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Porto.

SILVA, Manuel F.; MACHADO, J. A. Tenreiro; LOPES, António M.. (2003). “Comparison of Fractional and Integer Order Control of an Hexapod Robot”. In: *Proceedings of DECT’03 – ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*; VIB-48377.

SMITH, Adam C.; BERKEMEIER, Matthew D.. (1997). “Passive Dynamic Quadrupedal Walking”. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 34 – 39.

SONG, Jun; LOW, K. H.; GUO, Weimiao. (1999). “A Simplified Hybrid Force/Position Controller Method for the Walking Robots”. *Robotica*. Vol. 17; Part 6; pp. 583 – 589.

SONG, Shin-Min; WALDRON, Kenneth J.. (1989). *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*. The MIT Press.

SPONG, Mark W.; BULLO, Francesco. (2002). “Controlled Symmetries and Passive Walking”. In: *Proceedings b’02 – 15th IFAC World Congress on Automatic Control*.

SUGAHARA, Yusuke; HOSOBATA, Takuya; MIKURIYA, Yutaka; LIM, Hun-Ok; TAKANISHI, Atsuo. (2003). “Realisation of Stable Dynamic Walking by a Parallel Bipedal Locomotor on Uneven Terrain Using a Virtual Compliance Control”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 595 – 600.

SUNG, Sanghak; YOUM, Youngil; CHUNG, Wankyun. (2003). “Hopping Through Stiffness Modulation Method (STIMM)”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 94 – 99.

- SUZUKI, S.; FURUTA, K.. (2002). “Enhancement of Stabilization For Passive Walking by Chaos Control Approach”. In: *Proceedings b'02 – 15th IFAC World Congress on Automatic Control*.
- TEDRAKE, Russ; ZHANG, Teresa W.; FONG, Ming-fai; SEUNG, H. Sebastian. (2004). “Actuating a Simple 3D Passive Dynamic Walker”. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 4656 – 4661.
- TORRES, Ann L.. (1996). *Virtual Model Control of a Hexapod Walking Robot*. BSc. Thesis. Department of Mechanical Engineering – Massachusetts Institute of Technology.
- TSAI, Chau-Ren; LEE, Tsu-Tian. (1998). “A Study of Fuzzy-Neural Force Control for a Quadrupedal Walking Machine”. *Transactions of the ASME – Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. Vol. 120; No. 1; pp. 124 – 133.
- TSAI, Chau-Ren; LEE, Tsu-Tian; SONG, Shin-Min. (1997). “Fuzzy Logic Control of a Planetary Gear Type Walking Machine Leg”. *Robotica*. Vol. 15; Part 5; pp. 533 – 546.
- UCHIDA, H.; NONAMI, K.. (2003). “Attitude Control of Six-Legged Robot Using Sliding Mode Control”. In: *Proceedings CLAWAR'2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 103 – 110.
- UCHIDA, Hiroaki; SHIMOI, Nobuhiro; JIU, Huang Qing; KOMIZO, Daisuke; NONAMI, Kenzo. (2000). “Force / Attitude Control of Mine Detecting Six-Legged Locomotion Robot”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 780 – 785.
- WOLLHERR, Dirk; HARDT, Michael; BUSS, Martin; STRYK, Oskar von. (2002). “Actuator Selection and Hardware Realization of a Small and Fast-Moving, Autonomous Humanoid Robot”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2491 – 2496.
- YAMAGUCHI, Jin'ichi; NISHINO, Daisuke; TAKANISHI, Atsuo. (1998). “Realization of Dynamic Biped Walking Varying Joint Stiffness Using Antagonistic Drives Joints”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2022 – 2029.
- YAMASAKI, Fuminori; HOSODA, Koh; ASADA, Minoru. (2002). “An Energy Consumption Based Control for Humanoid Walking”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2473 – 2477.
- YI, Keon Young. (1997). “Locomotion of a Biped Robot With Compliant Ankle Joints”. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 199 – 204.
- ZHAO, Mingguo; LIU, Li; WANG, Jingsong; CHEN, Ken; ZHAO, Jiandong; XU, Kai. (2002). “Control System of THBIP-I Humanoid Robot”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2253 – 2258.

ZHIFENG, Cheng; XIULI, Zhang; HAOJUN, Zheng; LIYAO, Zhao. (2003). “The CPG-based Bionic Quadruped System”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*; pp. 1828 – 1833.

ZIELINSKA, T.. (2001). “Synthesis of Control System – Gait Implementation Problems”. In: *Proceedings CLAWAR'2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 489 – 496.

ZONFRILLI, Fabio; ORIOLO, Giuseppe; NARDI, Daniele. (2002). “A Biped Locomotion Strategy for the Quadruped Robot Sony ERS-210”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2768 – 2774.

Capítulo 6

Estudo de Padrões de Locomoção Periódicos e Quase-Periódicos Para Robôs com Pernas

Uma das principais vantagens dos robôs com locomoção por pernas é a sua inerente capacidade de se deslocarem em terrenos com características muito diferentes. No entanto, para que tal seja possível, é importante dispor de algoritmos que modifiquem o padrão de locomoção a adoptar durante o movimento do robô, uma vez que este depende de vários factores, entre os quais se encontram as características e condições do terreno em que o robô se desloca, os requisitos de estabilidade e de mobilidade, a facilidade de controlo, a suavidade do movimento do corpo, a velocidade de locomoção e o consumo energético. Por outro lado, sendo certo que vários destes factores são frequentemente considerados como critérios de optimização, a sua importância relativa ainda não foi claramente estabelecida.

Verifica-se, assim, que a análise e selecção dos padrões de locomoção é uma área de investigação que necessita de um grande esforço de modelação para a melhoria da mobilidade dos robôs com pernas, especialmente quando se deslocam a velocidades elevadas e em ambientes não estruturados.

Tendo por base estas ideias, neste capítulo começa-se por analisar a adequação dos padrões de locomoção frequentemente adoptados pelos animais quadrúpedes e hexápodes, quando se deslocam a diferentes velocidades, a sistemas artificiais de locomoção. O objectivo consiste

em determinar qual é o padrão de locomoção (e os respectivos parâmetros) que um robô com pernas deve adoptar quando se desloca a uma velocidade particular.

De seguida, efectua-se o estudo dos padrões de locomoção quase-periódicos de sistemas de locomoção multipernas e apresentam-se duas estratégias alternativas para o robô transpor obstáculos que se encontrem no seu trajecto. Cada uma destas estratégias é testada, através de um conjunto de experiências de simulação, de forma a determinar as suas características de desempenho (do ponto de vista dos índices dinâmicos propostos no Capítulo 3) na ultrapassagem de obstáculos de diferentes dimensões ou posicionados em diferentes locais. Ainda nesta secção, estuda-se o desempenho das arquitecturas PD-P e PD-P&F no controlo das juntas de um hexápode durante a transposição de obstáculos.

Por último, analisam-se as funções de transferência do sistema artificial de locomoção hexápode quando este se desloca sobre uma superfície plana e livre de obstáculos. Neste estudo inclui-se a análise da variação das funções de transferência do sistema com o factor de ocupação, com os parâmetros do modelo do solo e com a velocidade de locomoção, para os casos dos modelos cinemático e dinâmico lineares do solo.

Tendo presentes estes factos, este capítulo encontra-se organizado da seguinte forma. A secção um apresenta uma introdução às metodologias utilizadas para a geração, selecção e optimização de padrões de locomoção periódicos e não periódicos. Na secção dois apresenta-se o estudo da variação de alguns dos parâmetros de locomoção com a velocidade de deslocamento, para robôs quadrúpedes e hexápodes. Nesta secção é ainda analisada a selecção do padrão de locomoção quadrúpede a adoptar em função da velocidade, tendo como critério de escolha a minimização de um dos índices dinâmicos formulados no Capítulo 3. De seguida, na secção três, estende-se o estudo dos padrões de locomoção à situação de terrenos com obstáculos para os quais é necessário adoptar padrões quase-periódicos e efectuar a selecção destes de acordo com a posição e as dimensões dos obstáculos a transpor. Segue-se, na secção quatro, o estudo da dinâmica da interacção pé-solo em robôs multipernas. Por último, na secção cinco apresentam-se as principais conclusões e as perspectivas para trabalho futuro nesta área.

6.1 Estudo dos Padrões de Locomoção

O primeiro estudo científico documentado da locomoção dos animais deve-se a Eadweard Muybridge, que estudou os padrões de locomoção de cavalos a partir de fotografias de animais em trote (HTTP#1). Os resultados deste trabalho foram publicados na revista *Scientific American* em 1878. Após este estudo inicial Muybridge dedicou-se ainda à análise dos padrões de locomoção de quarenta outros mamíferos, incluindo o dos seres humanos.

No entanto, só no século XX, em meados da década de 50, é que foi iniciado, de forma sistemática, o estudo e o desenvolvimento de máquinas com locomoção por pernas. Na realidade só cerca de uma década depois começaram a ser projectadas e construídas as primeiras máquinas. Por esta altura iniciaram-se também os estudos dos padrões de locomoção, tendo em vista a sua aplicação às máquinas desenvolvidas. No entanto, estes estudos iniciais centraram-se essencialmente na estrutura e na selecção dos modos de locomoção, tendo por base os padrões de locomoção observados nos animais.

A investigação focou-se primeiro no estudo, compreensão e formulação matemática dos padrões de locomoção naturais. Estes padrões de locomoção caracterizam-se pelo facto do corpo se encontrar em movimento constante durante a locomoção. Os resultados destes estudos têm sido significativos, mas estes padrões parecem ser mais adequados para os animais do que para as máquinas.

Por outro lado, os padrões de locomoção descontínuos, utilizados pelos animais em condições de locomoção extremas, apresentam excelentes características para a sua implementação em sistemas robóticos de locomoção, mas ainda não foram extensivamente estudados. Nestes padrões de locomoção só existe uma perna em movimento em cada instante e o corpo é movimentado para a frente e para trás com todos os pés firmemente posicionados no solo. Logo, estes padrões de locomoção provocam movimentos descontínuos do corpo e daí o seu nome.

Uma boa introdução à base de conhecimentos matemáticos e aos métodos gráficos utilizados na análise de padrões de locomoção é efectuada por Song e Waldron (1989). Neste seu trabalho, apresentam um estudo detalhado de vários padrões de locomoção utilizados para a locomoção em terrenos regulares e planos, em terrenos inclinados e para transpor três tipos de obstáculos de grandes dimensões (valas horizontais, degraus verticais e muros isolados),

bem como as relações entre a mobilidade dos veículos, em termos da estabilidade dos padrões de locomoção, e os volumes de trabalho das pernas. Estes autores apresentam também um conjunto de linhas gerais para a selecção dos padrões de locomoção adequados, de acordo com as condições do terreno, os requisitos de estabilidade, os requisitos energéticos e a velocidade pretendida. Descrevem ainda os principais padrões de locomoção e a sua aplicabilidade. Quanto à sua classificação, organizam os padrões de locomoção em dois grandes grupos (de uma forma praticamente consensual): periódicos e não periódicos.

Nos padrões de locomoção periódicos os pés são levantados e colocados no solo de acordo com um padrão repetitivo fixo. Estes padrões de locomoção são caracterizados pelo facto de cada perna ser colocada numa posição fixa e operar com o mesmo período. São os mais simples de implementar e necessitam de menor tempo de processamento. Desta forma, os veículos que adoptam padrões de locomoção periódicos podem ser facilmente controlados e podem deslocar-se mantendo uma margem de estabilidade óptima. No entanto, em princípio, estes padrões de locomoção não são adequados à locomoção em terrenos irregulares.

Os padrões de locomoção não periódicos, por outro lado, são apropriados para terrenos irregulares, uma vez que permitem que as pernas sejam posicionadas em locais previamente seleccionados e possibilitam que a colocação e o levantamento dos pés do solo sejam definidos de acordo com um conjunto de regras que têm em consideração as condições existentes para efectuar o movimento, ou qualquer critério de optimização (por exemplo, a maximização da estabilidade estática). Em função destas características, estes padrões de locomoção não periódicos são computacionalmente mais pesados.

Independentemente da sua classificação, Wettergreen (1995) descreve as várias aproximações à geração de padrões de locomoção e, após as classificar como sendo baseadas em controlo, comportamentos, regras e restrições, apresenta exemplos da sua geração, tendo por base cada uma destas aproximações.

De seguida serão abordados diversos trabalhos que versam o desenvolvimento e a implementação de padrões de locomoção periódicos e não periódicos para robôs com diferentes números de pernas. Não serão vistos aqui os casos de padrões de locomoção adequados para a locomoção de robôs que sofreram a perda de pernas. Estas situações de

locomoção são abordadas, por exemplo, por Yang e Kim (1998), Inagaki (1999), Lee e Hirose (2000), Yang (2003) e Spenneberg, *et al.* (2004).

6.1.1 Padrões de Locomoção Periódicos

Os padrões de locomoção periódicos são, na sua maioria, baseados na observação da locomoção dos mais diversos seres vivos na natureza (HTTP#1; HTTP#2). De entre os diferentes animais cuja locomoção tem servido de base a estes estudos, contam-se, por exemplo, os insectos (Kimura, *et al.*, 1994), os escorpiões (Klaassen, *et al.*, 2003; Spenneberg, *et al.*, 2004) e os mamíferos quadrúpedes (Xiuli, *et al.*, 2003).

Mais recentemente, têm também vindo a ser utilizados modelos para gerar padrões de locomoção periódicos baseados na biologia. Os biólogos descobriram evidências fisiológicas de que a locomoção dos humanos e dos animais, como sejam o andar, correr, nadar, rastejar, voar (e até mesmo o respirar), são realizados através de movimentos rítmicos sincronizados.

Na locomoção com pernas encontra-se envolvido um grande número de gdl e é essencial que os movimentos de todos estes gdl se encontrem perfeitamente coordenados. A parte principal da coordenação é efectuada no sistema nervoso central, que gera sinais de acordo com o movimento imposto pelo padrão de locomoção desejado, através de certos elementos neuronais designados por geradores centrais de padrões (GCP). Este processo da geração de sinal pode ser modelado como uma rede de osciladores não lineares mutuamente acoplados.

Assim, um GCP consiste num grupo de osciladores neuronais, agrupados em rede de forma a permitirem a geração de ciclos limite estáveis com um frequência e fase apropriadas. A arquitectura dos GCP tem sido extensivamente estudada para a locomoção de uma grande variedade de animais e os seus modelos matemáticos têm sido desenvolvidos e validados comparando os resultados obtidos por simulação com observações experimentais (Collins e Stewart, 1993; Collins e Richmond, 1994; Beek, *et al.*, 1995; Xiuli, *et al.*, 2003).

Ainda de acordo com a teoria da biologia, pode olhar-se para o conjunto global do sistema de controlo dos movimentos rítmicos como uma rede com retroalimentação em três camadas: a camada de tomada de decisão, a camada da geração do padrão central e a camada do ajuste motivado pela realimentação. É na segunda camada que se encontra o GCP.

A camada de tomada de decisão, ou controlador de alto nível, simula o sistema nervoso central, ajustando e controlando a locomoção do robô, escolhendo a velocidade pretendida e o padrão de locomoção a adotar. Cada padrão de movimento requer um conjunto específico de parâmetros e acoplamentos dos osciladores. Desta forma, os padrões de locomoção podem ser modificados através da alteração de um pequeno número de parâmetros (Matsuoka, 1987). Torna-se pois necessário implementar um controlador de supervisão, de forma a calcular e fornecer os parâmetros, para o gerador central de padrões implementar um determinado padrão de locomoção.

A camada de geração do padrão central consiste na unidade de oscilação que é implementada recorrendo a diversos modelos, como sejam, por exemplo, o modelo da equação diferencial de Matsuoka (Matsuoka, 1985) ou os osciladores de Van der Pol (Zielinska, 1996). Esta camada gera o sinal rítmico que serve de referência ao sistema de controlo dos actuadores das juntas das pernas do robô, quer seja uma referência de posição (Zielinska, 1996; Jalic, *et al.*, 1997; Cao e Kawamura, 1998; Shan, *et al.*, 2000; Inada e Ishii, 2003; Inagaki, *et al.*, 2004) ou de binário (Taga, 1995a; Kimura e Fukuoka, 2000).

A camada de ajuste por retroacção implementa uma malha de realimentação no modelo baseada, por exemplo, nos mecanismos de reflexos dos animais (Zhifeng, *et al.*, 2003), de forma a melhorar a capacidade de adaptabilidade do robô ao ambiente em que se move. É no entanto de frisar que o GCP pode produzir a saída neuronal ritmada na ausência de retroacção de informação sensorial dos músculos e dos mecanismos controlados pelos GCP e na ausência de controlo de centros neuronais superiores. No entanto, a integração de retroacção sensorial permite modular e disparar as saídas dos GCP da melhor forma possível.

Como exemplo da aplicação dos GCPs à geração dos padrões de locomoção de robôs multipernas, Collins e Richmond (1994) recorrem a um GCP, constituído por quatro osciladores não lineares acoplados, para gerar múltiplos padrões de oscilação desfasados que correspondem a três padrões de locomoção comuns nos quadrúpedes: o Andar, o Trote e o Salto.

Zhifeng, *et al.* (2003) adopta como GCP o modelo de Matsuoka e aplica-o à geração de múltiplos padrões de locomoção, para um robô quadrúpede, através do ajuste de alguns parâmetros do modelo do GCP. Recorre também à retroalimentação do modelo para interagir

com a informação do corpo do robô e do ambiente externo, de forma a melhorar a estabilidade e a adaptabilidade do robô.

No que diz respeito à aplicação deste método aos bípedes, Zielinska (1996) aplicou um GCP, baseado nos osciladores de Van der Pol, para a geração das trajectórias das ancas e dos joelhos do modelo de um robô bípede, resultando num padrão de locomoção semelhante ao dos humanos. Apresenta também um método para modificar o padrão de locomoção (a sua velocidade e as trajectórias das extremidades das pernas) através da modificação dos valores de alguns parâmetros nas equações dos osciladores.

Uma vez que recorre a quatro osciladores de Van der Pol acoplados, dispõe de 24 parâmetros para sintonizar, torna-se muito difícil a escolha destes parâmetros de forma a que as oscilações resultantes em função do tempo sejam estáveis (para o que recorre a métodos heurísticos para determinar os parâmetros) e a influência destes 24 parâmetros nas propriedades do oscilador torna-se bastante complexa.

Taga (1995a; 1995b) construiu um modelo da locomoção humana, que inclui um esqueleto constituído por oito segmentos, um sistema muscular com vinte músculos, um GCP composto de sete pares de osciladores neuronais (adopta modelo de GCP de Matsuoka) e mecanismos para processar e transportar os sinais motores e sensoriais. Demonstrou com este modelo, recorrendo a simulação computacional, que a locomoção emerge como um ciclo limite estável (Taga, 1995a) capaz de se adaptar em tempo real a diversas condições do ambiente e das tarefas (Taga, 1995b).

Jalics, *et al.* (1997) também aplicam um GCP para a geração das trajectórias de um modelo da locomoção humana, baseado na estrutura do esqueleto e dos músculos humanos, mas estes autores utilizam os sinais do GCP como referência de posição do deslocamento dos músculos que actuam as juntas, ao contrário de Taga (1995a) que os utilizava como referência de binário.

Apesar dos osciladores neuronais serem uma solução elegante, que explora a ligação existente entre a biomecânica e a neurociência, o facto de existir uma dinâmica altamente não linear e muitos parâmetros ajustáveis, sem que exista uma relação clara entre os valores dos parâmetros e o desempenho dos osciladores neuronais, leva a que estes parâmetros sejam difíceis de sintonizar, para se conseguirem obter as amplitudes e frequências de oscilação

pretendidas para as diferentes variáveis controladas. Os métodos correntes para efectuar a sintonia dos parâmetros dos osciladores neuronais são baseados em programas de simulação e no processo de tentativa-erro, em algoritmos genéticos (Cao e Kawamura, 1998; Inada e Ishii, 2003) e algoritmos genéticos com múltiplos objectivos de optimização (Shan, *et al.*, 2000). Ultimamente têm surgido outras aproximações, baseadas em processos analíticos, recorrendo a funções descritivas de múltiplas entradas (Arsenio, 2000) e aprendizagem por reforço (Ilg, *et al.*, 1999).

Uma possibilidade alternativa para a geração de padrões de locomoção periódicos passa pelo recurso a estratégias evolutivas. Parker, *et al.* (1997) utilizam algoritmos genéticos cíclicos para gerarem padrões de locomoção periódicos, baseados no padrão Ondulatório. Os padrões desenvolvidos são aplicados à locomoção do robô hexápode Stiquito. Já Hornby, *et al.* (2000) recorrem a um algoritmo genético para evoluir os padrões de locomoção para o robô quadrúpede AIBO, em terrenos perfeitamente lisos ou irregulares. Cada padrão de locomoção é completamente descrito por um conjunto de 20 parâmetros. De acordo com estes autores, os padrões de locomoção determinados desta forma são melhores do que os encontrados manualmente, quer em termos de velocidade, como em termos de robustez, quando o robô tem que se deslocar em diferentes tipos de superfícies. São também mais robustos em termos de portabilidade para outros robôs.

Por último, são de referir os padrões de locomoção periódicos adoptados pelos robôs para curvar. Cho, *et al.* (1995) apresentam um destes padrões para um robô quadrúpede efectuar mudanças de direcção, permitindo também a locomoção com uma certa rotação do corpo face ao eixo da trajectória e ainda a rotação sobre o eixo do corpo do robô. De acordo com os autores, este padrão de locomoção maximiza a velocidade de robô mantendo simultaneamente a margem de estabilidade dentro de um intervalo pré-definido.

6.1.2 Padrões de Locomoção Não Periódicos

Os trabalhos apresentados na subsecção anterior foram substancialmente enriquecidos por vários outros trabalhos no campo dos padrões de locomoção para superfícies irregulares e ambientes não estruturados. Estes padrões de locomoção não periódicos são por vezes chamados padrões de locomoção descontínuos (pelas razões referidas anteriormente) e, no

seu caso limite, designam-se por padrões de locomoção livres. Entre os diversos autores que se debruçaram sobre este problema, são de destacar vários trabalhos que se apresentam seguidamente.

Santos e Jiménez (1995) apresentam um estudo comparativo dos padrões de locomoção contínuos e descontínuos, no que concerne à sua máxima velocidade e estabilidade.

No seu estudo, demonstram que a margem de estabilidade longitudinal dos padrões de locomoção descontínuos é superior à dos padrões de locomoção contínuos (ondulatórios). Por outro lado, provam que os padrões de locomoção contínuos permitem velocidades mais elevadas dos que os descontínuos, para baixos valores do factor de ocupação (situação em que estes padrões de locomoção apresentam reduzidas margens de estabilidade).

Abordam também, de forma breve, aspectos relacionados com a implementação destes padrões em máquinas reais (no robô quadrúpede Rimho), os requisitos energéticos de cada um deles e o seu controlo em terrenos difíceis. Por último, formulam um padrão de locomoção descontínuo (o Padrão Descontínuo de Duas Fases), estudam a sua adaptação para o robô efectuar trajectórias curvas e apresentam diferentes métodos para aumentar quer o ângulo entre o eixo longitudinal do corpo do veículo e a direcção do seu movimento, quer a sua estabilidade.

Posteriormente, Jiménez e Santos (1997) propõem uma estratégia para adaptar, em tempo real, a locomoção de robôs com pernas a terrenos irregulares. Esta estratégia é baseada nas variações dos parâmetros de um padrão de locomoção periódico, que afectam a coordenação das pernas, sendo a sua principal característica não necessitar de conhecer os locais onde o robô deve colocar os pés. No entanto, este controlo adaptativo dos padrões de locomoção pode ser incorporado num sistema com sensores externos para seleccionar os locais onde o robô deve colocar os pés.

Yoneda, *et al.* (1997) descrevem a geração de um padrão que denominam de semi-periódico (uma vez que não é periódico mas também não é livre) adequado para um robô hexápode que se desloque num terreno irregular. Este padrão, baseado no PLO, caracteriza-se por adoptar para o factor de ocupação o valor máximo permitido pelo limite de velocidade da perna que se encontra na fase de transferência. Através da variação do factor de ocupação garante-se em cada instante a maximização da estabilidade do robô. O padrão de locomoção

apresentado permite também a movimentação do robô em qualquer direcção e com qualquer orientação do corpo.

Por último, Tsukagoshi, *et al.* (1997) propõem um padrão de locomoção, que denominam de intermitente, para que um robô quadrúpede consiga deslocar-se numa superfície inclinada mantendo a estabilidade. A sua principal característica reside no facto de o centro de gravidade do robô permanecer fixo durante a fase de transferência das pernas. Este padrão possibilita, com pequenas alterações, efectuar mudanças de direcção.

Os geradores centrais de padrões foram também já experimentados na geração de padrões de locomoção para terrenos irregulares. Kimura e Fukuoka (2000) recorrem a um GCP para induzirem um robô quadrúpede a andar de forma dinamicamente estável em terrenos irregulares. Para o efeito integram no sistema de controlo diversos reflexos inspirados na biologia.

No que diz respeito aos padrões de locomoção livres, têm também vindo a ser propostas várias alternativas para a sua geração.

Assim, Wettergreen (1995) apresenta a geração de um padrão de locomoção livre para o robô hexápode AMBLER, tendo por base uma estratégia de optimização baseada em restrições.

Bai, *et al.* (1999a) propõem um padrão de locomoção livre, baseado nos conceitos de padrão de locomoção primário e secundário, para permitir a um robô transpor obstáculos posicionados no seu trajecto. O padrão de locomoção primário é uma sequência fixa de transferências de pernas, com limites cinemáticos das extremidades das pernas, passíveis de serem modificados de acordo com a presença de obstáculos. Por seu lado, o padrão de locomoção secundário é um padrão de locomoção flexível, que é gerado para ajustar as extremidades das pernas. Recorrendo ao método proposto por estes autores, um veículo tende a deslocar-se recorrendo ao padrão de locomoção primário. Quando este padrão de locomoção não consegue deslocar o veículo, é adoptado o padrão de locomoção secundário para servir como complemento ao padrão de locomoção primário. Para modificar os parâmetros do padrão de locomoção é considerada a influência dos obstáculos. Posteriormente, estes mesmos autores desenvolveram este padrão de locomoção de forma a possibilitar ao robô executar trajectórias circulares (Bai, *et al.*, 1999b).

Um método alternativo para a geração de um padrão de locomoção livre para um robô hexápode é apresentado por Porta e Celaya (2001). O padrão de locomoção é gerado de uma forma reactiva, uma vez que não existe qualquer informação prévia sobre o terreno em que o robô se movimenta e sobre a direcção em que este se irá deslocar. Esta aproximação é baseada num algoritmo de aprendizagem com reforço e num conjunto de heurísticas para seleccionar a próxima perna a transferir. A solução gerada garante em qualquer instante a manutenção da estabilidade estática do robô.

Outra aproximação a este problema, com aplicação a um robô quadrúpede, é desenvolvida por Igarashi e Kakikura (2003). Estes autores propõem um padrão de locomoção livre denominado Padrão Seguidor de Trajectória (*Trajectory Following Gait*), cuja principal característica é permitir ao robô alterar a sua postura durante o movimento. Isto permite ao robô negociar obstáculos de três maneiras diferentes: passar por cima deles, no caso de terem pequenas dimensões, passar por baixo deles, no caso de estarem colocados a uma altura superior à que o robô consegue negociar com uma postura adequada e, por último, contorná-los quando apresentam grandes dimensões. Como critérios para decidir qual a perna que deve ser transferida, o algoritmo que implementa este padrão recorre a dois índices baseados na margem de estabilidade energética normalizada e na margem de movimento angular.

Os padrões de locomoção vistos até este ponto baseiam-se na regulação das trajectórias das juntas, sendo a atenção colocada no planeador de trajectórias de referência e na simplificação dos modelos. No entanto, nestes casos, a capacidade de interacção com o meio ambiente apresenta fortes limitações. Desta forma têm sido introduzidas alterações marcadas pelo crescente grau de importância atribuído ao ambiente e às forças de interacção que se estabelecem.

A utilização do controlo baseado em comportamentos foi proposto para o controlo de robôs autónomos por Brooks (1989). Este autor criticou a ênfase que é dada à experiência estreita e rígida sobre as aptidões fundamentais de sobrevivência. Pelo contrário, advoga a construção de robôs capazes de comportamentos simples, robustos e adaptativos em ambientes sem restrições, dinâmicos e mesmo abertamente hostis. Para controlar estes robôs, Brooks recorre a um sistema de controlo por camadas a que chama de arquitectura de

subordinação¹. A arquitectura de subordinação é uma arquitectura de inteligência artificial inspirada nos sistemas biológicos. É uma aproximação reactiva de baixo para cima sem um modelo e / ou a representação do ambiente. Esta arquitectura é baseada em máquinas de estados finitas acrescidas de registos e relógios internos. Cada camada é organizada em torno de tarefas particulares, como sejam evitar obstáculos e o seguimento de arestas.

A arquitectura de subordinação é constituída por um conjunto hierárquico de comportamentos pré-definidos que operam em paralelo. Um comportamento é definido como um conjunto de acções, que são disparadas por determinadas condições obtidas a partir de sensores (físico ou virtual), para alcançarem um determinado objectivo que eventualmente facilitará o alcançar do objectivo final do sistema. De acordo com as regras de supressão, os comportamentos de nível superior, se disparados, podem suprimir os de níveis inferiores.

Esta arquitectura de controlo foi posteriormente aplicada a robôs com locomoção por pernas por Wettergreen (1995), Celaya e Porta (1995; 1996) e Peng, *et al.* (2003).

Por último, é de referir o trabalho de Pack (1996). Este autor propõe uma estratégia para identificar, recorrendo a visão artificial, degraus de escadas. Depois de as escadas e as suas características terem sido claramente identificadas propõe algoritmos de locomoção para possibilitar a um robô quadrúpede subir os degraus.

6.1.3 Optimização dos Padrões de Locomoção

Nas situações em que a locomoção é efectuada em terrenos perfeitamente planos, surge a questão de determinar qual o padrão de locomoção mais eficiente em função da velocidade de locomoção, bem como os parâmetros de locomoção óptimos.

Uma análise deste género, para otimizar o padrão de locomoção de um robô hexápode com uma estrutura tipo insecto e três gdl por perna, é apresentado por Marhefka e Orin (1997). Como critério de optimização recorrem à minimização da potência consumida ao longo de um ciclo completo de locomoção. Em resultado do seu estudo apresentam um conjunto de regras (para estabelecerem a velocidade, os locais de colocação dos pés no solo, a

¹ Tradução do termo anglo-saxónico *Subsumption Architecture*.

altura do corpo ao solo, o factor de ocupação e o comprimento do passo) a aplicar durante a geração do padrão de locomoção de forma a maximizar a economia energética.

O problema da selecção do padrão de locomoção a adoptar pelo quadrúpede TITAN-VIII, em função da velocidade de deslocamento, é abordado por Kurazume, *et al.* (2003). Estes autores calculam o consumo energético recorrendo a um modelo de simulação e os resultados são depois comparados com os obtidos a partir de medições efectuadas durante a locomoção do robô TITAN-VIII, quando este adopta o padrão de locomoção Trote. O valor do consumo energético é utilizado na comparação de duas estratégias alternativas para manter a estabilidade dinâmica do robô, baseadas na compensação da trajectória do seu Ponto de Momento Zero (ZMP).

Estes autores efectuem ainda uma comparação do desempenho dos padrões de locomoção Ondulatório e Trote *versus* velocidade de locomoção, para diferentes valores do factor de ocupação β , recorrendo ao índice resistência específica (ρ), tal como apresentado na expressão (4.3). Deste estudo concluem que o padrão de locomoção Ondulatório apresenta valores inferiores da resistência específica para toda a gama de velocidades de locomoção estudada. No entanto, também verificam que o padrão de locomoção Trote apresenta valores inferiores de ρ para valores de β mais elevados.

Quanto à optimização dos parâmetros de locomoção, Weingarten, *et al.* (2004) apresentam um sistema automático para efectuar a sintonia dos parâmetros que afectam o desempenho do padrão de locomoção do robô hexápode RHex. Para o efeito, recorrem ao algoritmo de procura directa Nelder-Mead, aplicado a duas funções objectivo baseadas na resistência específica, tal como apresentado na expressão (4.2).

Por último, Papadopoulos e Cherouvim (2004) recorrem a um modelo dinâmico para efectuar a análise dos padrões de locomoção passivos de robôs monopés, tendo em vista determinar qual deles dissipa a menor quantidade de energia por distância percorrida. Durante a análise consideram quer as perdas mecânicas, quer as eléctricas. Desta forma determinam analiticamente o padrão de locomoção mais eficiente para o robô. Por último, verificam os resultados alcançados através de simulações numéricas e estudam os efeitos que são impostos ao padrão de locomoção óptimo quando se utilizam actuadores com saturação.

Esta temática será abordada com maior detalhe na secção seguinte, para o caso de sistemas artificiais de locomoção quadrúpedes e hexápodes que adoptem padrões de locomoção periódicos frequentemente observados nos animais, durante a sua locomoção a diferentes velocidades na natureza.

6.1.4 Estratégia a Adostrar para a Selecção do Local para Colocar os Pés

Do exposto neste capítulo, até este ponto, pode ficar-se com a ideia de que após seleccionar o padrão de locomoção a adoptar por um robô com pernas todo o problema do movimento deste está resolvido. Mas a escolha do padrão de locomoção a adoptar é só uma parte do problema. O movimento de um sistema artificial de locomoção para atingir um determinado objectivo é tipicamente muito complexo devido aos gdl envolvidos e às restrições de contacto que necessitam de ser mantidas. Por estes motivos é habitual adoptar-se uma aproximação ao planeamento de movimento em dois níveis distintos.

O nível mais elevado apenas considera o planeamento global da trajectória, geralmente a trajectória do corpo considerado como um único bloco, do ponto inicial ao ponto final, evitando colisões com eventuais obstáculos que surjam no seu caminho. Dado o planeamento grosseiro da trajectória efectuado neste primeiro nível, entra em acção o segundo nível, que considera unicamente o planeamento local do movimento, para um dado padrão de locomoção. Neste nível inferior efectua-se o planeamento do movimento das pernas e a selecção dos locais onde os pés vão ser colocados, de forma a permitir ao robô cumprir o plano de mais alto nível, obedecendo a um conjunto de restrições, como sejam restrições cinemáticas, manutenção da estabilidade e economia energética. Se este segundo nível de planeamento falhar deve existir um mecanismo de realimentação capaz de gerar um plano de alto nível alternativo. Para este efeito têm sido propostas diferentes abordagens tanto para robôs bípedes (Bourgeot, *et al.*, 2002; Okada, *et al.*, 2003; Kuffner, *et al.*, 2003; Sabe, *et al.*, 2004; Li e Huang, 2004) como para sistemas multipernas (Chen, *et al.*, 1998; Eldershaw e Yim, 2001; Bai, *et al.*, 2002; Igarashi e Kakikura, 2004).

De referir que antes de o robô cumprir um dado trajecto que o leve de um ponto arbitrário A para um outro ponto B, necessita de construir um mapa do terreno que tem que atravessar, após o que pode proceder ao planeamento do trajecto que vai seguir.

Com esta finalidade, Chow e Chung (2000) propõem a utilização de um sistema de visão artificial para detectar obstáculos no terreno que um robô bípede tem que navegar. Ao contrário dos veículos com rodas, as câmaras montadas em robôs com pernas oscilam devido ao impacto da locomoção e as imagens instáveis obtidas provocam um desempenho operacional degradado. Assim, o método que estes autores utilizam para a detecção e identificação de obstáculos é adequado à locomoção com pernas. Também nesta perspectiva, Karazume e Hirose (2000) propõem um sistema de estabilização de imagem, para operação remota de robôs com pernas, recorrendo à utilização de uma câmara CCD de elevada velocidade e giroscopos.

Por sua vez, Lorch, *et al.* (2002) utilizam um sistema de visão artificial para detectar a presença de obstáculos na trajetória planeada para a locomoção de um robô bípede e a distância a que esses obstáculos se encontram da posição actual do robô. Com base nesta informação, o espaço de passos possíveis é discretizado em primitivas de locomoção. Cada primitiva corresponde a um passo de comprimento L_S , com a máxima altura a que o pé deverá ser levantado do solo F_C e duração de passo $2T$. Durante a locomoção do robô este espaço de primitivas é pesquisado de forma a encontrar uma combinação de passos que permita transpor o próximo obstáculo. No caso de haver mais do que uma solução possível, é seleccionada a combinação de primitivas de locomoção que minimiza uma função de custo heurística. Esta função de custo é determinada de forma a que seja favorecida a execução de primitivas de locomoção com comprimentos de passo próximos do passo humano (inspirada na locomoção humana).

A pesquisa da melhor combinação de primitivas de locomoção é efectuada após cada passo, de forma a melhorar a informação sobre a posição do obstáculo e a permitir levar em consideração possíveis alterações da sua posição. No entanto, esta estratégia para transpor obstáculos só é despoletada quando o obstáculo se encontra a uma distância do robô inferior a $3L_S$ (em que L_S é o comprimento nominal do passo do robô na ausência de obstáculos).

Também Yagi e Lumelsky (1999) implementaram um algoritmo para um robô bípede ultrapassar obstáculos durante a locomoção. Durante o seu movimento no ambiente normal de trabalho o robô detecta, recorrendo a visão artificial, a presença e as características de obstáculos no seu trajecto, nomeadamente o tamanho, a forma e a localização. Após esta

caracterização dos obstáculos, um algoritmo interno escolhe a melhor opção para os transpor. As possibilidades são: passar por cima do obstáculo sem lhe tocar, colocar um pé em cima do obstáculo para o transpor ou passar à sua volta (evitando o obstáculo). O posicionamento dos pés durante esta operação é planeado de forma a garantir a estabilidade dinâmica. Para implementar estes padrões de locomoção, o robô dispõe de cinco variantes do padrão de locomoção básico: variação do comprimento do passo; variação da altura do pé ao solo durante a fase de transferência; passo para o lado; passo para a frente-lado; colocar o pé em cima do obstáculo e voltar a colocá-lo no solo.

Um outro algoritmo para efectuar o planeamento da trajectória de um robô humanóide num ambiente com obstáculos é apresentado por Li, *et al.* (2003). A escolha da forma como a transposição dos obstáculos é efectuada (passar por cima deles ou contorná-los) tem por base um critério denominado de eficiência energética. De acordo com esta ideia, o algoritmo proposto por estes autores (que permite planear três passos em avanço) escolhe o local de colocação dos pés tendo por base a maximização da relação entre o comprimento dos passos dados e o consumo energético necessário para efectuar os passos. O cálculo da energia necessária para efectuar cada passo é uma relação linear de três factores, nomeadamente a energia para efectuar o movimento horizontal, o movimento vertical e o movimento angular das juntas do robô. Os valores destas energias são determinados a partir de dados estatísticos da locomoção humana, sendo os pesos atribuídos a cada um destes factores dependentes do tamanho do obstáculo a transpor.

Por sua vez Chen, *et al.* (1998) descrevem o planeamento da trajectória e a optimização numérica do padrão de locomoção estaticamente estável de um robô hexápode que se desloca num terreno com obstáculos. O terreno pode conter valas e depressões, que o robô consegue ultrapassar passando por cima, e obstáculos que têm que ser contornados. O planeamento de movimento implementado efectua a determinação da trajectória do veículo, incluindo a sua posição e orientação, a sequência de pegadas do padrão de locomoção, e a colocação dos pés em locais adequados no terreno. O processo de optimização seguido por estes autores permite gerar um plano quase óptimo, minimizando o tempo necessário para o robô cumprir o trajecto necessário e garantindo a estabilidade do veículo, num intervalo de tempo relativamente curto.

6.2 Adaptação dos Padrões de Locomoção Quadrúpedes e Hexápodes à Velocidade

Após esta introdução, nesta secção estudam-se os padrões de locomoção periódicos aplicados a quadrúpedes e hexápodes. Pretende-se determinar o melhor conjunto de padrão e parâmetros de locomoção, para diferentes velocidades de deslocamento do robô, com base no modelo dinâmico do sistema. Nesta perspectiva, efectuam-se várias experiências que mostram a influência dos padrões de locomoção periódicos e dos parâmetros de locomoção (β , L_S , H_B) sobre as medidas de desempenho dinâmicas formuladas no Capítulo 3.

Numa primeira fase estuda-se o robô hexápode durante a locomoção com o padrão de locomoção ondulatório. Começa-se por analisar a variação dos índices de desempenho com este e outros padrões de locomoção e para diferentes sintonias do controlador das juntas das pernas. De seguida, é desenvolvida uma análise similar para o robô quadrúpede.

Numa segunda fase implementam-se diversos padrões de locomoção adoptados frequentemente pelos animais quadrúpedes na natureza, quando se deslocam a diferentes velocidades, e simula-se o robô quadrúpede de forma a comparar o desempenho destes padrões *versus* V_F , para diferentes sintonias do controlador.

Nas duas fases deste estudo o robô é controlado recorrendo a um controlador PD-P&F nas juntas das pernas. Com este algoritmo de controlo, surgem forças de valor elevado durante o impacto dos pés com o solo, levando ao aparecimento de binários que se propagam através da estrutura mecânica das pernas até às juntas, como referido no capítulo anterior. De forma a determinar a influência destes impactos sobre os resultados, as experiências são repetidas para um caso ideal, onde se considera que as trajectórias são idênticas às planeadas, pelo que não ocorrem impactos dos pés do robô.

6.2.1 Metodologia de Sintonia do Controlador

Para efectuar a simulação tomam-se os parâmetros do robô, da locomoção e do solo apresentados na Tabela 6.1. Considera-se, ainda, que os actuadores das juntas do robô apresentam elevado desempenho, com um binário máximo na equação (3.10) de $\tau_{ijMax} = 400$ Nm.

Para sintonizar o controlador adopta-se um método sistemático (tal como descrito na subsecção 5.2.1), testando e avaliando uma grelha de várias combinações possíveis de

parâmetros do controlador, em simultâneo com o estabelecimento dum compromisso no que concerne à minimização dos índices de desempenho E_{av} (3.20) e ε_{xyH} (3.25a).

De forma a analisar a evolução dos parâmetros de locomoção (β , L_S , H_B) com V_F , o controlador do robô é sintonizado para cada valor da velocidade de avanço $V_F = \{0,2 \text{ ms}^{-1}; 1,0 \text{ ms}^{-1}; 5,0 \text{ ms}^{-1}\}$ e do factor de ocupação $\beta = \{25\%; 50\%; 75\%\}$, durante a locomoção com o PLO, obtendo-se os parâmetros do controlador apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.1: Parâmetros do sistema.

Parâmetros do modelo do robô		Parâmetros da locomoção	
S_P	1,0 m	β	50%
L_{ij}	0,5 m	L_S	1,0 m
O_i	0,0 m	H_B	0,9 m
M_b	88,0 kg	F_C	0,1 m
M_{ij}	1,0 kg	V_F	1,0 ms^{-1}
M_{if}	0,0 kg	Parâmetros do solo	
K_{xH}	10^5 Nm^{-1}	K_{xF}	1302152,0 Nm^{-1}
K_{yH}	10^4 Nm^{-1}	K_{yF}	1705199,0 Nm^{-1}
B_{xH}	10^3 Nsm^{-1}	B_{xF}	2364932,0 Nsm^{-1}
B_{yH}	10^2 Nsm^{-1}	B_{yF}	2706233,0 Nsm^{-1}
		ν	0,9

Tabela 6.2: Parâmetros do controlador para o caso do robô hexápode.

	$V_F = 0,2 \text{ ms}^{-1}$		$V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$		$V_F = 5,0 \text{ ms}^{-1}$	
$\beta = 25\%$	Kp_1	8000	Kp_1	10000	Kp_1	200
	Kd_1	0	Kd_1	40	Kd_1	100
	Kp_2	500	Kp_2	500	Kp_2	2000
	Kd_2	60	Kd_2	20	Kd_2	60
$\beta = 50\%$	Kp_1	9000	Kp_1	1000	Kp_1	700
	Kd_1	120	Kd_1	180	Kd_1	100
	Kp_2	5000	Kp_2	2500	Kp_2	7500
	Kd_2	0	Kd_2	40	Kd_2	10
$\beta = 75\%$	Kp_1	7000	Kp_1	4000	Kp_1	7500
	Kd_1	140	Kd_1	180	Kd_1	60
	Kp_2	4000	Kp_2	3500	Kp_2	200
	Kd_2	20	Kd_2	20	Kd_2	10

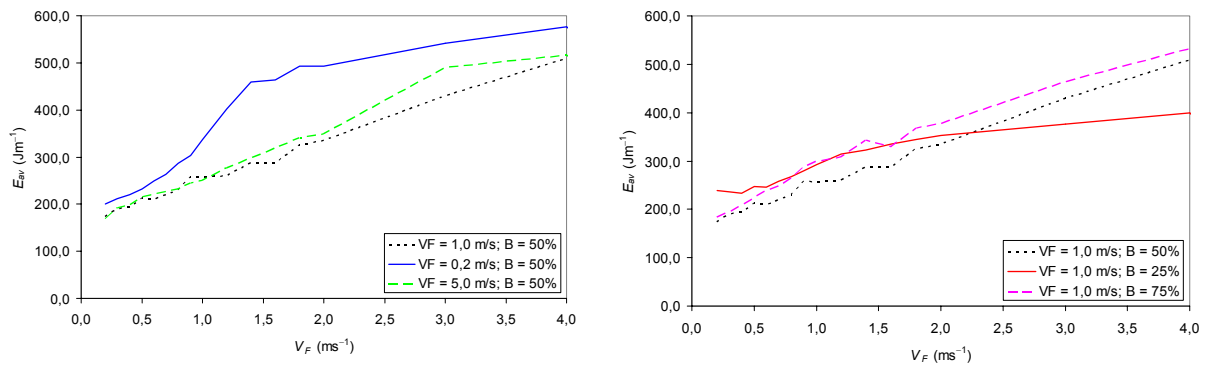


Figura 6.1: $\min[E_{av}(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.

