

CMC-12 - Relatório Lab 1 - *Cruise Control*

Aluno: Bruno Costa Alves Freire

2 de Maio de 2020

1. Identificação do Sistema

A rotina de identificação do sistema consta no *script* MATLAB `identificarCruiseControl.m`. Na figura 1, temos a comparação entre os dados experimentais em `data.mat` e o modelo extraído a partir da identificação desses dados.

Note que existe um erro de ajuste do modelo, calculado da forma $\sum_t |\hat{v}(t) - v(t)|$. Este decorre da aproximação da velocidade terminal do sistema pela última velocidade registrada e também pela interpolação utilizada para estimar a constante de tempo do sistema. Apesar disso, vemos que as curvas se sobrepõem, então tomamos a estimativa como satisfatória.

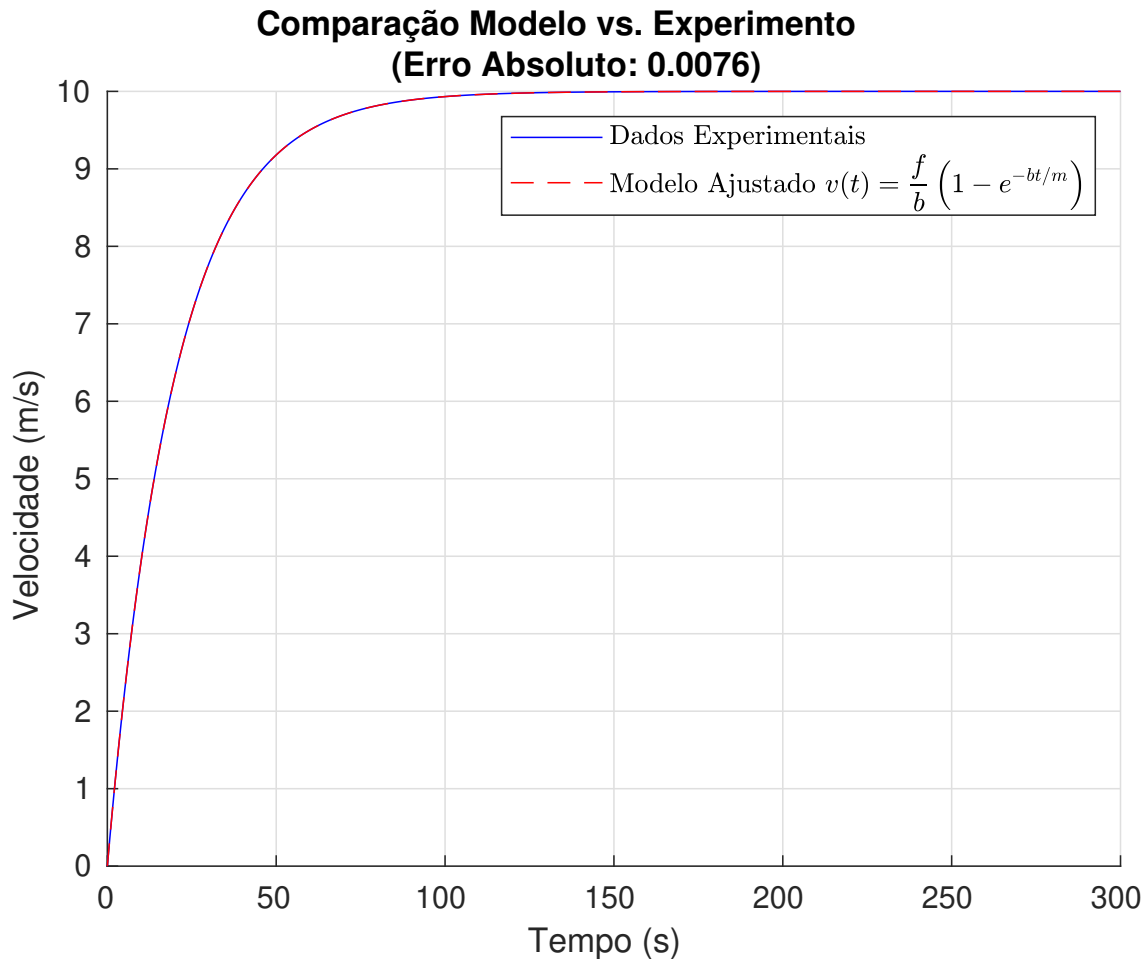


Figura 1: Comparação entre os dados experimentais e o modelo ajustado a partir destes para o sistema de *cruise control*.

