

1 Introdução

Atualmente, na área da robótica é bastante comum o estudo de sistemas pendulares, em especial os sistemas de pêndulos invertidos. Esse conceito é bem conhecido e derivado desta idéia, este trabalho visa obter resultados semelhantes para o pêndulo planar, usando o torque de reação de uma roda acionada. Há muitas experiências com pêndulos, mas muito poucas usando o modelo escolhido para este projeto, portanto, o principal propósito desta análise consiste em observar as particularidades de rodas de reação para controlar o pêndulo planar. As rodas de reação substituirão o atuador no eixo de rotação, fazendo com que a haste não se mova de acordo com um torque, mas de acordo com a reação do torque aplicado na a roda.

Para implementar esta estrutura, o controle será inicialmente do tipo PID e todas as variáveis podem ser modificadas utilizando-se o Simulink que permite acesso a todos os dados relevantes para o sistema. Para um resultado mais realista foram modelados também os efeitos de atrito e outras perdas. Pela simplicidade e abrangência em muitos projetos similares o controlador PID foi escolhido para iniciar a análise.

Em seguida o objetivo foi comparar os resultados com o controle Fuzzy, modelado através do conhecimento em Lógica Fuzzy, aplicando às regras do sistema a forma como se quer controlar o sistema. Os modelos SISO (Single Input Single Output) e DISO (Dual Input Single Output) foram aplicados e suas diferenças foram analisadas. Ambos os controles puderam ser bem modelados no Simulink, pois o software dispõe de uma gama de opções para um melhor ajuste.

Para realização da parte experimental do projeto, foi montado no Laboratório de Dinâmica e Vibrações um modelo real do sistema usando ambos os controles, e controlado através do software LabView, usando-se um microcontrolador ou usando a placa de aquisição de dados da National Instruments. Com esse programa é possível representar visulmente os dados do sistema bem como adquirir os gráficos dos ângulos em tempo real. Os materiais

usados foram baratos, desde um disco de acrílico para a roda de reação até um motor DC (ou CC – Corrente Contínua) usado, o que permitiu provar que não são necessários equipamentos sofisticados ou caros para obter um desempenho satisfatório do sistema.

Um dos principais propósitos deste desenvolvimento é o conhecimento básico da dinâmica de rotação e as equações de movimento que caracterizam o comportamento do pêndulo, apresentando a análise uma componente muito didática na compreensão dos fenômenos dinâmicos. Além disso, o conhecimento adquirido ao desenvolver a parte eletrônica funcionou muito bem para uma conclusão satisfatória dos trabalhos, mostrando um elo importante entre esta área e a mecânica.

Optou-se na redação deste texto a estruturá-lo na forma de um tutorial para que futuros projetos, valendo-se das rodas de reação para controlar a posição dos sistemas onde estão montados, não tenham que passar pelos mesmas experiências negativas e possam se focar nos aspectos positivos. Assim são dadas dicas de montagem e materiais a serem usados. É claro que a parte do estudo do sistema também é abordada, principalmente como uma introdução ao modelo contruído, mas o foco fica voltado para futuros trabalhos.

1.1. Conceitos

1.1.1. Pêndulo Planar

Normalmente usado na vertical, o pêndulo planar encontra-se perpendicular à aceleração gravitacional, eliminando qualquer efeito da mesma sobre o sistema. A restituição a uma posição de equilíbrio pode ser feita de forma passiva (molas) ou ativa. Eventuais perturbações no modelo real provocadas, por exemplo, por um ligeiro desnivelamento, pode ocorrer em função de baixo atrito, devido à aceleração gravitacional, vento etc.

