

# Controlador desacoplado livre de modelo para caminhada de robôs humanoides

Maria Tejada-Begazo<sup>1,2</sup>, Esther Luna Colombini<sup>2</sup>, Alexandre da Silva Simões<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista (Unesp)  
Instituto de Ciência e Tecnologia – Sorocaba, SP, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)  
Instituto de Computação – Campinas, SP, Brasil

[m197488@dac.unicamp.br](mailto:m197488@dac.unicamp.br), [esther@ic.unicamp.br](mailto:esther@ic.unicamp.br), [alexandre.simoese@unesp.br](mailto:alexandre.simoese@unesp.br)

**Resumo.** *Controlar os movimentos de robôs projetados para atuar com ferramentas e em ambientes feitos para humanos tem se mostrado uma tarefa desafiadora. Essa dificuldade tem estimulado a investigação de novos métodos de controle que independam do modelo dinâmico dos robôs. A robô humanoide Marta, projetada e construída pelo grupo de trabalho, apresenta características construtivas diferenciadas: pés pequenos, pontas dos pés articuladas e junta esférica na cintura. Tendo em vista a arquitetura deste robô, o presente trabalho apresenta um controlador livre de modelo para a marcha de robôs humanoides composto por dois blocos desacoplados: i) um controlador clássico para a articulação esférica da cintura que foca na estabilidade do robô e ii) um controlador de trajetória para marcha baseada na Série Truncada de Fourier com parâmetros sintonizados por algoritmo genético. Os resultados mostram que a arquitetura mecânica e a estratégia de controle desacoplado têm juntas potencial para conferir robustez adicional ao caminhar de robôs bípedes em relação às técnicas convencionais.*

**Palavras chave:** *Robô humanoide. Algoritmo genético. Locomoção bípede.*

**Abstract.** *Controlling the movements of robots designed to work with tools and in environments made for humans has proven to be a challenging task. This difficulty has stimulated the investigation of new control methods independent of the robot's dynamic model. Marta's humanoid robot, designed and built by the workgroup, has different constructive characteristics: tiny feet, articulated toes, and a spherical joint at the waist. The present work considers the architecture of this robot, which presents a model-free controller for walking humanoid robots composed of two decoupled blocks: i) a classic controller for the spheric joint that focuses on the stability of the robot, and ii) a walk trajectory controller based on truncated Fourier series with parameters adjusted by genetic algorithm. The results show that the mechanical architecture and the decoupled control strategy can provide additional robustness when walking bipedal robots compared to conventional techniques.*

**Keywords:** *Robot humanoid. Genetic algorithm. Bipedal locomotion.*

**Dissertação de mestrado** apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica (PGEE) da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Sorocaba, SP, no dia **30/12/2020** sobre a orientação do **Prof. Dr. Alexandre da Silva Simões**. Artigo submetido ao Concurso de Teses e Dissertações em Robótica (CTDR-2022).

## 1. Introdução

Nas últimas décadas, a robótica tem sido utilizada em segmentos tais como medicina, militar, resgate, educação, etc. Nesses ambientes, os robôs são constantemente demandados a interagir em locais e com ferramentas projetadas para humanos, o que representa um desafio significativo. Nesse cenário, espera-se que os robôs humanoides – aqueles têm aparência semelhante à humana – tenham a capacidade de se mover de um ponto a outro da forma mais próxima possível do ser humano. Há, portanto, uma grande demanda por novos controladores que possam expandir as capacidades da caminhada de robôs bípedes.

Caminhar pode ser definido como “mover-se ou ir a algum lugar colocando um pé na frente do outro no chão, mas não correndo” [Oxford 2015]. Essa definição implica que devemos considerar que o robô tem sempre pelo menos um dos pés em contato com o solo durante o processo de caminhada. Sob essa ótica, o controle de caminhada de um robô humanoide é frequentemente dividido em duas abordagens: *i*) caminhada quase estática e *ii*) caminhada dinâmica. A caminhada **quase estática** foca na modelagem cinemática do robô geralmente baseada na teoria dos manipuladores robóticos. A principal desvantagem desta abordagem é a redução da velocidade de caminhada do robô, uma vez que este deve fazer movimentos lentos o suficiente para que a dinâmica do robô possa ser negligenciada. Por outro lado, o modelo de **caminhada dinâmica** tem como objetivo manter a estabilidade do robô considerando a dinâmica do ambiente, ou seja, foca nas forças internas e externas que atuam sobre o robô durante o movimento. Existem duas abordagens para a caminhada dinâmica: *i*) a abordagem **baseada em modelos**, que requer o modelo dinâmico do robô no ambiente, e *ii*) a abordagem **livre de modelo** onde a dinâmica do robô não precisa conhecer *a priori*, pois é empiricamente determinada durante o processo.

