

# Fundamentos

Este capítulo trata-se da parte teórica deste trabalho, tal como a revisão de literatura e fundamentação teórica. Na revisão de literatura será descrito a linha temporal deste TCC. Na fundamentação teórica serão descritos de forma clara as teorias nas quais este trabalho será emabasado, como por exemplo, técnicas de modelagem de sistemas e projeto de controladores.

## 1.1 Revisão de Literatura

Pode-se afirmar que o primeiro trabalho significativo de controle foi o regulador centrífugo construído por James Watt para o controle de velocidade de uma máquina de tear, no século XVIII. O sistema permitia realizar o controle da velocidade, controlando a injeção de combustível na máquina a vapor.

Segundo Katsuhiko (2010), trabalhos importantes como de Minorsky, Nyquist e Hazen, datados entre as décadas de 20 e 30, contribuíram para o progresso da teoria de controle. Minorsky, em 1922, trabalhou com pilotagem de embarcações utilizando controladores automáticos e demonstrou por meio de equações diferenciais a estabilidade do sistema. Em 1932, Nyquist desenvolveu um procedimento no qual determina a estabilidade de sistemas em malha fechada com base na resposta em malha aberta. E Hazen, em 1934, introduziu o termo *servomecanismos* para sistemas de controle de posição e analisou o projeto de servomecanismos a relé.

No século XX, acontecimentos como a Segunda Guerra Mundial estimulou a pesquisa em sistemas de controle. No final dos anos 50, a teoria de controle já era bastante consolidada, sendo que o carro chefe eram métodos que utilizavam a resposta em frequência e com muitas aplicações industriais, como por exemplo, a utilização de controladores PID para o controle de pressão, temperatura, etc. Os métodos de resposta em frequência e do lugar das raízes, os quais são a base da teoria clássica de controle, conduziram a sistemas que são estáveis e satisfatórios para um determinado conjunto de condições. Esses

sistemas são aceitáveis, porém não são ótimos no sentido literal do termo.

Entre as décadas de 60 e 80, segundo Katsuhiko (2010), o controle ótimo de sistemas determinísticos, controle adaptativo e de aprendizagem foi altamente pesquisado. Diferentemente da teoria clássica, esses métodos se enquadram na teoria de controle moderno. Essa teoria se baseia no domínio do tempo em sistemas de equações diferenciais. Como vantagem, temos que essa teoria simplificou o projeto de sistemas de controle já que se baseia no modelo de um sistema controle real. Em contrapartida, a estabilidade é sensível ao erro entre o sistema real e seu modelo. Dessa forma, quando o controlador projetado for aplicado no sistema, o mesmo poderá ficar instável.

Um dos sistemas clássicos de controle que há na literatura, é o pêndulo invertido. Este sistema possui uma única entrada e várias saídas. Dessa maneira, tratá-lo com técnicas de controle moderno tende a facilitar a estabilidade do mesmo.

Em Ooi (2003) a técnica utilizada para controle do pêndulo foi o LQR. Também desenvolveu um controlador por alocação de pólos para a estabilização do sistema. Dessa forma, foi capaz realizar a comparação entre esses dois métodos e saber qual dos dois foi mais eficaz. Pelas simulações concluiu-se que os dois métodos atendeu, com ressalvas de que o controlador LQR ofereceu uma maior confiabilidade.

Outra **técnica não linear** utilizada para controlar um pêndulo invertido sobre duas rodas (PIDR), utilizada por Thao; Nghia; Phucand (2010) foi a *PID Backstepping*. Essa técnica consiste basicamente em uma estrutura de controle que possui três malhas de controle, sendo elas: 1) a malha principal, desenvolvida a partir da técnica não linear *backstepping* que manterá o pêndulo em equilíbrio; 2) a segunda malha que utiliza um PD para controlar a posição do robô e; 3) um controlador PI para o controle de movimentação.

