

3 Projetos experimentais

No desenvolvimento de um projeto ou no estudo de um fenômeno ligado à Dinâmica sempre há um fase em que são construídos em escala real ou reduzida sistemas que foram previamente modelados por simulações, a fim de comprovar a eficácia de tais modelagens, ou simplesmente para ter uma compreensão melhor dos fenômenos.

Este capítulo irá apresentar a montagem de dois dos sistemas modelados matematicamente anteriormente e estudados com o uso de MATLAB/Simulink, mostrando comparativamente como se comportaram. O local dos testes foi o Laboratório de Dinâmica e Vibrações da PUC-Rio.



Figura 3.1 – Estrutura de ferro para suportar os projetos

Como ambos sistemas se basearam em pêndulos, procuramos uma estrutura que pudesse atender aos dois projetos, encontrando-se uma estrutura de ferro adequada. Para ter certeza que ela não iria se movimentar com os balanços dos pêndulos foi usado um grampo na sua base. Adicionou-se um encoder do modelo

H40-8-1000VL, fixo também na estrutura para medição de ângulos e velocidades angulares.



Figura 3.2 – Base da estrutura fixada pelo grampo



Figura 3.3 – Detalhe do encoder na estrutura

Para obter a leitura dos sinais do encoder e fazer a ponte para o software Labview, foi utilizada uma placa de aquisição de dados (ou simplesmente DAQ) da National Instruments® modelo USB-6229.

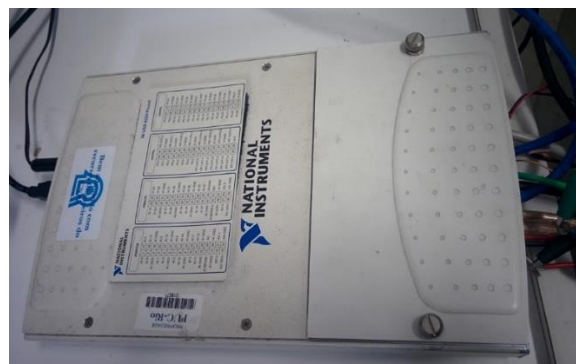


Figura 3.4 – Placa de aquisição de dados

Todos os valores de tempo, ângulo e velocidade foram gravados num arquivo de texto (.txt) e a comparação com o simulado foi feito usando-se o MATLAB.

3.1. Pêndulo Auto Alongável

O modelo criado com um pêndulo que se alonga da seção 2.2 foi montado numa bancada do laboratório, utilizando-se de materiais disponíveis e que pudessem ter o mesmo efeito que a simulação.

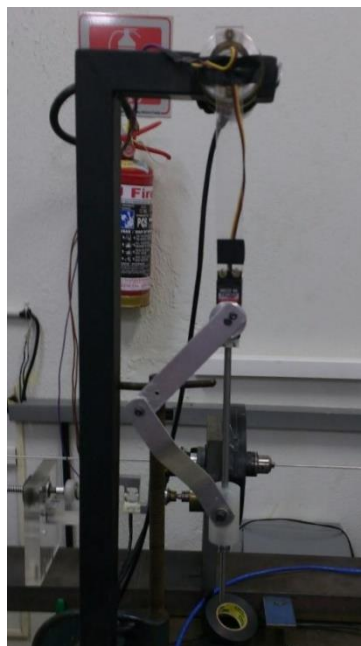


Figura 3.5 – Modelo real do pêndulo auto alongável

Como não tínhamos um atuador linear para usar, a solução foi montar um sistema que modificasse o centro de massa do sistema. Para tal, usou-se um servo de modelo HITEC HS-322HD que controla um braço de alumínio. Este braço está ligado a uma massa que desliza verticalmente em um trilho quando a parte móvel do servo gira.

Nas comparações, os valores teóricos do ângulo α e de sua velocidade $\dot{\alpha}$ foram chamados de α_{th} e $\dot{\alpha}_{\text{th}}$ respectivamente. E os análogos dos testes práticos foram chamados de α_{pr} e $\dot{\alpha}_{\text{pr}}$.

Ao todo foram feitos 15 testes para cada rotina, 3 testes para cada valor de ângulo inicial de lançamento (foram escolhidos -60° , -65° , -70° , -75° e -80°), e

apenas o melhor resultado (menor diferença em relação ao simulado) será mostrado na tese.