O grupo de pesquisa [GASI 2022] [LaRoCS 2022] projetou e implementou em ambientes físicos e simulados uma robô humanoide denominada Marta com 25 graus de liberdade (*Degrees of Freedom* - DoF) desenvolvida para a pesquisa de locomoção bípede, que apresenta três elementos particulares: *i*) pequena dimensão dos pés, *ii*) articulação nas pontas dos pés, e *iii*) uma articulação esférica na cintura do robô. Essas particularidades construtivas trazem novas possibilidades e desafios ao controle dinâmico da caminhada do humanoide com implicações no equilíbrio do robô durante a caminhada. Aproveitando a arquitetura mecânica deste robô, este trabalho propõe um controlador livre de modelo para o controle da marcha de robôs humanoides composto por *i*) um controlador clássico para o controle da articulação esférica – cintura – que foca na estabilidade do robô, e *ii*) um controlador de trajetória para as demais articulações – membros do robô – baseado no algoritmo da Série de Fourier Truncada (SFT) com seus parâmetros ajustados por Algoritmo Genético (GA) que foca na implementação de um padrão coordenado para caminhada.

Este artigo encontra-se dividido da seguinte forma: a seção 2 apresenta o estado da arte para a caminhada bípede; a seção 3 descreve com mais detalhes a abordagem proposta; a seção 4 descreve os experimentos realizados; a seção 5 apresenta os resultados obtidos; por fim, a seção 6 apresenta as conclusões deste trabalho.

## 2. Estado da Arte

Nesta seção são discutidos os algoritmos de controle baseados em: *i*) marcha quase estática (ou estática) e *ii*) marcha dinâmica, bem como descreve-se *iii*) a robô Marta.

## 2.1. Marcha Quase Estática

A marcha quase estática foi definida no início desta seção como uma marcha baseada no princípio de que o robô deve permanecer em equilíbrio todo o tempo. Para tanto, a projeção do Centro de Massa (*Center of Mass* – CoM) é tipicamente mantida permanentemente dentro do polígono de suporte formado pelos pés do robô. Esta abordagem é composta por duas fases consecutivas. Na primeira fase, **suporte simples**, o robô levanta um pé enquanto deixa o outro como ponto de apoio no solo. Na segunda fase, **suporte duplo**, o robô fica com os dois pés no chão, e o centro de massa deve se deslocar em direção ao espaço ocupado pelo pé que foi levantado anteriormente [Figuroa and Meggiolaro 2016].

Existem duas abordagens usuais para o projeto de controladores baseados na marcha quase estática: *i)* otimizar os parâmetros de um controlador clássico aplicado à abstração do modelo cinemático do robô [Rapetti et al. 2019] [Sari et al. 2019]; e *ii)* obter informações do ambiente que ajudarão a ter um controlador mais robusto [Mohamed et al. 2020]. A caminhada quase estática envolve a análise da estrutura e cinemática do robô. Portanto, os algoritmos que se baseiam nesta abordagem são de difícil transferência para outros robôs. O principal problema com esta abordagem é que os movimentos do robô são tipicamente executados em baixa velocidade para que a dinâmica não afete os movimentos.

## 2.2. Marcha Dinâmica

O segundo modelo de caminhada é baseado na hipótese de que o CoM do robô pode deixar o polígono de suporte em alguns momentos. A marcha dinâmica é determinada por duas posturas básicas: *i)* **suporte**, onde o pé do robô está em contato com o solo; e *ii)* **equilíbrio**, quando um pé está elevado [Rose and Gamble 1994]. Assim, podemos ter, por exemplo, simultaneamente a perna esquerda em suporte e a perna direita em equilíbrio. Além disso, há a fase de suporte duplo em que ambos os pés estão em contato com o solo. Essas posições básicas são subdivididas em [Sánchez-Lacuesta et al. 1993]:

- Suporte: O contato do calcanhar é subdividido em suporte da sola, suporte médio, elevação do calcanhar e, finalmente, elevação do pé.
- Equilíbrio: Aceleração, equilíbrio médio e desaceleração são determinados.

Figura 1 mostra o movimento dessas três posições e seus intervalos correspondentes.

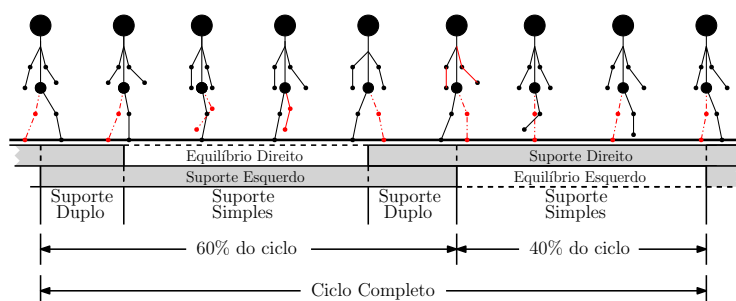


Figura 1. Ciclo de caminhada humana [Figuroa and Meggiolaro 2016].

O projeto de controladores para este tipo de marcha tem como foco encontrar um padrão de caminhada adequado para o controlador [Maximo et al. 2017]. Distinguem-se dois tipos de controladores: *i)* baseado em modelo e *ii)* livre de modelo.

A caminhada dinâmica **baseada em modelo** utiliza o modelo dinâmico do robô, ou seja, trabalha com as forças internas e externas que interagem com o robô [Villagra and Balaguer 2011]. O modelo do pêndulo invertido (*Inverted Pendulum Model* – IPM) é um dos modelos mais utilizados e oferece uma estrutura para lidar com o equilíbrio do robô. Essa metodologia é particularmente aplicável para movimentos cíclicos em terrenos planos [Coros et al. 2010]. Os trabalhos neste campo tem se concentrado em: *i*) melhorar este modelo (LIPM, TLPIM, IPM não linear); *ii*) trabalhar no plano frontal do robô (3D-LIPM); e *iii*) na posição das equações internas para aumentar a robustez do modelo (VLIPM, 3D-FPBIPM).

