

CONTROLADOR FUZZY ÓTIMO APLICADO A UMA PONTE ROLANTE

WENLLSON CARLOS FERREIRA LEITE*, JOÃO VIANA DA FONSECA NETO†, GEILSON ABREU COSTA‡

**Avenida do Portugueses, 1966
Universidade Federal do Maranhão
São Luis, Maranhão, Brasil*

Emails: `welsoncarlos@hotmail.com`, `vianafonseca@gmail.com`, `geilson_abreu@hotmail.com`

Abstract— Involving optimal fuzzy modeling applied to an overhead crane, control system design to improve its performance, related with the load displacement variations and angular swing, is presented in this article. The main focus is to improve the performance of the controller that leads with displacement of the load and angular movement, that is caused by the pendulum effect. After the optimal fuzzy design, the system becomes more stable to perturbations caused by non-linearity of the multivariate crane system. The method employed has shown to promote an effective control design to crane system.

Keywords— Fuzzy controller Optimal, overhead crane, stable system

Resumo— Envolvendo a modelagem fuzzy ótimo aplicada a uma ponte rolante, o projeto de um sistema de controle para melhorar o desempenho da ponte em relação as variações no deslocamento da carga e do movimento angular é apresentada neste artigo. Desta maneira, o sistema torna-se mais estável para comportamentos provocados pelas não-linearidades da ponte rolante que é um sistema multivariável. O método proposto mostra-se uma alternativa eficiente de controle para Pontes Rolantes.

Palavras-chave— Controlador fuzzy ótimo, ponte rolante, sistema multivariável

1 Introdução

As pontes rolantes são caracterizadas pela sua importância no deslocamento de cargas pesadas, economizando no tempo e mão de obra, tanto na indústria como em oficinas e armazéns. É largamente utilizada, tornando-se uma máquina de manuseio moderna, indispensável nos trabalhos. Por causa dos balanços provocados pelo deslocamento, o posicionamento se torna impreciso e as operações repetitivas, afetando a eficiência e provocando um grande risco a segurança. O posicionamento impreciso e as oscilações da carga podem provocar danos aos equipamentos e colisões de peças, assim provocando prejuízos. O objetivo do sistema de controle de pontes rolantes é o carregamento e descarregamento de mercadorias com precisão e eficiência, portanto o foco da pesquisa é o controle de posicionamento do carro e controle de oscilação da carga.

Existem técnicas de controle bastante empregados ao sistema de ponte rolante nos últimos anos, entre os quais, podemos citar um controlador fuzzy de precisão em Rahmani et al. (2015), controle anti-oscilação de cargas em Wang et al. (2006) e controle anti-deslizante adaptativo de posição Chang et al. (2006) e Aksjonov et al. (2015). Entre os mais utilizados são controle fuzzy, adaptativo, PID, preditivo, robusto, entre outros. Uma técnica não muito conhecida porém já utilizada em Al-Hadithi et al. (2012) envolve o controle Fuzzy ótimo que pode ser encontrado com mais detalhes em Wang (1997) e Al-Hadithi et al. (2012). A escolha da lógica fuzzy, assim como o princípio ótimo como formas de melhorar o desempenho do sistema, ainda está em estudo Wang (1997), pois

o mesmo apresenta estudos preliminares sobre o tema. Portanto o presente trabalho propõe apresentar o desenvolvimento alternativo de controle via espaço de estados usando Fuzzy Ótimo, considerando certas condições iniciais como o desacoplamento de estados.

A seguir descreve-se o conteúdo das Seções do artigo. Portanto, na Seção 2 apresenta-se um protótipo de uma ponte rolante em escala reduzida desenvolvido em laboratório, o modelo matemático adotado, a linearização do sistema envolvendo os ângulos de carga e análise do comportamento dinâmico sem controle. Na Seção 3 são abordadas as funções para o controlador fuzzy, o desempenho ótimo e o algoritmo desenvolvido com os resultados gráficos. Já na Seção 4 apresentam-se os resultados envolvendo o comportamento dos estados após o controle. A Seção 5 apresenta-se a conclusão e comentários sobre o desempenho do sistema após o controlador fuzzy ótimo.

2 Projeto de uma Ponte Rolante

Inspirado, tendo por base o artigo Leite (2018) e a monografia Castro (2017), desenvolveu-se um protótipo de uma ponte rolante de duas vigas apoiadas, tal qual ilustrada na Figura 1, com o objetivo de estudar e pesquisar soluções de controle no balanço do transporte de cargas, na qual objetiva reduzir os efeitos causados pela amplitude e duração destas oscilações, dificultando o uso na indústria.