2. Controle em Malha Aberta

Nesta seção analisamos o sistema de *cruise control* em malha aberta, ou seja, que não incorpora informação de sensores.

a)

Para simular o comportamento da lei de controle em malha aberta com entrada constante, plotamos o gráfico da figura 2, onde podemos ver a curva de $v(t)$ para diferentes velocidades de referência v_r . De acordo com a teoria, na ausência de perturbações ou erros de modelo, a saída do sistema é dada por

$$v(t) = v_r \left(1 - e^{-\frac{b}{m}t}\right) \Rightarrow v_\infty = v_r,$$

de modo que o sistema sempre atinge (terminalmente) a velocidade de referência v_r , o que pode ser observado no gráfico da figura 2.

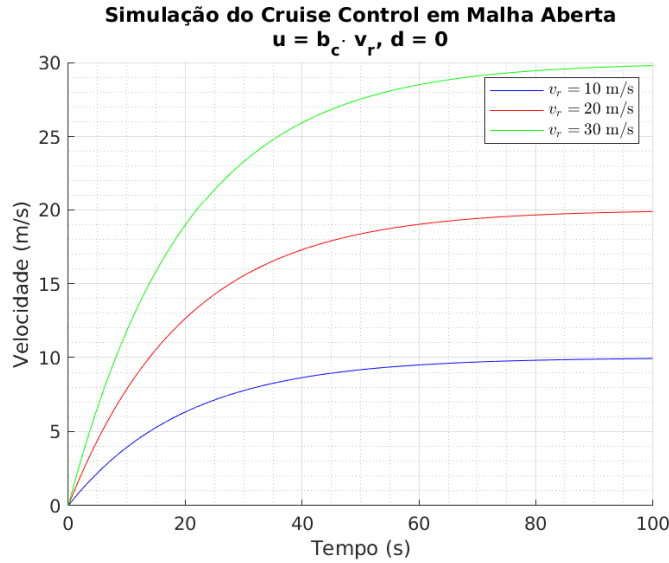


Figura 2: Simulação do *cruise control* em malha aberta para três entradas constantes sem perturbação.

b)

Um dos parâmetros de interesse num sistema de controle é o tempo de resposta, isto é, o tempo que o sistema leva para atingir a saída desejada. Na figura 3 temos um gráfico da simulação da estratégia de tempo mínimo em malha aberta, implementada levando em conta o limite de esforço do atuador.

Para implementar tal estratégia, é necessário calcular o tempo de transição t_s , o que requer conhecimento exato de todos os parâmetros da planta do sistema. Ou seja, o comando de entrada depende da planta, de modo que a estratégia é sensível a qualquer alteração na planta, perturbações e erros de modelo. Note que a saída do sistema apresenta um comportamento abrupto, correspondente à entrada descontínua aplicada, porém de fato atinge a velocidade de referência em tempo mínimo.

c)

Uma das desvantagens dos sistemas de controle em malha aberta é a sua vulnerabilidade a perturbações. Na figura 4, apresentamos o resultado das simulações do *cruise control* sujeito a perturbações de diferentes intensidades.

Conforme previsto na teoria, o sistema apresenta erro em regime proporcional à perturbação, $v_\infty - v_r = \frac{d}{b}$, comportamento que pode ser constatado no gráfico da 4.