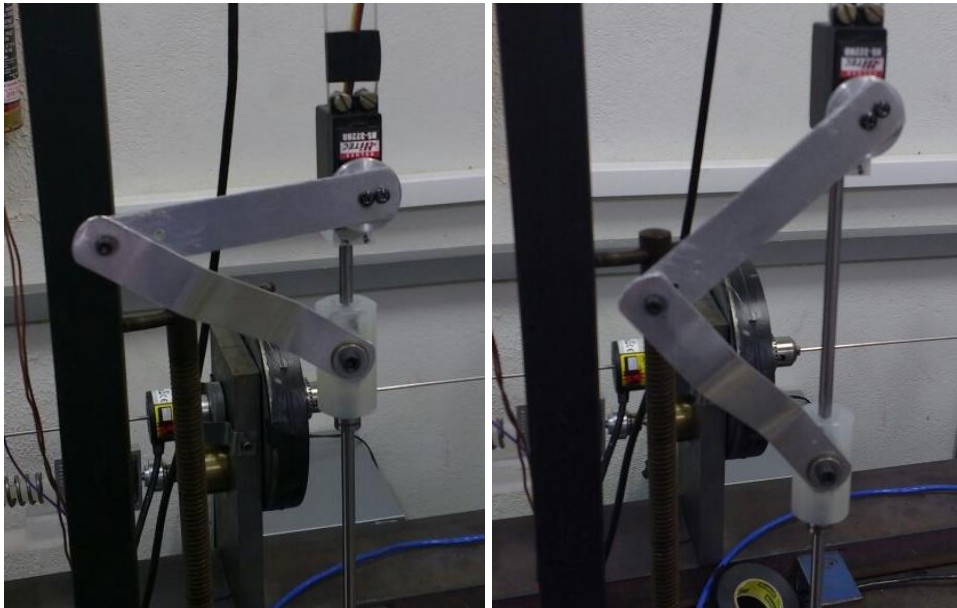


Figura 3.6 – Detalhe do servo no pêndulo

3.1.1. Primeira comparação

Para testar o sistema montado, foi comparado com a rotina de rotação contínua visto na seção 2.2.2.1, onde o controle tenta manter a rotação do pêndulo. E com isso foram medidos os valores no sistema prático para simular o sistema com estes valores.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
l_{\min}	0,24 [m]
l_{\max}	0,31 [m]
m_1	0,354 [Kg]
m_2	0,103 [Kg]
c	0,06 [Nms/rad]
α_0	-80°

Tabela 3.1 – Valores de comparação do sistema prático

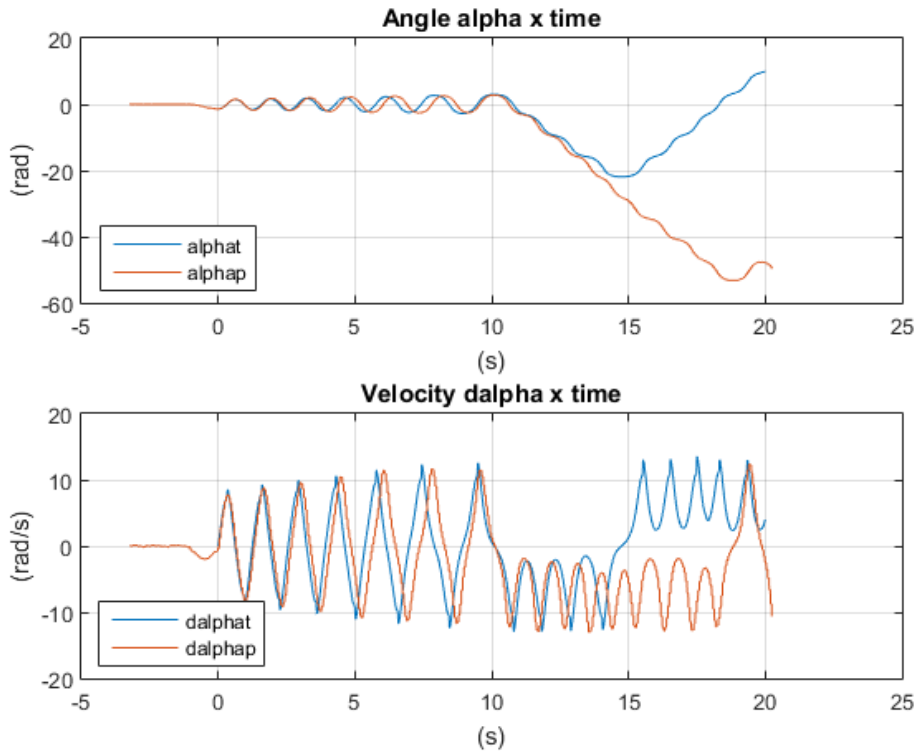


Figura 3.7 – Comparação de ângulo e velocidade do sistema teórico e prático para o primeiro teste do pêndulo alongável