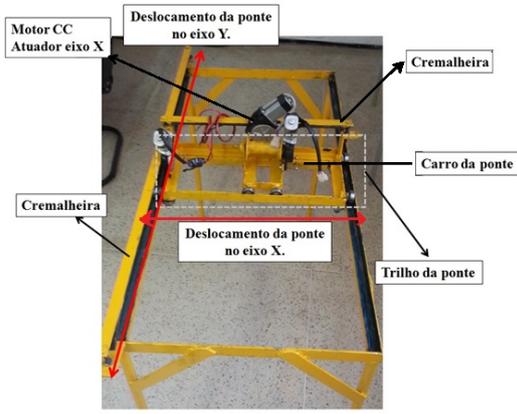


Figura 1: Detalhe do trilho e movimento da ponte no eixo X e Y

2.1 Modelo Matemático do Sistema

As regras e a metodologia aqui empregadas para obter estas equações, foram retiradas de Castro (2017) e Lima (2011). Desta maneira o modelo por eles obtido através da formulação de Lagrange - Euler, onde as energias cinética e potencial do sistema são expressas por derivadas parciais em relação ao tempo.

Para facilitar os cálculos e o entendimento do modelo matemático para análise do sistema ilustrado na Figura 2, decompõe-se o sistema principal em dois subsistemas desacoplados, o que significa que um age independente do outro, estes subsistemas descrevem os movimentos nos eixos X , Y e Z e a relação dos ângulos α , β e γ .

Os dois primeiros subsistemas descrevem matematicamente o movimento nos eixos X e Y e o terceiro modela o movimento vertical da carga no eixo Z através da modelagem chamado de Sistema Servo de Posição Vertical da Carga, Wang et al. (2006) e Rahmani et al. (2015), onde a formulação de Euler-Lagrange é dada por

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q_k} \right) + \left(\frac{\partial V}{\partial \dot{q}_k} \right) = Q_k \quad (1)$$

A expressão do Lagrangeano é dada por

$$L = T - V, \quad (2)$$

sendo L a função lagrangeana do sistema mecânico em estudo, T é a expressão que define a energia cinética do sistema mecânico em estudo; V é a expressão que define a energia potencial do sistema mecânico em estudo e Q_k é a função força generalizada associada a \dot{q}_k .

O diagrama de corpo Livre do sistema de forças da ponte rolante com três graus de liberdade é apresentado na Figura 2, observa-se que os parâmetros e ângulos do estudo: m_1, m_2 e m_3 são as massas do trilho, carro e da carga, respectivamente; α é o ângulo entre o eixo Z e a projeção

ortogonal do cabo no plano XZ ; β é o ângulo entre o eixo Z e a projeção ortogonal do cabo no plano YZ e γ é o ângulo entre o cabo e a sua projeção angular em relação a XZ e YZ .

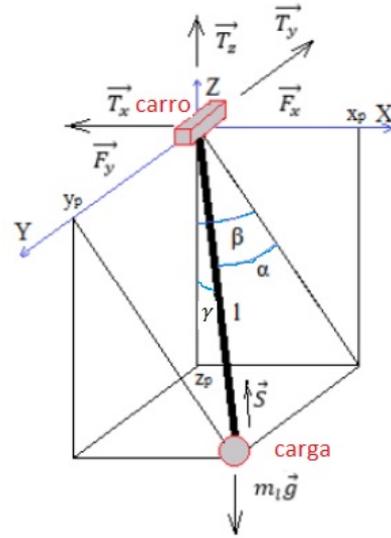


Figura 2: Diagrama de corpo livre de uma ponte rolante.

Os ângulos α e β são rastreados em tempo real. Com eles é possível calcular o ângulo γ através da expressão dada por

$$\gamma = \arcsen \left(\frac{\cos(\beta) \sen(\alpha)}{\sqrt{1 - \sen^2(\alpha) \sen^2(\beta)}} \right) \quad (3)$$

Para a obtenção do modelo do sistema são utilizadas como coordenadas generalizadas: x , y e os ângulos α e β . Analisando o diagrama de forças da Figura 2, pode-se concluir que a energia cinética do sistema é dada por

$$\begin{aligned} T = & \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_3 \dot{x}^2 + \\ & + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}^2 - m_3 l \dot{x} \dot{y} \cos(\gamma) + \frac{1}{2} m_3 l^2 \dot{\gamma}^2 \\ & + \frac{1}{2} m_3 l^2 \dot{\beta}^2 \cos(\gamma) + m_3 l \dot{y} \dot{\gamma} \sen(\gamma) \sen(\beta) \\ & - m_3 l \dot{y} \dot{\beta} \cos(\gamma) \cos(\beta) + \frac{1}{2} m_3 \dot{\gamma}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

