



Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Relatório da disciplina CM-202: Planejamento e Controle para Robótica Móvel

## Laboratório 6: Controle de voo de Drones

Guilherme Müller Bertolino

### 1. Introdução

O objetivo desse laboratório é a implementação de elementos da arquitetura de controle de quadricópteros com 6 graus de liberdade, também considerando um efeito dinâmico não modelado, o *in-ground-effect* (IGE). O modelo utilizado para o drone considera que a força que cada hélice gera uma força  $f_i$  dada por:

$$f_i = k_f \omega_i^2, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

Com  $k_f$  sendo uma constante determinada por parâmetros físicos e geométricos da hélice e  $\omega_i$  sendo a respectiva velocidade angular. Ainda consideramos nesse laboratório o IGE, um efeito que é particularmente forte quando o drone opera próximo do chão, gerando uma interação complexa do fluxo de ar dos rotores e a superfície do chão, aqui empregamos o seguinte modelo para o IGE:

$$f_{z,B} = \frac{\bar{f}_{z,B}}{1 - \sigma(z_r)} \quad ; \quad \sigma(z_r) = \rho \left( \frac{c}{4z_r} \right)^2, \quad 0 < \sigma(z_r) < 1 \quad (2)$$

Em que  $c$  é o raio da hélice,  $\rho$  é um parâmetro determinado experimentalmente e  $z_r$  é a distância do rotor até o chão.

### 2. Metodologia

A técnica de controle utilizada no projeto dos controladores foi o regulador linear quadrático (LQR), com modelos em espaço de estados das dinâmicas de rotação e translação sendo:

$$\dot{\xi}_r(t) = A_r \xi_r(t) + B_r U_r(t) \quad (3)$$

$$\dot{\xi}_p(t) = A_p \xi_p(t) + B_p U_p(t) \quad (4)$$

Dessa forma, empregando as matrizes Q e R fornecidas chegamos aos seguintes ganhos para o controlador de rotação:

$$K_{rot} = \begin{bmatrix} 0.7071 & 0.1584 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7071 & 0.1584 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7071 & 0.1586 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Para o controlador de posição, foram obtidos os seguintes ganhos:

$$K_{pos} = \begin{bmatrix} 0.3162 & 0.2233 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3162 & 0.2233 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3162 & 0.2233 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Como a dinâmica em  $z$  ainda possui o IGE e o efeito da gravidade, é interessante adicionar um integrador nesse eixo de modo a eliminar o erro em regime. Os ganhos obtidos adicionando o integrador são:

$$K_{pos} = \begin{bmatrix} 0.3162 & 0.2233 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3162 & 0.2233 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5665 & 0.2853 & -0.3873 \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 3. Resultados

O primeiro experimento foi realizar uma manobra de *hover* com o drone a 0.5m do chão. Sem utilizar o integrador, a Figura 1 apresenta os resultados obtidos.

