

Trabalho Controle de Robôs

Kevin Braathen, Alexandre Caldeira, João Vítor

I. CONTROLE DE TRAJETÓRIA

Esse trabalho consiste em alinhar índices de controle de controladores diferentes através de simulações para poder comparar o seu desempenho em experimento. Para atingir isso, utilizou-se o IAE permanente, isto é, avaliado após 15 segundos de simulação, de referência para analisar os controladores.

Com o intuito de se ter um grande número de simulações para serem comparadas, utilizou-se uma abordagem de simular repetidas vezes variando os ganhos levemente para que no fim pudesse ter um panorama do desempenho de cada controlador e encontrar os índices de controle com melhor desempenho e com o menor valor de IAE permanente possível.

A. Simulações com MobileSim

A trajetória seguida é da da pelas equações abaixo:

$$x = 1.5 \sin(2\pi/T \cdot t) \quad (1)$$

$$y = \sin(4\pi/T \cdot t) \quad (2)$$

com período T, de 60 segundos.

As simulações foram feitas criando um vetor de ganhos, um linear e outro angular, e então realizou-se as simulações para cada par possível de ganhos. Importante destacar que no início de cada simulação a pose do robô foi definida para o mesmo estado inicial de $[0 \ 0 \ 0 \ 0]$ novamente e que no fim de cada teste, antes de começar o próximo, foi enviado sinal de controle linear e angular zero para o robô e aguardou-se 3 segundos para começar a simulação seguinte, para evitar que o robô começasse a simulação com alguma velocidade, contaminando os dados obtidos. Então, utilizou-se um critério de parada para acelerar as simulações. Como não é de interesse que os sinais de controle sejam próximos dos valores de saturação do robô físico, então caso o sinal de controle linear fosse maior que o limite físico, $0.75m/s$ a simulação mudaria para o próximo par de ganhos. Por fim, foi necessário após uma primeira bateria de testes e resultados utilizar ainda outro critério, baseado na velocidade angular máxima de $100^\circ/s$ que realiza o mesmo tipo de parada nas simulações do critério anterior, resultando em aprimoramentos nos resultados apesar de um leve aumento nos índices de erro.

Nas Figuras 1, 2 e 3 podem ser vistos gráficos para análise do comportamento das funções controladoras selecionadas como descritas a seguir e o resultado do processo de escolha de melhores ganhos em contraste com ganhos exagerados e o ganho unitário.

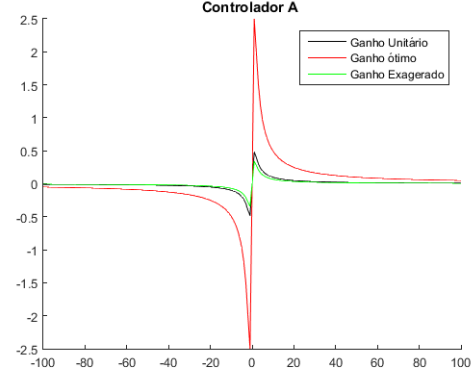


Fig. 1. Função utilizada no Controlador A.

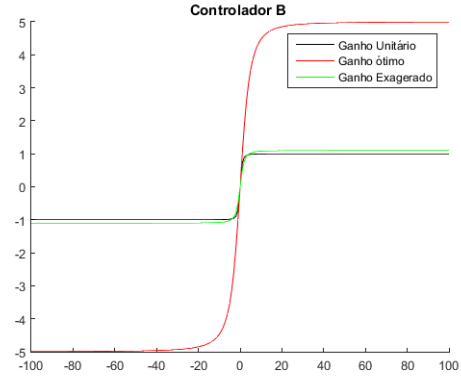


Fig. 2. Função utilizada no Controlador B.

1) *Controlador A*: Para controle do robô, a proposta utilizada foi:

$$\mathbf{v}_a = \begin{bmatrix} v_a \\ \omega_a \end{bmatrix} = \frac{G_l \cdot \tilde{\mathbf{x}} \cdot \tanh[G_a \cdot (1 + \tilde{\mathbf{x}}^2)]}{(1 + \tilde{\mathbf{x}}^2)} \quad (3)$$

Onde G_l e G_a são ganhos a serem ajustados nas simulações.