A energia potencial do sistema é dada por

$$V = -m_3 g \cos(\beta) \cos(\gamma) \quad (5)$$

A partir destas expressões podemos determinar as forças generalizadas do sistema que movem o carro no plano XY . Estas forças são produzidas pelo conjugado de motores CC que atuam em cada um dos eixos. Sabemos que o conjugado aplicado por um motor CC é dado pela expressão:

$$e_p = \frac{JRN}{AKr} \ddot{z} + \frac{KN}{Ar} \dot{z} - \frac{R}{AKN} T_c \quad (6)$$

$$f_x = \frac{AN_x K}{rR} e_x - \frac{K^2 N_x^2}{r^2 R} \dot{x} - \frac{JN_x^2}{r^2} \ddot{x} \quad (7)$$

$$f_y = \frac{AN_y K}{rR} e_y - \frac{K^2 N_y^2}{r^2 R} \dot{y} - \frac{JN_y^2}{r^2} \ddot{y} \quad (8)$$

Podemos agora fazer a linearização do sistema em torno de um ponto de operação fixo a fim de obter uma representação matemática mais simples para a aplicação das técnicas de controle linear disponíveis na literatura, uma vez que estas teorias se aplicam basicamente a Sistemas Invariantes no Tempo (SIT). Segundo o teorema de Lyapunov, existe uma pequena região de operação em um sistema não linear em torno de um ponto de equilíbrio em que este é estável, logo é possível projetar um controle linear de tal forma que se garante a estabilidade do modelo, pelo menos nas vizinhanças do ponto de equilíbrio da operação, segundo Nguyen and Nguyen (2017).

2.1.1 Modelos ($x - \gamma$) e ($y - \beta$)

Para fins de projeto os estados são: $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, $x_3 = \gamma$, $x_4 = \dot{\gamma}$, $x_5 = y$, $x_6 = \dot{y}$, $x_7 = \beta$ e $x_8 = \dot{\beta}$. O sistema pode ser dividido em dois sistemas desacoplados que representam a dinâmica completa da planta mostrando o movimento no eixo X e a relação com o ângulo γ no modelo ($x - \gamma$), o movimento no eixo Y e a relação com o ângulo β no modelo ($y - \beta$). Esses sistemas são representados por meio das matrizes do modelo em espaço de estados que são dados por

$$A_{(x-\gamma)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.4036 & -8.2210 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.8072 & -36.0619 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$B_{(x-\gamma)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1.6182 \\ 0 \\ 3.2364 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$A_{(y-\beta)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1.3632 & -27.7676 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2.7265 & -75.1551 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B_{(y-\beta)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 5.4657 \\ 0 \\ 10.9313 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Os parâmetros envolvidos na Tabela 1 foram utilizados no sistema real da ponte rolante aplicados no CLP (Controlador Lógico Programável)

para a movimentação do carro ao longo dos eixos X e Y .

Tabela 1: Valores das constantes do sistema

Var	Definição	Valor	Uní
m1	Massa do trilho	4,2	kg
m2	Massa do carro	1,5	kg
m3	Massa da carga	5	kg
R	Resistência da armadura do motor	0,93	Ω
r	Raio da roda do carro e trilho	2	cm
Nx	Relação de acoplamento das engrenagens do motor ao eixo X	73:1	-
Ny	Relação de acoplamento das engrenagens do motor ao eixo Y	73:1	-
K	Constante de torque do motor	41.10^{-3}	kg.m ²
J	Momento de inércia do eixo do motor	20.10^{-5}	kg.m ²
L	Comprimento do fio	0,5	m
A	Ganho de tensão do Amplificador de Potência	6	V/V
G	Aceleração da gravidade	9,81	m/s ²

2.1.2 Análise do Comportamento Dinâmico do Sistema em Malha Aberta

Os sinais de saída da Figura 3 e Figura 4 foram obtidas por medição dos sensores *Encodes*, acoplados aos eixos dos motores. Sendo assim, a Figura 3 apresenta o comportamento para uma resposta ao degrau em relação ao movimento X e o ângulo γ após a aplicação da entrada ao degrau unitário, já na Figura 4 mostra-se a resposta ao degrau unitário em relação ao movimento Y e o comportamento do ângulo β ao degrau.

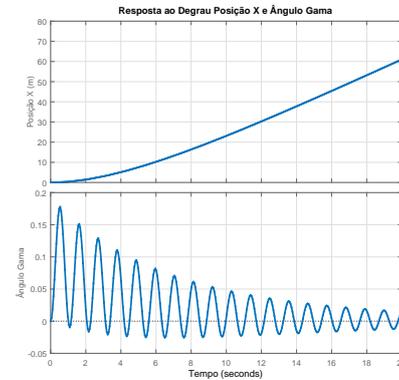


Figura 3: Resposta ao degrau da posição X e ângulo γ .

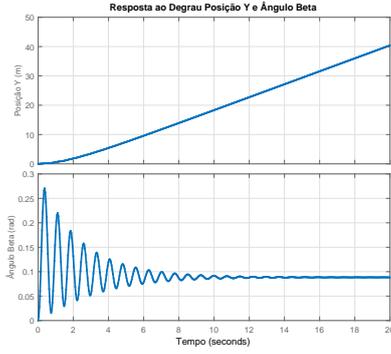


Figura 4: Resposta ao degrau da posição Y e ângulo β .

