

Uma Visão Panorâmica sobre os Robôs com Pernas



ROBOCONTROL'07
2007-Maio-28



Manuel F. Silva / ISEP – DEE
mss@isep.ipp.pt

J. A. Tenreiro Machado / ISEP – DEE
jtm@isep.ipp.pt

Índice da Apresentação

1. Introdução à Robótica de Locomoção
 1. Limitações dos veículos tradicionais
 2. Características dos veículos com pernas e aplicações potenciais
 3. Evolução dos veículos com pernas
 4. Aplicações actuais destes veículos
 5. Perspectivas de desenvolvimento futuro
2. Modelo de Simulação de Robôs Multi-Pernas
 1. Modelo cinemático
 2. Modelo dinâmico
 3. Modelo do solo
 4. Arquitectura de controlo

Formas Alternativas de Locomoção

- Rodas
- Lagartas
- Corpo articulado
- Barbatanas
- Asas
- **Pernas**
- Híbridos

Limitações dos Veículos Tradicionais

- Veículos com rodas exigem superfícies pavimentados
 - rápidos
 - eficientes
 - difícil vencer obstáculos e desníveis grandes
- Veículos com lagartas
- Mais do que 50% da superfície terrestre inacessível a veículos tradicionais

Vantagens dos Veículos com Pernas

- Possibilidade de percorrerem trajectos acidentados
 - irregulares
 - com grandes desníveis
 - transpor obstáculos de grandes dimensões
- Possibilidade de variar a altura ao solo
 - efeito de amortecimento

Limitações dos Veículos com Pernas

- Difícil atingir velocidades elevadas
- Grande consumo energético (elevado número de actuadores)
- Controlo difícil

Campos de Aplicação Potenciais

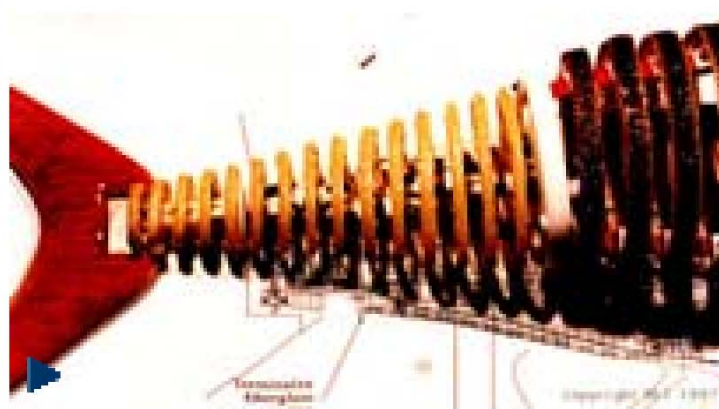
- 3-Ds (Dirty, Dull, Dangerous)
- Exploração de locais remotos
 - exploração de vulcões
 - exploração do fundo marinho
 - exploração espacial
- Ambientes hostis ou perigosos
 - exploração mineira
 - guerra e desminagem
 - situações de catástrofe
- Medicina
 - [cadeiras de “pernas”](#)
- Entretenimento

Veículos com Corpo Articulado

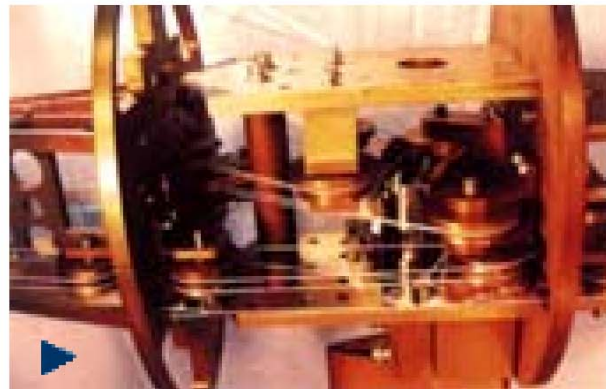


- Japão & EUA
- atravessar terrenos irregulares e trajectos estreitos adaptando activamente o seu corpo ao perfil do terreno
- atravessar valas
- atravessar terrenos pantanosos
- fiabilidade e facilidade de manutenção elevadas
- facilmente transportados
- inspecção de tubagens, situações de catástrofe

Veículos com Barbatanas



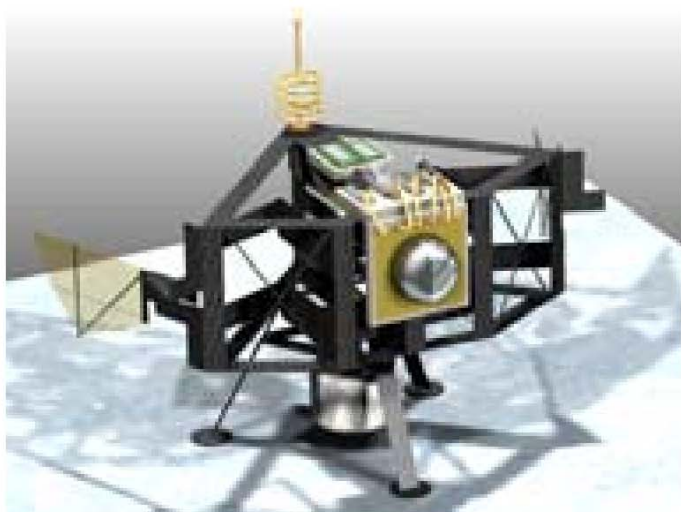
- Locomoção subaquática
 - EUA & Japão



Veículos com Asas (I)

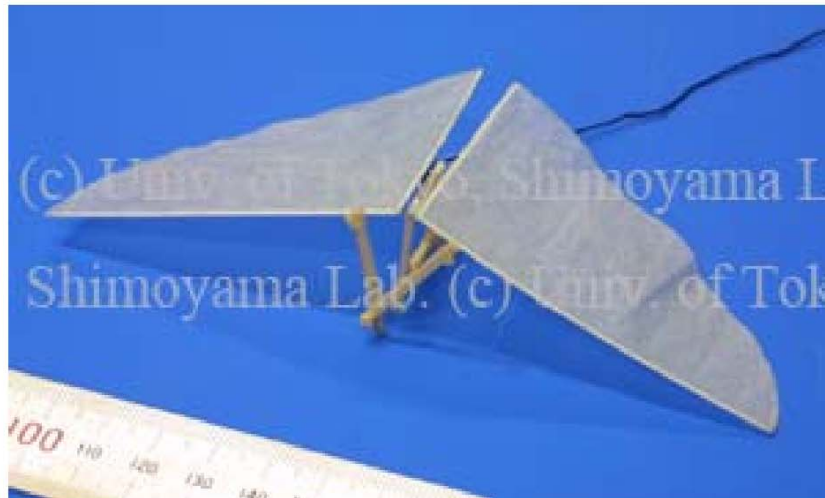


- Locomoção aérea
 - EUA
 - MFI – Micromechanical Flying Insect
 - objectivo: desenvolver um dispositivo com 25 mm de envergadura (de um extremo ao outro das asas) capaz de manter voo sustentado autónomo



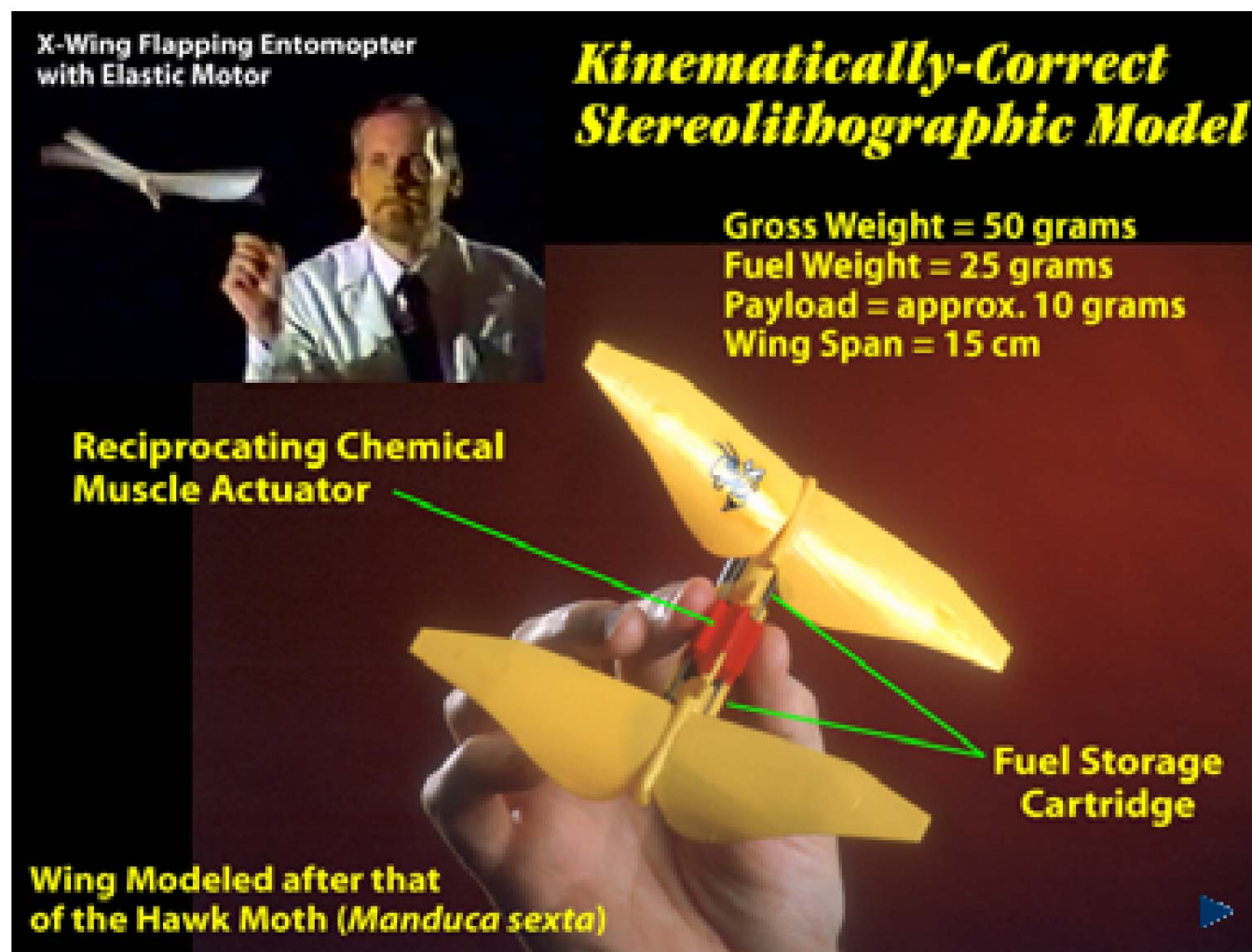
- baseado nos princípios biomiméticos do voo das moscas
- actuadores piezoeléctricos
- estrutura do tórax flexível
- baterias de lítio carregadas por células solares

Veículos com Asas (II)



- Locomoção aérea
 - Japão
 - Butterfly-Type Ornithopter
 - baseado no voo da borboleta
 - peso: 0.4 g
 - envergadura: 140 mm (de asa a asa)
 - frequência do batimento das asas: 10 Hz

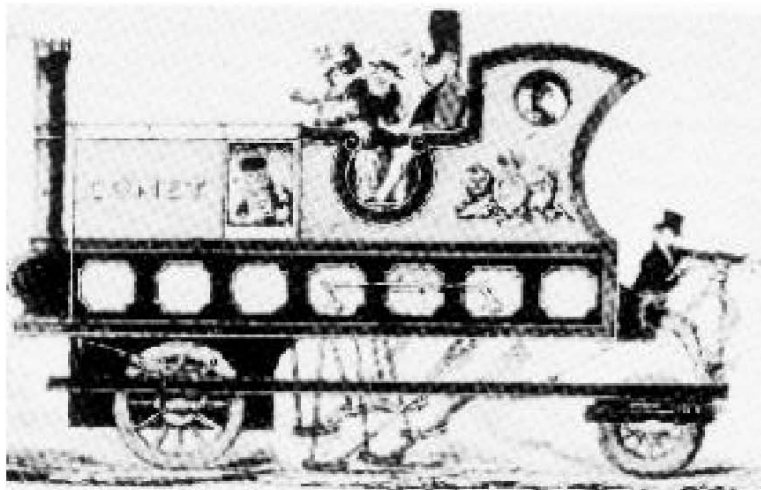
Veículos com Asas (III)



● Locomoção aérea

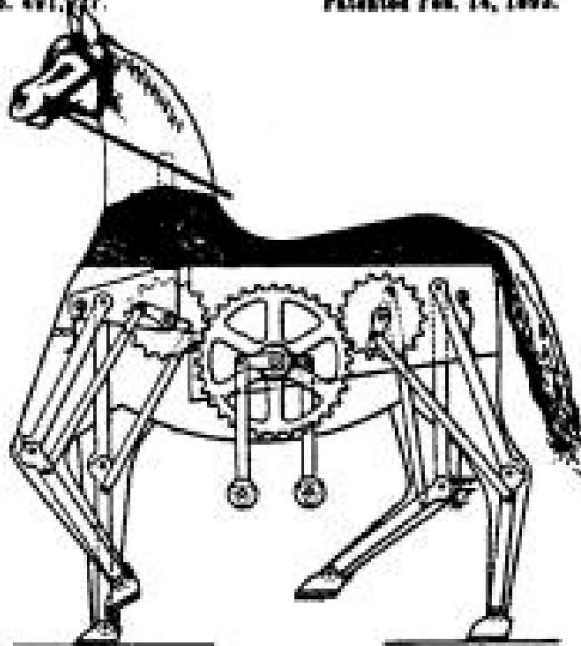
- EUA
- [Entomopter](#)
- accionamento:
Reciprocating Chemical Muscle (RCM) capaz de gerar de forma autónoma o batimento das asas a partir de uma fonte de energia química
- através de conversão directa o RCM também é capaz de gerar pequenas quantidades de energia eléctrica para os sistemas a bordo

Primeiras Ideias (I)



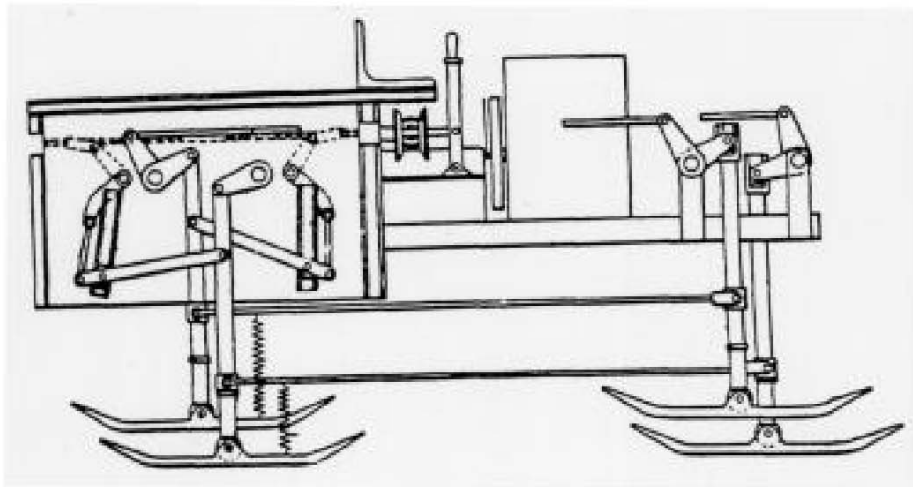
No. 481,837.