O resultado do teste prático foi bem similar ao simulado até cerca de 12 s, quando a partir deste instante a simulação o pêndulo dá uma volta para o outro lado. Isso se deve principalmente à não-linearidade do sistema. Por exemplo, uma diferença de 1 cm no tamanho máximo do pêndulo causa um efeito completamente diferente (daí a denominação de sistema caótico), então considerando isso pode-se considerar este resultado como adequado.

3.1.2. Segunda comparação

Em uma outra comparação, queríamos ver como o sistema se comportava em comparação com a rotina de rotação e desaceleração do sistema. Os parâmetros usados para esta simulação foram os mesmos da primeira comparação, exceto o ângulo inicial do pêndulo no melhor teste foi com -75° .

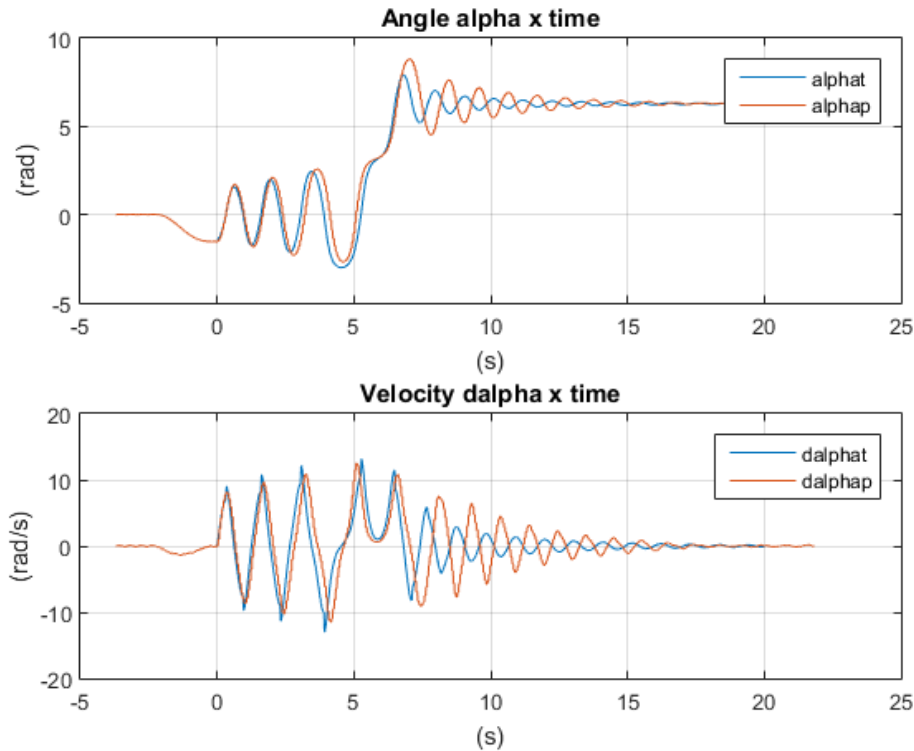


Figura 3.8 – Comparação de ângulo e velocidade do sistema teórico e prático para o segundo teste do pêndulo alongável

O sistema se comportou de forma bem similar até dar uma volta completa, porém depois disso o sistema teve uma pequena divergência entre os valores teóricos e práticos, devido a diversos possíveis fatos: erro na medição, dinâmica do atuador real ser diferente da modelada, atrito seco etc.

3.1.3. Relatório das comparações

Foram testadas duas rotinas faladas anteriormente no sistema de pêndulo auto alongável. O primeiro fator que se observou é que o sistema é caótico. Uma pequena mudança no ângulo de lançamento do pêndulo, ou no tamanho do pêndulo causa uma diferença grande no movimento do sistema. Portanto, a similaridade que houve nos testes simulados e práticos é algo raro de se obter.