Analisando as saídas da planta para entradas do tipo degrau unitário das Figuras 3 e da Figura 4, observa-se que a mesma apresenta um comportamento operacional que não atende as especificações, necessitando de implementações de controladores.

3 Projeto de um controlador Fuzzy ótimo

Os principais elementos para o projeto do controlador Fuzzy Ótimo são apresentados nessa seção. Destacando-se os conceitos de estabilidade Fuzzy, a lei de controle Fuzzy ótimo e o algoritmo de controle.

3.1 Estabilidade Fuzzy

De acordo com Wang (1997) para o sistema ser exponencialmente estável as funções de pertinência devem apresentar características como

- Considere as seguintes regras fuzzy $2N + 1$ SE-ENTÃO:
- SE y é A^l , ENTÃO u é B^l
- Usando motor de inferência, fuzzificador singleton e defuzzificador de centro médio, o controlador fuzzy é definido como

$$u = -f(y) = -\frac{\sum_{l=1}^{2N_1+1} y_j^{-l} \mu_{A^l}(y)}{\sum_{l=1}^{2N_1+1} \mu_{A^l}(y)} \quad (13)$$

3.2 Controle Fuzzy Ótimo

Suponha que o sistema sob controle seja um sistema linear invariante no tempo

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), x(0) = x_0 \quad (14)$$

$x \in R^n$ e $u \in R^m$ e que o critério de desempenho é a função quadrática dada por

$$J = \int_0^T [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (15)$$

a lei de controle de realimentação que minimiza o valor do custo é

$$u = -R^{-1}B^T Px \quad (16)$$

Sendo P a equação de Riccati que é dado por

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (17)$$

Sendo as matrizes $Q \in R^{n \times n}$ e $R \in R^{m \times m}$ simétricas e definida positiva. Agora, supondo-se que o controlador $u(t)$ é um sistema fuzzy na forma da Função 13, exceto se mudarmos a saída do sistema y da Função 13 para o estado x ; isto é, $u(t) = (u_1, \dots, u_m)^T$ com

$$u_j = -f_j(x) = -$$

$$\frac{\sum_{l_1=1}^{2N_1+1} \dots \sum_{l_n=1}^{2N_n+1} y_j^{-l_1 \dots l_n} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)}{\sum_{l_1=1}^{2N_1+1} \dots \sum_{l_n=1}^{2N_n+1} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)} \quad (18)$$

Assumimos que as funções de pertinência são fixas. Nossa tarefa é determinar os parâmetros $y_j^{-l_1 \dots l_n}$ de modo que J da Função 15 seja minimizado.

Definindo as funções de base fuzzy $b(x) = (b_1(x), \dots, b_N(x))^T$ como

$$b_l = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i)}{\sum_{l_1=1}^{2N_1+1} \dots \sum_{l_n=1}^{2N_n+1} \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^{l_i}}(x_i) \right)} \quad (19)$$

onde $l_i = 1, 2, \dots, 2N_i + 1, l = 1, 2, \dots, N$ e $N = \prod_{i=1}^n (2N_i + 1)$. Defina a matriz de parâmetros $\Theta \in R^{m \times N}$ como

$$\Theta = \begin{bmatrix} -\Theta_1^T \\ \dots \\ -\Theta_m^T \end{bmatrix} \quad (20)$$

onde $\Theta_j^T \in R^{1 \times N}$ consiste de N parâmetros $y_j^{-l_1 \dots l_n}$ para $l_i = 1, 2, \dots, 2N_i + 1$ na mesma ordem como $b_l(x)$ para $l = 1, 2, \dots, N$. Por meio dos parâmetros 20, pode-se reescrever o controlador fuzzy $u(t) = (u_1, \dots, u_m)^T = (-f_1(x), \dots, -f_n(x))^T$ como

$$u = \Theta b(x) \quad (21)$$

Para alcançar a otimização, assume-se que a matriz de parâmetros Θ é variante no tempo, ou seja, $\Theta = \Theta(t)$. Substituindo a Função 21 na Função 14 e na Função 15, obtemos o sistema de malha fechada

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B\Theta(t)b[x(t)] \quad (22)$$

e o critério de desempenho é dado por

$$J = \int_0^T [x^T Q x + b^T (\Theta^T R \Theta) b] dt \quad (23)$$

Assim, o problema de projetar o melhor controlador fuzzy consiste em determinar o $\Theta(t)$, de modo

que J da Função 23 seja minimizado. $\Theta(t)$ como controle $u(t)$ no Princípio Mínimo de Pontryagin, podemos determinar o ótimo $\Theta(t)$. Especificamente, definindo a função de Hamilton a partir de $\frac{\partial H}{\partial \Theta} = 0$, que é

$$\frac{\partial H}{\partial \Theta} = 2R\Theta b(x) b^T(x) + B^T p b^T(x) \quad (24)$$