Os métodos **livres de modelo** buscam criar um controlador sem fazer uso da modelagem da dinâmica do robô. A estabilidade do movimento é avaliada tipicamente por tentativa e erro, o que normalmente requer técnicas derivadas de aprendizado de máquina (*Machine Learning* – ML) ou algoritmos de otimização. A ideia básica desse controlador decorre da premissa de que a marcha bípede não deveria ser planejada analiticamente, mas deveria surgir como resultado de oscilações não lineares decorrentes da retroalimentação e interação dinâmica entre o sistema e o ambiente [Kato and Mori 1984]. Para tanto existe um Gerador de Padrão Central (*Central Pattern Generator* – CPG) inspirado em padrões gerados pela atividade neural em humanos que conduzem ritmicamente movimentos motores como caminhar, nadar, respirar ou mastigar [Sayari et al. 2019]. Outra abordagem é baseada no movimento periódico da marcha. Em geral, há um deslocamento de fase entre os lados direito e esquerdo do corpo, onde um lado está sempre meio período atrasado em relação ao outro. A figura 2 apresenta a trajetória angular de duas articulações – quadril e joelho – de um humano capturadas durante uma marcha [Yang et al. 2007].

A Série Truncada de Fourier (SFT) pode ser utilizada para replicar cada trajetória do quadril e joelho utilizando:

$$\theta_{hip}(t) = \begin{cases} a_{hp} + A_{hp} \sin(i\omega_{hp}t) & t \in R_1, \\ a_{hp} + B_{hp} \sin(i\omega_{hp}t) & t \in R_2. \end{cases} \quad (1)$$

$$\theta_{knee}(t) = \begin{cases} a_{kn} + C_{kn} \sin(i\omega_{kn}t_2) & t \in R_1, \\ a_{kn} & t \in R_2. \end{cases} \quad (2)$$

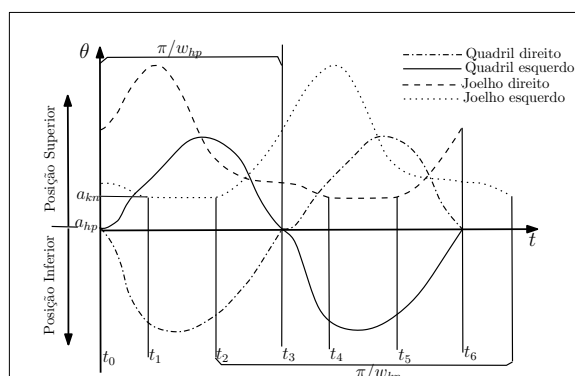
$$R_1 = [kT, \frac{T}{2} + kT), k \in \mathbb{Z}, \quad (3)$$

$$R_2 = [\frac{T}{2} + kT, (k + 1)T), k \in \mathbb{Z}; \quad (4)$$

onde:  $A_{hp}$ ,  $B_{hp}$  e  $C_{kn}$  são coeficientes constantes para geração de sinais;  $T$  é o período da trajetória dos ângulos;  $a_{hp}$  e  $a_{kn}$  são *offsets* do sinal.

Os parâmetros das equações de SFT podem então ser adaptados para reproduzir caminhadas de diferentes tipos de robôs mediante a sintonização adequada dos parâmetros das equações, ou seja, no exemplo acima os parâmetros  $A_{hp}$ ,  $B_{hp}$ ,  $C_{kn}$ ,  $a_{hp}$ ,  $a_{kn}$  e  $t_2$ . Os algoritmos evolutivos são comumente utilizados para essa tarefa [Maximo et al. 2017] [Villela and Colombini 2017] [Salehi et al. 2018] [Abedi et al. 2017].

Trabalhos recentes aplicaram com sucesso a técnica livre de modelo para gerar padrões



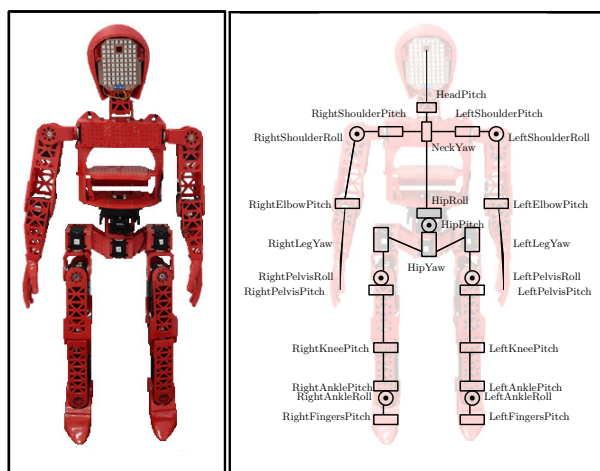
**Figura 2. Padrão genérico de caminhada elaborado a partir de características da caminhada humana [Yang et al. 2007]**

de caminhada para robôs com diferentes DOFs e características de construção, como o robô NAO [Shafii et al. 2010] e o Robonova [Maximo et al. 2017]. A aplicação desta técnica a diferentes robôs ou considerando diferentes DOFs tipicamente requer tanto adaptações na geração das curvas quanto ajustes dos parâmetros através de algoritmos de ML.

