

# 1 Introdução

## 1.1 Motivação

Um transportador pessoal robótico auto-equilibrante (TPRE) é uma plataforma com duas rodas paralelas que funciona a partir do equilíbrio do indivíduo que o utiliza, assemelhando-se ao funcionamento do clássico pêndulo invertido. Entre as principais características que o TPRE possui, podem-se destacar a rapidez na movimentação, possuir um espaço de uso reduzido, poder fazer curvas com raio igual a zero, e alta capacidade de carga em relação ao peso próprio. Ele pode ser resistente, se possuir uma estrutura compacta, e possuir agilidade muito maior que outros tipos de transporte pessoal. Ao contrário dos veículos motorizados regulares, o TPRE utiliza alimentação elétrica, portanto não existe emissão poluidora ao ambiente e, além disso, evita o problema de poluição sonora.

## 1.2 Objetivo

O objetivo da presente dissertação é desenvolver um transportador pessoal robótico auto-equilibrante funcional, utilizando diferentes estratégias de controle - Controle PID, Controle Fuzzy e Controle Robusto - e avaliar os desempenhos de cada um e sua estabilidade.

## 1.3 Revisão Bibliográfica

O lançamento do primeiro transportador pessoal robótico auto-equilibrante foi publicado em 3 de dezembro de 2001, em *Bryant Park*, na cidade de *Nova York*, no programa *Good Morning América* da rede de televisão ABC News. O inventor do

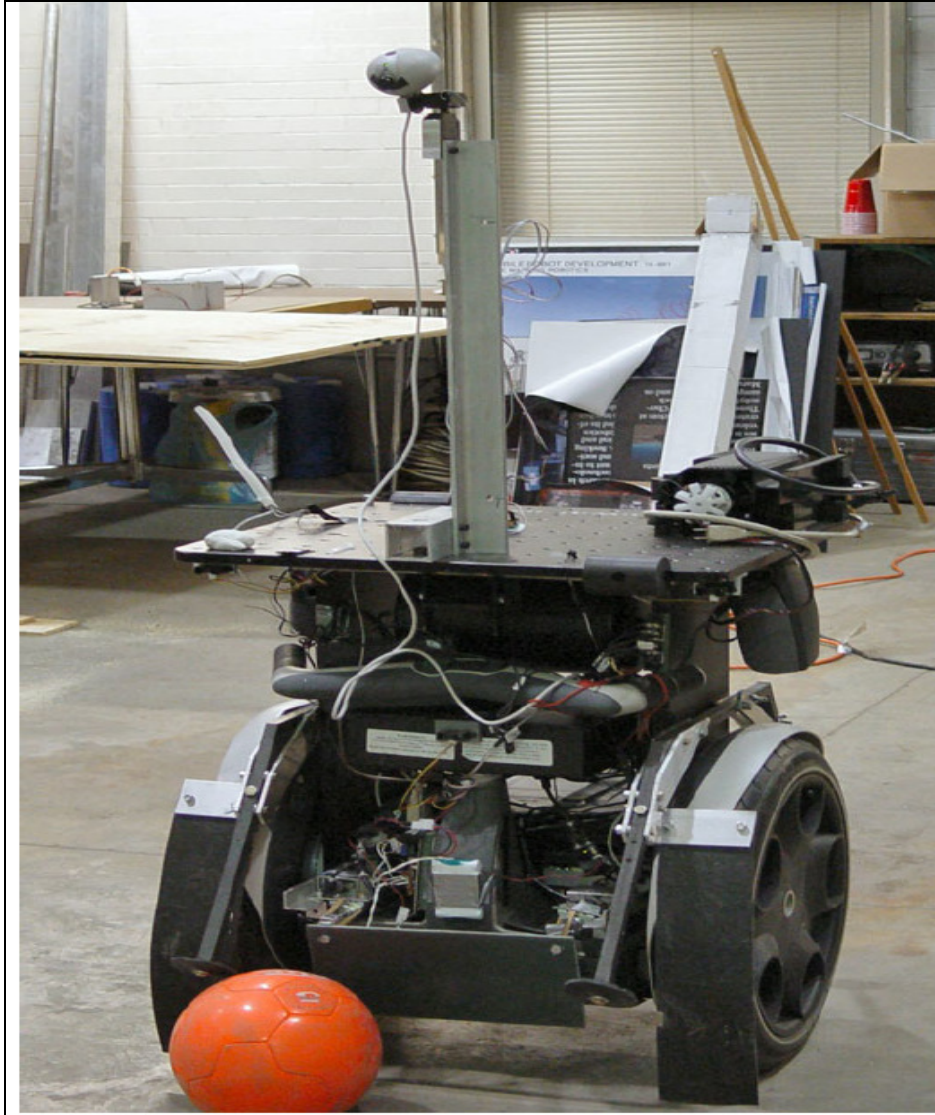
mesmo foi o presidente da *DEKA Research & Development Corp*, Dean Kamen, que ganhou a medalha *Edwin F. Church* pelos aportes na área da engenharia biomédica e também por criar as competições *FIRST (For the Inspiration and Recognition of Science and Technology)*, com a finalidade de inspirar a juventude do país nas áreas de ciência e tecnologia. O primeiro TPRE não possuía freios e podia atingir uma velocidade de 12 milhas por hora. A velocidade, as curvas, e também a frenagem, eram controladas por quem o dirigia utilizando um mecanismo manual localizado no guidão. Os primeiros testes públicos foram feitos sobre o asfalto, sobre um gramado, sobre um solo oleoso e, também, sobre pequenos obstáculos [1].

