

CONTROLE NÃO LINEAR

Modeling and Passivity-Based Control for a convertible fixed-wing VTOL

THAYRON MIRANDA
thayron.hudson@ufv.br

GABRIEL MUNIZ
gabriel.muniz@ufv.br

SUMÁRIO

- 1. Introdução
- 2. Objetivos
- 3. Metodologia
- 4. Resultados
 - 4.1. Trajetória 1
 - 4.2. Trajetória 2
 - 4.3. Trajetória 3
- 5. Referências

1 INTRODUÇÃO

INTRODUÇÃO

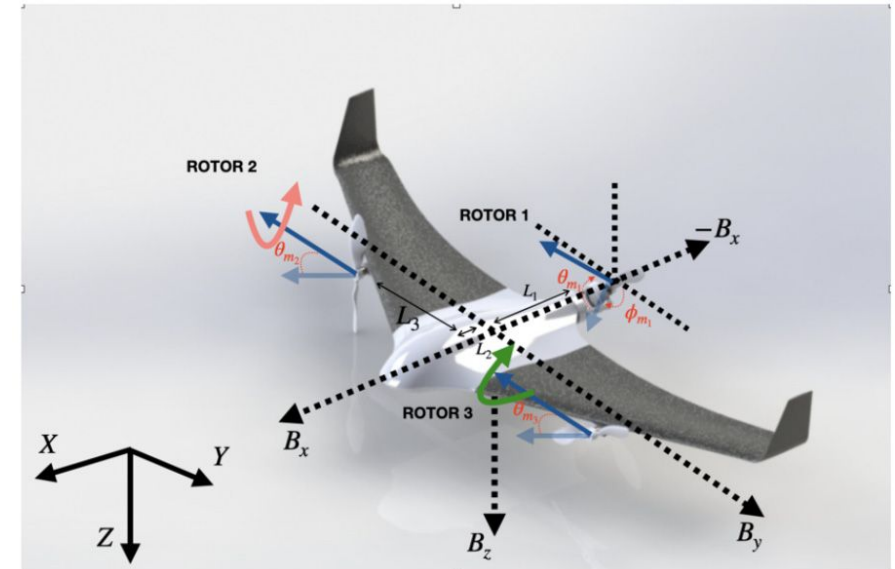
- ❑ Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) são amplamente utilizados em diferentes setores.
- ❑ Dois tipos predominantes:
 - ❑ **Asa fixa:** maior alcance e velocidade.
 - ❑ **Multirrotores:** pairam com precisão e pousam em espaços reduzidos.
- ❑ VTOLs conversíveis integram vantagens de ambos os tipos.
- ❑ Desafio: **controlar dinâmicas contrastantes** em voos estacionário e de cruzeiro.



2 OBJETIVOS

OBJETIVOS

- ❑ Desenvolver um **modelo matemático não linear** para um VTOL com asas fixas e rotores inclináveis.
- ❑ Projetar uma **lei de controle baseada em passividade (PBC)** para estabilizar o veículo em transições de voo.
- ❑ Implementar um **algoritmo de alocação de controle** que permita o desacoplamento dos ângulos dos motores frontais.
- ❑ Validar o desempenho via **simulações numéricas**.