### 2.3. A Robô Marta

A robô humanoide Marta [GASI 2022] [LaRoCS 2022], apresentada na figura 3, possui as seguintes particularidades:

- Aproximadamente 1m de altura e 25 DoFs;
- Uma junta esférica no quadril, com 3 DoFs críticos para a estabilidade do robô;
- Pés pequenos quando comparados às proporções usualmente encontradas em robôs humanóides, o que reduz significativamente o polígono de apoio na fase de apoio da caminhada;
- Articulações simulando dedos nos pés, o que traz novas possibilidades para a marcha e seu controle.



**Figura 3. Foto da robô Marta (esquerda) e diagrama esquemático destacando seus 25 DoFs (direita).**

### 3. Abordagem Proposta

Este trabalho propõe desacoplar o controle do robô humanoide utilizando para tanto dois controladores distintos: *i)* o controlador da cintura e *ii)* o controlador SFT, cada um deles aplicado a um subconjunto específico de articulações. O controlador de cintura é um controlador PID que atua na articulação esférica com o objetivo de manter o equilíbrio da parte superior do robô. Já o controlador SFT é um controlador livre de modelo e atua sobre os demais DoFs (quadril, joelho, tornozelo, pé, ombro e cotovelo) com foco na geração de padrões de movimento adequados para essas articulações. Com o conjunto dos dois controladores espera-se, portanto, simultaneamente gerar trajetórias para uma caminhada de sucesso mantendo-se o robô constantemente em equilíbrio para realizar essa caminhada.

#### 3.1. Controlador SFT

Este controlador foca na geração dos padrões adequados de trajetória dos movimentos das articulações usando a SFT. Como o robô Marta possui uma estrutura mecânica diferente dos robôs modelados por trabalhos anteriores [Shafii et al. 2009a] [Shafii et al. 2009b] [Shafii et al. 2010] [Maximo et al. 2017], adaptações se mostraram necessárias no controlador. Em trabalhos anteriores, foram consideradas as seguintes articulações: *pelvis pitch*, *knee pitch* e *ankle pitch* [Shafii et al. 2009a]. Os movimentos dessas articulações foram determinados pelas seguintes equações:

$$\theta_{RplvP}(t) = O_{plvP} + d_f * A_{plvP} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right), \quad (5)$$

$$\theta_{LplvP}(t) = O_{plvP} - d_f * A_{plvP} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right). \quad (6)$$

$$\theta_{RknP}(t) = \begin{cases} O_{knP} & t \in R_1, \\ O_{knP} - d_f * C_{knP} \sin\left(\frac{2\pi(t-t_{2k})}{T}\right) & t \in R_2. \end{cases} \quad (7)$$

$$\theta_{LknP}(t) = \begin{cases} O_{knP} + d_f * C_{knP} \sin\left(\frac{2\pi(t-t_{2k})}{T}\right) & t \in R_1, \\ O_{knP} & t \in R_2. \end{cases} \quad (8)$$

$$R_1 = [kT, \frac{T}{2} + kT), \quad k \in \mathbb{Z}, \quad (9)$$

$$R_2 = [\frac{T}{2} + kT, (k+1)T), \quad k \in \mathbb{Z}; \quad (10)$$

onde: *plvP* e *knP* são índices de referência a *pelvis* e *knee pitch*, respectivamente;  $\theta_{plvP}$  e  $\theta_{knP}$  representam os ângulos da trajetória no tempo  $t$ ;  $O_{plvP}$  e  $O_{knP}$  são o deslocamento do sinal;  $A_{plvP}$ ,  $C_{knP}$  representam a amplitude positiva do sinal;  $T$  representa o período do movimento que determina a velocidade de caminhada;  $t_{2K}$  é o atraso de tempo do sinal do joelho;  $d_f$  é o fator de amortecimento que aumentará a cada ciclo de 0 a 1 para permitir a partida suave do robô, isto é, os movimentos serão iniciados com uma amplitude reduzida nos primeiros ciclos;  $k$  é o ponto corrente no ciclo de caminhada. Relevante destacar que nas equações originais [Shafii et al. 2009a], uma constante  $B$  representava a amplitude negativa da pélvis. No presente trabalho, pelas características construtivas do robô, esta amplitude foi modelada igual à positiva ( $A_{plvP}$ ).



Considerando as características construtivas da robô Marta, a modelagem de novas juntas foi necessária. As equações adotadas para o *pelvis roll* foram:

$$\theta_{RplvR}(t) = d_f * \left( A_{plvR} \sin \left( \frac{2\pi(t - t_{2p})}{T} \right) \right), \quad (11)$$

$$\theta_{LplvR}(t) = d_f * \left( A_{plvR} \sin \left( \frac{2\pi(t - t_{2p})}{T} \right) \right); \quad (12)$$

onde: *plvR* é referência do *pelvis roll*;  $\theta_{plvR}$  representa o ângulo na trajetória no tempo  $t$ ;  $A_{plvR}$  e  $B_{plvR}$  representam a amplitude positiva e negativa do sinal, respectivamente;  $T$  representa o período do movimento que é o mesmo que *pelvis pitch*, *knee pitch* e *ankle pitch*;  $t_{2p}$  é o tempo de atraso do sinal.