Obtenção para os parâmetros é

$$\Theta = \frac{1}{2} R^{-1} B^T p b^T(x) [b(x) b^T(x)]^{-1} \quad (25)$$

Portanto o controlador fuzzy ótimo é dado por

$$u^* = \Theta^*(t) b(x) \quad (26)$$

3.3 Função Gaussiana

Considerando $Q = I$, $R = I$, $T = 10s$ a função de pertinência é escolhida como uma função Gaussiana, sendo

$$\mu_{A_i^{l_i}}(x_i) = \exp\left[-2(x_i - \bar{x}_i^{l_i})^2\right] \quad (27)$$

Onde $i = 1, 2, 3, 4$, $l_i = 1, 2, \dots, 5$ e $\bar{x}_i^{l_i} = a_i + b_i(l_i - 1)$ com $a_1 = a_2 = -2$, $a_3 = a_4 = -1$, $b_1 = b_2 = 1$ e $b_3 = b_4 = 0, 5$

Nota-se que o controlador fuzzy ótimo da Equação 26 é um controlador de realimentação de estado com coeficientes variando no tempo. O procedimento de projeto deste controlador fuzzy ótimo agora é implementado via script no software MATLAB[®].

3.4 Algoritmo Fuzzy Ótimo

A modelagem da ponte rolante e do controlador fuzzy ótimo, apresentada nas seções anteriores, é convertida em um algoritmo de controle. O algoritmo proposto é formado de quatro funções que são os módulos: 1) Condições iniciais, 2) Lógica Fuzzy, 3) Solução da Equação Algébrica de Riccati, 4) Cálculo da lei de controle fuzzy-ótimo.

```

1 ▷ - Algoritmo Fuzzy-Ótimo
2 ▷ - Condições Iniciais
3 [A, B, C, D]
4  $X_i \leftarrow [-N : 0.01 : N]$ 
5 [a, b]  $\leftarrow [a_1, \dots, a_n; b_1, \dots, b_n]$ 
6 ▷ - Lógica Fuzzy
7 início
8   for  $i \leftarrow 1:N$  do
9     |  $l(i) = i$ 
10  end
11   $z = 0$ 
12   $W = 1$ 
13  for  $i \leftarrow 1:N-1$  do
14    |  $c(i) \leftarrow a(i) + [b(i) * (l(i)-1)]$ 
15    |  $\mu_{X_x} i = \exp(-2 * (x_i - c(i))^2)$ 
16    |  $M \leftarrow \mu_{X_x}(i) * W$ 
17    |  $W \leftarrow \mu_{X_x} i(i)$ 
18    | for  $i \leftarrow 1:N-1$  do
19      | |  $D(i) \leftarrow M^i + z$ 
20      | |  $z \leftarrow M^i$ 
21    | end
22  end
23 fim
24 ▷ - Vetor fuzzy base
25  $b_l \leftarrow M/D$ 
26 ▷ - Matrizes identidade e unitária
27  $Q \leftarrow I$  e  $R \leftarrow 1$ 
28 ▷ - Solução Equação Algébrica de Riccati
29  $P \leftarrow care(A, B, Q, R)$ 
30 ▷ - Cálculo dos Parâmetros
31  $\theta = -(1/2)inv(R) * B' * P * (b'_i inv(b_l, b'_i))$ 
32 ▷ - Lei de Controle Fuzzy Ótimo
33  $u \leftarrow \theta * b_l$ 
34 ▷ - Cálculo da Lei de Controle
35  $K \leftarrow inv(R) * B' * P$ 
36  $A_a \leftarrow A - B * K$ 
37  $B_a \leftarrow B * u$ 
38  $C_a \leftarrow C$ 
39  $D_a \leftarrow null$ 
40 ▷ - Espaço de estados otimizado
41  $Sys \leftarrow ss(A_a, B_a, C_a, D_a)$ 

```

4 Resultados

Os resultados apresentados nesta seção são provenientes dos modelos matemáticos da ponte rolante da Seção 2 associados com o projeto do controlador fuzzy ótimo da Seção 3 na malha fechada. A simulações foram realizadas na plataforma MATLAB[®].

4.1 Procedimentos da simulação

Considera-se apenas uma variável iniciando com valor 1 e as demais iniciando com valor 0 em cada figura, assim observa-se o comportamento dos quatro estados em relação ao tempo. Fez se necessário uma comparação entre a entrada ao degrau unitário para um controlador PID clássico e

o algoritmo Fuzzy ótimo, mostrando assim, as características de aplicação para cada controlador como mostra a Figura 15.

4.2 Simulações e Análises no eixo X

Os resultados representam o deslocamento linear, posição angular e suas respectivas velocidades que são provenientes de simulações do controlador desenvolvido e sua implementação no modelo para o eixo x da ponte rolante. Os resultados apresentados levam em consideração quatro situações, cada situação tem inicialmente uma condição diferente de zero e demais são nulas.