Em um robô humanóide também foi instalado um TPRE como sistema de locomoção. Este robô humanóide foi desenvolvido pela NASA, com nome de *Robonaut RMP*, tornando-se uma amostra da mistura de um robô móvel com um robô com competências manipulativas [4], vide Figura 1.



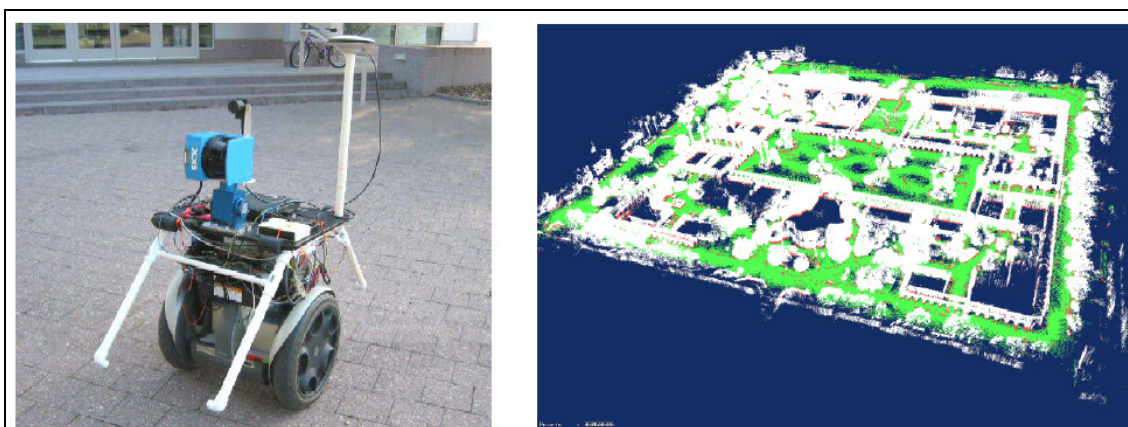
**Figura 1:** Robonaut desenvolvido pela NASA

Outro trabalho foi desenvolvido pela *Carnegie Mellon University*. Nele se utilizou um TPRE com a finalidade de criar um time de robôs jogadores de futebol e, ainda, foram testados diferentes algoritmos de visão computacional [1], vide Figura 2.



**Figura 2:** Robô Móvel com câmera para aplicações de visão computacional desenvolvida pela Carnegie Mellon University

Na *Neurosciences Institute* utilizaram-se times de TPRE's como parte de um projeto de desenvolvimento de dispositivos físicos, baseados no funcionamento do cérebro, com a finalidade de obter um melhor entendimento das funções realizadas dentro deste [1]. Na *Stanford University* montou-se sobre um TPRE uma câmara, como parte de um projeto de mapeamento em 3D para ambientes fechados [1], vide Figura 3. Na *Naval Warfare Systems Center* utilizaram-se os TPRE's como ajuda na área logística e foram aplicados nos setores militar e industrial [2].



