



DESENVOLVIMENTO DE UM KIT DIDÁTICO UTILIZANDO A PLATAFORMA TRMS

RESUMO

As metodologias de ensino aplicadas em cursos de sistemas de controle envolvem, tipicamente, o desenvolvimento das teorias por meio de exercícios, demonstrações matemáticas e com o uso de softwares, como o Simulink, que permite a implementação numérica das estratégias aprendidas na teoria. Entretanto, é parte essencial desta jornada a experimentação nas aulas práticas, através de instrumentos que reproduzam os desafios estudados nas aulas de teoria. É esperado que estes equipamentos permitam diferentes ensaios para a observação prática de conceitos. Além disso, para que o aluno possa se aprofundar nas questões de controle, é vital dispor de equipamentos mais complexos, mais desafiadores, como por exemplo, o Twin Rotor MIMO System (TRMS), que, como o próprio nome indica, é um sistema Multiple Input Multiple Output, ou de múltiplas entradas e múltiplas saídas. Com um aparelho desses é possível demonstrar aos alunos os desafios dinâmicos de um sistema MIMO. Entretanto, este dispositivo, em sua versão disponibilizada no laboratório, contém algumas barreiras que o limitam, como a versão dos softwares e sistemas operacionais necessários para seu uso. Este projeto tem por finalidade atualizar o TRMS para as versões mais atuais de softwares e sistema operacional, bem como desenvolver um kit didático que acompanhe os alunos desde sua primeira aula de Controle Clássico até seus dias de Controle Avançado, permitindo a aplicação de diversas estratégias de controle.

Palavras-chave: TRMS. MIMO. Atualização. Didático.

INTRODUÇÃO

Os desafios do dia-a-dia de um engenheiro encontram-se, por muitas vezes, inseridos em tópicos complexos, lidando com o desenvolvimento de produtos e projetos, bem como a aplicação destas novas teorias. Esta complexidade traz consigo um fator que se torna cada vez mais relevante, o custo. Realizar ensaios e estudos em equipamentos em escala real nem sempre é a opção mais viável, logo, juntamente com o desenvolvimento deste conhecimento, busca-se desenvolver, também, ferramentas que facilitem o fluxo de trabalho, como simuladores, por exemplo. E é através deste desenvolvimento, aliado às ferramentas mencionadas, que o futuro da engenharia global se forma. Experimentos em laboratórios são frequentes na graduação destes profissionais, e, apesar da pluralidade de dispositivos disponíveis para auxiliar no entendimento deste novo mundo para os futuros engenheiros e cientistas, ainda se faz necessária a fundamentação proporcionada pelo aprendizado dos conceitos que foram base para o desenvolvimento das teorias mais básicas do controle.

A abrangência do controle excede os limites da engenharia e pode ser aplicada nos mais diversos campos da ciência, além da quase onipresença nos ambientes industriais de processo. A familiarização da teoria e prática dos sistemas de controle deve fazer parte da vida profissional dos engenheiros e cientistas, tamanha a extensão do âmbito onde se aplicam estes conhecimentos.

Ademais, uma das áreas que conta com forte influência destes conhecimentos é o aeronáutico, que precisa de um controle muito eficiente da velocidade de uma turbina ou de uma hélice, por exemplo, para que a posição da aeronave se mantenha de acordo com o desejado. Neste projeto, o principal dispositivo é chamado de *Twin Rotor MIMO System* ou simplesmente TRMS, que nada mais é do que uma simplificação de uma aeronave com dois rotores, um posicionado verticalmente, que controla sua elevação, ou arfagem, e um posicionado horizontalmente, que controla sua direção, ou guinada. Como mencionado anteriormente, o desenvolvimento das teorias de controle deve acompanhar a jornada de aprendizado daqueles que as estudam, e prepará-los para que possam a utilizar da melhor maneira possível nas aplicações que encontrarem durante sua vida profissional. É necessário um desafio "final", com um sistema de complexidade elevada, para que esta trajetória seja devidamente concluída.

JUSTIFICATIVA

A partir do contexto estabelecido anteriormente, percebe-se, então, a necessidade de preparar os futuros engenheiros para que sejam capazes de trabalhar com plenitude no âmbito do controle, uma vez que os sistemas que estes encontrarão no decorrer de suas vidas profissionais são muito variados em sua natureza e construção.

Partindo das aulas introdutórias de Controle, os alunos poderão visualizar, na prática, a ação dos diferentes controladores, estabelecidos com base na modelagem matemática de um sistema simples, graças à versatilidade do TRMS, que permite simplificar seu comportamento dinâmico com travas mecânicas.

Entretanto, em sua forma completa, destravada, é proposto um desafio maior aos alunos, que devem aplicar todos os conhecimentos adquiridos para efetivamente controlar este dispositivo. Portanto, entende-se que, através da criação de um kit didático que englobe os aspectos comentados, será possível agregar uma profundidade e uma variedade maior para o uso nas aulas de controle.

OBJETIVO

Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um kit didático para o ensino das diferentes teorias de controle, baseando-se no equipamento Twin Rotor MIMO System, ou TRMS.

Objetivos Específicos

Além disso, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Adaptação do equipamento para funcionar com softwares e hardwares mais atuais;
- Modelagem de um controlador baseado na teoria de Espaço de Estados para o equipamento TRMS;
- Desenvolvimento de diferentes controladores que seguirão a abordagem didática das teorias de controle para o equipamento TRMS;

CONTEXTUALIZAÇÃO

O TRMS é constituído de dois motores com hélices acoplados no final de uma barra que possui dois graus de liberdade, a arfagem, o movimento vertical, e a guinada, horizontal. Na barra, estão posicionados dois *encoders*, que por meio de sinais elétricos, enviam a posição vertical e horizontal. Acoplados aos motores, estão dois tacômetros, com o objetivo de aferir a velocidade. O objetivo do equipamento é servir como um sistema MIMO para o ensino de teorias de controle e validação de controladores.

