

# CAPÍTULO 1

## DESENVOLVIMENTO DE MECANISMO DE VETORIZAÇÃO DA FORÇA DE EMPUXO PARA UM BICÓPTERO DE BANCADA

**Gabriel Henrique Costa e Silva**

**Felipe Machini Malaquias Marques**

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Laboratório de Aeronaves Autônomas (LAA)

[gabriel.henrike@ufu.br](mailto:gabriel.henrike@ufu.br)

**Pedro Augusto Queiroz de Assis**

Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

**RESUMO:** Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um mecanismo de vetorização longitudinal da força de empuxo para um bicóptero de bancada. O sistema desenvolvido se baseia em um mecanismo de quatro barras e visa atender requisitos de massa, velocidade, excursão e ainda reduzir o efeito giroscópico causado pelo movimento dos rotores. Com esse propósito, ferramentas computacionais foram utilizadas no desenvolvimento e na modelagem estática e dinâmica do mecanismo. Os resultados experimentais confirmam que o sistema desenvolvido é capaz de movimentar os rotores atendendo aos requisitos de projeto.

**PALAVRAS-CHAVE:** vetorização da força empuxo, mecanismo de quatro barras, bicóptero.

### Design of a tilt-rotor mechanism for a test bench bicopter

**ABSTRACT:** *This paper presents the design of a longitudinal thrust vectoring mechanism for a test bench bicopter. The proposed system is based on a four-bar mechanism and aims to meet requirements of mass, velocity, excursion and to reduce the gyroscopic effect caused by the movement of the rotors. For this purpose, computational tools were used in the design and static and dynamic modelling of the mechanism. The experimental results confirm that the developed system is able to move the rotors meeting the design requirements.*

**KEYWORDS:** tilt-rotor mechanism, four bar mechanism.

## 1 INTRODUÇÃO

Com intuito de se investigar os efeitos da vetorização da força empuxo em multirrotores, está sendo desenvolvido no laboratório de aeronaves autônomas (LAA) da UFU/ FEMEC, o bicóptero

mostrado na Figura 1a. Nesse veículo, os conjuntos propulsivos, formados por hélice e motor sem escovas, devem ser rotacionados longitudinalmente (vide Figura 1b). Com efeito, além da velocidade de rotação de cada hélice, manipular-se-ão os ângulos entre os eixos de rotação dos conjuntos propulsivos e os braços do bicóptero. Para isso, um mecanismo de vetorização adequado deve ser desenvolvido.

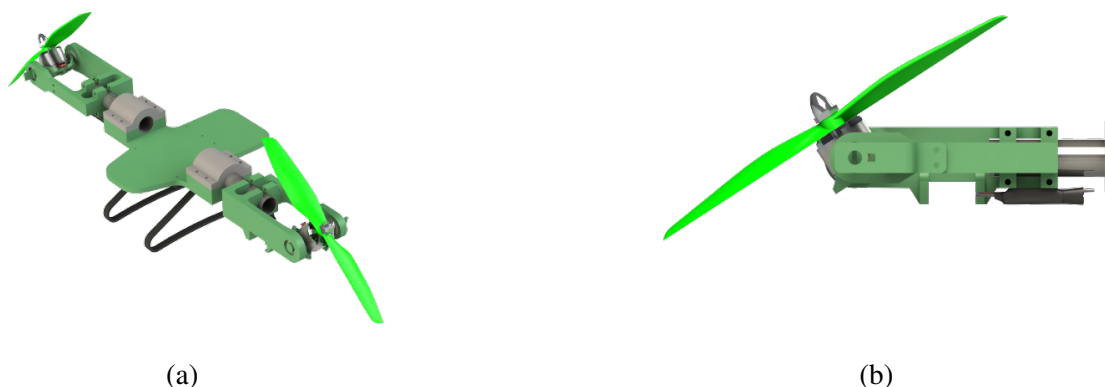


Figura 1: (a) Desenho do bicóptero desenvolvido. (b) Detalhamento da rotação longitudinal do conjunto propulsivo.