Utilizando esse controlador, testes foram realizados para poder avaliar diferentes ganhos com o IAE permanente. A trajetória do melhor ganho esta na Figura 4.

2) *Controlador B*: Na segunda proposta de controle, foi utilizada a equação de controle:

$$\mathbf{v}_b = \begin{bmatrix} v_b \\ \omega_b \end{bmatrix} = G_l \cdot \frac{\tilde{\mathbf{x}}}{\sqrt{\tilde{\mathbf{x}}^2 + G_a^2}} \quad (4)$$

Com o mesmo procedimento feito com o controlador A, resultados semelhantes foram encontrados para o controlador B, sua trajetória de melhor ganho se encontra na Figura 5.

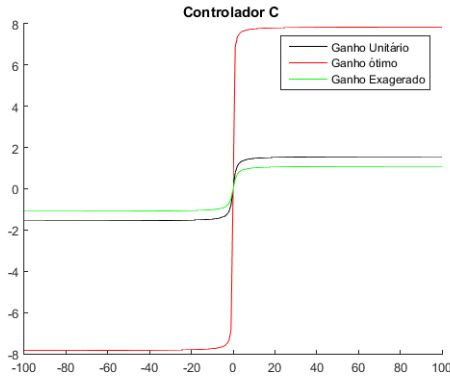


Fig. 3. Função utilizada no Controlador C.

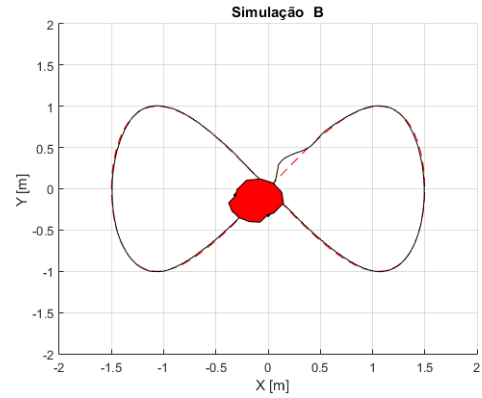


Fig. 5. Trajetória utilizando Controlador B.

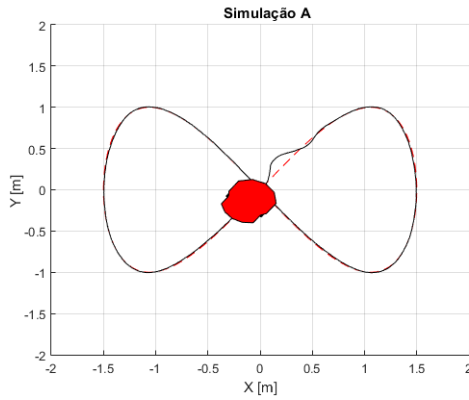


Fig. 4. Trajetória utilizando Controlador A.

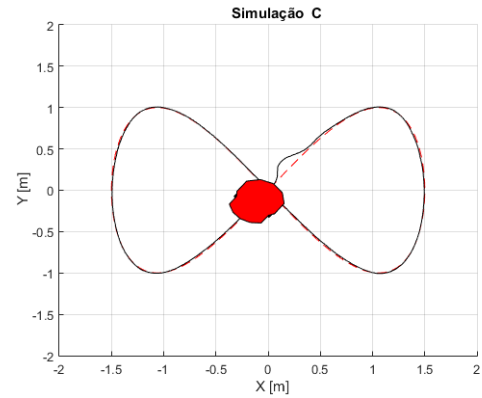


Fig. 6. Trajetória utilizando Controlador C.

3) *Controlador C*: De forma análoga, ainda outro controlador foi proposto baseado na função de controle:

$$\mathbf{v}_c = \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = G_l \cdot \text{tg}^{-1}(G_a \cdot \tilde{\mathbf{x}}) \quad (5)$$

Como pode ser observado na Figura 6, resultados semelhantes aos outros controladores foram encontrados para o controlador C, sua trajetória de melhor ganho se encontra na Figura 6.

4) *Discussão de resultados dos experimentos*: As funções utilizadas para os controladores são diferentes entre si, mas após o refinamento dos ganhos, pode-se perceber que a trajetória seguida por cada uma delas é muito parecida, com poucas diferenças em regime transitório e praticamente iguais em regime permanente. Isso se dá pois dentro de suas particularidades, todos os controladores foram capazes de seguir a trajetória após ter seus ganhos refinados.