6.2.2 Adaptação dos Parâmetros do Padrão de Locomoção à Velocidade de Locomoção de Robôs Hexápodes

Após sintonizar o controlador, a locomoção do robô é simulada para diferentes padrões de locomoção, ao mesmo tempo que se varia a sua velocidade de avanço no intervalo $0,2 \leq V_F \leq 4,0$ ms^{-1} . Nas simulações, consideram-se os padrões PLO, PLFIMC, PLFICC, PLOI, PLFIMCI e PLFICCI. Para cada padrão de locomoção e velocidade de avanço do robô, é determinado o conjunto de parâmetros de locomoção (β , L_S , H_B) que minimizam cada um dos índices de otimização $\{E_{av}, D_{av}, T_L, F_L\}$.

Os gráficos apresentados na Figura 6.1 mostram o valor mínimo do índice E_{av} , no intervalo de V_F em consideração. Para analisar a consistência dos resultados, cada gráfico apresenta curvas obtidas com três sintonias diferentes do controlador. Assim, apresentam-se gráficos para sintonias obtidas a diferentes velocidades, com o mesmo factor de ocupação ($\{V_F = 0,2$ ms^{-1} ; $\beta = 50\%$ }, $\{V_F = 1,0$ ms^{-1} ; $\beta = 50\%$ }, $\{V_F = 5,0$ ms^{-1} ; $\beta = 50\%$ }, e sintonias obtidas com o mesmo valor da velocidade, mas para diferentes valores do factor de ocupação ($\{V_F = 1,0$ ms^{-1} ; $\beta = 25\%$ }, $\{V_F = 1,0$ ms^{-1} ; $\beta = 50\%$ }, $\{V_F = 1,0$ ms^{-1} ; $\beta = 75\%$ }). É possível concluir que os valores mínimos de E_{av} aumentam com V_F , independentemente da sintonia do controlador adoptada. Apesar de não se encontrar apresentado aqui, devido a limitações de espaço, o comportamento dos gráficos de $\min[E_{av}(V_F)]$, para todas as outras sintonias do controlador apresenta uma forma similar. Este aumento com V_F é observado nos outros índices de desempenho, independentemente da sintonia do controlador adoptada, como pode ser visto nas Figuras 6.2 – 6.4, respectivamente para o caso dos índices D_{av} , T_L e F_L .

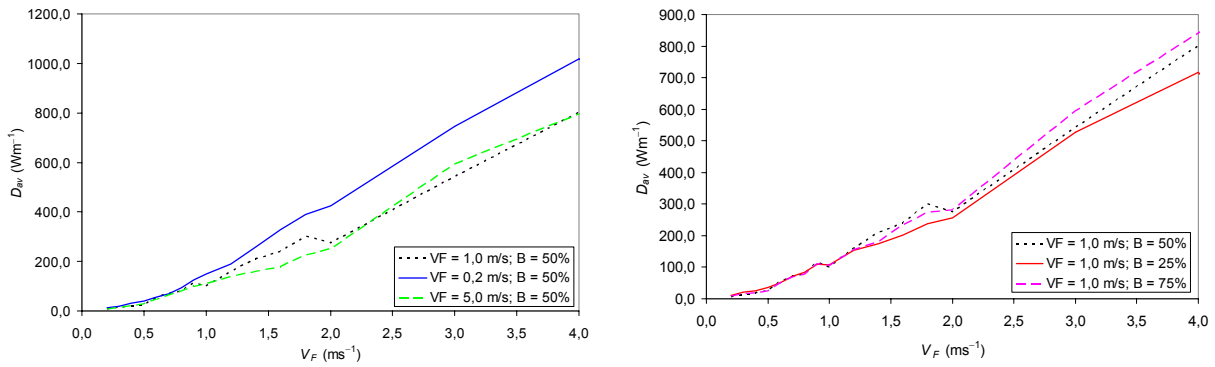


Figura 6.2: $\min[D_{av}(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.

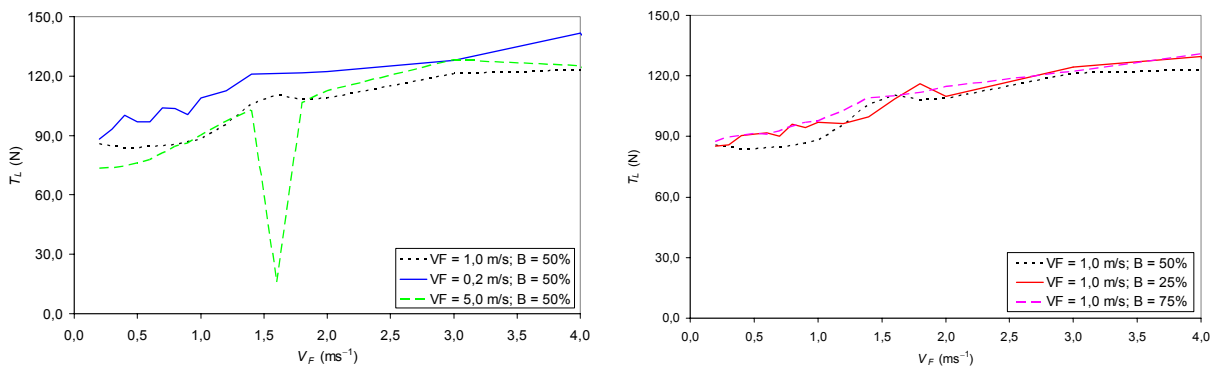


Figura 6.3: $\min[T_L(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.

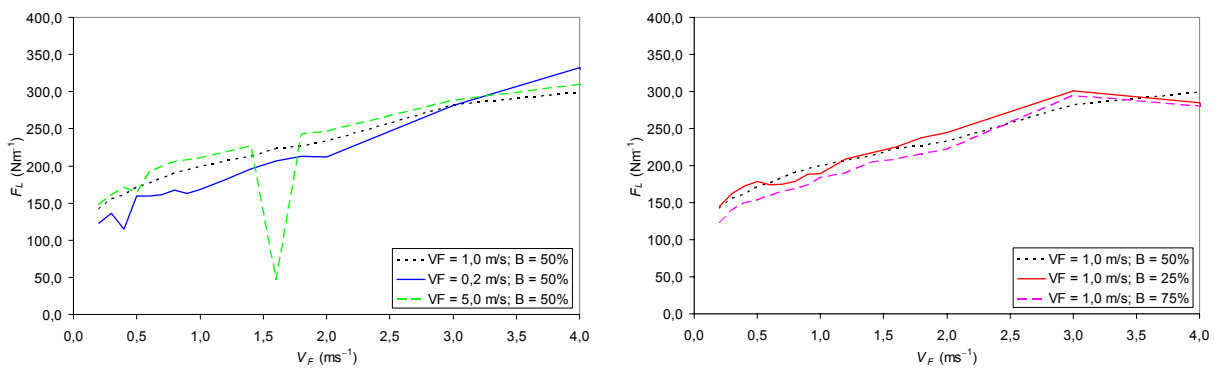


Figura 6.4: $\min[F_L(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.

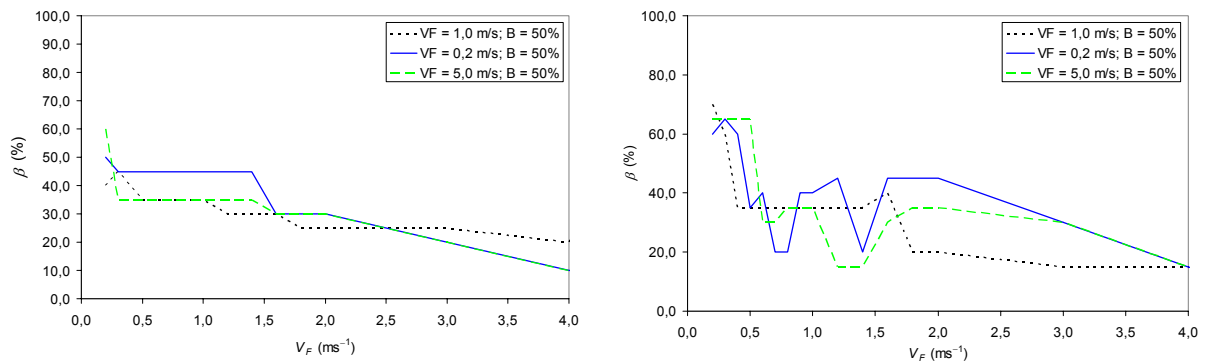


Figura 6.5: $\beta(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(T_L)$, para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.

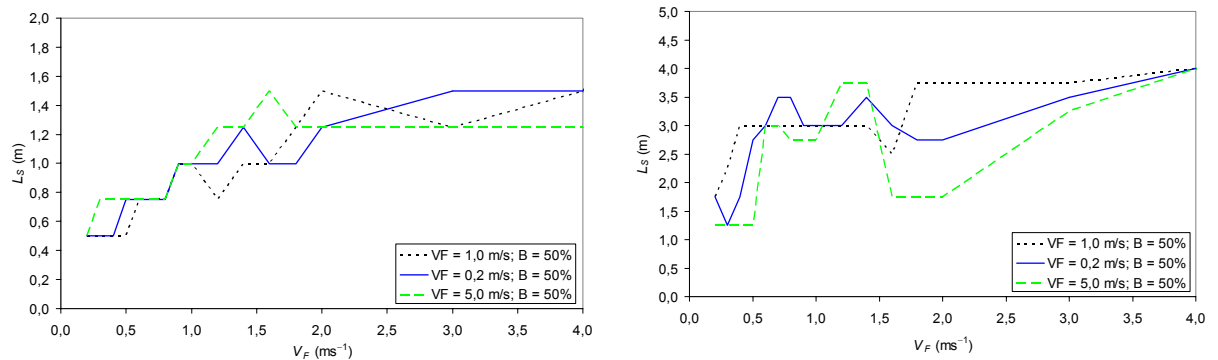


Figura 6.6: $L_S(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(T_L)$, para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.

É também interessante analisar a forma como os parâmetros de locomoção variam com V_F . A Figura 6.5 mostra que os valores ótimos de β diminuem com V_F , quando se analisa a locomoção do robô através dos índices E_{av} e T_L . Por outro lado, a Figura 6.6 mostra que o valor ótimo de L_S aumenta com V_F quando se consideram os índices de desempenho E_{av} e T_L . No que diz respeito à variação do valor ótimo de H_B com V_F , constata-se que estes índices de desempenho indicam resultados diferentes. A Figura 6.7 mostra que H_B deve permanecer constante / aumentar com V_F , do ponto de vista de E_{av} / T_L .

A variação dos três parâmetros de locomoção (β , L_S , H_B) é do mesmo tipo quando se analisa a locomoção do robô recorrendo aos outros índices de desempenho ou quando se adoptam as diferentes sintonias do controlador das juntas das pernas do robô (apresentadas na Tabela 6.2).

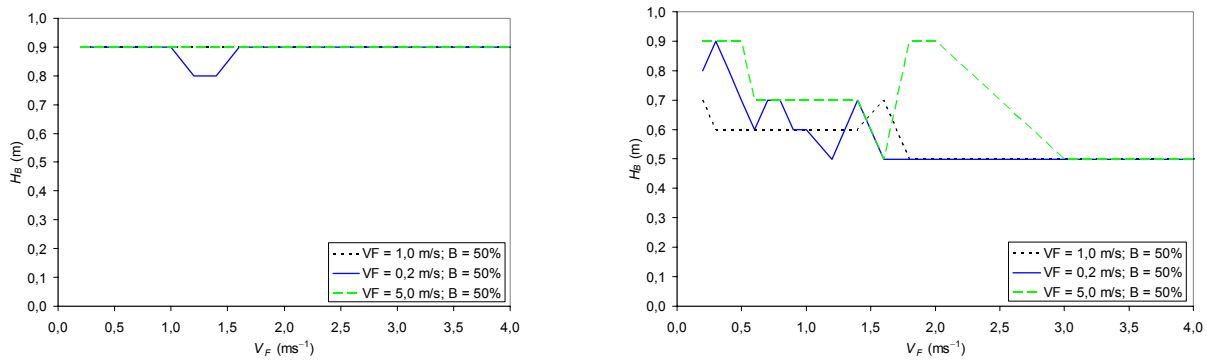


Figura 6.7: $H_B(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(T_L)$, para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.

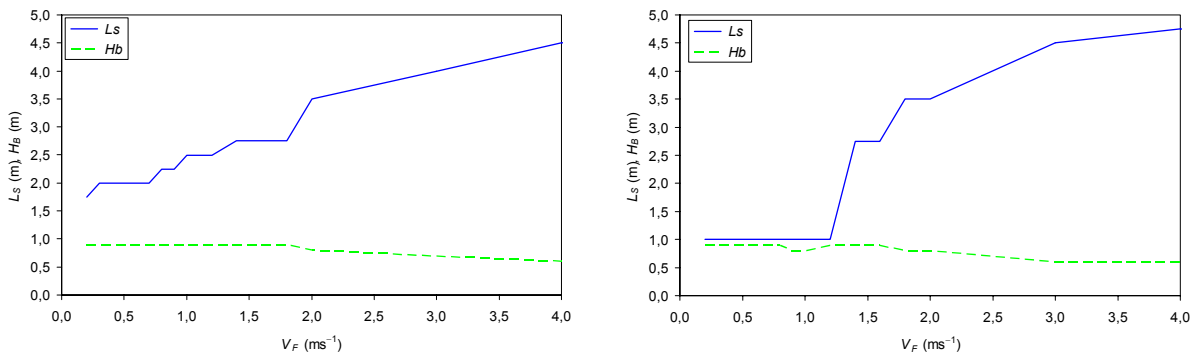


Figura 6.8: $L_S(V_F)$ e $H_B(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(D_{av})$, considerando as trajetória planeadas do robô, com $F_C = 0,1$ m, PLO.

Para os outros padrões de locomoção periódicos considerados, a evolução dos índices de desempenho e dos parâmetros de locomoção com V_F segue o mesmo padrão. Portanto, conclui-se que os parâmetros de locomoção devem ser adaptados à velocidade de locomoção de forma a otimizar o desempenho do robô. À medida que V_F aumenta, os valores de β e H_B , devem ser diminuídos e o valor de L_S aumentado.

Por último, as experiências anteriores são repetidas para um caso ideal, onde se considera que as trajetórias são idênticas às planeadas. A Figura 6.8 mostra a evolução dos parâmetros de locomoção L_S e H_B com V_F quando se consideram os índices de desempenho E_{av} e D_{av} . Esta figura indica que L_S deve aumentar, e H_B deve diminuir, com V_F . Estes resultados estão de acordo com os obtidos anteriormente e apresentados na secção 4.2.8 do Capítulo 4. No que concerne ao valor óptimo de β este é independente de V_F , e deve ser mantido pequeno. As variações dos três parâmetros de locomoção (β , L_S , H_B) são similares quando se analisa a locomoção do robô recorrendo aos outros índices de desempenho.

Tabela 6.3: Parâmetros do controlador para o caso do robô quadrúpede.

	$V_F = 0,2 \text{ ms}^{-1}$		$V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$		$V_F = 5,0 \text{ ms}^{-1}$	
$\beta = 25\%$	Kp_1	10000	Kp_1	5000	Kp_1	4000
	Kd_1	0	Kd_1	40	Kd_1	160
	Kp_2	1000	Kp_2	4000	Kp_2	500
	Kd_2	60	Kd_2	0	Kd_2	20
$\beta = 50\%$	Kp_1	5000	Kp_1	1000	Kp_1	1000
	Kd_1	80	Kd_1	200	Kd_1	100
	Kp_2	4500	Kp_2	2000	Kp_2	4500
	Kd_2	0	Kd_2	20	Kd_2	20
$\beta = 75\%$	Kp_1	3000	Kp_1	4000	Kp_1	9000
	Kd_1	180	Kd_1	200	Kd_1	80
	Kp_2	2500	Kp_2	5000	Kp_2	500
	Kd_2	0	Kd_2	20	Kd_2	40

6.2.3 Adaptação dos Parâmetros do Padrão de Locomoção à Velocidade de Locomoção de Robôs Quadrúpedes

Os resultados acabados de descrever, para o caso do robô hexápode, são semelhantes aos que se obtêm para um robô quadrúpede, tanto para os diferentes padrões de locomoção, como para as diferentes sintonias do controlador.

Tal como apresentado na subsecção anterior, estuda-se o robô quadrúpede de forma a analisar a evolução dos parâmetros de locomoção β , L_S e H_B com V_F , quando o controlador do robô é sintonizado para diferentes valores da velocidade de avanço $V_F = \{0,2 \text{ ms}^{-1}; 1,0 \text{ ms}^{-1}; 5,0 \text{ ms}^{-1}\}$ e do factor de ocupação $\beta = \{25\%; 50\%; 75\%\}$, durante a locomoção com o PLO, resultando os parâmetros do controlador apresentados na Tabela 6.3.

Após concluir a sintonia do controlador, a locomoção do robô quadrúpede é simulada para diferentes padrões de locomoção e analisa-se o efeito da variação da velocidade de avanço no intervalo $0,2 \leq V_F \leq 4,0 \text{ ms}^{-1}$. Mais uma vez, consideram-se os padrões PLO, PLFIMC, PLFICC, PLOI, PLFIMCI e PLFICCI e determina-se o conjunto de parâmetros de locomoção (β, L_S, H_B) que minimiza uma determinada medida de desempenho $\{E_{av}, D_{av}, T_L, F_L\}$.

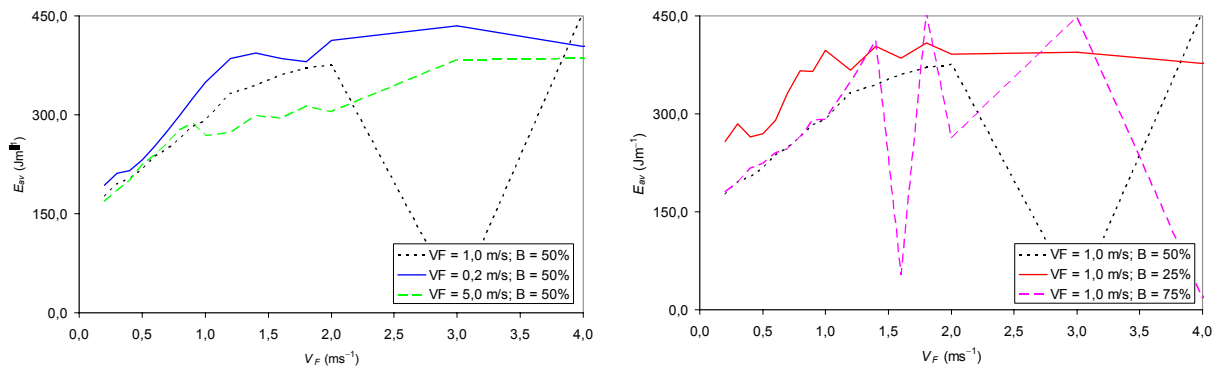


Figura 6.9: $\min[E_{av}(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.

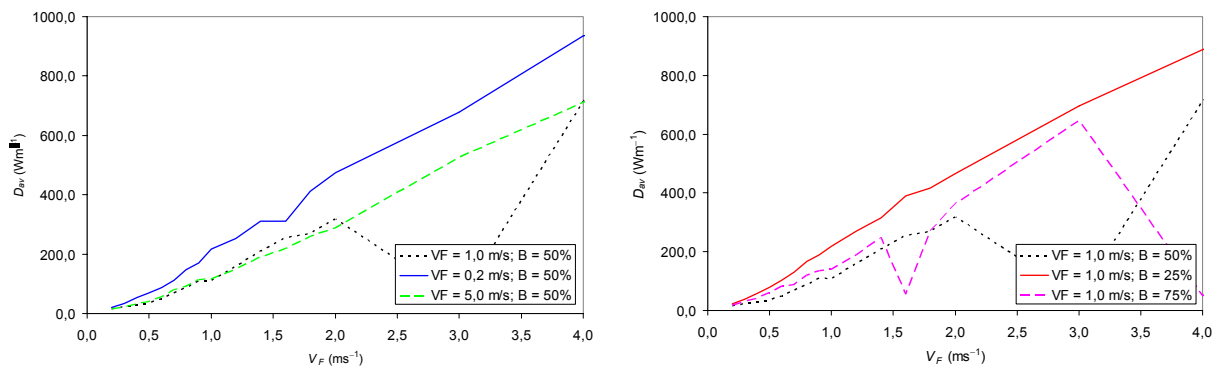


Figura 6.10: $\min[D_{av}(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.

A Figura 6.9 mostra o valor mínimo do índice E_{av} , no intervalo de V_F em consideração, para sintonias diferentes do controlador PD-P&F aplicado às juntas das pernas do robô quadrúpede. Tal como anteriormente, verifica-se que os valores mínimos do índice E_{av} aumentam com V_F , independentemente da sintonia do controlador adoptada. No entanto, neste caso, algumas das curvas apresentam uma oscilação pronunciada particularmente para valores de V_F elevados. Apesar de não se encontrar apresentado aqui, o comportamento dos gráficos $\min[E_{av}(V_F)]$, para as restantes sintonias do controlador, apresenta uma forma similar. Este aumento com V_F é observado nos outros índices de desempenho, independentemente da sintonia do controlador adoptada, como pode ser observado nas Figuras 6.10 – 6.12 para, respectivamente o caso de D_{av} , T_L e F_L . Mais uma vez, algumas das curvas apresentam alguma oscilação para valores de V_F elevados.

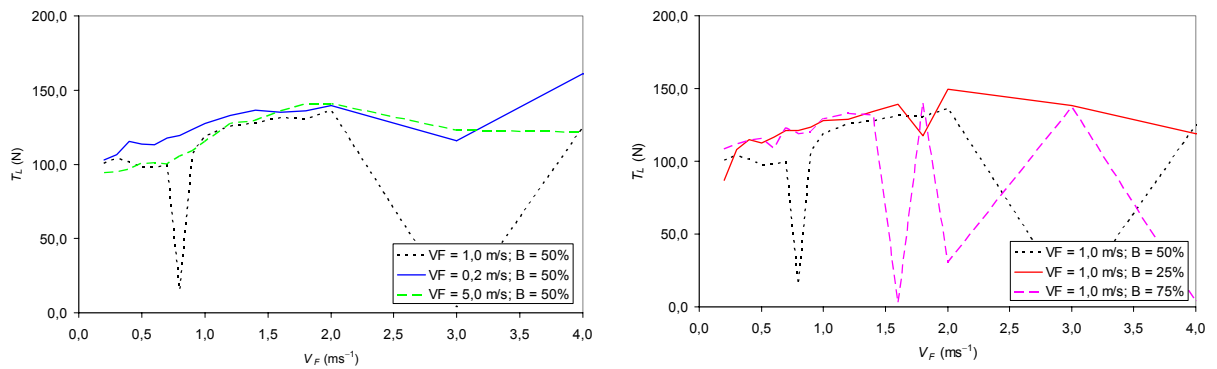


Figura 6.11: $\min[T_L(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.

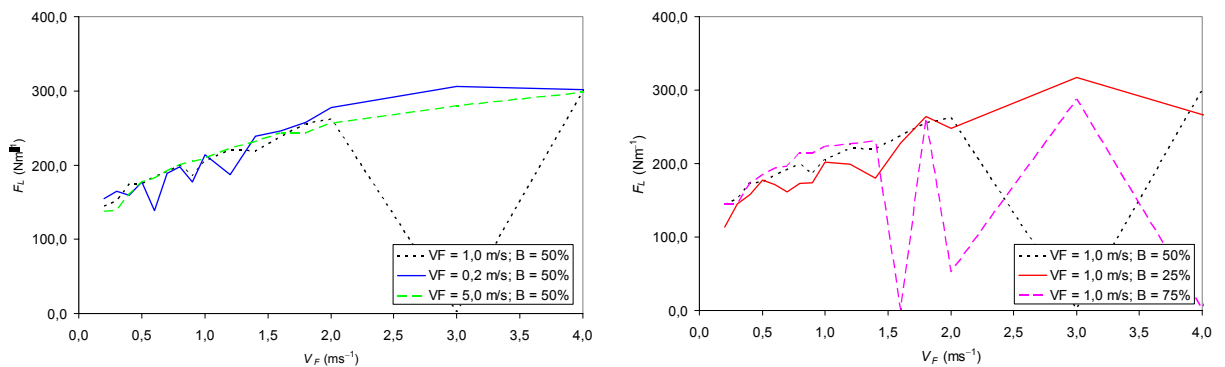


Figura 6.12: $\min[F_L(V_F)]$ para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1$ m, PLO.

O passo seguinte é a análise da variação dos parâmetros de locomoção com V_F . Da Figura 6.13 constata-se que os valores óptimos de β diminuem com V_F , quando a locomoção do robô é analisada através dos índices E_{av} e T_L . Quanto ao valor óptimo de L_S , a Figura 6.14 mostra que este deve aumentar com V_F quando se mede o desempenho através dos índices E_{av} e T_L . Por seu lado, a Figura 6.15 mostra que H_B deve permanecer constante / aumentar com V_F , do ponto de vista de E_{av} / T_L .

Estes três parâmetros de locomoção (β , L_S , H_B) apresentam variações equivalentes quando a locomoção do robô é analisada recorrendo aos outros índices de desempenho, assim como para as diferentes sintonias do controlador (Tabela 6.3). Mais ainda, a evolução dos índices de desempenho e dos parâmetros de locomoção com V_F é do mesmo tipo para os demais padrões de locomoção periódicos considerados neste estudo.

Do exposto, e tal como para a situação da locomoção hexápode, conclui-se que à medida que V_F aumenta, os valores de β e H_B , devem ser diminuídos e o valor de L_S aumentado.

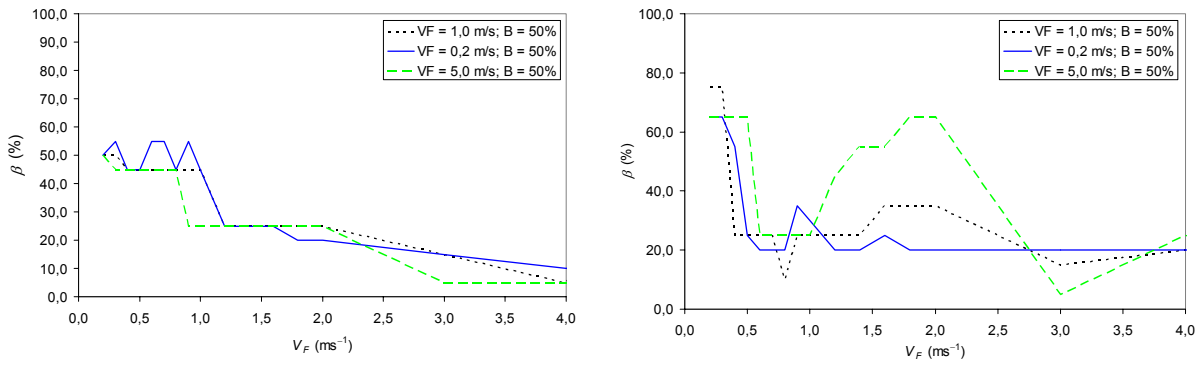


Figura 6.13: $\beta(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(T_L)$, para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1 \text{ m}$, PLO.

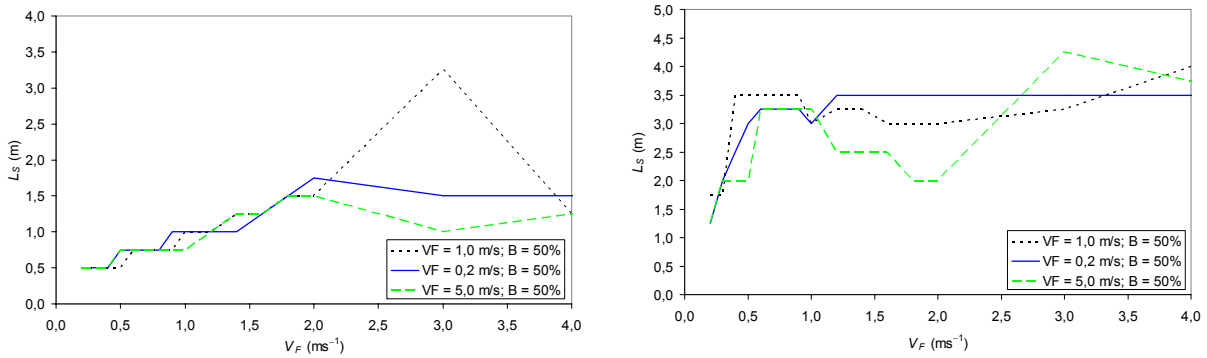


Figura 6.14: $L_S(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(T_L)$, para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1 \text{ m}$, PLO.

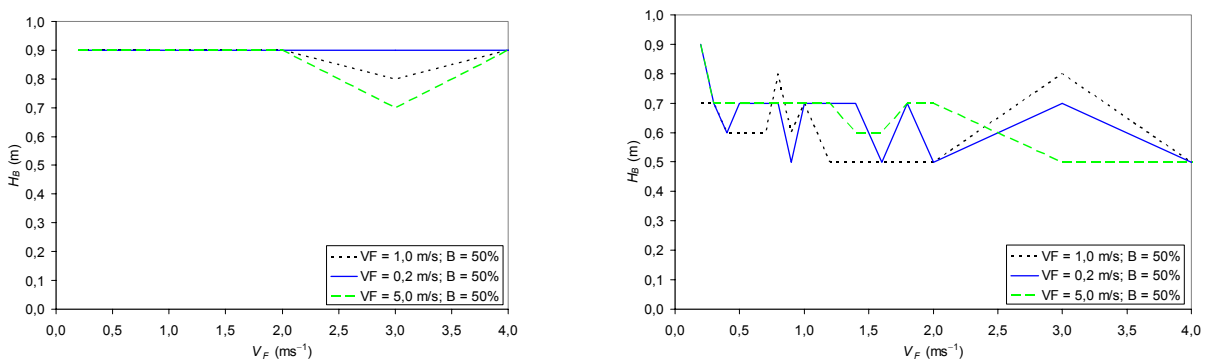


Figura 6.15: $H_B(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(T_L)$, para diferentes sintonias do controlador, com $F_C = 0,1 \text{ m}$, PLO.

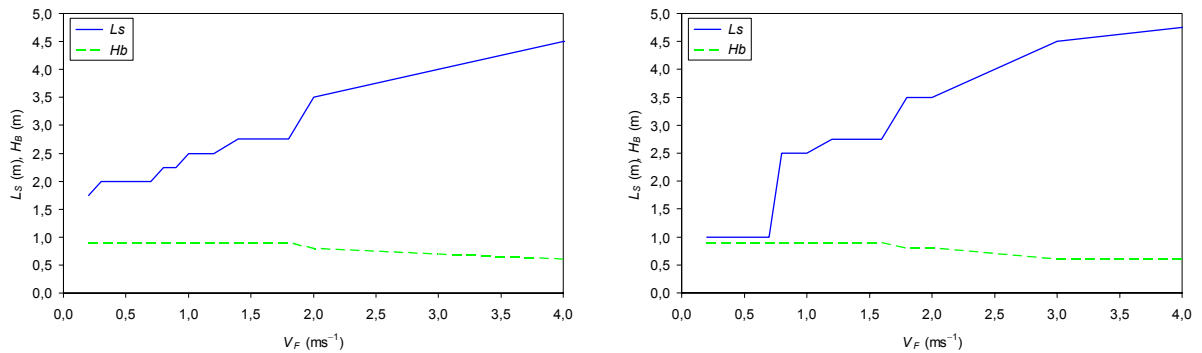


Figura 6.16: $L_S(V_F)$ e $H_B(V_F)$ para $\min(E_{av})$ e $\min(D_{av})$, considerando as trajetória planeadas do robô, com $F_C = 0,1$ m, PLO.

De seguida, considera-se novamente um caso ideal, onde as trajetórias são idênticas às planeadas. A evolução dos parâmetros de locomoção L_S e H_B com V_F , na perspectiva de E_{av} e D_{av} , é apresentada na Figura 6.16. Constata-se que L_S deve aumentar e que H_B deve diminuir com V_F . No que diz respeito ao valor óptimo de β este é invariante com V_F e deve ser mantido pequeno. As variações dos parâmetros de locomoção (β , L_S , H_B) são similares quando se analisa a locomoção do robô recorrendo aos outros índices de desempenho. Assim, conclui-se que estes resultados estão de acordo com os obtidos anteriormente.

Em síntese, conclui-se que os resultados desta subsecção, tal como os da subsecção anterior, parecem estar de acordo com as observações das criaturas quadrúpedes e hexápodes vivas. De facto, também os animais adaptam os parâmetros de locomoção com V_F , aumentando o valor de L_S e diminuindo β e H_B (Alexander, 1984; Collins e Stewart, 1993).

6.2.4 Adaptação / Selecção do Padrão de Locomoção à velocidade de Locomoção

Na segunda fase deste trabalho procura-se determinar o melhor padrão de locomoção do robô para diferentes velocidades de avanço no plano sagital, no intervalo $0,2 \leq V_F \leq 4,0$ ms^{-1} . Este conjunto de experiências inspira-se em certos resultados experimentais obtidos com animais, onde se concluiu que a adopção dum padrão de locomoção, e a transição entre diferentes padrões, é efectuada do ponto de vista da optimização da eficiência energética (Hoyt e Taylor, 1981) ou da minimização da resistência à locomoção (Schmiedeler e Waldron, 1999).

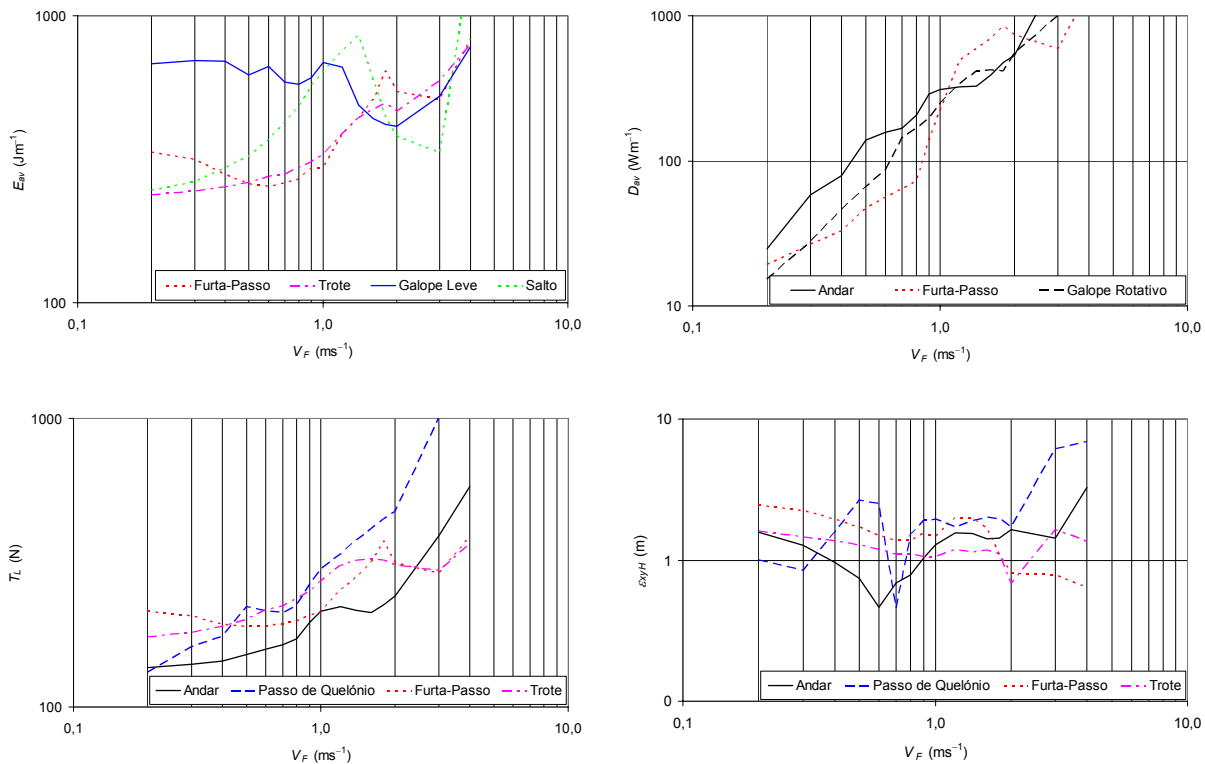


Figura 6.17: $\min[E_{av}(V_F)]$, $\min[D_{av}(V_F)]$, $\min[T_L(V_F)]$ e $\min[\varepsilon_{xyH}(V_F)]$, para diferentes padrões de locomoção quadrúpede (considerando uma sintonia comum do controlador para todos eles), com $F_C = 0,1$ m.

Nesta ordem de ideias, decidiu-se testar a locomoção do robô quadrúpede, em função de V_F , quando este adopta diferentes padrões de locomoção (HTTP#2). Assim, consideram-se três padrões de locomoção para andar (Andar, Passo de Quelônio e Furta-Passo), dois padrões de locomoção simétricos de corrida (Trote e Passo) e cinco padrões de locomoção de corrida assimétricos (Galope Leve, Galope Transversal, Galope Rotativo, Meio-Salto e Salto). Estes padrões de locomoção são geralmente adoptados pelos animais quadrúpedes na natureza, respectivamente quando se deslocam a velocidades baixas, médias e elevadas. A sua descrição detalhada é efectuada no Anexo A.

Para efectuar esta análise são utilizados os parâmetros do sistema e os parâmetros do controlador (determinados para a locomoção do robô hexápode com o PLO, $V_F = 1,0$ ms^{-1} e $\beta = 50\%$) apresentados nas Tabelas 6.1 e 6.2, respectivamente.

A Figura 6.17 apresenta os gráficos de $\min[E_{av}(V_F)]$, $\min[D_{av}(V_F)]$, $\min[T_L(V_F)]$ e $\min[\varepsilon_{xyH}(V_F)]$ para os diferentes padrões de locomoção quadrúpede. A análise através do índice E_{av} sugere que a locomoção deverá ser efectuada recorrendo aos padrões Trote, Furta-

-Passo, Galope Leve e Salto à medida que a velocidade aumenta. A análise através do índice D_{av} indica que os padrões Galope Rotativo, Furta-Passo e Andar devem ser adoptados, respectivamente a baixa, média e alta velocidade. Por seu lado, a análise através dos índices T_L e ε_{xyH} aponta no sentido de, na locomoção quadrúpede, se adoptarem os padrões Passo de Quelónio, Andar, Trote e Furta-Passo à medida que aumenta V_F . Apesar de não estar representado o gráfico da análise através do índice F_L (por limitações de espaço), este indica que a locomoção deverá ser efectuada com os padrões Passo de Quelónio, Andar, Trote e Passo para valores crescentes de V_F .

Os gráficos representados na Figura 6.17 mostram que o padrão de locomoção do robô deve mudar de acordo com a velocidade de deslocamento pretendida. Estes resultados parecem estar de acordo com as observações da locomoção dos animais quadrúpedes (Alexander, 1984). No entanto, os resultados obtidos através dos diferentes índices de optimização não são totalmente consistentes entre si (uma vez que apontam no sentido de a locomoção ser efectuada com diferentes padrões de locomoção nas mesmas gamas de velocidades), com a excepção de T_L e ε_{xyH} , como se ilustra na Figura 6.17.

De forma a analisar a influência da sintonia do controlador das juntas do robô sobre os resultados obtidos, efectua-se uma nova sintonia para cada padrão de locomoção em estudo. Para o efeito, considera-se uma velocidade de deslocamento $V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$ e adoptam-se os parâmetros de locomoção $L_S = 1,0 \text{ m}$ e $H_B = 0,9 \text{ ms}^{-1}$, levando aos parâmetros do controlador apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Parâmetros do controlador do robô quadrúpede quando este se encontra sintonizado para os diferentes padrões de locomoção dos animais quadrúpedes.

Padrão de Locomoção	Kp_1	Kd_1	Kp_2	Kd_2
Andar	1000	40	2000	40
Passo de Quelónio	5000	200	2500	20
Furta-Passo	1000	20	1000	60
Trote	1000	140	2000	20
Passo	1000	60	500	40
Galope Leve	1000	0	1500	20
Galope Transversal	6000	40	1000	40
Galope Rotativo	4000	0	500	80
Meio-Salto	4000	0	3000	20
Salto	2000	0	500	20

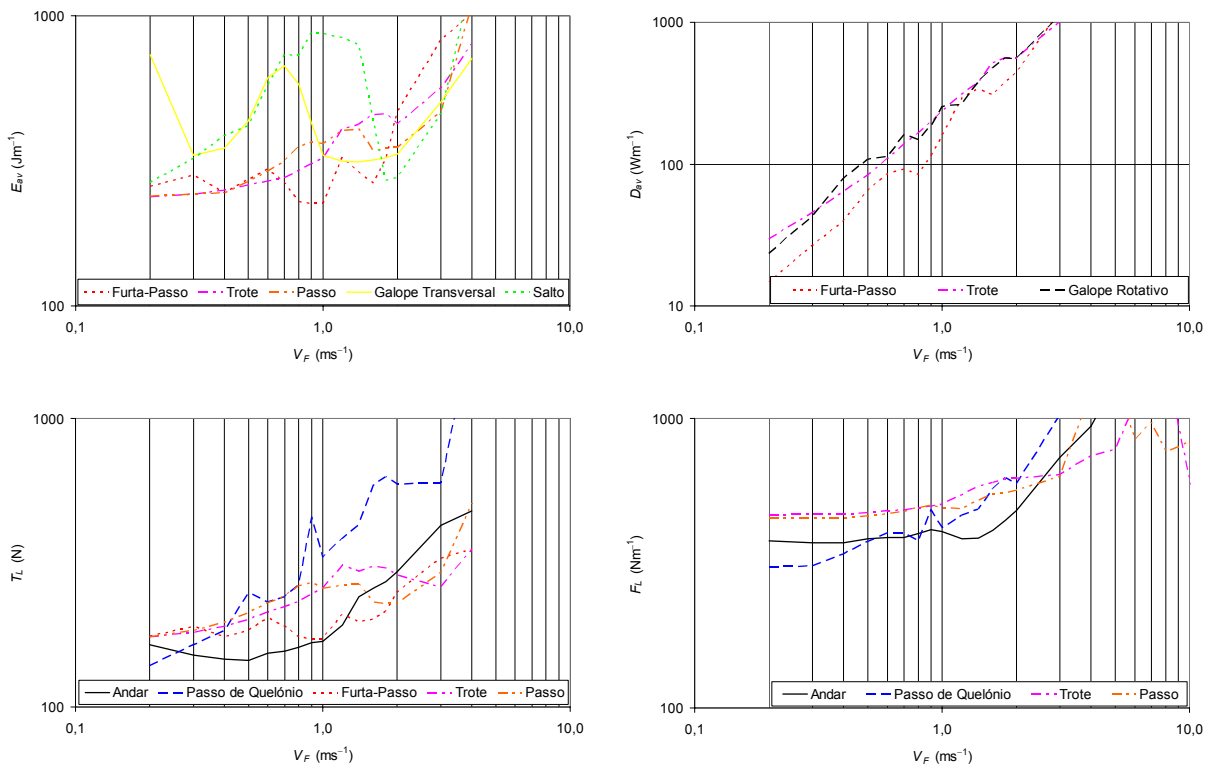


Figura 6.18: $\min[E_{av}(V_F)]$, $\min[D_{av}(V_F)]$, $\min[T_L(V_F)]$ e $\min[F_L(V_F)]$, para diferentes padrões de locomoção quadrúpede (considerando uma sintonia própria do controlador para cada um deles), com $F_C = 0,1$ m.

A Figura 6.18 ilustra o desempenho dos diferentes padrões de locomoção quadrúpede através dos índices E_{av} , D_{av} , T_L e F_L . Verifica-se que sob o ponto de vista do índice E_{av} a locomoção deverá ser efectuada recorrendo sucessivamente aos padrões Passo, Trote, Furta-Passo, Salto e Galope Transversal, à medida que a velocidade aumenta. No entanto, quando se compara com os resultados obtidos através dos demais índices de desempenho, conclui-se que eles não são concordantes. De facto, a análise através do índice D_{av} indica que devem ser adoptados os padrões Furta-Passo, Galope Rotativo e Trote, respectivamente a baixa, média e alta velocidade. Por seu lado, a análise através dos índices T_L ou F_L aponta no sentido da locomoção quadrúpede adoptar sucessivamente os padrões Passo de Quelônio, Andar, Furta-Passo, Passo e Trote (no caso de T_L) ou Passo de Quelônio, Andar, Passo e Trote (no caso de F_L) à medida que aumenta V_F .