1.1.2. Rodas de Reação

O conceito de rodas de reação vem da engenharia aeroespacial. Elas são usadas para mudar a atitude em órbita de um objeto, como por exemplo, uma espaçonave ou um satélite, sem utilizar-se de jatos ou propelentes no controle, o que estaria associado a uma mudança de massa do sistema. Utilizando-se de um motor controlado ligado a um volante, seu torque resultará em uma mudança da velocidade angular da roda de reação enquanto a reação a este torque, pela 3ª. Lei de Newton rotaciona o objeto no espaço. Para tal, são comumente usados três motores elétricos montados em direções ortogonais. No projeto proposto, apenas um motor será usado para mover o sistema no plano xy.

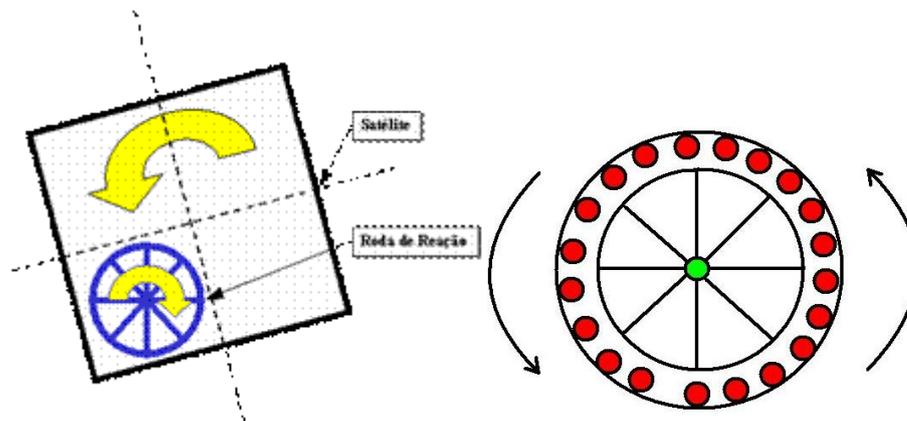


Figura 1.1 – Roda de reação embarcada em satélites

A precisão possível é algo que faz com que as rodas de reação sejam muito usadas em sistemas que requerem mudança de atitude, como é o caso de satélites que orbitam na Terra.

O trabalho aplica esse conceito em um sistema em um plano paralelo ao da superfície da Terra, não se considerando, portanto a ação gravitacional.

1.1.3. Controle PID

O controle PID é um agregado de três tipos de controle descritos nas figuras 1.2 a 1.5:

1.1.3.1. Controle P

Um controlador proporcional da Figura 1.2 consiste essencialmente num amplificador com ganho fixo. Uma característica importante desta ação de controle é a existência de um erro residual permanente, sempre que ocorre uma alteração de carga. O erro que é dependente de k_p e da carga pode ser minimizado por um aumento de k_p . No entanto deve-se notar que o aumento deste parâmetro conduz a um aumento do tempo de estabilização e eventualmente até a uma instabilidade. Conclui-se assim que este tipo de controlador só pode ser usado, quando o ganho proporcional é suficientemente elevado para reduzir o erro estacionário a um nível aceitável, e sem causar instabilidade.



Figura 1.2 – Diagrama de blocos de um controle P

1.1.3.2. Controle I

No controle integrativo na figura 1.3, usa-se a integral dos erros, ou seja, a sequência de erros, que levaram à instabilização, onde T_i é o tempo integral, ou seja, o tempo necessário para que a contribuição da ação integral se iguale a da ação proporcional.

A componente integral elimina o erro estacionário, porém aumenta o tempo de estabilização, e como consequência, o ganho da ação proporcional deve ser reduzido, sempre que esta esteja combinada com a ação integral.

O PI é utilizado em sistemas com frequentes alterações, sempre que o controlador P, por si só, não seja capaz de reduzir o erro estacionário a um nível aceitável.