Patented Feb. 14, 1893.

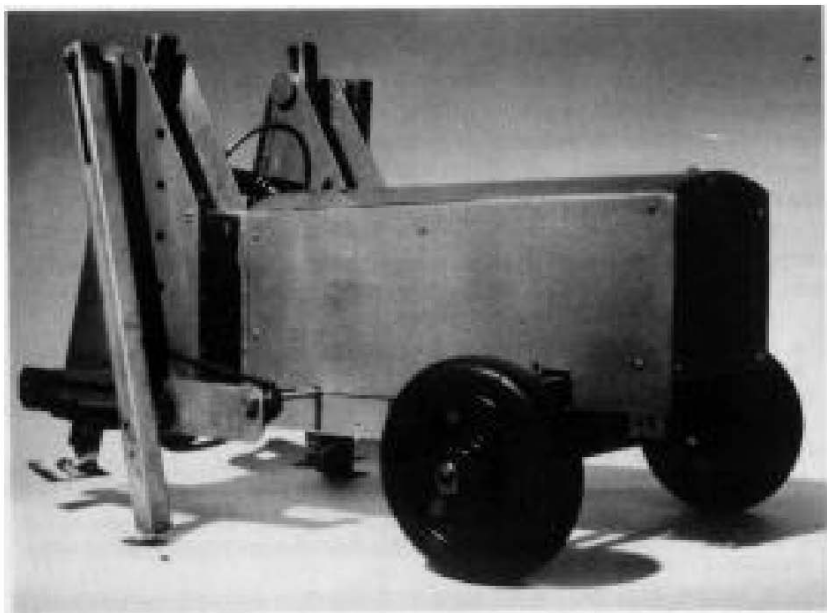


- Gravura de um dos primeiros veículos com pernas
 - Século XVIII
- Esboço da primeira máquina quadrúpede
 - The Mechanical Horse (L.A.Rygg)
 - patenteada em 14 de Fevereiro de 1893

Primeiras Ideias (II)

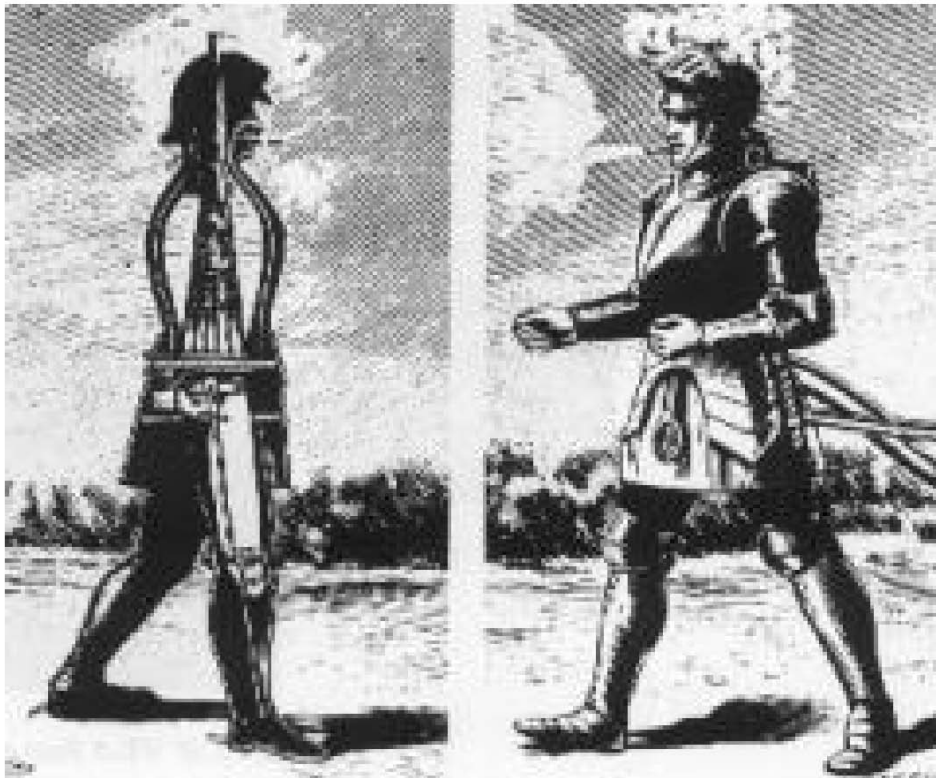


- Máquina quadrúpede do Barão de Bechtolsheim



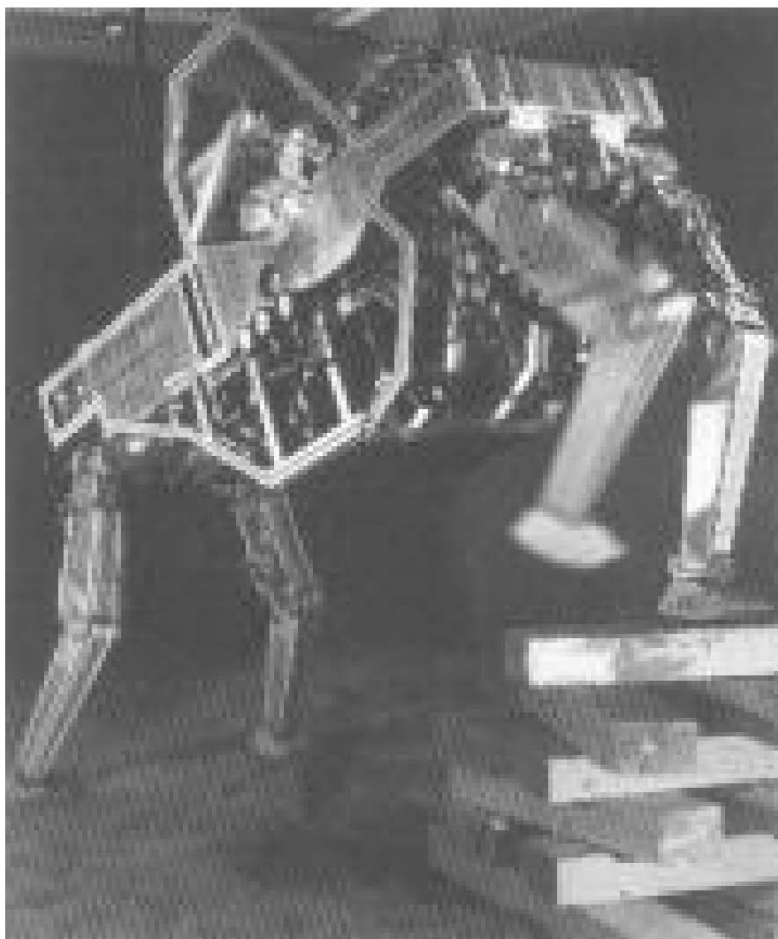
- Modelo de um tractor com pernas
 - Primeira Guerra Mundial

Primeiras Ideias (III)



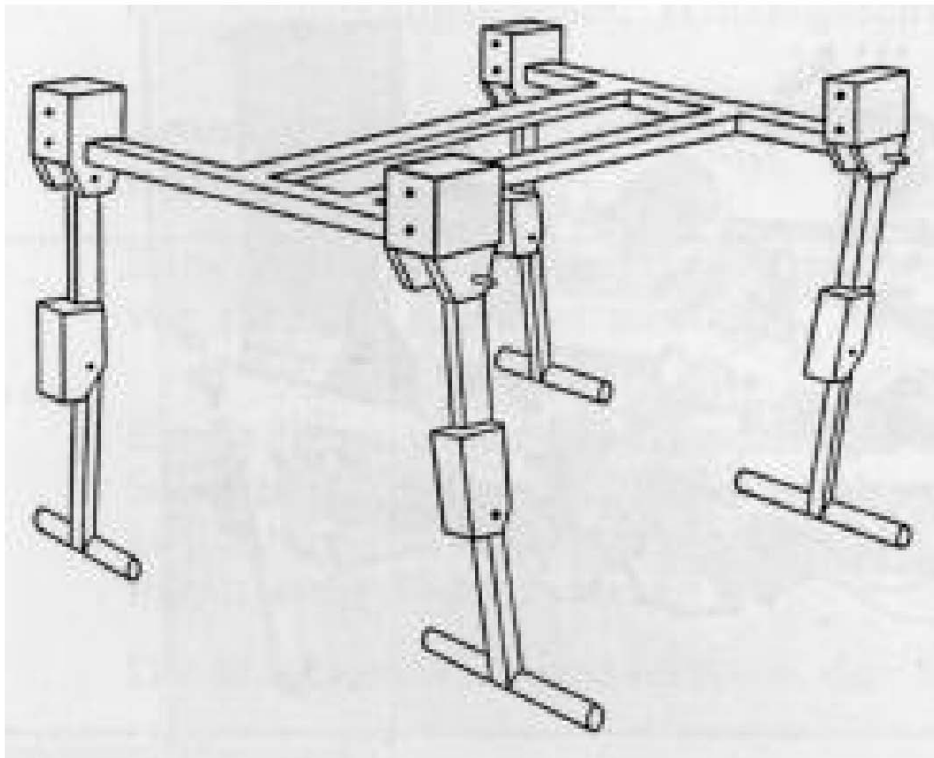
- A primeira máquina bípede
 - The Steam Man
 - projectado por Georges Moore em 1893

Primeiras Implementações (I)



- Quadrúpede da G.E.
 - EUA
 - concluído em 1968
 - desenvolvido por R. Mosher
 - primeiro “camião” com pernas controlado manualmente
 - accionamento hidráulico

Primeiras Implementações (II)



- Phoney Poney
 - EUA
 - construído em 1966
 - desenvolvido por McGhee e Frank na University of South Carolina
 - primeira máquina com pernas controlada por “computador”
 - accionamento eléctrico

Primeiras Implementações (III)



- Big Muskie
 - EUA
 - 1969
 - 15.000 toneladas
 - mina de carvão ao ar livre
 - quatro pernas accionadas hidraulicamente

Dificuldades de Implementação

- Projecto
 - estrutura mecânica do robô
 - que tipo de actuadores nas juntas
 - qual o melhor padrão de locomoção
 - periódicos
 - não-periódicos

Dificuldades de Implementação

- Controlo
 - coordenação de múltiplas cadeias cinemáticas fechadas
 - que sinais de comando devem ser enviados para as pernas para coordenar todos os graus de liberdade (muitos!)
 - distribuição de força nas pernas
 - como manter a estabilidade dinâmica ao parar

Exemplos Actuais (I)

(Estudos na Área de Controlo)

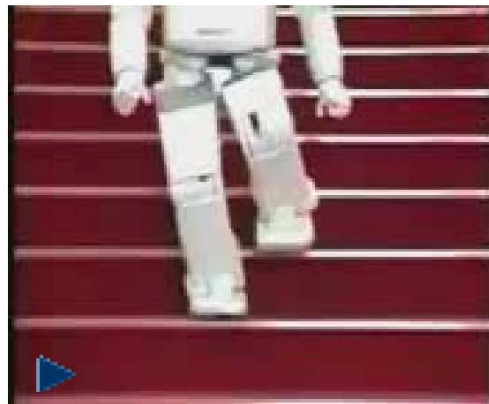
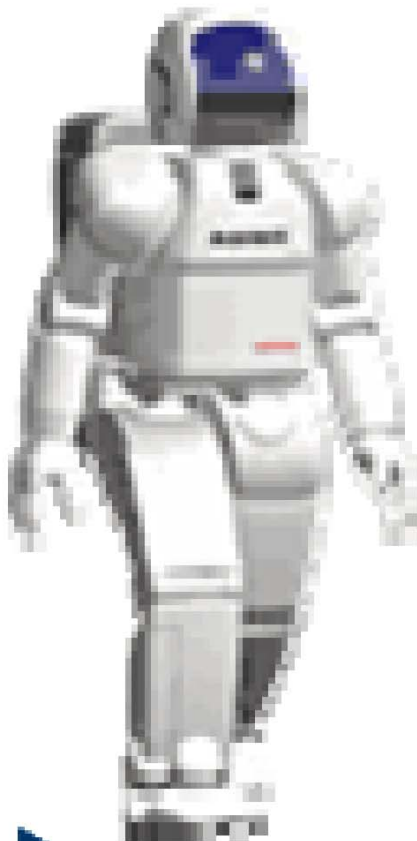


- ARL Monopod II
 - EUA
 - 2 d.o.f.
 - accionamento eléctrico
 - armazenamento/recuperação de energia através de molas



Exemplos Actuais (II)

(Bípedes)



- ASIMO / Honda Humanoid Robot
 - Japão
 - objectivo

“...should coexist and cooperate with human beings, by doing what a person can not do...”
 - introduzir robôs deste tipo nas fábricas
 - accionamento eléctrico
 - capacidades avançadas de locomoção

Exemplos Actuais (III)

(Bípedes)



- WABIAN (WAseda Bipedal humANoid)
 - Japão
 - “Humanoid Project”
 - bípede actuado electricamente
 - 43 d.o.f.
 - visão artificial



Exemplos Actuais (IV)

(Exploração Locais Remotos)



- DANTE II
 - EUA
 - CMU Field Robotics Center
 - octópode
 - accionado electricamente
 - alimentado através de cabo (comunicações e resgate)
 - exploração de vulcões (vulcão do Monte Spurr - Alaska - Julho de 1994)
 - recolher e analisar os gases do solo da cratera
 - demonstrar a possibilidade da exploração robótica de ambientes planetários
 - desce as paredes da cratera de uma forma similar ao “rappel”

Exemplos Actuais (V)

(Locais de Difícil Acesso)



- Plustech
 - Finlândia
 - motor Diesel
 - accionamento hidráulico
 - protótipo com vários prémios
- projecto abandonado

