

MODELAGEM E PROJETO DOS SISTEMAS DE CONTROLE DE TRAÇÃO E ESTERÇAMENTO DA PLATAFORMA ROBÓTICA AGRÍCOLA MÓVEL RAM

Victor Sammarco Dias, victor.sammarco.dias@usp.br¹

Clayton José Torres, clayton@ifsp.edu.br^{1,4}

Mário Luiz Tronco, mltronco@sc.usp.br¹

Emerson Carlos Pedrino, emerson@dc.ufscar.br²

Alexandre José Tiberti, atiberti@sc.usp.br¹

Carlos Roberto Valêncio, valencio@ibilce.unesp.br³

John Faber Archila-Diaz, john.faber@ifsp.edu.br⁴

¹Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade São Paulo – Avenida Trabalhador são-carlense, 400 - Parque Arnold Schmidt, CEP 13566-590 - São Carlos – SP - Brasil

²Universidade Federal de São Carlos – Rod. Washington Luís km 235 - SP-310 - CEP 13565-905, São Carlos – SP - Brasil

³Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, 14884-900 – Jaboticabal - SP - Brasil

⁴Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia – Rua Doutor Aldo Benedito Pierri, 250 - Jardim dos Manacas, 14801-600 - Araraquara – SP - Brasil

Resumo: Este artigo trata da modelagem do sistema eletromecânico de tração e de esterçamento das rodas de uma plataforma robótica móvel para uso agrícola - RAM. Com base nas equações referentes a modelagem do sistema foram geradas as funções de transferência de cada sistema e analisada de forma experimental, levando-se em conta a formulação da geometria Ackerman para o esterçamento controlado. A análise de estabilidade do sistema completo foi realizada, em função de dois modelos de controle no espaço de estados e os resultados obtidos, otimizam e estabilizam os sistemas, tornando-os compatíveis às especificações de projeto.

Palavras-chave: Robô Agrícola Móvel, Sistemas de tração e esterçamento, Ackermann, Controle no espaço de estados

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho aborda a modelagem de um sistema de controle para esterçamento e tração de uma plataforma robótica móvel, tendo como base, o robô agrícola móvel (RAM), desenvolvido no Departamento de Engenharia Mecânica da EESC – USP. A proposta inicial do veículo, determina que o mesmo possua a capacidade de deslocamento controlado e semiautônomo, para trafegar em ambientes agrícolas. Para realizar as tarefas de controle e análise de dados agrícolas, o robô possui um conjunto de sensores, proprioceptivos que medem parâmetros internos e exteroceptivos os quais realizam o monitoramento de parâmetros associados às culturas agrícolas. Na Fig. 1, é possível observar a plataforma RAM e seu modelo em CAD do sistema de tração e esterçamento, assim como, a legenda referente as principais características do mesmo.

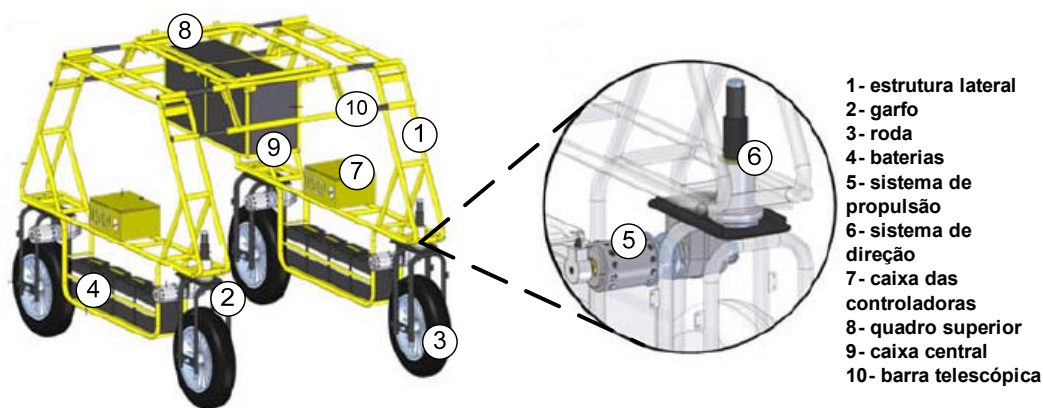


Figura 1: Robô Agrícola Móvel (RAM). Detalhe do módulo da roda dianteira e sistema de Tração e Esterçamento, adaptado Tabile *et al.* (2011).

O RAM é dotado de um sistema de tração individual em cada uma de suas rodas, seu sistema de esterçamento também é individual e utiliza apenas as rodas dianteiras para realizar manobras. Tal configuração, exige um sistema de controle confiável e com mínimo de *Overshoot*. Devido a aplicação da geometria de Ackermann, a qual durante a excussão de uma curva exige um diferencial de velocidade em cada uma das rodas do sistema de tração, além de diferentes ângulos de esterçamento das rodas dianteiras. As equações da geometria de Ackerman utilizadas como base são uma sequência do um trabalho realizado no desenvolvimento das equações cinemáticas da plataforma RAM, as quais são abordadas detalhadamente em Torres *et al.* (2012). O presente trabalho realiza a modelagem matemática dos dois sistemas eletromecânicos (motor e redutor) presentes no RAM, tomando como base as equações resultantes, projeta um sistema de controle que atenda às necessidades do robô agrícola móvel, RAM.