Inicialmente, de acordo com algoritmo da Subseção 3.4, computa-se as funções de pertinência Gaussianas que são apresentadas na Figura 5. Estas são referentes aos números de estados do sistema desacoplado, onde cada função de pertinência formará uma base vetorial b_l com defuzzificação média dos centros.

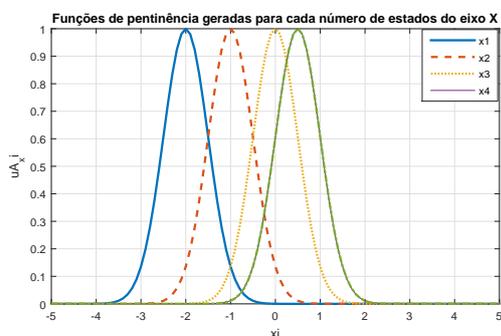


Figura 5: Funções de Pertinência para o eixo X

Apresenta-se na Figura 6 o estado inicial x em relação ao eixo X, o tempo de deslocamento do carro em relação ao eixo X em 5 segundos aproximadamente, onde denota que existe uma suavização da curva e melhora do tempo de resposta.

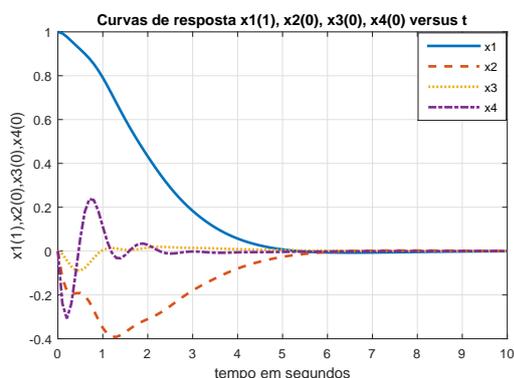


Figura 6: Deslocamento x , com condição inicial de 1 m e demais estados nulos.

Observa-se na Figura 7 que a velocidade \dot{x} em que o carro se desloca no eixo X para um determinado ponto, considerando como condições iniciais

em 1 m/s e o tempo de resposta semelhante ao da primeira Figura 6.

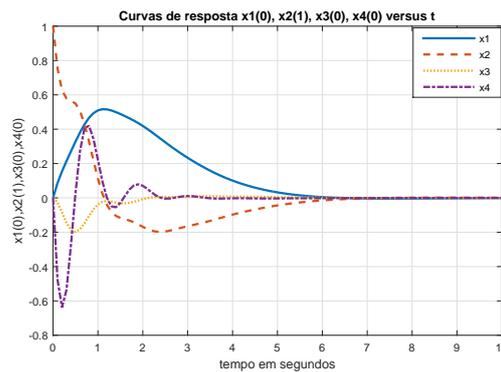


Figura 7: Velocidade \dot{x} , com condição inicial em \dot{x} 1 m/s e demais estados nulos.

Verifica-se na Figura 8 que as variações do ângulo γ em 1 rad apresenta um amortecimento considerável das oscilações e termina aproximadamente em 5 segundos.

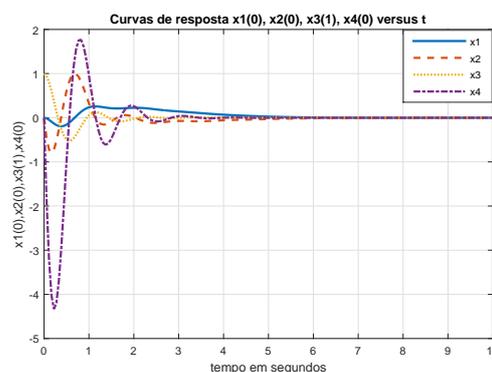


Figura 8: Deslocamento angular γ , com condição inicial de 1 rad e demais estados inicialmente nulos.

Verifica-se na Figura 9 que a velocidade angular $\dot{\gamma}$ inicia em 1 rad/s e termina em 3 segundos aproximadamente, considerando demais estados iniciando em 0.

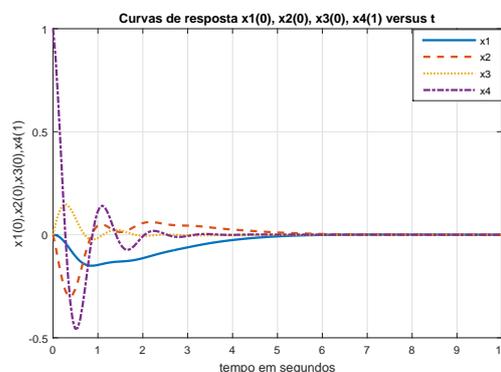


Figura 9: Velocidade angular $\dot{\gamma}$ e os demais estados inicialmente nulos.