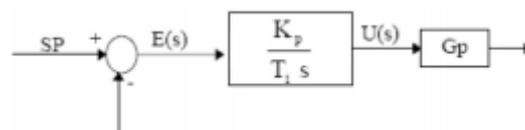


Figura 1.3 – Diagrama de blocos de um controle I

1.1.3.3. Controle D

Neste controlador derivativo da figura 1.4 o sinal de controle $u(t)$ é proporcional ao erro e à sua derivada, onde T_d é o tempo derivativo, ou seja, o período de tempo antecipado pela ação derivativa relativamente à ação proporcional. O fato de o sinal de controle ser proporcional à taxa de variação do erro implica que o modo derivativo nunca possa ser usado sozinho, uma vez que só responde a regimes transientes. A adição do modo derivativo ao modo proporcional resulta num controlador altamente sensível. A ação derivativa não afeta diretamente o erro estacionário e adiciona amortecimento ao sistema (melhora a estabilidade) e assim permite o uso de valores de k_p mais elevados, o que implica um menor erro. Um inconveniente deste modo é o de acentuar o ruído.

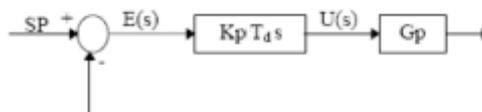


Figura 1.4 – Diagrama de blocos de um controle D

1.1.3.4. Controle PID

Este controlador da figura 1.5 resulta da combinação dos modos apresentados anteriormente: proporcional, integral e derivativo. Pode se afirmar que resulta numa combinação entre as vantagens e desvantagens de um PI e um PD.

Neste tipo de controlador, o modo integral é usado para eliminar o erro causado por grandes variações angulares. O modo derivativo, com o seu efeito estabilizador, permite um aumento do ganho e reduz a tendência para as oscilações, o que leva a uma velocidade de resposta superior quando comparado com P e PI. O k_p elevado tem o efeito de reduzir o tempo de subida e o erro.

Porém a ação integrativa terá como efeitos uma resposta transitória menos satisfatória, isto é, mais oscilatória. Portanto sempre que se utiliza controle integral, deve-se testar inicialmente com um k_p reduzido.

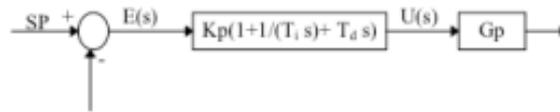


Figura 1.5 – Diagrama de blocos de um controle PID

Tipo de Controle	Tempo de Subida	Overshoot	Tempo de Assentamento	Erro em regime permanente
Proporcional	Diminui	Aumenta	Pouco influi	Diminui
Integral	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
Derivativo	Pouco muda	Diminui	Diminui	Pouco muda

Tabela 1.1 – Resumo de cada controle individual

1.1.4. Controle Fuzzy

A lógica difusa ou lógica fuzzy se deriva da lógica booleana onde temos apenas 0's e 1's, e insere valores intermediários como, por exemplo, 0,7. Pode-se aplicar parte de certa característica a certo elemento, chamando de Grau de Pertinência. Em adição a isso, é criado um banco de dados que define de forma proposicional (se x então y) essas características. A este banco de dados dá-se o nome de Banco de Regras.

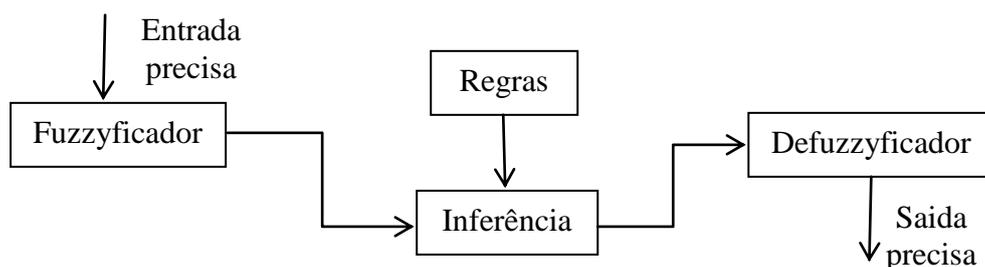


Figura 1.6 – Princípio do sistema Fuzzy

Essas regras atuam sobre as entradas fuzzyficadas e sua saída é defuzzyficada para obter uma resposta precisa. Para o trabalho, esse controle foi comparado com o PID, e suas vantagens e desvantagens foram analisadas.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desse trabalho é simular e controlar o pêndulo planar do sistema proposto usando os controles PID e Fuzzy, e comparar o modelo matemático descrito pelas equações da dinâmica com o modelo real montado no laboratório.