2. MODELAGEM DOS SISTEMAS DE ESTERÇAMENTO E TRAÇÃO

2.1. Esterçamento

O sistema de esterçamento do veículo autônomo RAM é composto basicamente por motor DC, redutor, encoder, mancal e rolamento, os quais são acoplados aos garfos que ligam este sistema às rodas. Para uma análise inicial, assume-se que apenas o motor e o redutor interfiram de modo relevante na função de transferência de todo o sistema de esterçamento do veículo RAM. Estes componentes são modelados a seguir.

2.1.1. Motor de esterçamento

Seu diagrama de blocos em termos de função de transferência é mostrado na Fig. 2. Neste diagrama propõe-se, primeiramente, um modelo referente à parte elétrica do motor, no qual a resistência ($R=1,16\Omega$) e a indutância ($L_a=0,329\times 10^{-3}H$) são fundamentais no motor, e como entrada do sistema a tensão fornecida à armadura (E_m). Depois, inclui-se uma constante de proporcionalidade ($K_t=60,3\cdot 10^{-3}Nm/A$) entre corrente e torque, a fim de que se possa introduzir uma subsequente parte mecânica do motor a ser modelada. Então, modela-se a parte mecânica do motor e assume-se como influente a inércia ($J=1,38\cdot 10^{-5}Kg\cdot m^2$) e a viscosidade (B), e como saída do sistema observa-se a velocidade angular final do motor (W_m). Por fim, deve-se incluir no diagrama do motor uma constante ($K_b=0,0604V/(rad/s)$) referente à força contra eletromotriz (E_c), isto é, uma tensão que é gerada nos enrolamentos da armadura do motor de corrente contínua e, que acarreta em uma perda na tensão aplicada ao sistema.

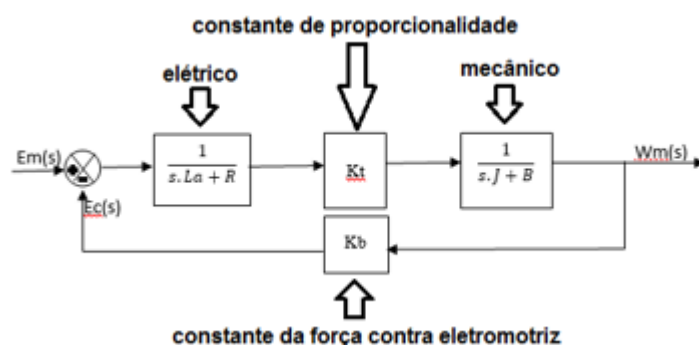


Figura 2. Diagrama de blocos motor do sistema de esterçamento.

O coeficiente de atrito viscoso, B, pode ser definido como:

$$B = \frac{J}{\tau_1} \quad (1)$$

sendo τ_1 a constante de tempo do motor ($\tau_1 = 4,39.10^{-3}s$).

Portanto, pela Eq. (1), $B = 0,0031 \text{ Kg m}^2/\text{s}$.

A partir dos dados calculados e do diagrama de blocos proposto, tem-se a seguinte função de transferência para o motor [$G_m(s) = \frac{W_m}{E_m}(s)$]:

$$G_m(s) = \frac{2.738.10^{-10}.s^2 + 1.028.10^{-6}.s + 0.0002199}{2.061.10^{-17}.s^4 + 1.548.10^{-13}.s^3 + 3.401.10^{-10}.s^2 + 1.864.10^{-7}.s + 2.659.10^{-5}} \quad (2)$$

2.1.2. Redutor de esterçamento

O redutor utilizado para o esterçamento do robô possui fator de redução de 1:230. O diagrama de blocos, em malha aberta, para o conjunto motor-redutor do sistema de esterçamento, é apresentado na Fig. 3, em que Θ_{rm} é o ângulo de saída do redutor e B_r a função de transferência do redutor.

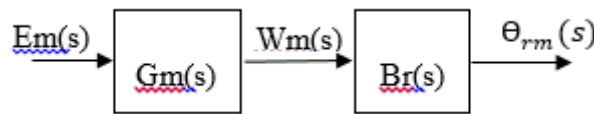


Figura 3. Diagrama de blocos conjunto motor-redutor esterçamento.

O modelo utilizado para o redutor é dado por um disco menor (r_1) recebe a velocidade angular do motor (W_m), que pode ser definida pela variação angular da posição do motor (Θ_{wm}) e transmite o movimento a um disco maior (r_2), o qual tem uma variação angular (Θ_{rm}). Dessa forma, utiliza-se apenas a relação clássica de rotação entre dois discos para equacionar o problema Vu e Esfandiari (2003), e como $r_2 = 230.r_1$ pela taxa de redução, o equacionamento de $B_r(s)$ é realizado por:

$$\frac{\Theta_{rm}}{\Theta_{wm}}(s) = \frac{r_1}{r_2} \quad (3)$$

$$B_r(s) = \frac{\Theta_{rm}}{W_m}(s) = \frac{r_1}{s.r_2} = \frac{1}{s.230} \quad (4)$$

Então, o diagrama de blocos para malha aberta do sistema motor-redutor do sistema de esterçamento será como mostrado na Fig. 4, a seguir.

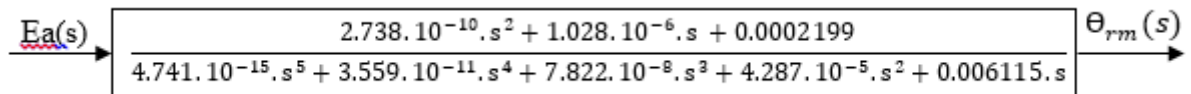


Figura 4. Diagrama de Blocos e Função de Transferência Ester(s) do sistema motor-redutor do esterçamento do RAM.