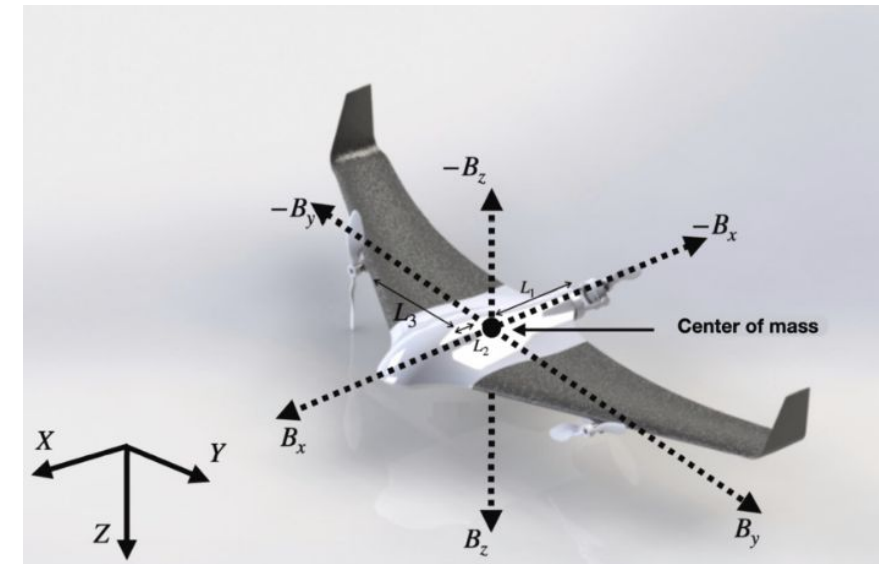
3 METODOLOGIA

METODOLOGIA - MODELAGEM

- ❑ Modelo baseado em **6 graus de liberdade (6-DOF)**: posições e orientações no espaço.
- ❑ Considera:
 - ❑ Efeitos aerodinâmicos completos.
 - ❑ Forças e momentos gerados pelos motores inclináveis.
 - ❑ Estrutura com **três motores**: dois frontais independentes e um traseiro com dois graus de liberdade.
 - ❑ Controlador baseado em modelo não linearizado.
 - ❑ Trajetórias variáveis no tempo.
- ❑ Formulado via **equações de Euler-Lagrange**.

METODOLOGIA - MODELAGEM

- ❑ Cada motor possui um servo motor, que traz controle independente da angulação.
- ❑ O controle estabiliza a rotação e a translação durante a transição entre os modos de voo.
- ❑ Um algoritmo de alocação converte os comandos virtuais do controle em ações reais para os motores.



MODELAGEM - Euler-Lagrange

$$\Delta \ddot{\lambda} + C(\dot{\lambda}) \dot{\lambda} + G(\lambda) = C_m + F_m$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & -I_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{xz} & 0 & I_z \end{bmatrix};$$

$$C(\dot{\lambda}) = \begin{bmatrix} 0 & -mr & mq & 0 & 0 & 0 \\ mr & 0 & -mp & 0 & 0 & 0 \\ -mq & mp & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{xz}q & -I_{yy}r & I_{zz}q \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx}r + I_{xz}p & 0 & -I_{xz}r - I_{zz}p \\ 0 & 0 & 0 & -I_{xx}q & I_{yy}p & I_{xz}q \end{bmatrix};$$

$$G(\lambda) = \begin{bmatrix} -mg \sin \theta \\ mg \cos \theta \sin \phi \\ mg \cos \theta \cos \phi \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C_m = \begin{bmatrix} -D \\ N \\ -L \\ L_A \\ M_A \\ N_A \end{bmatrix}; \quad F_m = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}.$$

METODOLOGIA - CONTROLE PASSIVO

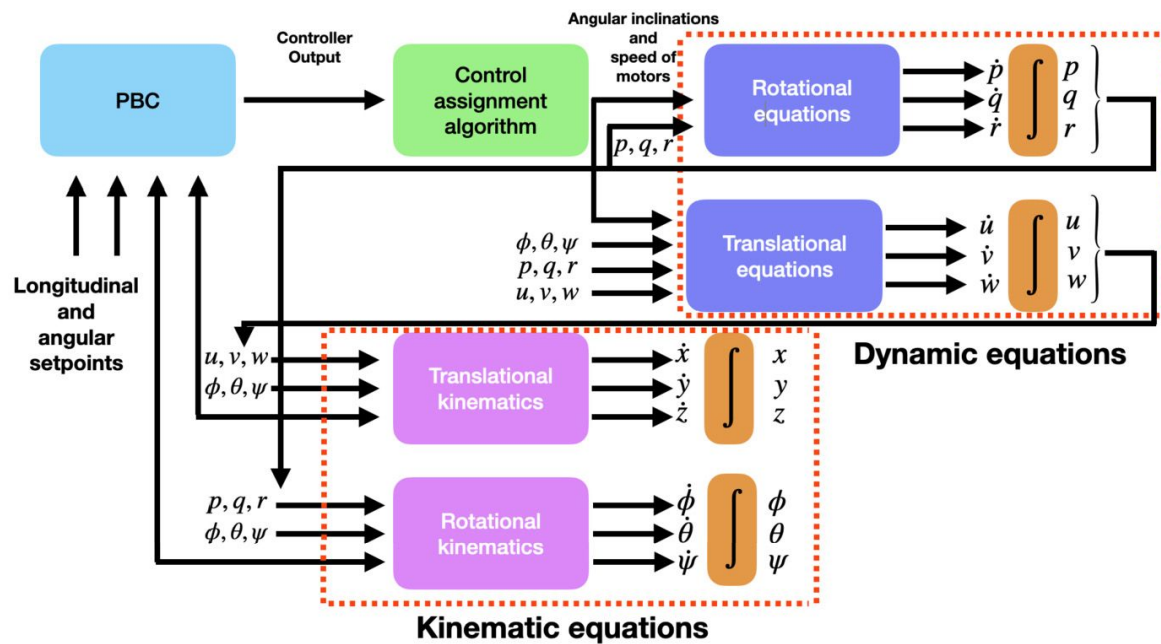
- ❑ O sistema é **completamente atuado**, permitindo a aplicação do PBC.
- ❑ Energia total:

$$H(\lambda, \dot{\lambda}) = \frac{1}{2} \dot{\lambda}^T \Delta \dot{\lambda} + V(\lambda);$$