Foi difícil conseguir fazer o pêndulo dar uma volta em torno do ponto de apoio. Para tal foi necessário aumentar além dos limites a voltagem máxima aplicada no servo para aumentar consequentemente a velocidade máxima de atuação. O máximo de voltagem era 6 Volts, e foi aplicado 6,5 V, fato esse que

não comprometeu o servo, pois ele possui uma tolerância de 10% da voltagem máxima.

Por fim, criou-se uma expectativa positiva para que o controle funcione com o sistema de pêndulo duplo.

3.2.Pêndulo Duplo

E para provar de novo o efeito do controle não linear desta vez no sistema da seção 2.3, este teste foi realizado com a mesma estrutura de pêndulo descrita no início do capítulo e o mesmo servo utilizado na seção anterior, mas usando uma barra de alumínio com uma massa na ponta ligado ao servo.

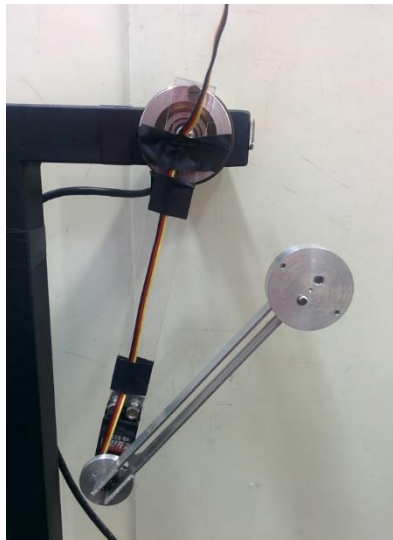


Figura 3.9 – Modelo real do pêndulo duplo

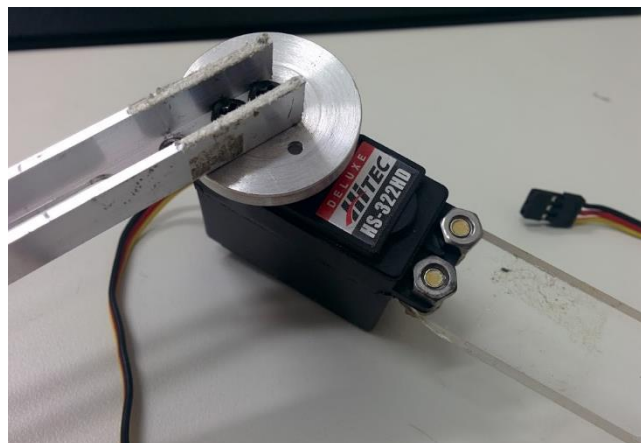


Figura 3.10 – Detalhe do servo preso na haste

A barra de alumínio que possui a extremidade livre tem fixado em uma ranhura um disco de alumínio. A variação de posição altera o centro de massa do pêndulo exterior para outros testes.

Mais uma vez, os valores teóricos do ângulo α e de sua velocidade $\dot{\alpha}$ foram chamados de α_{th} e $\dot{\alpha}_{\text{th}}$ respectivamente. E os análogos dos testes práticos foram chamados de α_{pr} e $\dot{\alpha}_{\text{pr}}$.

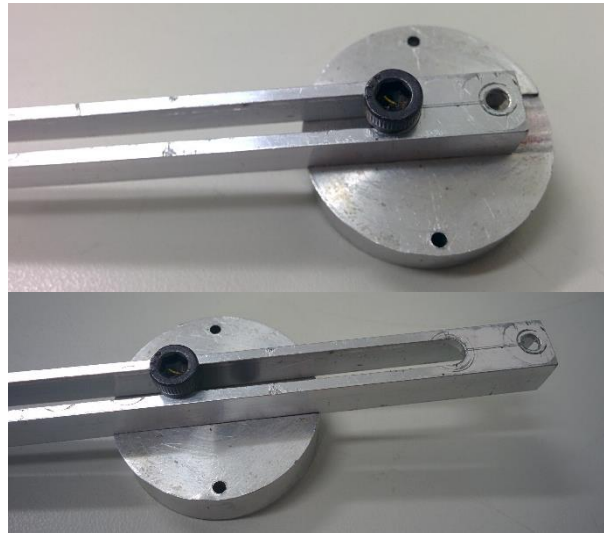


Figura 3.11 – Detalhe da barra de alumínio com CM podendo variar

3.2.1. Primeira comparação

Este teste comparou a rotina de rotação do pêndulo em movimento contínuo mostrada na seção 2.3.3.1 que foi simulada com a bancada construída. E foram tirados os seguintes valores da bancada.