Esta função Ester(s) é obtida a partir da multiplicação entre a função de transferência do motor $G_m(s)$ pela função $B_r(s)$, a qual torna-se possível pois nos modelos teóricos apresentados, propõe-se que a velocidade de saída do motor será a entrada do redutor. Além disso, observa-se que Ester (s) é igual à razão $\frac{\Theta_{rm}}{E_a}(s)$, e, por isso, implicará em uma forma de se relacionar, no domínio da frequência, a rotação de esterçamento das rodas em função de uma tensão dada ao motor.

2.1.3. Validação da modelagem teórica de esterçamento

Na validação do modelo teórico de esterçamento e, posterior projeto de seu controlador, utilizou-se como saída de seu sistema a velocidade angular. Para isso, calculou-se a função de transferência Ester2(s) = $\frac{W_{rm}}{E_a}(s)$, a qual relaciona a velocidade da saída do redutor (rad/s) com uma tensão aplicada ao motor. Portanto, derivando-se o termo da posição para velocidade, obteve-se a função de transferência da Eq. (5).

$$Ester2(s) = \frac{1.19.10^{-12}.s^2 + 4.468.10^{-9}.s + 9.56.10^{-7}}{2.061.10^{-17}.s^4 + 1.548.10^{-13}.s^3 + 3.401.10^{-10}.s^2 + 1.864.10^{-7}.s + 2.659.10^{-5}} \quad (5)$$

O experimento, para validar a função de transferência calculada para o motor, consistiu em enviar um sinal de controle para que ele atingisse 3200 rpm, a partir de uma tensão aplicada constantemente. O sistema motor-redutor é controlado por um PWM, gerado pela placa controladora de velocidade e posição, presente na estrutura do RAM. Os dados da velocidade instantânea do motor são lidos diretamente na saída de um encoder. Para comparação dos valores reais (lidos) e teóricos (calculados), foi implementado um modelo teórico, na plataforma Matlab/Simulink, para simular o experimento. Os gráficos das medidas experimentais e simuladas são mostrados a seguir, na Fig. 5.

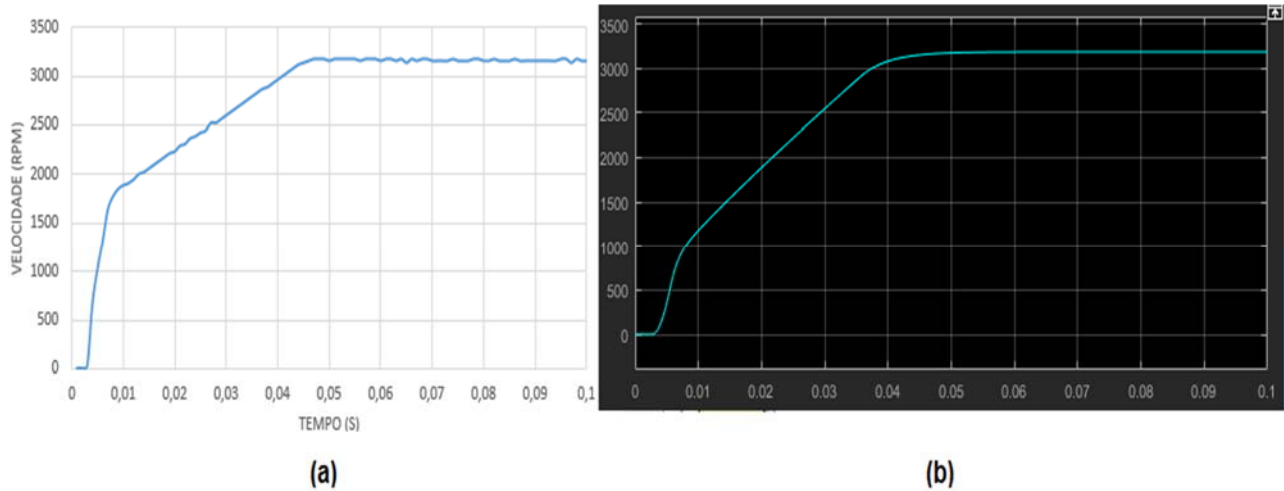


Figura 5. Gráfico dos dados experimentais de esterçamento (a) e da simulação (b)

Comparando-se estes dois gráficos, avalia-se que ambos possuem características similares, além de valores ao longo do tempo muito próximos, atingir um resultado idêntico de velocidade e possuir um tempo de estabilização muito próximos (aproximadamente 0,05s para ambos). Este resultado é satisfatório para o presente objetivo do projeto que seria controlar o esterço do veículo RAM que se faz em velocidades muito baixas e, assim, permite uma porcentagem maior de erro no modelo.

2.2. Tração

No sistema de tração do veículo autônomo RAM, pode-se considerar como partes principais: motor DC, redutor, pinhão, corrente, coroa e roda, pois estes, a princípio, terão uma maior relevância no funcionamento mecânico do sistema.

2.2.1. Motor da tração

O motor utilizado para a tração na plataforma RAM é de corrente contínua, com 750W de potência e 24V de tensão nominal. Ele é modelado como uma função de primeira ordem (B_m) com a entrada do sistema como a tensão fornecida à armadura (E_m) e saída a velocidade angular do motor (W_b). Assim, sua constante de tempo (τ_2) pode ser calculada a partir do tempo de seu regime transitório (ΔT) e seu ganho determinado pela constante de velocidade angular (K_v), a qual é calculada a partir da razão entre a rotação do motor em vazio e sua tensão necessária para o funcionamento. O diagrama de blocos do motor é exibido na Fig. 6.