B. Ajuste dos Índices e Análise

Na segunda etapa da proposição do controlador de trajetória, foi necessário a comparação dos controladores A, B e C propostos anteriormente e para tal foram utilizadas simulações, ou seja, iterações do algoritmo para busca de ganho ótimo (data_merger, DM), em que todos os controladores atingiram um valor de ITAEp similar, com diferença percentual máxima de 5%. Para encontrar as iterações em

que v_a , v_b , v_c tinham tais índices, foi necessário primeiramente ordenar a matriz de índices (I) de cada controlador segundo o vetor que continha o ITAEp, especificamente $I_{N,1}$ (sendo N o número da iteração que gerou tal resultado), do menor resultado para o maior, uma vez que as iterações descartadas por ultrapassar o limite de saturação mecânica em velocidade linear eram marcadas através de um ITAEp alto (nominalmente 1000), podendo-se assim encontrar os menores valores de ITAEp. Em seguida as novas matrizes I, ordenadas, resultantes de cada controlador, foram comparadas entre si populando uma matriz de resultados com valores de ITAEp de cada um dos respectivos controladores se a diferença percentual entre os mesmos fosse menor que 5%. Dessa forma, essa matriz de resultados era automaticamente ordenada do menor valor (ótimo) ao maior (viável porém menos ideal) e foi então comparada com a matriz original I de forma a encontrar o número da iteração em que tal valor foi obtido para cada um dos controladores. Finalmente, utilizando o número da iteração em que os valores ótimos e comparáveis de ITAEp foram obtidos, foram recolhidos os dados de velocidade linear, erro em X e erro em Y resultantes dessa dada iteração para cada um dos controladores, como mostrado e discutido a seguir. O resultado de ganho e ITAEp ideal é mostrado na Tabela 1.

Nas Figuras 7, 8, 9 e 10, assim como esperado dadas as trajetórias resultantes de cada um dos controladores, é

Controlador	IAEp	G_a	G_l
A	0.40871	1.18	0.7
B	0.40089	2	1.1
C	0.4202	0.8	0.7

TABLE I
GANHOS E IAEp PARA CADA CONTROLADOR.

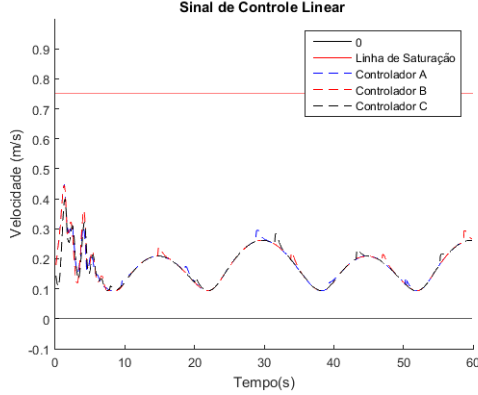


Fig. 7. Comparação dos sinais de controle linear antes do critério de parada de velocidade angular

perceptível que em faixas similares de ITAEp resultante, haverá também um resultado de erro e velocidade linear similar. Pode se observar na Figura 8 que existe mais diferenças no desempenho de cada controlador ao se coparar com a Figura 10, após melhorar os ganhos com o critério de parada de velocidade angular. Pode se observar também uma clara redução na oscilação do sinal de controle do robô, tornando o período transitório mais suave.

C. Experimento

O experimento foi feito utilizando os ganhos mostrados na Tabela I com simulações tendo o período de 30 segundos. Para evitar saturações na velocidade angular, iniciou-se a pose do robô com a orientação de $tg^{-1}(2/1.5)$ garantindo que o robô comece orientado com a *lemniscata*, reduzindo o tempo para alcançar regime permanente. Para cada controlador foram feitos 5 experimentos e os resultados se encontram na Tabela II.