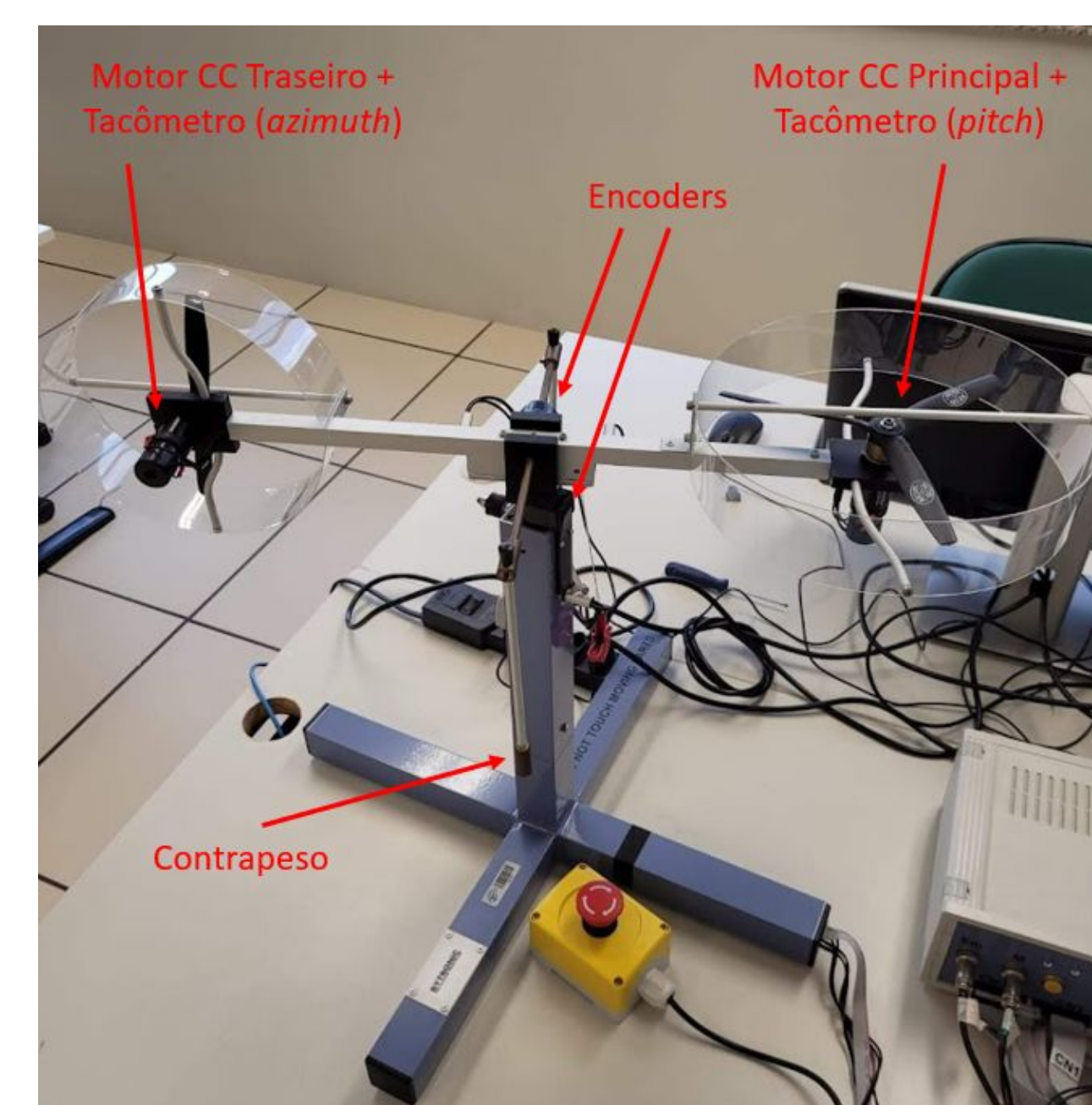


Figura 1 - TRMS

Alunos: Bruno do Carmo Spindola, Eduarda Campos Aragão, Eric Rossini Ebner e Lucas Pasqual Fernandes.

Orientador: Fabrizio Leonardi <fabrizio@fei.edu.br>



ADAPTAÇÃO DE SOFTWARE E HARDWARE

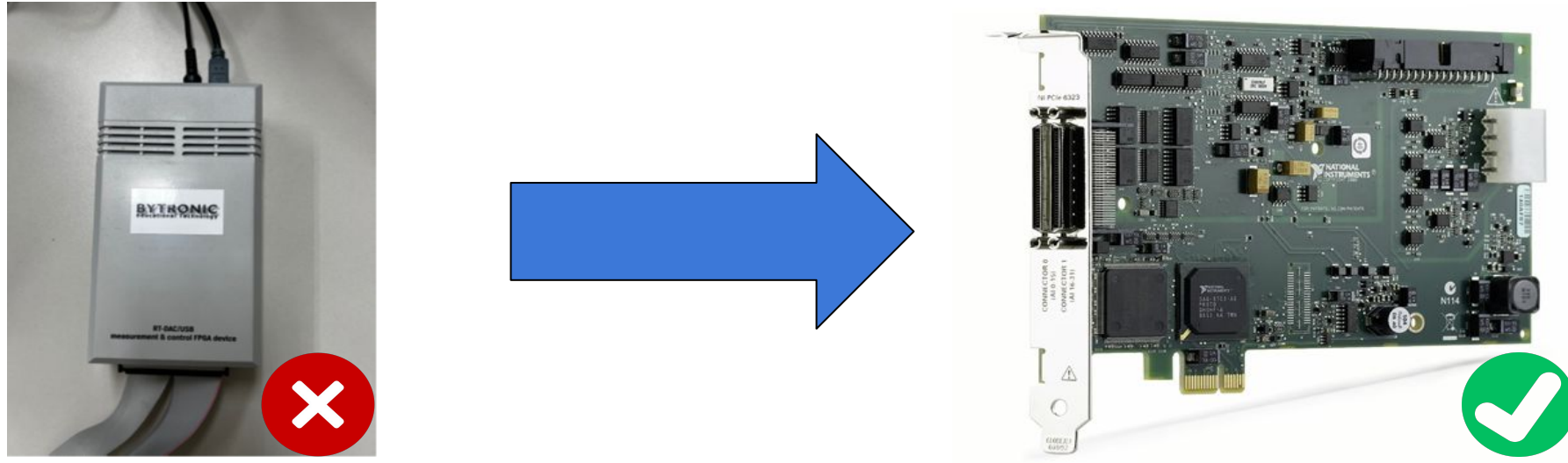


Figura 2 - Adaptação de Hardware

Foi realizada a substituição da placa original do TRAS, por uma placa de aquisição de dados PCIe-6323, de fácil integração ao *Simulink*.

IDENTIFICAÇÃO DE SINAIS E METODOLOGIAS UTILIZADAS

• MOTORES

Para identificar o sinal dos motores, primeiro utilizou-se o TRAS para enviar o sinal máximo de potência e medir qual a tensão máxima que chega nos terminais. Aferiu-se que é de +24V para um sentido e -24V para outro. A outra etapa de identificação foi para verificar a frequência do PWM que deve ser utilizado. Para tal, foi utilizado um osciloscópio e um sinal enviado do TRAS. O resultado foi um sinal de 4,88kHz.