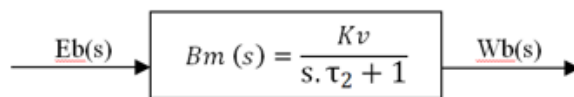


Figura 6. Função de Transferência para o motor de tração.

A constante de velocidade angular é dada pela Eq. (6), em que n_0 é a rotação do motor com carga aplicada nula e V a tensão aplicada no motor com carga nula.

$$K_v = \frac{n_0.(\pi/30)}{V} = \frac{4150.(\pi/30)}{24} = 18,11 \text{ rad/(s.V)} \quad (6)$$

Para determinar a constante de tempo, utilizou-se o osciloscópio para a medição do tamanho de seu regime transiente, isto é, 4 vezes a sua constante de tempo ($4 \cdot \tau_2$) Felício (2010), segundo a teoria de controle. Na fig. 7 é mostrada uma medida.

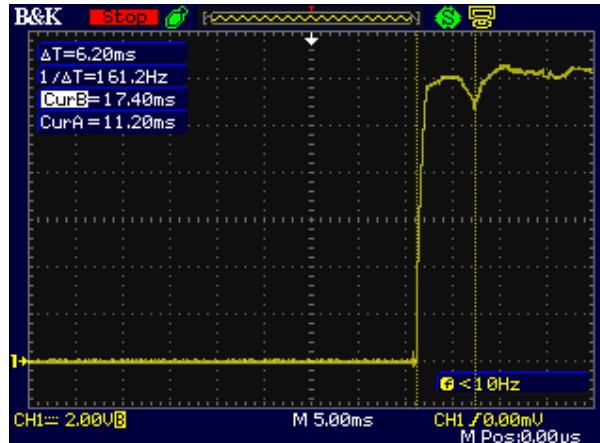


Figura 7. Medida de tempo em transitório para o motor.

Utilizando-se este valor experimental para ΔT ($\Delta T = 6,2\text{ms}$), tem-se $\Delta T = 4 \cdot \tau_2$, ou seja, $\tau_2 = 1,6 \cdot 10^{-3}\text{s}$.

A partir dos dados obtidos no *datasheet* do motor (K_v) e do experimento com o motor (τ_2), pode-se estabelecer a seguinte função de transferência $B_m(s)$ para o motor:

$$B_m(s) = \frac{W_b}{E_b}(s) = \frac{18,11}{s \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} + 1} \quad (7)$$

2.2.2. Redutor da tração

O redutor utilizado no sistema de tração tem fator de redução de 1:25. O diagrama de blocos para o conjunto motor-redutor do sistema de tração em malha aberta é mostrado na Fig. 8, no qual θ_{rb} é o ângulo de saída do redutor e M_r a função de transferência do redutor.



Figura 8. Diagrama de blocos do sistema motor-redutor do sistema de tração do RAM

O redutor foi modelado como dois discos, um menor possuindo raio r_3 e outro maior com raio r_4 , e por conta da redução do sistema, também pode-se avaliar que $r_4 = 25 \cdot r_3$. Além disso, foi proposto que o motor entre com sua velocidade angular de saída no disco menor, gerando assim uma variação angular θ_{Bm} . A rotação do disco menor é transmitida ao maior por meio de um contato perfeito entre ambos e, por consequência, o disco maior passará a ter um ângulo de saída θ_{rb} . A função de transferência para o redutor, $M_r(s)$, será dada por:

$$\frac{\theta_{rb}}{\theta_{Bm}}(s) = \frac{r_3}{r_4} \quad (8)$$

$$M_r(s) = \frac{\theta_{rb}}{W_b}(s) = \frac{r_3}{s \cdot r_4} = \frac{1}{s \cdot 25} \quad (9)$$

$M_r(s)$ relaciona, no domínio da frequência, a rotação de saída do motor que será fornecida como entrada ao redutor com a rotação de saída que o redutor terá por consequência. O sistema consiste na interação entre a coroa e o pinhão por meio de uma corrente, a qual será considerada ideal e transmitindo perfeitamente o movimento de redução entre pinhão e coroa. O diagrama do sistema de tração com a inclusão do sistema pinhão-corrente-coroa, no qual θ_{pc} é o ângulo que é transmitido à roda pela corrente e C_{pc} a função transferência do conjunto coroa-corrente-pinhão, é exibido na Fig. 9.

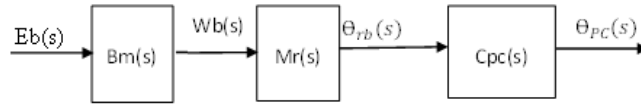


Figura 9. Diagrama de blocos da parte motor-redutor em conjunto à coroa-corrente-pinhão da tração.

O sistema corrente-pinhão-coroa, o qual é visto como não possuindo folgas, faz a ligação entre a saída do redutor e a roda do veículo para proporcionar uma tração eficiente. Além disso, possui uma redução de 1:3 no seu curso. Portanto, modela-se este conjunto de forma semelhante aos redutores anteriores, ou seja, como dois discos em contato perfeito (r_5 como raio do disco menor e r_6 o raio do disco maior) e sem perdas. Então, a partir da redução do sistema calcula-se que $r_6 = 3.r_5$ e, assim, equaciona-se a função de transferência $Cpc(s)$ do sistema corrente-pinhão-coroa tal qual nos redutores pela Eq. (10).

$$Cpc(s) = \frac{\theta_{pc}}{\theta_{rb}}(s) = \frac{r_5}{r_6} = \frac{1}{3} \quad (10)$$

Portanto, a mesma velocidade de saída da coroa, será a da roda e, por consequência, a velocidade que se deseja controlar no sistema, como mostrado na Fig. 10 pelo diagrama de blocos de todo o sistema de tração.