- ❑ Entrada de controle é dividida em:
 - ❑ **Modelagem de energia** (δ_e) – molda a energia potencial desejada.
 - ❑ **Injeção de amortecimento** (δ_{di}) – garante dissipação.
- ❑ PBC permite transições suaves entre modos de voo, respeitando as leis físicas do sistema.

MODELAGEM - PBC

$$H(\lambda, \dot{\lambda}) = \frac{1}{2} \dot{\lambda}^T \Delta \dot{\lambda} + V(\lambda);$$



$$V(\lambda) = mgz.$$

$$\delta = \delta_{es} + \delta_{di}.$$

$$-\int_0^T \delta_{es}^T[\lambda(t)]y(t)dt = H_a[\lambda(t)] + k;$$

$$\delta_{es}(\lambda) = m\bar{g} - K_p(\lambda - \lambda_*);$$

$$Kp1 = \text{diag} [23 \ 28 \ 23]$$

$$Kp2 = \text{diag} [46 \ 57 \ 46]$$

$$Kv = \text{diag} [10 \ 15 \ 10 \ 18 \ 22 \ 18]$$

$$u_{di}(\dot{\delta}) = -K_v(\dot{\lambda} - \dot{\lambda}_*);$$

$$K_v = K_v^T = \text{diag} [10 \ 15 \ 10 \ 18 \ 22 \ 18].$$

METODOLOGIA - ALOCAÇÃO DE CONTROLE

- ❑ Transforma os **6 comandos virtuais** (forças e torques desejados) em **7 entradas reais**:
 - ❑ Velocidades angulares dos motores.
 - ❑ Ângulos de inclinação dos motores (independentes).

$$\delta_m = \left[\Omega_1^2 \quad \Omega_2^2 \quad \Omega_3^2 \quad \theta_{m_1} \quad \psi_{m_1} \quad \theta_{m_2} \quad \theta_{m_3} \right]^T ;$$

$$\delta = \Upsilon u;$$

$$u = \begin{bmatrix} \Omega_1^2 \sin \theta_{m_1} \\ \Omega_1^2 \cos \theta_{m_1} \cos \psi_{m_1} \\ \Omega_1^2 \cos \theta_{m_1} \sin \psi_{m_1} \\ \Omega_2^2 \sin \theta_{m_2} \\ \Omega_2^2 \cos \theta_{m_2} \\ \Omega_3^2 \sin \theta_{m_3} \\ \Omega_3^2 \cos \theta_{m_3} \end{bmatrix}.$$