4.3 Simulações e Análises no eixo Y

Os resultados representam o deslocamento linear y , o deslocamento angular β e suas respectivas velocidades \dot{y} e $\dot{\beta}$ que são provenientes de simulações do projeto desenvolvido e sua implementação no modelo do eixo Y. Os resultados levam em consideração quatro condições, cada situação tem inicialmente uma condição inicial para um estado diferente de zero e as demais variáveis de estado são nulas.

Inicialmente, de acordo com algoritmo da Subseção 3, computa-se as funções de pertinência Gaussianas que são apresentadas na Figura 10. Estas são referentes aos números de estados, onde cada função de pertinência formará uma base vetorial b_i com defuzzificação média dos centros. Observa-se que na Figura 10 as funções de pertinência para o eixo Y e o ângulo β , utilizando as mesmas características para o eixo X.

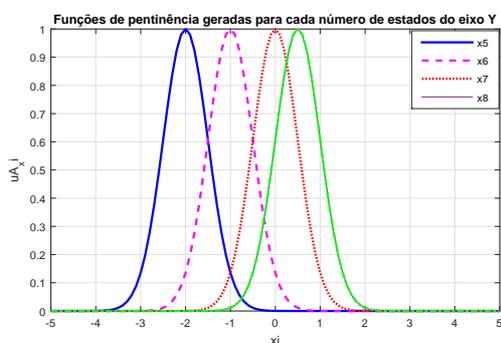


Figura 10: Funções de Pertinência para o eixo Y.

Verifica-se na Figura 11 o deslocamento y tem as mesmas características para a resposta ao tempo, próximo de 5 segundos.

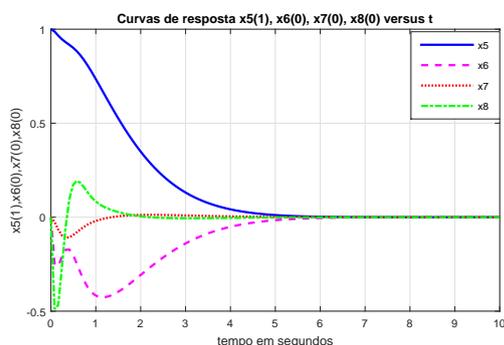


Figura 11: Deslocamento y em 1 m e demais estados inicialmente nulos.

Observa-se na Figura 12 a velocidade \dot{y} para uma condição inicial em 1 m/s e os demais estados em 0.

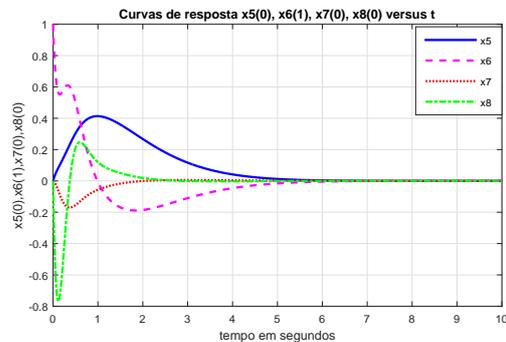


Figura 12: Velocidade \dot{y} em 1 m/s e demais estados inicialmente nulos.

Observa-se na Figura 13 a condição inicial em 1 rad para o ângulo β que estabiliza-se em 2,5 segundos aproximadamente.

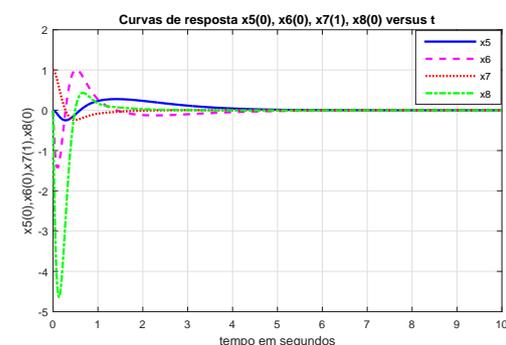


Figura 13: Deslocamento angular β , com condição inicial β em 1 rad e demais estados inicialmente nulos.

Observa-se na Figura 14 a condição inicial em 1 rad/s para a velocidade angular $\dot{\beta}$ que estabiliza-se em 2,5 segundos aproximadamente.

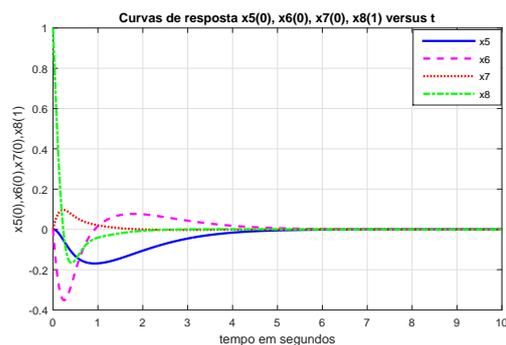


Figura 14: Velocidade angular $\dot{\beta}$ iniciando em 1 rad/s e demais estados inicialmente nulos.