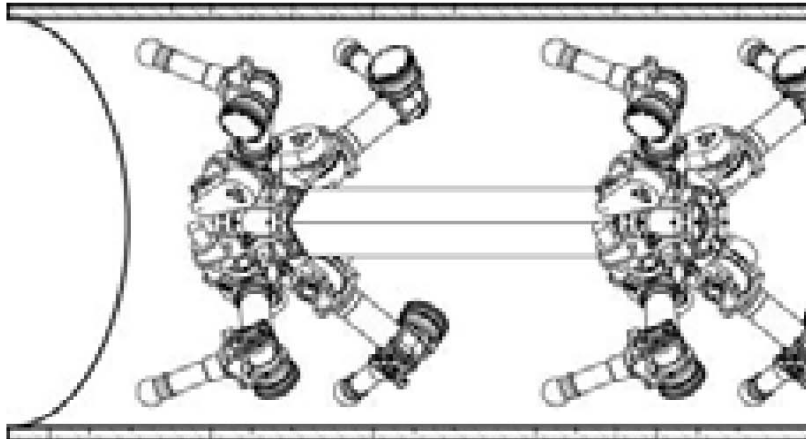
Exemplos Actuais (VI) (Militar)



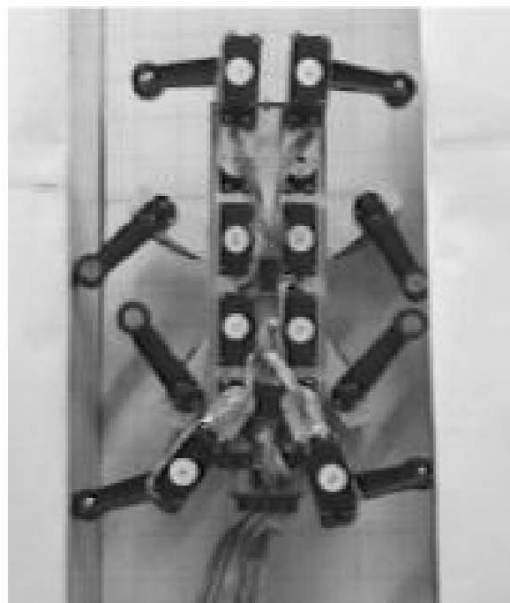
- Big Dog
 - EUA
 - motor a gasolina
 - accionamento hidráulico
 - 1 m de comprimento
 - 0,7 m de altura
 - 75 kg de peso
 - trota a 5,3 km/h
 - sobe inclinações de 35°
 - carrega cargas de 54,4 kg

Exemplos Actuais (VII)

(Inspeção de Tubagens)



- Pipe Crawling Robot
 - Alemanha
 - accionamento eléctrico
 - 8 pernas (3 d.o.f.)



- Pipe Climbing Robot
 - Alemanha
 - accionamento eléctrico
 - 8 pernas (2 d.o.f.)

Exemplos Actuais (VIII) (Robôs Trepadores)

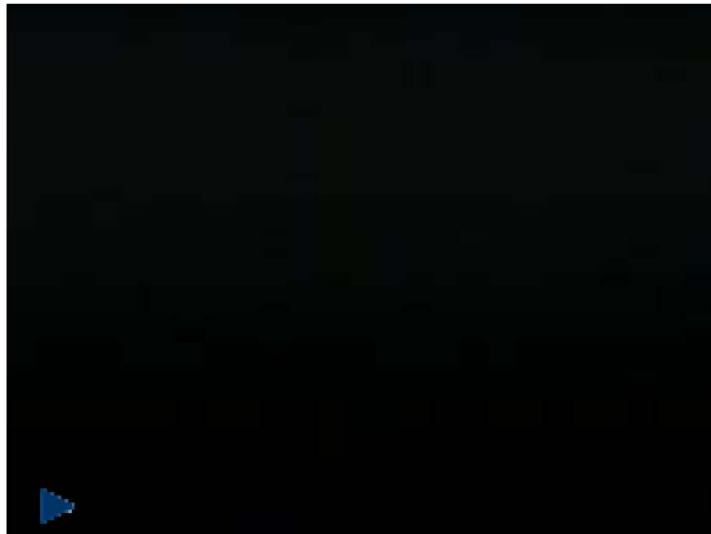


- Flipper
 - EUA
 - accionamento eléctrico
 - 2 pernas
- Hyperion
 - Japão
 - accionamento reduzido
 - 3 d.o.f.



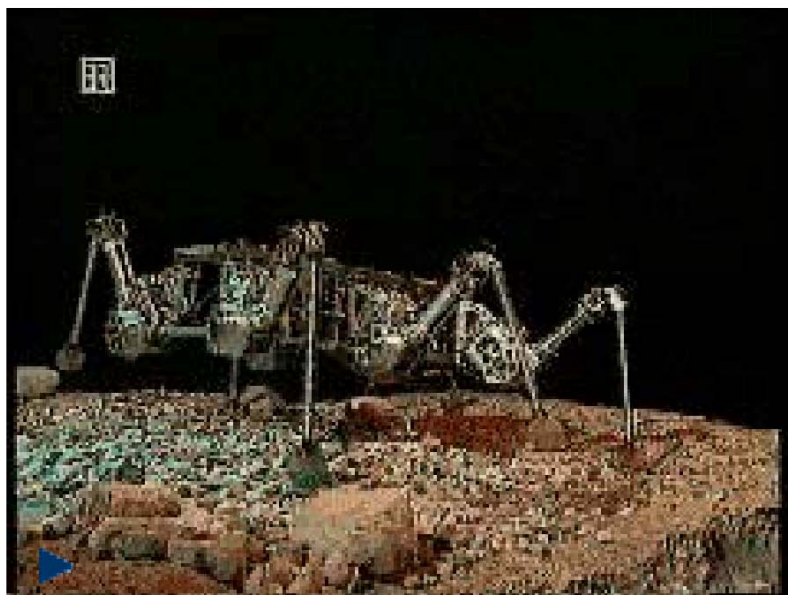
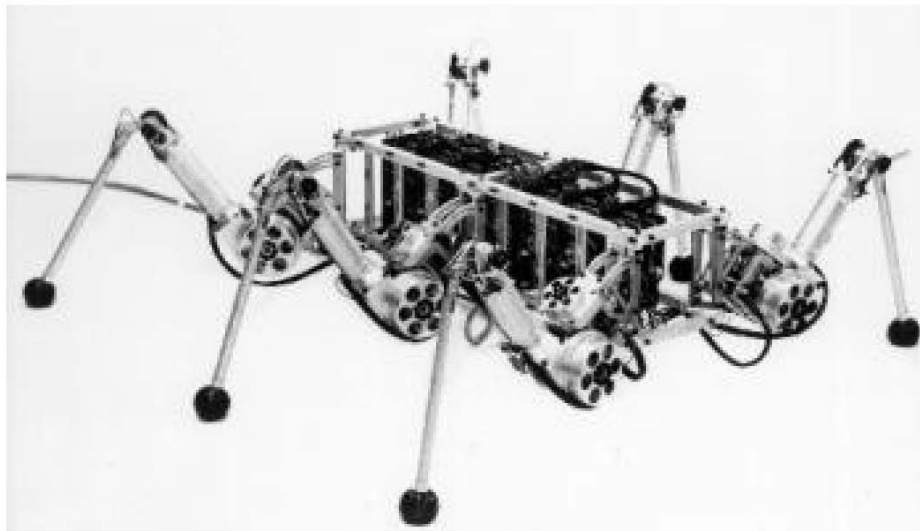
Exemplos Actuais (IX)

(Aproximações Biológicas)



- CWRU
 - EUA
 - “bio-design”:
 - Robot II
 - mímica do *Stick Insect*
 - accionamento eléctrico
 - Robot III
 - mímica da *Blaberus Discoidalis*
 - accionamento pneumático
 - Robot IV
 - mímica do grilo
 - actuadores musculares

Exemplos Actuais (X) (Aproximações Biológicas)



- TUM
 - Alemanha
 - “bio-design”:
 - mímica do insecto-pau *Carausius Morosus*
 - geometria e cinemática das pernas
 - padrões de locomoção
 - sistema de controlo
 - accionamento eléctrico

Exemplos Actuais (XI) (Mecanismos Simples)



- Sprawlita
 - EUA
 - accionamento pneumático
 - 6 pernas
 - 2 dof / perna

Exemplos Actuais (XII) (Mecanismos Simples)



- Rhex
 - Canadá & EUA
 - accionamento eléctrico
 - whegs



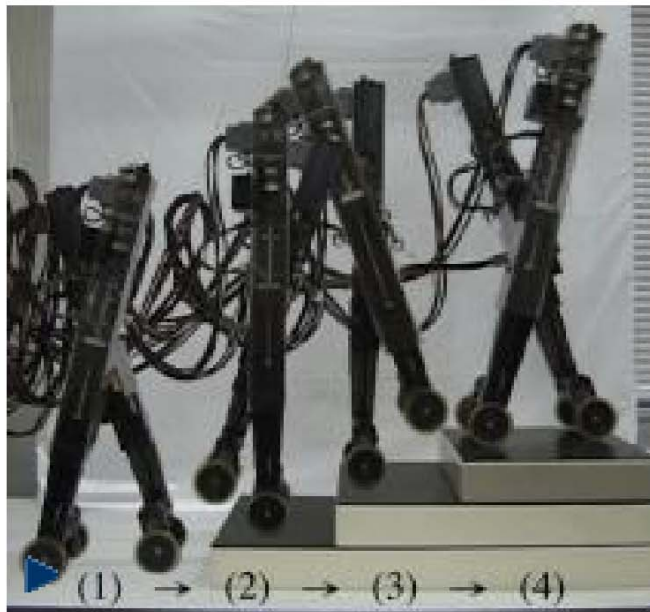
Exemplos Actuais (XIII) (Mecanismos Simples)



- Whegs
 - EUA
 - whegs (wheels + legs)
 - accionamento eléctrico
- Mini-Whegs
- Climbing Mini-Whegs

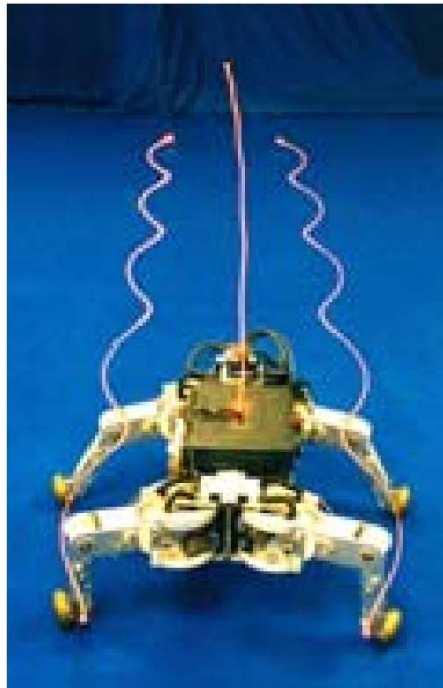


Exemplos Actuais (XIV) (Locomoção Híbrida)

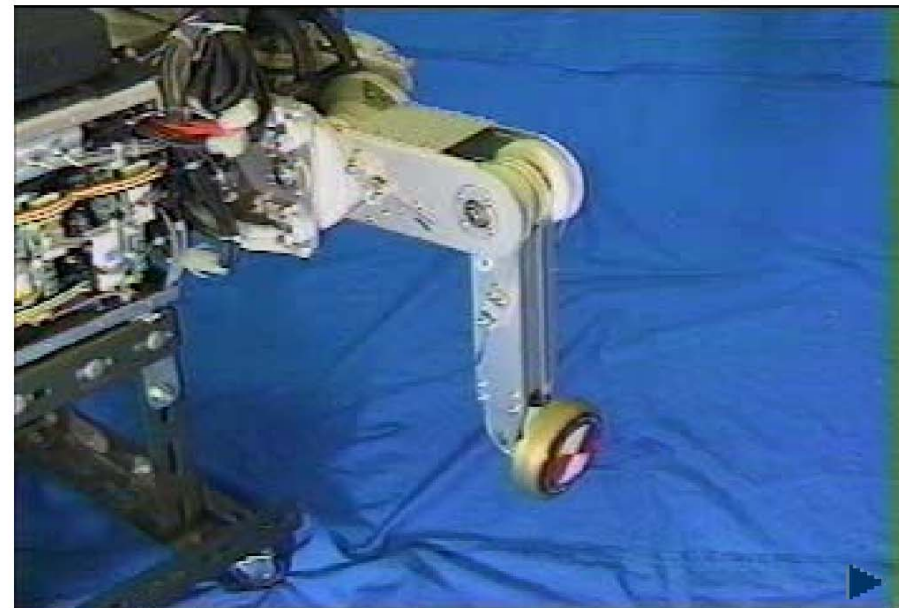


- Biped type leg-wheeled robot
 - Japão
 - accionamento eléctrico
 - duas pernas com rodas nas extremidades

Exemplos Actuais (XV) (Locomoção Híbrida)



- Roller-Walker
 - Japão
 - accionamento eléctrico
 - quatro pernas com rodas nas extremidades



Exemplos Actuais (XVI) (Locomoção Híbrida)



- WorkPartner
 - Finlândia
 - veículo híbrido
 - rodas, com accionamento próprio

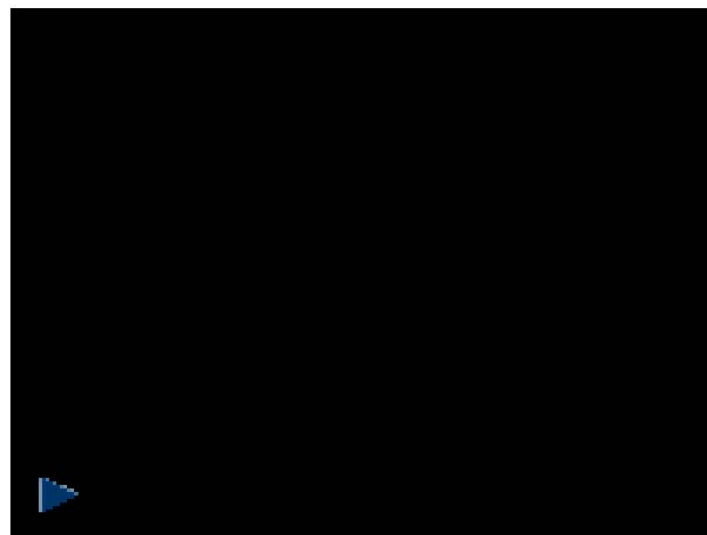


Exemplos Actuais (XVII)

(Locomoção Híbrida)



- AZIMUT
 - Canadá
 - veículo híbrido
 - pernas
 - rodas
 - lagartas



Exemplos Actuais (XVIII) (Locomoção Híbrida)