Os resultados obtidos para estas sintonias do controlador das juntas das pernas apontam, mais uma vez, no sentido do padrão de locomoção do robô mudar de acordo com a velocidade de deslocamento pretendida, o que parece estar de acordo com as observações da locomoção dos animais quadrúpedes (Alexander, 1984).

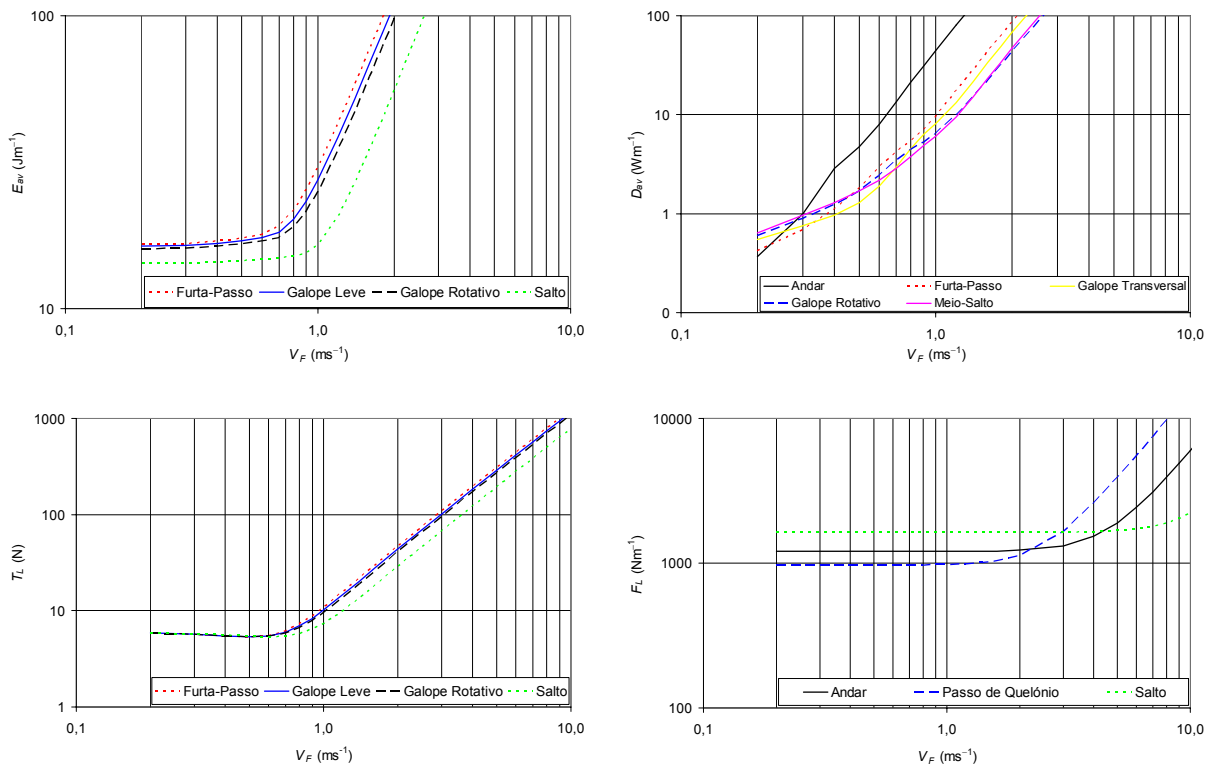


Figura 6.19: $\min[E_{av}(V_F)]$, $\min[D_{av}(V_F)]$, $\min[T_L(V_F)]$ e $\min[F_L(V_F)]$, considerando as trajetórias planeadas do robô para diferentes padrões de locomoção quadrúpede, com $F_C = 0,1$ m.

No entanto, os resultados obtidos através dos diferentes índices de otimização não são totalmente consistentes entre si. Estes resultados também não são totalmente concordantes com os de Hoyt e Taylor (1981) uma vez que, de acordo com estes autores, a velocidades elevadas o padrão de locomoção preferencial dos quadrúpedes é o galope, o que não se verifica nos resultados das simulações. Este facto pode dever-se a diversas razões, algumas delas referidas na secção 4.3 do Capítulo 4, mas a mais provável é o facto do modelo adoptado nas nossas simulações não considerar todos os aspectos dos animais biológicos, nomeadamente a capacidade de armazenamento de energia nos músculos e tendões das pernas e das costas.

Por último, as experiências anteriores são repetidas considerando que as trajetórias são idênticas às planeadas. Da Figura 6.19 conclui-se que analisando a locomoção sob o ponto de vista dos índices E_{av} e T_L o padrão de locomoção preferencial é o Salto, para os valores de V_F em estudo. No que diz respeito à análise através do índice D_{av} , o quadrúpede deve adoptar sucessivamente os padrões Andar, Furta-Passo, Galope Transversal, Meio-Salto e Galope Rotativo para V_F crescente. Com o índice F_L o quadrúpede deve adoptar os padrões Passo de

Quelónio, Andar e Salto. Mais uma vez, conclui-se que os resultados obtidos através dos diferentes índices de desempenho não são homogéneos.

6.3 Locomoção Recorrendo a Padrões de Locomoção Quase-Periódicos

Nesta secção analisa-se a estratégia mais adequada quando o robô, durante a locomoção com o padrão PLO, se depara com um obstáculo que é necessário transpor. Este estudo pretende generalizar o trabalho apresentado no Capítulo 4 (para padrões de locomoção periódicos) através da análise das trajectórias dos pés e do corpo do robô no que diz respeito à sua variação com a posição, altura e largura do obstáculo tendo por base os índices de desempenho formulados no Capítulo 3.

Para alcançar este objectivo, tanto o movimento planeado do robô, como a posição e as características dos obstáculos com que o robô se depara durante a locomoção, são caracterizados através de diversas variáveis de locomoção. Um conjunto de experiências tendo por base o modelo desenvolvido (Capítulo 3) mostra a influência da posição do obstáculo e das suas dimensões sobre os índices de desempenho propostos.

6.3.1 Selecção da Estratégia a Adotar para Transpor Obstáculos

A selecção da estratégia que um sistema artificial de locomoção deve adoptar para transpor obstáculos é um dos problemas envolvidos no planeamento do movimento durante a locomoção num terreno não estruturado. Como referido anteriormente, o planeamento do movimento em robôs com pernas envolve, a um nível “superior”, a determinação da trajectória pretendida para o corpo do robô e, a um nível “inferior”, a selecção dos possíveis locais de apoio dos pés do robô no espaço bem como o posterior sequenciamento das pegadas no espaço. Este problema é visto como a determinação de uma sequência de locais para o robô colocar os seus pés, no ambiente em que se desloca, mantendo a estabilidade, a continuidade do movimento e trabalhando dentro das suas restrições estruturais.

Nesta secção aborda-se a questão do sequenciamento da colocação dos pés no terreno, considerando que a trajectória pretendida para o corpo do robô se encontra especificada e que o robô pode colocar os pés em cima dos obstáculos (no seu centro geométrico) ou em qualquer local do chão, desde que não existam restrições de ordem cinemática. Este trabalho

pode facilmente ser generalizado para solos mais irregulares considerando que existem, por exemplo, locais onde não é admissível ao robô colocar os pés.

O problema consiste na selecção do melhor local para colocar os pés em função da dimensão e posição dos obstáculos. Os obstáculos encontram-se completamente caracterizados pela sua posição X_o , ao longo da direcção de movimento do robô (eixo x), pela sua altura H_o e pela sua largura L_o . Adicionalmente, e para simplificar, considera-se que o obstáculo só afecta a trajectória do pé (e da perna) 1. Como exemplos de possíveis tecnologias para identificar obstáculos temos, por exemplo, os sistemas de visão artificial (Pack, 1996; Lorch, *et al.*, 2002), os sistemas de visão artificial estéreo (Kagami, *et al.*, 2003; Okada, *et al.*, 2003) e as aplicações conjuntas de sensores de distância laser e infravermelhos e sensores de força nos pés (Gaßmann, *et al.*, 2003).

Na ausência de obstáculos considera-se que o robô se desloca com o padrão PLO. Quando o robô encontra um obstáculo, altera o seu padrão de locomoção de acordo com uma de duas estratégias pré-definidas. Após transpor o obstáculo, o robô continua a sua locomoção regressando ao padrão PLO. Dado o facto do padrão de locomoção utilizado ser o mesmo antes e depois de ultrapassado o obstáculo, vamos passar a denominar estes padrões por quase-periódicos.

Em ambas as estratégias implementadas para transpor os obstáculos (Figuras 6.20 e 6.21) considera-se que a trajectória da extremidade da perna 1 (do pé), durante a fase de transferência, é calculada através de uma função cicloidal (3.3a).

Convém frisar aqui que o planeamento de padrões de locomoção que sejam estáveis é um aspecto importante, particularmente quando se pretendem padrões de locomoção que se encontram longe de serem estaticamente estáveis, uma vez que não existe nenhum controlador em malha fechada que garanta a estabilidade dinâmica para todas as condições de locomoção. No entanto, no desenrolar deste trabalho não se considera (por limitações de tempo) a estabilidade dos padrões de locomoção gerados. Informação sobre a estabilidade de padrões de locomoção em terrenos irregulares pode ser obtida, por exemplo, em (Song e Waldron, 1989; Koo e Yoon, 1999; Garcia, *et al.*, 2002) que apresentam diversas medidas de estabilidade dinâmica apropriadas para padrões de locomoção não-periódicos.

De seguida passa-se a detalhar as duas estratégias implementadas para transpor obstáculos.

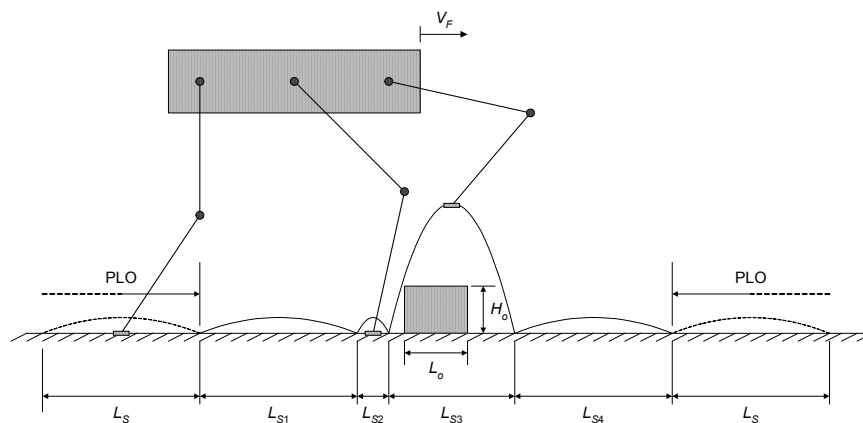


Figura 6.20: Transposição de um obstáculo recorrendo à estratégia APCP.

6.3.2 Transposição de um Obstáculo Através da Variação da Altura do Pé ao Solo e do Comprimento do Passo

A primeira estratégia implementada é denominada de variação da Altura do Pé ao solo e do Comprimento do Passo (APCP). Ao utilizar esta estratégia, o robô tem a liberdade de modificar os comprimentos de quatro passos (L_{Sp} , $p = 1, 2, 3, 4$) e a altura ao solo do terceiro passo (aquele em que efectivamente transpõe o obstáculo) mas mantendo a relação $V_F = L_{Sp} / T$ constante (ver Figura 6.20). Assim, antes de transpor o obstáculo o robô dá dois passos ($p = 1, 2$) que poderão ter um comprimento diferente do normal (mais curtos ou mais compridos), de forma a aproximar-se do obstáculo, mas mantendo a máxima altura do pé ao solo. No passo seguinte ($p = 3$) o robô ajusta a máxima altura do pé ao solo, de forma a que esta seja superior à altura do obstáculo, e ultrapassa-o através dum passo que, mais uma vez, poderá ter um comprimento diferente do normal ($L_{Sp} \neq L_S$). Do exposto, conclui-se que para que esta estratégia possa ser aplicável é necessário que $L_o < L_{SMáx}$ e $H_o < F_C^2$.

Por último, o robô dá um quarto passo ($p = 4$), também este com um comprimento não necessariamente igual ao normal, mas de forma a que a soma dos comprimentos dos quatro passos seja igual a quatro comprimentos do passo normal. Por outras palavras, na situação em que o comprimento normal do passo é $L_S = 1$ m, deverá ser:

$$\sum_{p=1}^4 L_{Sp} = 4 \text{ m}, \quad 0 \leq L_{Sp} \leq L_{SMáx}, \quad L_{SMáx} = 2 \text{ m} \quad (6.1)$$

² Condições necessárias mas não suficientes.

A selecção dos comprimentos dos quatro passos é efectuada tendo por objectivo minimizar um determinado critério, no nosso caso um dos índices dinâmicos formulados do Capítulo 3.

Um caso particular desta estratégia surge quando o robô não necessita de variar o comprimento dos passos anteriores e posteriores à transposição do obstáculo. Nesta situação o comprimento do passo p mantém-se inalterado ($L_{Sp} = L_S$) e o robô passa o pé 1 sobre o topo do obstáculo, dando num único passo de comprimento L_S . Para esta situação ser possível devemos ter obrigatoriamente $L_o < L_S$ e $H_o < F_C$ ³.

6.3.3 Transposição de um Obstáculo Através da Colocação do Pé Sobre Este

Quanto à segunda estratégia implementada, intitulada Pé Sobre Obstáculo (PSO), permite ao robô vencer obstáculos de largura superior a um comprimento do passo. Neste caso, ilustrado na Figura 6.21, o robô tem também a liberdade de modificar os comprimentos de quatro passos. Durante o segundo passo o robô levanta o pé 1 acima do topo do obstáculo e posiciona-o sobre este (daí o nome desta estratégia) e no terceiro passo o robô volta a colocar o pé sobre o solo. Para esta estratégia ser aplicável, é necessário que $L_o < 2L_{SMáx}$ e $H_o < F_C$ ⁴. Tal como no caso da estratégia anterior recorre-se a um dos índices dinâmicos para otimizar o valor do comprimento, e da máxima altura da trajectória do pé ao solo, de cada um dos quatro passos que o robô efectua durante o processo de transposição dum obstáculo⁵.

Tal como referido anteriormente, as trajectórias adoptadas pelo pé do robô durante a fase de transferência são cicloidais, mas sofrem um rotação de acordo com o apresentado na Figura 6.22 e na equação (6.2).

$$\begin{cases} x'_{iFd}(t) = x_{iFd}(t) \cos(\gamma) - y_{iFd}(t) \sin(\gamma) \\ y'_{iFd}(t) = y_{iFd}(t) \cos(\gamma) + x_{iFd}(t) \sin(\gamma) \end{cases} \quad (6.2)$$

onde $\mathbf{p}'_{Fd}(t) = [x'_{iFd}(t), y'_{iFd}(t)]^T$ são as coordenadas planeadas para o pé do robô, durante a fase de transferência, rodadas do ângulo γ .

³ Condições necessárias mas não suficientes.

⁴ Condições necessárias mas não suficientes.

⁵ Por uma questão de espaço, nesta Tese só se referem os resultados relativos à optimização através do índice E_{av} . Os resultados obtidos com o recurso aos restantes índices não mostram diferenças significativas face aos apresentados.

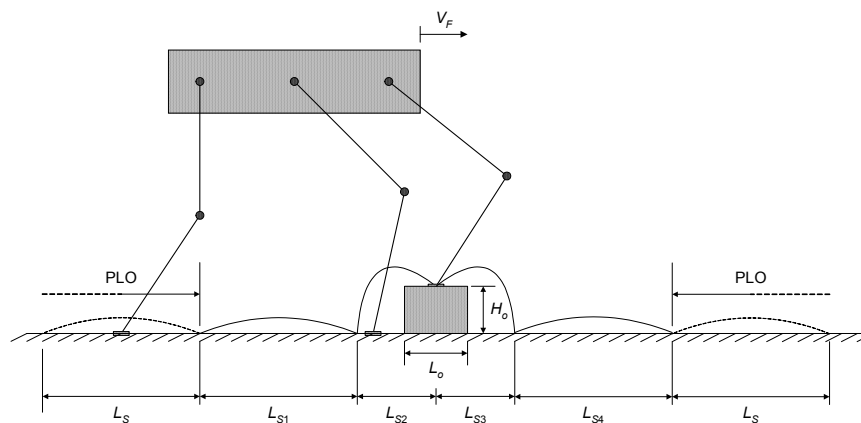


Figura 6.21: Transposição de um obstáculo recorrendo à estratégia PSO.

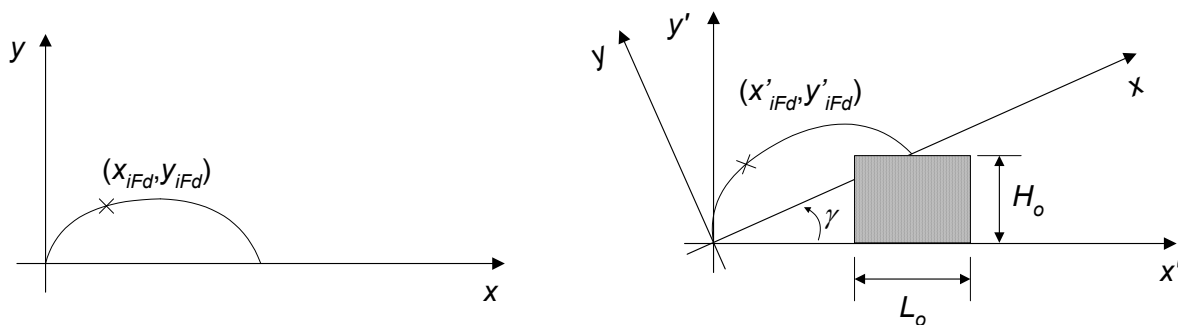


Figura 6.22: Trajectórias e coordenadas planeadas para o pé do robô, durante a fase de transferência, nas situações em que a trajectória do pé começa e termina sobre o solo (esquerda) e termina sobre um obstáculo (direita).

6.3.4 Comparação das Duas Estratégias Quando os Obstáculos se Encontram em Localizações Bem Definidas

De forma a ilustrar os conceitos acabados de referir, apresenta-se de seguida um conjunto de simulações que têm por objectivo analisar a influência da posição do obstáculo (X_o) e das suas dimensões (L_o , H_o) durante a locomoção recorrendo a padrões quasi-periódicos. Primeiro estudam-se as estratégias para transpor obstáculos posicionados no início / fim do passo e, de seguida, analisa-se o caso destes se encontrarem localizados aleatoriamente, numa qualquer posição ao longo de um passo do robô.

Além disso, numa primeira fase consideram-se as trajectórias planeadas (*i.e.*, ideais) e, posteriormente, analisa-se a situação onde se adoptam os algoritmos de controlo PD-P e PD-P&F (resultando trajectórias não ideais), de forma a verificar o seu desempenho em situações de terrenos não planos.

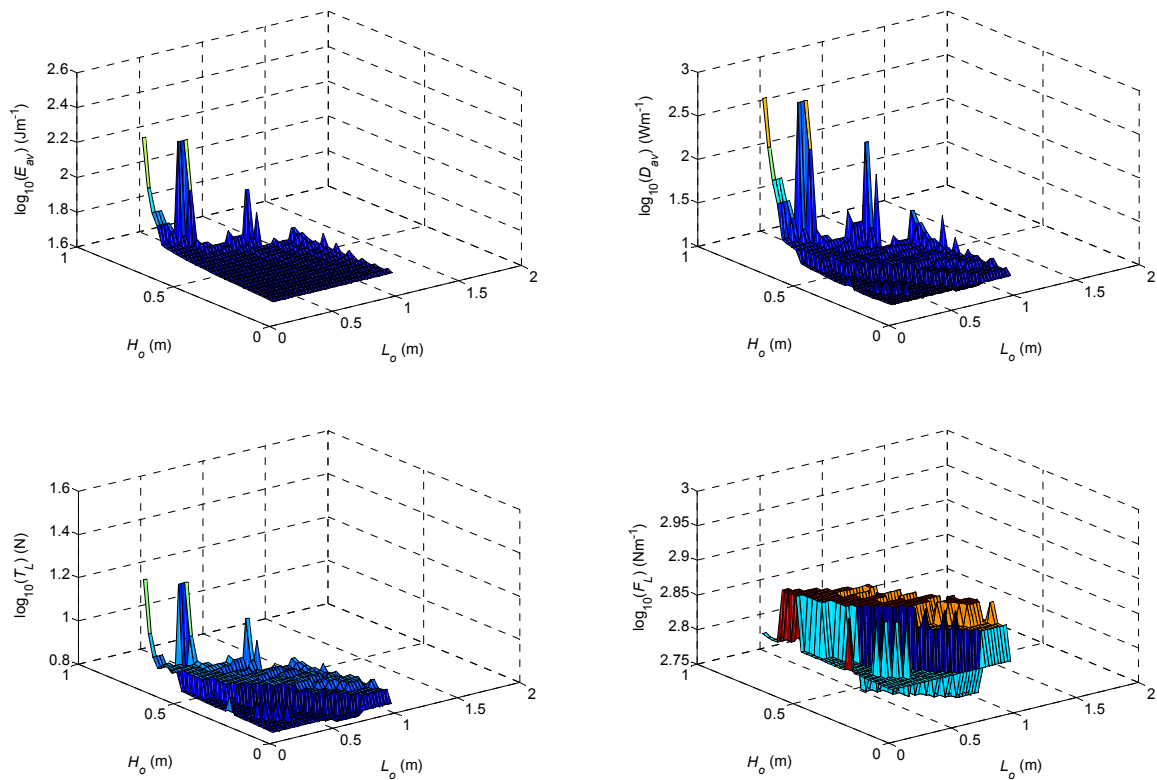


Figura 6.23: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (L_o, H_o) , com $X_o = 2,25$ m, quando se adota a estratégia APCP, para $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$.

No decurso das experiências, a locomoção do robô hexápode é simulada ao longo de seis passos ($p = 1, 2, \dots, N_S$) com os parâmetros indicados na Tabela 6.1. Nesta primeira situação considera-se que os obstáculos se encontram localizados na posição $X_o = 2,25$ m (início / fim do passo) e que têm uma largura e uma altura nos intervalos $0,0 \text{ m} < L_o < 2,0 \text{ m}$ e $0,0 \text{ m} < H_o < 1,0 \text{ m}$.

6.3.4.1 Estratégia APCP

A Figura 6.23 apresenta os gráficos de $E_{av}(L_o, H_o)$, $D_{av}(L_o, H_o)$, $T_L(L_o, H_o)$ e $F_L(L_o, H_o)$ para a estratégia APCP, considerando que o obstáculo está centrado em relação à posição onde o robô deve concluir o seu segundo passo (*i.e.*, $X_o = 2,25$ m).

Da análise destes gráficos verifica-se que as dimensões máximas do obstáculo que o robô consegue transpor são $L_o = 0,975$ m (para obstáculos com $H_o < 0,025$ m) e $H_o = 0,675$ m (para obstáculos com $L_o < 0,05$ m).

Pode ser visto que E_{av} aumenta de forma suave com L_o e H_o em praticamente todo o intervalo destes parâmetros onde é possível a transposição do obstáculo. Na zona de fronteira dos valores admissíveis para estes parâmetros, o índice E_{av} aumenta de uma forma mais abrupta, indicando que a transposição de obstáculos com dimensões próximas destes limites é bastante difícil. Estes gráficos permitem também concluir que os índices D_{av} e T_L apresentam o mesmo tipo de variação, nomeadamente que eles aumentam com L_o e H_o , se bem que a sua variação não seja tão suave. Mostram ainda que o índice F_L apresenta uma variação complexa com as dimensões do obstáculo.

O facto da variação de E_{av} ser mais suave do que a dos restantes índices deve-se a este ter sido o critério adoptado durante o planeamento da trajectória para a transposição do obstáculo.

As Figuras 6.24 e 6.25 mostram a forma como o hexápode adapta o comprimento e alturas máximas ao solo dos quatro passos envolvidos nesta estratégia. Da Figura 6.24 conclui-se que os primeiros dois passos têm, por norma, um comprimento superior ao normal ($L_{Sp} > 1,0$ m, $p = 1, 2$) sendo, conseqüentemente, os dois últimos passos inferiores ao normal ($L_{Sp} < 1,0$ m, $p = 3, 4$). No entanto, existem conjuntos de parâmetros (L_o, H_o) para os quais o primeiro passo é suprimido ($L_{S1} = 0,0$ m). Estas zonas são perfeitamente visíveis na Figura 6.25 e correspondem aos pares de dimensões do obstáculo (L_o, H_o) para os quais $F_{C2} > 0,01$ m.

A Figura 6.25 apresenta a variação da máxima altura do pé ao solo (F_{Cp}), para os casos do segundo e terceiro passos do robô, durante o recurso à estratégia APCP. Vê-se claramente que a altura a que é necessário elevar o pé aumenta com a altura do obstáculo e com a sua largura. Relativamente ao instante no qual o robô ultrapassa o obstáculo conclui-se que ocorre na maioria das vezes no segundo passo, com excepção de duas zonas nas quais é o terceiro porque, nesses casos, o primeiro passo tem comprimento nulo (é inexistente).

Comparando os resultados das Figuras 6.24 e 6.25 é ainda possível concluir que o passo utilizado na transposição dos obstáculos tem um comprimento superior ao normal ($L_{Sp} > 1,0$ m).

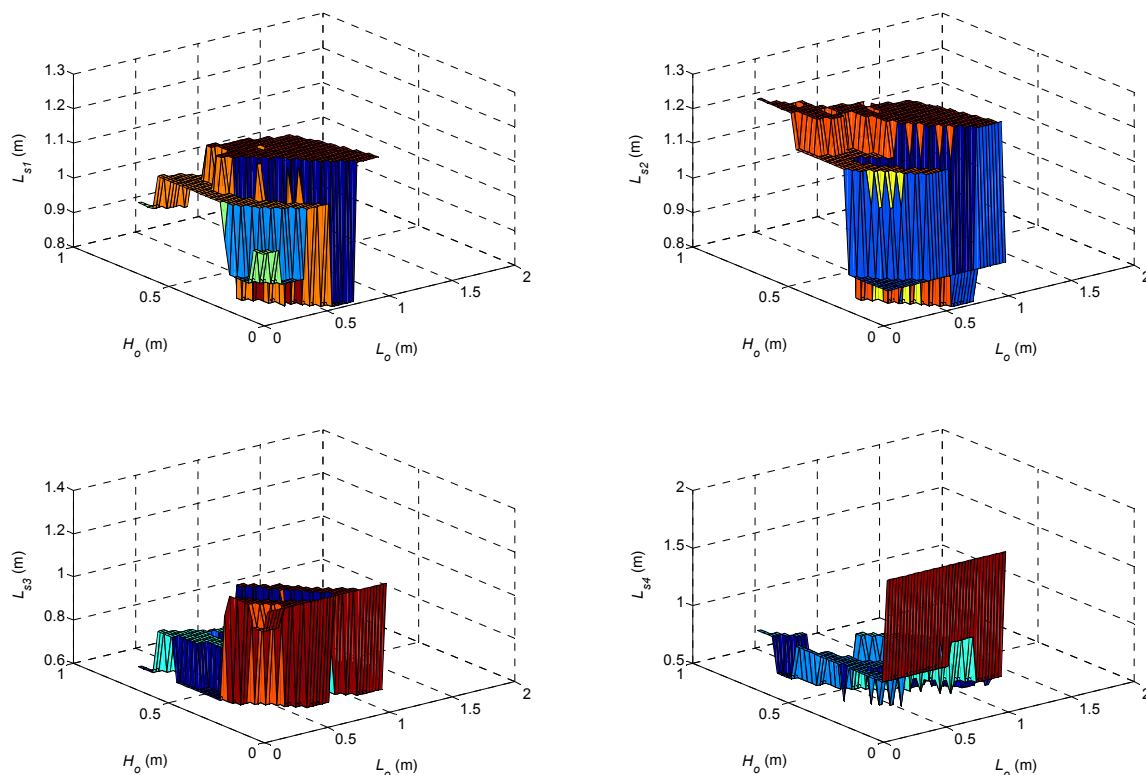


Figura 6.24: L_{S1} , L_{S2} , L_{S3} e L_{S4} vs. (L_o, H_o) , para $\min(E_{av})$, quando se adota a estratégia APCP, com $X_o = 2,25$ m, $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$.

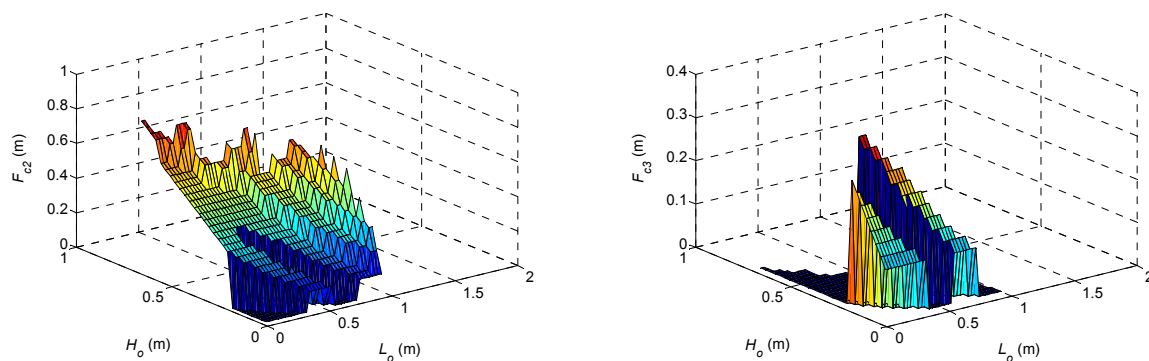


Figura 6.25: F_{C2} e F_{C3} vs. (L_o, H_o) , para $\min(E_{av})$, quando se adota a estratégia APCP, com $X_o = 2,25$ m, $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$.

6.3.4.2 Estratégia PSO

As experiências realizadas na subsecção anterior são agora repetidas para a situação em que o robô adota a estratégia PSO. Mais uma vez, supõe-se que o obstáculo se encontra centrado em relação à posição onde o robô deve concluir o seu segundo passo ($X_o = 2,25$ m) e que

possui dimensões (L_o , H_o) variáveis. A Figura 6.26 apresenta os gráficos dos índices dinâmicos para esta situação. Da sua observação, verifica-se que $E_{av}(L_o, H_o)$, $D_{av}(L_o, H_o)$, $T_L(L_o, H_o)$ e $F_L(L_o, H_o)$ apresentam duas zonas distintas. Para obstáculos de pequenas dimensões, a variação destes índices é relativamente suave com L_o e com H_o . Já para o caso de os obstáculos possuírem maiores dimensões, todos os índices apresentam um aumento significativo com L_o e com H_o .

Estes gráficos mostram também que o índice E_{av} apresenta uma variação mais suave do que os restantes (pelos motivos já referidos anteriormente). É ainda possível concluir que a altura máxima do obstáculo que o robô consegue vencer é $H_o = 0,45$ m (para qualquer valor de L_o considerada nas experiências). Quanto à largura máxima do obstáculo que o robô consegue vencer, o intervalo de variação considerado para este parâmetro ($0,0 \text{ m} < L_o < 2,0 \text{ m}$) não permite determinar o seu valor. No entanto, com esta estratégia é possível transpor obstáculos de largura crescente (até $L_o \approx 2L_{SMáx}$) variando a altura na proporção inversa até $H_o \approx 0,0$ m.

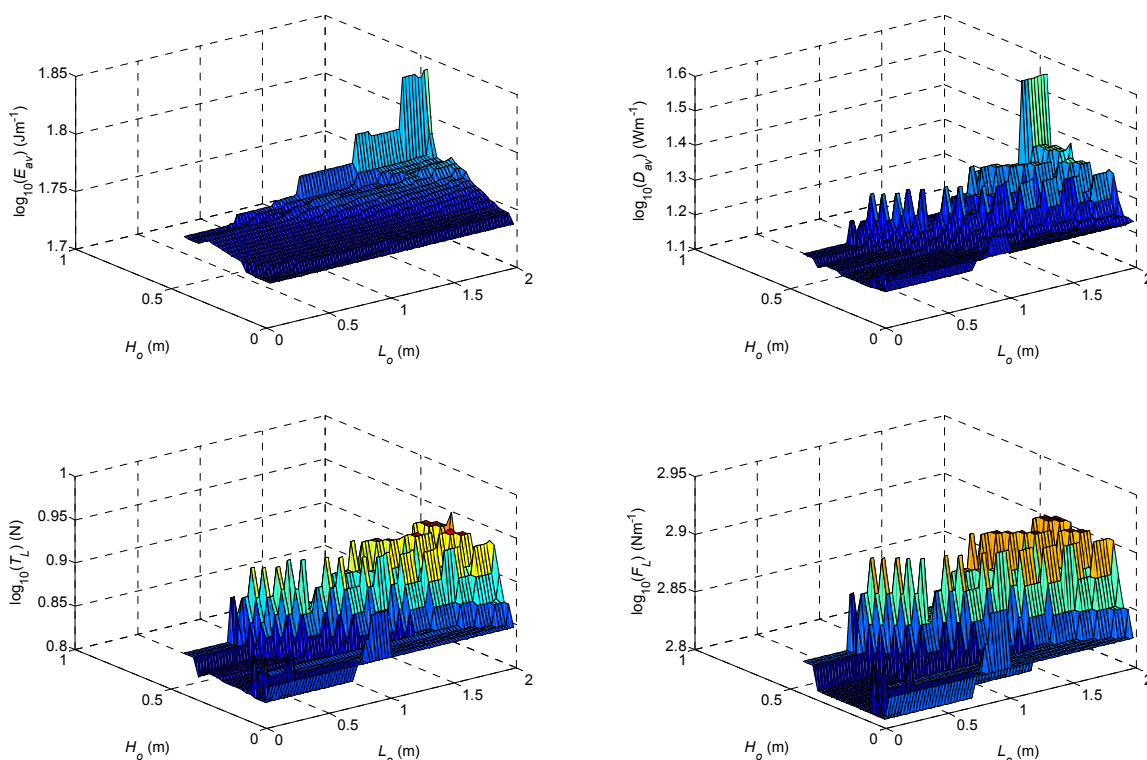


Figura 6.26: $\log(E_{av})$, $\log(D_{av})$, $\log(T_L)$ e $\log(F_L)$ vs. (L_o , H_o), com $X_o = 2,25$ m, quando se adopta a estratégia PSO, para $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0 \text{ ms}^{-1}$.

Comparando com a estratégia APCP, esta alternativa permite vencer obstáculos de maiores dimensões, particularmente no que concerne à sua largura. No entanto, a estratégia APCP permite transpor obstáculos de maior altura, desde que sejam relativamente estreitos.

As Figuras 6.27 e 6.28 mostram a forma como o robô adapta o comprimento dos quatro passos envolvidos nesta estratégia, e as respectivas alturas máximas ao solo, em função das dimensões do obstáculo a vencer.

Observando a Figura 6.27 verifica-se que o primeiro e último passos têm, por norma, um comprimento inferior ao normal ($L_{Sp} < 1,0$ m, $p = 1, 4$) enquanto que o segundo e terceiro passos apresentam um comprimento superior ao normal ($L_{Sp} > 1,0$ m, $p = 2, 3$). Esta característica ocorre porque estes dois passos são aqueles nos quais o robô se posiciona sobre o obstáculo. Assim, quanto mais alto, ou mais largo, for o obstáculo, maior terá que ser o comprimento destes dois passos para o robô conseguir posicionar o seu pé sobre ele. Pelos mesmos motivos, a máxima altura do pé ao solo nestes dois passos terá que ser superior ao normal (Figura 6.28), aumentando também o seu valor com as dimensões o obstáculo a transpor.

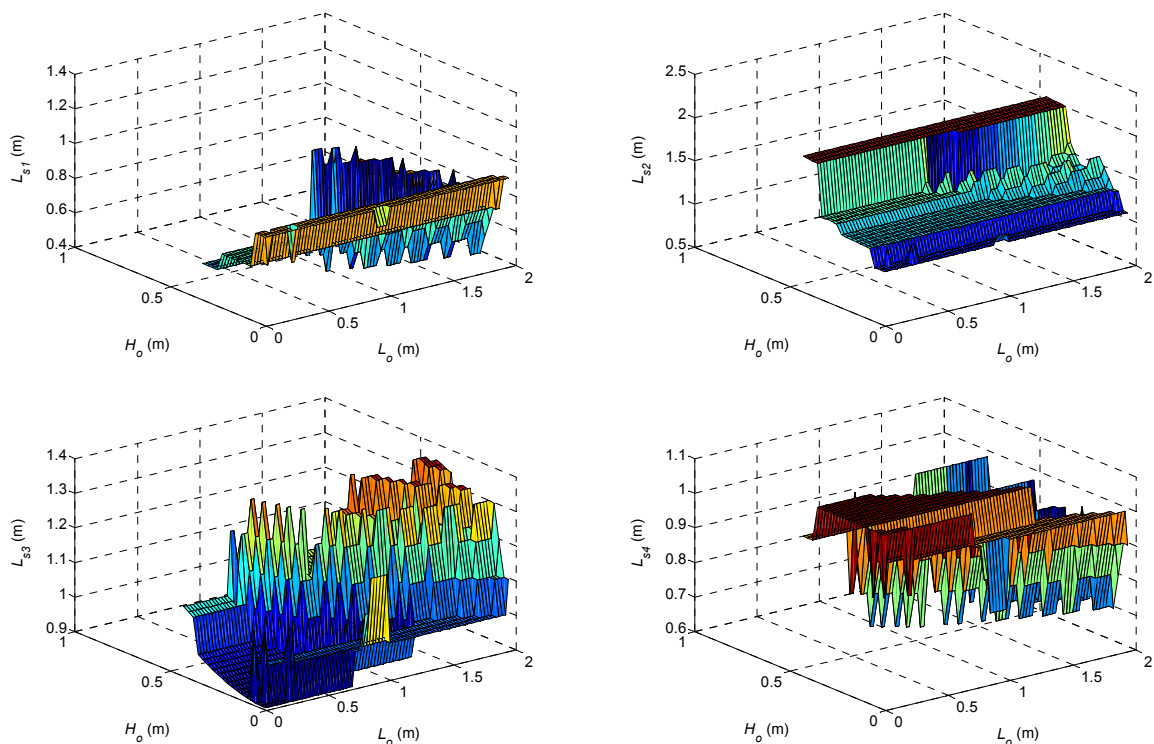


Figura 6.27: L_{S1} , L_{S2} , L_{S3} e L_{S4} vs. (L_o, H_o) , para $\min(E_{av})$, quando se adopta a estratégia PSO, com $X_o = 2,25$ m, $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0$ ms⁻¹.

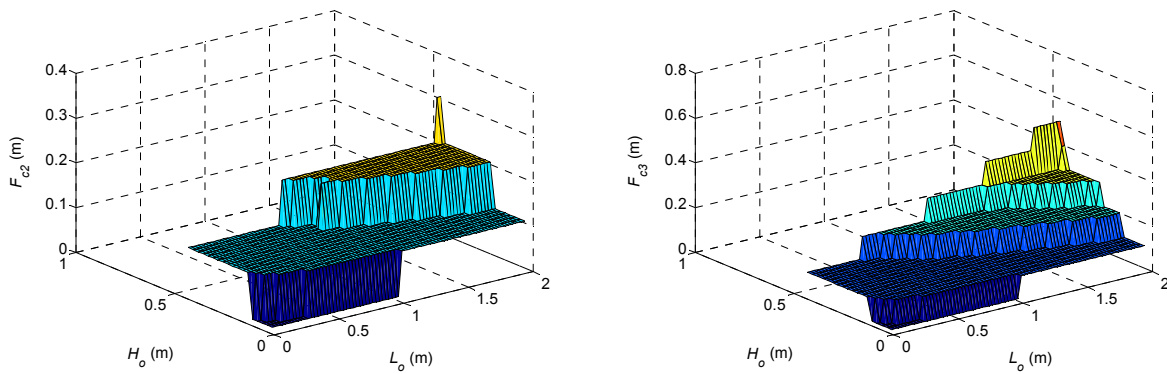


Figura 6.28: F_{C2} e F_{C3} vs. (L_o, H_o) , para $\min(E_{av})$, quando se adopta a estratégia PSO, com $X_o = 2,25$ m, $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0$ ms^{-1} .

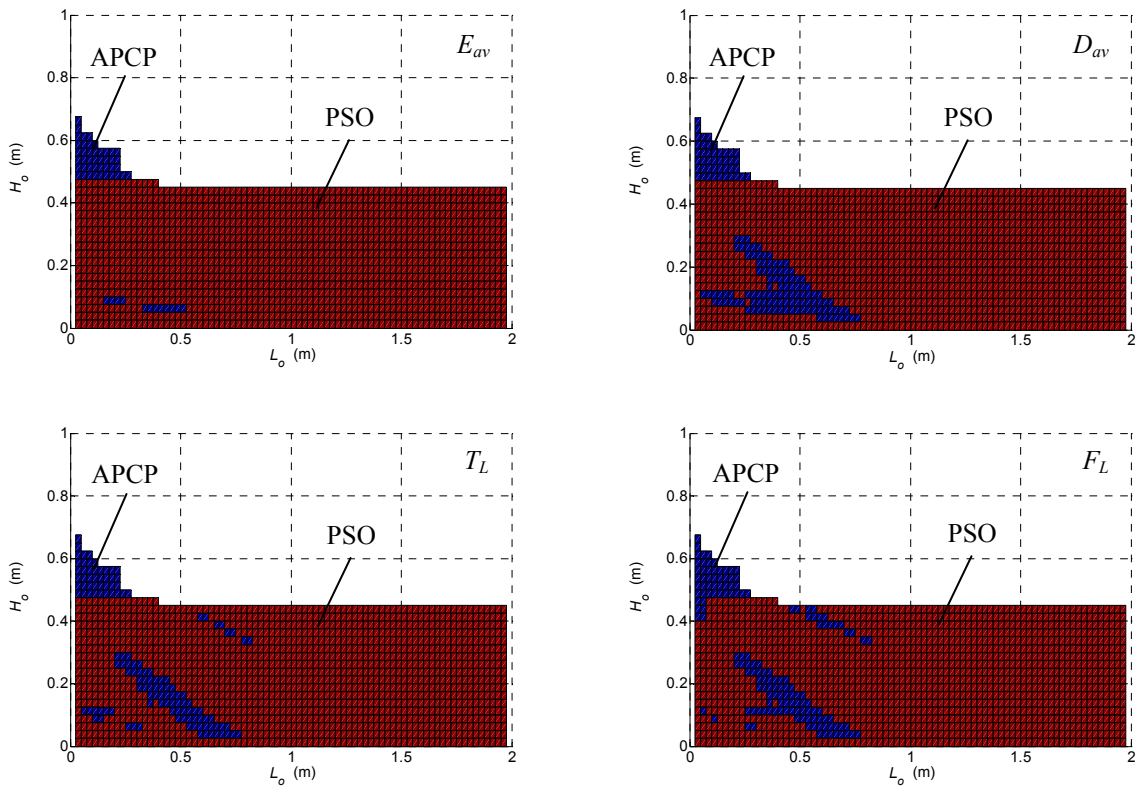


Figura 6.29: Lugar de (L_o, H_o) para a “melhor” estratégia do ponto de vista de E_{av} , D_{av} , T_L e F_L .

6.3.4.3 Comparação das Estratégias APCP e PSO

A Figura 6.29 apresenta uma síntese dos resultados anteriores. Ela mostra, para as várias combinações de valores de (L_o, H_o) em consideração, qual a melhor estratégia a adoptar durante a transposição do obstáculo do ponto de vista dos índices E_{av} , D_{av} , T_L e F_L . Estes

gráficos resultam do cruzamento dos resultados das estratégias APCP e PSO, seleccionado a melhor das duas. Conclui-se que os gráficos obtidos a partir dos diferentes índices (E_{av} , D_{av} , T_L e F_L) apresentam um comportamento semelhante e que a estratégia PSO é a melhor numa gama alargada de valores das dimensões do obstáculo a transpor (L_o , H_o). As excepções ocorrem para obstáculos relativamente altos e estreitos ou quando os obstáculos apresentam larguras próximas de $L_o \approx 0,4$ m, para valores da sua altura inferiores a $H_o < 0,3$ m.

6.3.4.4 Variação dos Parâmetros de Locomoção

As experiências anteriores foram repetidas para diferentes valores das dimensões das pernas do robô (logo permitindo manter uma altura ao solo superior e dar passos de maior comprimento), do factor de ocupação β e da velocidade V_F (Silva, *et al.*, 2002).

Como seria de esperar, as dimensões dos obstáculos que o robô consegue transpor aumentam com as dimensões das pernas do robô. No entanto, mantêm-se as zonas relativas de excelência de cada uma das estratégias. Quanto à influência do factor de ocupação, pode-se concluir que o tamanho dos obstáculos que o robô consegue transpor diminui com β . Estes resultados aqui referidos são independentes dos índices dinâmicos (E_{av} , D_{av} , T_L e F_L) utilizados na análise das experiências.