Em Junfeng; Wanying (2011) novamente é feito uma comparação entre o controlador ótimo LQR com o controlador por alocação de pólos. Contudo, neste artigo, conclui-se que o *overshoot* foi menor por meio da técnica de alocação de pólos e que o tempo de estabilização foi quase comparável ao do LQR.

No artigo de Juang; Lurr (2013), os autores propuseram a desenvolver um protótipo utilizando o Arduino como microcontrolador e a implementação de duas técnicas de controle, sendo elas o PID e LQR na forma de PI-PD. Os resultados obtidos deixam bem claro que a técnica PI-PD foi muito mais eficaz em todos sentidos do que a utilização pura do PID. Como concluído, a estabilização por PID é marginal e as oscilações angulares excedem o limite máximo de torque que os motores podem oferecer. Já no PI-PD ou LQR, a estabilidade é alcançada e ainda o controlador é capaz de compensar o desalinhamento do CG, fazendo com que o robô retorne para a posição angular inicial e que é a desejada.

Em Paula (2014), o autor utilizou duas técnicas de controle discreto, LQR com ação integral e alocação de pólos. A primeira técnica utilizada teve como objetivo a estabiliza-

ção do pêndulo e a segunda o controle de velocidade dos motores. A técnica de alocação de pólos além de realizar o controle dos motores, teve como objetivo interfaciar o controle de ângulo e o sinal enviado para os motores.

Por último, Alves (2018), além de projetar um controlador por meio do controlador LQR, apresenta duas técnicas de linearização, sendo elas: a jacobina e a por realimentação. A modelagem do sistema baseou-se na equação Lagrangeana e após encontrar as equações de movimento, passou-se as mesmas para o Espaço de Estados. Os resultados obtidos foram satisfatório, contudo, ao sofrer interferências, como distúrbio e ruídos o sistema passa a ser mais oscilante.

Como dissertado acima, há vários trabalhos com diferentes resultados para o mesmo tema. Isso reflete apenas que por se tratar de um sistema altamente instável e não linear, faz com que sempre precise de novos estudos e novos testes. Ademais, quando se há domínio de um determinado assunto, é possível transformar os resultados teóricos em um produto e que será refletido de alguma forma na sociedade. Há vários estudos sobre o pêndulo invertido, pois o funcionamento do mesmo está presente em diferentes aplicações práticas, desde um pouso/lançamento de um foguete até um veículo de transporte humano, como o *Segway*.

O *Segway*, visto na Figura 1.1, inventado por Dean Karmen e revelado em dezembro de 2001 tem o funcionamento idêntico ao do pêndulo invertido, com adição que o mesmo está sobre duas rodas. A função básica deste veículo é o transporte de uma única pessoa. O sistema entende que deve-se locomover para frente ou freiar, devido a inclinação que o passageiro impõe sobre o veículo. Hoje em dia, existem vários modelos e cada um com uma especificação diferente um do outro.



Figura 1.1: Segway X2 SE.  
Fonte: Segway, 2019.

# Referências

- Alves, R. G. *Controle de um pêndulo invertido utilizando técnica de linearização por realimentação*. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- Juang, H.; Lurrr, K. Design and control of a two-wheel self-balancing robot using the arduino microcontroller board. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION (ICCA), 2013. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2013. p.634–639.
- Junfeng, W.; Wanying, Z. Research on Control Method of Two-wheeled Self-balancing Robot. In: FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION, 2011. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2011. v.1, p.476–479.
- Katsuhiko, O. *Engenharia de Controle Moderno*. 5. ed..ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.
- Ooi, R. C. *Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot*. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — University of Western Australia, Western Australia.
- Paula, A. R. de. *Modelagem e controle do pêndulo invertido sobre duas rodas*. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- Thao, N. G. M.; Nghia, D. H.; Phucand, N. H. A PID backstepping controller for two-wheeled self-balancing robot. In: INTERNATIONAL FORUM ON STRATEGIC TECHNOLOGY 2010. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2010. p.76–81.