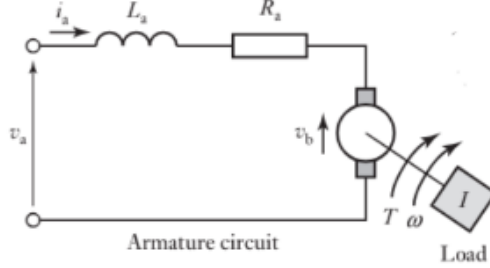


**Universidade de São Paulo - USP**  
**Escola de Engenharia de São Carlos - EESC**  
**Drone Simulation and Control**

Ana Julia Guimarães Lopes - 1383116  
Enzo Rangel Pereira - 13831280  
Marco Aurélio Sabino Garletti - 13673371  
Pedro Vinicius Ivo de Medeiros - 12725088

## 1 Modelagem de motores DC

Um motor elétrico de corrente contínua pode ser considerado como a associação em série de 3 elementos sendo controlados pela diferença de potencial em sua armadura.



**Figura 1:** Diagrama simplificado do motor

Pela Lei de Kirchoff das tensões, obtém-se:

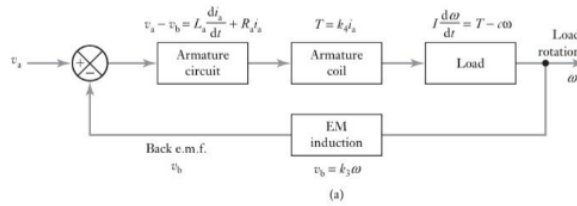
$$V_a - V_b + L \frac{d}{dt} i + Ri = 0 \quad (1)$$

$$\Rightarrow L \frac{d}{dt} i = V_b - V_a - Ri \quad (2)$$

Pelo viés mecânico, o somatório de torques é:

$$J \frac{d}{dt} \omega = T_{el} - c\omega - \tau \quad (3)$$

Podemos relacionar as equações com o diagrama (2).



**Figura 2:** Esquema de Blocos do Sistema

Obtém-se

$$V_b = K_e \omega \quad \text{onde} \quad K_e = \frac{1}{K_v} \quad (4)$$

$$T_{el} = K_t i \quad (5)$$

$$L \frac{d}{dt} i = -K_e \omega - Ri + V_a \quad (6)$$

$$J \frac{d}{dt} \omega = -c\omega + K_t i - \tau \quad (7)$$

Definindo entradas como a voltagem sobre a armadura e o torque externo, resultamos no seguinte sistema representado no espaço de estados.

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-R}{L} & \frac{-k_e}{L} \\ \frac{k_t}{J} & \frac{-c}{J} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{k}{J} & 0 \\ 0 & \frac{-c}{J} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ \tau \end{bmatrix} \quad (8)$$