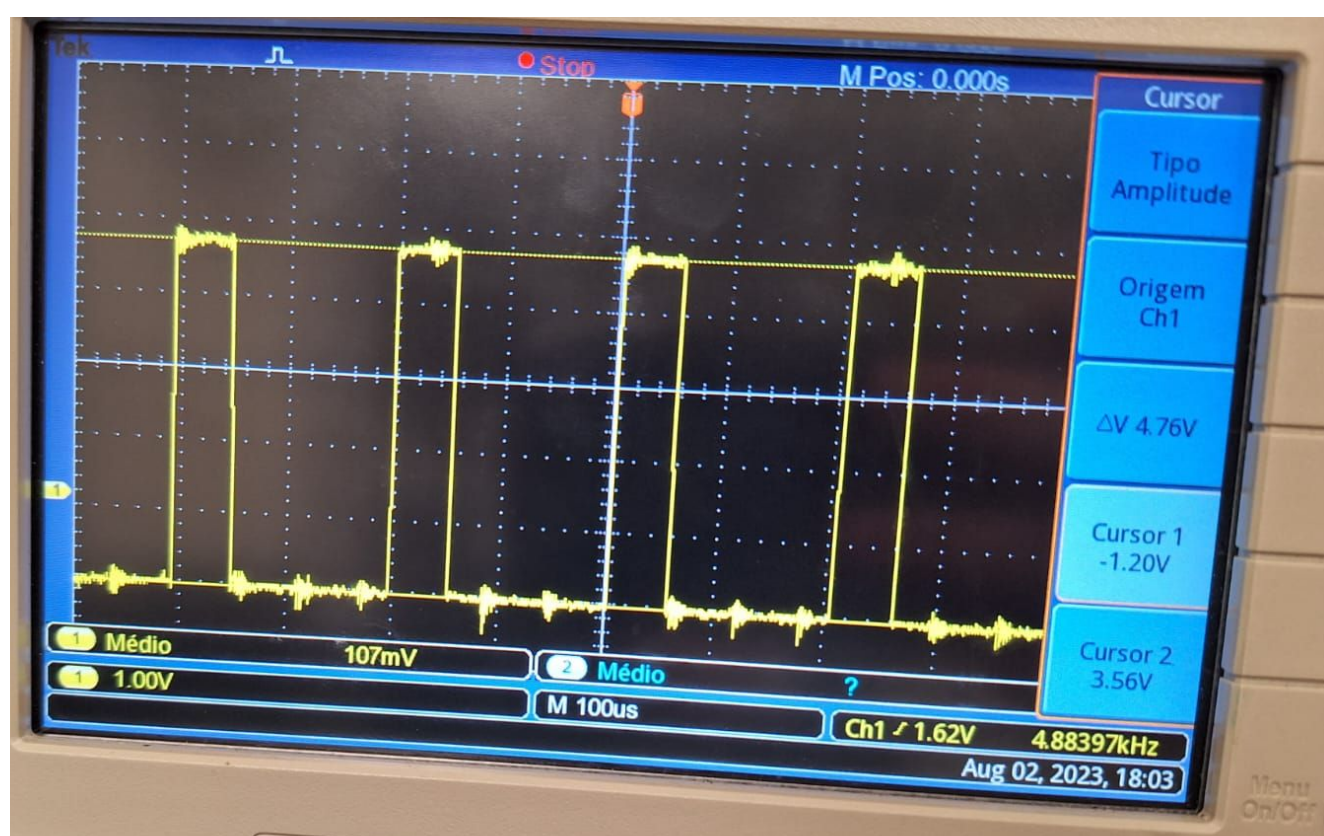


Figura 3 - Verificação da frequência do PWM no osciloscópio

Para efetivamente controlar, criou-se um diagrama no Simulink que altera o *duty-cycle*, de -1 a 1, dependendo da intensidade e sentido de rotação. O módulo deste valor é injetado no bloco de *Frequency Output*. Para definir a direção, um bit é definido em nível lógico alto para *duty-cycle* maior que 0 e baixo para valores menores.