MMALV

The Morphing Micro Air-Land Vehicle

Kevin Jones, Naval Postgraduate School

Frank Boria, University of Florida

Richard Bachmann, BioRobots, LLC

Ravi Vaidyanathan, Naval Postgraduate School

Peter Ifju, University of Florida

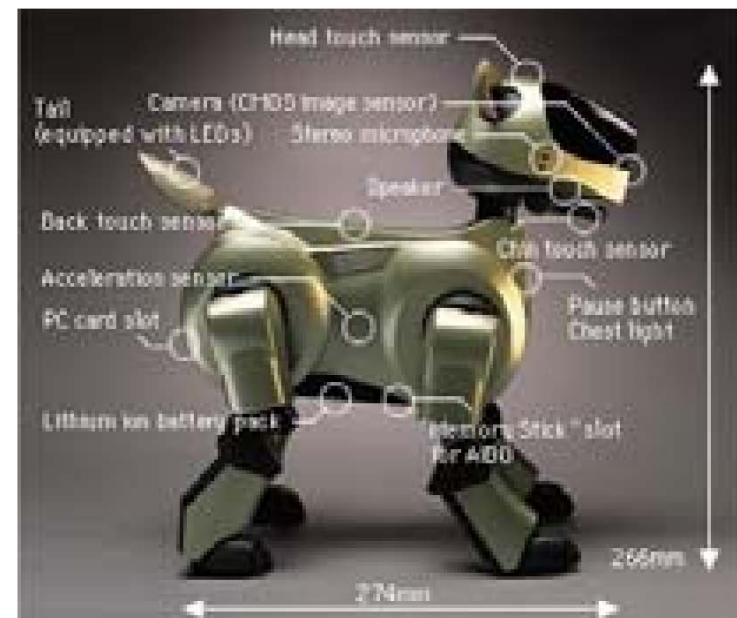
Roger Quinn, Case Western Reserve University

- MMALV
 - EUA
 - veículo híbrido
 - asas
 - whegs



Exemplos Actuais (XIX) (Entretenimento)

- AIBO
 - Japão
 - comercialização abandonada

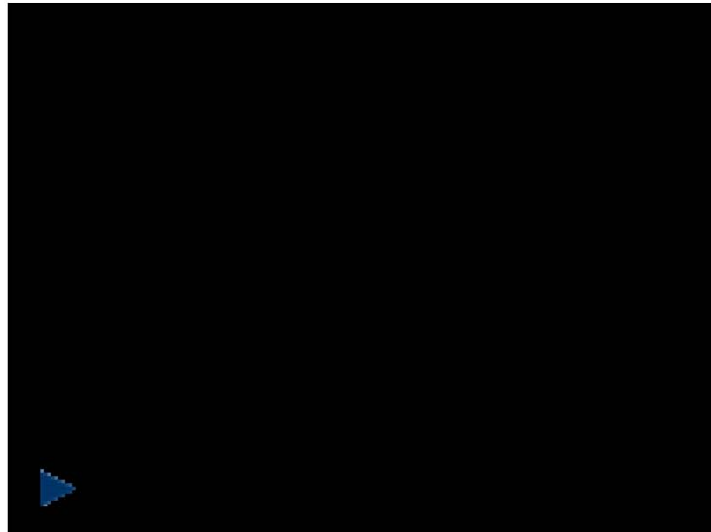


Exemplos Actuais (XX) (Entretenimento)

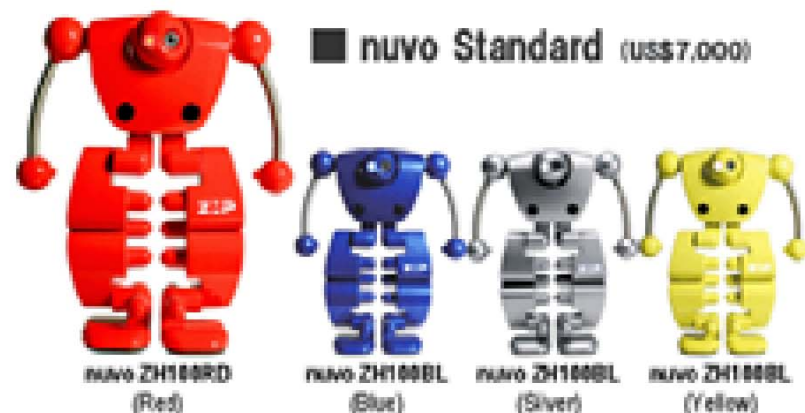


- SONY Dancing Robot
 - Japão
- QRIO (Quest + cuRIOsity)
 - primeiro humanoíde a correr de forma estável
 - comercialização abandonada

Exemplos Actuais (XXI) (Entretenimento)



- NUVO
 - Japão
 - controlado remotamente (Wi-Fi)
 - altura: 39 cm
 - peso: 2,5 kg
 - velocidade 3 m/min
 - evita obstáculos
 - câmara VGA na cabeça
 - reproduz música
 - preço: 5.700 Euros

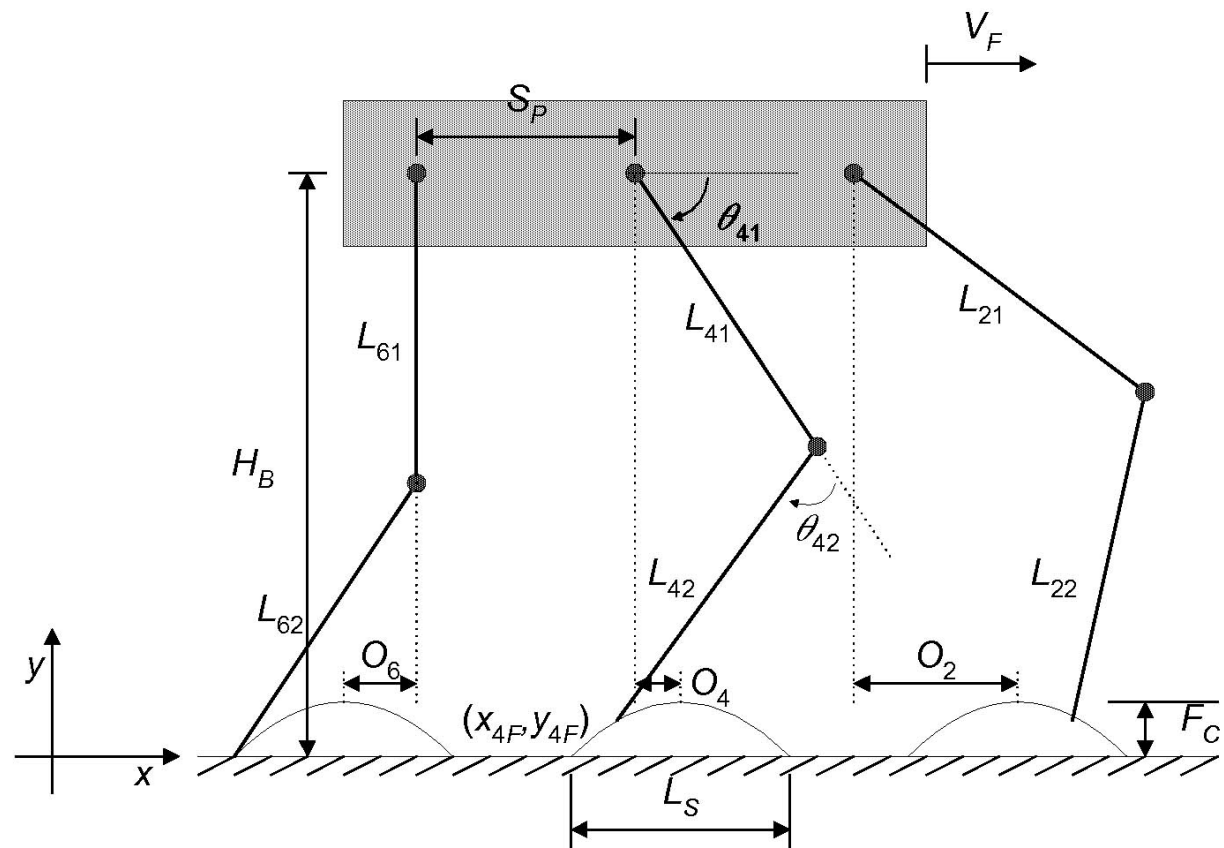


Perspectivas de Desenvolvimento Futuro

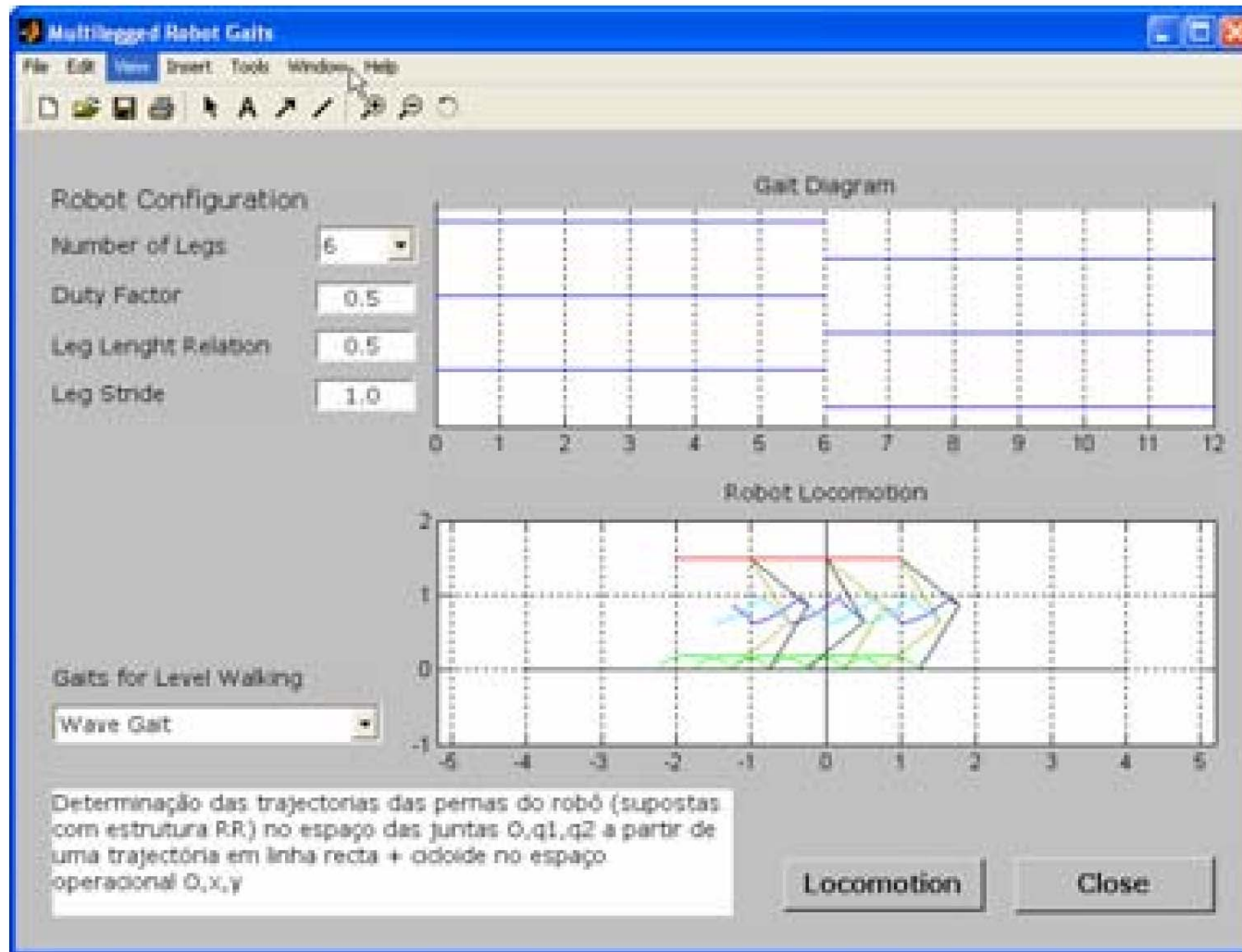
- Aprofundamento do estudo dos sistemas biológicos
- Novas estruturas cinemáticas para as pernas
- Sistemas de controlo mais poderosos (estabilidade dinâmica)
- Actuadores mais eficientes

Modelo de Simulação

- Interface gráfico com o utilizador
- Modelo cinemático
 - Padrões de locomoção
 - Variáveis
 - Parâmetros
 - Planeamento das trajectórias
- Modelo dinâmico
 - Dinâmica do corpo, pernas e pés
 - Complacência do corpo
 - Interface pés-solo



Interface Gráfico com o Utilizador



Modelo Cinemático

Padrões de Locomoção (I)

- Diferentes animais adoptam o mesmo padrão de locomoção (a uma dada velocidade de locomoção, para cada um)
 - andar



Modelo Cinemático

Padrões de Locomoção (II)

- Cada animal adopta diferentes padrões de locomoção para diferentes velocidades de locomoção
 - cão (andar, trote, galope curto, galope)



Modelo Cinemático

Padrões de Locomoção (III)

- Padrões de locomoção periódicos
 - fase de suporte de cada perna tem a mesma duração temporal
 - cada perna, durante o seu curso, passa pelos mesmos estados, a intervalos regulares T
- Padrões de locomoção regulares
 - todas as pernas apresentam o mesmo factor de ocupação β



Modelo Cinemático

Padrões de Locomoção Periódicos (I)

- Padrão de locomoção ondulatório

$$\varphi_{2m+1} = F(m\beta), m = 1, 2, \dots, n-1 \quad \text{e} \quad 1 > \beta \geq 3/(2n)$$