## 1.1 Simulação

Utilizou-se do software MATLAB para a realização das simulações utilizando o código presente em (3), as entradas representadas em (4), resultando nas respostas em (5).

```

Parâmetros
1  R = 0.179 %[ohm]
2  L = 0.0056 %[m]
3  J = 39.1 %[kgm^2]
4  c = 11.9 %[rpm/m]
5  kt = 12 %[mNm/A]
6  kv = 797 %[rpm/V]
7  ke = 1/ke %[V/rpm]

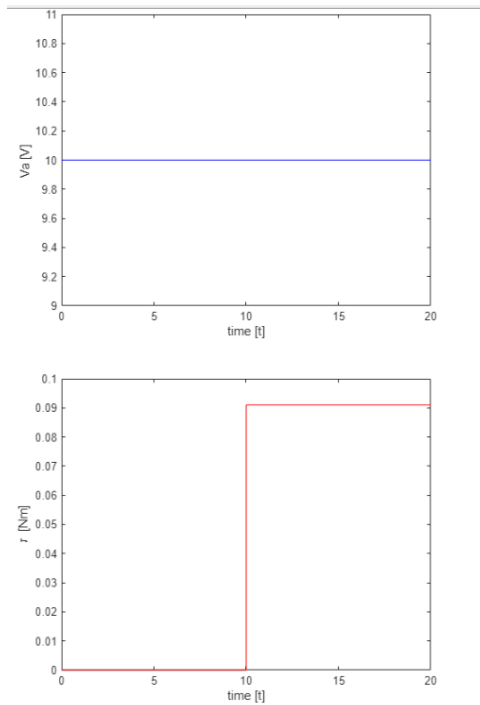
Espaço de Estado
8  A = [-R/L, -ke/L; kt/J, -c/J]
9  B = [1/L, 0; 0, -1/J]
10 C = [1, 0; 0, 1]
11 D = zeros(2)
12
13 model = ss(A,B,C,D)

Entradas
14 Va = 10*ones(10000,1)
15
16 tau = 0.091*([zeros(5000,1),ones(5000,1)])
17
18 time = linspace(0,20,10000)
19
20 plot(time,Va,'b')
21 xlabel('time [s]')
22 ylabel('Va [V]')
23
24 plot(time,tau,'r')
25 xlabel('time [s]')
26 ylabel('tau [Nm]')

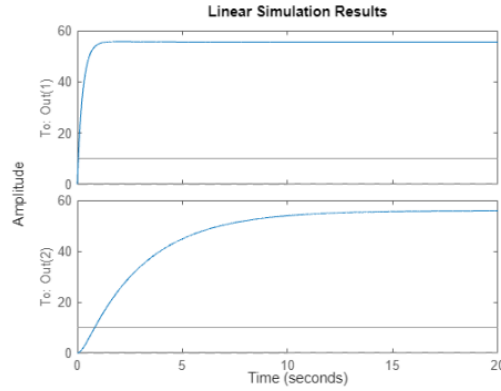
Respostas
27
28 lisz(model,[Va,tau],time)

```

**Figura 3:** Código em MATLAB do Sistema



**Figura 4:** Entradas do Sistema



**Figura 5:** respostas do Sistema

## 2 Controlador

Levando em conta um drone quadrimotor livre no espaço, ele apresenta 6 graus de liberdade sendo 3 de translação ( para cima/baixo, direita/esquerda e frente/trás) e 3 de rotação (rolagem, arfagem e guinada).

Para nosso drone bidimensional com o objetivo de decolar e manter-se em hover (com uma altitude constante) em 5 m, temos um sistema bem mais simplificado, nos restando apenas 3 graus de liberdade, sendo o movimento no eixo x (direita/esquerda), no eixo z(cima/baixo) e rolagem (rotação no eixo y, no plano xz).

Para o controle de desse drone basta a mudança da velocidade de cada motor, e para isso, é preciso um modelo que desvincule os principais movimentos dele. O simples incremento da potência em todos os motores de forma igual gera um movimento ascendente ao solo e negativo em z. Entretanto, para movimento lateral, no eixo x, o drone seria incapaz de realizá-lo desvinculado ao movimento de rolagem que é resultante de uma diferença de empuxo entre os motores de diferentes lados.

Seguindo esse lógica de movimento cruamente nos levaria a um controle arisco, onde o piloto precisaria de grande perícia para controlar cada motor e conduzir o drone de forma segura e eficiente, o que torna a necessidade de um controlador mais eficiente para a aeronave.

Temos os seguintes esquemas para o sistema do drone e seu controlador de malha fechada, sendo para um drone 3D (6) desenvolvido por [6] e nosso esquema 2D (7)