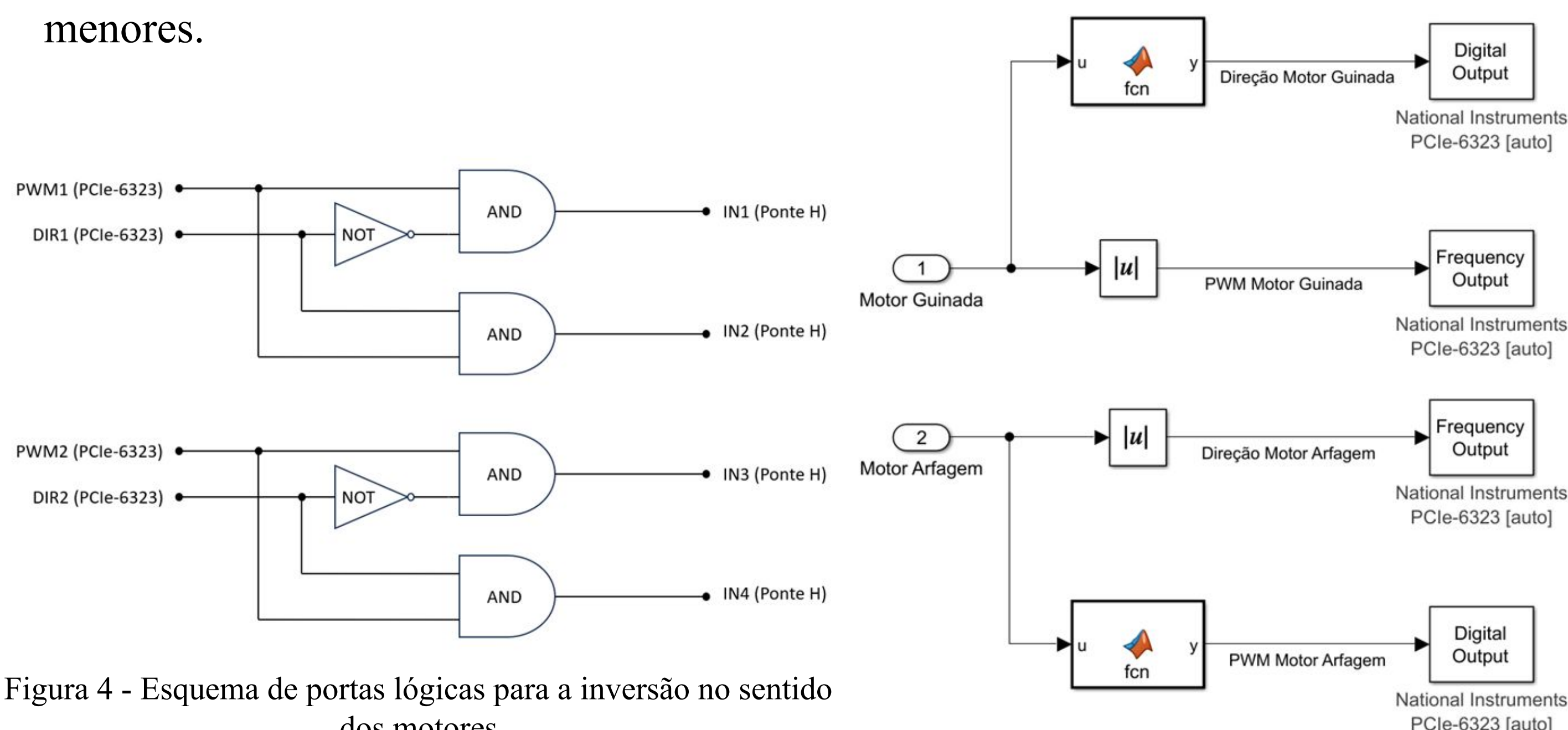


Figura 4 - Esquema de portas lógicas para a inversão no sentido dos motores

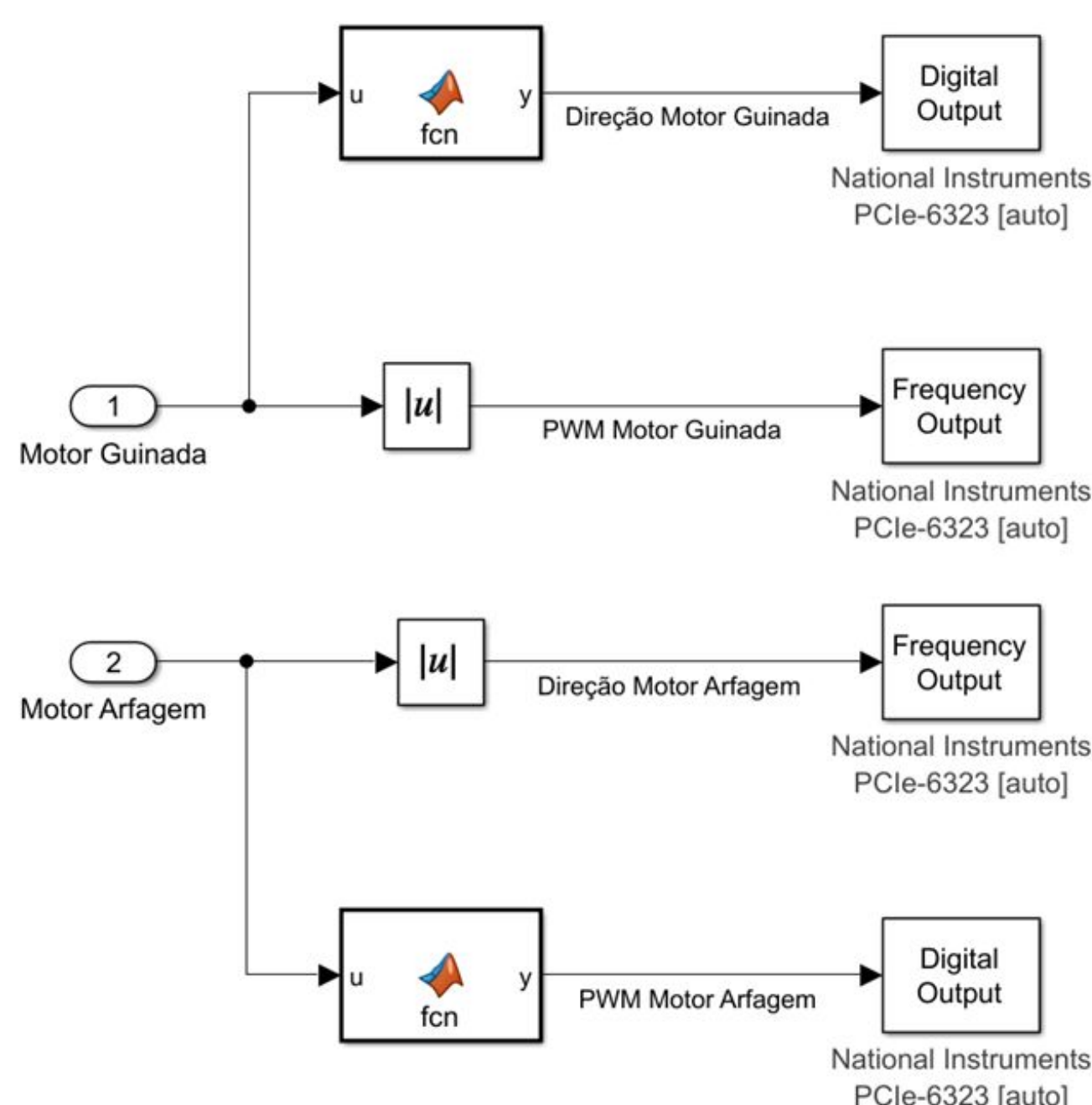


Figura 5 - Diagrama de blocos *Simulink*

• TACÔMETROS

Com o motor em sua rotação máxima, identificou-se a tensão nos terminais, que varia de -5V a 5V, e definiu-se o tipo de conexão como "Single ended" no bloco *Analog Input*, ou seja, um dos terminais deve ser conectado a uma referência.

Para encontrar a relação entre a tensão gerada pelos tacômetros e a respectiva rotação em seu eixo, foram feitos testes cruzados entre o funcionamento a biblioteca TRAS do MATLAB e a nova versão com PCIe-6323.

Injetou-se sinais PWM na entrada de cada motor, variando de -1 a 1 com um incremento de 0,1 para o *duty-cycle*. Com isso, foram levantadas as curvas da tensão gerada nos tacômetros, com os valores capturados utilizando a PCIe-6323 para a aquisição dos dados.

Como o eixo de ambos os gráficos representam o valor de *duty-cycle* aplicado de cada motor, adotou-se o valor de tensão na horizontal e o valor de rotação do motor na vertical, gerando assim o gráfico de RPM por tensão.

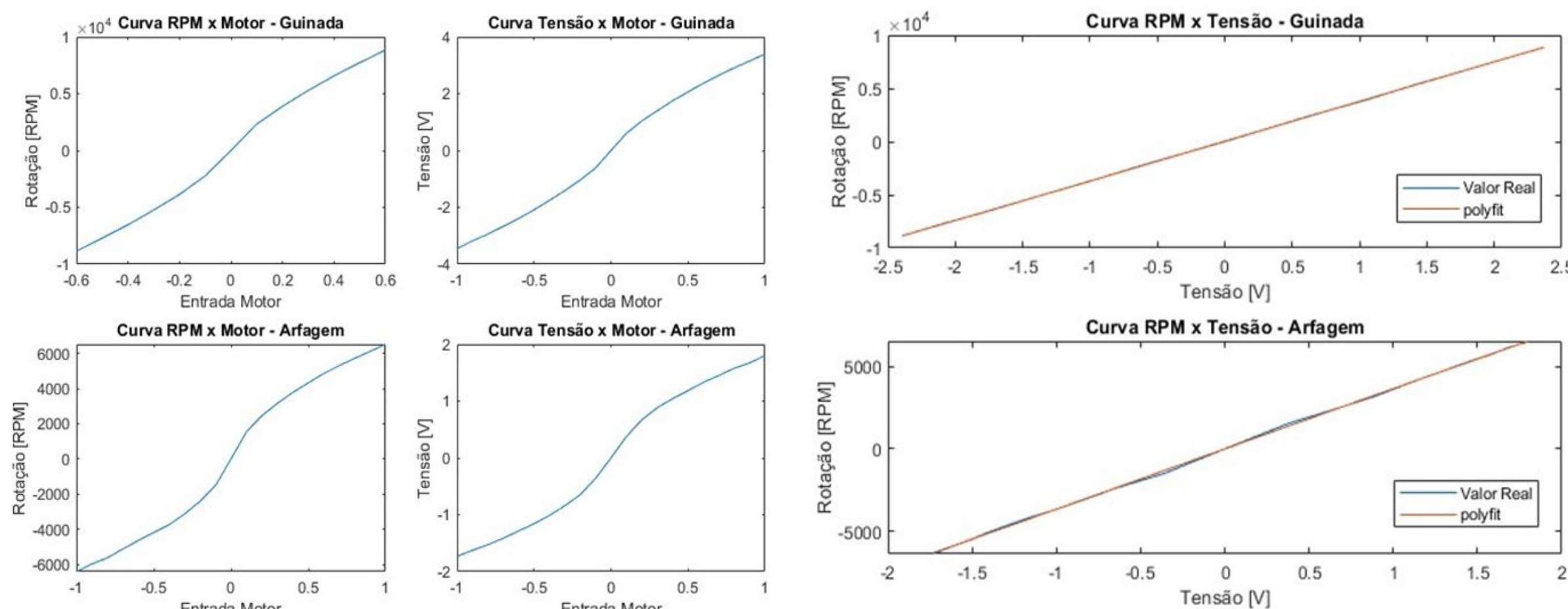


Figura 6 - Gráficos para aquisição da relação RPM x Tensão dos tacômetros

A partir dessa nova curva relacionando RPM por tensão para cada motor, chegou-se a duas equações de terceiro grau. Com as equações encontradas, as mesmas foram adicionadas ao diagrama de blocos através de um bloco de função como visto abaixo.