A articulação *shoulder pitch* foi introduzida utilizando [Shafii et al. 2009b]:

$$\theta_{shP}(t) = d_f * \begin{cases} D_+ \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) & t \in R_1, \\ D_- \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) & t \in R_2, \end{cases} \quad (13)$$

onde:  $D_+$  e  $D_-$  representam a amplitude positiva e negativa do *shoulder pitch*. Neste caso, o *shoulder pitch* não mostra o deslocamento do sinal, pois a premissa dos braços é que o movimento comece com o ângulo  $0^\circ$ .

Os graus de liberdade do *ankle* modelam a posição da sola do pé do robô, ou seja, são diretamente responsáveis pela estabilidade do robô em relação ao solo. Para o *ankle pitch*, que modela a estabilidade frontal, três abordagens distintas foram investigadas:

1. O *passo do tornozelo* é definido pela soma das articulações do *pelvis pitch* e do *knee pitch*, ou seja:

$$\theta_{RankP}(t) = -(\theta_{RplvP}(t) + \theta_{RknP}(t)), \quad (14)$$

$$\theta_{LankP}(t) = -(\theta_{LplvP}(t) + \theta_{LknP}(t)). \quad (15)$$

2. O *ankle pitch* segue um sensor de orientação colocado nos pés do robô, e
3. O *ankle pitch* depende do sensor de orientação da pélvis do robô. Se o sensor da pélvis do robô for maior que a inclinação máxima (*MaxIncl*), o *ankle pitch* segue a soma dos pés e do sensor da pélvis do robô (*PlvSensor*); caso contrário, será determinado apenas pelo sensor de pés. Está ilustrado na seguinte equação:

$$\theta_{ankP}(t) = \begin{cases} -1.0 * (FeetSensor + Kp_{ank} * PelvisSensor) & abs(PlvSensor) \geq MaxIncl \\ -1.0 * FeetSensor & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (16)$$

Já o *ankle roll*, responsável pela estabilidade lateral dos pés, foi modelado como sempre paralelo ao solo. Nesse contexto, duas abordagens distintas foram investigadas:

1. O *ankle roll* é definido pelo ângulo invertido da *pelvis roll*, ou seja:

$$\theta_{RnkR}(t) = -(\theta_{plvR}(t)), \quad (17)$$

$$\theta_{LnkR}(t) = -(\theta_{plvR}(t)). \quad (18)$$

2. O *ankle roll* segue um sensor de orientação colocado nos pés do robô.

### 3.2. Controlador da Cintura

O desacoplamento do robô *Marta* permite que sua parte superior funcione como um pêndulo invertido. A hipótese investigada, portanto, é de que o controle dos 3 DoFs presentes na cintura possa levar robôs humanoides a uma caminhada dinamicamente mais estável para as mesmas ondas geradas pelo controlador SFT. O modelo adotado para o controlador foi o PID. Uma vez que esta estratégia de controle tem sido extensivamente utilizada para controlar pêndulos invertidos, também é razoável esperar que ela possa alcançar resultados satisfatórios neste domínio. Para o ajuste das constantes  $K_p$ ,  $K_d$  e  $K_i$ , duas abordagens foram investigadas: *i*) O método tradicional de Ziegler-Nichols, e *ii*) a abordagem baseada em aprendizagem por reforço (*Reinforcement Learning* – RL). A adoção da abordagem RL se justifica considerando que robôs humanoides estão sujeitos a padrões de entrada e saída complexos, o que poderia fazer com que um método baseado em curvas de resposta pudesse ter um desempenho inadequado na sintonia dos parâmetros.

## 4. Experimentos

Os experimentos foram conduzidos com a versão simulada do robô *Marta* no ambiente V-REP. A implementação foi realizada em C++ utilizando biblioteca GALib (AGs) configurada <sup>1</sup>. O PID foi inicialmente sintonizado utilizando o método de Ziegler-Nichols. Três grupos de experimentos distintos foram realizados:

- **ANK01-03:** Três experimentos para avaliação da caminhada da robô para as diferentes estratégias de controle dos tornozelos descritas na seção 3.1;
- **EXP01-05:** Cinco experimentos para avaliação do controlador desacoplado completo:
  1. **EXP01.** Os três DoFs da articulação esférica da cintura do robô foram fixados. Desta forma, *Marta* se assemelhava a um robô tradicional com corpo rígido;
  2. **EXP02.** O *pitch* DoF da junta esférica foi liberado e controlado por um algoritmo proporcional (P) com a referência do corpo configurada para a posição vertical. *Roll* e *yaw* permaneceram fixos;
  3. **EXP03.** Os DoFs de *pitch* e *yaw* da articulação esférica foram liberados e controlados por um algoritmo PID com a referência do corpo configurada para a posição vertical. O *roll* permaneceu fixo;
  4. **EXP04.** Os DoFs de *pitch* e *roll* da junta esférica foram liberadas e controladas por um algoritmo PID com a referência do corpo configurada para as posições verticais. O *yaw* permaneceu fixo;
  5. **EXP05.** Os DoFs de *pitch*, *yaw* e *roll* da junta esférica foram liberados e controlados por um algoritmo PID com a referência do corpo configurada para a posição vertical;
- **RL01:** experimento final com a melhor configuração obtida sintonizando a constante *Pitch* do PID por RL conforme descrito na seção 3.2.