Tem-se também como objetivo não usar equipamentos extremamente precisos ou caros, apenas itens que possam ser encontrados facilmente em laboratórios ou lojas de produtos eletrônicos.

1.3. Revisão bibliográfica

Na literatura é um pouco difícil encontrar trabalhos sobre pêndulos planares e rodas de reação, então a solução foi procurar modelos similares e a partir deles tentar criar um modelo que se adequasse ao proposto neste trabalho.

Muitos dos autores que foram citados nesse trabalho usam o sistema de pendulo invertido, como por exemplo, Spong et al [1]. Ele usa um modelo dinâmico bem parecido com o modelo criado para estabilização da haste, porém o seu ângulo desejado é sempre 0° , para equilíbrio vertical da haste. O modelo que ele propõe é o alicerce de todo esse estudo, desprezando a ação da força da gravidade em suas equações, e também o sistema de reequilibrar o pêndulo, uma vez caído.

Spong et al [2] em seu livro faz referência às equações de controle e de movimento para manipuladores com dois graus de liberdade para vários tipos de modelos. Estes modelos, no entanto, não incluem rodas de reação.

Aström et al [3], [4], Taguchi [14] e O'Dwyer [15] desenvolvem sobre o controle P, PI e PID, citando o método de Ziegler Nichols, além de outros usados para o controle. Eles dissertam sobre as vantagens e desvantagens de se usar um controle clássico PID em sistemas dinâmicos quanto ao tempo de resposta e a saída.

Sobre os controles Fuzzy, Passino [6] e Riid [7] dissertam em suas publicações a vantagem de usar duas entradas no controle Fuzzy ao invés de uma,

fato esse que motivou o uso destes dois tipos de controle citados no sistema apresentado nessa dissertação.

Gruzman [10] faz intenso uso das equações da dinâmica para simular seu sistema de “pan-tilt” usando ambos os controles PID com “anti-windup” nas malhas internas bem como controle Fuzzy nas malhas externas (de perseguição do alvo). Com isso, este trabalho se mostrou muito importante para o desenvolvimento do pendulo planar com rodas de reação.

Jarzebowska [5] apresenta um modelo subatuado que servirá de base para um possível trabalho futuro.

Sobre os trabalhos a respeito de rodas de reação, Narayan et al [12] e Biswas [13] apresentam o seu funcionamento e o esquema de forças, o que foi útil no desenvolvimento deste projeto.

Finalmente, os demais trabalhos e livros [8], [9], [11], [16], [17], [18], [19] e [20] também contribuíram para o desenvolvimento desta tese, seja em dúvidas ou esquemas de circuitos. Todo esse conjunto de referências foi importante na correta definição do problema, do modelo e na resolução do mesmo.

1.4. Descrição da dissertação

Este trabalho divide-se em 6 capítulos. O capítulo 1 apresenta uma introdução ao projeto estudado, e adiciona conceitos essenciais para entendimento do mesmo.

No capítulo 2, serão apresentadas as equações de movimento e da dinâmica do sistema, o modelo matemático e suas não linearidades.

No capítulo 3, são apresentadas as formas de controlar o sistema, suas vantagens e desvantagens aparentes. Discute-se sobre a diferença de se controlar o sistema por um controle de corrente ou de tensão.

No capítulo 4, são apresentados os resultados das simulações em todos os métodos de controle propostos, usando o software Simulink.

No capítulo 5, descreve-se o projeto experimental construído no Laboratório de Dinâmica e Vibrações da PUC-Rio, e os resultados são comparados com o software de simulação.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, o que foi esperado e inesperado nesse período de estudo, e o trabalho futuro para uma possível continuação do projeto.