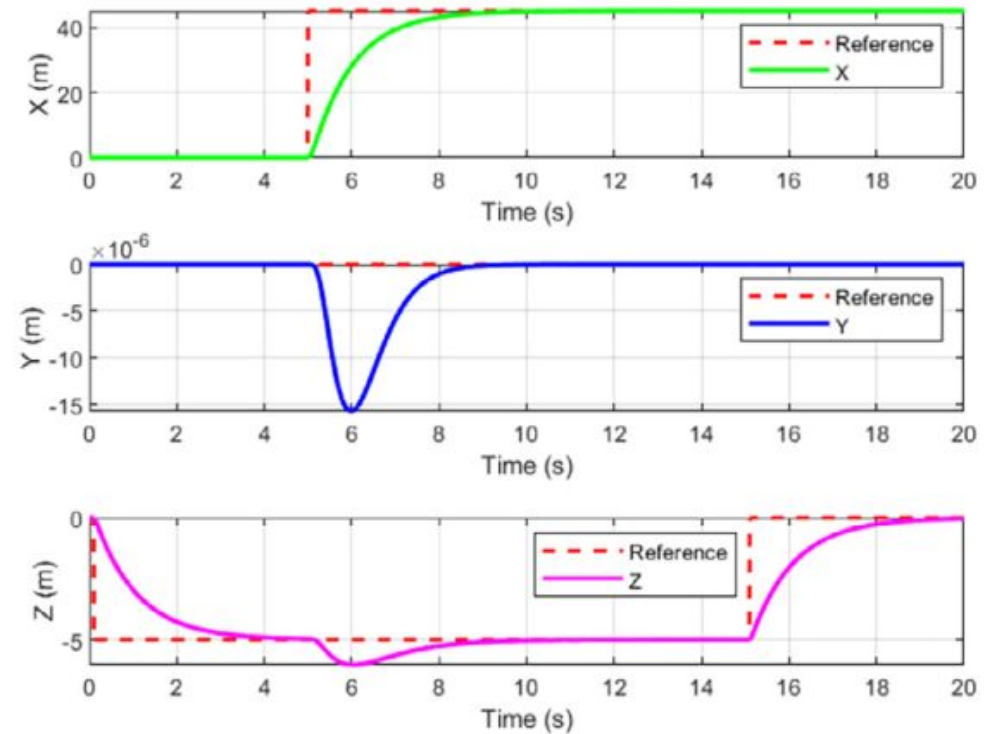
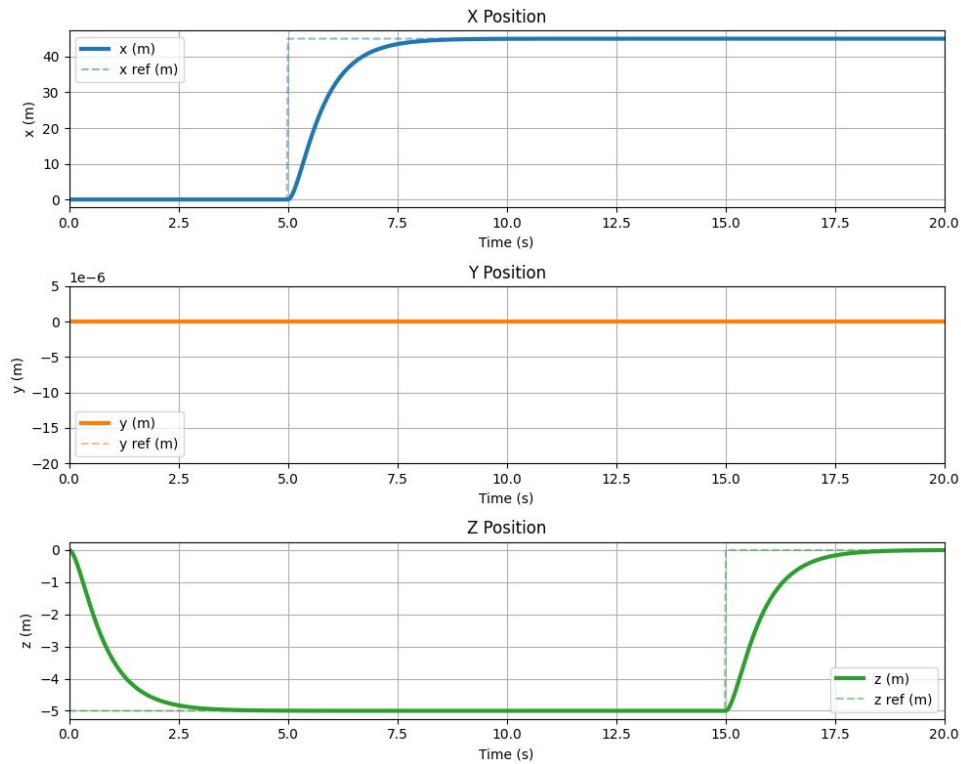
$$\Upsilon = \begin{bmatrix} 0 & 0 & K_F & 0 & K_F & 0 & K_F \\ 0 & -K_F & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_F & 0 & 0 & -K_F & 0 & -K_F & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_3 K_F & 0 & -L_3 K_F & 0 \\ -L_1 K_F & 0 & 0 & L_2 K_F & 0 & L_2 K_F & 0 \\ K_M & -L_1 K_F & 0 & K_M & L_3 K_F & K_M & -L_3 K_F \end{bmatrix}.$$