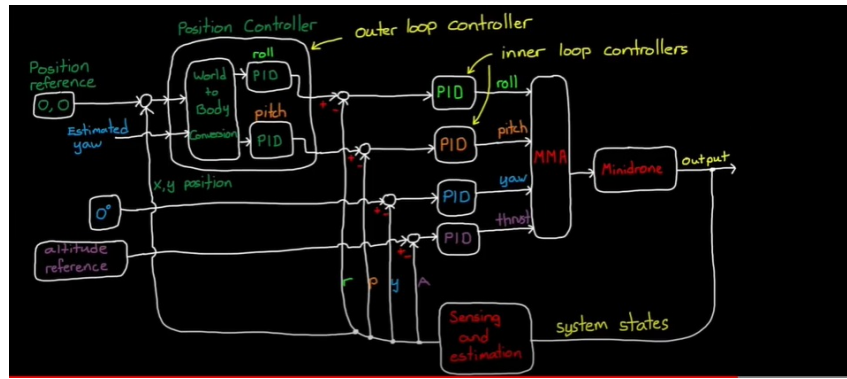


Figura 6: Esquema Drone 3D

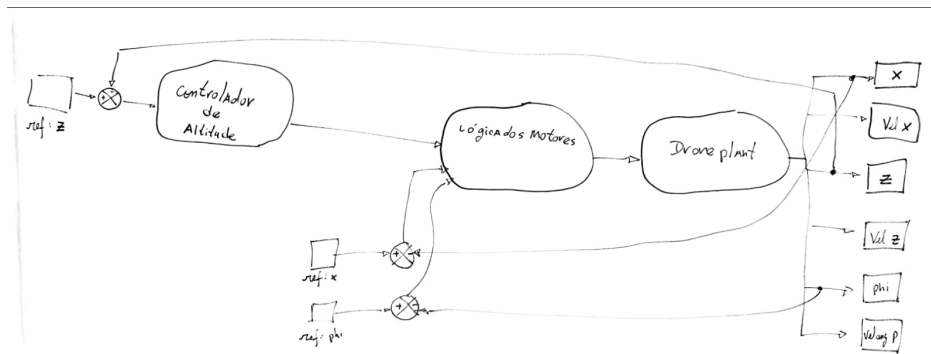


Figura 7: Esquema Drone 2D

## 2.1 Simulação

Para a simulação temos o seguinte sistema de malha fechada feito por meio do software SIMULINK:

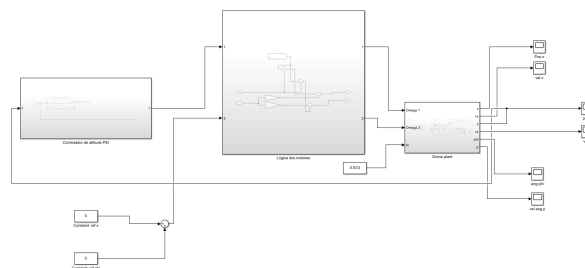


Figura 8: Diagrama Completo

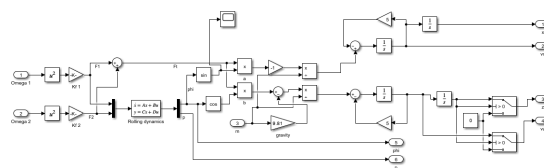
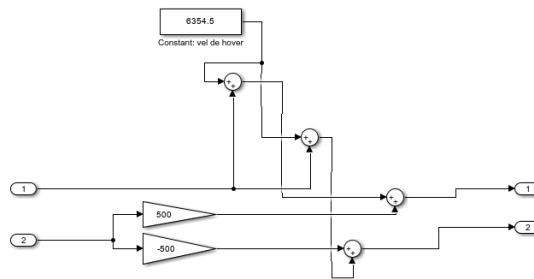
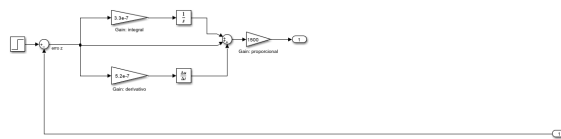


