

# PROJETO DE CONTROLADORES NÃO LINEARES EM UM SISTEMA PÊNDULO CARRO

Renan Junior Balan; Otávio Rafael de Souza; Felipe Jung; Marina Padilha; Rafael Garlet de Oliveira

## Introdução

Modelos lineares são usados em várias áreas da ciência para representar um amplo espectro de sistemas. No entanto, sistemas reais podem apresentar algum tipo de não linearidade. Em muitos casos a faixa de operação fica limitada devido à linearização feita em torno de um ponto de operação do sistema, isso faz com que o efeito destas não linearidades altere o comportamento do sistema fora destes limites. Porém, o projeto de controladores utilizando o modelo não linear não é tão consolidado quanto o projeto de controladores para sistemas lineares.

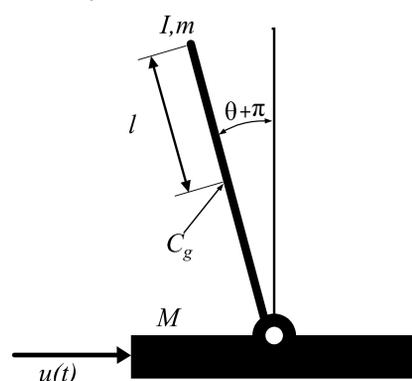
## Objetivo

O objetivo do trabalho é projetar e implementar um controlador para estabilizar o pêndulo no ponto de equilíbrio instável, ou seja, na posição vertical para cima. Para isto foi utilizado o método de controle por estrutura variável, também conhecido por modos deslizantes, e pretende-se utilizar a linearização por realimentação. Estas são técnicas utilizadas em controle de sistemas não lineares.

## Planta

A Figura 1 apresenta um diagrama ilustrativo do pêndulo invertido simples. Partindo desta representação adota-se que a posição de equilíbrio é  $\pi$ , ou seja, quando  $\theta=0$ .

Figura 1– Representação do pêndulo invertido.



Fonte: Próprio autor.

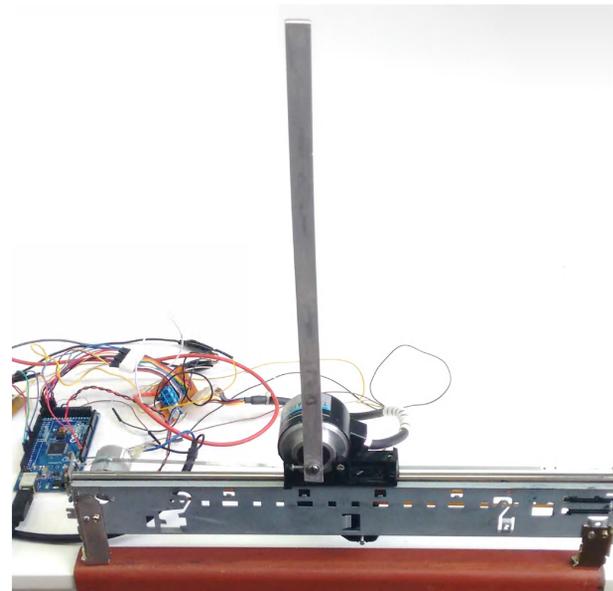
Onde:  
 $C_g$  – Centro de gravidade do pêndulo;  
 $l$  – Medida da extremidade ao centro de gravidade;  
 $M$  – Massa do carro;  
 $m$  – Massa do pêndulo;  
 $I$  – Momento de inércia;  
 $u(t)$  – Força externa;  
 $\theta$  – Ângulo do pêndulo em relação a referência.

Esta planta escolhida para testes é formada por um carro que se movimenta sobre uma guia linear, no qual, o *encoder* que mede a posição do pêndulo está fixo, conforme a figura 2 que ilustra o sistema real do estudo. Este foi desenvolvido, sendo necessário reduzir ao máximo folgas no sistema de transmissão, para que outras não linearidades não fossem geradas no sistema, interferindo desta forma no estudo.

## Referências:

- AGUIRRE, L. A. **Enciclopédia de Automática - Controle & Automação**. Vol. 2, 1ª ed., Editora Edgard Blucher, 2007.
- SLOTINE, J-J, E., LI, W., **Applied Nonlinear Control**. Rio de Janeiro, Editora Prentice-Hall, 1991.
- KHALIL, H. K., **Nonlinear Systems**. Rio de Janeiro, Editora Prentice-Hall, 1996.

Figura 2– Sistema Pêndulo Carro.



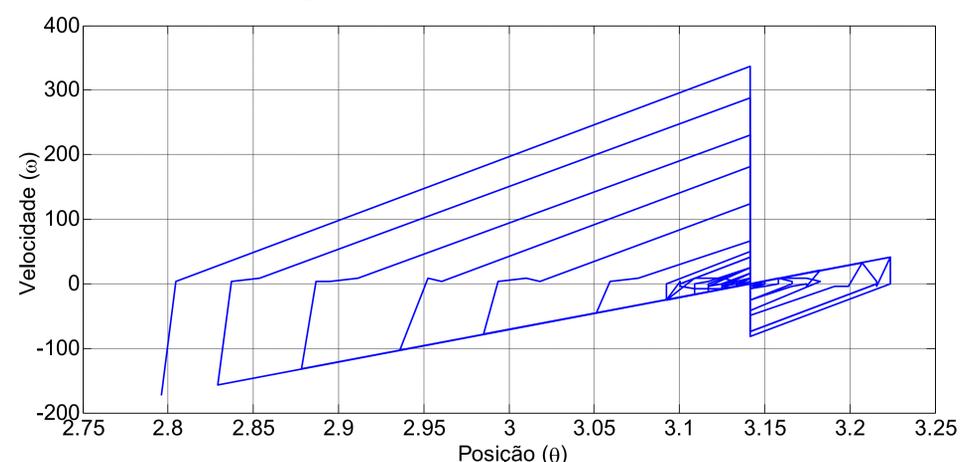
Fonte: Próprio autor.

## Resultados

A técnica de controle não linear por estrutura variável se baseia em alterações abruptas intencionais da estrutura do sistema feitas para alcançar o comportamento desejado. O controle por estrutura variável combina estruturas que podem ser instáveis de forma isolada, de modo que o sistema fique assintoticamente estável.

Como resultado experimental teve-se o seguinte gráfico representado no retrato de fases do sistema, que são a posição do pêndulo ( $\theta$ ) e sua velocidade angular ( $\omega$ ) considerando como posição de equilíbrio instável  $\pi$ .

Figura 3– Modos Deslizantes.



Fonte: Próprio Autor.

Nota-se que a posição de equilíbrio  $\theta=\pi$  é um ponto, que para a condição inicial dada ( $\theta \cong 2.8$ ), a trajetória tende a se aproximar do equilíbrio devido a ação do controle, até esta ser alcançada.

Como sugestão aos trabalhos futuros, desenvolvidos com a planta, é obter uma equação matemática simplificada para facilitar a linearização por realimentação, e assim será possível implementar as técnicas de controle linear clássicas somadas a ao cancelamento da parcela não linear.