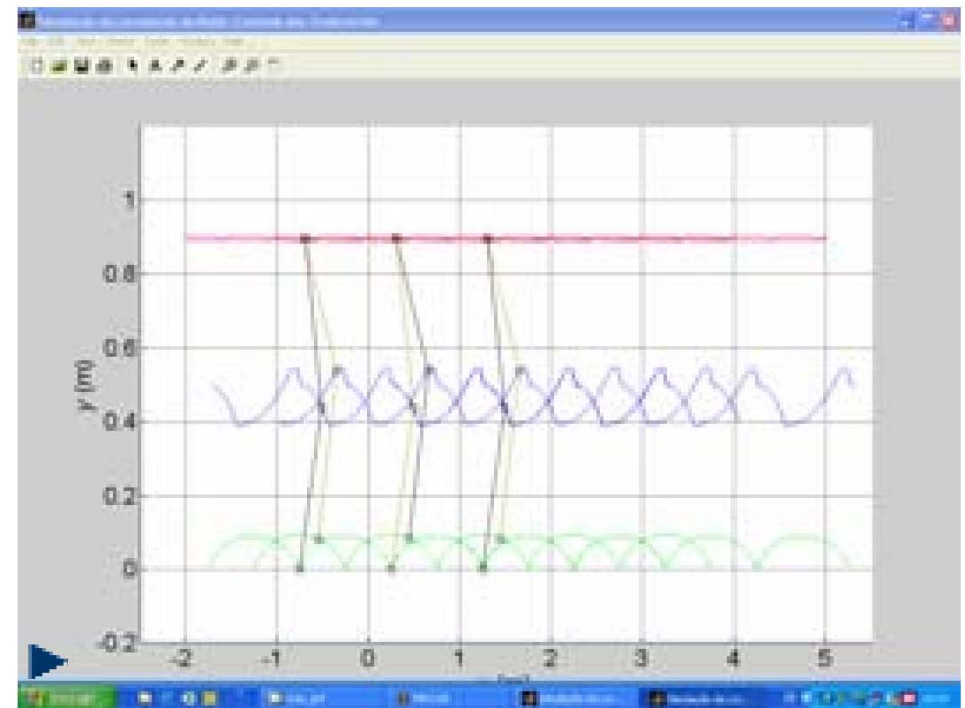
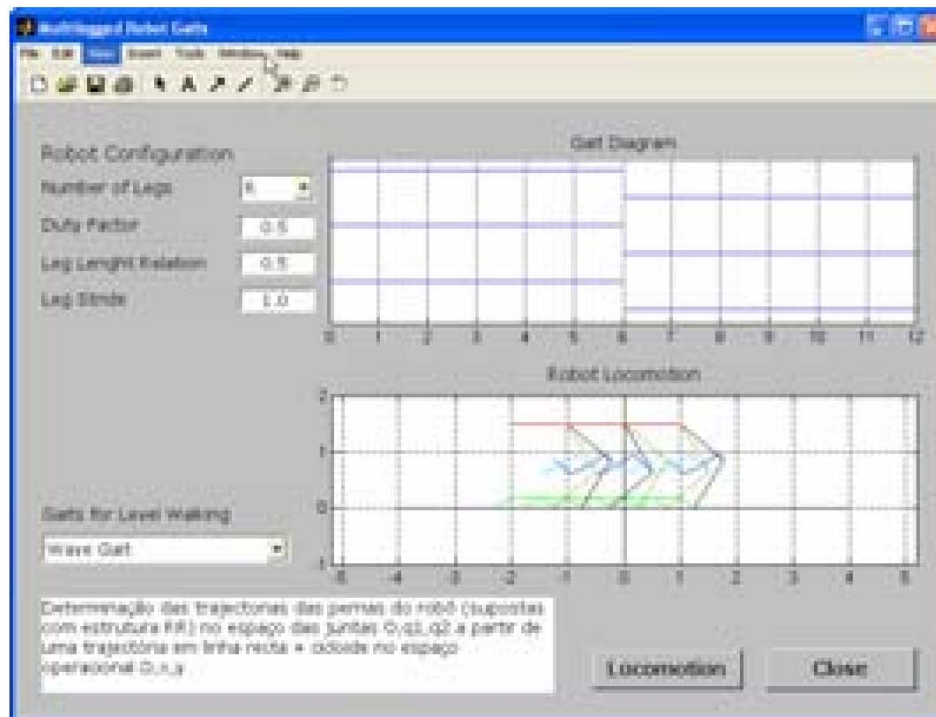
- $F(x)$ parte fraccionária do número real x
- m : pernas sucessivas após a perna 1 do lado esquerdo do robô, numeradas da frente para trás



Modelo Cinemático

Padrões de Locomoção Periódicos (II)

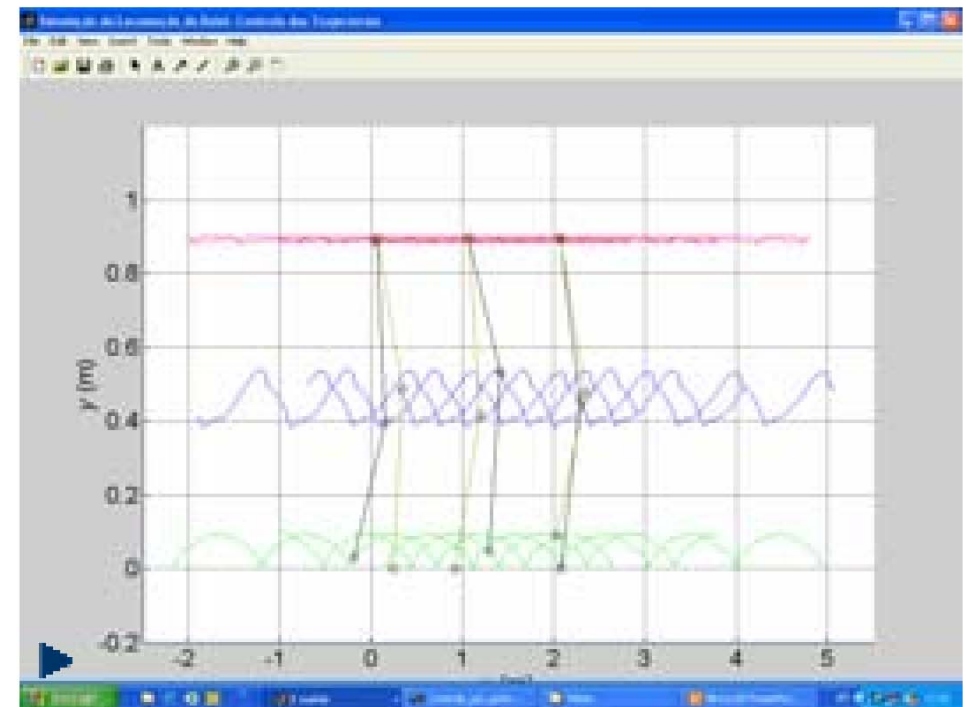
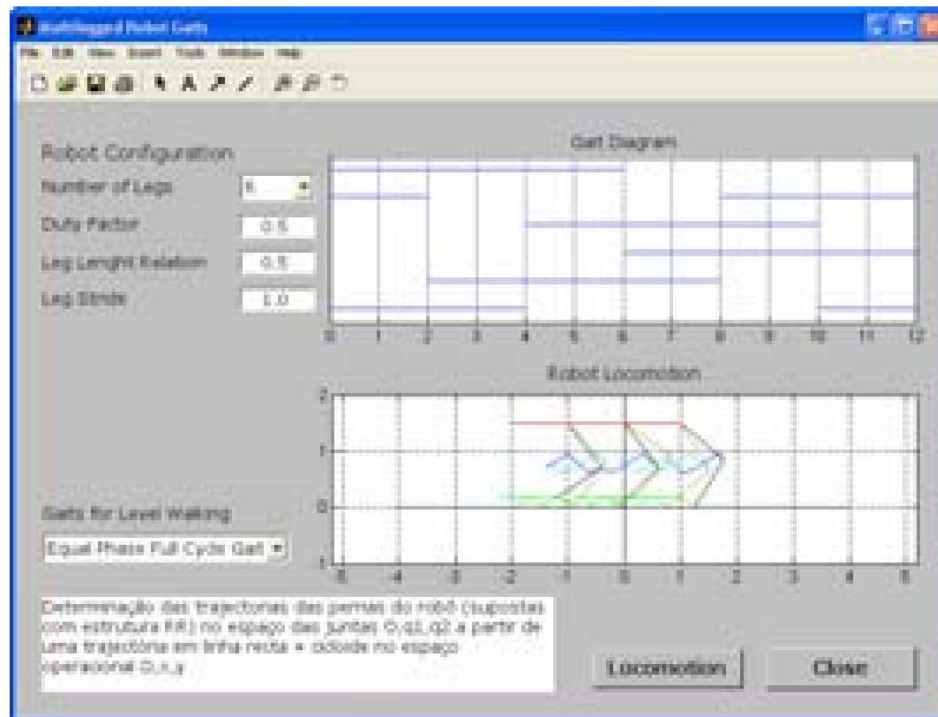
- Padrão de locomoção ondulatório



Modelo Cinemático

Padrões de Locomoção Periódicos (III)

- Padrão de locomoção de fase igual e ciclo completo



Modelo Cinemático

Trajectórias Cartesianas das Ancas/Pés

- Trajectória cartesiana das ancas
 - linha recta horizontal a velocidade constante
- Trajectória cartesiana dos pés
 - evitar colisões com o solo e obstáculos
 - padrões de locomoção periódicos
 - diferentes estratégias para gerar a trajectória
 - baseadas na biologia
 - funções matemáticas
 - índices de optimização
 - trajectórias balísticas

Modelo Cinemático

Trajectórias das Juntas

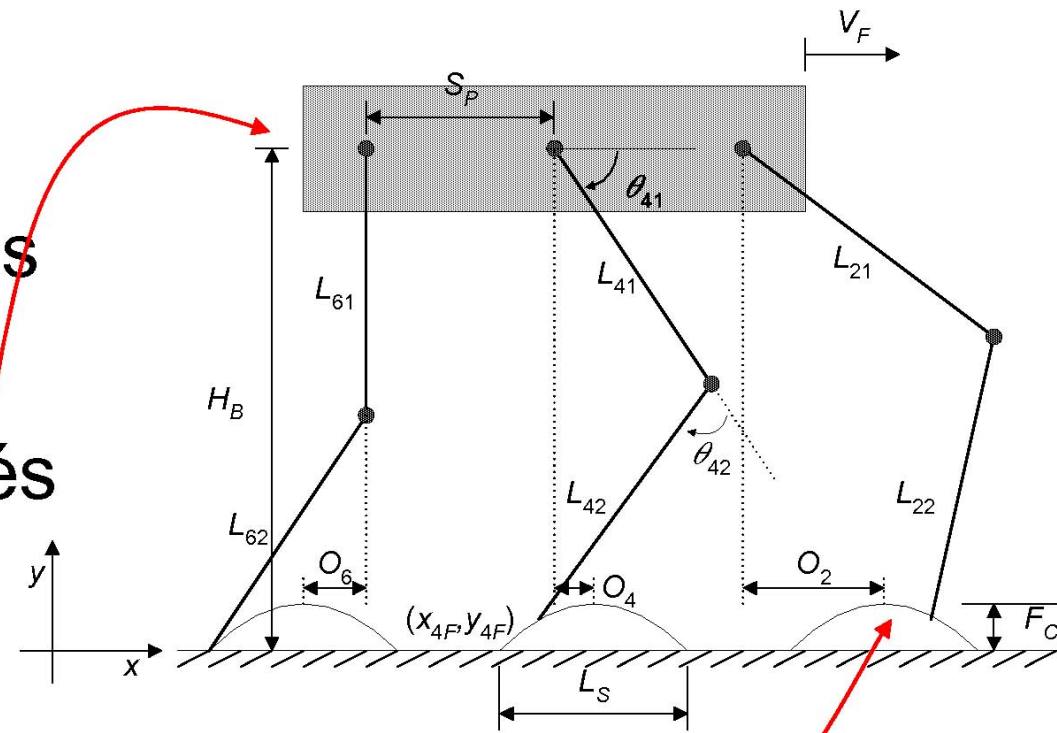
Cinemática inversa ψ^{-1}
e Jacobiano $\mathbf{J} = \partial\psi/\partial\boldsymbol{\theta}$
para calcular as trajectórias
das juntas a partir das
trajectórias das ancas e pés

- Posições

$$\boldsymbol{\Theta}_d(t) = [\theta_{i1d}(t), \theta_{i2d}(t)]^T$$

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

$$\mathbf{p}_d(t) = \psi[\boldsymbol{\Theta}_d(t)] \Rightarrow \boldsymbol{\Theta}_d(t) = \psi^{-1}[\mathbf{p}_d(t)]$$