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
m_1	0,08 [Kg]
l_1	0,18 [m]
s_1	0,16 [m]
m_2	0,05 [Kg]
l_2	0,15 [m]

c	0,06 [Nms/rad]
α_0	0 [rad]

Tabela 3.2 – Valores de comparação do sistema prático

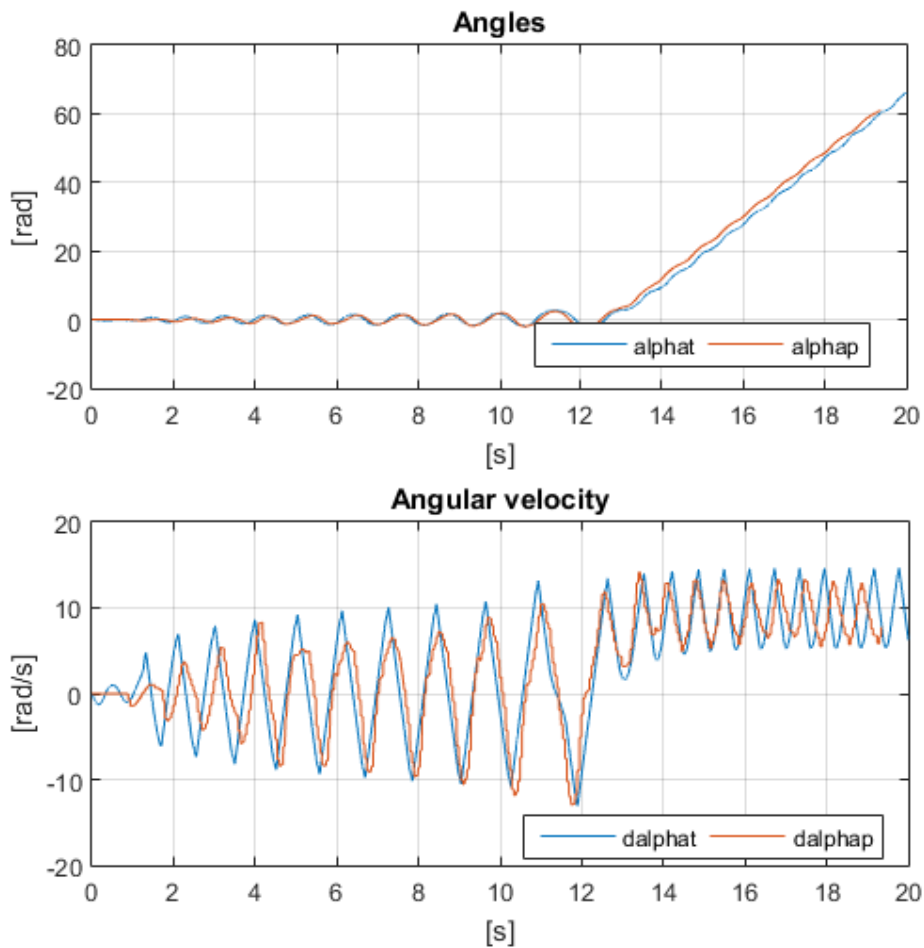


Figura 3.12 – Comparação de ângulo e velocidade do sistema teórico e prático para o primeiro teste

É visível que os sistemas se comportaram qualitativamente bem similares, o que mostrou que a simulação se aproximou bastante do sistema real. Na comparação das velocidades pode-se ver similaridade na frequência, porém com ligeiras variações na amplitude.

Dada a não-linearidade e eventuais perturbações que podem ocorrer na modelagem matemática ou nas medições caracterizamos o resultado como bom, já que cumpriu o objetivo da lei de controle de dar uma volta no pêndulo e manter o

pêndulo em rotação contínua. Além disso, muitos pontos de medição do teste coincidiram com o simulado.

3.2.2. Segunda comparação

Este segundo teste comparou a rotina de rodar e parar do pêndulo que também foi simulada. Os ângulos e velocidades dos testes teórico e prático foram nomeados da mesma forma que na comparação anterior.