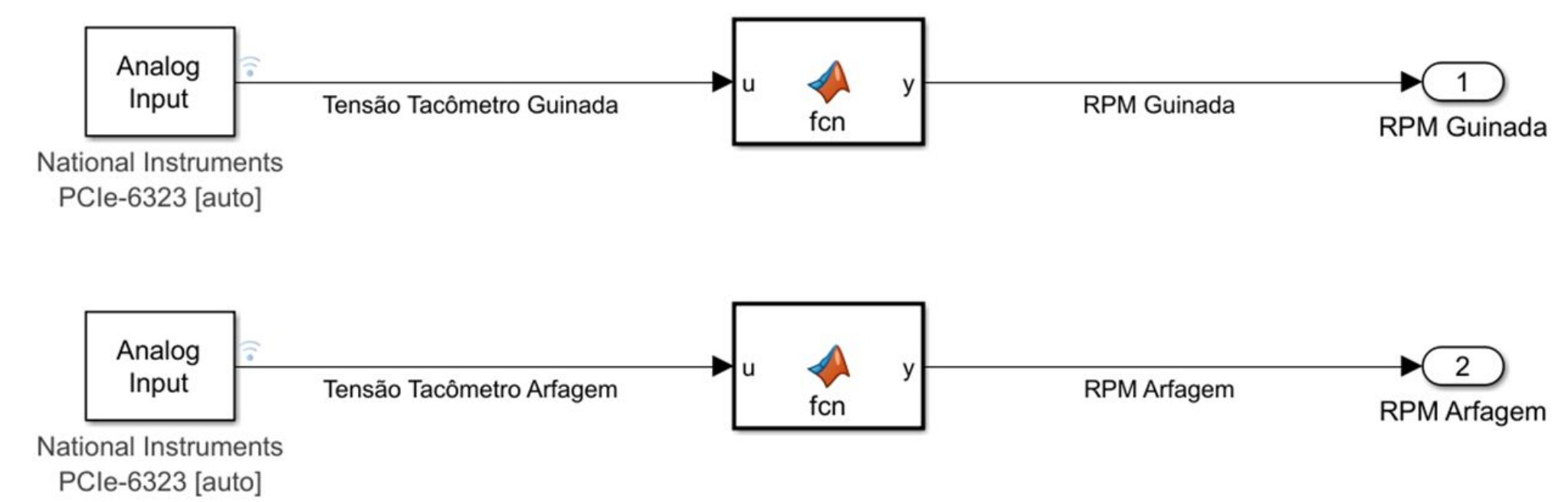


Figura 7 - Diagrama de blocos no *Simulink* para os tacômetros

• ENCODERS

A fim de mapear o deslocamento da barra principal, utilizou-se de uma bússola para definir o intervalo angular de movimento da barra, tanto na guinada quanto na arfagem. Após ter em mãos esse resultado, levantou-se a relação entre os graus e os counts obtidos, e posteriormente, a conversão para radianos. Isto foi realizado num bloco de função do MATLAB. Implementou-se, também, uma função que redefine a posição de referência da barra, acionada por um botão posicionado no próprio diagrama. Por fim, blocos de derivada fornecem a velocidade angular da barra para cada movimento.

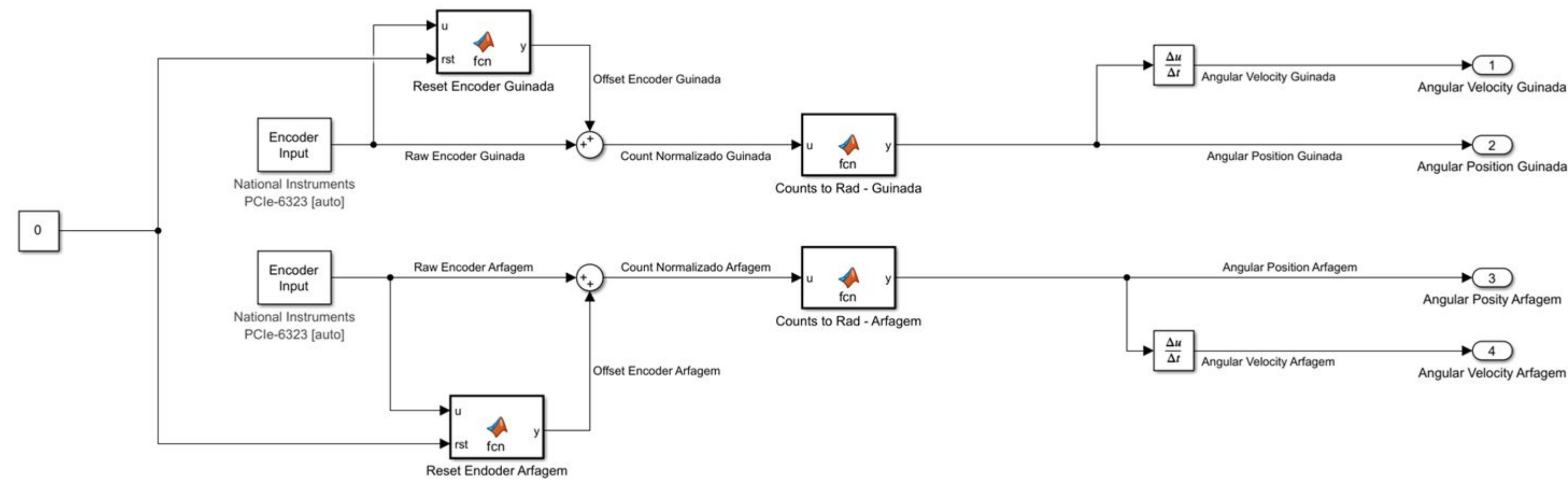


Figura 8 - Diagrama de blocos no *Simulink* para os encoders

DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM E CONTROLADORES

• UM GRAU DE LIBERDADE

Foi selecionado o grau de liberdade da guinada (horizontal) para realizar a modelagem e desenvolvimento dos controladores, uma vez que se aproximam aos sistemas de controle de posição vistos durante a graduação. Para a modelagem, utilizou-se o modelo fenomenológico, e a partir dele, encontrou-se uma função de transferência cujo comportamento despreza as não-linearidades.

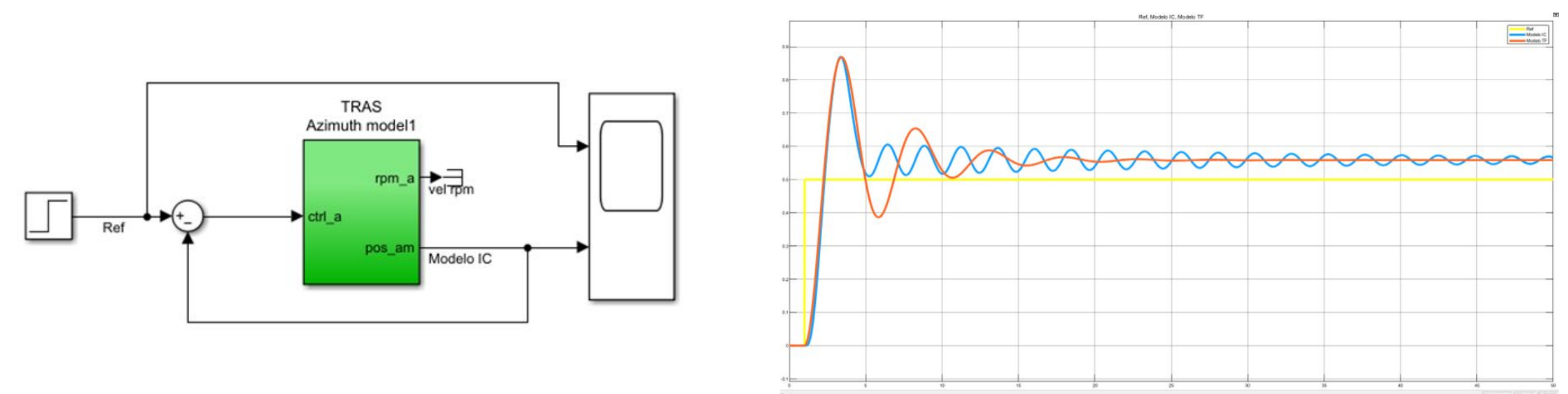


Figura 9 - Diagrama e respostas para obtenção da modelagem em 1 grau de liberdade

$$G(s) = \frac{1,9487}{s^2 + 0,4859s - 0,2044}$$

Com a função de transferência, foi possível utilizar as técnicas aprendidas durante o curso de Controle e Servomecanismos 1 para o desenvolvimento dos controladores mais básicos, a fim de demonstrar suas características e diferenças. Os controladores desenvolvidos foram:

- Proporcional-Integral;
- Proporcional-Integral-Derivativo (PID);
- Proporcional-Derivativo;
- Lead (Alocação de Polos e Zeros);



Alunos: Bruno do Carmo Spindola, Eduarda Campos Aragão, Eric Rossini Ebner e Lucas Pasqual Fernandes.

Orientador: Fabrizio Leonardi <fabrizio@fei.edu.br>

• DOIS GRAUS DE LIBERDADE

Neste caso, optou-se por empregar a técnica de identificação com base na estimação matemática já em espaço de estados, utilizando um algoritmo no software MATLAB e a função *ssest*. O objetivo era obter um modelo matemático que representasse o comportamento do TRMS com base num conjunto de dados de entrada conhecido e das saídas que o equipamento fornecerá. Este procedimento foi dividido em duas partes, coleta e identificação.