**Figura 3:** (a) Robô TPRE com sensor de raio laser (b) Amostra do mapeamento 3D.

Na *University of Michigan* um TPRE foi utilizado em um projeto com o objetivo de contornar obstáculos. Neste, o desenvolvimento incluiu análise e planejamento de uma trajetória ótima, usando um sensor de raio laser de grande alcance para detectar os obstáculos à frente [3]. Outro trabalho foi desenvolvido pelo Mallapragada e Chattopadhyay, um TPRE que utilizou um Controle Ótimo que pôde atingir um funcionamento autônomo [5].

O departamento de *Computer Science da University of Massachusetts Amherst* projetou um robô manipulador montado sobre um TPRE com a finalidade de utilizá-lo para se locomover e para procurar zonas quentes localizadas em um ambiente fechado. A abordagem usada para a modelagem foi a do pêndulo invertido. Também foi criada uma interface em Matlab para haver uma monitoração em tempo real do veículo. A estratégia de controle utilizada foi o Controle de Realimentação de Estados [8].

Outro TPRE [9] utilizou previamente uma análise dinâmica clássica para obter o modelo matemático do sistema, e nele foi implementado um controle PID cujos parâmetros possuem a capacidade de se auto-sintonizarem, com a finalidade de poder atingir estabilidade ótima em um ambiente com perturbações.

Outro trabalho, com aplicação futurista, foi desenvolvido por Michael Baloh e Michael Parent [10] (Figura 4), no qual se projeta um veículo com duas rodas muito parecido com um TPRE. É um veículo inteligente e autônomo orientado para o transporte público, com nome B2.



**Figura 4:** Um TPRE para transporte público, chamado B2.

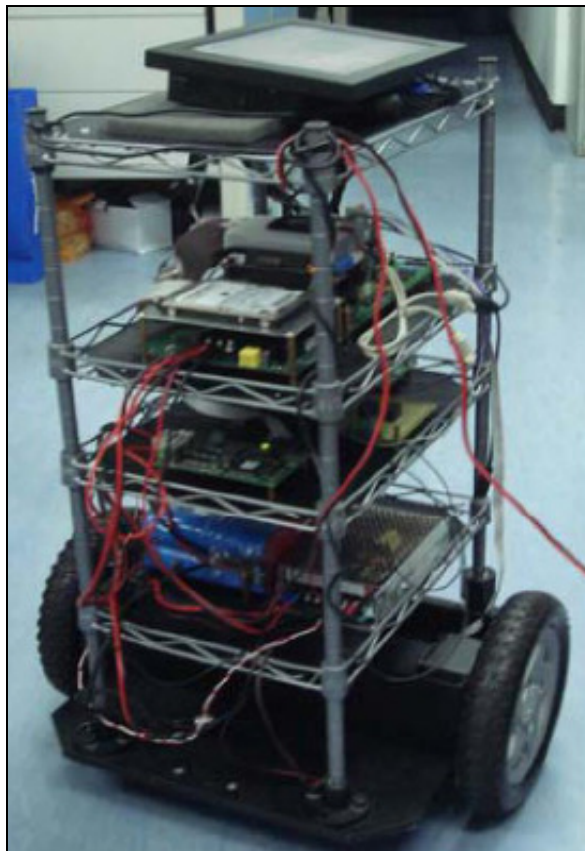
Há outro trabalho com um projeto de TPRE [11] no qual, utilizando-se uma linearização parcial do modelo matemático, se desenvolve um Controle por Realimentação de Estados para a velocidade e posição angular da haste. Promove-se também uma simulação utilizando as equações já obtidas anteriormente na linearização parcial e nas equações de controle.



Em um trabalho realizado por Kaustubh Pathak do Departamento de Engenharia Mecânica da *University of Delaware* [12], desenvolveu-se também um entorno de software para alguns sistemas móveis dinamicamente estabilizados. Como exemplos destacam-se pêndulos invertidos e/ou helicópteros autônomos. No caso do pêndulo invertido, utiliza-se uma linearização parcial do modelo matemático e aplica-se um Controle Não-Linear Preditivo para o controle da estabilidade, e um Controle Exponencial para o controle da trajetória.