De acordo com a Tabela II, o controlador que obteve melhor valor para IAEp foi o A, e também teve o maior valor de desvio padrão, porém esse controlador continua tendo o IAEp menor, o melhor valor de ITAE foi do controlador A, apesar do melhor desvio padrão ser do controlador C, o

	Controlador A	Controlador B	Controlador C
Média IAEp	0.3585	0.3671	0.3674
Desvio Padrão IAEp	0.0018	0.0012	0.0012
Média ITAE	14.5824	15.0284	14.86
Desvio Padrão ITAE	0.1061	0.2419	0.0284
Média IASC	11.0811	11.0807	11.07
Desvio Padrão IASC	0.0046	0.0309	0.0019

TABLE II
GANHOS E IAEp PARA CADA CONTROLADOR.

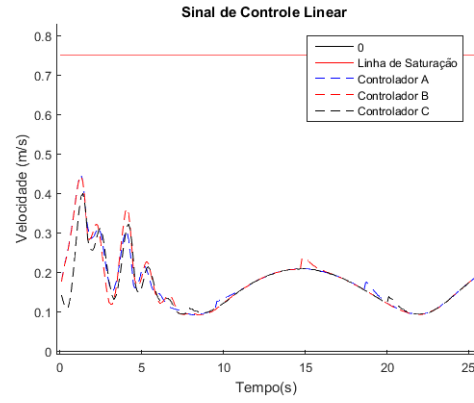


Fig. 8. Comparação dos sinais de controle linear antes do critério de parada de velocidade angular com zoom.

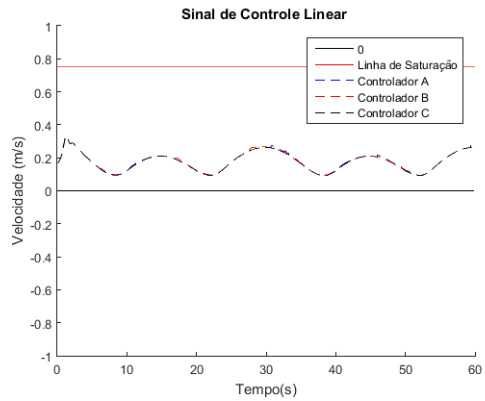


Fig. 9. Comparação dos sinais de controle linear após aplicação do critério de parada de velocidade angular

controlador A continua tendo o melhor ITAE, e o melhor valor e desvio padrão para IASC foi o controlador C, porém o controlador A teve ótimos valores bem próximos do C.

O controlador A ter tido, em média, melhores valores de IAEp e ITAE contribue para que seu valor de IASC seja maior, afinal, para ter um erro menor seguindo uma trajetória, é de se esperar que tenha que acionar com maior intensidade seus atuadores, enviando sinais de controle em média maiores, aumentando o valor de IASC. Então podemos concluir que o melhor controlador foi o A, já que teve menores erros e precisou gastar um pouco mais de energia para poder ter esse resultado.

II. CONTROLE COMUTADO

O trabalho proposto para controle comutado foi fazer o controle de posição ser separado do controle de orientação, ou seja, enquanto um controle estiver atuando o outro fica desligado. Um controlador atua por vez, ou seja, primeiramente o robô ira orientar para o destino com um erro menor que 5° (controle de orientação), orientado, o robô ira andar reto ate o destino, ou ate ter um erro de orientação maior que 10° (controle de posição). Ocorrendo o erro, o controlador de orientação é ativado, e corrige o robô ate um erro menor que 5° .

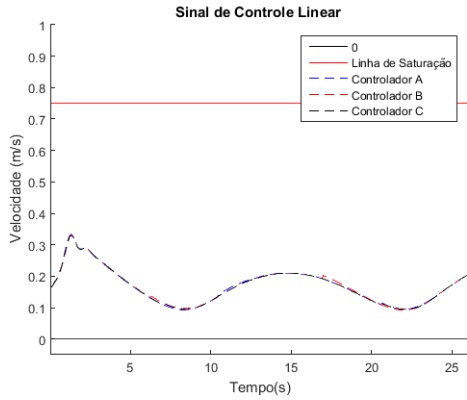


Fig. 10. Comparação dos sinais de controle linear após aplicação do critério de parada para velocidade angular com *zoom*

O destino proposto é, partindo da origem (0,0) o robô terá 20 segundos para chegar ao primeiro ponto (2,2), após esse tempo ele terá mais 20 segundos para chegar ao segundo ponto (2,0) e, finalmente, ele terá mais 20 segundos para chegar ao terceiro e ultimo ponto (0,2), totalizando um tempo de 60 segundos de simulação

A. Simulações com MobileSim

As simulações realizadas foram feitas usando o software *MobileSim*. A Figura 11 representa a simulação feita usando o software *MobileSim*, nota-se que a rota feita pelo robô condiz com o controle desejado, primeiramente o robô se orienta para depois realizar o deslocamento, em linha reta.