Diferentes tipos de mecanismo para realização desse movimento podem ser encontrados na literatura. Em particular, em Badr, Mehrez e Kabeel (2016), propôs-se um sistema com funcionamento similar à de um mecanismo de quatro barras. Contudo, naquele trabalho, a distância vertical entre o centros de massa do conjunto propulsivo e da aeronave é significativa. Como resultado, o efeito dinâmico causado pelo movimento do conjunto propulsivo, isto é, o efeito giroscópio (MARQUES, 2018), pode prejudicar o desempenho do veículo, caso não for considerado no projeto do controlador. Para mitigar esse problema, o presente trabalho envolve o desenvolvimento de um mecanismo de vetorização longitudinal com distância vertical reduzida entre os centros de massa do conjunto propulsivo e do bicóptero. Dessa forma, o efeito giroscópio torna-se desprezível, o que pode levar a simplificações no desenvolvimento do veículo. Além disso, deve-se atender os requisitos de projeto listados a seguir. A massa do mecanismo não pode ser superior a 0,125 Kg, consequência direta da limitação de peso total do multirrotor, o que está associado à de potência dos motores. Mais ainda, o movimento do mecanismo deve ser rápido, para não afetar a dinâmica do veículo, e o conjunto propulsivo deve ter uma excursão entre  $0^\circ$  e  $45^\circ$ .

## 2 DESCRIÇÃO DO MECANISMO DE VETORIZAÇÃO

O mecanismo de vetorização da força de empuxo desenvolvido é composto por suporte do motor, braço do servomotor, haste rígida e ressalto de acoplamento (vide Figura 2a). Tal mecanismo foi construído em plástico ABS usando uma impressora 3D. Após a construção a massa total foi de aproximadamente 0,110 Kg. O mecanismo desenvolvido se assemelha ao mecanismo de quatro

barras mostrado na Figura 2b. O esforço realizado pelo braço do servo é transmitido pela haste rígida até o elemento suporte ao qual o motor está acoplado. Desse modo, uma rotação de  $\theta_{servo}$  do servomecanismo, resulta em uma rotação de  $\alpha$  do conjunto propulsivo. A relação teórica entre  $\theta_{servo}$  e  $\alpha$  pode ser determinada a partir do equacionamento convencional de mecanismo de quatro barras (NORTON, 2010).

O sistema escolhido é do tipo manivela seguidor em que uma barra mais curta ( $\overline{O_2A}$ ) e adjacente a barra fixa ( $\overline{O_1O_2}$ ) pode rotacionar continuamente e a barra movida ( $\overline{O_1B}$ ) apenas oscila. Essa configuração permite uma excursão do suporte do motor ( $0^\circ, 45^\circ$ ) quando o ângulo do servo varia entre ( $180^\circ, 100^\circ$ ). O deslocamento angular  $\alpha$  é medido por um potenciômetro, que é acoplado ao suporte do motor através de um ressalto.

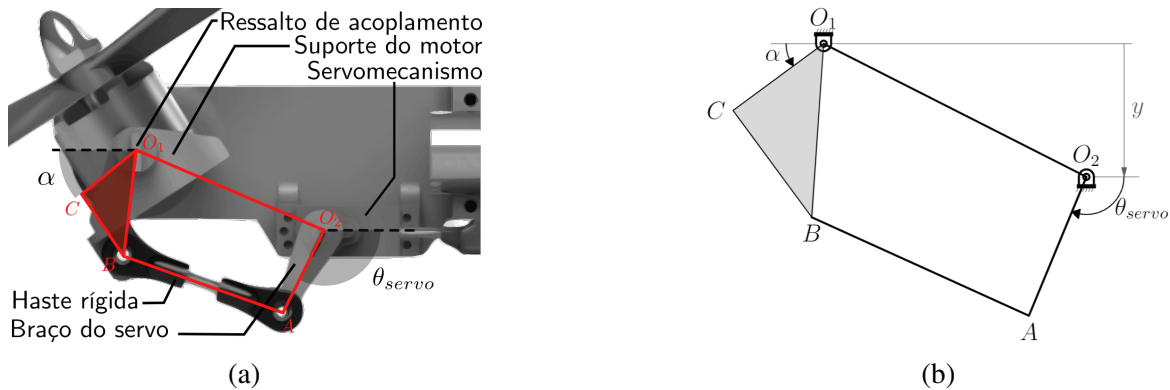


Figura 2: (a) Elementos funcionais do mecanismo de vetorização. (b) Especificação do mecanismo de quatro barras do tipo manivela seguidor.