4.4 Comparação PID x Fuzzy Ótimo

Na Figura 15 é apresentada a comparação entre o controle PID e o controle fuzzy ótimo, no qual se inicia o degrau unitário de deslocamento em 4 segundos.

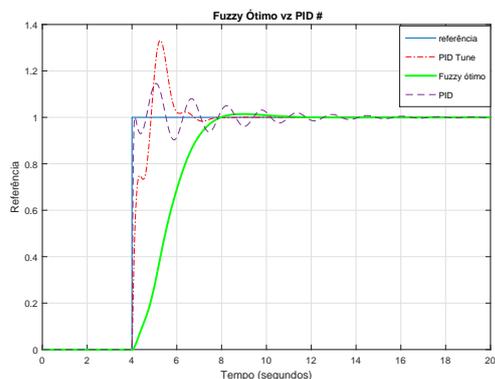


Figura 15: Comparação entre as curvas dos controles PID e Fuzzy Ótimo.

Os ganhos dos controladores são:

Tabela 2: Ganhos de controle

Fuzzy ótimo		PID	PID tune
Eixo X e Eixo Y			
$K_1 = 1.4142$	$K_5 = 1.4142$	$K_p = 30$	$K_p = 5.0$
$K_2 = 1.9648$	$K_6 = 1.4650$	$K_i = 3.0$	$K_i = 0.4$
$K_3 = 1.2596$	$K_7 = 1.3040$	$K_d = 15$	$K_d = 3.4$
$K_4 = 0.4680$	$K_8 = 0.4314$		

4.5 Observações

O controle fuzzy ótimo aloca novos autovalores e novos ganhos são computados utilizando o sistema da base fuzzy $b_l(x)$ para gerar novos parâmetros dentro da equação algébrica de *Riccati*, conforme pode ser observado no algoritmo proposto na Subseção 3.2. As matrizes Q e R são ajustadas para sintonizar e minimizar o custo da energia do sistema. Por meio da lógica fuzzy é montado um vetor referência para os novos autovalores e ganhos, ou seja impõem-se uma nova dinâmica.

5 Conclusão

No sentido de reduzir as oscilações pendulares e minimizar o custo com esforço de controle, neste artigo foi apresentado o projeto de um controlador fuzzy ótimo para melhorar o desempenho operacional da ponte rolante. Observando-se o comportamento das variáveis de estado controladas, conclui-se que o algoritmo desenvolvido promoveu uma resposta eficaz para uma dada posição de deslocamento, através de um controlador proposto que impôs um tempo de acomodação e *overshoot* satisfatórios, promovendo respostas rápidas e estáveis em torno do ponto de operação. Além do mais, as ações do controlador fuzzy ótimo suavizaram a curva de resposta do deslocamento e a variação angular do pêndulo. Os resultados do método propostos foram comparados com o controlador PID clássico.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal do Maranhão (UFMA), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Eletricidade (PP-GEE) e ao Laboratório de Sistemas Integrados e Controle Inteligente (LABSECI), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

Referências

- Aksjonov, A., Vodovozov, V. and Petlenkov, E. (2015). Sensorless control of the three-dimensional crane using the euler-lagrange approach with a built-in state-space model, *2015 56th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, pp. 1–4.
- Al-Hadithi, B. M., Barragán, A. J., Andújar, J. M. and Jiménez, A. (2012). Fuzzy optimal control for double inverted pendulum, *2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 1–5.
- Castro, I. L. (2017). Controle de Sistema a Eventos Discretos e contínuos embarcados em CLP para Acionamentos de Pontes Rolantes. Monografia (Bacharel em Engenharia Elétrica), UFMA (Universidade Federal do Maranhão), São Luis, BraSil.
- Chang, C. Y., Hsu, K. C., Chiang, K. H. and Huang, G. E. (2006). An enhanced adaptive sliding mode fuzzy control for positioning and anti-swing control of the overhead crane system, *2006 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 2, pp. 992–997.
- Leite, W. C. F. (2018). Event discrete control strategy design of overhead crane embedded in programmable logic controller, *American Journal of Engineering Research (AJER)*.
- Lima, A. J. D. (2011). *Controle proporcional integral derivativo para transporte de carga sem ponte rolante.*, Master’s thesis, Instituto Militar de Engenharia (IME).
- Nguyen, H. P. L. and Nguyen, Q. C. (2017). Nonlinear optimal control of a 3-d overhead crane with varying rope length, *2017 17th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, pp. 760–765.
- Rahmani, R., Karimi, H., Yusof, R. and Othman, M. F. (2015). A precise fuzzy controller developed for overhead crane, *2015 10th Asian Control Conference (ASCC)*, pp. 1–5.
- Wang, L., Wang, X. and Kong, Z. (2006). Anti-swing control of overhead cranes, *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Vol. 2, pp. 8024–8028.
- Wang, L. X. (1997). *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Prentice-Hall, Saddle River, NJ, USA.