Modelo Dinâmico

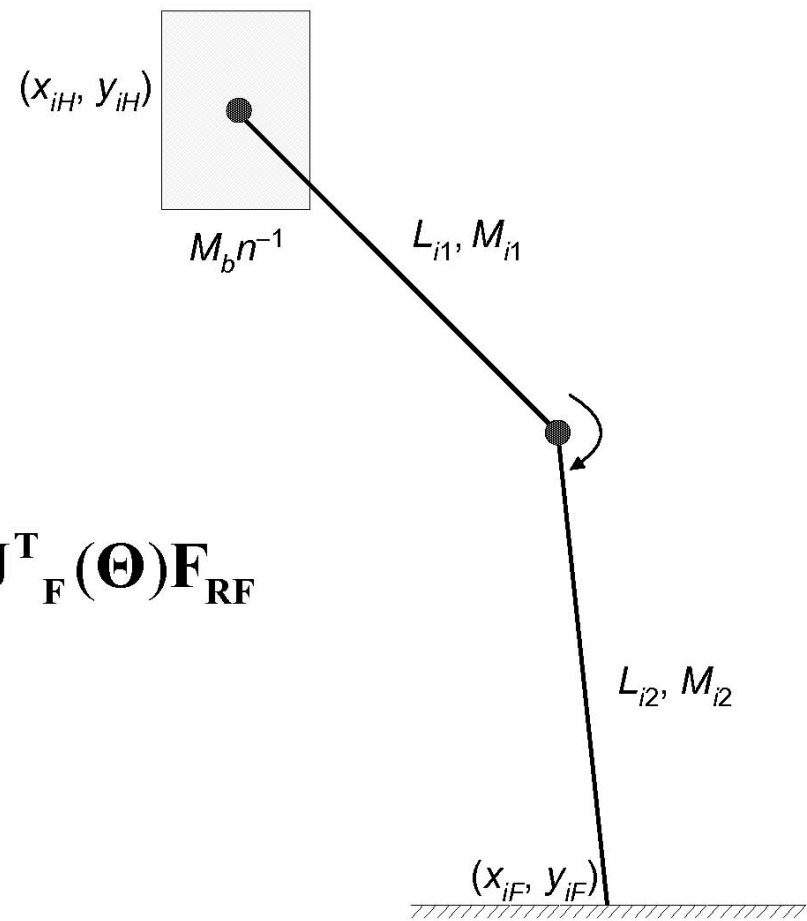
Dinâmica Inversa

- Método de Lagrange

$$\mathbf{L} = \mathbf{K} - \mathbf{U}$$

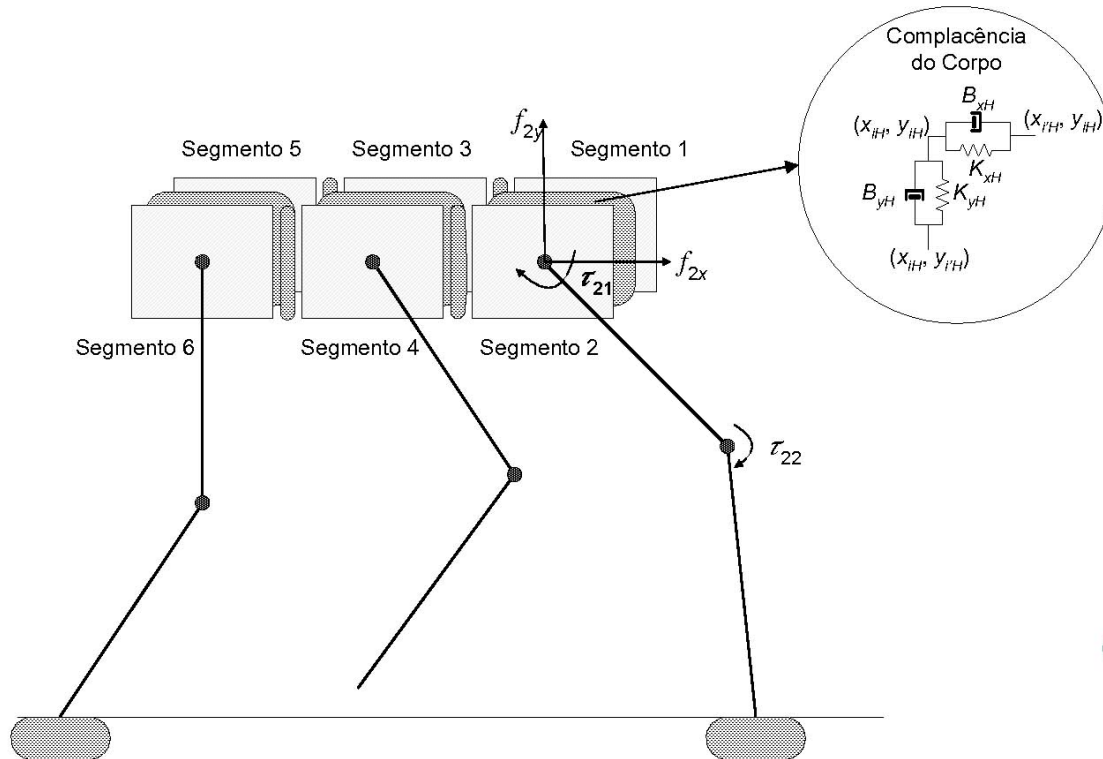
$$\mathbf{\Gamma} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \dot{\mathbf{\Theta}}} \right) - \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \mathbf{\Theta}}$$

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



Modelo Dinâmico Complacência do Corpo (I)

- Complacência do corpo



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

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

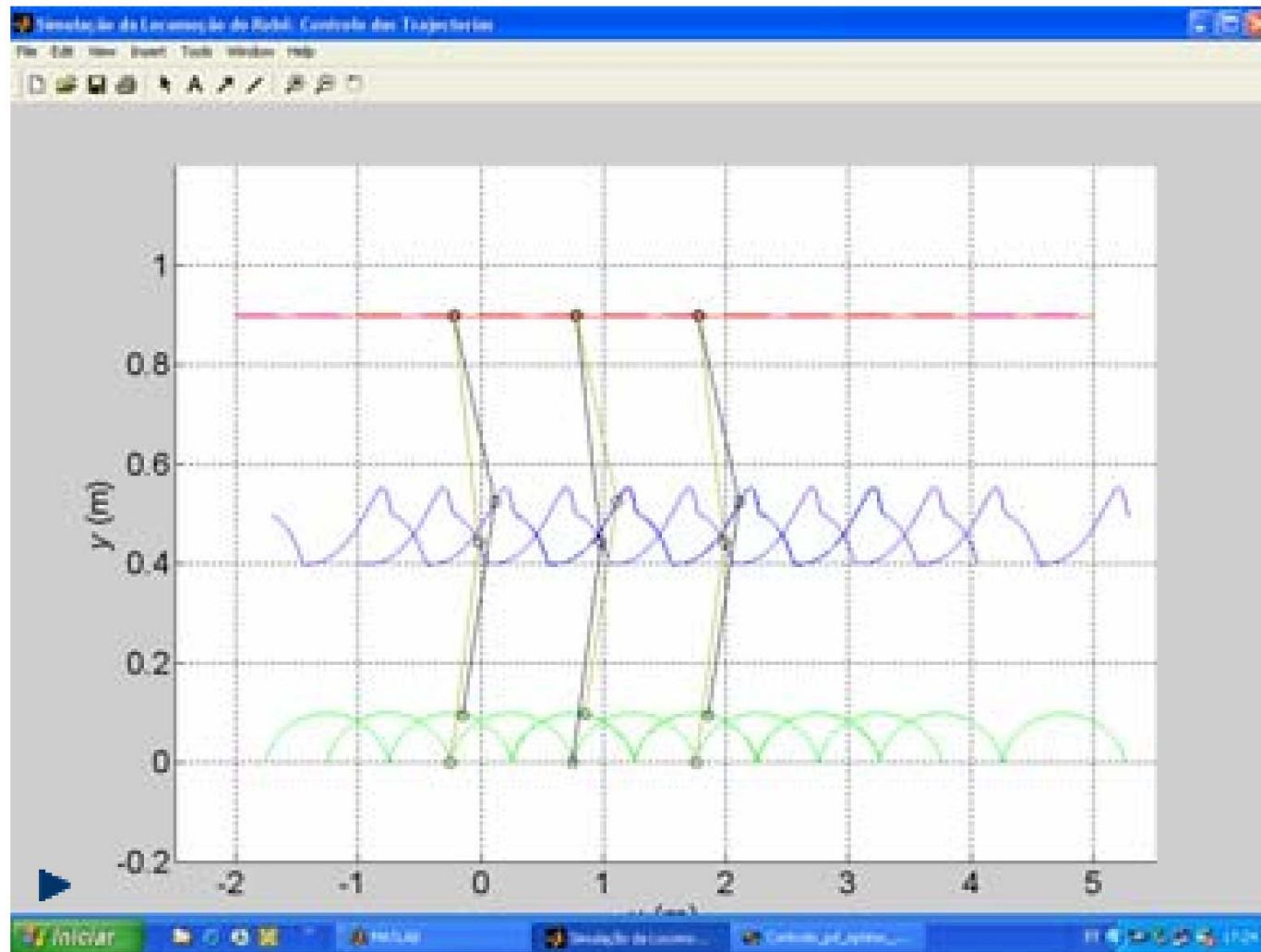
$$f_{iyH} = \sum_{i'=1}^u \left(-K_{yH} \Delta_{i'yH} - B_{yH} \dot{\Delta}_{i'yH} \right)$$

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

- parâmetros $B_{\eta H}$ e $K_{\eta H}$ definidos de forma a que o comportamento do corpo seja similar ao que se espera que ocorra nos animais vivos

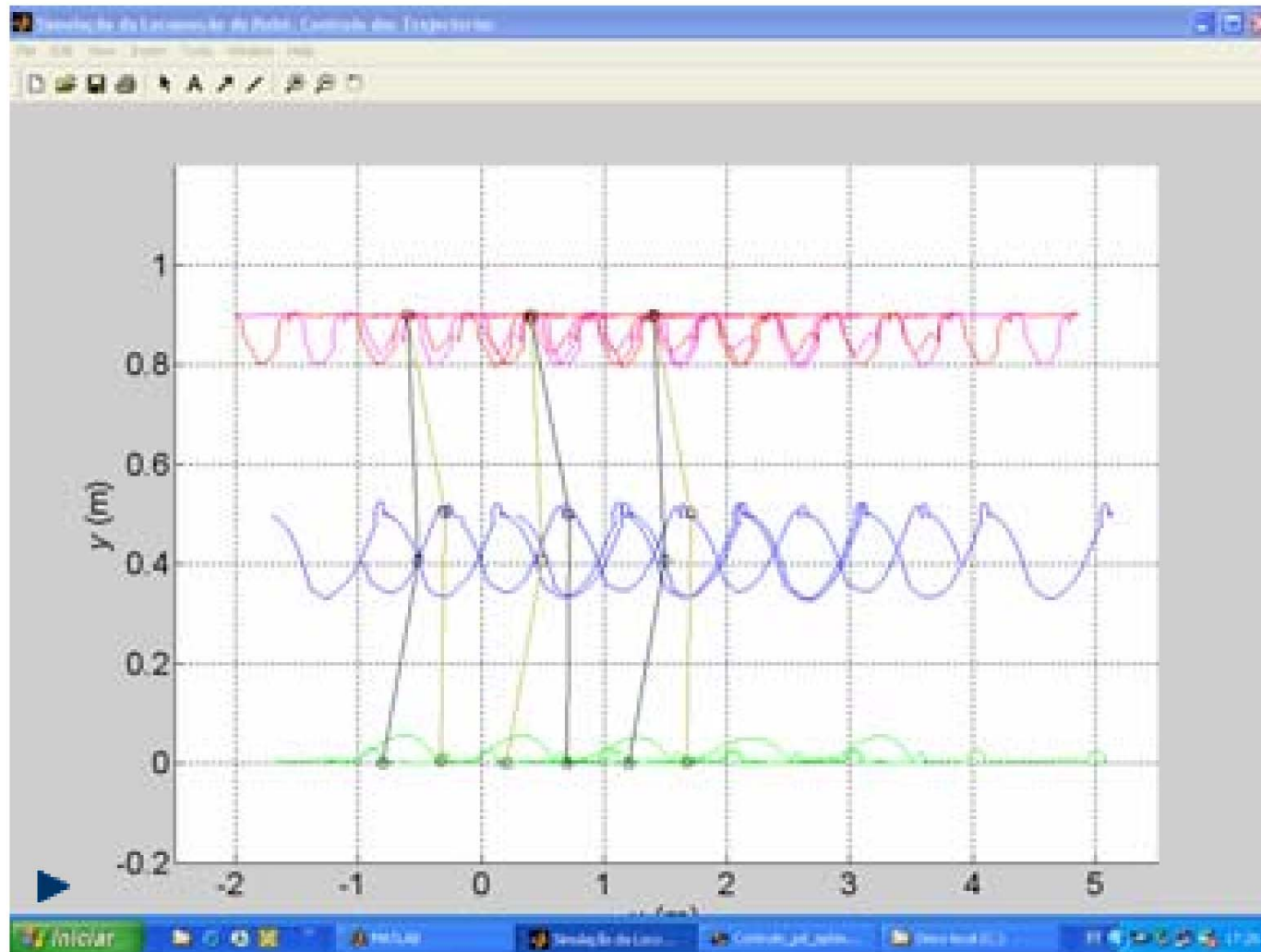
Modelo Dinâmico

Complacência do Corpo (II) – rígido



Modelo Dinâmico

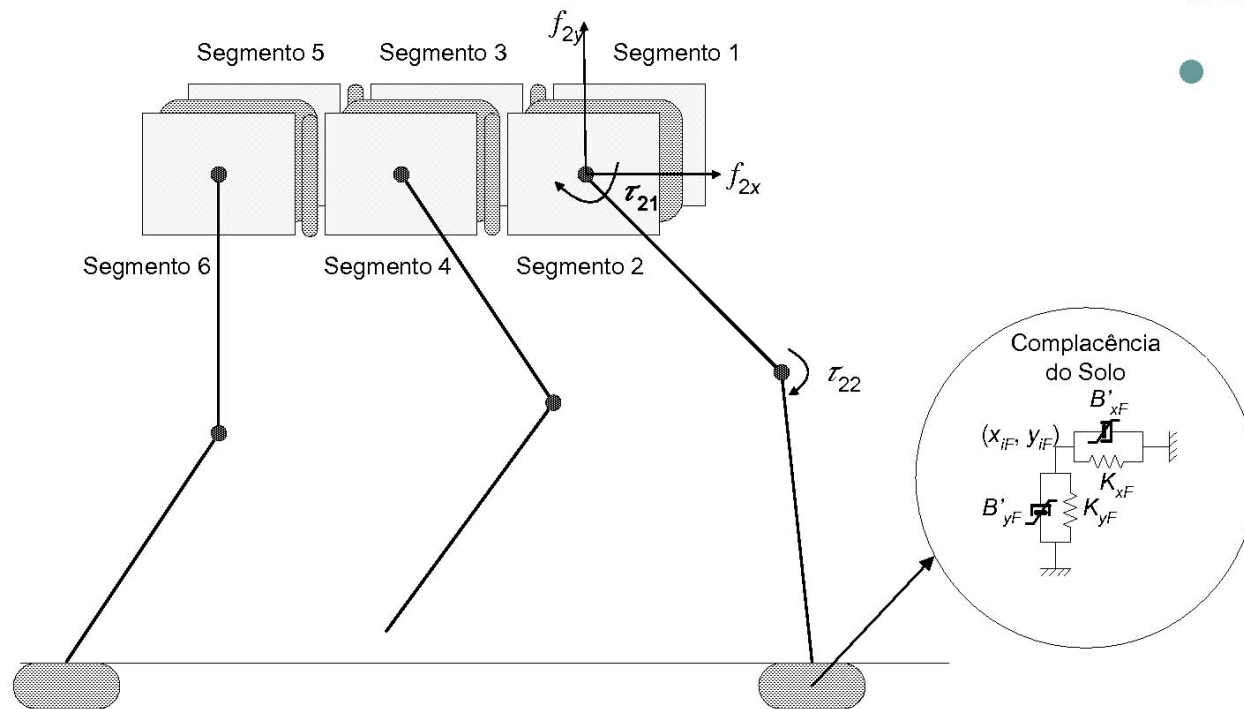
Complacência do Corpo (III) – mole



Modelo Dinâmico Interação Pé-Solo (I)

- Modelos aproximados da deformação do solo

- sistema linear com amortecimento $B_{\eta F}$ e rigidez $K_{\eta F}$ ($\eta = \{x, y\}$) (Lambe e Whitman, 1969)



$$f_{ixF} = -K_{xF} \Delta_{ixF} - B_{xF} \dot{\Delta}_{ixF}$$

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

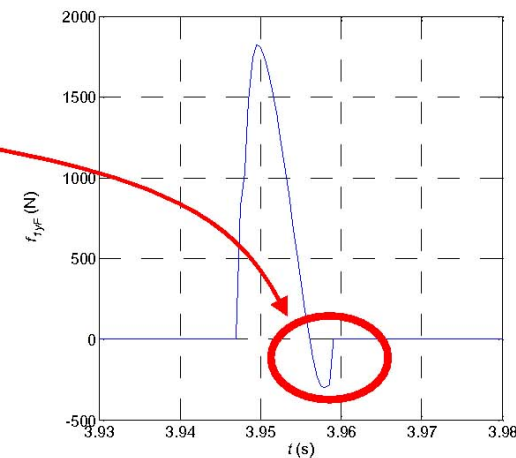
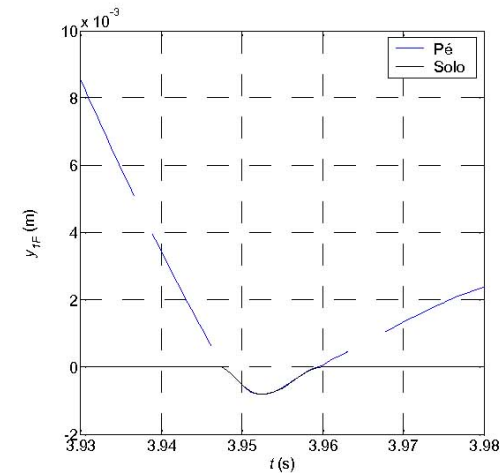
$$f_{iyF} = -K_{yF} \Delta_{iyF} - B_{yF} \dot{\Delta}_{iyF}$$