As dimensões das barras do mecanismo de vetorização foram determinados via software CAD a fim de atender o requisito a excursão do ângulo  $\alpha$  e diminuir a distância vertical entre os centros do conjunto propulsivo e do bicoóptero ( $Z_{cg}$ ). Em particular, as dimensões  $\overline{O_1O_2}$ ,  $\overline{O_2A}$ ,  $\overline{AB}$ ,  $\overline{O_1B}$ ,  $\overline{O_1C}$ ,  $\overline{BC}$  são 0,0425 m, 0,0150 m, 0,0380 m, 0,0216 m, 0,0148 m e 0,0158 m, respectivamente. Também, a distância vertical  $y$  entre os pontos  $O_1$  e  $O_2$  do mecanismo é 0,0179 m e  $Z_{cg}$  de 0,0120 m.

Destaca-se que  $\theta_{servo}$  é controlado por um sinal de modulação de posição de pulso (*Pulse Position Modulation* - PPM) (BIDGOLI, 2007) enviado ao servomecanismo. Nesse tipo de sinal, manipula-se a posição (i.e. o tempo) de um pulso retangular de amplitude e duração constantes ao longo de um ciclo.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foi realizado um ensaio para relacionar o ângulo  $\theta_{servo}$  com a variável manipulada. Mais especificamente, foram medidos ângulos  $\theta_{servo}$  para diferentes posições do pulso retangular (denotadas por PPM). Com base nesses resultados, identificou-se a relação (1) entre PPM e  $\theta_{servo}$ . A Figura 3

compara os dados experimentais com a relação linear obtida.

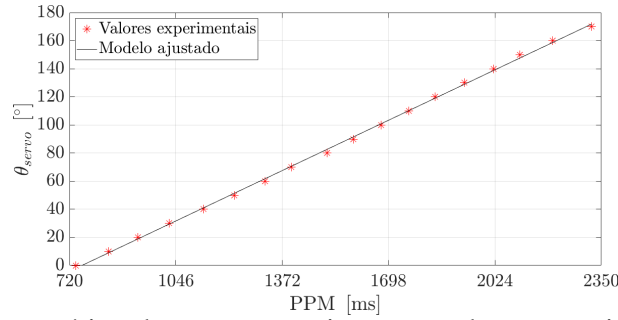


Figura 3: Mapeamento estático do servomecanismo em relação a variável manipulada PPM.

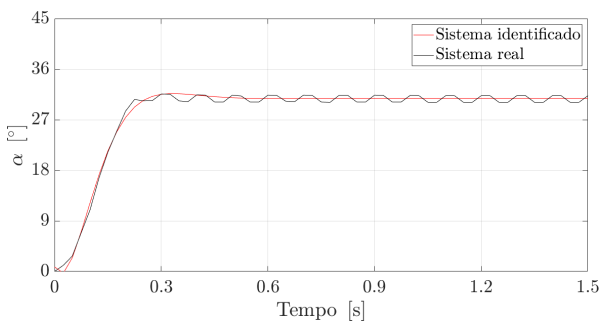
$$\theta_{servo} = 0,11PPM - 83,3864 \quad (1)$$

Doravante, considerar-se-á que o ângulo  $\theta_{servo}$  é controlado diretamente. Na prática, a partir de um valor de  $\theta_{servo}$  desejado, o PPM aplicado ao servo é calculado com base em (1). Além disso, devido à limitação de espaço, serão apresentados apenas os resultados de um dos mecanismos de vetorização desenvolvidos.