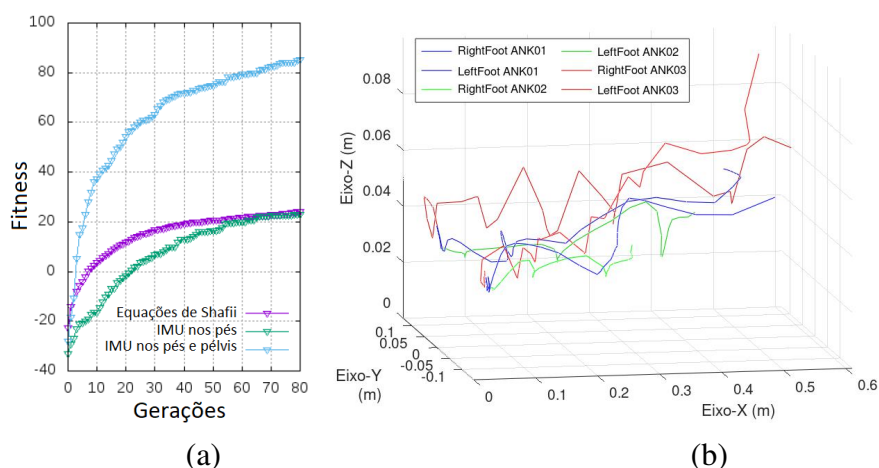
---

<sup>1</sup>Os limites para os alelos de cada genoma foram configurados como a posição máxima e mínima de cada articulação. Os parâmetros iniciais do algoritmo genético para cada experimento foram: tamanho da população é 100; geração máxima de 80 indivíduos; semente para início da população 100; probabilidade de substituição de indivíduos 0.8; probabilidade de mutação 0.3; tempo máximo para cada teste 35s; seleção por roleta; *crossover* de um ponto; operador de mutação com distribuição uniforme. A execução de cada genoma foi repetida 3 vezes considerando a média dos resultados obtidos.



## 5. Resultados

A figura 4 apresenta os resultados da caminhada da robô com as três diferentes estratégias de controle dos tornozelos. Claramente, a estratégia de utilizar as duas IMUs (pés e pelvis) obteve tanto os melhores valores de *fitness* quanto proporcionou os deslocamentos mais estáveis e prolongados nos pés.



**Figura 4. Avaliação das estratégias de controle dos tornozelos. a) Evolução da função de *fitness* durante o treinamento; b) Trajetória dos pés esquerdo e direito do robô durante uma caminhada para os melhores indivíduos obtidos. ANK01) Utilizando as equações de Shafii; ANK02) Utilizando IMUs posicionadas nos pés da robô; ANK03) utilizando IMUs nos pés e pélvis da robô.**

Os resultados para os experimentos com o controlador livre de modelo utilizando a estratégia de controle desacoplado são apresentados na figura 5. O EXP01 resultou em um robô instável e com menor *fitness* para a maioria dos padrões de caminhada gerados pelo gerador SFT. Experimentos com algum DoF ativo na junta esférica resultaram sempre em um robô mais estável e, portanto, em valores *fitness* mais elevados. Para todas essas estratégias de controle, o robô conseguiu dar alguns passos. O melhor padrão de marcha foi obtido com todos os graus de liberdade controlados pelo PID.

Na figura 6 e no seguinte link <https://youtu.be/t5Jb03OzsQk> mostra o padrão de caminhada final da robô utilizando o RL. Nos testes realizados, a robô foi capaz de caminhar aproximadamente 1m com o controlador livre de modelo baseado na estratégia desacoplada. Relevante destacar que a robô Marta é de controle bem mais complexo que outros robôs com controle semelhante encontrados na literatura.

## 6. Conclusão

O presente trabalho apresentou uma estratégia para controlar a caminhada de robôs humanoides baseada em desacoplar o robô em duas partes: *i*) uma cintura ativa com 3-DoFs controlada por PID focada em manter o equilíbrio do robô, e *ii*) um controlador livre de modelo focado na geração de ondas baseado em SFT para os demais DoFs. Diferentes algoritmos de ML – Algoritmo Genético em (i) e Aprendizado por Reforço em (ii) – foram utilizados para selecionar os melhores padrões para uma caminhada da robô Marta.

