

# Sistemas Operacionais – 2020/2

## Trabalho Prático 01

Guilherme Leles  
Victor Moraes

**Resumo**—Este relatório descreve a prática de controle da planta de um rotor duplo. O sistema é composto por duas hélices, semelhante a um helicóptero, sendo uma no sentido horizontal e outra no vertical. O intuito do presente trabalho foi realizar o controle de ambos graus de liberdade da planta: ângulos de arfagem e de guinada. Para tal, realizou-se identificação do sistema para cada entrada e para cada saída. Assim foram obtidas quatro funções de transferência que aproxima o sistema real. Tal modelo foi validado por meio de simulações na planta. Foi realizado o projeto de um desacoplador e controladores PID foram projetados para controle de arfagem e guinada. Esses controladores foram simulados nos modelos e posteriormente testado na planta.

### I. INTRODUÇÃO

Uma das aplicações de controle na aeronáutica mais importantes é o controle da orientação espacial de uma aeronave, a fim de alterar a trajetória do veículo em voo. Os ângulos controlados são: em relação ao eixo horizontal, ângulo de arfagem; em relação ao eixo vertical: ângulo de guinada; e em relação ao sentido longitudinal da aeronave, o ângulo de rolagem. Em helicópteros comerciais tais controles são realizados atuando na velocidade dos rotores e ângulos das pás, controlando empuxo, arfagem e guinada.

O dispositivo didático utilizada nesta prática é o sistema rotor duplo de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), que é uma simplificação de um helicóptero e produzida pela *Feedback*. O controle de tal planta deve possuir dois controladores, sendo cada um dependente de ambas entradas. Contudo, é possível desacoplar as entradas e eliminar o efeito cruzado, isto é, o efeito em que uma entrada, afeta a saída oposta, permitindo o controle de um sistema MIMO.

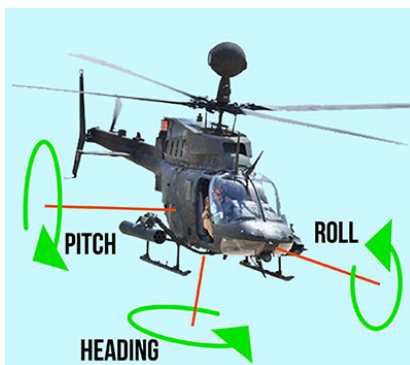


Figura 1: Orientação espacial de uma aeronave: arfagem (*pitch*), rolagem (*roll*) e guinada (*heading*).

### II. ESPECIFICAÇÃO

Os requisitos de desempenho no domínio do tempo adotados para o controle de pitch foram:

- 1) *Overshoot* máximo percentual:  $M_p \leq 30\%$ ;
- 2) Tempo de acomodação:  $t_{2\%} \leq 20$  s; e
- 3) Erro nulo em estado estacionário para entradas do tipo degrau.

Os requisitos de desempenho no domínio do tempo adotados para o controle de yaw foram:

- 1) *Overshoot* máximo percentual:  $M_p \leq 20\%$ ;
- 2) Tempo de acomodação:  $t_{2\%} \leq 10$  s; e
- 3) Erro nulo em estado estacionário para entradas do tipo degrau.

Tais requisitos introduziram restrições que delimitaram uma região de suposto desempenho satisfatório no plano complexo  $s$ , e foram consideradas no projeto dos controladores.

### III. ALGORITMO

O sistema é composto por dois rotores de velocidade variáveis, sendo uma hélice horizontal e outra vertical, acoplado em uma haste com dois graus de liberdade que por sua vez está conectada a uma outra haste com contra-peso. A planta possui duas variáveis de entrada, que são as tensões de alimentação de cada rotor, fornecidas pela unidade eletrônica, que recebe uma referência de  $-2.5$  a  $2.5$  V do controlador. Também possui duas variáveis a serem controladas, correspondente aos dois graus de liberdade: ângulo de arfagem e ângulo de guinada, sendo sensoreadas, cada uma, por *encoders* incrementais, lidos pela unidade de aquisição de dados e enviados ao controlador [?].

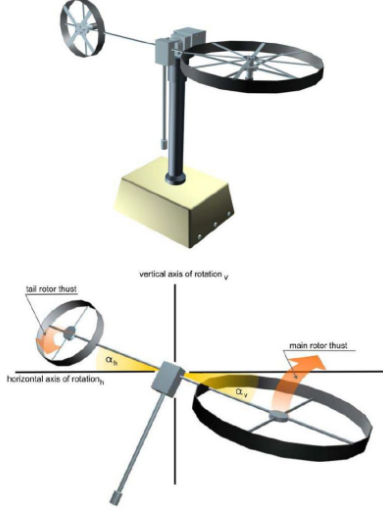


Figura 2: Dispositivo *Twin rotor MIMO System*.