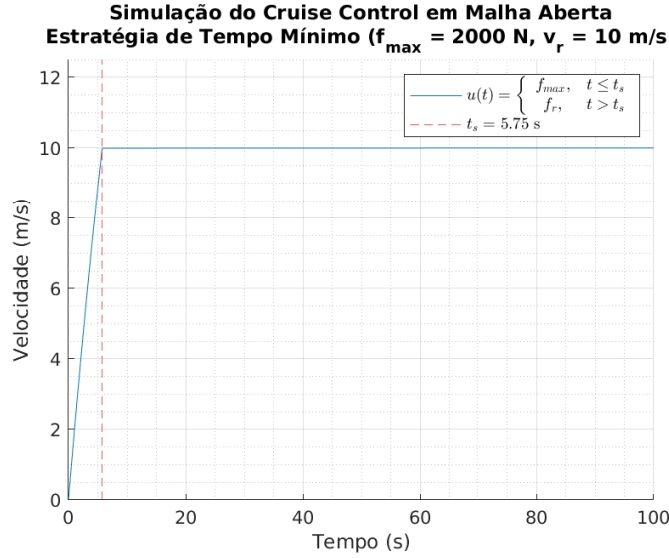


Figura 3: Simulação da estratégia de tempo mínimo sujeita a $f_{\max} = 2000 \text{ N}$.

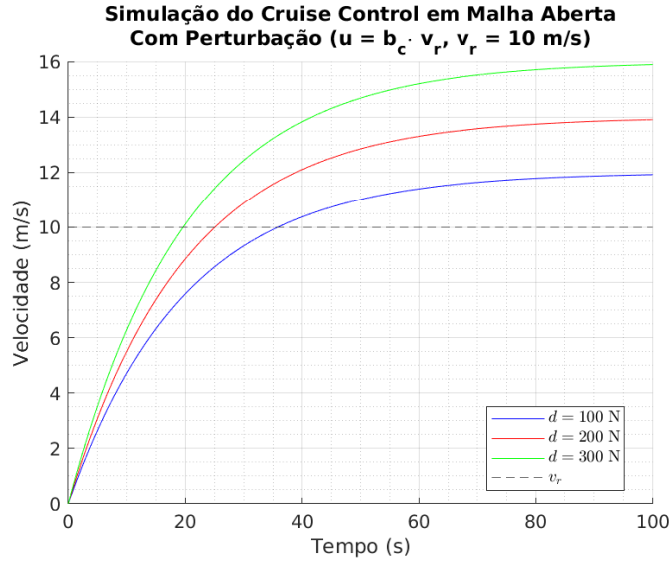


Figura 4: Simulação do *cruise control* em malha aberta sujeito a perturbações constantes.

d)

Uma característica dos sistemas de malha aberta é que quando nossa entrada $u(t)$ não depende de algum parâmetro da planta, uma alteração deste não acarreta no surgimento de erro em regime, embora possa interferir na velocidade de resposta do sistema. A seguir simulamos o efeito de uma alteração de massa no sistema de *cruise control*, devida à entrada de um passageiro no veículo.

A teoria prevê que a velocidade terminal do sistema permanecerá a mesma, atingindo a velocidade de referência. No entanto, teremos uma constante de tempo maior, cujo efeito pode ser visualizado no gráfico da figura 5.

e)

Agora analisamos um novo efeito decorrente de erros de modelo. Tendo o sistema sofrido uma alteração no parâmetro de amortecimento do veículo, a planta do sistema mudou, embora nosso controlador não tenha incorporado essa alteração.

A teoria prevê que, uma vez que nosso sinal de entrada $u(t) = b_c v_r$ é dependente do parâmetro

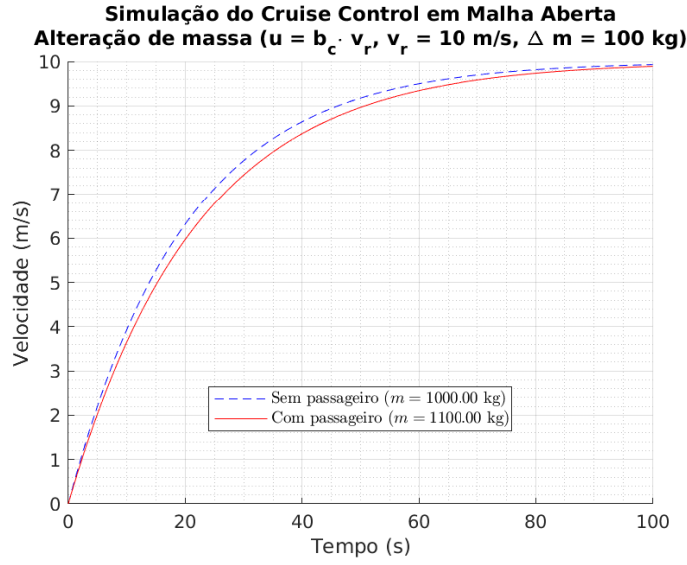


Figura 5: Simulação do *cruise control* em malha aberta perante uma alteração de massa.

que foi alterado, teremos o surgimento do erro em regime dado por $e_\infty = \left(\frac{b - b_c}{b} \right) v_r$, o qual pode ser observado no gráfico da figura 6.