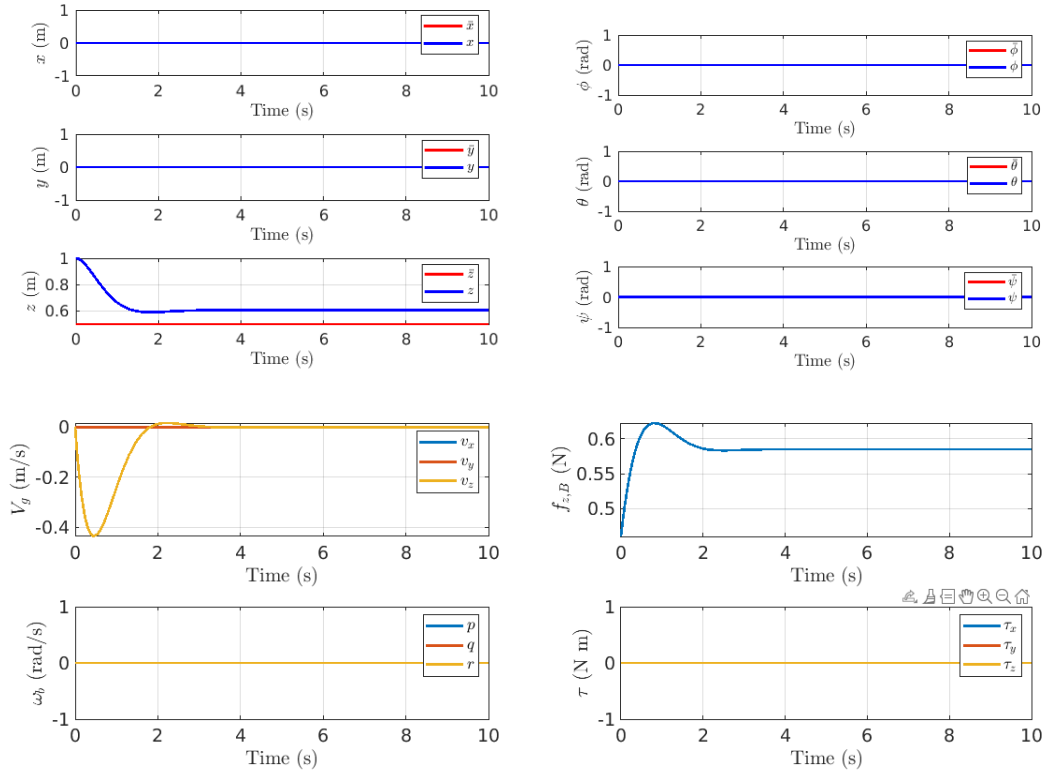


Figura 1: Resultados obtidos com o experimento 1 sem o uso de integrador

Veja que, na ausência de integrador, o efeito IGE não modelado causa um erro de regime considerável (aproximadamente 20%). Adicionando o integrador ao sistema, obtemos o resultado da Figura 2.

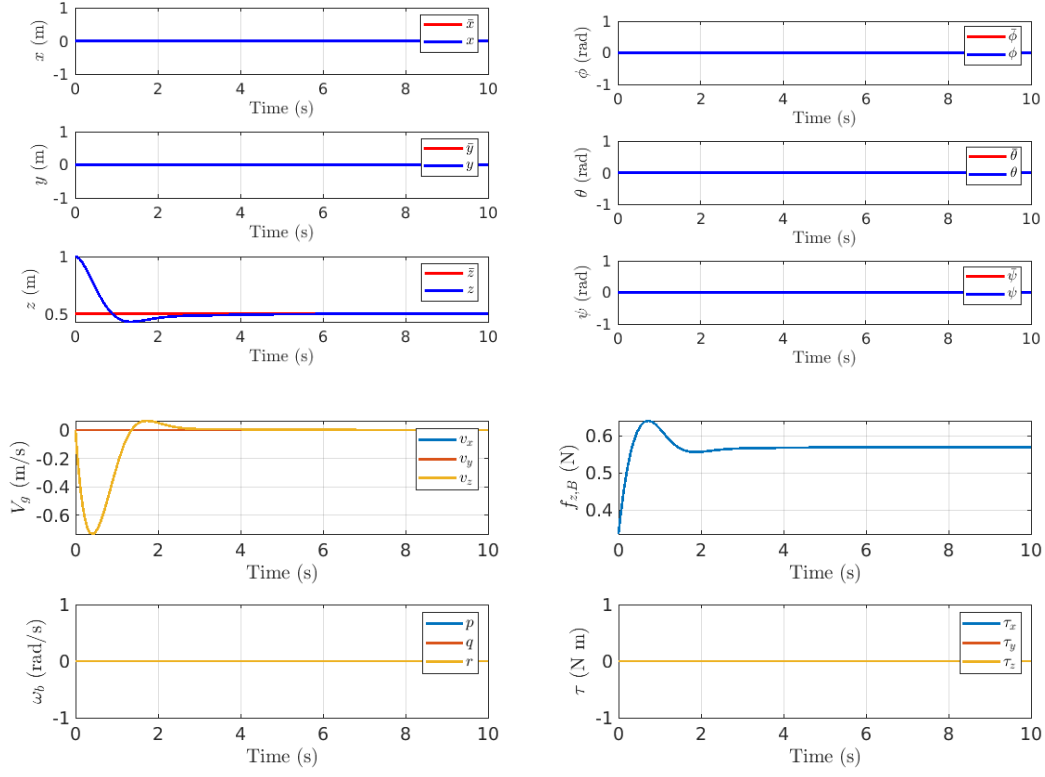


Figura 2: Resultados obtidos com o experimento 1 com o uso de integrador

Nesse caso, o integrador zera o erro em regime causado pelo efeito não modelado. Elaborar uma lei de controle que cancele o IGE exigiria uma modelagem precisa da influência do solo em diferentes altitudes e velocidades, além de que possivelmente outros efeitos não modelados também estarão atuando no drone, dessa forma, é mais fácil tratar esses efeitos como perturbações e adicionar um integrador para eliminar o erro em regime causado por eles.