No sistema físico está presente a perturbação de fluxos de ar externos e turbulências. Como não-linearidades, tem-se o atraso da aceleração do rotor e de seu empuxo. O torque de arfagem depende de forma não-linear da orientação espacial.

Tem-se como variável controlada o ângulo de arfagem (*pitch angle*), responsável pelo movimento vertical do rotor dianteiro. A tensão aplicada ao rotor é a variável manipulada. O *set-point* ou referência é o ângulo de arfagem desejado, que nessa prática foi expresso em sinais do tipo degrau, senoide e rampa. A variável medida foi o ângulo de arfagem real do rotor (resposta do sistema).

#### IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

##### A. Teste do Controlador na Planta

Simulamos os controladores, até que estivessem com um desempenho satisfatório. Então foram realizados ensaios com uma entrada variável, para realizar a observação de desempenho dos controles com desacoplamento, correspondentes às figuras 4, 3. É possível observar que o desempenho foi satisfatório e condizente com os requisitos.

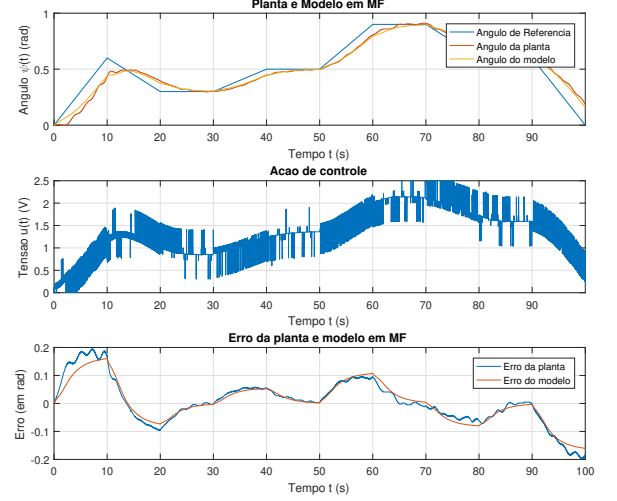


Figura 3: Validação de controle desacoplado de *pitch*.

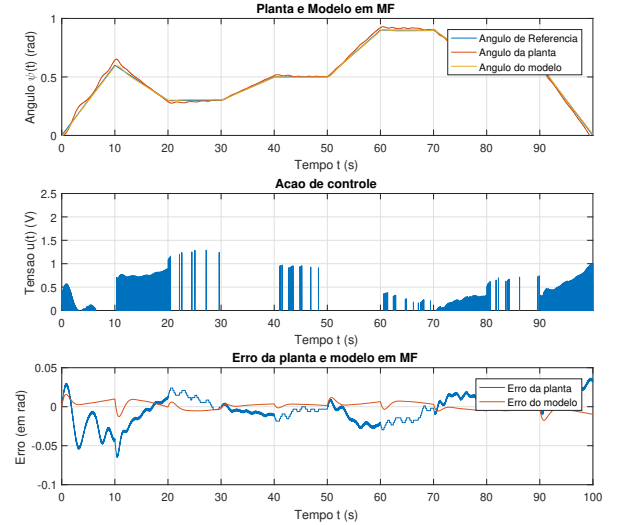


Figura 4: Validação de controle desacoplado de *yaw*.

##### B. Análise de Desempenho

Para a avaliação de desempenho do sistema em malha fechada para a entrada variável mostrada na Figura ??, foi realizada utilizando-se dois índices de desempenho, a Integral do Erro Quadrático (*ISE - Integral Squared Error*) e a Integral do Erro Absoluto (*IAE - Integral Absolute Error*). Os quais foram calculados por meio das equações (1) e (2)

$$ISE = \int_0^T e^2(t) dt \quad (1)$$

$$IEA = \int_0^T |e(t)| dt \quad (2)$$

onde  $e$  é o erro, dado pela diferença entre o *set-point* e o ângulo medido e  $T$  representa a janela de tempo considerada.

Para o *yaw*, obtivemos os seguintes índices:

$$ISE = 2.8430$$

$$IAE = 450.3624$$

E para o *pitch*, obtivemos:

$$ISE = 507.7020$$

$$IAE = 5.5331 \times 10^3$$

## V. CONCLUSÕES

Por meio dessa prática, foi possível controlar, com desempenho satisfatório, uma planta do tipo MIMO, utilizando a técnica de desacoplamento, dessa forma possibilitando o controle para *yaw* e *pitch* independentemente.

## REFERÊNCIAS