Figura 10. Diagrama de blocos de todo o sistema de tração do veículo RAM.

A função de transferência total do sistema de tração será dada por $Tracao(s) = \frac{\theta_{pc}}{E_b}(s)$, e é calculada na Eq. (11).

$$Tracao(s) = \frac{6.036}{0.03875.s^2 + 25.s} \quad (11)$$

2.2.3. Validação da modelagem teórica de tração

Assim como no esterçamento, na validação do modelo de tração e no projeto do controlador, a função de transferência $Tracao(s)$ terá parte derivada para que se obtenha a função $Tracao2(s) = \frac{W_{pc}}{E_b}(s)$ na Eq. (12), que relaciona a velocidade de saída da roda (rad/s) com a tensão aplicada ao motor.

$$Tracao2(s) = \frac{0.2414}{0.00155.s + 1} \quad (12)$$

Para a validação do equacionamento relativo ao esterçamento, foi realizada leitura experimental, via encoder, da velocidade da roda em função da tensão aplicada ao motor. Implementou-se também um modelo no ambiente Matlab/Simulink, para comparação dos dados teóricos. Os resultados são mostrados na Fig. 11.

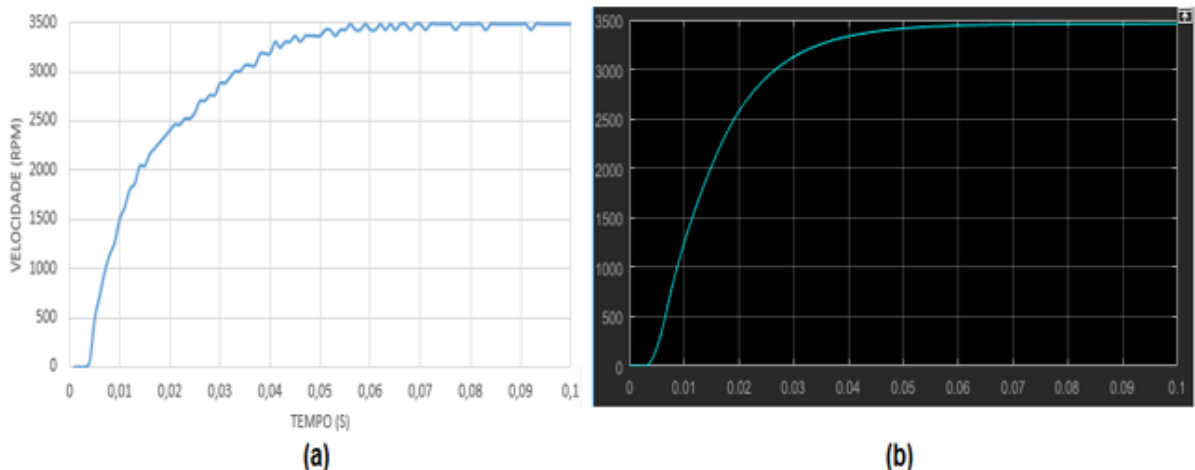


Figura 11. Dados experimentais (a) e simulados (b).

Assim, por meio de comparação, percebe-se que ambos os gráficos alcançam o mesmo índice de velocidade, possuem em sua trajetória ao longo do tempo valores muito próximos e o tempo de estabilização do sistema muito próximo (aproximadamente 0,06s). Este resultado de comparação torna-se satisfatório no projeto de controle de tração do RAM, o qual trafega em velocidades e, por consequência, torna-se permissível um maior erro no modelo teórico.

3. PROJETO DOS CONTROLADORES

3.1. Controle de esterçamento

O projeto do controlador para o esterçamento consiste em controlar a função Ester2(s), que relaciona a velocidade de esterçamento da roda com a tensão aplicada ao motor. O método a ser utilizado para o controle do sistema de esterçamento é o método de alocação de polos. Para se trabalhar com este método, deve-se utilizar do espaço de estados e, por consequência, representar a função de transferência Ester2(s) na forma canônica controlável, a qual é de suma importância na alocação de polos.

Então, calcula-se a forma canônica controlável:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1.29 \cdot 10^{12} & 9.04 \cdot 10^9 & 1.65 \cdot 10^7 & 7.51 \cdot 10^{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot u \quad (13)$$

$$y = [4.64 \cdot 10^{10} \quad 2.17 \cdot 10^8 \quad 5.77 \cdot 10^4 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + 0 \cdot u \quad (14)$$

A matriz de controlabilidade Ogata (2011), é dada pela Eq. (15):

$$CO = [A^0 \cdot B \quad A^1 \cdot B \quad A^2 \cdot B \quad A^3 \cdot B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 7.51 \cdot 10^3 \\ 0 & 1 & 7.51 \cdot 10^3 & 7.29 \cdot 10^7 \\ 1 & 7.51 \cdot 10^3 & 7.29 \cdot 10^7 & 6.80 \cdot 10^{11} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Como a matriz CO é não singular, o sistema de controle é completamente controlável. Portanto, pode-se utilizar o método da alocação de polos no sistema.

A fim de se implementar o controle do sistema, deve-se calcular a matriz de ganho K. Para tal, escolhem-se os polos a serem alocados no sistema por meio do lugar das raízes. O gráfico do lugar das raízes obtido por meio do Matlab da função Ester2(s) é mostrado na Fig12.