Já no que diz respeito à variação com V_F , o tamanho dos obstáculos (estáticos) não afecta $E_{av}(L_o, H_o)$ que unicamente aumenta com V_F . Os índices $D_{av}(L_o, H_o)$, $T_L(L_o, H_o)$ e $F_L(L_o, H_o)$ mostram o mesmo tipo de variação com L_o e H_o *versus* V_F .

6.3.5 Comparação das Estratégias no Caso de Obstáculos Localizados Aleatoriamente

Nesta subsecção estuda-se o desempenho das duas estratégias referidas quando o robô tem que transpor um obstáculo com largura $L_o = 0,05$ m e altura H_o variável, centrado num qualquer ponto X_o ao longo de um passo do robô (a situação real mais parecida com esta seria a de um muro estreito com diferentes alturas).

Para efeitos da realização das experiências seguintes, admite-se que os obstáculos têm uma altura que varia no intervalo $0,0 \text{ m} < H_o < 1,0 \text{ m}$ e podem estar posicionados entre os limites do terceiro passo do hexápode, desde que se inicia a sua locomoção, supondo que não existem obstáculos no seu trajecto ($2,25 \text{ m} < X_o < 3,25 \text{ m}$).

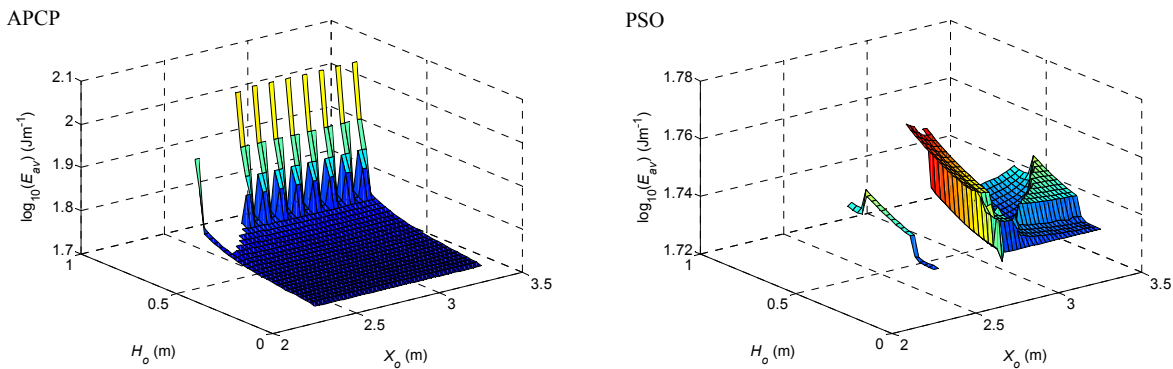


Figura 6.30: $\log(E_{av})$ vs. (L_o, H_o) , com $L_o = 0,05$ m, quando se adoptam as estratégias APCP e PSO, para $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0$ ms⁻¹.

6.3.5.1 Estratégia APCP

A Figura 6.30 apresenta os gráficos de $E_{av}(L_o, H_o)$ para os dois padrões quase-periódicos em estudo. Esta mostra que, no caso da estratégia APCP, o índice E_{av} aumenta de forma monótona com H_o e mantém-se praticamente constante com X_o .

6.3.5.2 Estratégia PSO

Da Figura 6.30 constata-se que no caso da estratégia PSO a variação do índice E_{av} é mais complexa. De facto, há mesmo uma zona, para valores de X_o ligeiramente superiores à posição onde deve terminar o segundo passo do hexápode ($X_o = 2,25$ m), onde é impossível ultrapassar obstáculos (de qualquer altura) recorrendo a esta estratégia.

Verifica-se que a melhor situação corresponde a X_o estar deslocado para a esquerda do local de conclusão do passo, devido ao robô estar a deslocar-se com o joelho numa configuração para a frente. Para o caso de obstruções posicionadas na primeira metade do passo, podem ocorrer colisões entre a parte inferior da perna e o obstáculo ou as dimensões da perna podem não permitir dar passos do comprimento necessário para a transposição dos obstáculos.

Apesar de não representado aqui, os gráficos de $D_{av}(L_o, H_o)$, $T_L(L_o, H_o)$ e $F_L(L_o, H_o)$ apresentam um comportamento semelhante aos de $E_{av}(L_o, H_o)$ para as duas estratégias em análise.

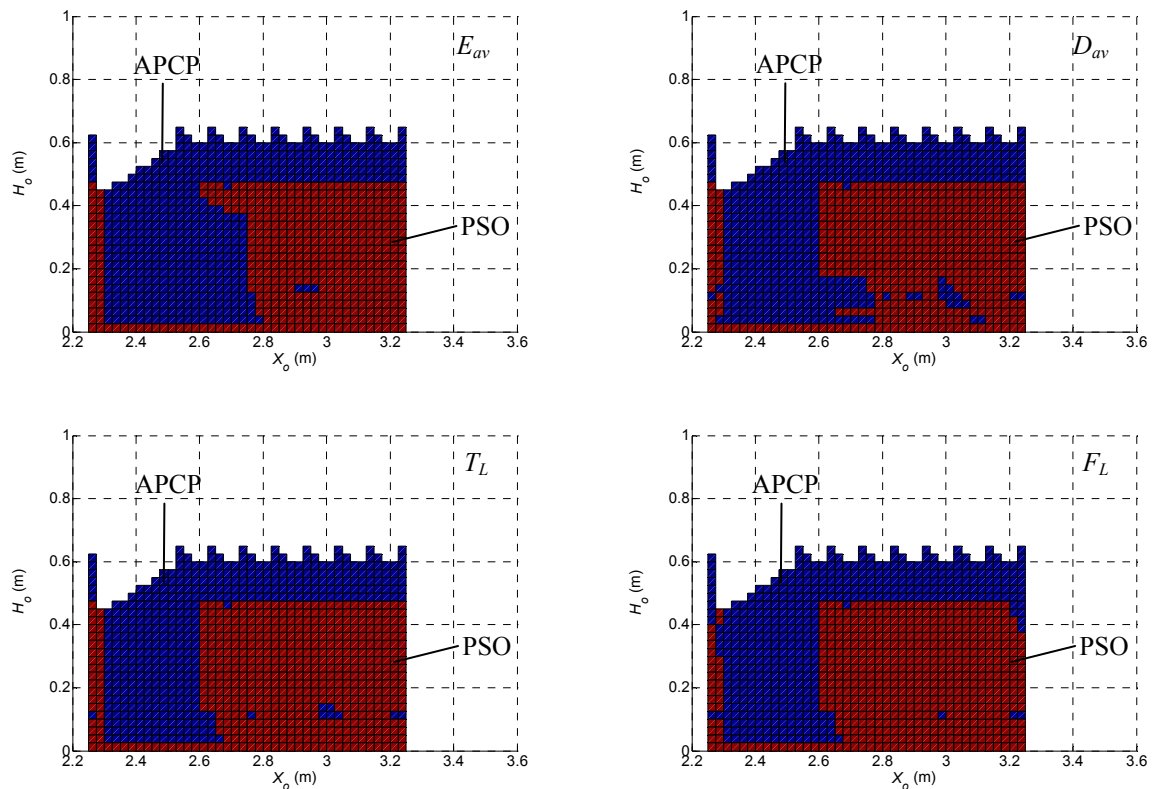


Figura 6.31: Lugar de (X_o, H_o) para a “melhor” estratégia do ponto de vista de E_{av} , D_{av} , T_L e F_L .

6.3.5.3 Comparação das Estratégias APCP e PSO

A Figura 6.31 apresenta uma síntese dos resultados anteriores mostrando, para as várias combinações de valores de (X_o, H_o) em estudo, qual a melhor estratégia do ponto de vista dos índices dinâmicos em consideração.

Conclui-se que os gráficos obtidos a partir dos diferentes índices são consistentes entre si e que existem duas zonas claramente distintas. Assim, para valores de $2,3 \text{ m} < X_o < 2,7 \text{ m}$ e para valores de $H_o > 0,475 \text{ m}$ a estratégia óptima é a APCP. Nos restantes casos é preferível a utilização da estratégia PSO, do ponto de vista dos índices dinâmicos adoptados.

6.3.6 Controlo do Robô Hexápode Durante a Transposição de Obstáculos

Nesta subsecção analisa-se o desempenho dos algoritmos PD-P e PD-P&F no controlo do hexápode durante um movimento adoptando estes padrões de locomoção quase-periódicos.

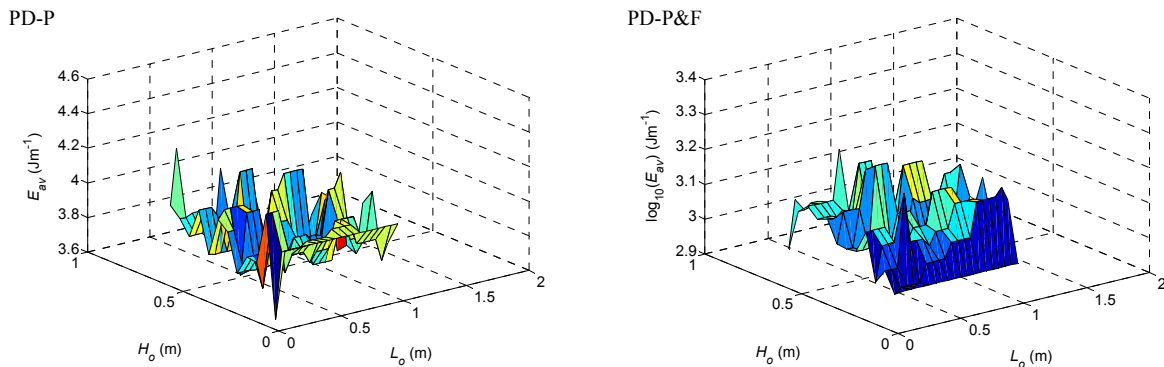


Figura 6.32: $\log(E_{av})$ vs. (L_o, H_o) , aplicando as arquiteturas de controlo PD-P e PD-P&F às juntas do robô quando se adopta a estratégia APCP, com $X_o = 2,25$ m, $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0$ ms⁻¹.

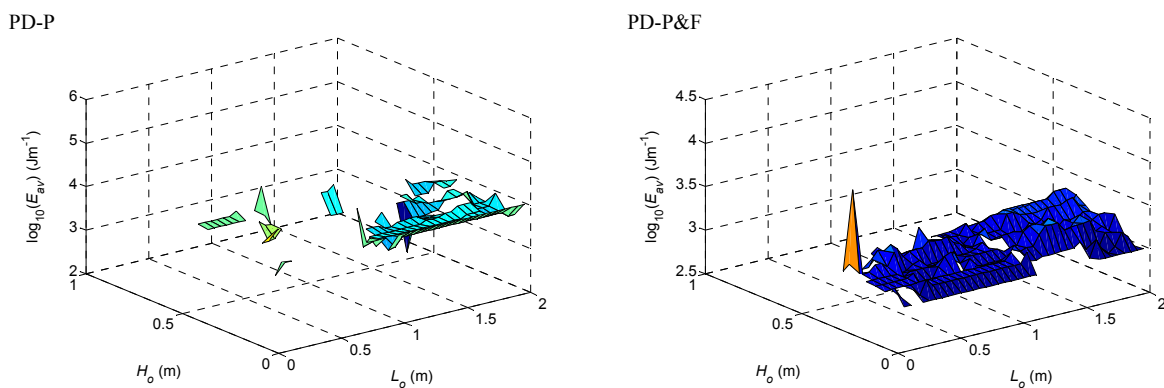


Figura 6.33: $\log(E_{av})$ vs. (L_o, H_o) , aplicando as arquiteturas de controlo PD-P e PD-P&F às juntas do robô quando se adopta a estratégia PSO, com $X_o = 2,25$ m, $\beta = 50\%$, $V_F = 1,0$ ms⁻¹.

Nesta ordem de ideias, desenvolve-se um conjunto de simulações considerando o caso em que os obstáculos se encontram localizados na posição $X_o = 2,25$ m (início / fim do passo) e as suas dimensões variam no intervalo $0,0$ m $< L_o < 2,0$ m e $0,0$ m $< H_o < 1,0$ m. As trajetórias planeadas do robô, para transpor estes obstáculos, são as determinadas nas subsecções anteriores.

As Figuras 6.32 e 6.33 apresentam os gráficos de $E_{av}(L_o, H_o)$, respectivamente quando se adoptam as estratégias APCP e PSO com os algoritmos de controlo PD-P e PD-P&F. Comparando estas figuras com as Figuras 6.23 e 6.26 conclui-se que nenhum dos dois algoritmos consegue garantir a locomoção do hexápode de forma estável em toda a gama de valores do obstáculo que este cinematicamente consegue ultrapassar.

Verifica-se também da comparação dos gráficos correspondentes às arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F que, para ambas as estratégias de transposição de obstáculos, o esquema PD-P&F apresenta uma robustez significativamente mais alargada quando comparado com a arquitectura PD-P e valores inferiores do índice E_{av} . Em particular, a arquitectura de controlo PD-P demonstra sérias dificuldades para controlar a locomoção do robô com o padrão quase-periódico PSO durante a transposição de obstáculos com uma altura $H_o > 0,2$ m.

Os gráficos de $D_{av}(L_o, H_o)$, $T_L(L_o, H_o)$ e $F_L(L_o, H_o)$, não apresentados neste texto, apresentam uma forma similar aos de $E_{av}(L_o, H_o)$ para as duas estratégias em análise e para as duas arquitecturas de controlo em consideração.

Do exposto, conclui-se que a arquitectura de controlo PD-P&F apresenta uma robustez superior à PD-P, quando a controlar as juntas das pernas do robô durante a transposição de obstáculos com recurso às estratégias APCP e PSO. No entanto, ambas as arquitecturas de controlo apresentam deficiências que impedem ao robô manter a sua estabilidade para todos os valores das dimensões dos obstáculos em estudo.

6.4 Identificação e Análise das Funções de Transferência do Sistema Robótico de Locomoção

Nesta secção estuda-se a dinâmica da interacção entre o pé e o solo em robôs multipernas. O objectivo consiste em identificar a dinâmica do sistema artificial de locomoção e verificar se esta apresenta características de ordem fraccionária. O interesse deste estudo reside no facto de existirem diversos trabalhos que mostram que se obtêm dinâmicas fraccionárias em sistemas com características “mistas” como é o caso da interacção de um líquido com uma parede porosa (Oustaloup, 1991), em sistemas biológicos em que há o crescimento de tumores em tecidos saudáveis (Chen, 2003) e em sistemas com viscoelasticidade (Podlubny, 1999).

Uma situação deste tipo verifica-se no caso do sistema em análise, em que ocorrem múltiplas colisões periódicas dos pés do robô com o solo e, no início da fase de suporte de cada pé, surgem por vezes situações (apesar de não ser desejável) em que o contacto do pé com o solo é repetidamente estabelecido e perdido antes de estabilizar.

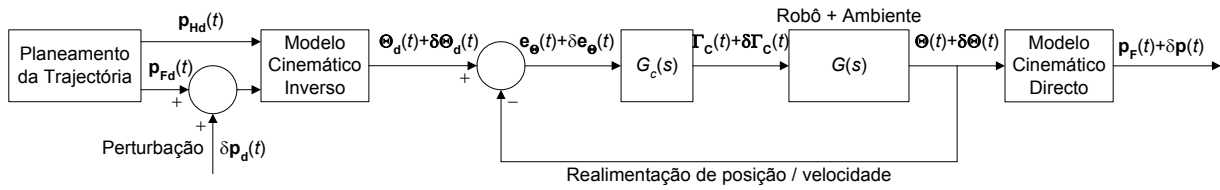


Figura 6.34: Diagrama de blocos adoptado para o cálculo das funções de transferência $G_{xy}(s)$ e $G_{yy}(s)$, $j = 1, 2$.

6.4.1 Metodologia para a Determinação das Funções de Transferência do Hexápode

De forma a obter a função de transferência (FT) do sistema (*i.e.*, do robô e do ambiente) é determinada numericamente a resposta em frequência quando é sobreposto um sinal de excitação em ruído branco $\delta \mathbf{p}_d(t)$ às trajectórias cartesianas planeadas dos pés segundo as direcções x e y , conforme representado no diagrama de blocos da Figura 6.34. Assim, as trajectórias de referência resultantes dos pés do robô relativamente às ancas são dadas por:

$$\mathbf{p}_d(t) + \delta \mathbf{p}_d(t) = \begin{bmatrix} x_{id}(t) + \delta x_{id}(t) \\ y_{id}(t) + \delta y_{id}(t) \end{bmatrix} \quad (6.3a)$$

$$\mathbf{p}_d(t) + \delta \mathbf{p}_d(t) = \Psi [\Theta_d(t) + \delta \Theta_d(t)] \Rightarrow \Theta_d(t) + \delta \Theta_d(t) = \Psi^{-1} [\mathbf{p}_d(t) + \delta \mathbf{p}_d(t)] \quad (6.3b)$$

onde $\mathbf{p}_d(t) + \delta \mathbf{p}_d(t)$ são as trajectórias cartesianas planeadas do i -ésimo pé (relativamente à sua anca) perturbadas com ruído branco e $\Theta_d(t) + \delta \Theta_d(t)$, são as correspondentes trajectórias perturbadas nas juntas. Durante a simulação da locomoção do robô, as perturbações introduzidas na fase de planeamento das trajectórias vão-se fazer sentir nos binários solicitados aos actuadores das juntas das pernas do robô (aparecendo sobreposta aos binários solicitados pelo controlador $\Gamma_C(t)$ uma perturbação de valor $\delta \Gamma_C(t)$) e nas trajectórias efectivas dos pés do robô (que passam a ser da forma $\mathbf{p}_F(t) + \delta \mathbf{p}(t)$).

Nesta ordem de ideias, as FTs do sistema são dadas por ($j = 1, 2$):

$$G_{xy}(s) = \frac{F\{\delta x_{1F}(t)\}}{F\{\delta \tau_{1JC}(t)\}} \quad (6.4a)$$

$$G_{y_j}(s) = \frac{F\{\delta y_{1F}(t)\}}{F\{\delta \tau_{1jC}(t)\}} \quad (6.4b)$$

onde $\delta x_{1F}(t)$ e $\delta y_{1F}(t)$ são as perturbações resultantes nas trajectórias dos pés da perna 1, $\delta \tau_{11C}(t)$ e $\delta \tau_{12C}(t)$ são as correspondentes perturbações nos binários solicitados nas juntas e $F\{\}$ representa o operador da transformada de Fourier.

6.4.2 Funções de Transferência do Sistema Robótico de Locomoção Multipernas

Nesta subsecção apresenta-se o resultado de um conjunto de simulações efectuadas de forma a determinar as FTs do sistema robô hexápode – ambiente, quando se modela o solo quer através do modelo cinemático linear, quer do modelo dinâmico linear (descritos no Anexo E).

Antes de iniciar as experiências procede-se à sintonia dos controladores das juntas das pernas do robô, de acordo com o exposto na subsecção 5.2.1, quando o robô se desloca com os parâmetros indicados na Tabela 6.1. Neste estudo adopta-se a arquitectura de controlo PD-P&F (Figura 5.5) e assume-se que os actuadores das juntas do robô são praticamente ideais (o binário máximo considerado na equação (3.10) é $\tau_{ijMax} = 400$ Nm). Os parâmetros resultantes para o controlador $G_{c1}(s)$ são apresentados na Tabela 6.5, para um controlador proporcional G_{c2} com ganho $Kp_j = 0.9$.

Tendo em vista a determinação das FTs G_{x_j} e G_{y_j} ($j = 1, 2$) do sistema robô – ambiente sobrepõe-se, separadamente, às trajectórias cartesianas planeadas dos pés um sinal de excitação em ruído branco, com uma amplitude máxima de $\delta x_{id}(t) = \delta y_{id}(t) = 5 \times 10^{-4}$ m segundo as direcções x e y , respectivamente. O sinal é adicionado às trajectórias cartesianas de referência dos pés do robô durante um período de excitação de 3970 passos, começando no 11º passo de forma a evitar os transitórios iniciais de simulação e terminando no final do passo 3980 de forma a permitir a dissipação das oscilações.

Tabela 6.5: Parâmetros do controlador para $G_{c1}(s)$, com $G_{c2}(s) = 0,9$.

PD-P&F	Junta $j = 1$	Kp_1	4000
		Kd_1	0
	Junta $j = 2$	Kp_2	1000
		Kd_2	50

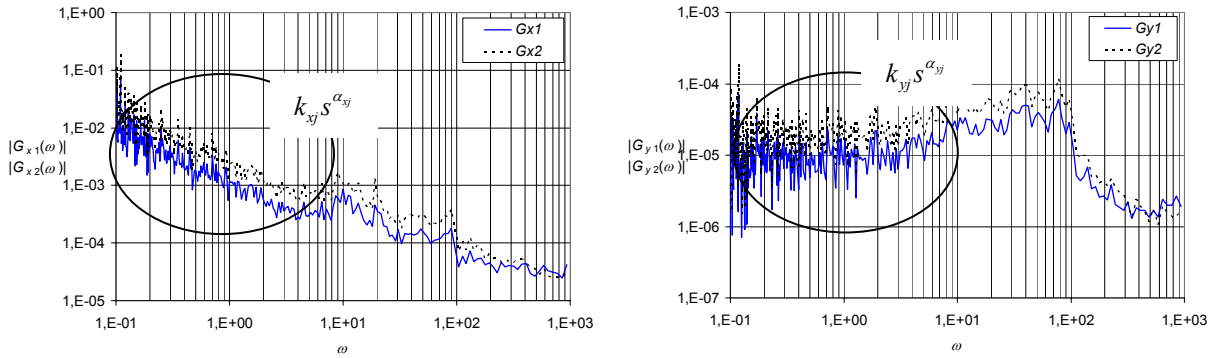


Figura 6.35: Funções de Transferência $G_{xj}(\omega)$ e $G_{yj}(\omega)$, $j = 1, 2$, para $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $H_B = 0,9$ m, $F_C = 0,1$ m, $V_F = 1$ ms $^{-1}$, PLO.

As FTs resultantes apresentam assintotas de diferentes ordens para diferentes bandas de frequência. Às baixas frequências (*i.e.*, até $\omega \approx 10$ rads $^{-1}$), a banda estudada nesta Tese, estas assintotas podem ser aproximadas pelas expressões:

$$G_{xj}(s) \approx k_{xj} s^{\alpha_{xj}}, \quad \alpha_{xj} \in \mathfrak{R}, \quad j = 1, 2 \quad (6.5a)$$

$$G_{yj}(s) \approx k_{yj} s^{\alpha_{yj}}, \quad \alpha_{yj} \in \mathfrak{R}, \quad j = 1, 2 \quad (6.5b)$$

No caso de se adoptar o modelo cinemático do solo para simular o efeito da interacção pé – solo as FTs resultantes, com os parâmetros apresentados na Tabela 6.1, são apresentadas na Figura 6.35. Verifica-se que G_{x1} e G_{x2} , bem como G_{y1} e G_{y2} , diferem somente de um factor de escala que é aproximadamente 0,5. É patente nas FTs apresentadas na Figura 6.35 a ocorrência de um pico de ressonância para valores de $\omega \approx 10$ rads $^{-1}$, nos casos de G_{x1} e G_{x2} , e $\omega \approx 100$ rads $^{-1}$, para G_{y1} e G_{y2} .

As funções de transferência indicadas foram, de seguida, calculadas para outros valores de diferentes parâmetros que se pensou poderem influenciar os resultados (β , K_{xF} , K_{yF} , B_{xF} e B_{yF}). No caso dos parâmetros do modelo solo, optou-se por fazer variar os quatro parâmetros em simultâneo mantendo a relação entre eles. Para o efeito, os valores de K_{xF} , K_{yF} , B_{xF} e B_{yF} , são multiplicados simultaneamente por um factor (K_{mult}). As Figuras 6.36 e 6.37 sintetizam os resultados obtidos, nomeadamente em termos da ordem α , quando a locomoção se efectua com diferentes valores do factor de ocupação e das características do solo. Estes gráficos

mostram que, na gama adoptada para os parâmetros se obtém $\alpha_{xj} \approx -1,0$ e $\alpha_{yj} \approx 0,0$ ($j = 1, 2$) e que consequentemente a ordem das FTs é inteira.

Por seu lado, a Figura 6.38 mostra a variação da ordem α das FTs *versus* a velocidade de locomoção do robô V_F . A partir destes gráficos pode-se concluir que, para valores médios e elevados da velocidade de locomoção do robô (*i.e.*, $V_F > 0,2 \text{ ms}^{-1}$) obtém-se $\alpha_{xj} \approx -1,0$ e $\alpha_{yj} \approx 0,0$ ($j = 1, 2$), em contraste com o valor fraccionário para a gama de velocidades baixas (*i.e.*, $V_F < 0,1 \text{ ms}^{-1}$).

Em todas as FTs determinadas a partir do modelo cinemático do solo surge um pico de ressonância, para valores de $10 < \omega < 100 \text{ rads}^{-1}$, tal como se ilustrou na Figura 6.35 para os valores de base dos parâmetros da simulação.

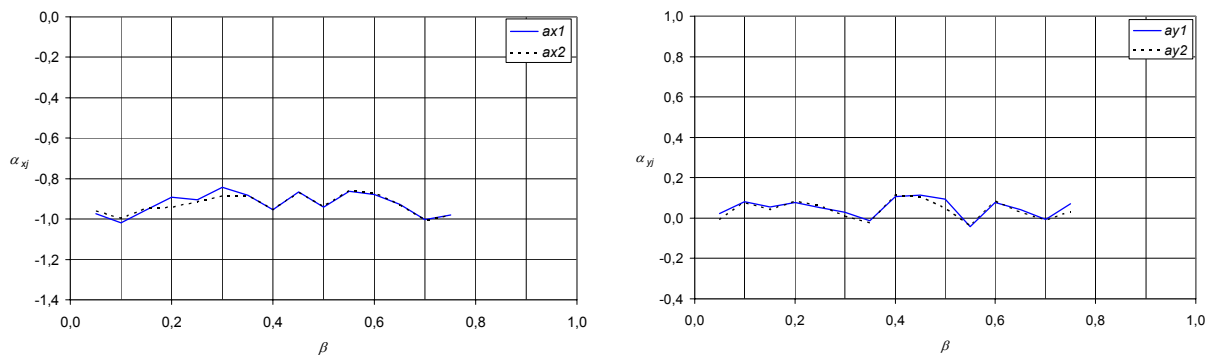


Figura 6.36: Gráficos de α_{xj} e α_{yj} vs. β para as Funções de Transferência $G_{xj}(s)$ e $G_{yj}(s)$, $j = 1, 2$.

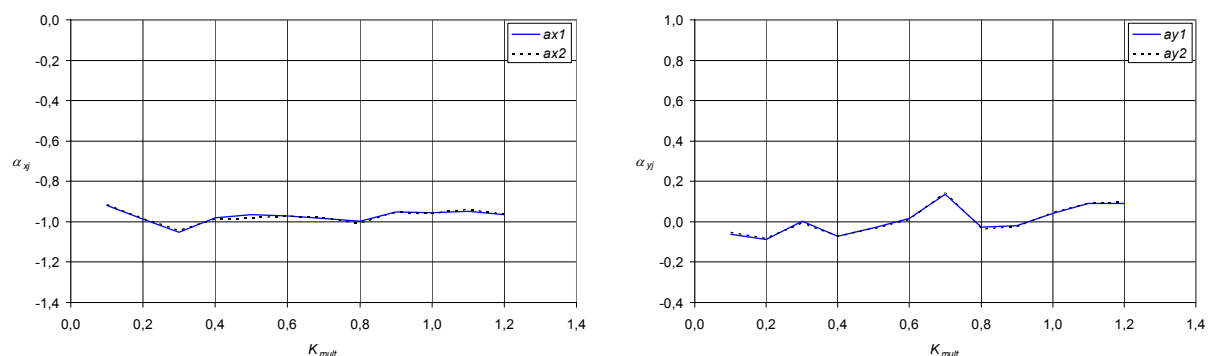


Figura 6.37: Gráficos de α_{xj} e α_{yj} vs. K_{mult} para as Funções de Transferência $G_{xj}(s)$ e $G_{yj}(s)$, $j = 1, 2$.

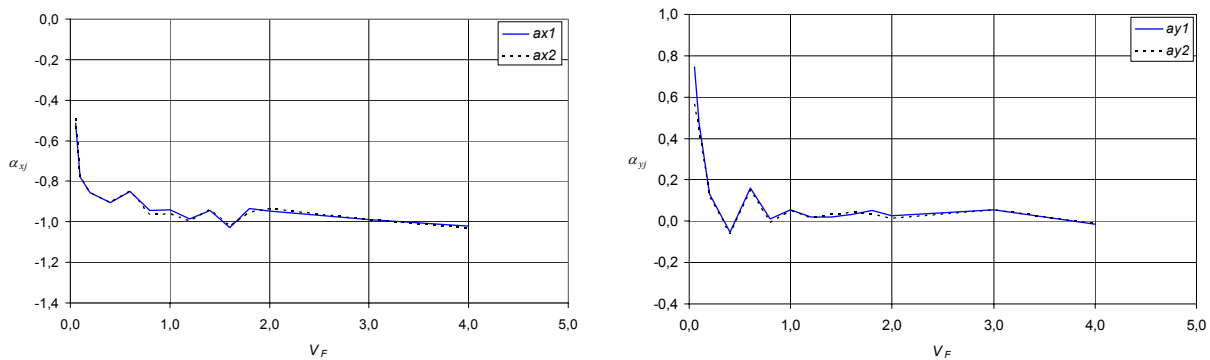


Figura 6.38: Gráficos de α_{xj} e α_{yj} vs. V_F para as Funções de Transferência $G_{xj}(s)$ e $G_{yj}(s)$, $j = 1, 2$.

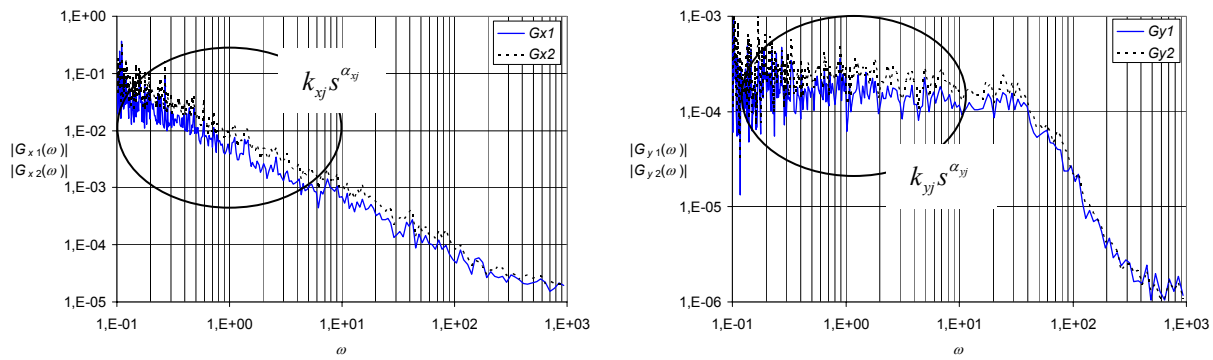


Figura 6.39: Funções de Transferência $G_{xj}(\omega)$ e $G_{yj}(\omega)$, $j = 1, 2$, para $\beta = 50\%$, $L_S = 1,0$ m, $H_B = 0,9$ m, $F_C = 0,1$ m, $V_F = 1$ ms⁻¹, PLO.

As FTs resultantes no caso de se adoptar o modelo dinâmico para simular o efeito da interacção pé – solo, com os parâmetros apresentados na Tabela 6.1, são apresentadas na Figura 6.39. Da sua observação, verifica-se que também neste caso G_{x1} e G_{x2} , bem como G_{y1} e G_{y2} , diferem somente de um factor de escala que é aproximadamente 0,5. No entanto, estas FTs apresentam uma variação mais suave do que as obtidas com o modelo cinemático do solo. Verifica-se mesmo que o pico de ressonância existente anteriormente não é agora aparente.

Tal como anteriormente, foram calculadas para este caso as FTs quando a locomoção se efectua de forma estável, para diferentes valores do factor de ocupação, das características do solo e da velocidade de locomoção. As Figuras 6.40 – 6.42 sintetizam os resultados, em termos da ordem α .

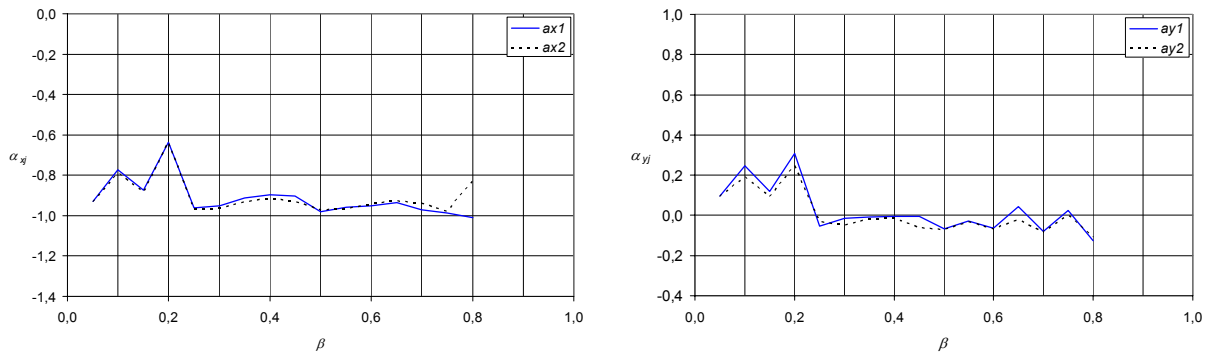


Figura 6.40: Gráficos de α_{xj} e α_{yj} vs. β para as Funções de Transferência $G_{xy}(s)$ e $G_{yj}(s)$, $j = 1, 2$.

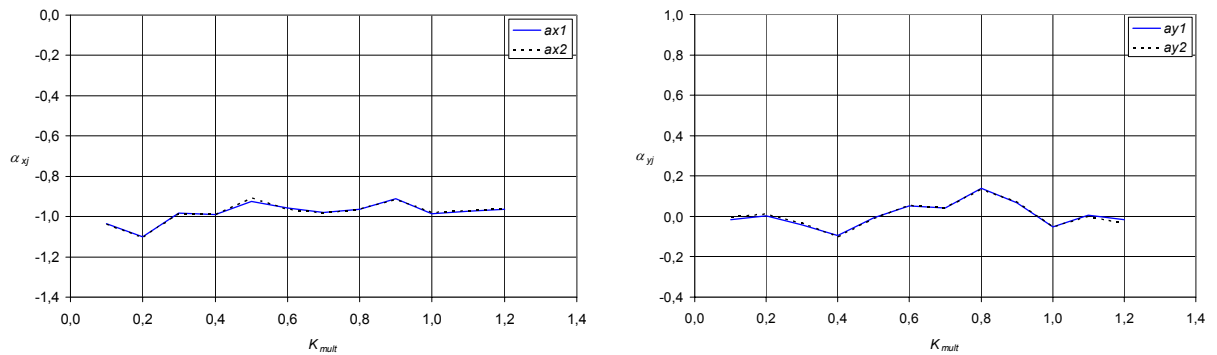


Figura 6.41: Gráficos de α_{xj} e α_{yj} vs. K_{mult} para as Funções de Transferência $G_{xy}(s)$ e $G_{yj}(s)$, $j = 1, 2$.

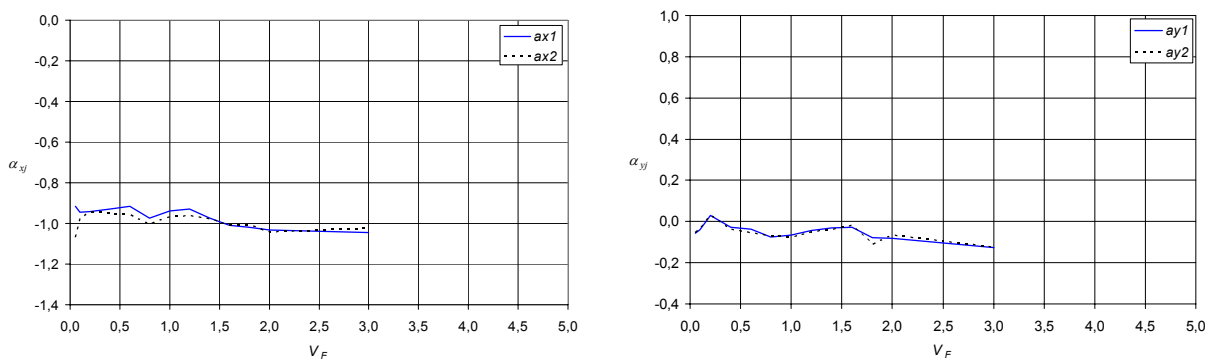


Figura 6.42: Gráficos de α_{xj} e α_{yj} vs. V_F para as Funções de Transferência $G_{xy}(s)$ e $G_{yj}(s)$, $j = 1, 2$.

A partir dos gráficos verifica-se que se obtém $\alpha_{xj} \approx -1,0$ e $\alpha_{yj} \approx 0,0$ ($j = 1, 2$) e conclui-se que neste caso a ordem das FTs é inteira para todos os valores dos parâmetros analisados.

Adoptando o modelo dinâmico do solo foram repetidas algumas das experiências para diferentes padrões de locomoção, nomeadamente os padrões PLFIMC e o PLFICC. As linhas

gerais das conclusões, em termos da ordem α das funções de transferência em estudo, não se alteram de forma significativa face à situação de a locomoção se efectuar com o PLO.

A título de conclusão verifica-se que os resultados das simulações efectuadas, considerando os modelos cinemático e dinâmico do solo, tomando diferentes valores do factor de ocupação, dos parâmetros do solo e da velocidade de locomoção, são consistentes entre si para praticamente todas as situações analisadas.

Mais ainda, estes resultados permitem concluir que, na gama de valores dos parâmetros em estudo, nos quais a locomoção do robô se mantém de forma estável, a ordem das funções de transferência é inteira e praticamente invariante.

A excepção ao que acaba de ser dito ocorre para valores reduzidos da velocidade de locomoção do robô V_F (*i.e.*, $V_F < 0,1 \text{ ms}^{-1}$), situação em que as FTs obtidas com o modelo cinemático do solo apresentam um valor fraccionário às baixas frequências, mas este valor é inteiro quando se simula o comportamento do solo com o modelo dinâmico.

6.5 Conclusões e Perspectivas de Trabalho Futuro

Neste capítulo foram comparados diversos aspectos dinâmicos dos padrões de locomoção periódicos e quase-periódicos utilizados em robôs multipernas.

Através da implementação de diferentes padrões de movimento periódicos frequentemente observados na natureza, analisou-se, numa primeira fase, a forma como o robô responde aos parâmetros factor de ocupação, comprimento do passo e altura do corpo ao solo e à velocidade de deslocamento. Para estudar o desempenho do sistema foram utilizadas diversas medidas quantitativas, baseadas nas propriedades dinâmicas do sistema, definidas no Capítulo 3. Um conjunto de experiências permitiu determinar o melhor conjunto de padrão e correspondentes variáveis de locomoção, em função da velocidade de deslocamento do robô.

Os resultados mostram que os parâmetros de locomoção devem ser adaptados à velocidade de deslocamento do robô de forma a otimizar o desempenho do sistema. À medida que a velocidade de movimento aumenta, os valores de β e H_B , devem ser reduzidos e o valor de L_S aumentado. Mais ainda, no caso do robô quadrúpede, concluiu-se que o padrão de locomoção

deve ser adaptado a V_F ; contudo, as experiências não foram conclusivas quanto ao padrão de locomoção mais adequado a cada velocidade.

Na segunda parte deste capítulo efectuou-se o estudo de duas estratégias para transpor obstáculos e a comparação do desempenho de cada uma delas. Através da consideração de obstáculos com diferentes dimensões, tais como a sua altura e comprimento, e do seu posicionamento em localizações distintas ao longo do ciclo de locomoção do robô, determinou-se a forma como o robô adapta o comprimento do passo e a máxima altura do pé ao solo para negociar cada obstáculo com cada uma das estratégias possíveis. Da análise das diversas experiências efectuadas obteve-se o conhecimento de qual a melhor estratégia para transpor obstáculos de acordo com a sua posição e dimensões. Mais ainda, concluiu-se que os resultados obtidos através dos diferentes índices são compatíveis. Verificou-se também que, comparativamente à arquitectura PD-P, a arquitectura de controlo PD-P&F é mais robusta quando aplicada no controlo das juntas de um hexápode que tem que transpor obstáculos de diferentes dimensões.

Na última parte deste capítulo apresentou-se o estudo da dinâmica da interacção pé-solo em sistemas de locomoção multipernas. O objectivo deste estudo era identificar a dinâmica do sistema artificial de locomoção e verificar se esta apresentava características fraccionárias. Os resultados das simulações efectuadas para diferentes valores do factor de ocupação, dos parâmetros que caracterizam o modelo do solo e da velocidade de locomoção foram consistentes entre si e permitiram concluir que, na gama de valores dos parâmetros em estudo nos quais a locomoção do robô se mantém de forma estável, a ordem das funções de transferência é inteira.

Uma vez que a nossa atenção foi concentrada na análise dinâmica da locomoção 2D recorrendo a padrões de locomoção periódicos e quase-periódicos, certos aspectos da locomoção não são necessariamente capturados pelos índices propostos. Em consequência, o trabalho futuro nesta área será dirigido ao refinamento dos nossos modelos, de acordo com as seguintes ideias:

- aprofundamento do estudo da adequação dos diferentes padrões de locomoção quadrúpedes à velocidade de locomoção V_F , nomeadamente através da adopção de sintonias diferentes para os controladores das juntas das pernas do robô; os

controladores deverão ser sintonizados para cada padrão de locomoção a considerar e também para cada velocidade particular. Isto faz sentido uma vez que se pode considerar que os animais adaptam as características de elasticidade dos seus músculos e tendões a cada velocidade;

- estudar a influência dos parâmetros do modelo do corpo do robô, nomeadamente os coeficientes de elasticidade e de atrito viscoso, de forma a perceber como estes influenciam a eficácia e eficiência da locomoção, quer em terrenos isentos de obstáculos e a diferentes velocidades, quer quando o robô tem que transpor obstáculos;
- verificar ainda qual o efeito de diferentes valores dos parâmetros da complacência interna do corpo do robô sobre o desempenho da locomoção, uma vez que os animais utilizam a complacência interna do seu corpo para armazenar energia a velocidades médias e elevadas;
- desenvolver ou adaptar critérios de estabilidade estática e dinâmica que permitam determinar se os dois padrões de locomoção quase-periódicos que o robô hexápode utiliza para ultrapassar obstáculos são estáveis;
- estender este trabalho para o caso de solos mais irregulares, considerando que existem locais onde não é admissível ao robô colocar os pés, e verificar o comportamento dos algoritmos implementados nesta situação;
- implementar modelos do solo que contenham características mais realísticas, onde os sistemas de locomoção por pernas devem vir a entrar na realidade, e para os quais sejam necessários conceitos de planeamento de trajectórias e estratégias de transposição de obstáculos distintos;
- aprofundar o estudo da adequação das arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F e comparar o seu desempenho quando aplicadas ao controlo das juntas das pernas de robôs hexápodes que recorrem às estratégias APCP e PSO para ultrapassar obstáculos com diferentes dimensões e posicionadas em diferentes posições do ciclo de locomoção do robô;
- estudar o comportamento das arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F quando o controlador $G_{cl}(s)$ é fraccionário (do tipo PD^{*α*}) e comparar o seu desempenho com a

situação em que este controlador é de ordem inteira (PD^1), para a locomoção com os padrões quase-periódicos descritos;

- estudar e desenvolver novas arquiteturas adequadas para o controle das juntas das pernas de sistemas artificiais de locomoção multipernas quando estes têm que ultrapassar obstáculos recorrendo às estratégias APCP e PSO, bem como a outras que venham a ser desenvolvidas;
- aprofundar a análise das FTs do sistema robô hexápode – ambiente, nomeadamente para outras bandas de frequência.

Referências

- ALEXANDER, R. McN.. (1984). “The Gaits of Bipedal and Quadrupedal Animals”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 3; No. 2; pp. 49 – 59.
- ARSENIO, Artur M.. (2000). “Tuning of Neural Oscillators for the Design of Rhythmic Motions”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1888 – 1893.
- BAI, Shaoping; LOW, K. H.; TEO, M. Y.. (2002). “Path Generation of Walking Machines in 3D Terrain”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2216 – 2221.
- BAI, Shaoping; LOW, K. H.; ZIELINSKA, Teresa. (1999a). “Quadruped Free Gait Generation Based on the Primary/Secondary Gait”. *Robotica*. Vol. 17; Part 4; pp. 405 – 412.
- BAI, Shaoping; LOW, K. H.; ZIELINSKA, Teresa. (1999b). “Quadruped Free Gait Generation for Straight-Line and Circular Trajectories”. *Advanced Robotics*. Vol. 13; No. 5; pp. 513 – 538.
- BEEK, P. J.; SCHMIDT, R. C.; MORRIS, A. W.; SIM, M.-Y.; TURVEY, M. T.. (1995). “Linear and Nonlinear Stiffness and Friction in Biological Rhythmic Movements”; *Biological Cybernetics*; Vol. 73; pp. 499 – 507.
- BOURGEOT, Jean-Matthieu; CISLO, Nathalie; ESPIAU, Bernard. (2002). “Path-Planning and Tracking in a 3D Complex Environment for an Anthropomorphic Biped Robot”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2509 – 2514.
- BROOKS, Rodney A.. (1989). *A Robot That Walks; Emergent Behaviours From a Carefully Evolved Network*. A.I. Memo 1091; Artificial Intelligence Laboratory; Massachusetts Institute of Technology.
- CAO, Meifen; KAWAMURA, Atsuo. (1998). “A Design Method of Neural Oscillatory Networks for Generation of Humanoid Biped Walking Patterns”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2357 – 2362.
- CELAYA, E.; PORTA, J. M.. (1995). “Force-Based Control of a Six-Legged Robot on Abrupt Terrain Using the Subsumption Architecture”. In: *Proceedings ICAR'95 – Seventh International Conference on Advanced Robotics*; pp. 413 – 419.
- CELAYA, Enric; PORTA, Josep M.. (1996). “Control of a Six-Legged Robot Walking on Abrupt Terrain”. In: *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2731 – 2736.