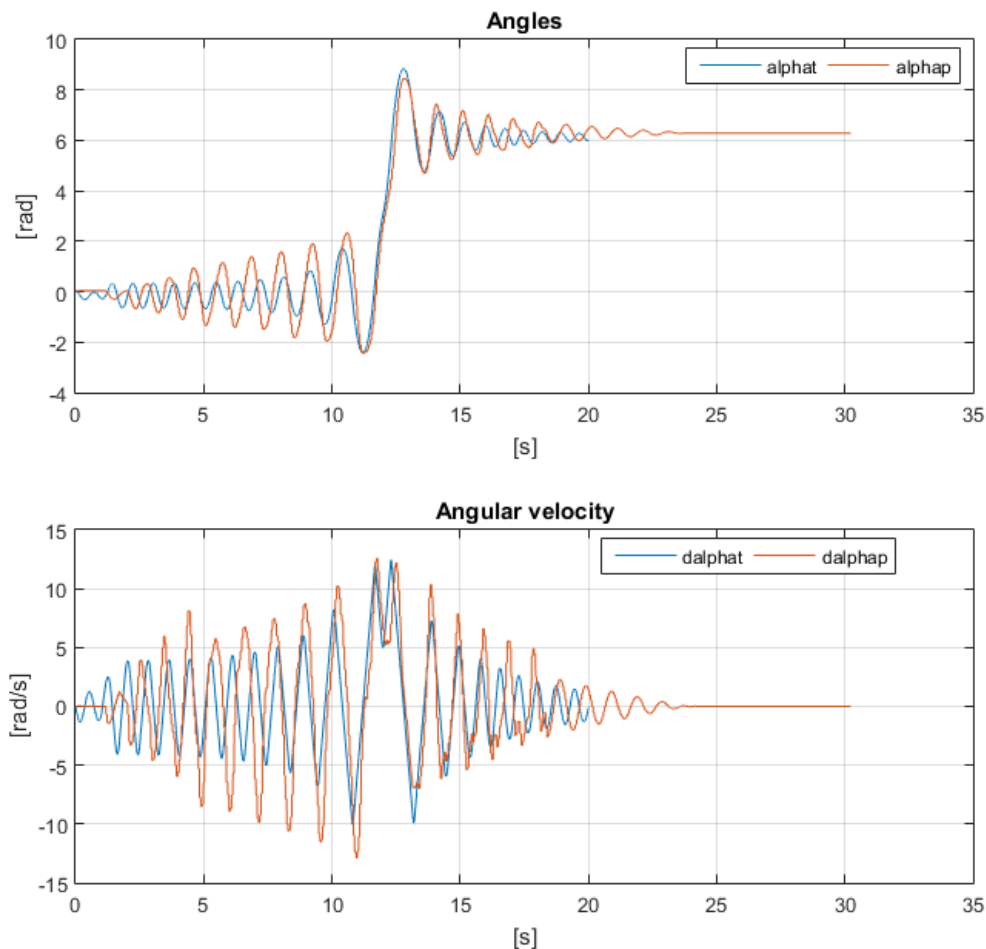


Figura 3.13 – Comparação de ângulo e velocidade do sistema teórico e prático para o segundo teste

Houve uma similaridade entre os resultados dos testes teóricos e práticos e de novo, considerando alto número de não linearidades no teste prático, o resultado foi dito satisfatório. É interessante observar que diferenças maiores na amplitude e na frequência que aparecem no início acabam sendo regularizados

quando se chega próximo ao ponto de virada. É como se o sistema “entrasse no compasso” perto de atingir o ponto de virada. A não-linearidade no sistema também faz com que seja difícil conseguir duas simulações iguais.

Os ângulos e as velocidades apesar de não baterem em amplitude e parcialmente na frequência tiveram similaridade, caracterizando o resultado como bom, devido aos fatores diferentes em cada teste citados na comparação anterior (dinâmica do atuador, erro do sensor, atrito seco etc).

3.2.3. Relatório das comparações

Foram feitos dois testes para verificar o modelo real e comprovar suas similaridades com o modelo desenvolvido no MATLAB. Ambos os resultados foram satisfatórios para o que se desejava obter. A equação de controle consegue mover o centro de massa no sistema da forma que se esperou.

Esses resultados deram muita esperança que o controle não-linear proposto atenda ao propósito de controlar um sistema pendular, mesmo com o elevado grau de não-linearidade do sistema.

Esse problema de não linearidade também abre portas para questões específicas e mais profundas de outras técnicas para controle. Mas por ora, o foco no controle proposto parece ser um caminho interessante para ser implementado no sistema giroscópico.