Para a coleta, o primeiro passo consistiu em construir dois sinais variantes de -1 a 1, e injetá-los nos motores responsáveis pelos movimentos de arfagem e guinada. Estes sinais deveriam representar diferentes dinâmicas do sistema, como mudanças bruscas de sentido e períodos de sinal variados para que, no momento de identificação do sistema, todos os diferentes cenários possam ser levados em consideração.

O próximo passo foi desenvolver um modelo no *Simulink* que possibilitasse a injeção destes sinais nos motores, e medir o deslocamento angular que ocorrerá no equipamento, através dos *encoders*, para que todos os dados eventualmente sejam inserido no algoritmo de identificação. Após a captura, utilizou-se um algoritmo de identificação no MATLAB, e antes disso, fez-se o uso da função *iddata*, que tem por objetivo preparar os dados de entrada e saída atribuindo características a elas para realizar a identificação. Sem esta função, a *ssest* não poderia ser empregada.

Esta, por sua vez, é que vai estimar o modelo em espaço de estados com base nos dados formatados pela função mencionada anteriormente. Para este projeto, chegou-se a um sistema de ordem 6. Com a utilização da função *lsim*, é possível observar os resultados em formatos de gráficos para análise do comportamento do sistema.

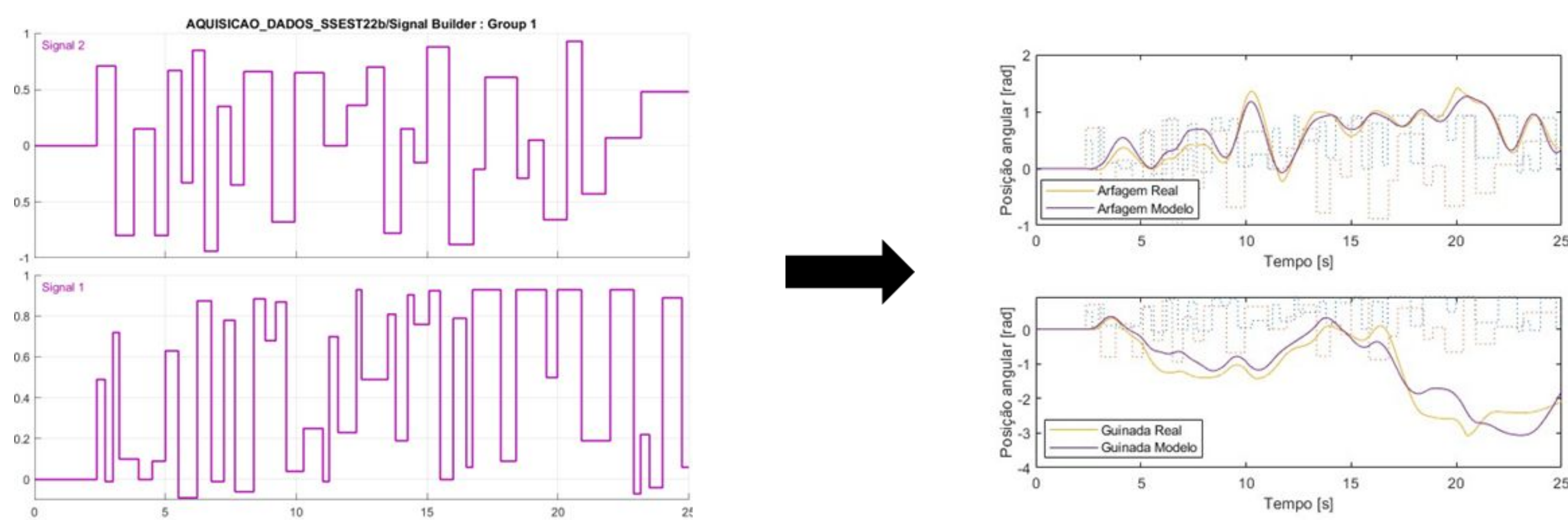


Figura 10 - Conjunto de dados de entrada para identificação do sistema e seu comportamento comparado ao real.

Em seguida, foi realizada a comparação das matrizes de espaço de estados que representavam o comportamento em dois graus de liberdade do TRMS, com o modelo originalmente proposto no trabalho de iniciação científica de Honsi (2015).

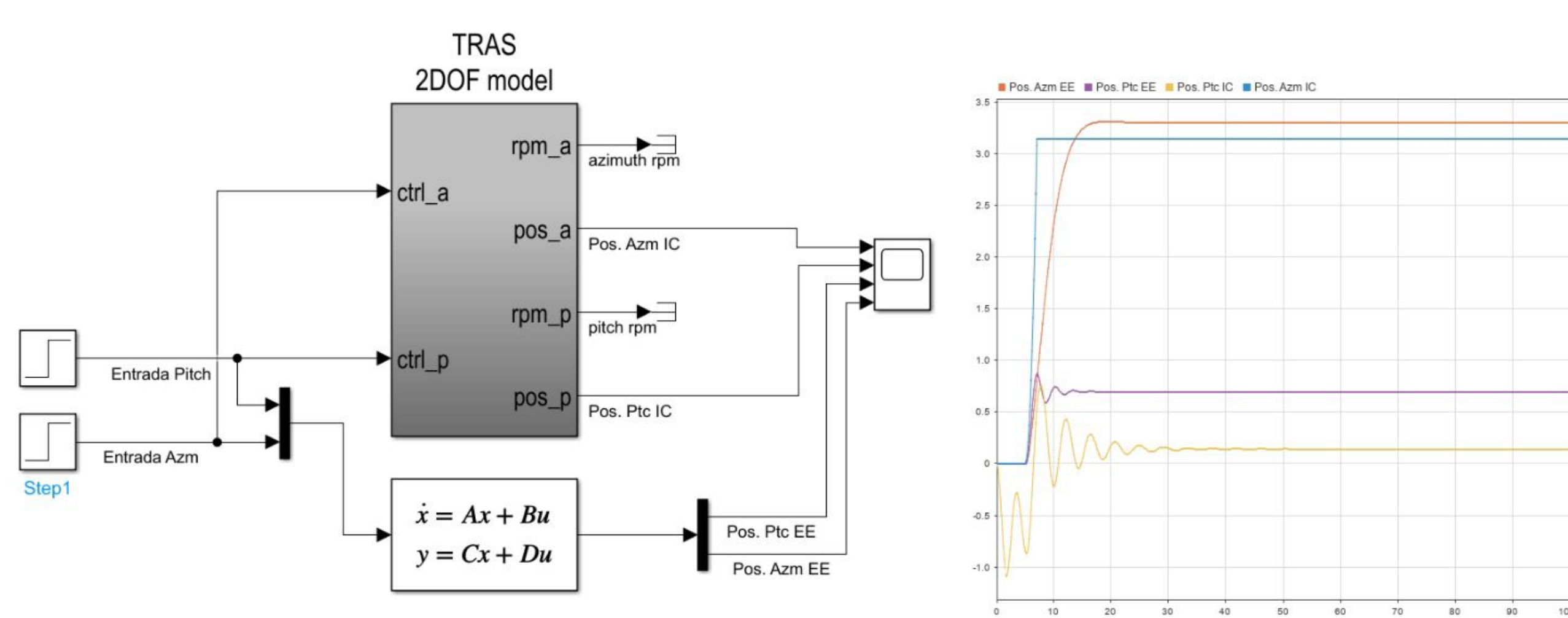


Figura 11 - Comparativo entre o modelo em espaço de estados oriundo da identificação e do modelo de Honsi (2015).