CHEN, Chun-Hung; KUMAR, Vijay; LUO, Yuh-Chyun. (1998). "Motion Planning of Walking Robots Using Ordinal Optimization". *IEEE Robotics & Automation Magazine*. Vol. 5; No. 2; pp. 22 – 32.

CHEN, W.; HOLM, S.. (2003). "Fractional derivative mathematical and numerical modelling of acoustic attenuations obeying arbitrary frequency power law". In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Theoretical & Computational Acoustics*.

CHO, D. J.; KIM, J. H.; GWEON, D. G.. (1995). "Optimal Turning Gait of a Quadruped Walking Robot". *Robotica*. Vol. 13; Part 6; pp. 559 – 564.

CHOW, Y. H.; CHUNG, Ronald. (2000). "Obstacle Avoidance of Legged Robot Without 3D Reconstruction of the Surroundings". In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2316 – 2321.

COLLINS, J. J.; RICHMOND, S. A.. (1994). "Hard-Wired Central Pattern Generators for Quadrupedal Locomotion". *Biological Cybernetics*. Vol. 71; pp. 375 – 385.

COLLINS, J. J.; STEWART, Ian. (1993). "Hexapodal Gaits and Coupled Nonlinear Oscillator Models". *Biological Cybernetics*. Vol. 68; pp. 287 – 298.

ELDERSHAW, Craig; YIM, Mark. (2001). "Motion Planning of Legged Vehicles in an Unstructured Environment". In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3383 – 3389.

GAßMANN, B.; FROMMBERGER, L.; DILLMANN, R.; BERNS, K.. (2003). "Real-Time 3D Map Building for Local Navigation of a Walking Robot in Unstructured Terrain". In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2185 – 2190.

GARCIA, Elena; ESTREMER, Joaquin; SANTOS, Pablo Gonzalez de. (2002). "A Comparative Study of Stability Margins for Walking Machines". *Robotica*. Vol. 20; Part 6; pp. 595 – 606.

HORNBY, G. S.; TAKAMURA, S.; YOKONO, J.; HANAGATA, O.; YAMAMOTO, T.; FUJITA, M.. (2000). "Evolving Robust Gaits With AIBO". In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3040 – 3045.

HOYT, Donald F.; TAYLOR, C. Richard. (1981). "Gait and the Energetics of Locomotion in Horses". *Nature*. Vol. 292; pp. 239 – 242.

IGARASHI, Hiroshi; KAKIKURA, Masayoshi. (2003). "Adaptive Gait for a Quadruped Robot on 3D Path Planing". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2049 – 2054.

IGARASHI, Hiroshi; KAKIKURA, Masayoshi. (2004). "Path and Posture Planning for Walking Robots by Artificial Potential Method". In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2165 – 2170.

- ILG, W.; ALBIEZ, J.; JEDELE, H.; BERNS, K.; DILLMANN, R.. (1999). "Adaptive Periodic Movement Control for the Four Legged Walking Machine BISAM". In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2354 – 2359.
- INADA, Hironobu; ISHII, Kazuo. (2003). "Behavior Generation of Bipedal Robot Using Central Pattern Generator (CPG) (1st Report: CPG Parameters Searching Method by Genetic Algorithm)". In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2179 – 2184.
- INAGAKI, Katsuhiko. (1999). "A Gait Study for a One-Leg-Disabled Hexapod Robot". *Advanced Robotics*. Vol. 12; No. 5; pp. 593 – 604.
- INAGAKI, Shinkichi; YUASA, Hideo; SUZUKI, Takanori; ARAI, Tamio. (2004). "Wave CPG Model for Autonomous Decentralised Multi-Legged Robot – Gait Generation and Walking Speed Control". In: *Proceedings of the 35th International Symposium on Robotics*.
- JALICS, Laci; HEMAMI, Hooshang; ZHENG, Yuan F.. (1997). "Pattern Generation Using Coupled Oscillators for Robotic and Biorobotic Adaptive Periodic Movement". In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 179 – 184.
- JIMÉNEZ, María A.; SANTOS, P. González de. (1997). "Terrain-Adaptive Gait for Walking Machines". *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 16; No. 3; pp. 320 – 339.
- KAGAMI, Satoshi; NISHIWAKI, Koichi; KUFFNER, James J.; OKADA, Kei; INABA, Masayuki; INOUE, Hirochika. (2003). "Vision-Based 2.5D Terrain Modeling for Humanoid Locomotion". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2141 – 2146.
- KARAZUME, Ryo; HIROSE, Shigeo. (2000). "Development of Image Stabilization System for Remote Operation of Walking Robots". In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1856 – 1861.
- KIMURA, H.; FUKUOKA, Y.. (2000). "Adaptive Dynamic Walking of a Quadruped Robot on Irregular Terrain by Using Neural System Model"; in *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 979 – 984.
- KIMURA, Shinichi; YANO, Masafuni; SHIMIZU, Hiroshi. (1994). "A Self-Organizing Model of Walking Patterns of Insects. II. The Loading Effect and Leg Amputation". *Biological Cybernetics*. Vol. 70; pp. 505 – 512.
- KLAASSEN, B.; LINNEMANN, R.; SPENNEBERG, D.; KIRCHNER, F.. (2003). "Biologically Inspired Robot Design and Modelling". In: *Proceedings of the ICAR 2003 – 11th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 576 – 581.
- KOO, Tae-Wan; YOON, Yong-San. (1999). "Dynamic Instant Gait Stability Measure For Quadruped Walking Robot". *Robotica*. Vol. 17; Part 1; pp. 59 – 70.

KUFFNER, James; KAGAMI, Satoshi; NISHIWAKI, Koichi; INABA, Masayuki; INOUE, Hirochika. (2003). "Online Footstep Planning for Humanoid Robots". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 932 – 937.

KURAZUME, Ryo; BYONG-WON, Ahn; OHTA, Kazuhiko; HASEGAWA, Tsutomu. (2003). "Experimental Study on Energy Efficiency for Quadruped Walking Vehicles". In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 613 – 618.

LEE, Yun-Jung; HIROSE, Shigeo. (2000). "Three-Legged Walking for Fault Tolerant Locomotion of a Quadruped Robot with Demining Mission". In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 973 – 978.

LI, Tsai-Yen; CHEN, Pei-Feng; HUANG, Pei-Zhi. (2003). "Motion Planning for Humanoid Walking in a Layered Environment". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3421 – 3427.

LI, Tsai-Yen; HUANG, Pei-Zhi. (2004). "Planning Humanoid Motions with Striding Ability in a Virtual Environment". In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3195 – 3200.

LORCH, Oliver; ALBERT, Amos; DENK, Joachim; GERECKE, Marc; CUPEC, Robert; SEARA, Javier F.; GERTH, Wilfried; SCHMIDT, Günther. (2002). "Experiments in Vision-Guided Biped Walking". In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2484 – 2490.

MARHEFKA, Duane W.; ORIN, David E.. (1997). "Gait Planning for Energy Efficiency in Walking Machines". In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 474 – 480.

MATSUOKA, Kiyotoshi. (1985). "Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons With Adaptation". *Biological Cybernetics*. Vol. 52; pp. 367 – 376.

MATSUOKA, Kiyotoshi. (1987). "Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators". *Biological Cybernetics*. Vol. 56; pp. 345 – 353.

OKADA, Kei; INABA, Masayuki; INOUE, Hirochika. (2003). "Walking Navigation System of Humanoid Robot Using Stereo Vision Based Floor Recognition and Path Planning With Multi-Layered Body Image". In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2155 – 2160.

OUSTALOUP, Alan. (1991). *La Commande CRONE: Commande Robuste d'Ordre Non Entier*. Éditions Hermès.

PACK, Daniel J.. (1996). "Perception-Based Control for a Quadruped Walking Robot". In: *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2994 – 3001.

- PAPADOPOULOS, Evangelos; CHEROUVIM, Nicholas. (2004). "On Increasing Energy Autonomy for a One-Legged Hopping Robot". In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 4645 – 4650.
- PARKER, Gary B.; BRAUN, David W.; CYLIAX, Ingo. (1997). "Learning Gaits for the Stiquito". In: *Proceedings of the ICAR 1997 – 8th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 285 – 290.
- PENG, S.; LAM, C. P.; COLE, G. R.. (2003). "A Biologically Inspired Four Legged Walking Robot". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2024 – 2030.
- PODLUBNY, Igor. (1999). *Fractional Differential Equations*. Academic Press.
- PORTA, J. M.; CELAYA, E.. (2001). "Efficient Gait Generation Using Reinforcement Learning". In: *Proceedings CLAWAR'2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 411 – 418.
- SABE, Kohtaro; FUKUCHI, Masaki; GUTMANN, Jens-Steffen; OHASHI, Takeshi; KAWAMOTO, Kenta; YOSHIGAHARA, Takayuki. (2004). "Obstacle Avoidance and Path Planning for Humanoid Robots Using Stereo Vision". In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 592 – 597.
- SANTOS, Pablo González de; JIMÉNEZ, María A.. (1995). "Generation of Discontinuous Gaits for Quadruped Walking Vehicles". *Journal of Robotic Systems*. Vol. 12; No. 9; pp. 599 – 611.
- SCHMIEDELER, J. P.; WALDRON, K. J.. (1999). "The Mechanics of Quadrupedal Galloping and the Future of Legged Vehicles". *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 18; No. 12; pp. 1224 – 1234.
- SHAN, Jiang; JUNSHI, Cheng; JIAPIN, Chen. (2000). "Design of Central Pattern Generator for Humanoid Robot Walking Based on Multi-Objective GA". In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1930 – 1935.
- SILVA, M. F.; MACHADO, J. A. Tenreiro; LOPES, A. M.. (2002). "Quasi-Periodic Gaits in Multi-Legged Robots". In: *Proceedings CLAWAR'2002 – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 733 – 740.
- SONG, Shin-Min; WALDRON, Kenneth J.. (1989). *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*. The MIT Press.
- SPENNEBERG, Dirk; MCCULLOUGH, Kevin; KIRCHNER, Frank. (2004). "Stability of Walking in a Multilegged Robot Suffering Leg Loss". In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2159 – 2164.
- TAGA, Gentaro. (1995a). "A Model of the Neuro-Musculo-Skeletal System for Human Locomotion: I. Emergence of Basic Gait". *Biological Cybernetics*. Vol. 73; pp. 97 – 111.

TAGA, Gentaro. (1995b). "A Model of the Neuro-Musculo-Skeletal System for Human Locomotion: II. Real-Time Adaptability Under Various Constraints". *Biological Cybernetics*. Vol. 73; pp. 113 – 121.

TSUKAGOSHI, Hideyuki; HIROSE, Shigeo; YONEDA, Kan. (1997). "Maneuvering Operations of a Quadruped Walking Robot on a Slope". *Advanced Robotics*. Vol. 11; No. 4; pp. 359 – 375.

WEINGARTEN, Joel D.; LOPES, Gabriel A. D.; BUEHLER, Martin; GROFF, Richard E.; KODITSCHKEK, Daniel E.. (2004). "Automated Gait Adaptation for Legged Robots". In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2153 – 2158.

WETTERGREEN, David. (1995). *Robotic Walking in Natural Terrain – Gait Planning and Behavior-Based Control for Statically-Stable Walking Robots*. PhD. Thesis. The Robotics Institute – Carnegie Mellon University.

XIULI, Zhang; HAOJUN, Zheng; GUANGHONG, Duan; JINSONG, Wang. (2003). "CPG-Based Bio-Gait Research of the Quadrupedal Robot". In: *Proceedings of the ICAR 2003 – 11th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 1009 – 1013.

YAGI, M.; LUMELSKY, V.. (1999). "Biped Robot Locomotion in Scenes With Unknown Obstacles". In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 375 – 380.

YANG, Jung-Min. (2003). "Fault-Tolerant Gait Generation for Locked Joint Failures". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*; pp. 2237 – 2242.

YANG, Jung-Min; KIM, Jong-Hwan. (1998). "A Strategy of Optimal Fault Tolerant Gait for the Hexapod Robot in Crab Walking". In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1695 – 1700.

YONEDA, Kan; SUZUKI, Kenji; KANAYAMA, Yutaka; TAKAHASHI, Hidetoshi; AKIZONO, Junichi. (1997). "Gait and Foot Trajectory Planning for Versatile Motions of a Six-Legged Robot". *Journal of Robotic Systems*. Vol. 14; No. 2; pp. 121 – 133.

ZHIFENG, Cheng; XIULI, Zhang; HAOJUN, Zheng; LIYAO, Zhao. (2003). "The CPG-based Bionic Quadruped System". In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*; pp. 1828 – 1833.

ZIELINSKA, Teresa. (1996). "Coupled Oscillators Utilized as Gait Rhythm Generators of a Two-Legged Walking Machine". *Biological Cybernetics*. Vol. 74; pp. 263 – 273.

HTTP#1. "Animal Locomotion". <http://bowlingsite.mcf.com/Movement/locoindex.html>

HTTP#2. “Gaits in Terrestrial Locomotion”.

<http://www.biology.leeds.ac.uk/teaching/3rdyear/Blgy3120/Jmvr/Loco/Gaits/GAITS.htm>

Capítulo 7

Conclusões, Discussão dos Resultados e Perspectivas de Desenvolvimento Futuro

Os sistemas artificiais de locomoção são estruturas mecânicas com uma ou mais pernas que, por sua vez, são constituídas por diversos elos interligados por eixos lineares ou rotacionais. Estes sistemas mecânicos pretendem imitar os sistemas biológicos, apresentando vantagens face aos veículos que utilizam rodas ou lagartas pois não necessitam de uma superfície de suporte contínua, sendo, por isso, capazes de se adaptar facilmente a terrenos muito irregulares. Todavia, estas máquinas exibem fenómenos cinemáticos e dinâmicos de natureza complexa, pelo que os requisitos para a coordenação e controlo das suas pernas impõem dificuldades para além das encontradas nos robôs com rodas.

O trabalho realizado “Sistemas Robóticos de Locomoção Multipernas” insere-se nas correntes actualmente apontadas para o desenvolvimento deste tipo de sistemas. Assim, uma vertente estudada neste trabalho foi a análise de esquemas baseados nos exemplos biológicos. Uma outra vertente consistiu na elaboração de modelos conducentes a uma caracterização quantitativa dos fenómenos envolvidos. A consideração destes tópicos clarificou alguns dos aspectos mencionados e, desta forma, ampliou o conhecimento científico no campo dos sistemas robóticos de locomoção.

Tendo presentes estes factos, este capítulo encontra-se organizado da seguinte forma. A secção um apresenta as principais conclusões sobre os resultados obtidos no decurso do

trabalho efectuado. A secção dois descreve as principais contribuições desta Tese para a área. Por último, a secção três refere algumas perspectivas para investigação futura.

7.1 Principais Conclusões e Discussão dos Resultados

Nesta Tese começa-se por apresentar, no Capítulo 2, uma perspectiva histórica do desenvolvimento de robôs com locomoção por pernas. Abordaram-se os aspectos principais que estão envolvidos neste campo de trabalho e foram referidos alguns dos exemplos mais significativos dos sistemas que têm vindo a ser desenvolvidos. Esta informação é complementada, no início de cada capítulo subsequente, com a apresentação do estado da arte nos assuntos aí abordados. Apesar de não se ter efectuado um levantamento exaustivo, pensa-se ter referido as principais abordagens aos assuntos tratados.

No capítulo 3 apresentou-se um modelo de simulação 2½D para sistemas de locomoção multipernas com corpo segmentado. Este inclui o planeamento das trajectórias dos pés, para vários padrões de locomoção periódicos e quase-periódicos, a cinemática e a dinâmica, dispondo cada perna de dois ou três gdl. Para além disto, as interacções entre o pé do robô e o solo são também consideradas. Mais ainda, os modelos dos actuadores e das transmissões das juntas das pernas podem incluir fenómenos dinâmicos, tais como saturação não linear, atrito viscoso, folga e flexibilidade.

Esta ferramenta serviu de base para o estudo da configuração do sistema e do tipo de movimentos que levam a uma melhor implementação mecânica, bem como para o teste das arquitecturas e dos algoritmos de controlo ao nível das juntas das pernas.

Para analisar o desempenho cinemático do sistema de locomoção multipernas foram formuladas duas medidas quantitativas, nomeadamente a análise face a perturbações e a medida da locomobilidade. A análise face a perturbações tende a ser um método elegante, se bem que exigente do ponto de vista computacional. As suas características aleatórias parecem ser particularmente adequadas para avaliar o papel das diferentes variáveis no processos de locomoção. Por outro lado, a medida da locomobilidade captura a amplificação geométrica entre as juntas das pernas e as trajectórias dos pés ou do corpo.

No que concerne à análise do desempenho dinâmico do sistema foram definidos cinco índices quantitativos baseados na dinâmica do sistema robô-solo (a densidade de energia

absoluta média, a densidade de dispersão da potência média, a densidade de potência perdida, a força média na interface entre o corpo e as pernas e o pico de binário no robô solicitado pelo controlador) e um índice baseado nos erros de seguimento da trajectória da anca do robô (os erros quadráticos médios entre as trajectórias planeadas e reais).

No capítulo 4 foram comparados vários aspectos cinemáticos e dinâmicos de sistemas artificiais de locomoção multipernas exibindo padrões de locomoção periódicos. Através da simulação de diferentes condições de movimento, estimou-se a forma como o robô responde a diversas variáveis e parâmetros, como sejam o padrão de locomoção, o factor de ocupação, a altura do corpo do robô ao solo, o comprimento do passo, a máxima altura a que o robô levanta o pé do solo, os comprimentos relativos dos elos das pernas do robô, o desvio horizontal entre a anca e o pé do robô quando este se encontra na sua posição mais elevada, a velocidade de locomoção, o número de pernas e as massas do corpo, das pernas e dos pés do robô.

Várias experiências de simulação, efectuadas para diferentes condições de deslocamento, revelaram a configuração do sistema e os tipos de movimentos que levam a uma melhor implementação mecânica do ponto de vista dos índices propostos.

Comparando os resultados, verificou-se que os obtidos através dos índices cinemáticos estão, na generalidade, de acordo com aqueles que foram obtidos através dos índices dinâmicos. Desta forma, estabeleceu-se um compromisso para otimizar os diferentes padrões de locomoção periódicos estudados, quando o robô apresenta a estrutura das pernas tipo mamífero. Estes resultados permanecem inalterados caso se considere a situação de a perna apresentar uma estrutura com o joelho para trás, pelo que as experiências efectuadas não foram conclusivas no que concerne à melhor posição do joelho relativamente à anca.

Além disso, verifica-se que os resultados de diversas experiências de simulação, efectuadas com o recurso ao modelo do sistema artificial de locomoção, estão de acordo com resultados experimentais obtidos a partir do estudo da locomoção dos seres biológicos.

O controlo das juntas de sistemas artificiais de locomoção multipernas foi abordado no capítulo 5. Aqui, efectuou-se a análise do desempenho das diferentes arquitecturas e respectivos algoritmos de controlo.

Esta abordagem começou pela comparação do desempenho de algoritmos de controlo PD, com realimentação de posição ou posição e força, em robôs hexápodes, para diversos valores dos parâmetros de locomoção. Mais ainda, avaliou-se a forma como as diferentes arquitecturas de controlo respondem a actuadores com saturação e diferentes características do solo.

As experiências efectuadas mostraram que a arquitectura de controlo PD-P&F (controlador em cascata) é superior ao esquema de controlo clássico PD-P, do ponto de vista dos índices de desempenho propostos. Além disso, mostram também que o controlador em cascata, com a realimentação da força pé-solo e uma redução dos ganhos proporcionais na malha directa de força durante a fase de suporte, é superior do ponto de vista dos índices propostos.

Posteriormente verificou-se também, para ambas as estratégias de transposição de obstáculos, que o esquema PD-P&F apresenta uma robustez consideravelmente superior à do esquema PD-P, aquando do controlo de um hexápode a transpor obstáculos de diferentes dimensões. Em particular, a arquitectura de controlo PD-P demonstra sérias dificuldades para controlar a locomoção do robô com o padrão quase-periódico PSO. No entanto, ambas as arquitecturas de controlo apresentam deficiências que impedem ao robô manter a sua estabilidade para todos os valores das dimensões do obstáculo que este cinematicamente consegue ultrapassar.

O passo seguinte consistiu na comparação do desempenho de controladores de ordens inteira e fraccionária para o controlo das juntas das pernas de hexápodes que adoptam padrões de locomoção periódicos. Através da implementação de modelos dos actuadores e das transmissões das juntas das pernas incorporando fenómenos dinâmicos, tais como saturação não ideal, atrito viscoso, flexibilidade e folga, estimou-se a forma como os controladores do robô respondem a actuadores e transmissões não ideais e à degradação das características dos actuadores e transmissões.

As experiências mostram que a implementação do controlador PD^α ($-2,0 < \alpha < 1,0$) de ordem fraccionária é superior ao algoritmo de ordem inteira PD^1 , do ponto de vista da robustez, quando os modelos incorporam condições de operação reais e fenómenos dinâmicos nos actuadores e transmissões das juntas.

O estudo das arquitecturas de controlo foi concluído com a comparação do desempenho de diferentes algoritmos OF aplicados ao controlo das juntas das pernas de sistemas artificiais de locomoção hexápodes, com três gdl por pernas, considerando os casos da junta do tornozelo ser actuada de forma passiva (através de uma combinação linear mola-amortecedor em paralelo), ou de forma activa (através de um motor). Para efeitos de comparação de desempenho foi também considerada a resposta da perna a uma perturbação em degrau na trajectória do pé. As experiências mostraram que o algoritmo de controlo OF para a situação de $\alpha_j \approx 0,5$, com um robô hexápode possuindo todas as juntas actuadas através de motores, apresenta o melhor desempenho.

No capítulo 4 centrou-se a atenção na locomoção recorrendo a padrões de locomoção periódicos e considerando unicamente os aspectos de planeamento de trajectórias. Por estes motivos, certos aspectos da locomoção não foram necessariamente capturados pelos índices utilizados.

Assim, no Capítulo 6 foram apresentados resultados de experiências efectuadas com diferentes padrões de locomoção frequentemente adoptados pelos animais, considerando os efeitos da interacção entre os pés do robô e o solo e a introdução de controlo do movimento do sistema mecânico. As forças de contacto e de reacção nos pés do robô permitiram obter indicações adicionais sobre o comportamento de sistemas artificiais de locomoção quadrúpedes e hexápodes.

Numa primeira fase, analisou-se a forma como o robô responde aos parâmetros factor de ocupação, comprimento do passo e altura do corpo ao solo e à velocidade de deslocamento. As experiências realizadas mostraram que os parâmetros de locomoção devem ser adaptados à velocidade de deslocamento do robô de forma a otimizar o desempenho do sistema. Mais ainda, no caso do robô quadrúpede, concluiu-se que o padrão de locomoção deve ser adaptado a V_F . Contudo, as experiências não foram conclusivas quanto ao padrão de locomoção mais adequado a cada velocidade.

Verificou-se também que alguns dos resultados obtidos a partir dos modelos não retratam de forma fiel todas as observações efectuadas nos estudos biológicos dos animais (o mesmo se passando com os resultados de algumas das experiências apresentadas no Capítulo 4). As diferenças encontradas, entre os desempenhos dos seres vivos e das simulações com o

modelo, podem dever-se a um grande número de factores. Desde logo, o mais provável é o modelo que se utilizou não entrar em linha de conta com todos os aspectos presentes na locomoção dos seres biológicos. Entre os aspectos não considerados no modelo podem referir-se o facto dos actuadores das juntas serem diferentes dos existentes nos seres vivos (que são de acção linear, resultantes da combinação de músculos e tendões, e com a capacidade de armazenar energia potencial e transformá-la em energia cinética), o centro de massa não se encontrar no centro geométrico do corpo do animal (mas sim, frequentemente, deslocado para a frente do centro geométrico) e as diferentes funções das pernas, que nos animais são claramente diferenciadas.

Ainda no Capítulo 6 foram introduzidas melhorias no modelo, de forma a permitir incorporar nas simulações terrenos mais irregulares. Para esses terrenos foram apresentados novos conceitos para o planeamento de trajectórias e novas estratégias de ultrapassagem de obstáculos, sendo também efectuada a correspondente análise do desempenho. Através da consideração de obstáculos com diferentes dimensões, tais como a sua altura e comprimento, e do seu posicionamento em localizações distintas ao longo do ciclo de locomoção do robô, determinou-se a forma como o robô adapta o comprimento do passo e a máxima altura do pé ao solo para negociar cada obstáculo com cada uma das estratégias possíveis. Da análise das diversas experiências efectuadas obteve-se o conhecimento de qual a melhor estratégia para transpor obstáculos de acordo com a sua posição e dimensões.

Este capítulo termina com o estudo da dinâmica da interacção pé-solo em sistemas de locomoção multipernas. O objectivo foi identificar a dinâmica do sistema artificial de locomoção e verificar se esta apresentava características fraccionárias. Os resultados das simulações efectuadas para diferentes valores do factor de ocupação, dos parâmetros que caracterizam o modelo do solo e da velocidade de locomoção, permitiram concluir que, na gama de valores dos parâmetros em estudo onde a locomoção do robô se mantém de forma estável, a ordem das funções de transferência é inteira e praticamente invariante. A excepção ocorre para valores reduzidos da velocidade de locomoção do robô V_F , situação em que as FTs obtidas com o modelo cinemático do solo apresentam uma ordem fraccionária às baixas frequências. Contudo, este valor é inteiro quando se simula o comportamento do solo com o modelo dinâmico.

7.2 Contribuições deste Trabalho

O cumprimento dos objectivos propostos no início dos trabalhos de Doutoramento levou ao desenvolvimento de vários aspectos relacionados com a análise de desempenho, com o controlo e com os padrões de locomoção de sistemas artificiais de locomoção multipernas. Como principais contribuições do trabalho para esta área científica são de realçar as seguintes:

- progresso na compreensão dos fenómenos envolvidos na locomoção dos robôs com pernas, nomeadamente na influência dos parâmetros da estrutura mecânica e da arquitectura de controlo;
- desenvolvimento de um modelo 2½D do robô multipernas com corpo segmentado (dispondo de complacência passiva entre cada segmento) considerando a interacção pé-solo. A complacência entre cada segmento foi implementada recorrendo a um conjunto de sistemas lineares mola-amortecedor em paralelo. Para efeitos de modelação do contacto do pé do robô com o solo, utilizou-se um modelo baseado em sistemas mola-amortecedor em paralelo, onde a componente da força de reacção do solo devida ao atrito é não linear. Os parâmetros adoptados para este modelo, são determinados tendo por base estudos de mecânica dos solos;
- formulação de diversos índices quantitativos, baseados na cinemática, na dinâmica do sistema robô-ambiente e nos erros de seguimento das trajectórias das ancas e dos pés do robô, para a análise do desempenho das estruturas mecânicas de locomoção e das suas arquitecturas de controlo;
- estudo detalhado da forma como os parâmetros da estrutura mecânica dos robôs com pernas e os seus parâmetros de locomoção influenciam o desempenho do sistema artificial de locomoção;
- desenvolvimento de arquitecturas de controlo simples e intuitivas, focadas nos problemas identificados na locomoção de sistemas artificiais, dedicadas ao controlo das juntas das pernas de sistemas robóticos multipernas, considerando actuadores com saturação e transmissões com atrito viscoso, flexibilidade e folgas. Utilização nestas arquitecturas de algoritmos de controlo de ordem não inteira (PD^α) e comparação do seu desempenho com algoritmos PD clássicos;

- estudo dos padrões de locomoção quadrúpedes e hexápodes, frequentemente adoptados pelos animais, e adaptação dos seus parâmetros às diferentes condições de locomoção com que se deparam os robôs com pernas;
- desenvolvimento de padrões de locomoção quase-periódicos, para transposição de obstáculos. Implementação de uma estratégia para a selecção destes padrões de locomoção, em função das características dos obstáculos a vencer.

Os resultados alcançados representam uma evolução do conhecimento existente e abrem diversas perspectivas de continuação e melhoria conforme referido na secção seguinte.

7.3 Perspectivas de Desenvolvimento Futuro

No que concerne às linhas principais para trabalho futuro que decorrem da investigação efectuada, estas enquadram-se no que se prevê vir a ser alvo de maior interesse no futuro próximo. Assim, o primeiro aspecto a considerar consiste no modelo desenvolvido do sistema artificial de locomoção multipernas. Apesar deste modelo implementar as principais características envolvidas na locomoção de sistemas artificiais multipernas, existem pontos a melhorar. Entre os aspectos que se prevê modificar, incluem-se os seguintes:

- a) implementar uma versão melhorada do modelo de interacção do pé com o solo, que considere a hipótese da força de reacção do solo, segundo a direcção horizontal, apresentar um valor máximo, a partir do qual permanece constante;
- b) incluir nas pernas ou nos pés do robô mecanismos que permitam o armazenamento de energia durante o impacto do pé com o solo e a sua restituição no início da fase de transferência;
- c) modificar a forma de actuação das juntas das pernas possibilitando que estas passem a ser actuadas através de conjuntos de dois actuadores lineares por junta, com efeitos agonista-antagonista;
- d) permitir que o corpo do sistema artificial de locomoção apresente um ângulo do corpo, face à horizontal, diferente de 0° ;
- e) incorporar outras características dos actuadores dos robôs e das transmissões das juntas nos modelos implementados;

-
- f) incluir a terceira dimensão no modelo desenvolvido.

A implementação destas melhorias no modelo do sistema artificial de locomoção permitirá explorar outros aspectos que não foram abordados no presente trabalho. Como matérias cujo estudo e investigação merecem um aprofundamento adicional, em termos da determinação da configuração óptima da estrutura para o sistema robótico, encontram-se as seguintes:

- g) avaliar o desempenho dos robôs no caso das trajectórias planeadas das ancas não serem horizontais e efectuadas a velocidade constante, como considerado neste trabalho, mas exibirem uma certa oscilação;
- h) analisar o desempenho dos sistemas artificiais de locomoção no caso dos pares de pernas (da frente, do meio e de trás) do hexápode possuírem diferentes características dimensionais e funções, tal como se verifica nos animais (em particular, nos insectos);
- i) estudar o desempenho dos robôs no caso das trajectórias das juntas serem determinadas por geradores centrais de padrões;
- j) avaliar o desempenho dos robôs no caso do sistema de accionamento das pernas dispor de mecanismos que permitam o armazenamento de energia durante o impacto do pé com o solo e a sua restituição pouco antes de a perna iniciar a fase de transferência;
- k) analisar o desempenho dos sistemas artificiais de locomoção no caso dos actuadores das juntas apresentarem comportamentos similares aos dos músculos artificiais ou aos dos músculos naturais.

Encontram-se também previstos estudos adicionais de forma a projectar arquitecturas de controlo superiores que incluam algoritmos mais sofisticados. Como ideias para trabalho futuro, deixam-se aqui os seguintes pontos:

- l) analisar o comportamento e o desempenho da locomoção do robô no caso deste possuir três gdl por perna e de se adoptar um controlo com redução dos ganhos da malha directa sempre que a ponta do pé entre, e permaneça, em contacto com o solo;
- m) verificar o desempenho do sistema, no caso de se adoptar uma arquitectura de controlo com redução do ganho da malha directa, considerando um algoritmo de controlo OF para os blocos de controlo $G_{c1}(s)$ e $G_{c2}(s)$;

- n) verificar o comportamento das arquitecturas de controlo PD-P e PD-P&F, quando a locomoção é efectuada com os padrões quase-periódicos, na situação em que o controlador $G_{c1}(s)$ é fraccionário;
- o) estudar e desenvolver novas arquitecturas mais adequadas para o controlo das juntas das pernas de robôs multipernas durante a locomoção em terrenos irregulares.

Em termos da análise da locomoção e dos padrões de locomoção, o trabalho futuro nesta área será dirigido ao refinamento dos modelos, de acordo com as seguintes ideias:

- p) aprofundar o estudo da adequação dos diferentes padrões de locomoção quadrúpedes à velocidade de locomoção V_F , nomeadamente através da sintonia dos controladores para cada padrão de locomoção e para cada velocidade particular;
- q) estudar a influência dos parâmetros da complacência interna do modelo do corpo do robô, nomeadamente os coeficientes de elasticidade e de atrito viscoso, sobre o desempenho da locomoção com padrões periódicos e quase-periódicos;
- r) desenvolver ou adaptar critérios de estabilidade estática e dinâmica que permitam determinar se os dois padrões de locomoção quase-periódicos que o robô hexápode utiliza para ultrapassar obstáculos são estáveis;
- s) implementar modelos do solo que contenham características mais realistas (por exemplo, considerando que existem locais onde não é admissível ao robô colocar os pés) e para os quais sejam necessários conceitos de planeamento de trajectórias e estratégias de transposição de obstáculos distintos.

Por último, o desenvolvimento de um protótipo de um sistema robótico de locomoção multipernas afigura-se como outra ideia a concretizar. Este objectivo prende-se com a verificação na prática de alguns dos ensinamentos obtidos com a realização deste trabalho de Doutoramento.

A título de conclusão final fica a ideia de se terem atingido os objectivos propostos. Foram encontradas algumas respostas para dúvidas e problemas que se encontravam inicialmente em aberto e abriram-se novos caminhos de investigação e desenvolvimento nesta área científica.

Padrões de Locomoção Bípedes, Quadrúpedes e Hexápodes

Os padrões de locomoção descrevem sequências descontínuas de movimentos das pernas, alternando entre fases de transferência e suporte. No modelo de simulação implementado consideram-se diversos padrões de locomoção frequentemente observados nos animais quadrúpedes e hexápodes quando estes se deslocam a diferentes velocidades. Para além destes consideram-se também diversos padrões de locomoção não observados nos animais e que, por este motivo podemos designar por artificiais. Estes diversos padrões de locomoção são objecto de descrição neste anexo.

A.1 Padrões de Locomoção de Animais Bípedes e Quadrúpedes

De acordo com os estudos da biologia, os animais adoptam o padrão de locomoção que requer um menor consumo energético a cada velocidade de locomoção (Alexander, 1984). Assim, independentemente do seu número de pernas, os animais apresentam uma diversidade de padrões de locomoção.

Em geral, os padrões de locomoção costumam ser divididos entre padrões de locomoção de andar e de correr. A principal diferença entre estes dois conjuntos reside no facto de nos padrões de locomoção de andar cada pé permanecer no solo durante mais de metade do período de locomoção, enquanto que no correr cada pé permanece no solo durante menos de metade deste período.

Tabela A.1: Transição entre padrões de locomoção de animais bípedes e quadrúpedes (Alexander, 1984).

Número de Pernas	Animal	Padrão de Locomoção a Baixa Velocidade	Número de Froude a que Ocorre a Transição	Padrão de Locomoção a Alta Velocidade
Bípedes	Pássaro	Andar	$\approx 0,5$	Saltar
	Humano	Andar	$\approx 0,5$	Correr
	Canguru	<i>Shuffle</i> ¹	$\approx 0,5$	Saltar
Quadrúpedes	Cão	Trote	$\approx 2,5$	Galope
	Chita	Trote	$\approx 2,5$	Galope
	Cavalo	Trote	$\approx 2,5$	Galope

No caso dos animais bípedes, e a título de exemplo, isto leva a que durante o andar existam instantes em que se encontram os dois pés no solo (sendo esta fase denominada de fase de duplo suporte) enquanto que durante o correr, pelo contrário, existem instantes de tempo em que nenhum dos pés se encontra em contacto com o solo dizendo-se, neste caso, que o animal se encontra na fase de voo.

Convém também referir que nos padrões de locomoção de corrida os animais se encontram numa situação de locomoção em que não possuem estabilidade estática. Como exemplo, e para os animais quadrúpedes, veja-se que no caso do Trote os animais que o adoptam apresentam alternadamente duas ou nenhuma perna no solo, e para o Galope nunca há mais do que duas pernas no solo simultaneamente. Assim, durante os padrões de locomoção de corrida os animais mantêm a estabilidade dinâmica.

Por último, é interessante notar que para animais com o mesmo número de pernas, e independentemente do animal em questão, a transição de padrão de locomoção com a velocidade ocorre para valores semelhantes do número de Froude (ver Tabela A.1). Esta é uma medida adimensional, cuja definição é:

¹ Padrão de locomoção caracterizado pelo arrastar dos pés pelo solo.

$$\text{Número de Froude} = \frac{V_F^2}{gL_{it}} \quad (\text{A.1})$$

sendo V_F a velocidade de locomoção do animal em questão, g a aceleração da gravidade e L_{it} o comprimento das pernas do animal em questão.

De seguida vamos passar a ver os principais padrões de locomoção adoptados pelos animais bípedes, quadrúpedes e hexápodes quando se deslocam a velocidades reduzidas, médias ou elevadas e as principais características que definem cada um dos padrões de locomoção considerados.

A.1.1 Padrões de Locomoção de Andar: Pouco ou Nenhum Armazenamento de Energia Elástica

Quando se deslocam a velocidades reduzidas os mamíferos quadrúpedes andam, movendo os seus pés de uma forma que torna a locomoção o mais estável possível (ver Tabela A.2). Com este padrão de locomoção garante-se que cada pé permanece no solo durante um intervalo de tempo superior a meio período de locomoção.

Uma vez que a estabilidade é mais importante para os animais com pernas curtas e que se deslocam devagar (como por exemplo as tartarugas) do que para os animais que possuem pernas compridas e se deslocam a velocidades mais elevadas (como por exemplo os cavalos), estes animais deslocam-se recorrendo a padrões de locomoção próprios. No caso particular das tartarugas, estas adoptam um único padrão de locomoção, denominado Passo de Quelónio², no qual cada pé permanece no solo durante um intervalo de tempo superior a 75% do período de locomoção.

A.1.2 Padrões de Locomoção de Corrida Simétricos: Armazenamento de Energia Elástica nas Pernas

Na gama de velocidades médias a maioria dos animais quadrúpedes trotam, movendo os pés diagonalmente opostos em conjunto (ver Tabela A.3). O Trote é um padrão de locomoção de

² Tradução do termo anglo-saxónico *Chelonian Walk*.

corrida, uma vez que cada pé permanece no solo durante menos de metade do período de locomoção.

Apesar de a maioria dos mamíferos quadrúpedes trotarem a velocidades moderadas, alguns deles, por exemplo os camelos, andam a passo. O Passo é também um padrão de locomoção de corrida no qual os dois pés do mesmo lado do corpo se movem em conjunto.

Tabela A.2: Padrões de locomoção dos quadrúpedes a baixa velocidade (Alexander, 1984; HTTP#1).

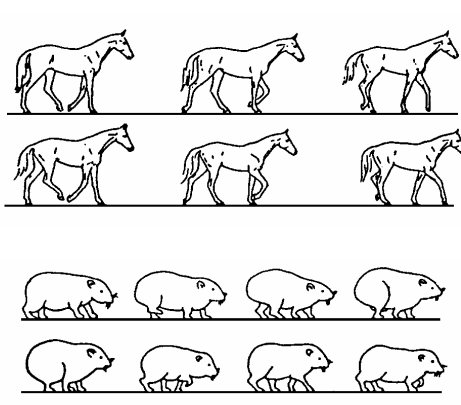
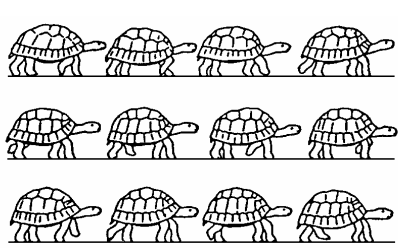
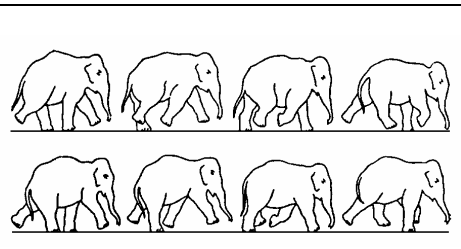

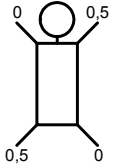
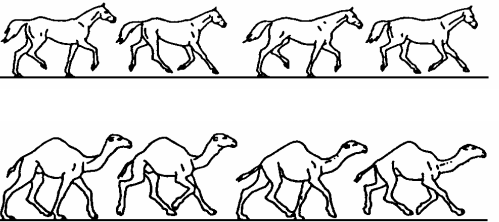
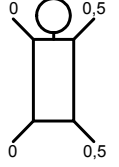
	Diagrama de Fase Factor de ocupação β	Bípede ou quadrúpede	Número por ciclo		
			Pernas	Suspensões	Batidas
Andar		b & q	3, 4	0	4
Passo de Quelónio (similar nos outros pequenos tetrápodes)		q	2-4	0	2
Furta-Passo		b & q	1-3	0	4

Tabela A.3: Padrões de locomoção dos quadrúpedes a média velocidade (Alexander, 1984; HTTP#1).

	Diagrama de Fase Factor de ocupação β	Bípede ou quadrúpede	Número por ciclo		
			Pernas	Suspensões	Batidas
Trote  Maioria dos mamíferos, mas raro nos roedores, mustelídeos, alguns ungulados, etc. $\beta = 0,3-0,45$	 $\beta = 0,3-0,45$	q	0, 2	2	2
Passo ou Trote duro  Camelos e cães de pernas compridas; genético ou treinado nos cavalos $\beta = 0,3-0,45$	 $\beta = 0,3-0,45$	q	0, 2	2	2

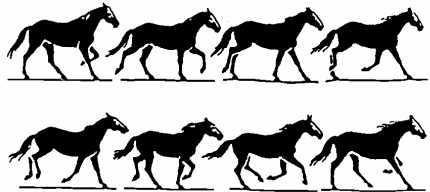

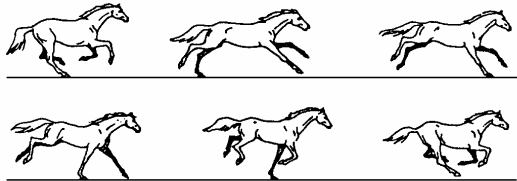
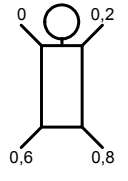
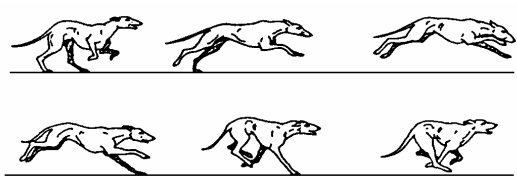
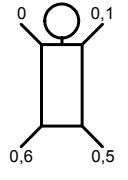

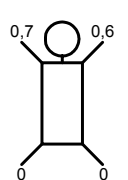
Uma possível razão para os mamíferos quadrúpedes preferirem este padrão de locomoção resulta do facto de terem pernas mais compridas. Pode assim ser difícil para alguns deles evitarem as colisões entre as pernas de trás e as da frente, do mesmo lado do corpo, se trotarem.

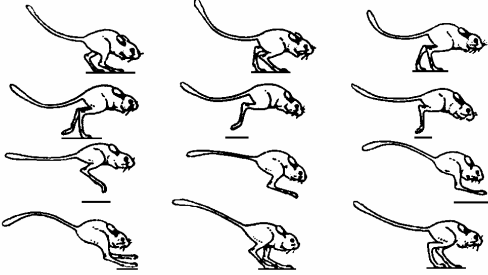
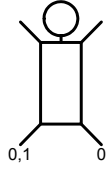

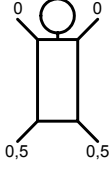
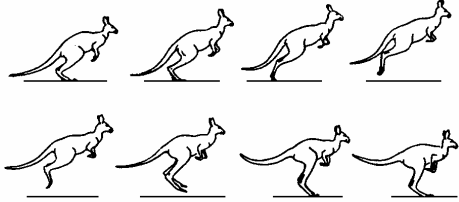
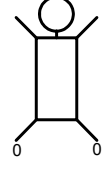
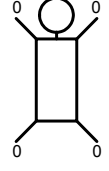
A.1.3 Padrões de Locomoção de Corrida Assimétricos: Armazenamento de Energia Elástica Frequente no Dorso e nas Pernas

Às velocidades mais elevadas os mamíferos quadrúpedes recorrem a padrões de locomoção de corrida assimétricos (ver Tabela A.4).

A maioria dos animais que adoptam estes padrões de locomoção optimiza a eficiência energética em detrimento da suavidade do movimento (Alexander, 1984). Para esse efeito, recorrem ao armazenamento de energia elástica no seu dorso e nas suas pernas.