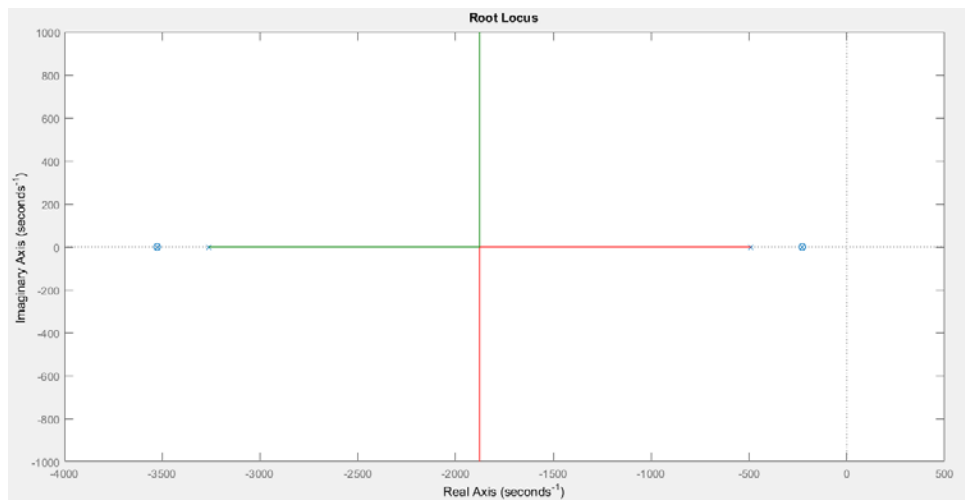


Figura 12. Gráfico do lugar das raízes da função Ester2(s)

Neste gráfico, observa-se que as raízes que estão sobre o eixo real encontram-se muito afastadas do eixo imaginário e, portanto, isso faz com que o sistema responda de uma forma demasiadamente rápida. Tal comportamento não é adequado para a Plataforma RAM, que utiliza velocidades de esterçamento baixas, com tempo de estabilização não

tão baixo. Os resultados serão analisados de acordo com dois fatores que são determinantes para o bom funcionamento em projeto do RAM: o sobressinal deve ser menor que 10% e o tempo de estabilização para o sistema deve ser menor que 0,3s. Então, simulou-se o sistema com alocação de diferentes polos e condição inicial de 1 para a variável x_4 e 0 para as demais, sendo o conjunto “J” possuindo 4 polos, sendo um par de complexos conjugados e dois reais. Selecionando-se o conjunto de polos $J = [-30 \text{ ; } -550 \text{ ; } -30+j\sqrt{200} \text{ ; } -30-j\sqrt{200}]$, obteve-se os seguintes parâmetros plotados na Fig. 13:

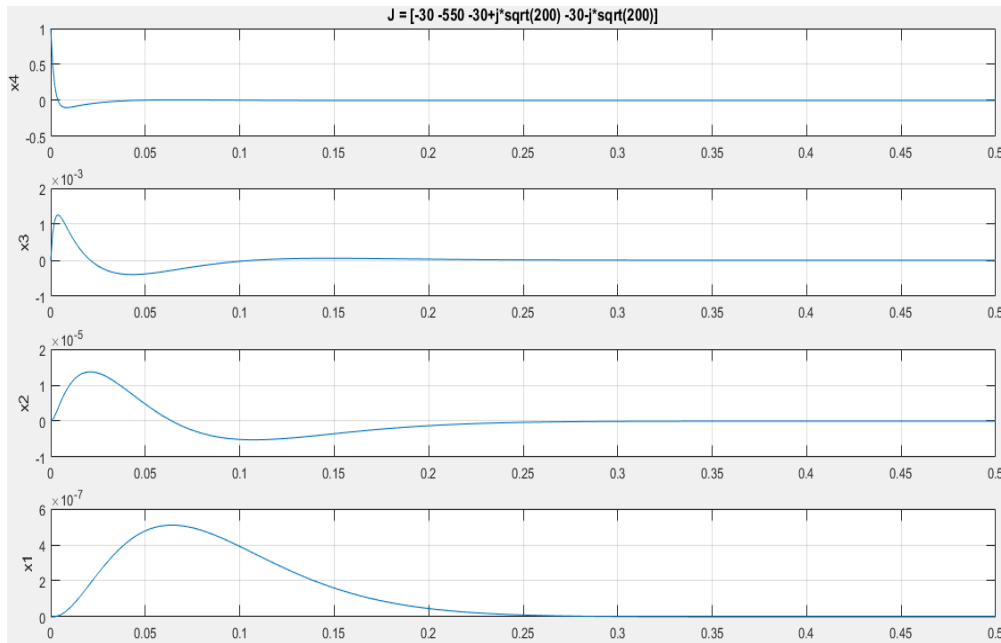


Figura 13. Alocação de polos J no sistema dado por Ester2(s)

Com a utilização dos polos localizados sobre o eixo real mais distantes, o sistema tenderá a ter um sobressinal menor em x_4 . Assim, o sistema responde com todas as suas variáveis de estado com tempos de estabilização menores que 0,3s, sobressinais menores que 10% e de forma estável. Portanto, utilizar-se-á este conjunto de polos J para a obtenção da matriz de ganho K.

Por meio da fórmula de Ackermann Ogata (2011), para obtenção da matriz de ganho “Kester”, tem-se na Eq. (16):

$$Kester = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \cdot [CO] \cdot \phi(A) = [-6,87 \cdot 10^3 - 1,65 \cdot 10^7 - 9,04 \cdot 10^9 - 1,29 \cdot 10^{12}] \quad (16)$$

Portanto, com a utilização desta matriz de ganho Kester, o sistema responderá de forma estável com sobressinal menor que 10% e tempo de estabilização menor que 0,3s, os quais atendem satisfatoriamente o bom funcionamento do esterçamento do RAM.