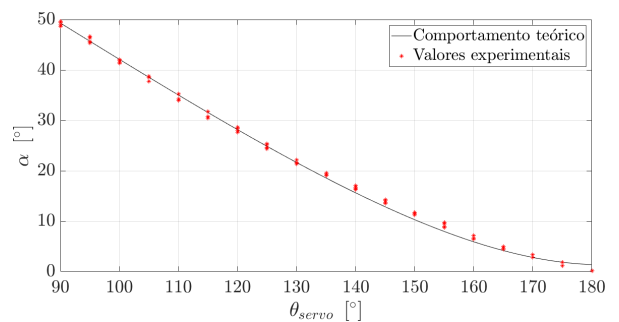
A identificação do modelo dinâmico do mecanismo de vetorização foi realizada a partir da resposta a um degrau de amplitude de  $66,3^\circ$  (partindo de  $180^\circ$  para  $113,7^\circ$ ) aplicado ao servomecanismo. A resposta a esse sinal de entrada é mostrada na Figura 4a. A partir dessa resposta, foi identificada a seguinte função de transferência ( $V(s)$ ) entre  $\theta_{servo}$  e  $\alpha$  utilizando o *System Identification Toolbox* do Matlab:

$$V(s) = \frac{\Theta_{servo}(s)}{\alpha(s)} = \frac{63,9395}{(s - 11,365 + 10i)(s - 11,365 - 10i)} \quad (2)$$

A Figura 4a apresenta uma comparação entre as respostas experimental e a do modelo identificado mostrado em (2). Nota-se que a resposta leva menos de 0,3 s para convergir para o valor final, o que pode ser negligenciável em relação ao tempo de resposta do bicóptero.



(a)



(b)

Figura 4: (a) Comparação entre as respostas ao degrau do sistema real e a do modelo identificado. (b) Comparativo entre as relações estáticas real e simulada entre  $\alpha$  e  $\theta_{servo}$  do mecanismo desenvolvido.

Também foram comparadas as relações estáticas teórica (obtida a partir do equacionamento do mecanismo de quatro barras) e experimental entre  $\alpha$  e  $\theta_{servo}$ . Essa comparação é mostrada na Figura 4b. Observa-se que o comportamento experimental do mecanismo de vetorização é bastante similar ao comportamento esperado dentro da excursão de  $\alpha \in [0, 50^\circ]$ .

## 4 CONCLUSÕES

Este trabalho envolveu o desenvolvimento de um mecanismo de vetorização longitudinal da força de empuxo para um bicóptero de bancada. Tal desenvolvimento foi realizado para diminuir a distância entre os centros de massa da aeronave e do conjunto propulsivo, reduzindo, assim, o efeito giroscópio sobre a aeronave. O mecanismo desenvolvido foi baseado em um sistema de quatro barras considerando requisitos de massa, velocidade e excursão total. Para isso, foi utilizado software CAD no desenvolvimento e na realização de simulações cinemáticas, que auxiliaram no ajuste das dimensões dos elos.

Resultados experimentais mostraram que o mecanismo desenvolvido atende os requisitos de excursão do ângulo de inclinação do rotor, massa e ainda proporciona uma distância reduzida entre os centros de massa do conjunto propulsivo e do bicóptero. A distância final entre tais centros foi de 12 mm.

Trabalhos futuros podem realizar a síntese do mecanismo longitudinal a partir da minimização um índice de desempenho. Por exemplo, dimensionar o mecanismo de modo a reduzir o esforço realizado pelo servomecanismo.

## 5 AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 88887.355806/2019-00.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BADR, S.; MEHREZ, O.; KABEEL, A. A novel modification for a quadrotor design. In: IEEE. **2016 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)**. [S.l.], 2016. p. 702–710.
- BIDGOLI, H. **The Handbook of Computer Networks, Key Concepts, Data Transmission, and Digital and Optical Networks**. [S.l.]: Wiley, 2007. v. 1.
- MARQUES, F. M. M. **Modeling, Simulation and Control of a Generic Tilting Rotor Multi-Copter**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.
- NORTON, R. L. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos**. [S.l.]: Mc Graw Hill, 2010.