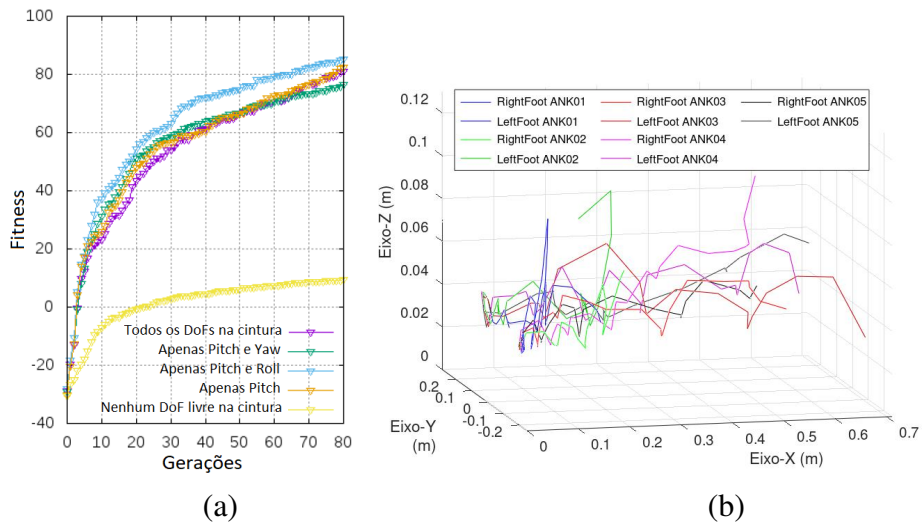


Figura 5. Avaliação geral das estratégias do controlador desacoplado. a) Evolução da função de fitness durante o treinamento; b) Trajetórias dos pés esquerdo e direito da robô do melhor indivíduo obtido com: EXP01) nenhum DoF livre na cintura; EXP02) Apenas *Pitch* controlado; EXP03) Apenas *Pitch* e *Roll* controlados; EXP04) Apenas *Pitch* e *Yaw* controlados; EXP05) Todos os DoFs controlados na cintura.

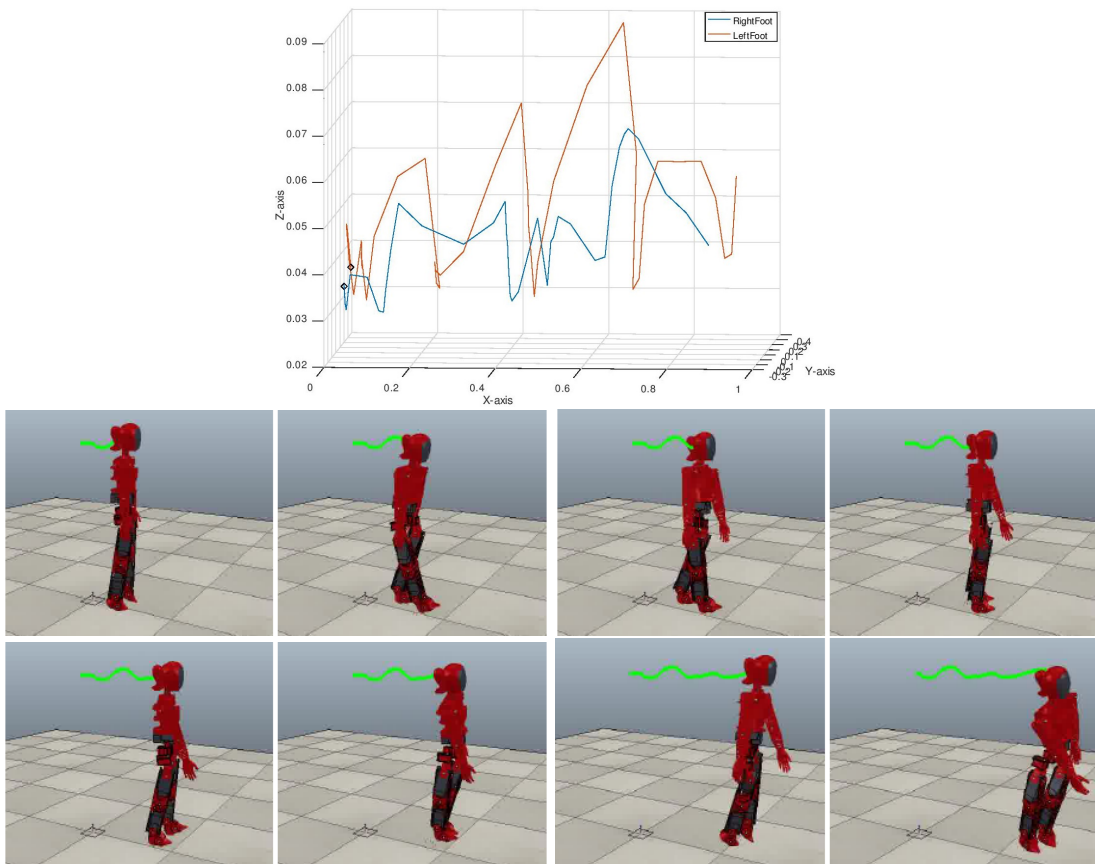


Figura 6. Padrão de caminhada final aprendido pela robô utilizando a estratégia do controlador desacoplado com parâmetro do PID aprendido por RL.

Com base nos experimentos realizados, corroboramos a hipótese de que a inserção de 3 DoFs ativos na cintura do robô humanoide **permite caminhadas mais estáveis** para um maior número de formas de onda geradas pelo controlador SFT. De fato, essa arquitetura demonstra grande potencial para controlar robôs humanoides sem a necessidade de modelagem, e futuros algoritmos podem explorar em maior profundidade as novas possibilidades abertas por este trabalho preliminar.