Para o experimento 2, ele foi simulado sem e com o uso do integrador, de forma a obter os resultados nas Figuras 3 e 4, respectivamente.

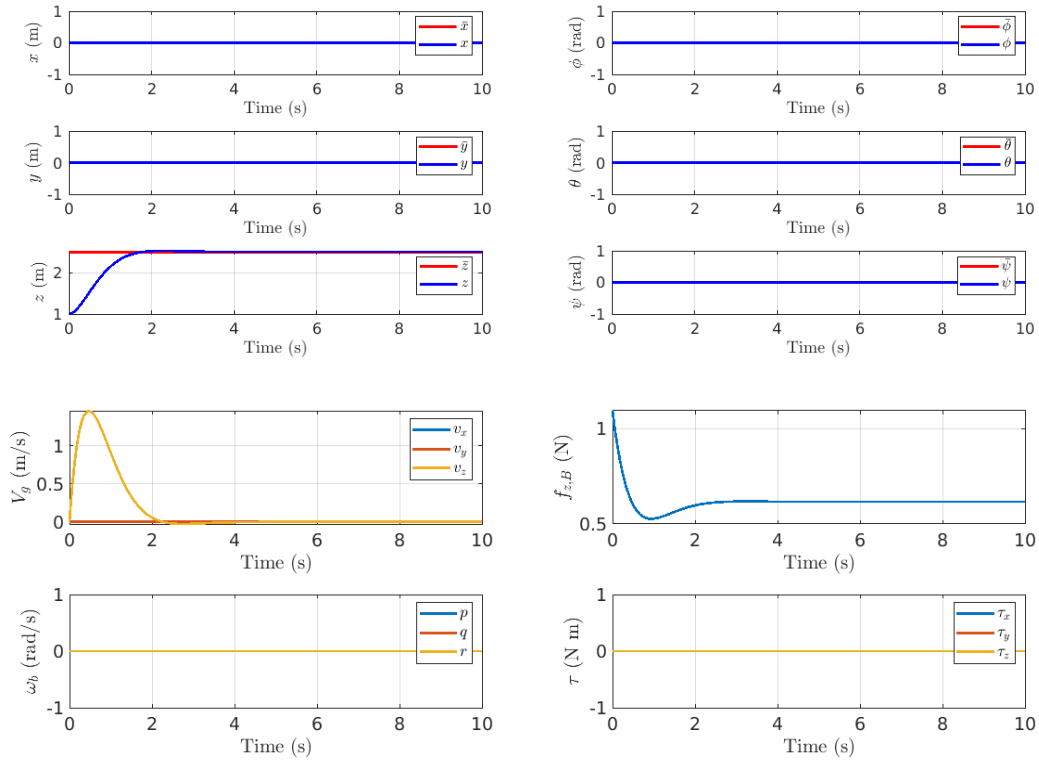


Figura 3: Resultados obtidos com o experimento 2 sem o uso de integrador

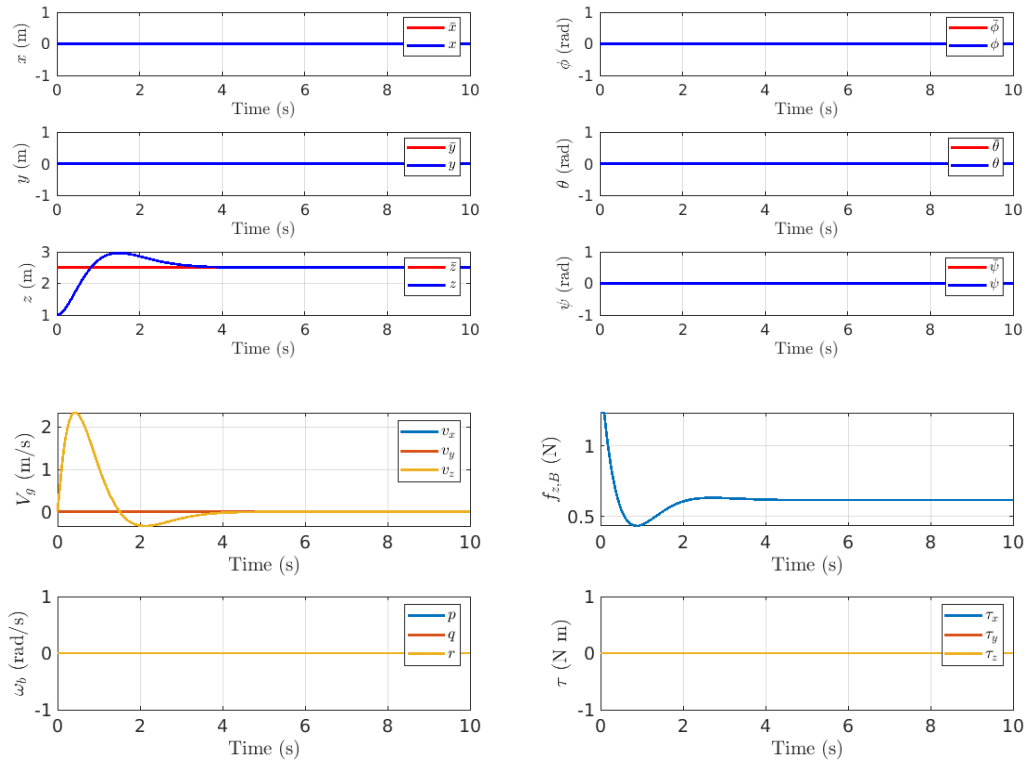


Figura 4: Resultados obtidos com o experimento 2 com o uso de integrador

Veja que, nesse caso, o IGE é pouco pronunciado a uma altura maior, de modo que o erro em regime mesmo sem o uso de integrador é baixo, e o uso de integrador tem o efeito de deixar o sistema mais oscilatório, tendo, nesse caso, um *overshoot* maior.

Para o experimento 3, ele foi simulado sem e com o uso do integrador, de forma a obter os resultados nas Figuras 5 e 6, respectivamente.