Finalmente, à partir do modelo construído foi possível desenvolver um controlador em dois graus de liberdade, por meio do método RLQ (Regulador Linear Quadrático). Nele, por meio de iterações e experimentação, foram propostas as matrizes Q e R, de desempenho e esforço respectivamente, e por meio da função *lqr* no MATLAB, foi gerada a matriz de ganhos K. Em seguida, como a representação do TRMS em espaço de estados se tratava de uma estimação, os estados dessas matrizes não representam nenhuma grandeza física real, o que gera a necessidade de observar os estados para a utilização de um controlador. Para tal, também foi calculada a matriz do observador H do controlador, obtendo os polos do modelo com a função *eig*, e em sequência por meio do comando *place* do MATLAB.

RESULTADOS

• ALOCAÇÃO DOS COMPONENTES

Com o objetivo de consolidar os componentes utilizados no conjunto em um local só, construiu-se uma caixa em MDF, desenvolvida com o objetivo de assemelhar-se à caixa original. Nela, estão todas as placas e circuitos utilizados no projeto, bem como os conectores necessários para enviar e receber sinais ao TRMS.

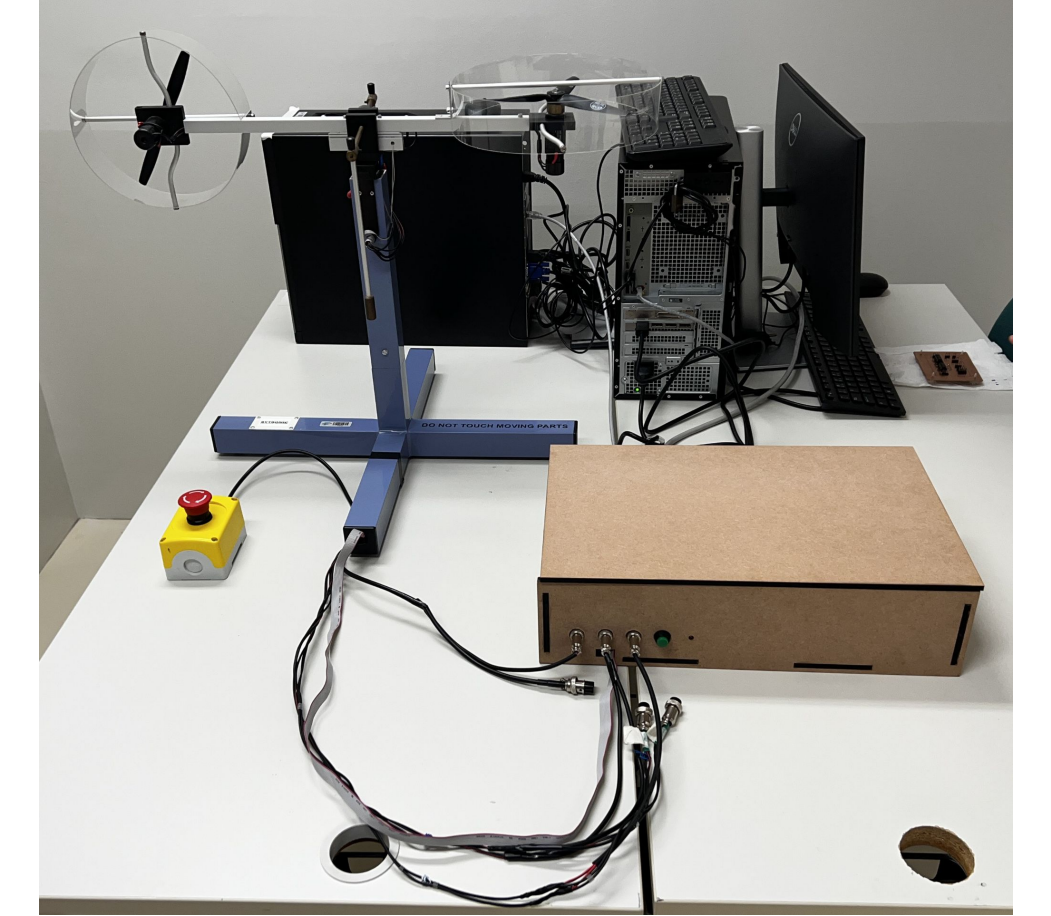


Figura 12 - Kit didático

• VALIDAÇÃO DO KIT

Para garantir que as adequações de *hardware* e *software* foram realizadas com sucesso, fez-se ensaios comparativos, em malha aberta, e também com o uso do controlador original do TRAS “*Cross-coupled PID*”, com a adaptação realizada por meio da PCIe-6323 e o funcionamento original com o uso do TRAS.

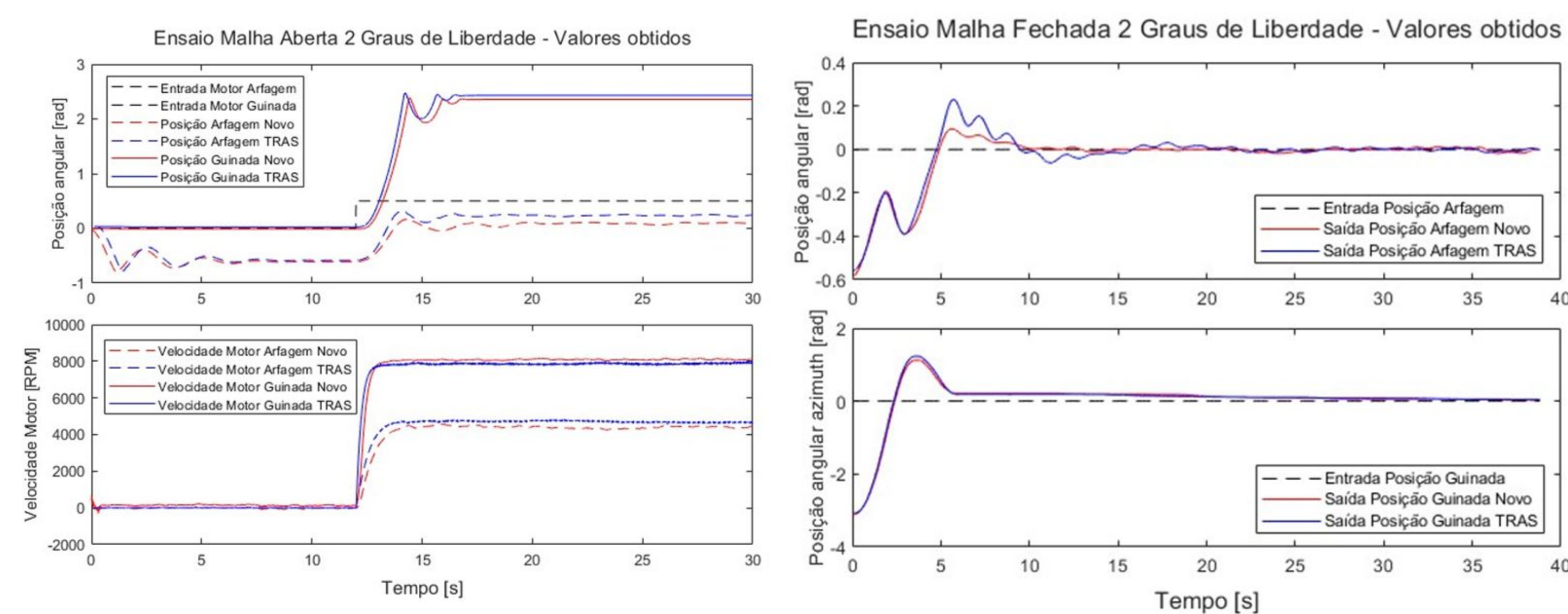


Figura 13 - Ensaio em malha aberta e em malha fechada para os dois graus de liberdade

• DESEMPENHO DOS CONTROLADORES

Após a validação do Kit construído, os controladores previamente desenvolvidos foram testados na prática. Adicionalmente, os resultados obtidos foram plotados em gráficos junto à respectiva resposta teórica.