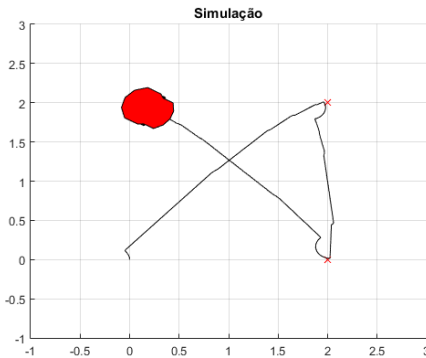


Fig. 11. Simulação do Controle Comutado

O erro da simulação esta sendo mostrado na Figura 12, nota-se que o robô atingiu os destinos no tempo proposto, e que o erro teve pequenas oscilações, quando a variação linear é baixa o robô estava se orientando e quando a variação linear é alta o robô estava realizando o deslocamento.

Os valores do ângulo psi da simulação, ângulo referente a orientação do robô, está sendo mostrado na Figura 13, analisando o gráfico é possível ver que o robô teve que corrigir sua orientação algumas vezes e que quando o ângulo estava fixo o robô estava realizando o deslocamento.

Na Figura 14 é possível ver o chaveamento dos controladores, ou o funcionamento do controlador comutado,

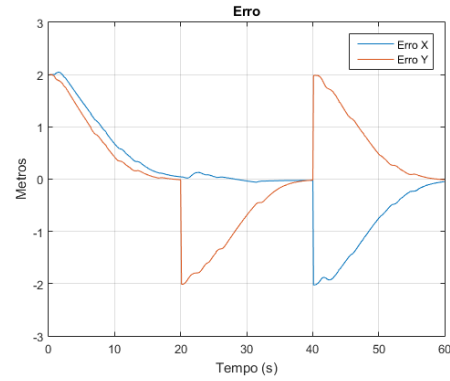


Fig. 12. Erro do Controle Comutado

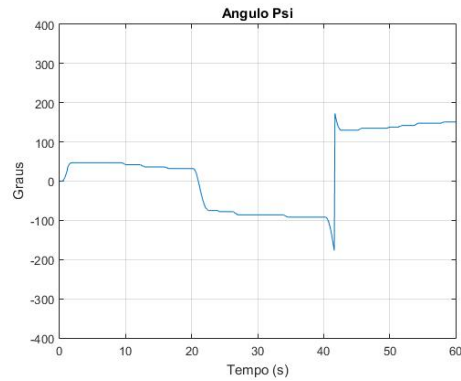


Fig. 13. Ângulo psi do Controle Comutado

observa-se que em nenhum momento os controladores de orientação e posição atuaram juntos.

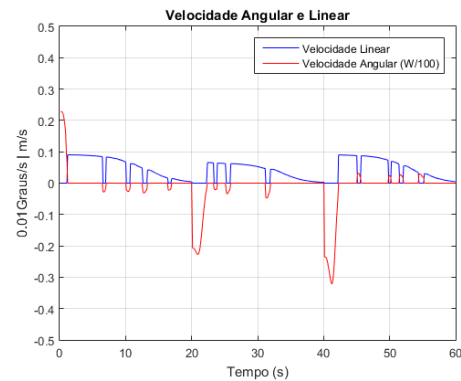


Fig. 14. Velocidade Linear e Velocidade Angular (dividido por 100) do Controle Comutado

B. Experimento

Foi realizado um experimento usando o Pioneer3DX, cujo vídeo está disponível no link <https://youtu.be/xmVds1TBGjY>, o experimento foi um sucesso. Como é mostrado na Figura 14, na simulação, o robô atinge cerca de $0,1m/s$ na velocidade linear, e em curtos períodos de tempo, atinge cerca de $30/s$ na velocidade angular. Pelo fato das velocidades serem baixas, o experimento não teve falhas que relacionassem com a inercia do robô.