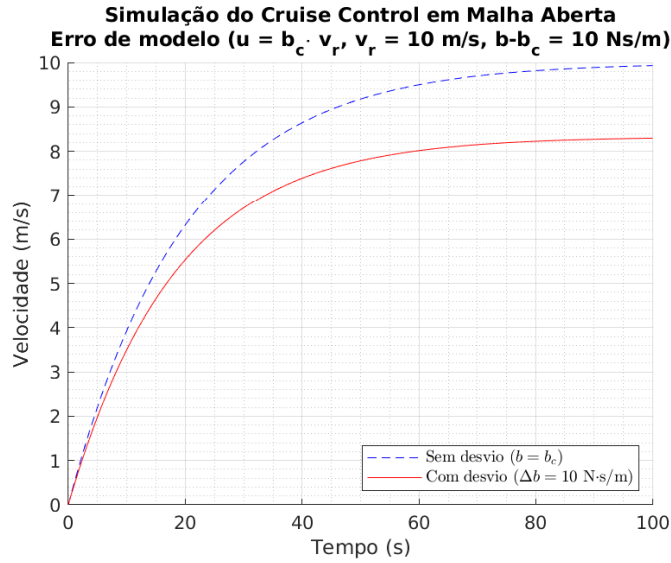


Figura 6: Simulação do *cruise control* em malha aberta com erro de modelo.

3. Controle em Malha Fechada

A seguir analisamos o sistema de controle em malha fechada, ou seja, incorporando sensores para medir o erro em relação à referência, e comparamos seu desempenho com o controlador de malha aberta.

a)

Primeiramente, vejamos o desempenho do controlador *feedforward*+P, o qual implementa um ganho proporcional ao erro além de um termo constante que imita o sinal de malha aberta.

Sabemos que na presença do termo de *feedforward*, o sistema não apresentará erro em regime, e devido ao ganho proporcional, podemos controlar a velocidade de resposta do sistema. Calculamos o ganho K_p de modo a obtermos uma constante de tempo de $\tau = 10$ s, dado por $K_p = \frac{m}{\tau} - b$, resultando em 50 N·s/m. O resultado da simulação pode ser visto na figura 7.

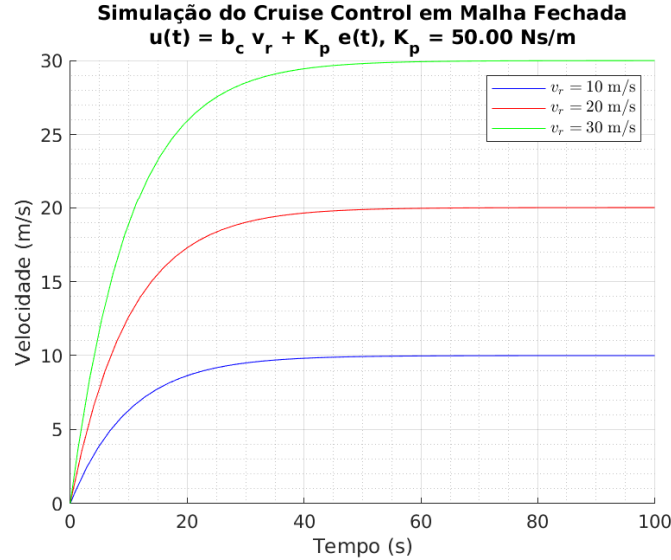


Figura 7: Simulação do *cruise control* em malha fechada com lei de controle *feedforward*+P, para três entradas constantes.