3.2. Controle de tração

O controlador a ser projetado deve controlar a velocidade de saída da tração, ou seja, deve-se utilizar da função Tracao2 que relaciona a tensão aplicada ao motor com a velocidade da roda no movimento de tração. Usando-se o método de alocação de polos para calcular a matriz de ganho de controlará o sistema, a função de transferência Tracao2(s) deve ser representada no espaço de estados, na forma canônica controlável, a qual a representa a etapa inicial do processo.

Então, calcula-se a forma canônica controlável:

$$[\dot{x}_1] = [-6,45 \cdot 10^2] \cdot [x_1] + [1] \cdot u \quad (17)$$

$$y = [1,56 \cdot 10^2] \cdot [x_1] + 0 \cdot u \quad (18)$$

A fim de que o sistema possa utilizar o método de alocação de polos, o sistema deve ser completamente controlável, ou seja, deve-se calcular a matriz de controlabilidade CO1 do sistema e verificar se esta é não singular.

$$CO1 = [A^0 \cdot B] = [1] \quad (19)$$

Como a matriz CO na Eq. (19) é não singular, o sistema de controle é completamente controlável e, por consequência, pode-se recorrer ao uso do método de alocação de polos para realizar seu controle.

Prosseguindo-se no método de controle escolhido, o objetivo é calcular a matriz de ganho K que regulará o funcionamento do sistema de acordo com especificações propostas no projeto do RAM. Com este intuito, deseja-se escolher os polos a para se alocar no sistema de controle e calcular a matriz K. Por meio do método do lugar das raízes, pode-se aferir a localização das atuais raízes do sistema para se escolher as demais alocadas. Com o uso do Matlab na função `Tracao2(s)`, tem-se o seguinte mapeamento do lugar das raízes plotado na Fig. 14:

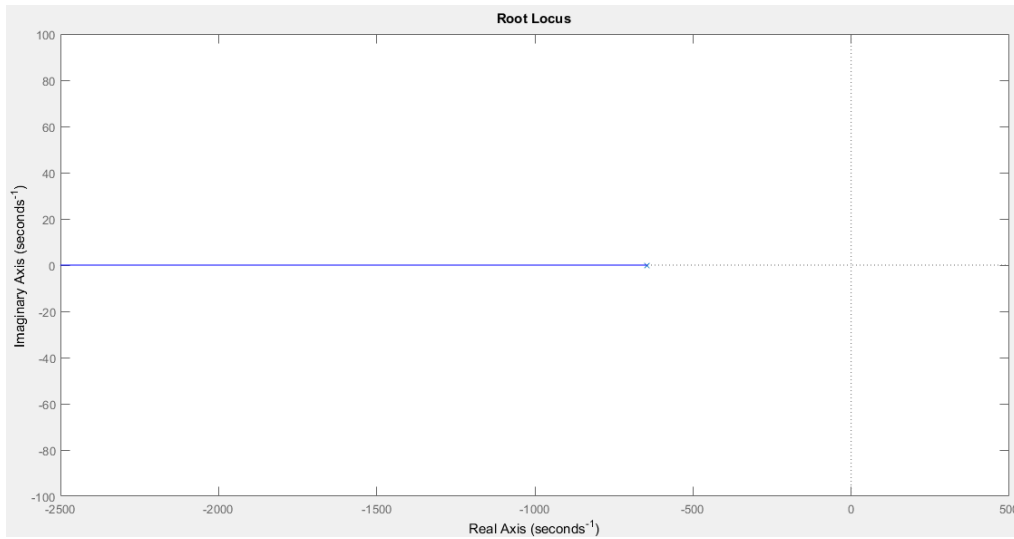


Figura 14. Gráfico do lugar das raízes de `Tracao2(s)` no Matlab

A partir da figura acima, pode-se perceber que a localização do único polo do sistema, que se encontra sobre o eixo real, é bem distante do eixo imaginário. Isso ocasiona uma resposta demasiadamente rápida do sistema, o qual é desnecessário pois o RAM atua com velocidades de tração relativamente baixas. Por projeto, tem-se duas especificações a serem seguidas na escolha dos polos: a estabilização da resposta do sistema deve ser menor que 0,3s e o sobressinal menor que 10%.

Então, testaram-se alguns polos por meio do Matlab, em que o a variável a ser controlada `x1` tem como condição inicial o valor 1 e os polos “J” a serem testados possuem valores apenas reais. O resultado final é apresentado na Fig. 15 a seguir pelo conjunto de polos $J2 = [-20]$:

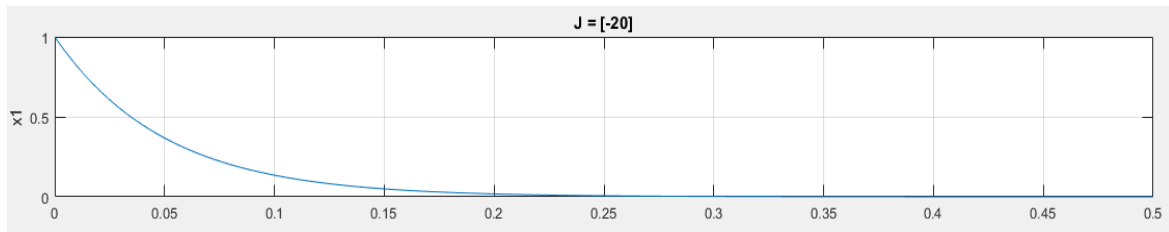


Figura 15. Alocação de polos J2 no sistema dado por `Ester2(s)`

Com um polo mais próximo do eixo imaginário, tem-se que o sistema respondeu com tempo de estabilização um ligeiramente menor que 0,3s, sobressinal nulo e de forma estável. Portanto, com a aferição das especificações concluídas, segue-se a para a obtenção da matriz de ganho K com a alocação do polo $J2 = [-20]$ no sistema.