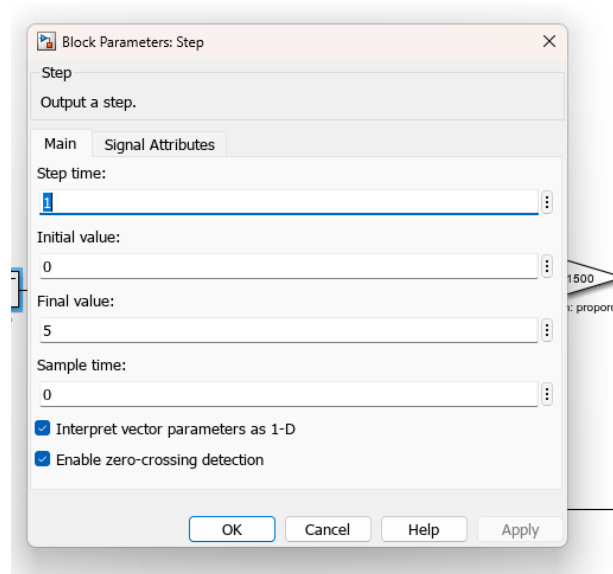
Figura 9: Drone Plant



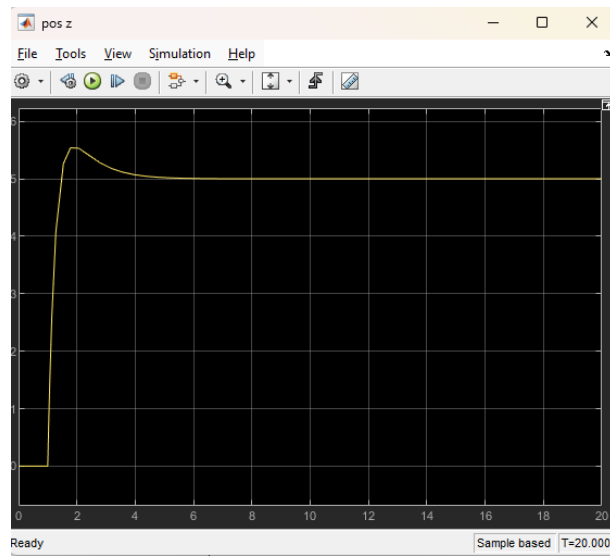
**Figura 10:** Lógica dos motores



**Figura 11:** Controlador de Altitude



**Figura 12:** Entrada de Altitude



**Figura 13:** Resposta de Altitude

### 3 Referências Bibliográficas

1. Bolton, William. Mechatronics: electronic control systems in mechanical and electrical engineering. Pearson Education, 2003.
2. Maxon UAV propulsion systems. Disponível em:  
[https://www.maxongroup.net.au/medias/sys\\_\\_master/root/8930376351774/210827-Brosch-UAV-2021-UG-PRINT.pdf](https://www.maxongroup.net.au/medias/sys__master/root/8930376351774/210827-Brosch-UAV-2021-UG-PRINT.pdf) . Acesso em 1 de junho de 2024.
3. MATLAB. Disponível em: [https://www.mathworks.com/academia.html?s\\_tid=gn\\_acad](https://www.mathworks.com/academia.html?s_tid=gn_acad)
4. MATLAB. Playlist “Drone simulation and Control”. [https://youtube.com/playlist?list=PLn8PRpmsu08oOLBVYYIwwN\\_nvuyUqEjrj&si=v3Dt74Kpx87b\\_q36R](https://youtube.com/playlist?list=PLn8PRpmsu08oOLBVYYIwwN_nvuyUqEjrj&si=v3Dt74Kpx87b_q36R)
5. Mellinger, Daniel, Nathan Michael, and Vijay Kumar. "Trajectory generation and control for precise aggressive maneuvers with quadrotors." The International Journal of Robotics Research 31.5 (2012): 664-674.
6. [https://youtube.com/playlist?list=PLn8PRpmsu08oOLBVYYIwwN\\_nvuyUqEjrj&si=azpWIVZ2Dr9Uc](https://youtube.com/playlist?list=PLn8PRpmsu08oOLBVYYIwwN_nvuyUqEjrj&si=azpWIVZ2Dr9Uc)