Note, em comparação com a figura 2, a velocidade com que o sistema atinge v_r , efeito esse devido ao ganho K_p .

b)

Agora avaliamos a importância do termo de *feedforward* no desempenho do controlador. Sem esse termo, o controlador proporcional apresenta erro em regime dado por

$$e_\infty = \frac{b}{b + K_p} v_r,$$

o qual pode ser mitigado por K_p , mas nunca extinto.

Na figura 8, temos a comparação dos sistemas com e sem o *feedforward*, onde podemos constatar o erro em regime na ausência desse termo.

c)

Analisamos agora a sensibilidade do controlador em malha fechada perante perturbações. O efeito de perturbações, geralmente, é de produzir erros em regime, caso esse erro não seja medido (malha aberta). Em malha fechada, apesar de ainda termos um erro em regime oriundo da perturbação, o mesmo pode ser mitigado pelo ganho, conforme a equação

$$e_\infty = -\frac{d}{b + K_p} v_r.$$

A figura 9 ilustra esse comportamento. Note, em comparação com a figura 4, que a intensidade do erro é menor e a velocidade de resposta é maior.

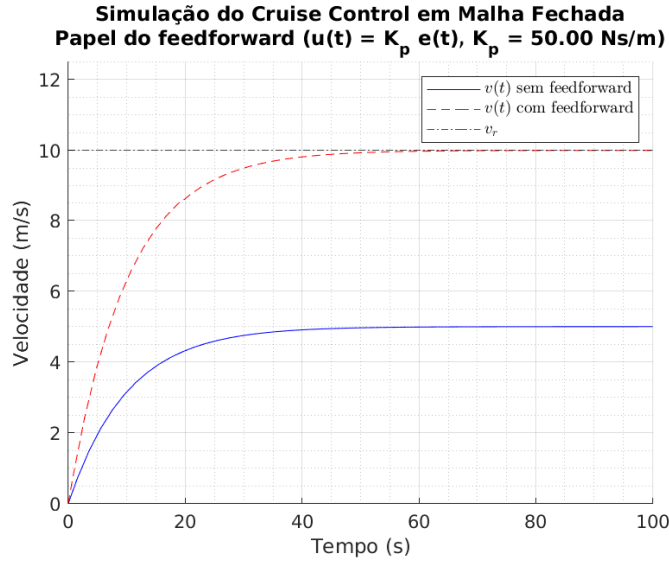


Figura 8: Simulação do *cruise control* em malha fechada com ganho proporcional, com e sem o termo de *feedforward*.

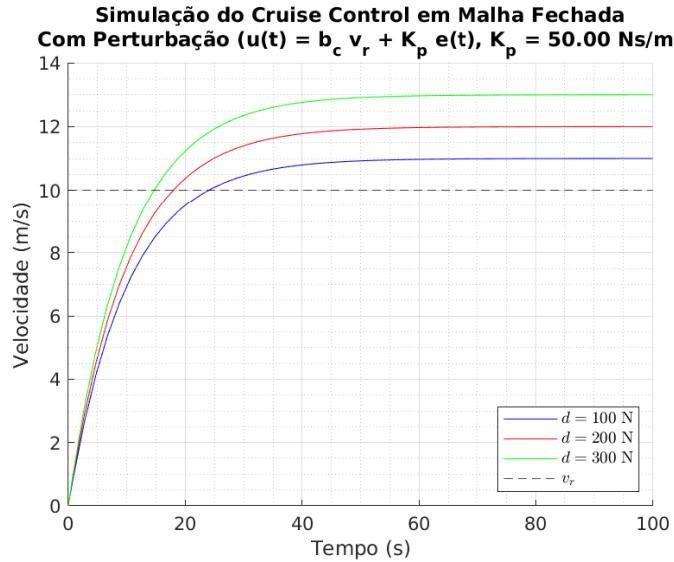


Figura 9: Simulação do *cruise control* em malha fechada com lei de controle *feedforward*+P, sujeito a perturbações constantes.

d)

Agora analisamos o comportamento do controlador em malha fechada perante erros de modelo que afetam o sinal de entrada, especificamente o termo de *feedforward*.