Com o uso da fórmula de Ackermann para o cálculo da matriz de ganho K_{tracao} na Eq. (20):

$$K_{tracao} = [1] \cdot [CO] \cdot \phi(A) = [-6,25 \cdot 10^2] \quad (20)$$

A partir do processo concluído, ao se utilizar a matriz de ganho K_{tracao} para regular o sistema no espaço de estados, o sistema responderá satisfatoriamente de acordo com os quesitos especificados para o bom funcionamento da tração do RAM, ou seja, de forma estável com tempo de estabilização menor que 0,3s e sobressinal menor que 10%.

4. CONCLUSÕES

Inicialmente, realizou-se a modelagem dos sistemas mecânicos. No que se refere ao sistema de esterçamento, a modelagem teórica atendeu satisfatoriamente ao que se propõe, quando comparado ao experimento realizado, isto é, todos os valores referentes a sua simulação no ambiente *Simulink* estão dentro de uma margem de erro em relação ao experimento real, em decorrência da baixa velocidade angular em que o RAM é executado. De modo análogo, o modelo teórico proposto

para a tração do veículo autônomo foi validado realizando a comparação de sua simulação no *Simulink* com o experimento prático realizado, pois os valores no tempo também se encontraram dentro de uma margem de erro gerada pelas baixas velocidades operacionais do RAM. Em decorrência do estudo realizado, onde foram realizados experimentos utilizando modelos teóricos, desenvolveu-se o projeto do sistema de controle de condução do RAM. Ambos os modelos, apresentaram como requisitos de projeto uma velocidade de estabilização máxima de 0,3s em conjunto a um sobressinal máximo de 10%. Dentro destes padrões, projetou-se dois modelos de controle no espaço de estados pelo método de alocação de polos em que as matrizes calculadas Kester e Ktracao, as quais otimizam os sistemas de forma estável e responderam de acordo com as especificações de projeto, sendo usada como base na implementação do controle de baixo nível do RAM.

5. REFERÊNCIAS

- TABILE, R. A.; GODOY, E. P.; PEREIRA, R. R. D.; TANGERINO, G. T.; PORTO, A. J. V.; INAMASU, R. Y., 2011. Design and development of the architecture of an agricultural mobile robot. Engenharia Agrícola, Jaboticabal. Vol.31, N.1, p.130-142.
- TORRES, C. J.; ARCHILA, J. F.; BECKER, M.; TRONCO, M. L.; TIBERTI, A. J.; PORTO, A. J. V., 2012. Cinemática directa de una plataforma robótica para agricultura. In: Anais do XI Congreso Internacional de electrónica y tecnologías de avanzada, Pamplona.
- VU, H.V.; ESFANDIARI, R.S., 2003. Dynamic systems: modeling and analysis. 1ª Edition. USA: McGraw-Hill, p.640.
- FELÍCIO, L. C., 2010. Modelagem da dinâmica de sistemas e estudo da resposta. São Carlos: RiMa. p. 551.
- OGATA, K., 2011. Engenharia de Controle Moderno. 5ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall. p.788.

6. Agradecimentos

Processo nº 2015/26353-2, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores Victor Sammarco Dias, Clayton José Torres, Mário Luiz Tronco, Emerson Carlos Pedrino, Alexandre José Tiberti, Carlos Roberto Valêncio e John Faber Archila-Diaz são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MODELING AND DESIGN OF THE TRACTION AND STEERING CONTROL SYSTEM OF THE MOBILE AGRICULTURAL ROBOTIC PLATFORM RAM

Victor Sammarco Dias, victor.sammarco.dias@usp.br ¹

Clayton José Torres, clayton@ifsp.edu.br ^{1,4}

Mário Luiz Tronco, mltronco@sc.usp.br ¹

Emerson Carlos Pedrino, emerson@dc.ufscar.br ²

Alexandre José Tiberti, atiberti@sc.usp.br ¹

Carlos Roberto Valêncio, valencio@ibilce.unesp.br ³

John Faber Archila-Diaz, john.faber@ifsp.edu.br ⁴

¹São Carlos School of Engineering – USP, Avenida Trabalhador são-carlense, 400 - Parque Arnold Schmidt, CEP 13566-590 - São Carlos – SP - Brazil

²Federal University of São Carlos – Rod. Washington Luís km 235 - SP-310 - CEP 13565-905, São Carlos – SP - Brazil

³São Paulo State University – Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, 14884-900 – Jaboticabal - SP - Brazil

⁴Federal Institute of Education, Science and Technology in Brazil – Rodovia Washington Luís, km 235, S/N - Monjolinho, São Carlos – SP - Brazil

Abstract: This article approaches the modeling of the electromechanical system of traction and steering of a mobile robotic platform for agricultural purpose - RAM. Based on the system modeling equations, the transfer functions of each system were generated and analyzed experimentally, considering the Ackermann geometry for controlled steering. The stability analysis of the complete system was performed, based on two control models in the state-space and the results obtained leads to optimization and stabilization of the systems, making them compatible with the design specifications.

Keywords: Mobile agricultural robot, Traction and steering systems, Ackermann, State-space control