• UM GRAU DE LIBERDADE

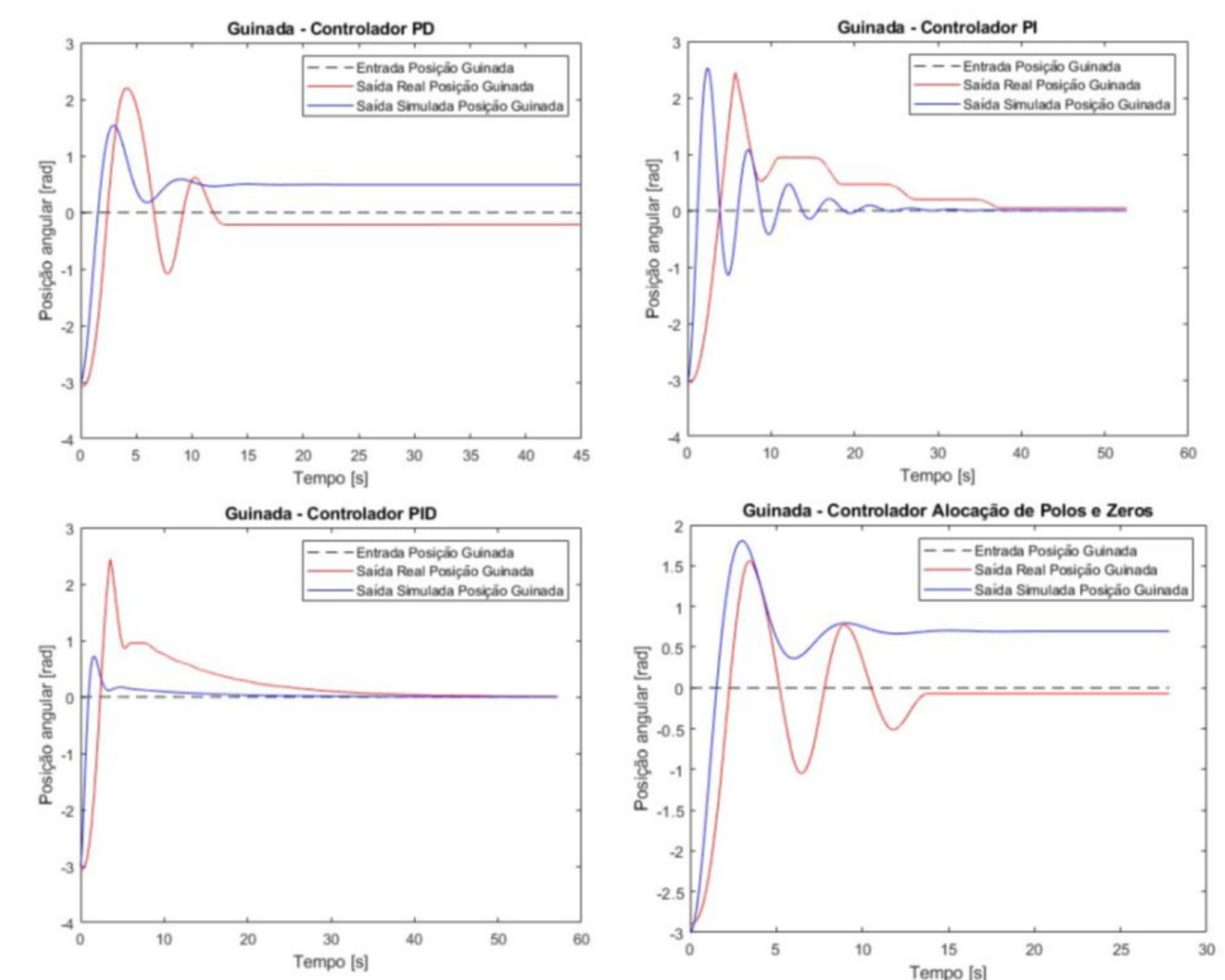


Figura 14 - Gráficos das respostas dos controladores para um grau de liberdade

• DOIS GRAUS DE LIBERDADE

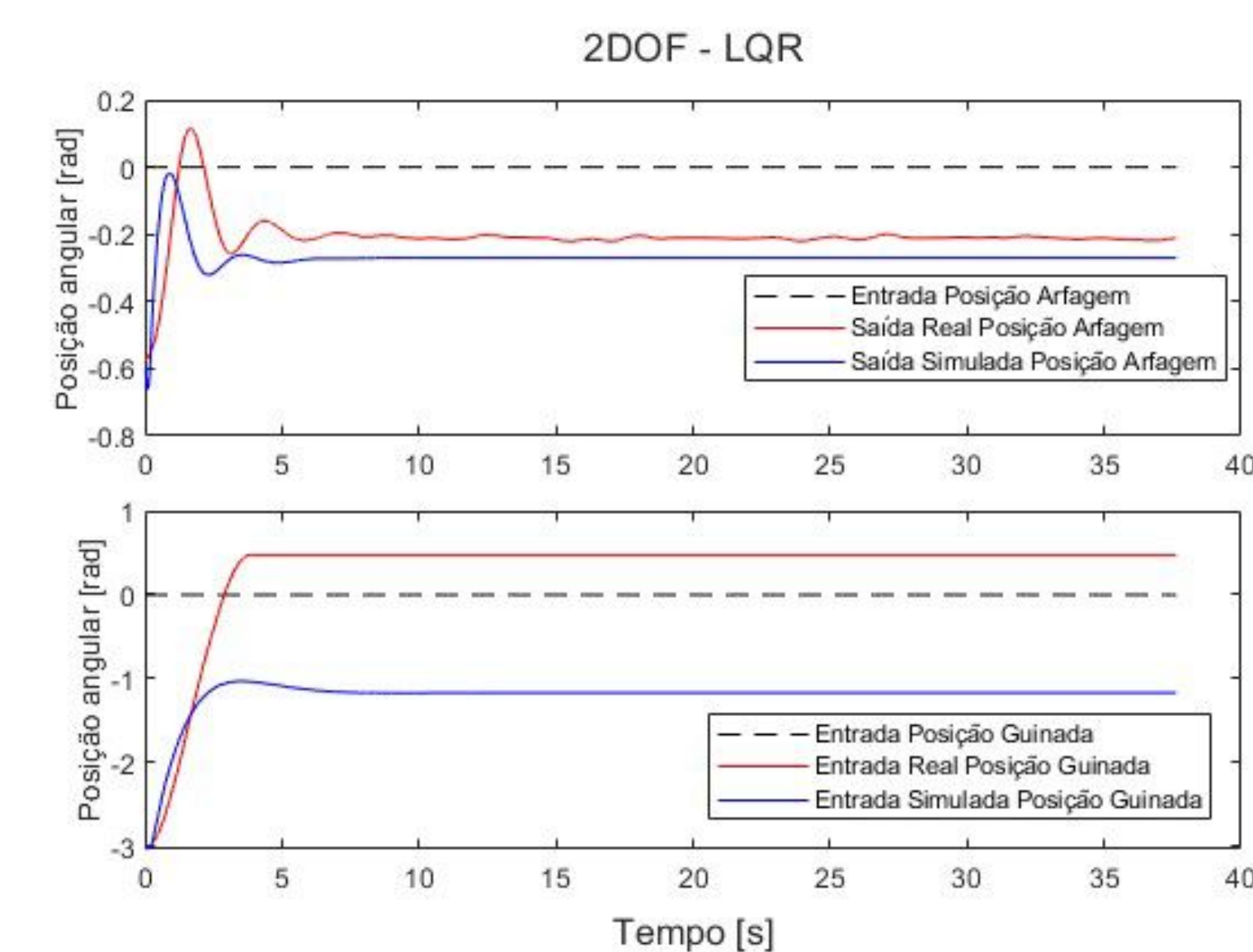


Figura 15 - Gráfico de resposta do controlador LQR para dois graus de liberdade