Tabela A.4: Padrões de locomoção dos quadrúpedes a elevada velocidade (Alexander, 1984; HTTP#1).

		Diagrama de Fase Factor de ocupação β	Bípede ou quadrúpede	Número por ciclo		
				Pernas	Suspensões	Batidas
Galope leve ou Galope brando apresentado com a perna da esquerda a conduzir		 $\beta = 0,3-0,45$	q	0-3	1	3
Galope Transversal (por exemplo, nos cavalos) apresentado com a perna da esquerda a conduzir		 $\beta < 0,4$	q	0-2	1	4
Galope Rotativo (por exemplo, nos cães) apresentado com a perna da esquerda a conduzir		 $\beta < 0,4$	q	0-2	2	4
Meio-salto quadrúpedes (por exemplo, mustelídeos, roedores, lagomorfos)			q	0-3	1	3

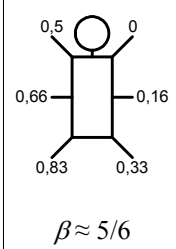
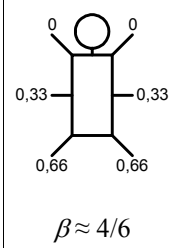
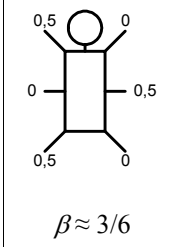
bípedes (por exemplo, roedores e alguns pássaros)		 $\beta = 0,1-0,3$	b	0-2	1	2
Salto quadrúpedes (por exemplo, roedores)		 $\beta = 0,1-0,3$	q	0, 2	1	2
bípedes (ou Pulo) (por exemplo, macrópodes, roedores, pássaros)		 $\beta \approx 0,2$	b	0, 2	1	1
Pronk		 $\beta \approx 0,2$	q	0, 4	1	1

A.2 Padrões de Locomoção de Animais Hexápodes

No caso dos animais hexápodes, estes costumam adoptar o padrão de locomoção Ondulatório, variando o factor de ocupação em função da velocidade pretendida (Tabela A.5). Assim a baixas velocidades o factor de ocupação aproxima-se do valor $\beta \approx 5/6$, sendo este padrão denominado Onda Metacronal³. Para velocidades médias, o factor de ocupação diminui para o valor $\beta \approx 4/6$, sendo este padrão denominado de Tetrápode. Finalmente, a velocidades elevadas o factor de ocupação desce para o valor $\beta \approx 3/6$ e o padrão de locomoção denomina-se de Trípede (Collins e Stewart, 1993; Dutra e Mello, 2001).

³ Tradução do termo anglo-saxónico *Metachronal Wave Gait*.

Tabela A.5: Padrões de locomoção dos hexápodes a diferentes velocidades (Collins e Stewart, 1993; Dutra e Mello, 2001).

	Diagrama de Fase Factor de ocupação β	Hexápode	Número por ciclo		
			Pernas	Suspensões	Batidas
Onda Metacronal	 $\beta \approx 5/6$	h	5	0	6
Tetrápode	 $\beta \approx 4/6$	h	4	0	3
Trípode	 $\beta \approx 3/6$	h	3	0	2

A.3 Padrões de Locomoção Artificiais

Na secção anterior descreveram-se vários padrões de locomoção frequentemente adoptados pelos animais quadrúpedes e hexápodes quando se deslocam a diferentes velocidades e que foram implementados no modelo de simulação. No entanto, os robôs com pernas podem também recorrer a outros padrões de locomoção não observados nos sistemas biológicos.

No seu trabalho, Song e Waldron (1989) apresentam um estudo detalhado de vários padrões utilizados para a locomoção em terrenos regulares e planos, em terrenos inclinados e para ultrapassar três tipos de obstáculos de grandes dimensões (valas horizontais, degraus verticais e muros isolados), bem como as relações entre a mobilidade dos veículos, em termos da estabilidade dos padrões de locomoção, e os volumes de trabalho das pernas.

De entre diversos padrões estudados por estes autores, no modelo de simulação consideram-se os padrões de locomoção PLO, PLFIMC, PLFICC, PLOI, PLFIMCI e PLFICCI.

No descrição que se segue, considera-se que para o índice de qualquer das n pernas (n par), deverá subentender-se a numeração 1, 3, 5, ..., $n - 1$ (*i.e.*, pernas ímpares) do lado esquerdo, e 2, 4, 6, ..., n (*i.e.*, pernas pares) do lado direito, sendo a numeração das pernas da frente para as de trás.

O primeiro padrão de locomoção estudado por estes autores é o PLO. Este padrão de locomoção apresenta como principal característica o facto de permitir maximizar a margem de estabilidade do sistema que o adopta. A sua descrição matemática é a seguinte:

$$\phi_{2m+1} = f(m\beta), \quad m = 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 1 \quad \text{e} \quad 1 > \beta \geq \frac{3}{n} \quad (\text{A.2})$$

sendo $f(x)$ a parte fraccionária do número real x e m as pernas sucessivas após a perna 1 do lado esquerdo do robô, numeradas da frente para trás.

Um outro conjunto de padrões de locomoção estudados por estes autores é o dos padrões de locomoção de fase igual. Estes padrões de locomoção permitem distribuir equitativamente os acontecimentos de colocação e levantamento dos pés de um dos lados do veículo ao longo de um meio ciclo ou de um ciclo completo de locomoção minimizando, desta forma, as flutuações no consumo energético.

Caso a distribuição dos acontecimentos seja efectuada ao longo de meio ciclo de locomoção, temos o padrão PLFIMC. Devido à simetria do padrão de locomoção, os acontecimentos de colocação dos pés do veículo do outro lado do robô estão distribuídos ao longo da outra metade do ciclo de locomoção. Logo, todos os acontecimentos de colocação dos pés se encontram distribuídos no ciclo completo. A descrição matemática deste padrão de locomoção é a seguinte:

$$\phi_{2m+1} = 1 - \frac{m}{n}, \quad m = 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 1 \quad (\text{A.3})$$

A distribuição dos acontecimentos de colocação dos pés do veículo de um dos lados do robô pode também efectuada ao longo de um ciclo completo de locomoção, caso em que temos o PLFICC. Neste caso, todos os acontecimentos de colocação dos pés se encontram igualmente distribuídos no ciclo completo se o número de pernas do veículo for par. A descrição matemática deste padrão de locomoção é a seguinte:

$$\phi_{2m+1} = 1 - \frac{2m}{n}, \quad m = 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 1 \quad \text{e} \quad n \text{ par} \quad (\text{A.4})$$

Os padrões que acabam de ser descritos denominam-se padrões de locomoção directos. Nestes padrões de locomoção, a sequência dos acontecimentos de colocação dos pés de cada lado do corpo do veículo inicia-se na perna traseira e avança em direcção à perna da frente. Alternativamente, a sequência dos acontecimentos de colocação dos pés de cada lado do corpo do veículo pode iniciar-se na perna da frente e avançar em direcção à perna de trás. Estes padrões de locomoção são denominados padrões de locomoção inversos.

Assim, para o caso do PLOI a sua descrição matemática é a seguinte:

$$\phi_{2m+1} = f(1 - m\beta), \quad m = 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 1 \quad \text{e} \quad 1 > \beta \geq \frac{3}{n} \quad (\text{A.5})$$

Por sua vez, o PLFIMCI apresenta a seguinte descrição matemática:

$$\phi_{2m+1} = \frac{m}{n}, \quad m = 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 1 \quad (\text{A.6})$$

Por último, o PLFICCI é descrito pela expressão:

$$\phi_{2m+1} = \frac{2m}{n}, \quad m = 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 1 \quad \text{e} \quad n \text{ par} \quad (\text{A.7})$$

Referências

ALEXANDER, R. McN.. (1984). “The Gaits of Bipedal and Quadrupedal Animals”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 3; No. 2; pp. 49 – 59.

COLLINS, J. J.; STEWART, Ian. (1993). “Hexapodal Gaits and Coupled Nonlinear Oscillator Models”. *Biological Cybernetics*. Vol. 68; pp. 287 – 298.

DUTRA, Max Suell; MELLO, Vinícius da Costa. (2001). “Generation of Walking Patterns of an Hexapod Robot Through Scheduling Algorithms”. In: *Proceedings of COBEM 2001 – 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering– Robotics and Control*; pp. 45 – 54.

SONG, Shin-Min; WALDRON, Kenneth J.. (1989). *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*. The MIT Press.

HTTP#1. “Gaits in Terrestrial Locomotion”.

<http://www.biology.leeds.ac.uk/teaching/3rdyear/Blgy3120/Jmvr/Loco/Gaits/GAITS.htm>

Anexo B

Estratégias Para o Planeamento das Trajectórias de Sistemas Artificiais de Locomoção

Um dos problemas que se colocam na robótica de locomoção é a forma geométrica que devem ter as trajectórias dos pés do robô durante a locomoção e, em particular, durante a fase de transferência.

O movimento do pé que se encontra na fase de transferência é um dos factores dominantes no processo de planeamento da trajectória de um sistema artificial de locomoção. Através da especificação da trajectória espacial da extremidade da perna que se encontra na fase de transferência é possível gerar várias tarefas de locomoção, tais como subir escadas, andar num plano horizontal ou inclinado.

No que diz respeito ao movimento dos pés do robô durante esta fase, as trajectórias devem ser realizadas de forma a evitar colisões com o solo e com quaisquer obstáculos que se possam encontrar na vizinhança do robô. Este problema assume contornos mais severos quando o robô se encontra a andar com um padrão de locomoção periódico uma vez que, durante a locomoção em terrenos irregulares, em que pode ser necessário adoptar um padrão de locomoção não periódico, a trajectória de cada pé do robô pode ter que ser diferente das outras.

Uma alternativa à aproximação anterior, em que as trajectórias dos pés do robô são obtidas no espaço operacional, é a geração das trajectórias no espaço das juntas e, partindo destas trajectórias, determinar as correspondentes trajectórias dos pés e das ancas dos robôs.

Para resolver este problema têm sido propostas diferentes estratégias. As secções seguintes apresentam algumas soluções alternativas para a sua resolução. Tendo por base estes estudos, no Capítulo 3 é apresentada a solução adoptada, em simultâneo com a explicação detalhada do processo de planeamento da locomoção do robô multipernas.

B.1 Trajectórias de Referência Baseadas na Biologia

Quando o projecto do robô é uma mímica de um animal, uma solução frequentemente adoptada consiste na cópia das trajectórias dos pés do animal. Estes animais são frequentemente filmados recorrendo a técnicas especiais, enquanto se deslocam num tapete rolante, e o filme resultante é analisado para extrair as trajectórias dos seus pés, ou das juntas das pernas, de forma a implementar trajectórias similares nos robôs. Exemplos desta aproximação são os trabalhos de Nelson (1995), Bai, *et al.* (2000) e Boggess, *et al.* (2004) no estudo da barata, Villanova, *et al.* (2000) no estudo do ouriço-cacheiro e Laksanachoen, *et al.* (2000) no estudo do grilo.

Esta aproximação tem sido também adoptada na determinação das trajectórias planeadas para robôs bípedes, quer no espaço operacional (Hafi e Gorce, 1998; Dasgupta e Nakamura, 1999), quer no espaço das juntas (Ude, *et al.*, 2000; Gravez, *et al.*, 2002; Inada e Ishii, 2003), para o que se recorre à filmagem de humanos durante a locomoção. As trajectórias obtidas desta forma são depois replicadas no robô. No entanto, enquanto Ude, *et al.* (2000) adoptam conjuntos de *B-splines*, codificadas através de onduletas, Inada e Ishii (2003) usam um gerador central de padrões, cujos parâmetros são sintonizados através de um algoritmo genético, para representar de forma eficiente as trajectórias obtidas.

Apesar de na literatura as trajectórias da locomoção humana serem frequentemente utilizadas como trajectórias de referência para os controladores das juntas das pernas de robôs bípedes, Kawaji, *et al.* (1998) referem que estas não são necessariamente as mais adequadas para robôs bípedes, uma vez que as suas características de distribuição de massa e as características dos seus actuadores são muito diferentes das dos seres humanos. Também

Dasgupta e Nakamura (1999) abordam esta problemática, referindo que esta não é a melhor solução uma vez que existem inconsistências cinemáticas e dinâmicas entre o humano e os robôs bípedes. Seguindo este raciocínio, o mesmo se poderá afirmar em relação à utilização das trajectórias dos animais nas juntas das pernas dos robôs quadrúpedes e hexápodes.

Uma aproximação ligeiramente diferente foi adoptada por Pfeiffer, *et al.* (1995). O estudo do insecto-pau é a base para a implementação das trajectórias do robô hexápode TUM. No entanto, neste caso, as coordenadas das juntas do joelho e do tornozelo são uma função matemática do valor da coordenada da junta da anca da mesma perna. Desta forma, o controlador da perna monitoriza a evolução da coordenada da junta da anca, e as coordenadas das juntas do joelho e do tornozelo, são controladas em cascata através da avaliação do seu valor pretendido (na dependência do valor da coordenada da junta da anca). Foi demonstrado que as trajectórias resultantes são muito aproximadas às observadas nos insectos durante a sua locomoção.

B.2 Trajectórias de Referência Baseadas em Funções Matemáticas

Outra estratégia, frequentemente adoptada, considera que as trajectórias dos pés dos robôs, no espaço cartesiano, são funções matemáticas baseadas nas funções seno (Tu, *et al.*, 1998; Campos, *et al.*, 2001), seno hiperbólico (Albert e Gerth, 2001) ou combinações destas com a função coseno (Koyachi, *et al.*, 1991; Matsumoto, *et al.*, 1998; Conte, *et al.*, 2003).

Diferentes fórmulas matemáticas, tais como arcos de circunferência (Queiroz, *et al.*, 2000), ovais (Koyachi, *et al.*, 1997), elipses (Inoue, *et al.*, 2000; Campos, *et al.*, 2001; Ogino, *et al.*, 2003), funções cicloidais (Hafi e Gorce, 1998; Albert e Gerth, 2001), funções trapezoidais (Ihme e Deutscher, 2001) e funções parabólicas (Park e Kim, 1998; Park e Cho, 2000) têm também sido adoptadas.

Uma outra forma de descrever matematicamente as trajectórias dos pés dos robôs passa pela adopção de polinómios de diferentes graus (Ono, *et al.*, 1998; Albert e Gerth, 2001).

Como exemplo, Ephanov e Hurmuzlu (1997) propõem a utilização de um polinómio de segundo grau para a geração da trajectória do pé de um robô bípede. De acordo com estes autores, é escolhida a forma quadrática uma vez que é a forma mais simples que permite a

selecção do comprimento do passo e da máxima altura do pé ao solo de uma forma independente.

Já Huang, *et al.* (1999) propõem a geração da trajectória de referência para o pé de um robô bípede recorrendo a polinómios de terceira ordem. Inicialmente formulam as restrições da trajectória do pé no que diz respeito à sua posição inicial e final e à posição em que o pé se encontra na altura máxima relativamente ao solo e, partindo destas restrições, geram a trajectória do pé do robô recorrendo a uma interpolação por um polinómio de terceira ordem. Através da imposição dos valores dos parâmetros que definem as restrições do movimento do pé, é possível produzir diferentes tipos de trajectória, quer para terrenos lisos, quer para terrenos irregulares e mesmo para ultrapassar obstáculos. Estratégias similares a esta e também recorrendo a polinómios cúbicos, foram adoptadas por Kim, *et al.* (2000) e Zonfrilli, *et al.* (2002), neste último caso para um robô quadrúpede AIBO.

Relativamente às trajectórias acabadas de ver, nada é referido pelos respectivos autores sobre a sua adaptação à fase de colocação do pé no solo, nomeadamente para reduzir o impacto do pé com o solo e os seus efeitos indesejáveis.

Tendo por base estudos em biomecânica, Hodgins (1996) conclui que as perturbações que ocorrem nos instantes dos impactos dos pés com o solo podem ser reduzidas diminuindo a velocidade relativa entre os pés e o solo nos instantes de contacto. Esta estratégia, frequentemente denominada de harmonização da velocidade ao solo, parece estar de acordo com as conclusões de Jiménez e Santos (1997). No seu trabalho, estes dois autores recorreram a uma trajectória rectangular durante a fase de transferência dos pés, quer no sistema de coordenadas do mundo quer no do robô, para o robô quadrúpede Rimho. De acordo com eles, apesar de cada uma destas trajectórias apresentar um conjunto de vantagens que descrevem, a trajectória rectangular no sistema de coordenadas do corpo do robô apresenta a desvantagem de não ser capaz de evitar colisões com o terreno, uma vez que os pés não apresentam um movimento vertical durante o levantamento e colocação no solo.

Para resolver este mesmo problema, Colbrunn (2000) adopta uma trajectória em arco para o pé do seu robô, descrita por um polinómio de segundo grau. No entanto, divide a fase de transferência da perna em dois segmentos, denominando o segundo segmento de colocação do pé. Durante esta fase, de duração relativamente curta face ao tempo de transferência da perna,

o pé passa a deslocar-se em linha recta e no sentido contrário ao do movimento do robô até tocar o solo.

Uma outra alternativa para resolver este problema foi adoptada por Koyachi, *et al.* (2002) que recorrem a um polinómio de quinta ordem para descrever as trajectórias dos pés do hexápode MELMANTIS-1 durante a fase de transferência. O polinómio em questão adapta a trajectória do pé, nos instantes de saída e regresso ao solo, de forma a efectuar a harmonização da velocidade do pé com o solo.

De igual forma, Tang, *et al.* (2003) propõem a descrição das trajectórias do pé que se encontra na fase de transferência através de polinómios de terceira ordem de forma a assegurar a continuidade das trajectórias na fase de suporte e de transferência (continuidade das posições, velocidades e acelerações) e evitar os impactos do pé com o solo.

Por último, Mu e Wu (2004) sugerem sintetizar as trajectórias de locomoção de um robô bípede que se desloca numa superfície plana. Em primeiro lugar geram as trajectórias dos pés e das ancas do robô. As trajectórias das ancas e do pé que se encontra na fase de transferência são aproximadas através de funções polinomiais no tempo, sendo os seus coeficientes determinados através de equações que descrevem as restrições em termos de características físicas coerentes do padrão de locomoção. São ainda impostas restrições específicas para eliminar o efeito dos impactos dos calcanhares do robô com o solo.

B.3 Determinação das Trajectórias de Referência Recorrendo a Algoritmos Genéticos e Redes Neurais

A utilização de estratégias e algoritmos evolutivos tem também servido de base a alguns autores para a determinação das trajectórias das juntas dos sistemas artificiais de locomoção.

No caso dos robôs quadrúpedes, um exemplo é dado por Hornby, *et al.* (2000). Estes autores recorrem a um algoritmo genético para evoluir os padrões de locomoção (que na sua definição inclui a trajectória dos pés) do robô quadrúpede AIBO em terrenos perfeitamente lisos ou irregulares. Cada padrão de locomoção é especificado por um conjunto de vinte parâmetros, incluindo já estes parâmetros a especificação da trajectória dos pés do robô.

Já Krasny e Orin (2003) recorrem a uma estratégia baseada num algoritmo genético para determinarem as trajectórias periódicas do corpo e das pernas de um robô quadrúpede durante

a locomoção a elevadas velocidades adoptando o padrão de locomoção galope. As trajectórias determinadas através deste método são comparadas com as encontradas recorrendo a uma aproximação baseada em redes neuronais.

A utilização de redes neuronais tem sido também adoptada para a geração das trajectórias das pernas de robôs. Por exemplo, Ilg, *et al.* (1997) geram as trajectórias para os pés de um robô hexápode a partir da determinação das correspondentes trajectórias pretendidas para as juntas ao longo de um ciclo de locomoção. Para o efeito, recorrem a uma rede neuronal conjugada com uma estratégia de aprendizagem supervisionada, numa primeira fase, e em aprendizagem por reforço, numa segunda fase. Já Parker e Li (2003) recorrem a uma rede neuronal, com seis neurónios completamente interligados, para gerar os sinais de comando dos dois servomotores (dois gdl por perna) que actuam as pernas de um robô hexápode. Desta forma geram implicitamente as trajectórias dos pés do robô. Para determinar os pesos da rede neuronal, recorrem a um algoritmo genético.

Estratégias semelhantes têm também sido adoptadas na determinação das trajectórias dos pés de robôs bípedes e humanóides.

De acordo com Kawaji, *et al.* (1998), as trajectórias óptimas para robôs bípedes, de forma a reduzir os binários nos actuadores, devem ser trajectórias que sejam óptimas do ponto de vista da minimização das alterações da potência. Tendo por base esta ideia, propõem a geração de trajectórias baseadas em algoritmos genéticos, sendo a função de aptidão baseada na minimização das alterações de potência durante um passo.

Também Yamasaki, *et al.* (2002) recorrem a um algoritmo genético para a aquisição das trajectórias de locomoção de um robô humanóide. O objectivo destes autores é que as trajectórias sejam suaves e estáveis e que, simultaneamente, minimizem os consumos energéticos. Para o efeito, o algoritmo genético é aplicado em duas fases, sendo a função de aptidão diferente em cada uma das fases. Na primeira fase, a função de aptidão é a distância percorrida pelo robô, sendo que a uma maior distância percorrida corresponde um maior valor da função de aptidão. Numa segunda fase a função de aptidão considera a distância a percorrer e a energia consumida (sendo que a menor energia consumida corresponde a um maior valor da função de aptidão). Para esta segunda fase são utilizados como população inicial os melhores indivíduos resultantes da primeira fase.

B.4 Determinação das Trajectórias de Referência Recorrendo a Índices de Optimização

As trajectórias das pernas e dos pés dos sistemas artificiais de locomoção, durante a fase de transferência, também podem ser optimizadas recorrendo a índices matemáticos. Uma vez que é reconhecido que a maioria dos animais com locomoção por pernas optimiza a eficiência energética (Alexander, 1984), durante a especificação das trajectórias de referência das pernas e pés de veículos com pernas é frequente considerar como funções a optimizar índices baseados no consumo energético.

Um primeiro exemplo desta estratégia é apresentado por Roussel, *et al.* (1998) que descrevem um algoritmo para gerar as trajectórias óptimas de robôs bípedes, optimizando o consumo energético ao longo de todo o ciclo de locomoção. Para o efeito, estes autores dividiram o ciclo de locomoção em quatro partes, considerando a fase de suporte único, a fase de duplo suporte, a fase de contacto do pé com o solo e a fase de levantamento do pé do solo.

Como resultado obtêm não só as trajectórias do corpo e das pernas do robô, mas também as trajectórias de todas as juntas do bípede, determinando os binários que devem ser aplicados nas juntas de forma a minimizar a sua função custo ao longo de todo o ciclo de locomoção. O critério que utilizam para optimizar o consumo energético é a energia injectada no robô durante um ciclo de locomoção.

Uma vez que, de acordo com estes critérios, a geração de um padrão de locomoção óptimo não é suficientemente rápida para ser obtida em tempo real, o objectivo do estudo destes autores era o estabelecimento de uma base de dados pré-calculada de padrões de locomoção óptimos para diferentes parâmetros de locomoção, como sejam o comprimento do passo, o período do ciclo e a velocidade de locomoção.

O objectivo do trabalho apresentado por Denk e Schmidt (2003) é também o estabelecimento de uma base de dados pré-calculada de padrões de locomoção óptimos para diferentes parâmetros de locomoção de um robô bípede que se desloque num ambiente tridimensional. Estes autores, no entanto, recorrem ao valor da potência mecânica desenvolvida nas juntas de um robô bípede para determinarem os parâmetros óptimos das trajectórias de locomoção.

Um outro trabalho onde se considera a optimização do consumo energético é o apresentado por Hardt, *et al.* (1998). Estes autores descrevem um método para determinar as trajectórias

dos pés de um robô bípede através da minimização das entradas de controlo. A função objectivo adoptada no seu trabalho considera a minimização do quadrado dos binários aplicados às juntas.

Silva (2001) estuda as trajectórias de referência de um robô bípede tendo por base diferentes critérios. Entre eles recorre à minimização da energia consumida ao longo da locomoção e à minimização de um índice baseado no quadrado dos binários aplicados às juntas.

Já Rostami e Bessonnet (1998) geram o padrão de locomoção óptimo de um bípede, no plano sagital, baseando-se no Princípio Máximo de Pontryagin. Para o efeito recorrem à teoria de controlo óptimo e utilizam como critério de optimização a minimização do integral dos quadrados dos binários aplicados às juntas. Durante a fase de optimização, consideram como restrições a ausência de impacto e de atrito quando o calcanhar do bípede toca no solo.

O resultado que obtiveram garante movimentos suaves com uma coordenação óptima dos binários actuantes das juntas e garantindo um consumo energético moderado. Adicionalmente o contacto do calcanhar com o solo, no final da fase de transferência, ocorre sem impacto e sem escorregamento, tornando o padrão de locomoção de referência gerado desta forma mais estável e de mais fácil controlo, de acordo com estes autores.

Chevallereau e Sardain (2000) optimizam as trajectórias das quatro juntas do robô bípede RABBIT para o que recorrem a dois polinómios de quarto grau por junta. Um destes polinómios é utilizado para descrever a trajectória da junta durante a fase de suporte e o outro para descrever a mesma trajectória durante a fase de transferência.

Para o processo de optimização das trajectórias utilizam como critério o integral da norma do quadrado dos binários dos actuadores, por unidade de deslocamento. Durante o processo de optimização são definidos os coeficientes de todos os polinómios e estes coeficientes permitem determinar as posições e velocidades inicial e final da trajectória, uma posição intermédia em cada fase e a respectiva duração da fase em consideração. Adicionalmente, supõe-se que o robô cumpre um conjunto de requisitos descritos por estes autores.

Também Miossec e Aoustin (2002) propõem um índice de optimização baseado no quadrado dos binários dos actuadores das juntas das pernas (*i.e.*, um critério relacionado com

a dissipação de energia). Através da minimização deste índice determinam os valores óptimos dos binários nas juntas e as correspondentes trajectórias dos pés. As coordenadas pretendidas para as juntas das pernas são depois armazenadas recorrendo a polinómios. Um ponto de vista similar é adoptado por Muraro e Chevallereau (2002) que definem dois índices dinâmicos para otimizar as trajectórias planeadas dos pés de um robô quadrúpede. O problema de optimização é resolvido de uma forma algébrica impondo uma determinada evolução temporal, descrita através de funções polinomiais, às coordenadas das juntas das pernas.

B.5 Trajectórias de Referência Cíclicas nas Juntas dos Robôs

De acordo com Espiau, *et al.* (1997), dada a natureza periódica dos ângulos das juntas durante a locomoção, é razoável levantar a hipótese da existência de um qualquer ciclo limite, denominado gerador de padrões, por trás do controlo da locomoção humana. Também já foi conjecturado que a locomoção com pernas, e possivelmente toda a coordenação entre membros, é efectuada por processos oscilatórios com a natureza de ciclos limite não lineares.

No entanto, excepto em (Kato e Mori, 1984), a existência de ciclos limite não tem sido objecto de investigação. No trabalho descrito por estes autores, é utilizado um oscilador acoplado de Van Der Pol, com um ciclo limite estável, para gerar as trajectórias de referência das juntas de um robô bípede.

Uma alternativa, que tem vindo a ganhar uma certa relevância, passa pela geração das trajectórias das juntas de robôs a partir da informação gerada por um gerador central de padrões. Esta aproximação é adoptada, por exemplo, por Inagaki, *et al.* (2004) que propõem a sua utilização na geração das trajectórias dos pés de um robô hexápode.

B.6 Geração das Trajectórias de Referência Recorrendo a Telecontrolo

No caso de sistemas com muitos gdl, como sejam os robôs humanóides, a geração automática de trajectórias para as pernas e pés e para os braços e mãos destes robôs implica uma multiplicidade de soluções, exige uma grande potência computacional e requer muito tempo para se chegar à solução óptima. Reconhecendo-se a complexidade necessária para gerar trajectórias eficazes e em tempo real, em particular quando os robôs têm que se defrontar com ambientes com obstáculos, foi sugerida a adopção do telecontrolo para a geração de

trajectórias para os braços dos robôs recorrendo a exoesqueletos com reflexão de força (Lee, *et al.*, 1998).

No que concerne directamente à questão da geração das trajectórias para os pés dos robôs, esta aproximação foi aplicada para a geração das trajectórias das pernas, num caso muito simples, para efeitos didácticos (Amin, *et al.*, 2001) e na teleoperação dos pés do robô humanóide HRP-2 (Sian, *et al.*, 2004).

B.7 Outras Estratégias para a Geração das Trajectórias de Referência

Apesar de em menor número, têm ainda sido utilizadas outras estratégias para a geração das trajectórias de referência de sistemas artificiais de locomoção.

Chevallereau, *et al.* (1997, 1998) adoptaram uma dinâmica balística durante a fase de transferência (*i.e.*, não há aplicação de binário aos actuadores das juntas durante este período) para definir as trajectórias de referência de robôs com locomoção por pernas. De forma a assegurar um movimento correcto, a velocidade inicial da perna do robô deve ser tal que, sob o efeito da dinâmica balística, o estado final seja o estado pretendido para o próximo passo. No final da fase de transferência do pé, ao verificar-se a colisão deste com o solo, ocorre um outro impulso. Devido a isto, as condições para entrar na fase seguinte não se verificariam exactamente, pelo que estes autores apresentam um algoritmo para ultrapassar esta limitação, de forma a que a trajectória dos pés seja quase balística e o accionamento ocorra principalmente nos instantes extremos da trajectória do pé. A velocidade em torno da zona de impacto com o solo é escolhida de forma a minimizar a energia necessária para alcançar a trajectória assintótica. Para controlar a trajectória efectiva dos pés do robô recorrem a um controlador do tipo “binário calculado” e aplicam estas ideias a um robô quadrúpede (Chevallereau, *et al.*, 1997) e a um robô bípede (Chevallereau, *et al.*, 1998). Uma aproximação similar a esta foi também adoptada por Aoustin, *et al.* (2002) para a definição das trajectórias de referência das pernas de um robô bípede.

Por último, refere-se a aproximação adoptada por Kanehiro, *et al.* (1998). Estes autores desenvolveram um modo de controlo para os actuadores do humanóide HARU que permite que eles se movam de forma passiva. Desta forma torna-se possível ensinar movimentos complexos ao robô, movendo directamente os seus braços e pernas e gravando os sinais dos

potenciômetros que indicam o deslocamento angular de cada junta. Durante a fase de operação, propriamente dita o robô recorre à repetição das trajetórias ensinadas previamente.

Referências

- ALBERT, A.; GERTH, W.. (2001). “New Path Planning Algorithms for Higher Gait Stability of a Bipedal Robot”. In: *Proceedings CLAWAR 2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 521 – 528.
- ALEXANDER, R. McN.. (1984). “The Gaits of Bipedal and Quadrupedal Animals”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 3; No. 2; pp. 49 – 59.
- AMIN, Shamsudin H. M.; MAMAT, Rosbi; ZAKARIA, Mohamad Fauzi; MAJID, Norhayati A.; SIONG, Lim Cheng; HORVÁTH, László; TAR, József. (2001). “Internet-Based Telerobotics: UTM's Experience and Future Direction”. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Advanced Robotics*; pp. 313 – 319.
- AOUSTIN, Yannick; FORMAL'SKY, Alexander; LAVROVSKY, Edouard. (2002). “Mouvement Balistique de Course Pour un Bipède”. In: *CIFA'2002 – Conférence Internationale Francophone d'Automatique*; pp. 593 – 598.
- BAI, Shaoping; LOW, K. H.; GUO, Weimiao. (2000). “Kinematographic Experiments on Leg Movements and Body Trajectories of Cockroach Walking on Different Terrain”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2605 – 2610.
- BOGGESS, Matthew J.; SCHROER, Robert T.; QUINN, Roger D.; RITZMANN, Roy E.. (2004). “Mechanized Cockroach Footpaths Enable Cockroach-Like Mobility”. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2871 – 2876.
- CAMPOS, Daniel Carmona de; BEZERRA, Carlos André Dias; ZAMPIERI, Douglas Eduardo; MENDELECK, André. (2001). “Modelagem e Simulação Dinâmica de um Robô Bípede”. In: *Proceedings of COBEM 2001 – 16th Brazilian Congress of Mechanical Engineering – Robotics and Control*; pp. 92 – 99.
- CHEVALLEREAU, C.; FORMAL'SKY, A.; PERRIN, B.. (1997). “Control of a Walking robot With Feet Following a Reference Trajectory Derived From Ballistic Motion”. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1094 – 1099.
- CHEVALLEREAU, C.; FORMAL'SKY, A.; PERRIN, B.. (1998). “Low Energy Cost Reference Trajectories For a Biped Robot”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1398 – 1404.
- CHEVALLEREAU, C.; SARDAIN, P.. (2000). “Design and Actuation Optimization of a 4 Axes Biped Robot for Walking and Running”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3365 – 3370.

COLBRUNN, Robb William. (2000). *Design and Control of a Robotic Leg With Braided Pneumatic Actuators*. M. Sc. Thesis. Case Western Reserve University – Department of Mechanical and Aerospace Engineering.

CONTE, G.; SCARADOZZI, D.; SUARDI, A.. (2003). “Control Architecture for a Prototypal Legged Robot”. In: *Proceedings CLAWAR’2003 – 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 127 – 134.

DASGUPTA, Anirvan; NAKAMURA, Yoshihiko. (1999). “Making Feasible Walking Motion of Humanoid Robots From Human Motion Capture Data”. In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1044 – 1049.

DENK, J.; SCHMIDT, G.. (2003). “Synthesis of Walking Primitive Databases for Biped Robots in 3D-Environments”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1343 – 1349.

EPHANOV, Anton; HURMUZLU, Yildirim. (1997). “Generating Pathological Gait Patterns via the Use of Robotic Locomotion Models”. In: *Proceedings of the ECC’97 – European Control Conference*.

ESPIAU, Bernard; THE BIP TEAM. (1997). “BIP: A Joint Project for the Development of an Anthropomorphic Biped Robot”. In: *Proceedings of ICAR’97 – 8th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 267 – 272.

GRAVEZ, F.; MOHAMED, B.; OUEZDOU, F. B.. (2002). “Dynamic Simulation of a Humanoid Robot With Four DOF’s Torso”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 511 – 516.

HAFI, F. El; GORCE, P.. (1998). “Walking Dynamic Control Under Unknown Perturbation”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*; pp. 3538 – 3543.

HARDT, Michael; KREUTZ-DELGADO, Kenneth; HELTON, J. William. (1998). “Minimal Energy Control of a Biped Robot With Numerical Methods and a Recursive Symbolic Dynamic Model”. In: *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision & Control*; pp. 413 – 416.

HODGINS, Jessica K.. (1996). “Three-Dimensional Human Running”. In: *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3271 – 3276.

HORNBY, G. S.; TAKAMURA, S.; YOKONO, J.; HANAGATA, O.; YAMAMOTO, T.; FUJITA, M.. (2000). “Evolving Robust Gaits With AIBO”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3040 – 3045.

HUANG, Qiang; KAJITA, Shuuji; KOYACHI, Noriho; KANEKO, Kenji; YOKOI, Kazuhito; ARAI, Hirohiko; KOMORIYA, Kiyoshi; TANIE, Kazuo. (1999). “A High Stability, Smooth Walking Pattern for a Biped Robot”. In: *Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 65 – 71.

IHME, T.; DEUTSCHER, M.. (2001). “Design and Control Aspects for Six-Legged Walking Robots to Realize Adaptation to the Environment”. In: *Proceedings CLAWAR'2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 627 – 634.

ILG, Winfried; MÜHLFRIEDEL, Thomas; BERNS, Karsten. (1997). “A Hybrid Learning Architecture Based on Neural Networks for Adaptive Control of a Walking Machine”. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2626 – 2631.

INADA, Hironobu; ISHII, Kazuo. (2003). “Behavior Generation of Bipedal Robot Using Central Pattern Generator (CPG) (1st Report: CPG Parameters Searching Method by Genetic Algorithm)”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 2179 – 2184.

INAGAKI, Shinkichi; YUASA, Hideo; SUZUKI, Takanori; ARAI, Tamio. (2004). “Wave CPG Model for Autonomous Decentralised Multi-Legged Robot – Gait Generation and Walking Speed Control”. In: *Proceedings of IAS-8: the 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems*; pp. 11 – 18.

INOUE, Kenji; YOSHIDA, Haruyuki; ARAI, Tatsuo; MAE, Yasushi. (2000). “Mobile Manipulation of Humanoids – Real-Time Control Based on Manipulability and Stability”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2217 – 2222.

JIMÉNEZ, María A.; SANTOS, Pablo González de. (1997). “Terrain-Adaptive Gait for Walking Machines”. *The International Journal of Robotics Research*. Vol. 16; No. 3; pp. 320 – 339.

KANEHIRO, Fumio; MIZUUCHI, Ikuo; KOYASAKO, Kotaro; KAKIUCHI, Youhei; INABA, Masayuki; INOUE, Hirochika. (1998). “Development of a Remote-Brained Humanoid for Research on Whole Body Action”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1302 – 1307.

KATOH, R.; MORI, M.. (1984). “Control Method of Biped Locomotion Giving Asymptotic Stability of Trajectory”. *Automatica*. Vol. 20; No. 4; pp. 405 – 414.

KAWAJI, Shigeyasu; OGASAWARA, Ken'ichi; ARAO, Masaki. (1998). “Rhythm-Based Control of Biped Locomotion Robot”. In: *Proceedings of the AMC'98 – 5th International Workshop on Advanced Motion Control*; pp. 93 – 98.

KIM, Sung-Hoon; OH, Jun-Ho; LEE, Ki-Hoon. (2000). “Design of 4 Joints 3 Links Biped Robot and its Gaits”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1155 – 1160.

KOYACHI, Noriho; ADACHI, Hironori; NAKAMURA, Tatsuya; NAKANO, Eiji. (1991). “Stair-Climbing Control of Self-Contained Hexapod With Semi-Fixed Gait”. In: *Proceedings of ICAR'91 – Fifth International Conference on Advanced Robotics*; pp. 747 – 752.

KOYACHI, Noriho; ADACHI, Hironori; SENJO, Naofumi; MURATA, Ryoji; IZUMI, Makoto; HIROSE, Takeshi; ARAI, Tatsuo. (2002). “Control of Walk and Manipulation by a Hexapod With Integrated Limb Mechanism: MELMANTIS-1”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3553 – 3558.

KOYACHI, Noriho; ARAI, Tatsuo; ADACHI, Hironori; MURAKAMI, Akira; KAWAI, Ken. (1997). “Mechanical Design of Hexapods With Integrated Limb Mechanism: MELMANTIS-1 and MELMANTIS-2”. In: *Proceedings of ICAR'97 – 8th International Conference on Advanced Robotics*; pp. 273 – 278.

KRASNY, Darren P.; ORIN, David E.. (2003). “Achieving Periodic Leg Trajectories to Evolve a Quadruped Gallop”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3842 – 3848.

LAKSANACHAROEN, Sathaporn; POLLACK, Alan J.; NELSON, Gabriel M.; QUINN, Roger D.; RITZMANN, Roy E.. (2000). “Biomechanics and Simulation of Cricket for Microrobot Design”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1088 – 1094.

LEE, Sooyong; CHOI, Dae-Seong; KIM, Munsang; LEE, Chong-Won; SONG, Jae-Bok. (1998). “Human and Robot Integrated Teleoperation”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*; pp. 1213 – 1218.

MATSUMOTO, Osamu; KAJITA, Shuuji; SAIGO, Muneharu; TANI, Kazuo. (1998). “Dynamic Trajectory Control of Passing Over Stairs by a Biped Type Leg-Wheeled Robot With Nominal Reference of Static Gait”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 406 – 412.

MIOSSEC, Sylvain; Aoustin, Yannick. (2002). “Mouvement de Marche Composé de Simple et Double Support Pour un Robot Bipède Planaire Sans Pieds”. In: *CIFA'2002 – Conférence Internationale Francophone d'Automatique*; pp. 522 – 527.

MU, Xiuping ; WU, Qiong. (2004). “Sagittal Gait Synthesis for a Five-Link Biped Robot”. In: *Proceedings of the 2004 IEEE American Control Conference*; pp. 4004 – 4009.

MURARO, Alain; CHEVALLEREAU, Christine. (2002). “Trajectoires Optimales Pour L'Amble d'un Quadrupède Pour des Critères Énergétiques”. In: *CIFA'2002 – Conférence Internationale Francophone d'Automatique*; pp. 528 – 533.

NELSON, Gabriel Martin. (1995). *Modelling and Simulation of an Insect-Like Hexapod*. M. Sc. Thesis. Case Western Reserve University – Department of Mechanical and Aerospace Engineering.

OGINO, Masaki; KATOH, Yutaka; AONO, Masahiro; ASADA, Minoru; HOSODA, Koh. (2003). “Vision-Based Reinforcement Learning for Humanoid Behavior Generation with Rhythmic Walking Parameters”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1665 – 1671.

ONO, T.; MURAKAMI, T.; OHNISHI, K.. (1998). “An Approach to Biped Robot Control According to Surface Condition of Ground”. In: *Proceedings of the AMC'98 – 5th International Workshop on Advanced Motion Control*; pp. 129 – 134.

PARK, Jong H.; KIM, Kyoung D.. (1998). “Biped Robot Walking Using Gravity-Compensated Inverted Pendulum Mode and Computed Torque Control”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3528 – 3533.

PARK, Jong Hyeon; CHO, Hyun Chul. (2000). “An On-Line Trajectory Modifier for the Base Link of Biped Robots To Enhance Locomotion Stability”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3353 – 3358.

PARKER, Gary B.; LI, Zhiyi. (2003). “Evolving Neural Networks for Hexapod Leg Controllers”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1376 – 1381.

PFEIFFER, F.; ELTZE, J.; WEIDEMANN, H.-J.. (1995). “The TUM-Walking Machine”. *Intelligent Automation and Soft Computing*. Vol. 1; No. 3; pp. 307 – 323.

QUEIROZ, Carlos; GONÇALVES, Nuno; MENEZES, Paulo. (2000). “A Study on Static Gaits for a Four Leg Robot”. In: *Proceedings of CONTROL 2000 – UK ACC International Conference on Control*.

ROSTAMI, Mostafa; BESSONNET, Guy. (1998). “Impactless Sagittal Gait of a Biped Robot During the Single Support Phase”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1385 – 1391.

ROUSSEL, L.; CANUDAS-DE-WIT, C.; GOSWAMI, A.. (1998). “Generation of Energy Optimal Complete Gait Cycles for Biped Robots”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2036 – 2041.

SIAN, Neo Ee; YOKOI, Kazuhito; KAJITA, Shuuji; SAITO, Hajime; TANIE, Kazuo. (2004). “A Stable Foot Teleoperation Method for Humanoid Robots”. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1065 – 1070.

SILVA, Filipe Miguel Teixeira Pereira da. (2001). *Análise Dinâmica e Controlo de Sistemas Robóticos de Locomoção Bípede*. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Porto.

TANG, Zhe; ZHOU, Changjiu; SUN, Zenqi. (2003). “Trajectory Planning for Smooth Transition of a Biped Robot”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2455 – 2460.

TU, Kuo-Yang; LEE, Tsu-Tian; WANG, Chi-Hsu; CHANG, Cu-An. (1998). “Design of Fuzzy Walking Pattern (FWP) for a Shape Memory Alloy (SMA) Biped Robot”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*; pp. 3266 – 3271.

UDE, Aleš; ATKESON, Christopher G.; RILEY, Marcia. (2000). “Planning of Joint Trajectories for Humanoid Robots Using B-Spline Wavelets”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2223 – 2228.

VILLANOVA, J.; GUINOT, J.-C.; NEVEU, P.; GASC, J.-P.. (2000). “Quadrupedal Mammal Locomotion Dynamics 2D Model”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1785 – 1790.

YAMASAKI, Fuminori; ENDO, Ken; KITANO, Hiroaki; ASADA, Minoru. (2002). “Acquisition of Humanoid Walking Motion Using Genetic Algorithm – Considering Characteristics of Servo Modules”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3123 – 3128.

ZONFRILLI, Fabio; ORIOLO, Giuseppe; NARDI, Daniele. (2002). “A Biped Locomotion Strategy for the Quadruped Robot Sony ERS-210”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 2768 – 2774.