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

Modelo Dinâmico

Interação Pé-Solo (II)

- Modelo linear
 - computacionalmente simples
 - deficiências do modelo (Marhefka e Orin, 1996)
 - forças de contacto descontínuas no momento do impacto
 - modelo admite não só forças devido à compressão no ponto de contacto mas também **forças que tendem a manter os objectos colados**
 - dependência do coeficiente de restituição das massas dos corpos envolvidos no impacto e falta de dependência da velocidade de impacto



Modelo Dinâmico Interação Pé-Solo (III)

- Modelo aproximado da deformação do solo

- sistema não-linear

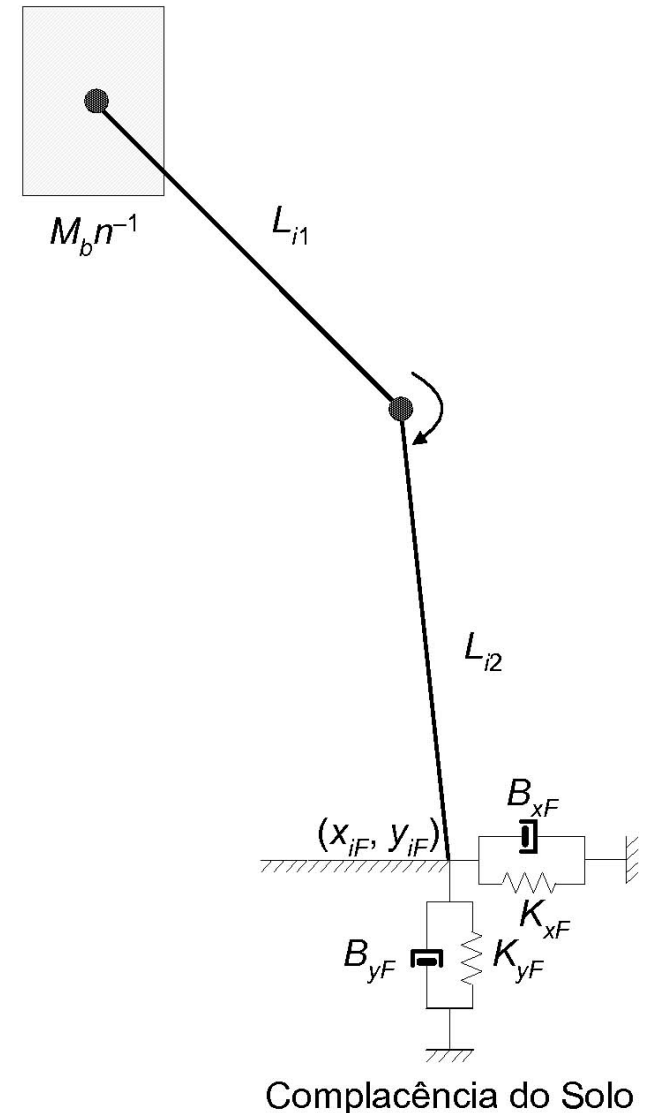
$$f_{ixF} = -K_{xF} \Delta_{ixF} - B'_{xF} (-\Delta_{iyF}) \dot{\Delta}_{ixF}$$

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

$$f_{iyF} = -K_{yF} \Delta_{iyF} - B'_{yF} (-\Delta_{ixF})^v \dot{\Delta}_{iyF}$$

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

- $v \approx 0.9$
- parâmetros $K_{\eta F}$ e $B'_{\eta F}$ calculados tendo por base estudos da mecânica dos solos



Modelo Dinâmico Interação Pé-Solo (IV)

- Modelo não linear

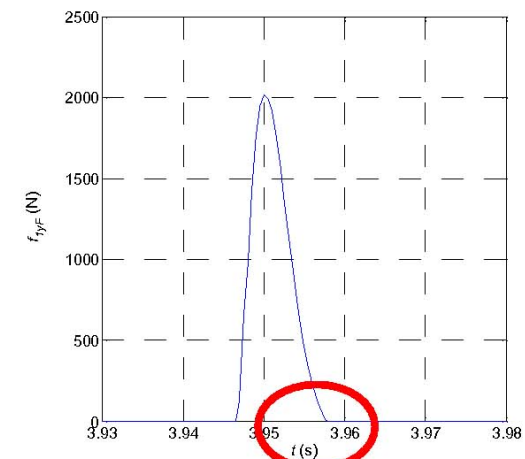
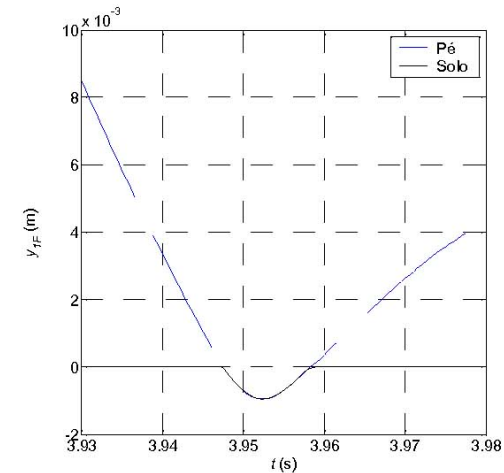
$$f_{ixF} = -K_{ix}\Delta_{ixF} - B'_{ix}(-\Delta_{iyF})\dot{\Delta}_{ixF}$$

$$f_{iyF} = -K_{iy}\Delta_{iyF} - B'_{iy}(-\Delta_{iyF})^v \dot{\Delta}_{iyF}$$

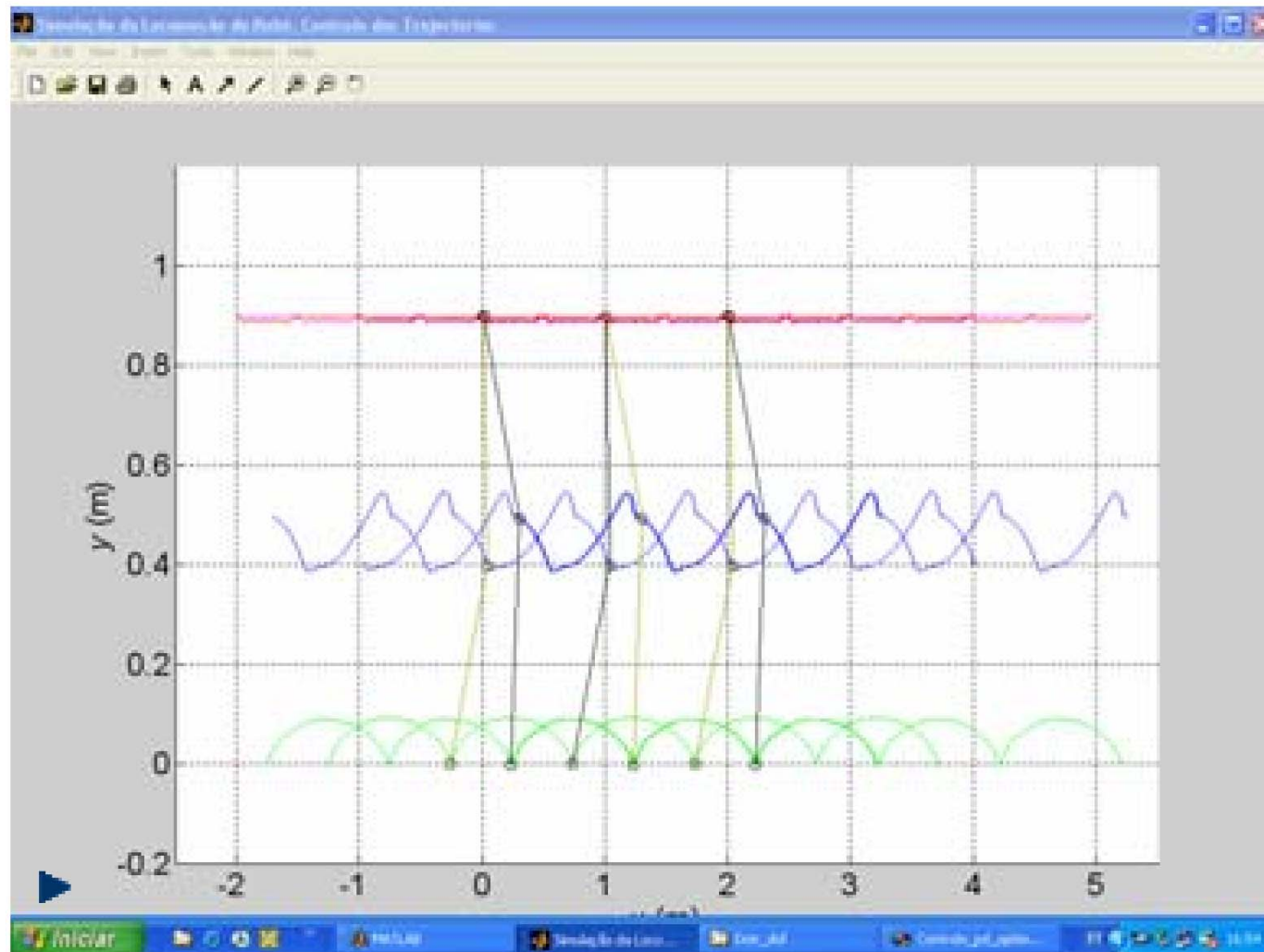
$$-B'_{xF}(-\Delta_{iyFMax}) = -B_{xF}$$

$$-B'_{yF}(-\Delta_{iyFMax})^v = -B_{yF}$$

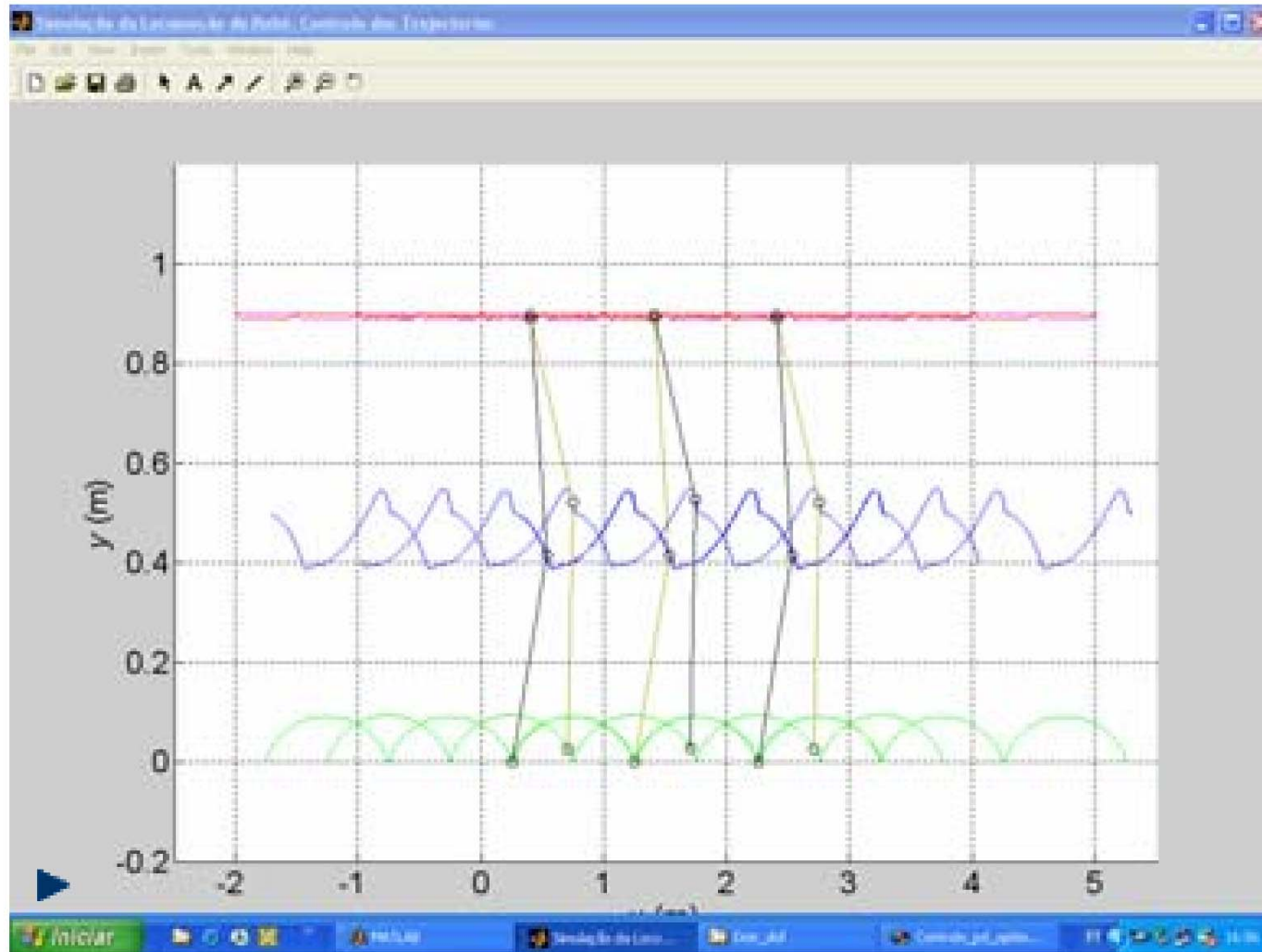
- $v \approx 0.9$
- não existem forças negativas