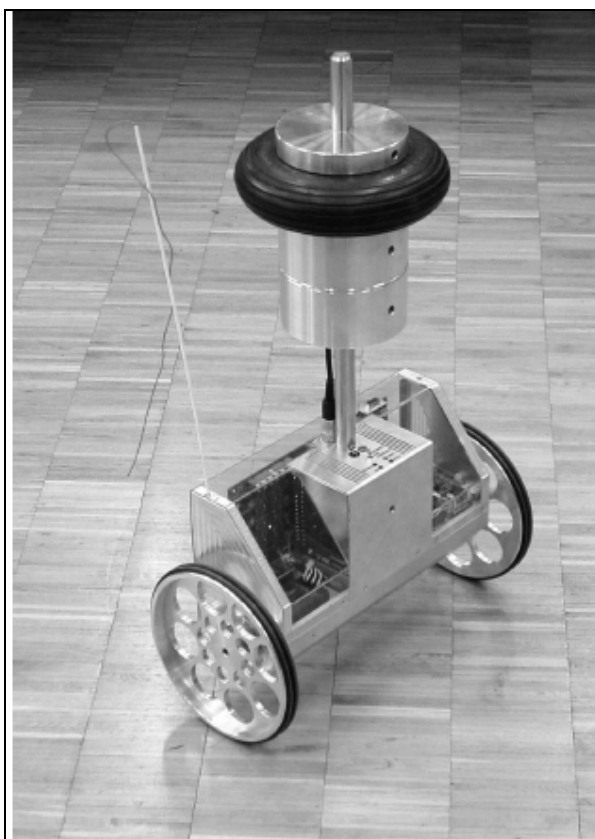
Uma análise dinâmica, utilizando o método de Kane, com a finalidade de obter a modelagem matemática de um TPPE, foi desenvolvida por Yeonhoom Kim, Soo Hyum Kim e Yoon Keun Kwak [13]. Neste trabalho, foi utilizado um Controle de Realimentação de Estados para o sistema.

Uma estratégia de controle por localização de pólos baseado em *Linear Quadrature Root* (LQR) foi utilizada para o desenvolvimento de um TPPE por S.W. Nawawi, M. N. Ahmad e J.H.S. Osman [14], vide Figura 5.



**Figura 5:** Protótipo de um robô móvel auto equilibrante.

Um TPRE chamado pelo nome de JOE (Figura 6) foi desenvolvido por Grasser, D'Arrigo, Colombi e Ruffer da *Swiss Federal Institute of Technology* [15]. Neste, usou-se uma abordagem de Espaço Estado para desenvolver o controle da estabilidade.



**Figura 6:** Robô móvel de duas rodas JOE.

No departamento de Engenharia Elétrica do *Tatung Institute of Technology* foi desenvolvido por Hung, Yeh e Lu um controle misto que utiliza o Controle Proporcional Integral e o Controle Fuzzy, com a finalidade de aplicá-lo ao problema do pêndulo invertido [16].

No Departamento de Engenharia Elétrica da *Tulane University* [17-18] aplicou-se um controle Robusto, mais especificamente um Controle Deslizante, para atingir o controle estável de um TPRE. Este controle atinge um grande desempenho em um ambiente com perturbações, embora o sistema seja não-linear [17].

## 1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em sete capítulos, com os seguintes tópicos:

- Capítulo 1: Introdução, incluindo a motivação, o objetivo e o resumo da pesquisa bibliográfica, como suporte do estudo realizado.
- Capítulo 2: Apresenta a modelagem do sistema, utilizando o método de Kane, e também outras modelagens retiradas de artigos, contidas na bibliografia da pesquisa.
- Capítulo 3: Demonstra os conceitos básicos das estratégias de controle utilizadas, como Controle PID, Controle Fuzzy e Controle Robusto.
- Capítulo 4: Descreve os resultados da simulação, utilizando as informações descritas nos capítulos 2 e 3, e reflete sobre os parâmetros dos sistemas utilizados na simulação.
- Capítulo 5: Apresenta a descrição completa do veículo, ou seja, dos materiais de construção do protótipo, das características básicas dos sensores, das características do controlador, dos motores, e das placas controladoras de velocidade dos motores.
- Capítulo 6: Apresenta os resultados dos testes feitos no protótipo dos algoritmos descritos no capítulo 3, assim como também as condições dos testes.
- Capítulo 7: Mostra as conclusões sobre a comparação dos resultados dos testes das estratégias implementadas e sobre a avaliação do desempenho do sistema.