Tendo uma discrepância na estimação do parâmetro b de $\Delta b = 10 \text{ N}\cdot\text{s/m}$, a teoria prevê que o erro em regime vai existir e ser dado por

$$e_\infty = \frac{\Delta b}{b + K_p} v_r,$$

o que, novamente, é atenuado pela presença do ganho K_p . A figura 10 ilustra esse comportamento. Note a diferença para o caso de malha aberta na figura 5.

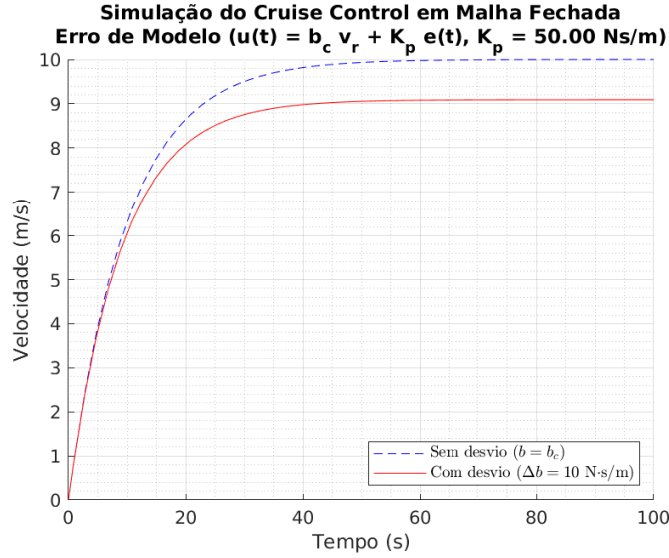


Figura 10: Simulação do *cruise control* em malha fechada, com lei de controle *feedforward*+P, com erro de modelo.

e)

Por fim, comparemos a velocidade de resposta dos controladores em malha aberta e em malha fechada. No controlador em malha aberta, implementamos a estratégia de tempo mínimo com limite de atuador, e na malha fechada implementamos a lei de controle *feedforward*+P.

A simulação das duas estratégias pode ser observada na figura 11. Aqui é interessante notar o aspecto abrupto da solução em malha aberta, em contraste com o comportamento suave tanto do esforço de controle $u(t)$ quanto da saída do sistema. Embora em primeira análise o controlador de malha aberta de fato tenha “vencido” no critério velocidade de resposta, vale ressaltar que essa estratégia tem efeitos desgastantes ao atuador, além de provocar desconforto no usuário, dado que se trata de um sistema de *cruise control*.

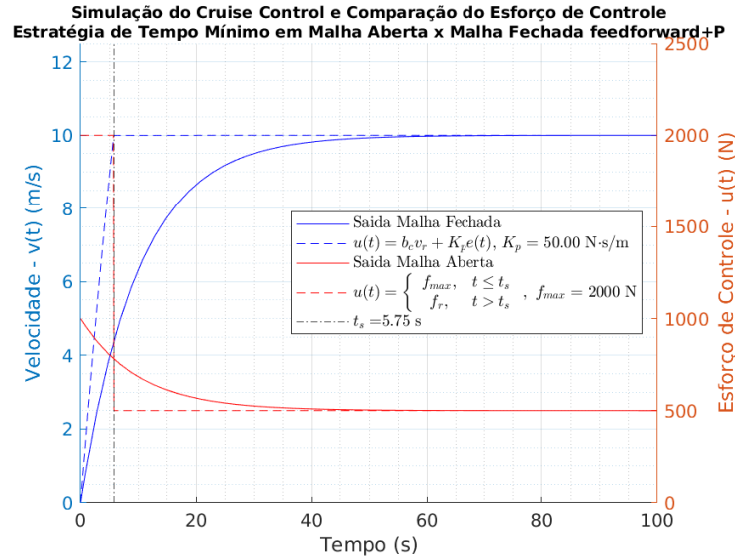


Figura 11: Comparação dos esforços de controle $u(t)$ para a estratégia de tempo mínimo em malha aberta e o controlador em malha fechada *feedforward*+P, e as respectivas saídas.

A geração de figuras foi feita por meio do *script* MATLAB em anexo, `plotting_facility.m`.