Dentre as contribuições do presente trabalho, destacamos:

- Uma revisão do estado-da-arte sobre abordagens para o caminhar de robôs;
- A implementação de um *framework* computacional que permitiu trabalhar com a versão simulada do robô humanoide Marta;
- A proposição, implementação e testes de um novo controlador híbrido baseado na estratégia de desacoplar o controle dos robôs humanoides;
- A investigação do uso de um controlador PID clássico na cintura de robôs humanoides modelando seus membros superiores como pêndulo invertido e a avaliação da estabilidade das caminhadas obtidas;
- A investigação do uso de Aprendizado por Reforço para sintonia de parâmetros do controlador PID da cintura da robô Marta e a avaliação da caminhada obtida;
- As adequações nas equações baseadas em SFT expandindo-as para um modelo de robô humanoide mais complexo;
- A investigação da otimização dos parâmetros dessas equações utilizando Algoritmos Genéticos para controlar os movimentos de membros do robô;
- A comparação entre o padrão de caminhada obtido pelo algoritmo proposto e o método proposto por [Shafi et al. 2010].

Como trabalhos futuros, destacamos: *i*) A investigação de novas estratégias de controle dos tornozelos para melhor equilíbrio do robô; *ii*) A investigação de novos algoritmos para sintonia do PID na cintura após a fase de aprendizado, e *iii*) A investigação da articulação livre nos dedos, não explorada neste trabalho.

## Referências

- Abedi, E., Alamirpour, P., and Mirshahvalad, R. (2017). Control humanoid robot using intelligent optimization algorithms fusion with fourier series. In *2017 9th Int. Conf. on Comp. Intelligence and Com. Networks (CICN)*, pages 181–185. IEEE.
- Coros, S., Beaudoin, P., and Van de Panne, M. (2010). Generalized biped walking control. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 29(4):1–9.
- Figuroa, A. L. and Meggiolaro, M. A. (2016). Modelagem e otimização por algoritmos genéticos de padrões de marcha quase-estática de robôs bípedes planos. Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- GASI (2022). Grupo de Automação e Sistemas Integráveis. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp). <http://www.sorocaba.unesp.br/gasi>. Acesso em 14/08/2022.
- Kato, R. and Mori, M. (1984). Control method of biped locomotion giving asymptotic stability of trajectory. *Automatica*, 20(4):405–414.
- LaRoCS (2022). Laboratório de Robótica e Sistemas Cognitivos. Universidade Estadual de Campinas. <https://larocs.ic.unicamp.br/>. Acesso em 14/08/2022.

- Maximo, M. R., Colombini, E. L., and Ribeiro, C. H. (2017). Stable and fast model-free walk with arms movement for humanoid robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14(3):1729881416675135.
- Mohamed, S. A., Awad, M. I., and Maged, S. A. (2020). Online gait generation for nao humanoid robot using model predictive control. In *2020 International Conference on Innovative Trends in Communication and Computer Engineering (ITCE)*, pages 205–209. IEEE.
- Oxford (2015). *Oxford Advanced Learner's Dictionary*. Oxford University Press, 9th edition.
- Rapetti, L., Tirupachuri, Y., Darvish, K., Latella, C., and Pucci, D. (2019). Model-based real-time motion tracking using dynamical inverse kinematics. *arXiv preprint arXiv:1909.07669*.
- Rose, J. and Gamble, J. G. (1994). *Human walking*. Williams & Wilkins.
- Salehi, M., Azarkaman, M., and Aghaabbasloo, M. (2018). Optimized joint trajectory model with customized genetic algorithm for biped robot walk. *Journal of Computer & Robotics*, 11(1):21–29.
- Sánchez-Lacuesta, J., Prat, J., Hoyos, J. V., Viosca, E., Soler-Gracia, C., Comín, M., Lafuente, R., and Cortés, A. (1993). Biomecánica de la marcha humana normal y patológica. *Valencia: Instituto de Biomecánica de Valencia*, 1.
- Sari, W. P., Dewanto, R. S., and Pramadihanto, D. (2019). Kinematic and dynamic modelling of "t-flow" humanoid robot for ascending and descending stair. In *2019 International Electronics Symposium (IES)*, pages 82–87. IEEE.
- Sayari, M. A., Masmoudi, N., and Zaier, R. (2019). Bio-inspired cpg based locomotion for humanoid robot application. In *International Conference Design and Modeling of Mechanical Systems*, pages 910–918. Springer.
- Shafii, N., Aslani, S., Nezami, O. M., and Shiry, S. (2009a). Evolution of biped walking using truncated fourier series and particle swarm optimization. In *Robot Soccer World Cup*, pages 344–354. Springer.
- Shafii, N., Khorsandian, A., Abdolmaleki, A., and Jozi, B. (2009b). An optimized gait generator based on fourier series towards fast and robust biped locomotion involving arms swing. In *Automation and Logistics, 2009. ICAL'09. IEEE International Conference on*, pages 2018–2023. IEEE.
- Shafii, N., Reis, L. P., and Lau, N. (2010). Biped walking using coronal and sagittal movements based on truncated fourier series. In *Robot Soccer World Cup*, pages 324–335. Springer.
- Villagra, J. and Balaguer, C. (2011). A model-free approach for accurate joint motion control in humanoid locomotion. *Int. Journal of Humanoid Robotics*, 8(01):27–46.
- Villela, L. F. C. and Colombini, E. L. (2017). Humanoid robot walking optimization using genetic algorithms. Relatório técnico. Instituto de Computação. Unicamp, julho.
- Yang, L., Chew, C.-M., Zielinska, T., and Poo, A.-N. (2007). A uniform biped gait generator with offline optimization and online adjustable parameters. *Robotica*, 25(5):549–565.