Anexo C

Cinemática e Dinâmica de um Robô com Dois gdl Rotacionais nas Pernas

C.1 Equações Cinemáticas para um Robô com Dois gdl nas Pernas

Na situação em que cada perna do robô apresenta dois gdl rotacionais, as posições, velocidades e acelerações de cada perna do robô (Figura C.1), no espaço cartesiano, são dadas pelas seguintes expressões:

$$\mathbf{p}_d(t) = \begin{cases} x_{id}(t) = x_{iFd}(t) - x_{iHd}(t) \\ y_{id}(t) = y_{iFd}(t) - y_{iHd}(t) \end{cases} \quad (\text{C.1a})$$

$$\dot{\mathbf{p}}_d(t) = \begin{cases} \dot{x}_{id}(t) = \dot{x}_{iFd}(t) - \dot{x}_{iHd}(t) \\ \dot{y}_{id}(t) = \dot{y}_{iFd}(t) - \dot{y}_{iHd}(t) \end{cases} \quad (\text{C.1b})$$

$$\ddot{\mathbf{p}}_d(t) = \begin{cases} \ddot{x}_{id}(t) = \ddot{x}_{iFd}(t) - \ddot{x}_{iHd}(t) \\ \ddot{y}_{id}(t) = \ddot{y}_{iFd}(t) - \ddot{y}_{iHd}(t) \end{cases} \quad (\text{C.1c})$$

Partindo destes valores, e recorrendo à cinemática inversa, é possível calcular as posições, velocidades e acelerações em cada perna do robô, no espaço das juntas das pernas, vindo:

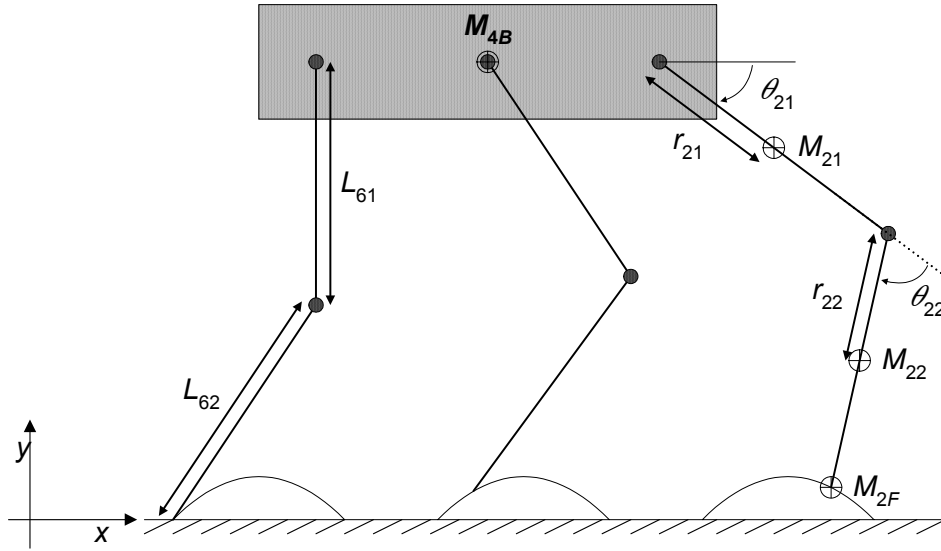


Figura C.1: Sistema de coordenadas e variáveis que caracterizam as dimensões das pernas de um robô hexápode com dois gdl por perna.

$$\Theta_d(t) = \begin{cases} \theta_{i1d}(t) = \text{atan2}(y_{id}, x_{id}) - \text{atan2}((L_{i2} S_2), (L_{i1} + L_{i2} C_2)) \\ \theta_{i2d}(t) = -\text{acos}((x_{id}^2 + y_{id}^2 - L_{i1}^2 - L_{i2}^2) / (2L_{i1}L_{i2})) \end{cases} \quad (\text{C.2a})$$

$$\dot{\Theta}_d(t) = \begin{cases} \dot{\theta}_{i1}(t) = (L_{i2} C_{12} \dot{x}_{id} + L_{i2} S_{12} \dot{y}_{id}) / (L_{i1}L_{i2} S_2) \\ \dot{\theta}_{i2}(t) = ((-L_{i1}C_1 - L_{i2}C_{12})\dot{x}_{id} + (-L_{i1}S_1 - L_{i2}S_{12})\dot{y}_{id}) / (L_{i1}L_{i2} S_2) \end{cases} \quad (\text{C.2b})$$

$$\ddot{\Theta}_d(t) = \begin{cases} \ddot{\theta}_{i1}(t) = (L_{i2} C_{12} \ddot{x}_{id} + L_{i2} S_{12} \ddot{y}_{id} + L_{i1}L_{i2} C_2 \dot{\theta}_{i1}^2 + L_{i2}^2 (\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2})^2) / (L_{i1}L_{i2} S_2) \\ \ddot{\theta}_{i2}(t) = (-L_{i1} C_1 \ddot{x}_{id} - L_{i1} S_1 \ddot{y}_{id} - L_{i2}^2 \dot{\theta}_{i1}^2 - L_{i1}L_{i2} C_2 (\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2})^2) / (L_{i1}L_{i2} S_2) - \ddot{\theta}_{i1} \end{cases} \quad (\text{C.2c})$$

onde:

$$\begin{aligned} S_1 &= \text{sen}(\theta_{i1}), S_2 = \text{sen}(\theta_{i2}), S_{12} = \text{sen}(\theta_{i1} + \theta_{i2}) \\ C_1 &= \text{cos}(\theta_{i1}), C_2 = \text{cos}(\theta_{i2}), C_{12} = \text{cos}(\theta_{i1} + \theta_{i2}) \\ \text{atan2}(y, x) &= \text{arctg}\left(\frac{y}{x}\right)^1 \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

¹ A função atan2(y, x) retorna um ângulo num dos quatro quadrantes, de acordo com os sinais das variáveis x e y.

C.2 Equações das Energias para um Robô com Dois gdl nas Pernas

As energias potenciais no corpo, elos das pernas e pés do robô são dadas por:

$$E_{PiB} = gM_{iB}y_{iH} \quad (C.4a)$$

$$E_{Pi1} = gM_{i1}(y_{iH} + r_{i1}S_1) \quad (C.4b)$$

$$E_{Pi2} = gM_{i2}(y_{iH} + L_{i1}S_1 + r_{i2}S_{12}) \quad (C.4c)$$

$$E_{PiF} = gM_{iF}(y_{iH} + L_{i1}S_1 + L_{i2}S_{12}) \quad (C.4d)$$

onde g representa a aceleração da gravidade. As correspondentes energias cinéticas são dadas por:

$$E_{CiB} = \frac{1}{2}M_{iB}[\dot{x}_{iH}^2 + \dot{y}_{iH}^2] \quad (C.5a)$$

$$E_{Ci1} = \frac{1}{2}M_{i1}[\dot{x}_{iH}^2 + \dot{y}_{iH}^2 + 2(\dot{y}_{iH}C_1 - \dot{x}_{iH}S_1)r_{i1}\dot{\theta}_{i1} + r_{i1}^2\dot{\theta}_{i1}^2] \quad (C.5b)$$

$$\begin{aligned} E_{Ci2} = \frac{1}{2}M_{i2}[\dot{x}_{iH}^2 + \dot{y}_{iH}^2 + 2(L_{i1}C_1 + r_{i2}C_{12})\dot{y}_{iH}\dot{\theta}_{i1} \\ - 2(L_{i1}S_1 + r_{i2}S_{12})\dot{x}_{iH}\dot{\theta}_{i1} + 2(\dot{y}_{iH}C_{12} - \dot{x}_{iH}S_{12})r_{i2}\dot{\theta}_{i2} \\ + L_{i1}^2\dot{\theta}_{i1}^2 + 2L_{i1}r_{i2}C_2(\dot{\theta}_{i1}^2 + \dot{\theta}_{i1}\dot{\theta}_{i2}) + r_{i2}^2(\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2})^2] \end{aligned} \quad (C.5c)$$

$$\begin{aligned} E_{CiF} = \frac{1}{2}M_{iF}[\dot{x}_{iH}^2 + \dot{y}_{iH}^2 + 2(L_{i1}C_1 + L_{i2}C_{12})\dot{y}_{iH}\dot{\theta}_{i1} \\ - 2(L_{i1}S_1 + L_{i2}S_{12})\dot{x}_{iH}\dot{\theta}_{i1} + 2(\dot{y}_{iH}C_{12} - \dot{x}_{iH}S_{12})L_{i2}\dot{\theta}_{i2} \\ + L_{i1}^2\dot{\theta}_{i1}^2 + 2L_{i1}L_{i2}C_2(\dot{\theta}_{i1}^2 + \dot{\theta}_{i1}\dot{\theta}_{i2}) + L_{i2}^2(\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2})^2] \end{aligned} \quad (C.5d)$$

C.3 Equações Dinâmicas para um Robô com Dois gdl nas Pernas

Os termos inerciais da equação da dinâmica inversa do robô são dados por:

$$f_{ixI} = j_{i11}\ddot{x}_{iH} + j_{i12}\ddot{y}_{iH} + j_{i13}\ddot{\theta}_{i1} + j_{i14}\ddot{\theta}_{i2} \quad (C.6a)$$

$$f_{iyI} = j_{i21}\ddot{x}_{iH} + j_{i22}\ddot{y}_{iH} + j_{i23}\ddot{\theta}_{i1} + j_{i24}\ddot{\theta}_{i2} \quad (\text{C.6b})$$

$$\tau_{i1I} = j_{i31}\ddot{x}_{iH} + j_{i32}\ddot{y}_{iH} + j_{i33}\ddot{\theta}_{i1} + j_{i34}\ddot{\theta}_{i2} \quad (\text{C.6c})$$

$$\tau_{i2I} = j_{i41}\ddot{x}_{iH} + j_{i42}\ddot{y}_{iH} + j_{i43}\ddot{\theta}_{i1} + j_{i44}\ddot{\theta}_{i2} \quad (\text{C.6d})$$

Sendo:

$$\begin{aligned} j_{i11} &= M_{iB} + M_{i1} + M_{i2} + M_{if} \\ j_{i12} &= 0 \\ j_{i13} &= -(M_{i1}r_{i1} + M_{i2}L_{i1} + M_{if}L_{i1})S_1 - (M_{i2}r_{i2} + M_{if}L_{i2})S_{12} \\ j_{i14} &= -(M_{i2}r_{i2} + M_{if}L_{i2})S_{12} \end{aligned} \quad (\text{C.7a})$$

$$\begin{aligned} j_{i21} &= 0 \\ j_{i22} &= M_{iB} + M_{i1} + M_{i2} + M_{if} \\ j_{i23} &= (M_{i1}r_{i1} + M_{i2}L_{i1} + M_{if}L_{i1})C_1 + (M_{i2}r_{i2} + M_{if}L_{i2})C_{12} \\ j_{i24} &= (M_{i2}r_{i2} + M_{if}L_{i2})C_{12} \end{aligned} \quad (\text{C.7b})$$

$$\begin{aligned} j_{i31} &= j_{i13} \\ j_{i32} &= j_{i23} \\ j_{i33} &= M_{i1}r_{i1}^2 + M_{i2}r_{i2}^2 + M_{i2}L_{i1}^2 + M_{if}L_{i1}^2 + M_{if}L_{i2}^2 + 2(M_{i2}L_{i1}r_{i2} + M_{if}L_{i1}L_{i2})C_2 \\ j_{i34} &= M_{i2}r_{i2}^2 + M_{if}L_{i2}^2 + (M_{i2}L_{i1}r_{i2} + M_{if}L_{i1}L_{i2})C_2 \end{aligned} \quad (\text{C.7c})$$

$$\begin{aligned} j_{i41} &= j_{i14} \\ j_{i42} &= j_{i24} \\ j_{i43} &= j_{i34} \\ j_{i44} &= M_{i2}r_{i2}^2 + M_{if}L_{i2}^2 \end{aligned} \quad (\text{C.7d})$$

Quanto aos termos Coriolis/Centrípetos da equação da dinâmica inversa do robô, estes são dados por:

$$\begin{aligned} f_{ixCC} &= -\left((M_{i1}r_{i1} + M_{i2}L_{i1} + M_{if}L_{i1})C_1 + (M_{i2}r_{i2} + M_{if}L_{i2})C_{12}\right)\dot{\theta}_{i1}^2 \\ &\quad - (M_{i2}r_{i2} + M_{if}L_{i2})C_{12}\dot{\theta}_{i2}^2 - 2(M_{i2}r_{i2} + M_{if}L_{i2})C_{12}\dot{\theta}_{i1}\dot{\theta}_{i2} \end{aligned} \quad (\text{C.8a})$$

$$f_{iyCC} = -\left(\left(M_{i1}r_{i1}+M_{i2}L_{i1}+M_{if}L_{i1}\right)S_1+\left(M_{i2}r_{i2}+M_{if}L_{i2}\right)S_{12}\right)\dot{\theta}_{i1}^2 - \left(M_{i2}r_{i2}+M_{if}L_{i2}\right)S_{12}\dot{\theta}_{i2}^2 - 2\left(M_{i2}r_{i2}+M_{if}L_{i2}\right)S_{12}\dot{\theta}_{i1}\dot{\theta}_{i2} \quad (\text{C.8b})$$

$$\tau_{i1CC} = -\left(M_{i2}L_{i1}r_{i2}+M_{if}L_{i1}L_{i2}\right)S_2\dot{\theta}_{i2}^2 - 2\left(M_{i2}L_{i1}r_{i2}+M_{if}L_{i1}L_{i2}\right)S_2\dot{\theta}_{i1}\dot{\theta}_{i2} \quad (\text{C.8c})$$

$$\tau_{i2CC} = \left(M_{i2}L_{i1}r_{i2}+M_{if}L_{i1}L_{i2}\right)S_2\dot{\theta}_{i1}^2 \quad (\text{C.8d})$$

Por último, os termos gravitacionais da equação da dinâmica do robô são dados por:

$$f_{ixG} = 0 \quad (\text{C.9a})$$

$$f_{iyG} = g(M_{iB}+M_{i1}+M_{i2}+M_{if}) \quad (\text{C.9b})$$

$$\tau_{i1G} = g\left(M_{i1}r_{i1}+M_{i2}L_{i1}+M_{if}L_{i1}\right)C_1 + g\left(M_{i2}r_{i2}+M_{if}L_{i2}\right)C_{12} \quad (\text{C.9c})$$

$$\tau_{i2G} = g\left(M_{i2}r_{i2}+M_{if}L_{i2}\right)C_{12} \quad (\text{C.9d})$$

Anexo D

Cinemática e Dinâmica de um Robô com Três gdl Rotacionais nas Pernas

D.1 Equações Cinemáticas para um Robô com Três gdl nas Pernas

No caso em que cada perna do robô apresenta três gdl rotacionais, as posições, velocidades e acelerações de cada perna do robô (Figura D.1), no espaço das juntas, são determinadas em duas iterações. Apesar de este cálculo poder ser efectuado de uma só vez, recorrendo à cinemática inversa de um sistema com três gdl rotacionais (Sciavicco e Siciliano, 1996), optou-se neste trabalho pela aplicação em duas fases da cinemática inversa de um sistema com dois gdl rotacionais.

Na primeira iteração são determinados os ângulos θ_{i1d} e θ_{i2d} de cada perna do robô. Para o efeito supõe-se uma perna equivalente com dois gdl, tendo como extremidade superior a anca e inferior o tornozelo. Nesta situação, as posições, velocidades e acelerações de cada perna do robô no espaço cartesiano são dadas pelas seguintes expressões:

$$\mathbf{p}_d(t) = \begin{cases} x_{id}(t) = x_{iAd}(t) - x_{iHd}(t) \\ y_{id}(t) = y_{iAd}(t) - y_{iHd}(t) \end{cases} \quad (\text{D.1a})$$

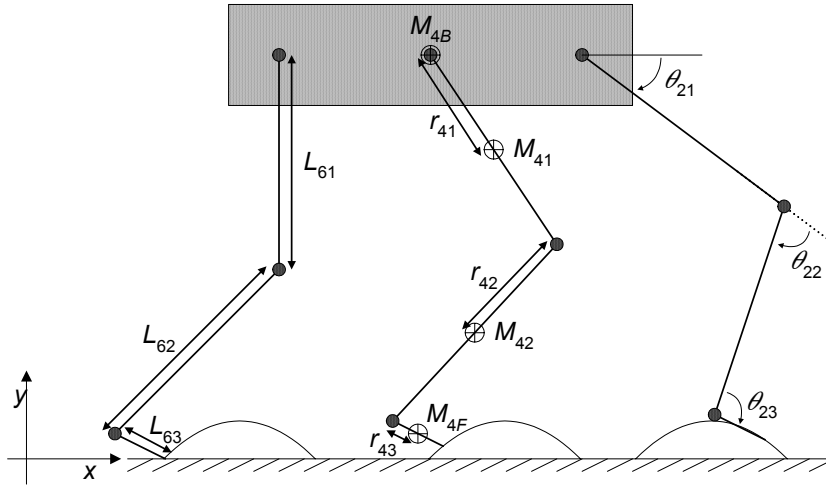


Figura D.1: Sistema de coordenadas e variáveis que caracterizam as dimensões das pernas de um robô hexápode com três gdl por perna.

$$\dot{\mathbf{p}}_d(t) = \begin{cases} \dot{x}_{id}(t) = \dot{x}_{iAd}(t) - \dot{x}_{iHd}(t) \\ \dot{y}_{id}(t) = \dot{y}_{iAd}(t) - \dot{y}_{iHd}(t) \end{cases} \quad (\text{D.1b})$$

$$\ddot{\mathbf{p}}_d(t) = \begin{cases} \ddot{x}_{id}(t) = \ddot{x}_{iAd}(t) - \ddot{x}_{iHd}(t) \\ \ddot{y}_{id}(t) = \ddot{y}_{iAd}(t) - \ddot{y}_{iHd}(t) \end{cases} \quad (\text{D.1c})$$

sendo $\mathbf{p}_{Ad}(t) = [x_{iAd}(t), y_{iAd}(t)]^T$ as trajetórias cartesianas pretendidas dos tornozelos do robô.

Partindo destes valores, e recorrendo à cinemática inversa, é possível calcular as posições, velocidades e acelerações nas juntas da anca e do joelho de cada perna do robô, vindo:

$$\Theta_d(t) = \begin{cases} \theta_{1d}(t) = \text{atan}2(y_{id}, x_{id}) - \text{atan}2((L_{i2} S_2), (L_{i1} + L_{i2} C_2)) \\ \theta_{2d}(t) = -\text{acos}\left(\frac{(x_{id}^2 + y_{id}^2 - L_{i1}^2 - L_{i2}^2)}{(2L_{i1}L_{i2})}\right) \end{cases} \quad (\text{D.2a})$$

$$\dot{\Theta}_d(t) = \begin{cases} \dot{\theta}_{1d}(t) = (L_{i2} C_{12} \dot{x}_{id} + L_{i2} S_{12} \dot{y}_{id}) / (L_{i1} L_{i2} S_2) \\ \dot{\theta}_{2d}(t) = ((-L_{i1} C_1 - L_{i2} C_{12}) \dot{x}_{id} + (-L_{i1} S_1 - L_{i2} S_{12}) \dot{y}_{id}) / (L_{i1} L_{i2} S_2) \end{cases} \quad (\text{D.2b})$$

$$\ddot{\Theta}_d(t) = \begin{cases} \ddot{\theta}_{1d}(t) = (L_{i2} C_{12} \ddot{x}_{id} + L_{i2} S_{12} \ddot{y}_{id} + L_{i1} L_{i2} C_2 \dot{\theta}_{1d}^2 + L_{i2}^2 (\dot{\theta}_{1d} + \dot{\theta}_{2d})^2) / (L_{i1} L_{i2} S_2) \\ \ddot{\theta}_{2d}(t) = (-L_{i1} C_1 \ddot{x}_{id} - L_{i1} S_1 \ddot{y}_{id} - L_{i2}^2 \dot{\theta}_{1d}^2 - L_{i1} L_{i2} C_2 (\dot{\theta}_{1d} + \dot{\theta}_{2d})^2) / (L_{i1} L_{i2} S_2) - \ddot{\theta}_{1d} \end{cases} \quad (\text{D.2c})$$

onde:

$$\begin{aligned} S_1 &= \text{sen}(\theta_{i1}), S_2 = \text{sen}(\theta_{i2}), S_{12} = \text{sen}(\theta_{i1} + \theta_{i2}) \\ C_1 &= \text{cos}(\theta_{i1}), C_2 = \text{cos}(\theta_{i2}), C_{12} = \text{cos}(\theta_{i1} + \theta_{i2}) \\ \text{atan } 2(y, x) &= \text{arctg}\left(\frac{y}{x}\right)^1 \end{aligned} \quad (\text{D.3})$$

Na segunda iteração é determinado o ângulo θ_{i3d} de cada perna do robô assim como o ângulo que o elo L_{i2} faz com a horizontal (θ'_{i2d}). Para o efeito supõe-se uma perna equivalente com dois gdl, tendo agora como extremidade superior o joelho e inferior o pé. Nesta situação, as posições, velocidades e acelerações de cada perna do robô no espaço cartesiano são dadas pelas seguintes expressões:

$$\mathbf{p}_d(t) = \begin{cases} x_{id}(t) = x_{iFd}(t) - x_{iKd}(t) \\ y_{id}(t) = y_{iFd}(t) - y_{iKd}(t) \end{cases} \quad (\text{D.4a})$$

$$\dot{\mathbf{p}}_d(t) = \begin{cases} \dot{x}_{id}(t) = \dot{x}_{iFd}(t) - \dot{x}_{iKd}(t) \\ \dot{y}_{id}(t) = \dot{y}_{iFd}(t) - \dot{y}_{iKd}(t) \end{cases} \quad (\text{D.4b})$$

$$\ddot{\mathbf{p}}_d(t) = \begin{cases} \ddot{x}_{id}(t) = \ddot{x}_{iFd}(t) - \ddot{x}_{iKd}(t) \\ \ddot{y}_{id}(t) = \ddot{y}_{iFd}(t) - \ddot{y}_{iKd}(t) \end{cases} \quad (\text{D.4c})$$

sendo $\mathbf{p}_{Kd}(t) = [x_{iKd}(t), y_{iKd}(t)]^T$ as trajectórias cartesianas pretendidas dos joelhos do robô.

Partindo destes valores e recorrendo à cinemática inversa, calculam-se agora as posições, velocidades e acelerações na junta do tornozelo de cada perna do robô, vindo:

$$\Theta_d(t) = \begin{cases} \theta'_{i2d}(t) = \text{atan } 2(y_{id}, x_{id}) - \text{atan } 2((L_{i3} S_3), (L_{i2} + L_{i3} C_3)) \\ \theta_{i3d}(t) = -\text{acos}\left(\frac{(x_{id}^2 + y_{id}^2 - L_{i2}^2 - L_{i3}^2)}{(2L_{i2}L_{i3})}\right) \end{cases} \quad (\text{D.5a})$$

¹ A função $\text{atan}2(y, x)$ retorna um ângulo num dos quatro quadrantes, de acordo com os sinais das variáveis x e y .

$$\dot{\Theta}_d(t) = \begin{cases} \dot{\theta}'_{i2}(t) = (L_{i3} C_{23} \dot{x}_{id} + L_{i3} S_{23} \dot{y}_{id}) / (L_{i2} L_{i3} S_3) \\ \dot{\theta}'_{i3}(t) = ((-L_{i2} C_2 - L_{i3} C_{23}) \dot{x}_{id} + (-L_{i2} S_2 - L_{i3} S_{23}) \dot{y}_{id}) / (L_{i2} L_{i3} S_3) \end{cases} \quad (D.5b)$$

$$\ddot{\Theta}_d(t) = \begin{cases} \ddot{\theta}'_{i2}(t) = (L_{i3} C_{23} \ddot{x}_{id} + L_{i3} S_{23} \ddot{y}_{id} + L_{i2} L_{i3} C_3 \dot{\theta}'_{i2}{}^2 + L_{i3}{}^2 (\dot{\theta}'_{i2} + \dot{\theta}'_{i3})^2) / (L_{i2} L_{i3} S_3) \\ \ddot{\theta}'_{i3}(t) = (-L_{i2} C_2 \ddot{x}_{id} - L_{i2} S_2 \ddot{y}_{id} - L_{i3}{}^2 \dot{\theta}'_{i2}{}^2 - L_{i2} L_{i3} C_3 (\dot{\theta}'_{i2} + \dot{\theta}'_{i3})^2) / (L_{i2} L_{i3} S_3) - \ddot{\theta}'_{i2} \end{cases} \quad (D.5c)$$

em que:

$$\begin{aligned} S_2 &= \text{sen}(\theta'_{i2}), S_3 = \text{sen}(\theta_{i3}), S_{23} = \text{sen}(\theta'_{i2} + \theta_{i3}) \\ C_2 &= \text{cos}(\theta'_{i2}), C_3 = \text{cos}(\theta_{i3}), C_{23} = \text{cos}(\theta'_{i2} + \theta_{i3}) \end{aligned} \quad (D.6)$$

Das equações (D.2) e (D.5), tira-se:

$$\Theta_d(t) = \begin{cases} \theta_{i1d}(t) = \theta_{i1d}(t) \\ \theta_{i2d}(t) = \theta_{i2d}(t) \\ \theta_{i3d}(t) = \theta_{i3d}(t) \end{cases} \quad (D.7a)$$

$$\dot{\Theta}_d(t) = \begin{cases} \dot{\theta}_{i1d}(t) = \dot{\theta}_{i1d}(t) \\ \dot{\theta}_{i2d}(t) = \dot{\theta}_{i2d}(t) \\ \dot{\theta}_{i3d}(t) = \dot{\theta}_{i3d}(t) \end{cases} \quad (D.7b)$$

$$\ddot{\Theta}_d(t) = \begin{cases} \ddot{\theta}_{i1d}(t) = \ddot{\theta}_{i1d}(t) \\ \ddot{\theta}_{i2d}(t) = \ddot{\theta}_{i2d}(t) \\ \ddot{\theta}_{i3d}(t) = \ddot{\theta}_{i3d}(t) \end{cases} \quad (D.7c)$$

D.2 Equações das Energias para um Robô com Três gdl nas Pernas

As energias potenciais no corpo, elos das pernas e pés do robô são dadas por:

$$E_{PiB} = gM_{iB}y_{iH} \quad (D.8a)$$

$$E_{Pi1} = gM_{i1} (y_{iH} + r_{i1}S_1) \quad (D.8b)$$

$$E_{Pi2} = gM_{i2} (y_{iH} + L_{i1}S_1 + r_{i2}S_{12}) \quad (D.8c)$$

$$E_{PiF} = gM_{iF} (y_{iH} + L_{i1}S_1 + L_{i2}S_{12} + r_{i3}S_{123}) \quad (D.8d)$$

onde g representa a aceleração da gravidade e:

$$\begin{aligned} S_1 &= \sin(\theta_{i1}), S_2 = \sin(\theta_{i2}), S_3 = \sin(\theta_{i3}) \\ S_{12} &= \sin(\theta_{i1} + \theta_{i2}), S_{23} = \sin(\theta_{i2} + \theta_{i3}), S_{123} = \sin(\theta_{i1} + \theta_{i2} + \theta_{i3}) \\ C_1 &= \cos(\theta_{i1}), C_2 = \cos(\theta_{i2}), C_3 = \cos(\theta_{i3}) \\ C_{12} &= \cos(\theta_{i1} + \theta_{i2}), C_{23} = \cos(\theta_{i2} + \theta_{i3}), C_{123} = \cos(\theta_{i1} + \theta_{i2} + \theta_{i3}) \end{aligned} \quad (D.9)$$

As correspondentes energias cinéticas são dadas por:

$$E_{CiB} = \frac{1}{2} M_{iB} [\dot{x}_{iH}^2 + \dot{y}_{iH}^2] \quad (D.10a)$$

$$E_{Ci1} = \frac{1}{2} M_{i1} [\dot{x}_{iH}^2 + \dot{y}_{iH}^2 + 2(\dot{y}_{iH} C_1 - \dot{x}_{iH} S_1) r_{i1} \dot{\theta}_{i1} + r_{i1}^2 \dot{\theta}_{i1}^2] \quad (D.10b)$$

$$\begin{aligned} E_{Ci2} &= \frac{1}{2} M_{i2} [\dot{x}_{iH}^2 + \dot{y}_{iH}^2 + 2(L_{i1} C_1 + r_{i2} C_{12}) \dot{y}_{iH} \dot{\theta}_{i1} \\ &\quad - 2(L_{i1} S_1 + r_{i2} S_{12}) \dot{x}_{iH} \dot{\theta}_{i1} + 2(\dot{y}_{iH} C_{12} - \dot{x}_{iH} S_{12}) r_{i2} \dot{\theta}_{i2} \\ &\quad + L_{i1}^2 \dot{\theta}_{i1}^2 + 2L_{i1} r_{i2} C_2 (\dot{\theta}_{i1}^2 + \dot{\theta}_{i1} \dot{\theta}_{i2}) + r_{i2}^2 (\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2})^2] \end{aligned} \quad (D.10c)$$

$$\begin{aligned} E_{CiF} &= \frac{1}{2} M_{iF} [\dot{x}_{iH}^2 + \dot{y}_{iH}^2 + L_{i1}^2 \dot{\theta}_{i1}^2 + L_{i2}^2 (\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2})^2 + r_{i3}^2 (\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2} + \dot{\theta}_{i3})^2 \\ &\quad + 2L_{i1} L_{i2} C_2 \dot{\theta}_{i1} (\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2}) + 2L_{i1} r_{i3} C_{23} \dot{\theta}_{i1} (\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2} + \dot{\theta}_{i3}) \\ &\quad + 2L_{i2} r_{i3} C_3 (\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2}) (\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2} + \dot{\theta}_{i3}) \\ &\quad - 2(L_{i1} S_1 \dot{\theta}_{i1} + L_{i2} S_{12} (\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2}) + r_{i2} S_{123} (\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2} + \dot{\theta}_{i3})) \dot{x}_{iH} \\ &\quad + 2(L_{i1} C_1 \dot{\theta}_{i1} + L_{i2} C_{12} (\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2}) + r_{i2} C_{123} (\dot{\theta}_{i1} + \dot{\theta}_{i2} + \dot{\theta}_{i3})) \dot{y}_{iH}] \end{aligned} \quad (D.10d)$$

D.3 Equações Dinâmicas para um Robô com Três gdl nas Pernas

Os termos inerciais da equação da dinâmica inversa do robô são dados por:

$$f_{ixI} = j_{i11}\ddot{x}_{iH} + j_{i12}\ddot{y}_{iH} + j_{i13}\ddot{\theta}_{i1} + j_{i14}\ddot{\theta}_{i2} + j_{i15}\ddot{\theta}_{i3} \quad (\text{D.11a})$$

$$f_{iyI} = j_{i21}\ddot{x}_{iH} + j_{i22}\ddot{y}_{iH} + j_{i23}\ddot{\theta}_{i1} + j_{i24}\ddot{\theta}_{i2} + j_{i25}\ddot{\theta}_{i3} \quad (\text{D.11b})$$

$$\tau_{i1I} = j_{i31}\ddot{x}_{iH} + j_{i32}\ddot{y}_{iH} + j_{i33}\ddot{\theta}_{i1} + j_{i34}\ddot{\theta}_{i2} + j_{i35}\ddot{\theta}_{i3} \quad (\text{D.11c})$$

$$\tau_{i2I} = j_{i41}\ddot{x}_{iH} + j_{i42}\ddot{y}_{iH} + j_{i43}\ddot{\theta}_{i1} + j_{i44}\ddot{\theta}_{i2} + j_{i45}\ddot{\theta}_{i3} \quad (\text{D.11d})$$

$$\tau_{i3I} = j_{i51}\ddot{x}_{iH} + j_{i52}\ddot{y}_{iH} + j_{i53}\ddot{\theta}_{i1} + j_{i54}\ddot{\theta}_{i2} + j_{i55}\ddot{\theta}_{i3} \quad (\text{D.11e})$$

Sendo:

$$\begin{aligned} j_{i11} &= M_{iB} + M_{i1} + M_{i2} + M_{i3} + M_{if} \\ j_{i12} &= 0 \\ j_{i13} &= -(M_{i1}r_{i1} + M_{i2}L_{i1} + M_{if}L_{i1})S_1 - (M_{i2}r_{i2} + M_{if}L_{i2})S_{12} - M_{if}r_{i3}S_{123} \\ j_{i14} &= -(M_{i2}r_{i2} + M_{if}L_{i2})S_{12} - M_{if}r_{i3}S_{123} \\ j_{i15} &= -M_{if}r_{i3}S_{123} \end{aligned} \quad (\text{D.12a})$$

$$\begin{aligned} j_{i21} &= 0 \\ j_{i22} &= M_{iB} + M_{i1} + M_{i2} + M_{i3} + M_{if} \\ j_{i23} &= (M_{i1}r_{i1} + M_{i2}L_{i1} + M_{if}L_{i1})C_1 + (M_{i2}r_{i2} + M_{if}L_{i2})C_{12} + M_{if}r_{i3}C_{123} \\ j_{i24} &= (M_{i2}r_{i2} + M_{if}L_{i2})C_{12} + M_{if}r_{i3}C_{123} \\ j_{i25} &= M_{if}r_{i3}C_{123} \end{aligned} \quad (\text{D.12b})$$

$$\begin{aligned}
\dot{J}_{i31} &= \dot{J}_{i13} \\
\dot{J}_{i32} &= \dot{J}_{i23} \\
\dot{J}_{i33} &= M_{i1}r_{i1}^2 + M_{i2}r_{i2}^2 + M_{i2}L_{i1}^2 + M_{if}L_{i1}^2 + M_{if}L_{i2}^2 + M_{if}r_{i3}^2 \\
&\quad + 2\left(M_{i2}L_{i1}r_{i2} + M_{if}L_{i1}L_{i2}\right)C_2 + 2M_{if}L_{i1}r_{i3}C_{23} + 2M_{if}L_{i2}r_{i3}C_3
\end{aligned} \tag{D.12c}$$

$$\begin{aligned}
\dot{J}_{i34} &= M_{i2}r_{i2}^2 + M_{if}L_{i2}^2 + M_{if}r_{i3}^2 + \left(M_{i2}L_{i1}r_{i2} + M_{if}L_{i1}L_{i2}\right)C_2 \\
&\quad + M_{if}L_{i1}r_{i3}C_{23} + 2M_{if}L_{i2}r_{i3}C_3 \\
\dot{J}_{i35} &= M_{if}r_{i3}^2 + \left(M_{i2}L_{i1}r_{i2} + M_{if}L_{i1}L_{i2}\right)C_2 + M_{if}L_{i1}r_{i3}C_{23} + M_{if}L_{i2}r_{i3}C_3
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{J}_{i41} &= \dot{J}_{i14} \\
\dot{J}_{i42} &= \dot{J}_{i24} \\
\dot{J}_{i43} &= \dot{J}_{i34} \\
\dot{J}_{i44} &= M_{i2}r_{i2}^2 + M_{if}L_{i2}^2 + M_{if}r_{i3}^2 + 2M_{if}L_{i2}r_{i3}C_3 \\
\dot{J}_{i45} &= M_{if}r_{i3}^2 + M_{if}L_{i2}r_{i3}C_3
\end{aligned} \tag{D.12d}$$

$$\begin{aligned}
\dot{J}_{i51} &= \dot{J}_{i15} \\
\dot{J}_{i52} &= \dot{J}_{i25} \\
\dot{J}_{i53} &= \dot{J}_{i35} \\
\dot{J}_{i54} &= \dot{J}_{i45} \\
\dot{J}_{i55} &= M_{if}r_{i3}^2
\end{aligned} \tag{D.12e}$$

Quanto aos termos Coriolis/Centrípetos da equação da dinâmica inversa do robô, estes são dados por:

$$\begin{aligned}
f_{ixCC} &= -\left(\left(M_{i1}r_{i1} + M_{i2}L_{i1} + M_{if}L_{i1}\right)C_1 + \left(M_{i2}r_{i2} + M_{if}L_{i2}\right)C_{12} + M_{if}r_{i3}C_{123}\right)\dot{\theta}_1^2 \\
&\quad - \left(\left(M_{i2}r_{i2} + M_{if}L_{i2}\right)C_{12} + M_{if}r_{i3}C_{123}\right)\dot{\theta}_2^2 - M_{if}r_{i3}C_{123}\dot{\theta}_3^2 \\
&\quad - 2\left(\left(M_{i2}r_{i2} + M_{if}L_{i2}\right)C_{12} + M_{if}r_{i3}C_{123}\right)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\
&\quad - 2\left(M_{if}r_{i3}C_{123}\right)\dot{\theta}_1\dot{\theta}_3 - 2\left(M_{if}r_{i3}C_{123}\right)\dot{\theta}_2\dot{\theta}_3
\end{aligned} \tag{D.13a}$$

$$\begin{aligned}
f_{iyCC} = & -\left(\left(M_{i1}r_{i1}+M_{i2}L_{i1}+M_{if}L_{i1}\right)S_1+\left(M_{i2}r_{i2}+M_{if}L_{i2}\right)S_{12}+M_{if}r_{i3}S_{123}\right)\dot{\theta}_{i1}^2 \\
& -\left(\left(M_{i2}r_{i2}+M_{if}L_{i2}\right)S_{12}+M_{if}r_{i3}S_{123}\right)\dot{\theta}_{i2}^2 - M_{if}r_{i3}S_{123}\dot{\theta}_{i3}^2 \\
& -2\left(\left(M_{i2}r_{i2}+M_{if}L_{i2}\right)S_{12}+M_{if}r_{i3}S_{123}\right)\dot{\theta}_{i1}\dot{\theta}_{i2} \\
& -2\left(M_{if}r_{i3}S_{123}\right)\dot{\theta}_{i1}\dot{\theta}_{i3} - 2\left(M_{if}r_{i3}S_{123}\right)\dot{\theta}_{i2}\dot{\theta}_{i3}
\end{aligned} \tag{D.13b}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{i1CC} = & -2\left(\left(M_{i2}L_{i1}r_{i2}+M_{if}L_{i1}L_{i2}\right)S_2+2M_{if}L_{i1}r_{i3}S_{23}\right)\dot{\theta}_{i1}\dot{\theta}_{i2} \\
& -2\left(M_{if}L_{i1}r_{i3}S_{23}+M_{if}L_{i2}r_{i3}S_3\right)\dot{\theta}_{i1}\dot{\theta}_{i3} \\
& -\left(\left(M_{i2}L_{i1}r_{i2}+M_{if}L_{i1}L_{i2}\right)S_2+M_{if}L_{i1}r_{i3}S_{23}\right)\dot{\theta}_{i2}^2 \\
& -2\left(M_{if}L_{i1}r_{i3}S_{23}+M_{if}L_{i2}r_{i3}S_3\right)\dot{\theta}_{i2}\dot{\theta}_{i3} \\
& -\left(M_{if}L_{i1}r_{i3}S_{23}+M_{if}L_{i2}r_{i3}S_3\right)\dot{\theta}_{i3}^2
\end{aligned} \tag{D.13c}$$

$$\begin{aligned}
\tau_{i2CC} = & \left(\left(M_{i2}L_{i1}r_{i2}+M_{if}L_{i1}L_{i2}\right)S_2+M_{if}L_{i1}r_{i3}S_{23}\right)\dot{\theta}_{i1}^2 - \left(2M_{if}L_{i2}r_{i3}S_3\right)\dot{\theta}_{i1}\dot{\theta}_{i3} \\
& - \left(2M_{if}L_{i2}r_{i3}S_3\right)\dot{\theta}_{i2}\dot{\theta}_{i3} - \left(M_{if}L_{i2}r_{i3}S_3\right)\dot{\theta}_{i3}^2
\end{aligned} \tag{D.13d}$$

$$\tau_{i3CC} = \left(M_{if}L_{i1}r_{i3}S_{23}+M_{if}L_{i2}r_{i3}S_3\right)\dot{\theta}_{i1}^2 + \left(2M_{if}L_{i2}r_{i3}S_3\right)\dot{\theta}_{i1}\dot{\theta}_{i2} + \left(M_{if}L_{i2}r_{i3}S_3\right)\dot{\theta}_{i2}^2 \tag{D.13e}$$

Por último, os termos gravitacionais da equação da dinâmica do robô são dados por:

$$f_{ixG} = 0 \tag{D.14a}$$

$$f_{iyG} = g(M_{iB} + M_{i1} + M_{i2} + M_{if}) \tag{D.14b}$$

$$\tau_{i1G} = g\left(M_{i1}r_{i1}+M_{i2}L_{i1}+M_{if}L_{i1}\right)C_1 + g\left(M_{i2}r_{i2}+M_{if}L_{i2}\right)C_{12} + g\left(M_{if}r_{i3}\right)C_{123} \tag{D.14c}$$

$$\tau_{i2G} = g\left(M_{i2}r_{i2}+M_{if}L_{i2}\right)C_{12} + g\left(M_{if}r_{i3}\right)C_{123} \tag{D.14d}$$

$$\tau_{i3G} = g\left(M_{if}r_{i3}\right)C_{123} \tag{D.14e}$$

Referências

SCIAVICCO, Lorenzo; SICILIANO, Bruno. (1996). *Modeling and Control of Robot Manipulators*. McGraw-Hill International Editions.

Modelação do Contacto do Pé com o Solo

A simulação de sistemas robóticos de locomoção requer invariavelmente a modelação das interacções entre o robô e o ambiente. Este problema tem sido encontrado por diversos autores e o mesmo se verificou durante a realização do presente trabalho, tendo surgido a necessidade de modelar o contacto do pé do robô com o solo. Para este efeito, torna-se necessário a existência de um modelo que seja, por um lado computacionalmente eficiente, de forma a permitir uma simulação rápida dos impactos e, por outro lado, preciso, de forma a permitir uma representação correcta das transições de, e para a, fase de contacto bem como do contacto mantido sob tensão.

Neste trabalho adoptou-se inicialmente um modelo linear do solo, composto por um sistema mola-amortecedor em paralelo, quer na direcção horizontal, quer na direcção vertical. Numa fase posterior do trabalho, e dadas as limitações detectadas neste modelo, optou-se por um sistema mola-amortecedor em paralelo onde a componente devida ao atrito é não linear.

Tendo por base o exposto, na secção seguinte apresentam-se, em linhas gerais, as formulações que têm sido adoptadas para a modelação e simulação de colisões entre corpos rígidos. De seguida, na secção dois, aborda-se o problema específico da modelação e simulação das colisões com o solo e descrevem-se algumas das soluções para a resolução deste problema. Por último, na secção três analisam-se em detalhe os diferentes modelos alternativos implementados neste trabalho.

E.1 Modelação e Simulação de Colisões entre Corpos

A simulação de impactos ou colisões tem sido tipicamente implementada através da aplicação da hipótese dos corpos rígidos (Kraus e Kumar, 1997). Esta hipótese requer a modelação dos impactos como acontecimentos instantâneos que envolvem forças de contacto impulsivas (Hardt, 1999).

No caso mais simples, em que ocorre o impacto de dois objectos em movimento de translação puro, o resultado da hipótese de corpos rígidos é dado por:

$$v_o = -\varepsilon v_i \quad (\text{E.1})$$

onde ε é o coeficiente de restituição, v_i é a velocidade relativa antes da colisão e v_o é a velocidade relativa após a colisão. O coeficiente de restituição é tratado como uma constante que é obtida empiricamente existindo, no entanto, diversas aproximações para definir o seu valor (Marhefka e Orin, 1996; Kraus e Kumar, 1997).

No entanto esta hipótese apresenta duas incongruências físicas e matemáticas (Marhefka e Orin, 1996; Kraus e Kumar, 1997): em primeiro lugar, quando utilizada com atrito de Coulomb surgem situações em que ou não existe solução ou existem múltiplas soluções; em segundo lugar, o princípio da conservação da energia pode ser violado em impactos com atrito. Para além dos problemas acabados de referir, ainda existem outros tais como a incerteza dos coeficientes de restituição dos corpos rígidos para uma colisão particular, a dificuldade de modelar as transições de, e para o, contacto sustentado, o desprezar das propriedades de complacência das superfícies em contacto e a necessidade de considerar as forças efectivas ao invés da aproximação das forças impulsivas.

Os problemas acabados de descrever, associados à aplicação da hipótese dos corpos rígidos, motivaram o desenvolvimento de modelos de contacto alternativos, em particular com complacência, para utilização em simulação.

Os modelos de contacto considerando a complacência das superfícies, geralmente obtêm as forças de interacção através da combinação de uma mola e de um atrito em paralelo, entre as superfícies de contacto. A força de interacção entre os objectos em contacto é dada pela expressão:

$$f = -B\dot{x} - Kx \quad (\text{E.2})$$

onde x é a profundidade de penetração, B é o coeficiente de atrito viscoso e K é o coeficiente de elasticidade das superfícies em contacto.

E.2 Modelação da Interação Pé-Solo

O contacto dos pés do robô com o solo pode ser modelado e analisado através de diferentes pontos de vista conduzindo assim a modelos distintos. Um método considera as relações exactas entre a força e a deformação do solo. Outro método, sob restrições particulares, passa pela utilização de modelos aproximados da deformação do solo baseados nos estudos de mecânica dos solos.

E.2.1 Modelação Recorrendo às Relações Força-Deformação

Um exemplo da primeira aproximação foi utilizado por Bekker (1969) que relaciona a depressão vertical e a pressão local normal à superfície do solo através de uma função exponencial. Bekker relaciona a deformação horizontal com a tensão de cisalhamento local à superfície do solo utilizando uma razão de funções exponenciais. Outro exemplo foi dado por Manko (1992), que modela as interações pé-solo através de relações de força-deformação, para diferentes condições de carga em superfícies planas e inclinadas. Manko utiliza uma equação bilinear para modelar a interação pé-solo segundo a direcção vertical enquanto que as forças de interação laterais são modeladas recorrendo a uma expressão descrevendo uma transição exponencial para a equação de Coulomb.

Mais recentemente, Ingvast (2002) apresentou um modelo de interação do pé do robô com o solo, especialmente indicado para solos com características plásticas, e baseado no modelo de Bekker (1969).