Modelo Dinâmico Solo Mole



Dynamic Model Solo Duro

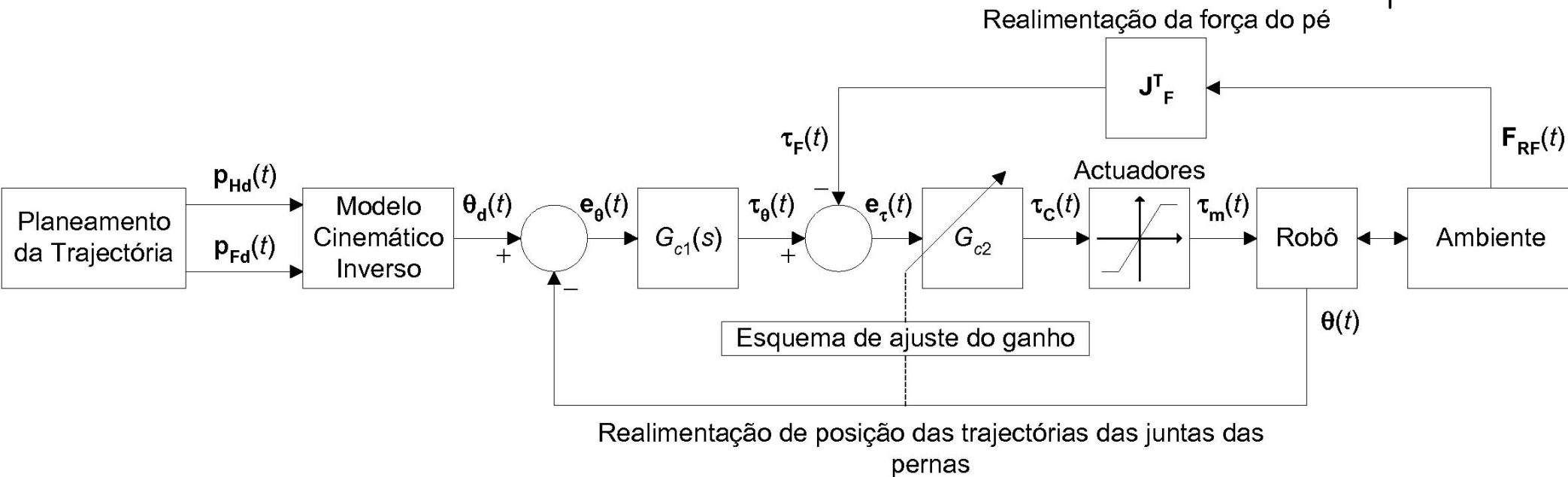


Controlo

Arquitectura de Controlo

- Estudar duas arquitecturas diferentes para o controlo das juntas das pernas de sistemas artificiais de locomoção
 - principal aspecto destas arquitecturas: algoritmo PD
 - influência da utilização de um algoritmo PD^α
 - utilizar estas soluções em hexápodes com pernas com três graus de liberdade
- Objectivo
 - determinar o seu desempenho e aplicabilidade

Arquitectura de Controlo PDv-P&F



- arquitectura de controlo PD-P&F para robôs multipernas
- realimentação de posição (anel exterior) e força de contacto do pé (anel interior)
- com esquema de ajuste do ganho na malha directa

Índices para Avaliação do Desempenho

- E_{av} : densidade de energia média absoluta por distância percorrida

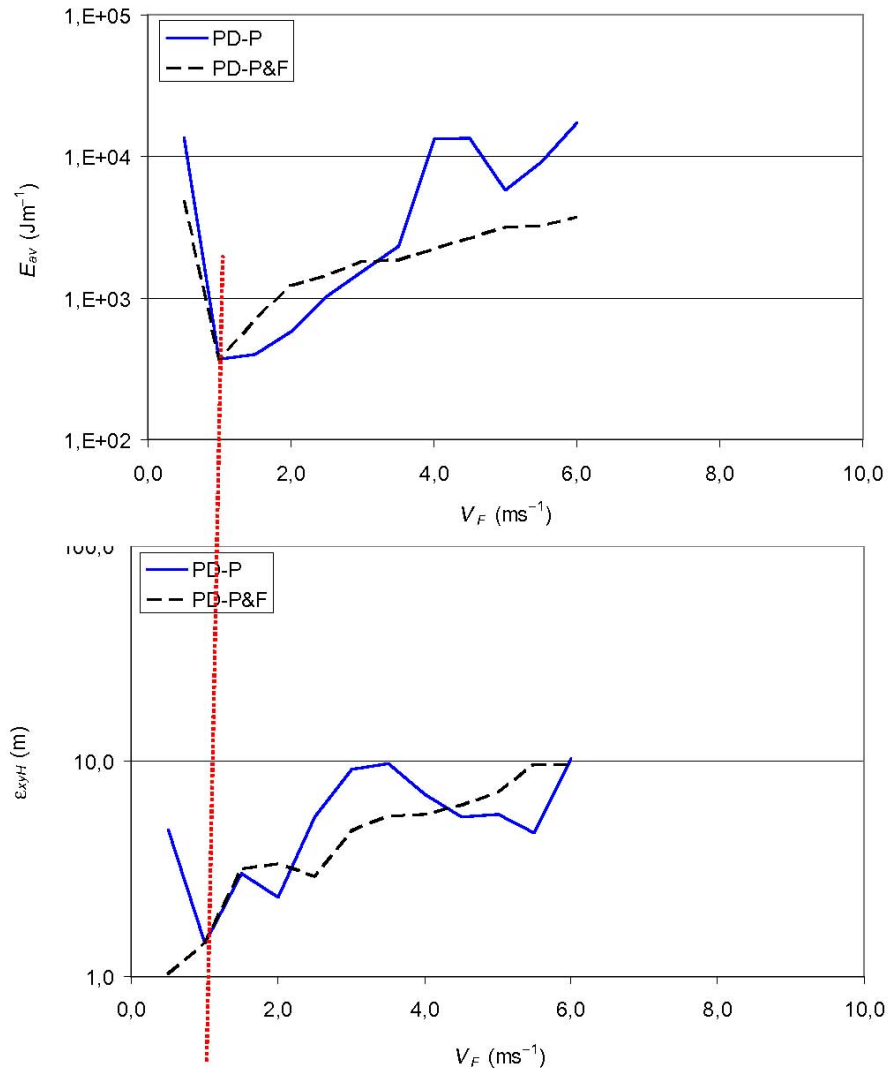
$$E_{av} = \frac{1}{d} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \int_0^T |\tau_{ijm}(t) \dot{\theta}_{ij}(t)| dt \quad [\text{Jm}^{-1}]$$

- ε_{xyH} : erros de seguimento das trajectórias das âncoras

$$\varepsilon_{xyH} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{1}{N_S} \sum_{k=1}^{N_S} (\Delta_{ixH}^2 + \Delta_{iyH}^2)}, \Delta_{i\eta H} = \eta_{iHd}(k) - \eta_{iH}(k), \eta = \{x, y\} \quad [\text{m}]$$

Arquitectura de Control

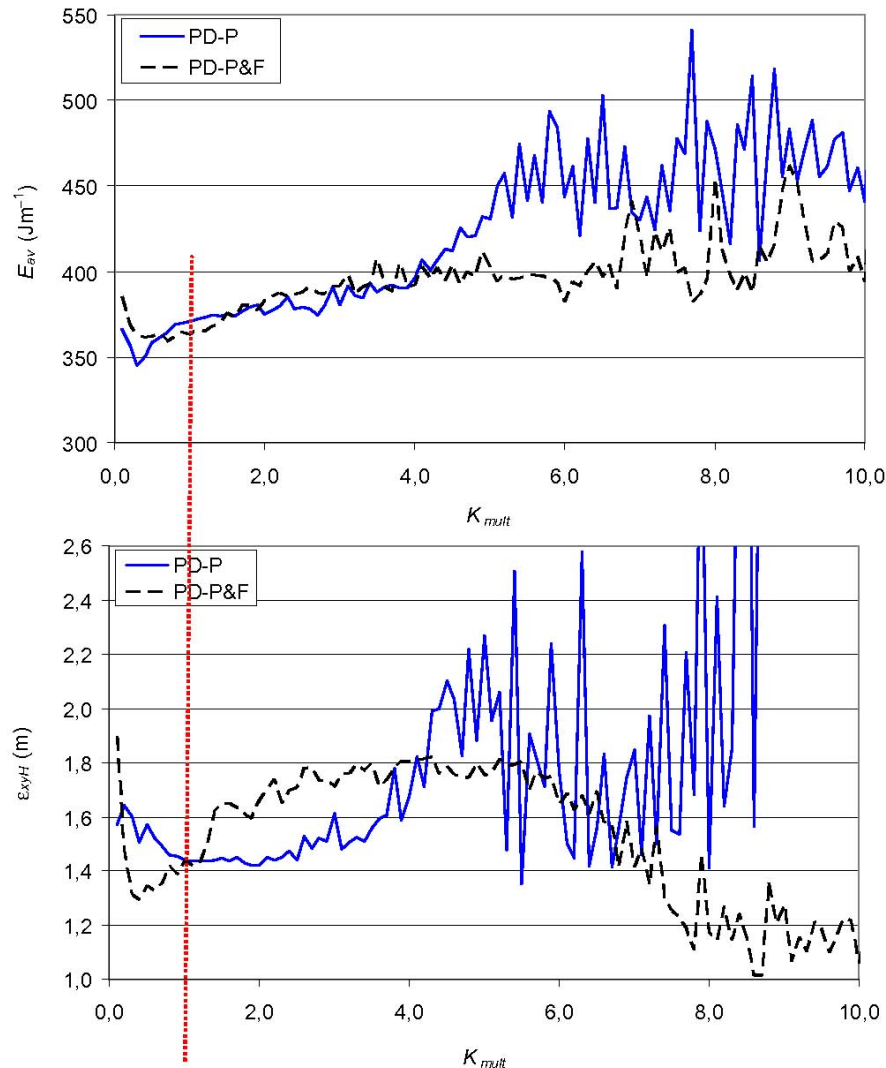
PD-P vs. PD-P&F (I)



E_{av} e ε_{xyH} vs. V_F para as
arquitecturas de controlo
PD-P and PD-P&F, com
 $\tau_{ijMax} = 400 \text{ Nm}$

Arquitectura de Control

PD-P vs. PD-P&F (II)



sintonia

E_{av} e ϵ_{xyH} vs. $K_{mult} =$
 $\times(K_{xF}, B'_{xF}, K_{yF}, B'_{yF})$
para as arquitecturas de
controlo PD-P e PD-P&F,
com $\tau_{ijMax} = 400 \text{ Nm}$

Arquitectura de Control

PD¹-P&F vs. PD^α-P&F

- Avaliação dos diferentes algoritmos em $G_{c1}(s)$

- PD clássico (PD¹)

$$G_{c1j}(s) = Kp_j + Kd_js, \quad j = 1, 2$$

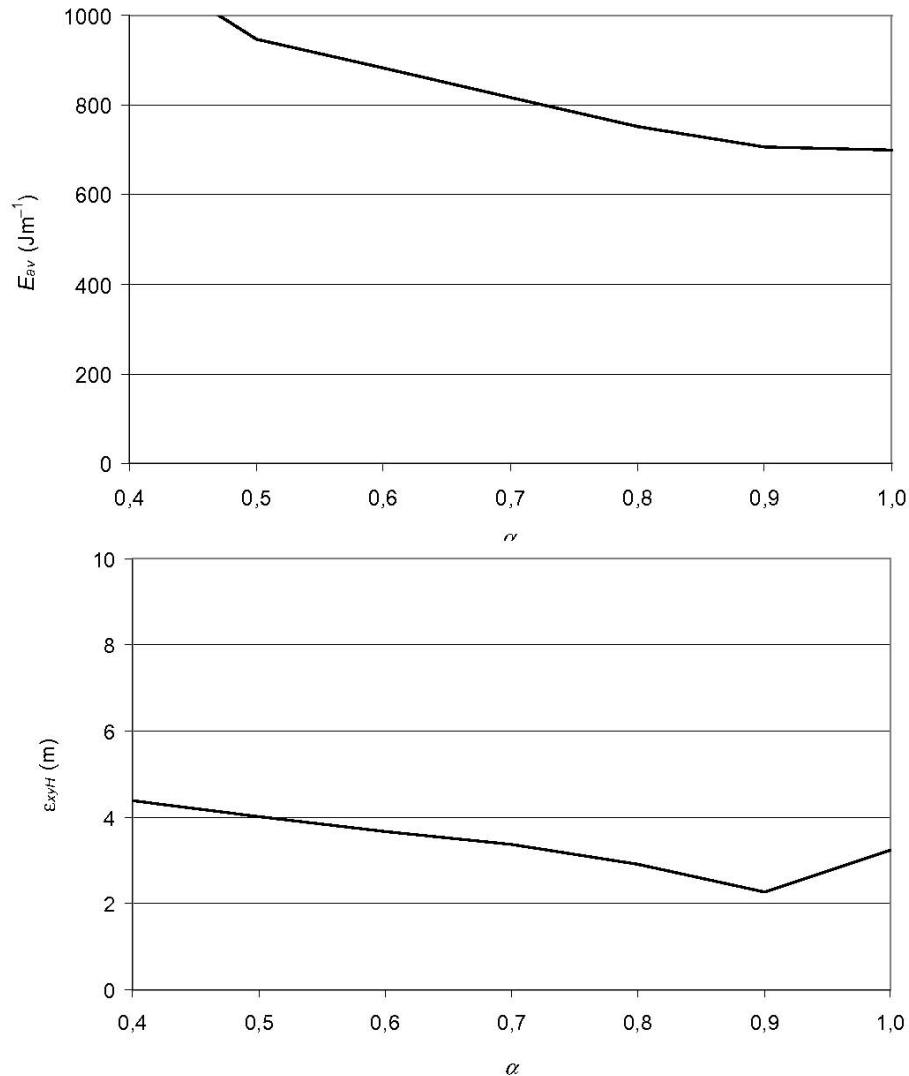
- algoritmo FO PD (PD^α)

$$G_{c1j}(s) = Kp_j + K\alpha_js^{\alpha_j}, \quad \alpha_j \in \mathbb{R}, \quad j = 1, 2$$

- controlador proporcional em G_{c2}

Arquitectura de Control

PD¹-P&F vs. PD^α-P&F



E_{av} e ε_{xyH} vs. α para
juntas das pernas com
atrito e flexibilidade e
 $\tau_{ijMax} = 400 \text{ Nm}$

- Arquitectura de controlo PD-P&F superior ao esquema de controlo clássico PD-P, do ponto de vista dos índices de desempenho propostos
- Controlador FO PD^α superior ao algoritmo PD^1 , do ponto de vista da robustez, isto é, quando os modelos dos actuadores e das transmissões das juntas incluem condições reais de operação e fenómenos dinâmicos
- Para pernas com três graus de liberdade, o controlador FO PD^α , com $\alpha_j \approx 0,5$, no caso em que o hexápode tem todas as juntas actuadas por motores, apresenta o melhor desempenho

Obrigado pela Vossa atenção! Questões?



Uma Visão Panorâmica sobre os
Robôs com Pernas

ROBOCONTROL'07
2007-Maio-28

Manuel F. Silva: mss@isep.ipp.pt
J. A. Tenreiro Machado: jtm@isep.ipp.pt