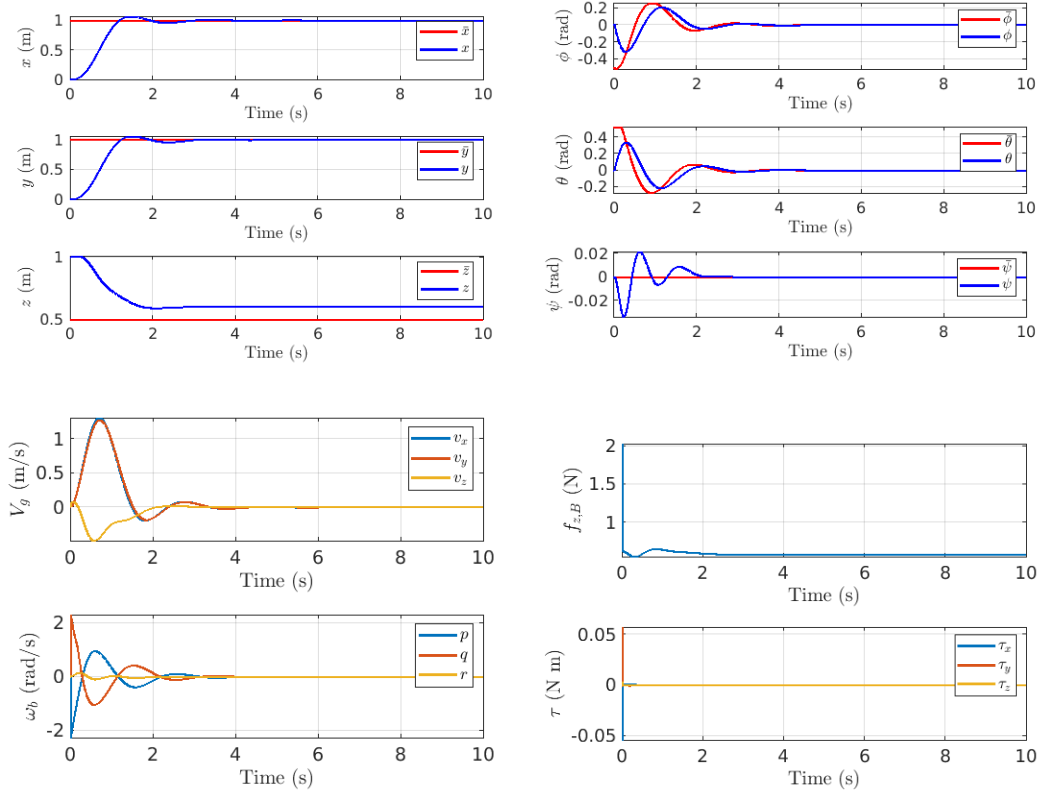


Figura 5: Resultados obtidos com o experimento 3 sem o uso de integrador

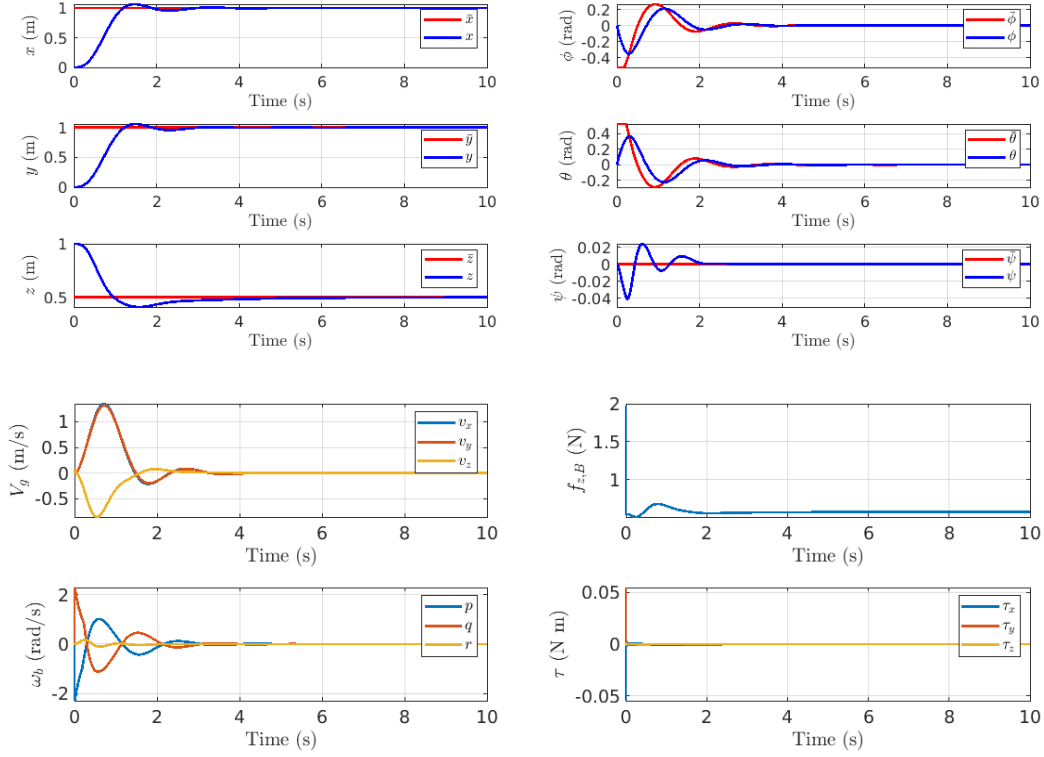


Figura 6: Resultados obtidos com o experimento 3 com o uso de integrador

Veja que o controlador foi capaz de rastrear as referências nos eixos  $x$  e  $y$ , nesse caso, sendo necessária a inclinação do quadricóptero, de modo que há ação de controle em todos os seis graus de liberdade do sistema. Como visto anteriormente, o uso do integrador elimina o erro em regime nessa direção, sob o custo de deixar o sistema mais oscilatório. Só é usada ação integral nessa direção porque nela há efeitos que causam erros, como variações na massa do sistema e o IGE.