Por outro lado, Grand, *et al.* (2001) implementaram no seu simulador de veículos planetários um módulo dedicado à simulação do contacto entre o veículo e o solo, suposto granular (por exemplo, composto maioritariamente por areia). O modelo apresentado por estes autores encontra-se dividido em três partes: a detecção de colisões (que determina a força normal de contacto), um modelo de atrito (que determina a força tangencial) e a

deformação do solo e do objecto devido às forças de contacto. Para a detecção de colisões, recorrem a um modelo de deformação elástica do solo baseado nos estudos da mecânica dos solos (testes triaxiais). Estes testes de carga do solo permitem construir curvas da deformação do solo quando sujeito a forças verticais. O modelo matemático destas curvas permite depois calcular a força de reacção normal devido à acção do robô. Para o modelo do atrito recorrem à lei de Coulomb, que relaciona a força normal com a força tangencial num dado ponto através da velocidade de deslocamento relativa entre os dois corpos em contacto.

E.2.2 Modelação Recorrendo a Sistemas Lineares Mola-Amortecedor

A segunda aproximação modela a interacção pé-solo através de um sistema linear (Figura E.1) com amortecimento $B_{\eta F}$ e elasticidade $K_{\eta F}$ ($\eta = \{x, y\}$) nas direcções {horizontal, vertical}, respectivamente, de acordo com as equações (Lambe e Whitman, 1969):

$$\begin{aligned} f_{ixF} &= -K_{xF} \Delta_{ixF0} - B_{xF} \dot{\Delta}_{ixF0} \\ \Delta_{ixF0} &= x_{iF} - x_{iF0}, \dot{\Delta}_{ixF0} = \dot{x}_{iF} - \dot{x}_{iF0} \end{aligned} \quad (\text{E.3a})$$

$$\begin{aligned} f_{iyF} &= -K_{yF} \Delta_{iyF0} - B_{yF} \dot{\Delta}_{iyF0} \\ \Delta_{iyF0} &= y_{iF} - y_{iF0}, \dot{\Delta}_{iyF0} = \dot{y}_{iF} - \dot{y}_{iF0} \end{aligned} \quad (\text{E.3b})$$

sendo x_{iF0} e y_{iF0} as coordenadas de colocação do pé i no solo.

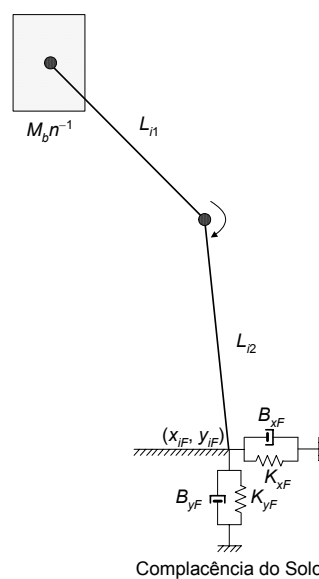


Figura E.1: Modelo massa-mola-amortecedor da interacção pé-solo.

Este modelo, com características muito simples, tem sido adoptado por diversos autores em diferentes aplicações de simulação das forças de reacção dos pés quando em contacto com o solo. Entre elas, foi adoptado para o caso de robôs bípedes (Taga, 1995), humanóides (Yamasaki, *et al.*, 2002), quadrúpedes (Lee, *et al.*, 1998) e quadrúpedes em corrida (Marhefka e Orin, 2000). Além disso, foi também utilizado para modelar a locomoção do ouriço-cacheiro (Villanova, *et al.*, 2000). Neste caso, os sistemas mola-amortecedor encontram-se espalhados sobre a superfície de cada pé de forma a permitirem modelar a complacência completa da perna em conjunto com o grau de elasticidade do solo: cinco destes sistemas estão colocados por baixo das juntas situadas entre as fálanges e os metacarpos e três outros encontram-se colocados debaixo das extremidades dos três dedos do meio. Desta forma o contacto com o solo é simulado através de um contacto distribuído ao invés de o ser através de um contacto pontual no plano. Esta opção foi escolhida para melhor representar a evolução da situação do pé no solo e as forças que este aplica durante a locomoção.

Por último, é de referir que este modelo tem sido também utilizado na simulação do contacto com o solo de veículos que se deslocam através de rodas. A título meramente exemplificativo, refira-se que Talukder, *et al.* (2002) utilizam este modelo, em conjunto com o modelo da suspensão de um veículo robotizado com rodas para determinar a máxima velocidade que o robô pode alcançar, ao deslocar-se sobre diferentes tipos de terreno e ultrapassando diferentes tipos de obstáculos, sem perder o contacto com o solo.

Uma versão ligeiramente melhorada deste modelo (Kraus e Kumar, 1997), considerando a hipótese de haver escorregamento do pé quando a força de reacção do solo, segundo a direcção horizontal, ultrapassa o limite da máxima força de atrito estático, foi adoptada por Hwang, *et al.* (2003) e Endo, *et al.* (2004). Estes autores, que recorrem a este modelo para simular as forças de reacção do pé de um robô humanóide quando em contacto com o solo, consideram que se se verificar a condição:

$$f_{ixF} = -K_{xF}\Delta_{ixF0} - B_{xF}\dot{\Delta}_{ixF0} > \mu_S f_{iyF} \quad (\text{E.4})$$

em que μ_S é a coeficiente de atrito estático, ocorre escorregamento do pé do robô, passando a força segundo a direcção horizontal a ser calculada de acordo com a expressão:

$$f_{ixF} = \mu_d f_{iyF} \quad (\text{E.5})$$

onde μ_d é o coeficiente de atrito dinâmico.

No que diz respeito aos valores dos parâmetros para este modelo, sendo B o coeficiente de atrito viscoso e K o coeficiente de elasticidade da mola, têm também sido seguidas diferentes aproximações.

Taga (1995) adopta valores idênticos para os parâmetros independentemente da direcção da força ($K_{\eta F} = 30000,0 \text{ Nm}^{-1}$ e $B_{\eta F} = 1000,0 \text{ Nsm}^{-1}$). Lee, *et al.* (1998) adoptam valores numéricos para os parâmetros ($K_{\eta F} = 150000,0 \text{ Nm}^{-1}$ e $B_{\eta F} = 2000,0 \text{ Nsm}^{-1}$) de forma que as forças nos pés do robô sejam idênticas à solução pseudo-inversa para o mesmo modelo considerando cadeias cinemáticas fechadas. Já Endo, *et al.* (2004) estabelecem os seguintes valores para os parâmetros: $K_{xF} = 3000,0$ e $B_{xF} = 10,0$ (parâmetros na direcção horizontal) e $K_{yF} = 30000,0$ e $B_{yF} = 100,0$ (parâmetros na direcção vertical).

Outra aproximação, utilizada neste trabalho, calcula os valores para os parâmetros tendo por base os estudos de mecânica dos solos. Os parâmetros são dados por (Lambe e Whitman, 1969):

$$K_{xF} = 2(1 + \mu)G\beta_x\sqrt{BL} \quad (\text{E.6a})$$

$$K_{yF} = \frac{G}{1 - \mu}\beta_y\sqrt{BL} \quad (\text{E.6b})$$

sendo μ a razão de Poisson (que varia entre 0,35, para solos pouco saturados, e 0,5, para solos completamente saturados), B é a largura da zona de contacto do pé com o solo e L o correspondente comprimento. Os valores de β_x e β_y são extraídos a partir de tabelas de valores pré-calculados como funções de L/B . Finalmente, G é o módulo de cisalhamento e é calculado usando a expressão:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (\text{E.7})$$

Tabela E.1: Módulo de Young de diferentes tipos de solo.

Tipo de Solo	Módulo de Young (kNm⁻²)
Cimento	30000000
Madeira	13000000
Saibro	100000 – 200000
Areia	10000 – 80000
Argila Compacta	3000 – 15000
Argila Solta	500 – 3000
Turfa	100 – 500

onde E é o módulo de Young de elasticidade do tipo de solo. Os valores do módulo de Young de elasticidade de alguns tipos de solo mais comuns encontram-se apresentados na Tabela E.1 (extraído de Suvinen, *et al.* (2003)).

No que diz respeito aos valores do amortecimento (B_{xF} e B_{yF}) estes podem ser calculados considerando que as expressões apresentadas acima se aplicam a um sistema massa-mola-amortecedor cujos coeficientes de amortecimento são extraídos de tabelas de valores pré-calculados dadas por Lambe e Whitman (1969) como funções de b :

$$b = \frac{M}{\rho R^3} \quad (\text{E.8})$$

sendo M a massa equivalente do sistema em consideração (no nosso caso $M_{bn^{-1}}$), ρ a densidade de massa do solo (Lambe e Whitman, 1969; Suvinen, *et al.*, 2003) e R o raio equivalente da área de contacto do pé com o solo. Para as dimensões típicas do robô em consideração, o coeficiente de amortecimento do solo quer na direcção horizontal quer na vertical é $\zeta < 0,15$.

Tendo por base as equações anteriores, a Tabela E.2 apresenta os valores para os parâmetros do modelo do solo de solos tipicamente encontrados na natureza e em ambientes habitados.

E.2.3 Modelação Recorrendo a Sistemas Não Lineares Mola-Amortecedor

Apesar de computacionalmente simples, o modelo linear de interacção pé-solo apresenta várias debilidades (Marhefka e Orin, 1996).

Tabela E.2: Parâmetros do modelo do solo para diferentes tipos de solo.

Tipo de Solo	K_{xF} (Nm ⁻¹)	B_{xF} (Nsm ⁻¹)	K_{yF} (Nm ⁻¹)	B_{yF} (Nsm ⁻¹)
Cimento	2604304130	153097	3410398265	175196
Madeira	1128531790	100781	1477839248	115328
Saibro	17362028	12500	22735988	14305
Areia	6944811	7906	9094395	9047
Argila Compacta	1302152	3423	1705199	3917
Argila Solta	260430	1531	341040	1752
Turfa	43405	625	56840	715

A primeira contradição resulta do facto da força de contacto ser descontínua no momento do impacto. Antes do impacto, a força é zero. Imediatamente após o impacto, a componente da força devido à mola ainda é zero, mas a componente devida ao atrito viscoso é aplicada instantaneamente e, portanto, salta do valor zero para $-B_{\eta F} \dot{\eta}$. Fisicamente, tem-se a intuição que as forças de interacção devem partir do zero e ir crescendo ao longo do tempo.

A segunda inconsistência prende-se com o facto de o modelo permitir não só forças devidas à compressão no ponto de contacto, mas também forças que tendem a manter os objectos colados. De facto, esta força de tensão surge sempre antes da separação. À medida que os objectos se separam, η_{iF} tende para η_{iF0} e o termo $\dot{\Delta}_{\eta F0} = \dot{\eta}_{iF} - \dot{\eta}_{iF0}$ será negativo e diferente de zero. A força resultante imediatamente antes da separação será então $-B_{\eta F} (\dot{\eta}_{iF} - \dot{\eta}_{iF0}) = -B_{\eta F} v_o$, a força de tensão segurando os objectos em contacto. Na maioria dos casos os efeitos deste problema podem ser ultrapassados igualando estas forças a zero quando surgem.

Uma última fraqueza é a dependência do coeficiente de restituição da massa dos corpos em impacto e a falta de dependência com a velocidade de impacto. Esta debilidade do modelo deve-se ao facto do coeficiente de restituição ser uma propriedade intrínseca do material, logo não deverá depender da sua massa. No entanto, deverá depender da velocidade de impacto.

Uma solução para estas imperfeições foi proposta por Hunt e Crossley (1975) e passa por substituir a combinação paralelo mola-amortecedor linear por uma não linear resultante da combinação de uma mola e de um atrito não lineares, de acordo com a expressão seguinte:

$$f = -(\lambda x^\nu) \dot{x} - Kx^\nu \quad (\text{E.9})$$

onde o expoente ν , obtido a partir do modelo de contacto Hertziano (Kraus e Kumar, 1997), é geralmente próximo de um e depende da geometria da superfície de impacto e o parâmetro λ é calculado recorrendo à expressão (E.11). Neste modelo, para além da componente da força da mola poder ser não linear, o principal efeito resulta do facto do amortecimento ser dependente da profundidade de penetração. Isto tem significado físico pois o amortecimento aumenta com a profundidade de penetração uma vez que entra em contacto uma maior área dos corpos. Adicionalmente, após o contacto, as forças evoluem de forma contínua. A dependência dos termos de amortecimento e de elasticidade com a profundidade de penetração, faz com que a força de contacto aumente desde o valor zero, imediatamente após o contacto, e retorne a zero, imediatamente antes da separação dos corpos.

Uma outra vantagem deste modelo resulta do facto das forças de tensão, que tendem a manter os corpos unidos, não surgirem na maioria das situações. Neste caso, as forças de tensão só surgem quando uma força externa separa os corpos a elevadas velocidades.

Hunt e Crossley (1975) demonstraram também que o coeficiente de restituição pode ser dado pela expressão seguinte:

$$\varepsilon = 1 - \sigma v_i \quad (\text{E.10})$$

para valores suficientemente pequenos de σ (parâmetro que depende da variação do coeficiente de restituição com a velocidade de impacto) e v_i através da seguinte escolha do valor do parâmetro λ :

$$\lambda = \frac{3}{2} \sigma K \quad (\text{E.11})$$

Este modelo não linear de contacto, com a escolha do parâmetro λ indicada na expressão anterior, não só fornece a desejada relação linear entre o coeficiente de restituição e a velocidade relativa antes da colisão para reduzidas velocidades de impacto, como também exhibe outras propriedades importantes a velocidades de impacto mais elevadas onde a relação linear não se verifica (Marhefka e Orin, 1996).

Este modelo permite assim ultrapassar muitos dos problemas do modelo de contacto linear, ao mesmo tempo que mantém a sua simplicidade computacional, tendo sido utilizado em diversos estudos de simulação na área da robótica de locomoção, quer isolado (Park e Kwon, 2001; Hirukawa, *et al.*, 2003), quer combinado com o modelo linear (Park e Chung, 2000).

Enquanto Hunt e Crossley (1975) recorrem à utilização de elementos com elasticidade e atrito não linear, neste trabalho (assim como no trabalho apresentado por Silva (2002) relativo à modelação de um robô bípede) adopta-se uma estratégia mista, ou seja, modela-se o contacto do i -ésimo pé do robô com o solo através de uma mola linear com coeficiente de elasticidade $K_{\eta F}$ e um atrito não linear com coeficiente de amortecimento viscoso $B'_{\eta F}$ ($\eta = \{x, y\}$) nas direcções {horizontal, vertical}, respectivamente, levando a:

$$f_{ixF} = -K_{xF}\Delta_{ixF0} - B'_{xF}(-\Delta_{iyF0})\dot{\Delta}_{ixF0} \quad (\text{E.12a})$$

$$f_{iyF} = -K_{yF}\Delta_{iyF0} - B'_{yF}(-\Delta_{iyF0})^v \dot{\Delta}_{iyF0} \quad (\text{E.12b})$$

em que v é um parâmetro dependente das características do solo (Hunt e Crossley, 1975).

De forma a converter os parâmetros deste modelo de interacção pé-solo não linear (B'_{xF} , B'_{yF}) para os parâmetros do modelo linear (B_{xF} , B_{yF}), descrito pela equação (E.3), utilizam-se as seguintes relações:

$$-B'_{xF}(-\Delta_{iyFMax}) = -B_{xF} \quad (\text{E.13a})$$

$$-B'_{yF}(-\Delta_{iyFMax})^v = -B_{yF} \quad (\text{E.13b})$$

sendo Δ_{iyFMax} a máxima profundidade a que o pé do robô penetra no solo.

E.2.4 Modelos Alternativos para Modelar e Simular a Interacção Pé-Solo

Um modelo ligeiramente diferente do visto na subsecção anterior é o apresentado por Plestan (2002). Este autor recorre a um sistema mola-amortecedor não linear para calcular a força normal de reacção do solo durante a interacção do pé de um robô bípede com o solo. Para calcular a força tangencial (f_{ixF}) utiliza o modelo de atrito, sendo esta força dada por:

$$f_{ixF} = \mu |f_{iyF}| \quad (\text{E.14})$$

onde μ é o coeficiente de atrito e f_{iyF} a força de reacção normal do solo.

Por último, Huang, *et al.* (2000) recorrem a um conjunto de expressões para obter a força de reacção do solo que entram em consideração com o módulo de Young, com o coeficiente de restituição e com a velocidade de penetração do pé. A partir da força de reacção do solo, obtêm a força de atrito f_{ixF} através da seguinte expressão:

$$f_{ixF} = \mu f_{iyF} \quad (\text{E.15})$$

em que μ é o coeficiente de atrito nominal e f_{iyF} a força de reacção normal do solo.

E.3 Modelos Implementados Para a Simulação da Interação Pé-Solo

Tendo por base as alternativas descritas na secção anterior, no decurso deste trabalho foram implementados diferentes modelos para simular a interacção entre o pé do robô e o solo. Numa primeira fase, adoptou-se um modelo linear do solo, composto por um sistema mola-amortecedor em paralelo, quer na direcção horizontal, quer na direcção vertical, de acordo com o descrito na subsecção E.2.2 deste Anexo. Numa segunda fase do trabalho, e dadas as limitações detectadas no modelo linear, optou-se por um modelo mola-amortecedor em paralelo, mas em que a componente devida ao atrito é não linear, tal como descrito na subsecção E.2.3 anterior.

Nestes dois modelos iniciais considera-se que o solo, na fase de recuperação da sua forma original após o pé deixar de o pressionar, apresenta um comportamento puramente cinemático acompanhando a trajectória do pé. Numa fase posterior, estes dois modelos foram melhorados através da implementação de um modelo dinâmico para o comportamento do solo. Este modelo é capaz de descrever o comportamento do solo, durante a recuperação da sua forma inicial após ter sido calcado, de forma mais precisa.

E.3.1 Modelo Cinemático Linear da Interação Pé-Solo

O primeiro modelo adoptado para simular o comportamento da interacção do pé do robô com o solo é denominado de modelo cinemático linear.

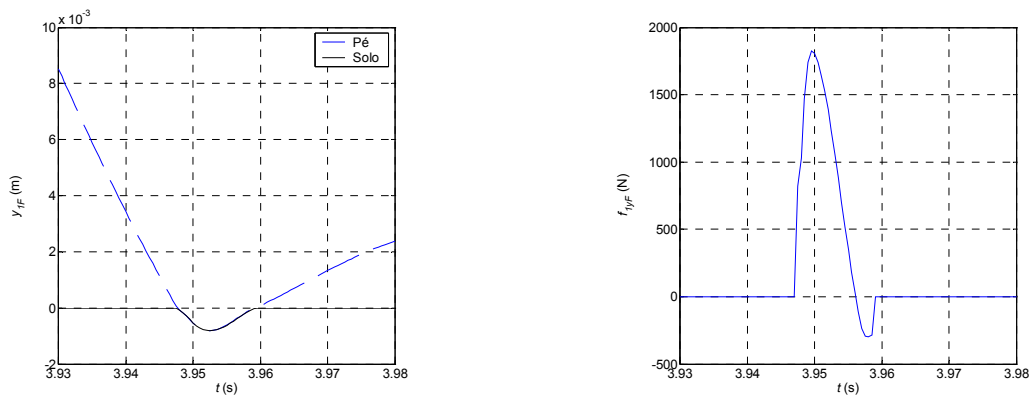


Figura E.2: Evolução temporal da coordenada do pé $y_{1F}(t)$ e da força de reacção do solo $f_{1yF}(t)$ para o caso do modelo cinemático linear de interacção pé-solo, considerando o solo de argila compacta.

Neste caso, descreve-se o comportamento do solo através de um sistema linear mola-amortecedor em paralelo, quer na direcção horizontal, quer na direcção vertical, de acordo com o descrito na subsecção E.2.2 deste Anexo. Os parâmetros adoptados para este modelo são os apresentados na Tabela E.2, determinados recorrendo a estudos da mecânica dos solos. Neste primeiro modelo considera-se também que a recuperação do estado inicial do solo, após ter sido pisado, é instantâneo e definido unicamente pelo comportamento do pé do robô.

Da observação da Figura E.2, que apresenta os gráficos da evolução temporal da coordenada do pé $y_{1F}(t)$ e da força de reacção do solo $f_{1yF}(t)$, é possível identificar os problemas que este modelo apresenta e que foram anteriormente referidos.

No gráfico que apresenta a evolução temporal da força de reacção do solo $f_{1yF}(t)$, por volta do instante $t \approx 3,946$ s, é visível a descontinuidade da força de contacto no momento do impacto. Antes do impacto, a força é zero. Imediatamente após o impacto, a força de reacção do solo salta de zero para $f_{1yF}(t) \approx 800,0$ N. É também notório, que pouco depois do impacto do pé com o solo surge um ricochete do pé, para $t \approx 3,955$ s, e neste instante a força de reacção do solo $f_{1yF}(t)$ toma um valor negativo, o que significa fisicamente que esta força está a tentar manter os objectos em contacto (pé do robô e solo) colados.

Por último, é visível no gráfico da evolução temporal da coordenada do pé $y_{1F}(t)$ que sempre que o solo está a ser pisado acompanha a trajectória do pé do robô, tanto durante a fase de compressão, como na fase de expansão. Isto deve-se ao facto de, no caso deste modelo, termos considerado um comportamento cinemático para o solo.

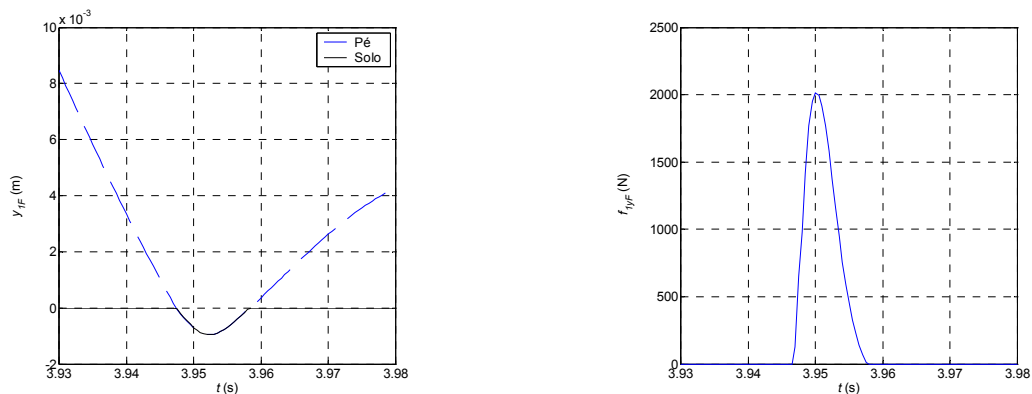


Figura E.3: Evolução temporal da coordenada do pé $y_{1F}(t)$ e da força de reacção do solo $f_{1yF}(t)$ para o caso do modelo cinemático não linear de interacção pé-solo, considerando o solo de argila compacta.

E.3.2 Modelo Cinemático Não Linear da Interação Pé-Solo

Dadas as limitações detectadas no modelo linear para simular o comportamento da interacção do pé do robô com o solo implementou-se, numa segunda fase do trabalho, um outro modelo denominado de modelo cinemático não linear.

Este modelo também recorre a um sistema mola-amortecedor em paralelo, quer na direcção horizontal, quer na direcção vertical, mas neste caso a componente devida ao atrito é não linear tal como o seu nome indica (e foi descrito anteriormente na subsecção E.2.3). Relativamente aos parâmetros adoptados para este modelo, eles são determinados a partir dos valores apresentados na Tabela E.2, aplicando as expressões (E.13a) e (E.13b). Nestas equações, considera-se para Δ_{iyFMax} o valor da máxima profundidade que o pé do robô penetra no solo que é obtido quando se adopta o modelo cinemático linear de forma a obter-se um comportamento equivalente entre os modelos linear e não linear ($\Delta_{iyFMax} \approx 1,0 \times 10^{-3}$ m).

Por último, neste modelo considera-se também que a recuperação do estado inicial do solo, após ter sido pisado, é instantâneo e definido unicamente pelo comportamento do pé do robô.

Analisando a Figura E.3, que apresenta os gráficos da evolução temporal da coordenada do pé $y_{1F}(t)$ e da força de reacção do solo $f_{1yF}(t)$, é possível concluir que os problemas referidos na subsecção anterior para o modelo cinemático linear são ultrapassados.

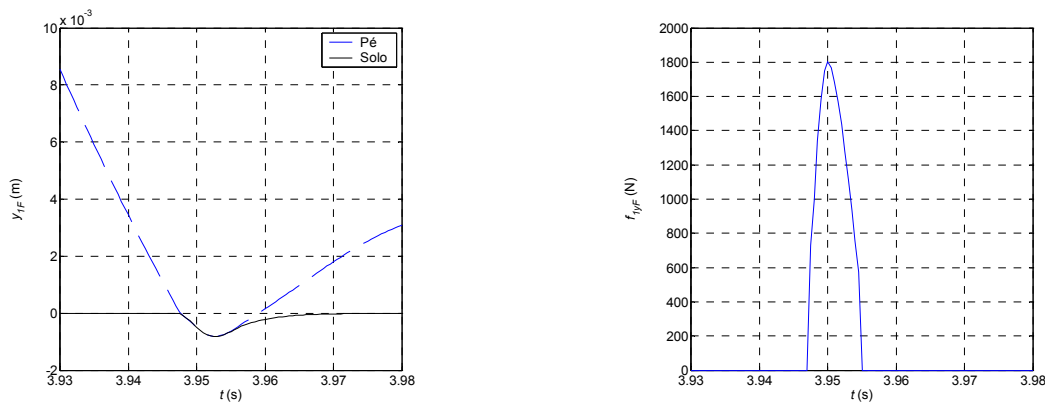


Figura E.4: Evolução temporal da coordenada do pé $y_{1F}(t)$ e da força de reacção do solo $f_{1yF}(t)$ para o caso do modelo dinâmico linear de interacção pé-solo, considerando o solo de argila compacta.

Da observação do gráfico que apresenta a evolução temporal da força de reacção do solo $f_{1yF}(t)$, verifica-se que aquando do impacto do pé com o solo (por volta do instante $t \approx 3,946$ s) a força de contacto evolui de forma contínua desde o zero até $f_{1yF}(t) \approx 2000,0$ N, instantes depois do impacto. É ainda possível observar que, apesar de continuar a existir ricochete do pé pouco depois do impacto com o solo (para $t \approx 3,955$ s), a força de reacção do solo $f_{1yF}(t)$ não toma valores negativos.

No entanto, neste caso, e uma vez que se mantém o comportamento cinemático para o solo, é visível no gráfico da evolução temporal da coordenada do pé $y_{1F}(t)$ que sempre que o solo está a ser pisado acompanha a trajectória do pé do robô, tanto durante a fase de compressão, como na fase de expansão.

E.3.3 Modelos Dinâmicos Linear e Não Linear da Interacção Pé-Solo

Por último, os dois modelos acabados de apresentar foram melhorados através da adopção de um modelo dinâmico para descrever o comportamento do solo de forma mais exacta, durante a recuperação da sua forma inicial após ter sido pisado.

Através da observação do gráfico da evolução temporal da coordenada do pé $y_{1F}(t)$, apresentado na Figura E.4, para o caso do modelo dinâmico linear, é visível que quando o pé do robô está a ser levantado do solo a grande velocidade (para $t \approx 3,955$ s), existem intervalos de tempo em que o solo não acompanha o pé. Isto deve-se ao facto de, no caso destes modelos

em que foi considerado um comportamento dinâmico para o solo, se entrar em consideração com as diferentes constantes de tempo dos subsistemas robô e solo.

Os modelos descritos nesta secção após terem sido testados foram abandonados uma vez que a complexidade computacional acrescida, em particular no caso do modelo dinâmico não linear, não traz benefícios que justifiquem a sua utilização.

Convém referir que, apesar destes modelos descreverem de forma dinâmica o comportamento do solo, existem ainda certos detalhes que não são correctamente modelados em qualquer um dos quatro modelos apresentados. Como exemplo, refira-se o facto de nenhum destes modelos considerar a existência de deformações permanentes no solo após este ter sido pisado nem as diferentes deformações e comportamentos que o solo apresenta quando é repetidamente pisado por diferentes pernas do robô. Este é, por exemplo, o caso que ocorre quando o robô adopta um padrão de locomoção seguidor do líder, em que cada pé é colocado no local deixado livre por um dos pés das pernas da frente.

Referências

- BEKKER, M. G.. (1969). *Introduction to Terrain Vehicle Systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
- ENDO, Gen; MORIMOTO, Jun; NAKANISHI, Jun; CHENG, Gordon. (2004). “An Empirical Exploration of a Neural Oscillator for Biped Locomotion Control”. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3036 – 3042.
- GRAND, C.; AMAR, F. BEN; BIDAUD, P.; ANDRADE, G.. (2001). “A Simulation System for Behaviour Evaluation of Off-Road Mobile Robots”. In: *Proceedings CLAWAR'2001 – 4th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 307 – 314.
- HARDT, M.. (1999). *Multibody Dynamical Algorithms, Numerical Optimal Control, With Detailed Studies in the Control of Jet Engine Compressors and Biped Walking*. PhD. Thesis. UCSD – Department of Electrical Engineering, La Jolla, CA.
- HIRUKAWA, Hirohisa; KANEHIRO, Fumio; KAJITA, Shuji; FUJIWARA, Kiyoshi; YOKOI, Kazuhito; KANEKO, Kenji; HARADA, Kensuke. (2003). “Experimental Evaluation of the Dynamic Simulation of Biped Walking of Humanoid Robots”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1640 – 1645.
- HUANG, Qiang; NAKAMURA, Yoshihiko; ARAI, Hirohiko; TANIE, Kazuo. (2000). “Development of a Biped Humanoid Simulator”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1936 – 1942.
- HUNT, K. H.; CROSSLEY, F. R. E.. (1975). “Coefficient of Restitution Interpreted as Damping in Vibroimpact”. *Transactions of the ASME: Journal of Applied Mechanics*. pp. 440 – 445.
- HWANG, Yoonkwon; INOHIRA, Eiichi; KONNO, Atsushi; UCHIYAMA, Masaru. (2003). “An Order n Dynamic Simulator for a Humanoid Robot With a Virtual Spring-Damper Contact Model”. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 31 – 36.
- INGVAST, J.. (2002). “A Two-Dimensional Bi-Directional Ground Interaction Model”. In: *Proceedings CLAWAR'2002 – 5th International Conference on Climbing and Walking Robots*; pp. 547 – 554.
- KRAUS, Peter R.; KUMAR, Vijay. (1997). “Compliant Contact Models for Rigid Body Collisions”. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1382 – 1387.

LAMBE, T. William; WHITMAN, Robert V.. (1969). *Soil Mechanics, SI Version*. John Wiley & Sons. pp. 227 – 232.

LEE, Kwang-Pyo; KOO, Tae-Wan; YOON, Yong-San. (1998). “Real-Time Dynamic Simulation of Quadruped Using Modified Velocity Transformation”. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1701 – 1706.

MANKO, David J.. (1992). *A General Model of Legged Locomotion on Natural Terrain*. Kluwer Academic Publishers.

MARHEFKA, Duane W.; ORIN, David E.. (1996). “Simulation of Contact Using a Nonlinear Damping Model”. In: *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 1662 – 1668.

MARHEFKA, Duane W.; ORIN, David E.. (2000). “Fuzzy Control of Quadrupedal Running”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3063 – 3069.

PARK, Jong Hyeon; CHUNG, Hoam. (2000). “Hybrid Control of Biped Robots to Increase Stability in Locomotion”. *Journal of Robotic Systems*. Vol. 17; No. 4; pp. 187 – 197.

PARK, Jong Hyeon; KWON, Ohung. (2001). “Reflex Control of Biped Robot Locomotion on a Slippery Surface”. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 4134 – 4139.

PLESTAN, Franck. (2002). “Commande de la Marche D’un Bipède Type RABBIT Avec Trajectoires Optimales et Évaluation de la Robustesse”. In: *CIFA’2002 – Conférence Internationale Francophone d’Automatique*; pp. 516 – 521.

SILVA, Filipe Miguel Teixeira Pereira da. (2001). *Análise Dinâmica e Controlo de Sistemas Robóticos de Locomoção Bípede*. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Porto.

SUVINEN, Antti; SAARILAHTI, M.; TOKOLA, T.. (2003). “Terrain Mobility Model and Determination of Optimal Off-Road Route”. In: *Proceedings 9th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science*; pp. 251 – 259.

TAGA, Gentaro. (1995). “A Model of the Neuro-Musculo-Skeletal System for Human Locomotion: I. Emergence of Basic Gait”. *Biological Cybernetics*. Vol. 73; No. 2; pp. 97 – 111.

TALUKDER, A.; MANDUCHI, R.; CASTANO, R.; OWENS, K.; MATTHIES, L.; CASTANO, A.; HOGG, R.. (2002). “Autonomous Terrain Characterisation and Modelling for Dynamic Control of Unmanned Vehicles”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 708 – 713.

VILLANOVA, J.; GUINOT, J.-C.; NEVEU, P.; GASC, J.-P.. (2000). “Quadrupedal Mammal Locomotion Dynamics 2D Model”. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; pp. 1785 – 1790.

YAMASAKI, Fuminori; ENDO, Ken; KITANO, Hiroaki; ASADA, Minoru. (2002). “Acquisition of Humanoid Walking Motion Using Genetic Algorithm – Considering Characteristics of Servo Modules”. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*; pp. 3123 – 3128.

Anexo F

Dados Antropométricos dos Seres Vivos

Durante a realização de várias experiências de simulação, nomeadamente algumas das apresentadas no Capítulo 4 desta Tese, torna-se necessário conhecer as dimensões dos diversos seres vivos estudados. Desta forma é possível efectuar a comparação do seu desempenho quando este é analisado do ponto de vista dos índices dinâmicos formulados neste trabalho. Para o efeito, consultou-se diversa bibliografia da área da biologia apresentando-se neste anexo uma compilação da diversa informação encontrada.

F.1 Dados Antropométricos do Ser Humano

A Figura F.1 refere-se ao ser humano, sendo a dimensão de cada segmento especificada em função da altura total pretendida para o sujeito em estudo. A Tabela F.1 complementa esta informação, apresentando o peso de cada segmento indicado na Figura F.1 como função da massa total do sujeito em consideração. Esta tabela apresenta também a posição do centro de massa de cada segmento relativamente aos seus extremos e o cálculo do momento de inércia em torno do centro de massa (expresso pela relação Raio de rotação / Comprimento segmento).

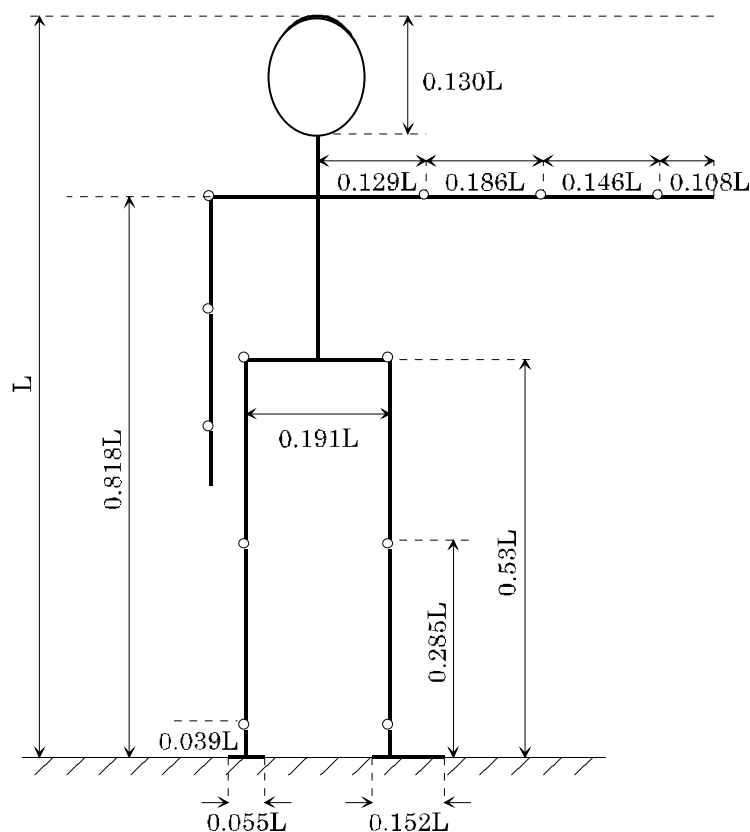


Figura F.1: Dimensões do ser humano – segmentos expressos como fracção da altura total, L (Winter, 1990).

F.2 Dados Antropométricos dos Seres Vivos Considerados nas Experiências

Quanto à Tabela F.2, esta apresenta as dimensões geométricas e as massas que foram adoptadas para o modelo do sistema artificial de locomoção apresentado no Capítulo 3, quando este é utilizado para modelar os diversos animais estudados nesta Tese.

No estudo de simulação desenvolvido neste trabalho para efectuar a comparação do desempenho de diferentes seres vivos recorreu-se ao modelo de sistemas artificiais de locomoção com dois gdl por perna. Por este facto, as dimensões geométricas e massas apresentadas na referida tabela foram adaptadas das reais, correspondentes aos animais em estudo, de forma a entrar em consideração com certos aspectos que o modelo por nós desenvolvido não implementa. A título de exemplo, refira-se que as dimensões geométricas dos diversos segmentos das pernas são todas iguais independentemente da perna em consideração. Isto deve-se ao facto de no nosso modelo não ser possível, por exemplo, que as pernas da frente de um quadrúpede apresentem um comprimento superior ao das de trás (neste

caso, durante a locomoção o corpo do animal faria um ângulo com a horizontal diferente de zero graus). Da mesma forma, no caso dos animais ungulígrados o comprimento do pé foi incluído no comprimento do elo dois (L_{i2}) da perna do modelo correspondente. Por último, as massas dos pés dos diversos animais em consideração também foram incluídas na massa do elo dois (M_{i2}) da perna do modelo correspondente.

Tabela F.1: Dados antropométricos do ser humano (Winter, 1990).

Segmento	Peso Segm. / / Peso Total	Centro de massa / / Comprimento segm.		Raio de rotação / / Comprimento segm.
		Proximal	Distal	CG
Pé	0,0145	0,5	0,5	0,475
Perna	0,0465	0,433	0,567	0,302
Coxa	0,1	0,433	0,567	0,323
Total Perna	0,161	0,447	0,553	0,326
Mão	0,006	0,506	0,494	0,297
Antebraço	0,016	0,43	0,57	0,303
Braço	0,028	0,436	0,564	0,322
Total Braço	0,05	0,53	0,47	0,368
Tórax	0,216	0,82	0,18	–
Abdômen	0,139	0,44	0,56	–
Pélvis	0,142	0,105	0,895	–
Total Tronco	0,497	0,5	0,5	–
Cabeça e Pescoço	0,081	1	0	–
Total Tronco+Cabeça	0,578	0,66	0,34	0,503

Tabela F.2: Dados antropométricos dos seres vivos, utilizados na simulação (Fedak, *et al.*, 1982; Pfeiffer, *et al.*, 1995; Kram, *et al.*, 1997).

Número de Pernas	Animal	Massa Total (kg)	Massas do Corpo e das Pernas (kg)	Comprimentos das Pernas (m)
<i>n</i> =2 (Bípedes)	Codorniz	$M_{Rt} = 44,4 \times 10^{-3}$	$M_B = 36,2 \times 10^{-3}$ $M_{i1} = 3,6 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $M_{i2} = 0,5 \times 10^{-3}, i = 1, 2$	$L_{i1} = 26,0 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $L_{i2} = 26,0 \times 10^{-3}, i = 1, 2$
	Peru	$M_{Rt} = 5,69$	$M_B = 4,22$ $M_{i1} = 649,0 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $M_{i2} = 86,0 \times 10^{-3}, i = 1, 2$	$L_{i1} = 21,0 \times 10^{-2}, i = 1, 2$ $L_{i2} = 21,0 \times 10^{-2}, i = 1, 2$
	Avestruz	$M_{Rt} = 89,5$	$M_B = 47,936$ $M_{i1} = 18.271, i = 1, 2$ $M_{i2} = 2.515, i = 1, 2$	$L_{i1} = 60,5 \times 10^{-2}, i = 1, 2$ $L_{i2} = 60,5 \times 10^{-2}, i = 1, 2$
	Humano	$M_{Rt} = 80,0$	$M_B = 54,24$ $M_{i1} = 8,0, i = 1, 2$ $M_{i2} = 4,88, i = 1, 2$	$L_{i1} = 48,0 \times 10^{-2}, i = 1, 2$ $L_{i2} = 48,0 \times 10^{-2}, i = 1, 2$
<i>n</i> =4 (Quadrúpedes)	Esquilo	$M_{Rt} = 115,38 \times 10^{-3}$	$M_B = 89,3 \times 10^{-3}$ $M_{i1} = 2,7 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $M_{i2} = 1,54 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $M_{i1} = 6,4 \times 10^{-3}, i = 3, 4$ $M_{i2} = 2,4 \times 10^{-3}, i = 3, 4$	$L_{i1} = 24,0 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $L_{i2} = 24,0 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $L_{i1} = 24,0 \times 10^{-3}, i = 3, 4$ $L_{i2} = 24,0 \times 10^{-3}, i = 3, 4$
	Cão	$M_{Rt} = 5037,2 \times 10^{-3}$	$M_B = 3705,4 \times 10^{-3}$ $M_{i1} = 256,7 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $M_{i2} = 81,8 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $M_{i1} = 294,9 \times 10^{-3}, i = 3, 4$ $M_{i2} = 32,5 \times 10^{-3}, i = 3, 4$	$L_{i1} = 102,5 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $L_{i2} = 102,5 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $L_{i1} = 102,5 \times 10^{-3}, i = 3, 4$ $L_{i2} = 102,5 \times 10^{-3}, i = 3, 4$
	Cavalo	$M_{Rt} = 97,904$	$M_B = 79,5$ $M_{i1} = 3.571, i = 1, 2$ $M_{i2} = 1.887, i = 1, 2$ $M_{i1} = 2.720, i = 3, 4$ $M_{i2} = 1.024, i = 3, 4$	$L_{i1} = 40,5 \times 10^{-2}, i = 1, 2$ $L_{i2} = 40,5 \times 10^{-2}, i = 1, 2$ $L_{i1} = 40,5 \times 10^{-2}, i = 3, 4$ $L_{i2} = 40,5 \times 10^{-2}, i = 3, 4$
	Barata	$M_{Rt} = 2,6 \times 10^{-3}$	$M_B = 22,5 \times 10^{-4}$ $M_{i1} = 2,8 \times 10^{-5}, i = 1, 2$ $M_{i2} = 0,5 \times 10^{-5}, i = 1, 2$ $M_{i1} = 5,2 \times 10^{-5}, i = 3, 4$ $M_{i2} = 0,9 \times 10^{-5}, i = 3, 4$ $M_{i1} = 6,6 \times 10^{-5}, i = 5, 6$ $M_{i2} = 1,4 \times 10^{-5}, i = 5, 6$	$L_{i1} = 15,3 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $L_{i2} = 15,3 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $L_{i1} = 15,3 \times 10^{-3}, i = 3, 4$ $L_{i2} = 15,3 \times 10^{-3}, i = 3, 4$ $L_{i1} = 15,3 \times 10^{-3}, i = 5, 6$ $L_{i2} = 15,3 \times 10^{-3}, i = 5, 6$
<i>n</i> =6 (Hexápodes)	Insecto-Pau	$M_{Rt} = 9,0 \times 10^{-4}$	$M_B = 79,2 \times 10^{-5}$ $M_{i1} = 1,9 \times 10^{-5}, i = 1, 2$ $M_{i2} = 0,4 \times 10^{-5}, i = 1, 2$ $M_{i1} = 1,4 \times 10^{-5}, i = 3, 4$ $M_{i2} = 0,3 \times 10^{-5}, i = 3, 4$ $M_{i1} = 1,4 \times 10^{-5}, i = 5, 6$ $M_{i2} = 0,3 \times 10^{-5}, i = 5, 6$	$L_{i1} = 14,6 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $L_{i2} = 14,6 \times 10^{-3}, i = 1, 2$ $L_{i1} = 14,6 \times 10^{-3}, i = 3, 4$ $L_{i2} = 14,6 \times 10^{-3}, i = 3, 4$ $L_{i1} = 14,6 \times 10^{-3}, i = 5, 6$ $L_{i2} = 14,6 \times 10^{-3}, i = 5, 6$

Referências

FEDAK, M. A.; HEGLUND, N. C.; TAYLOR, C. R.. (1982). “Energetics and Mechanics of Terrestrial Locomotion: II. Kinetic Energy Changes of the Limbs and Body as a Function of Speed and Body Size in Birds and Mammals”. *Journal of Experimental Biology*. Vol. 79; pp. 23 – 40.

KRAM, R.; WONG, B.; FULL, R. J.. (1997). “Three-Dimensional Kinematics and Limb Kinetic Energy of Running Cockroaches”. *The Journal of Experimental Biology*. Vol. 200; pp.1919 – 1929.

PFEIFFER, F.; ELTZE, J.; WEIDEMANN, H.-J.. (1995). “The TUM-Walking Machine”. *Intelligent Automation and Soft Computing*. Vol. 1; No. 3; pp. 307 – 323.

WINTER, David A.. (1990). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. John Wiley & Sons.