4 RESULTADOS

TRAJETÓRIA 1

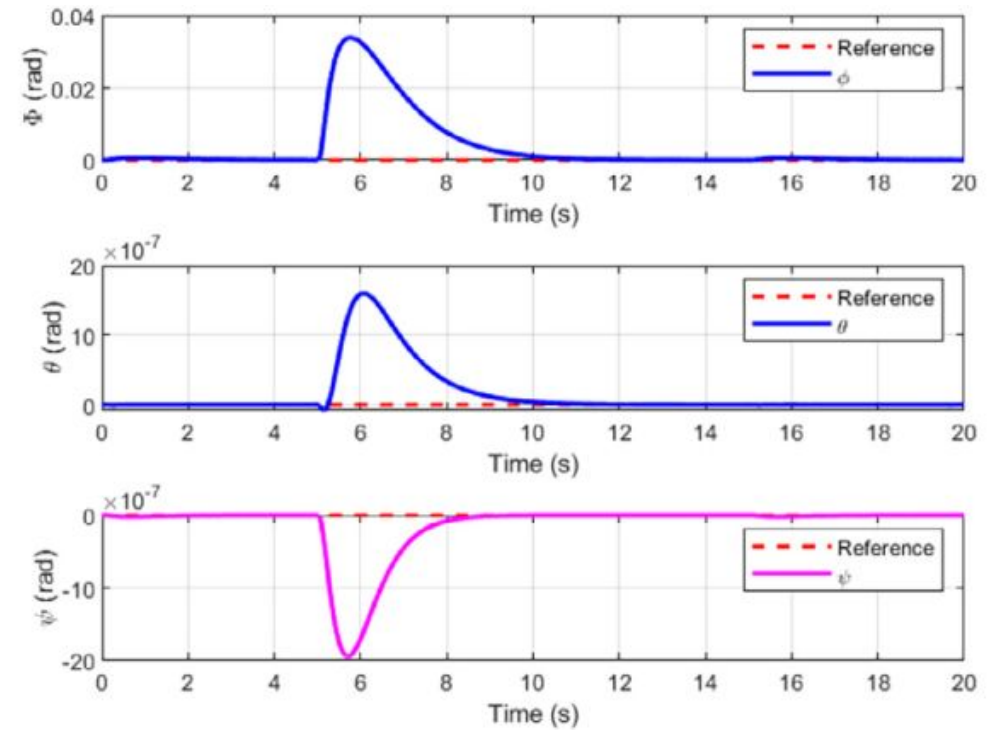
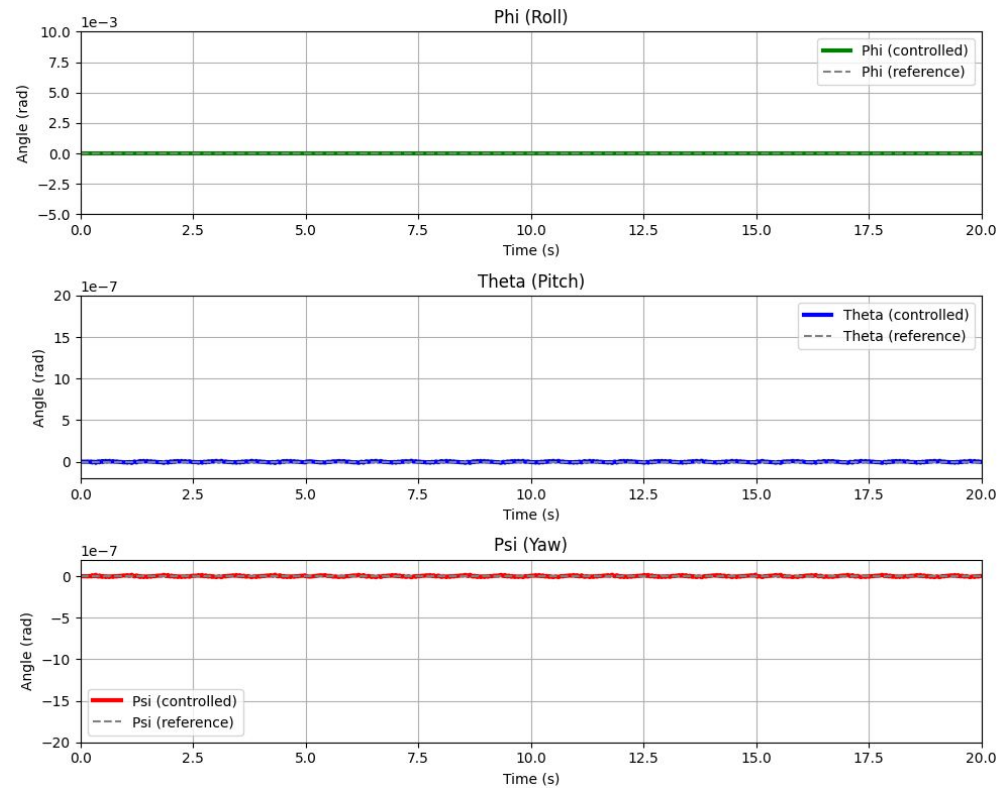
$$\lambda_* = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 & 0 & -5 \end{bmatrix}^T, & 0 < t < 5 \\ \begin{bmatrix} 45 & 0 & -5 \end{bmatrix}^T, & 5 \leq t < 15 \\ \begin{bmatrix} 45 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, & t \geq 15 \end{cases}$$

TRAJETÓRIA 1



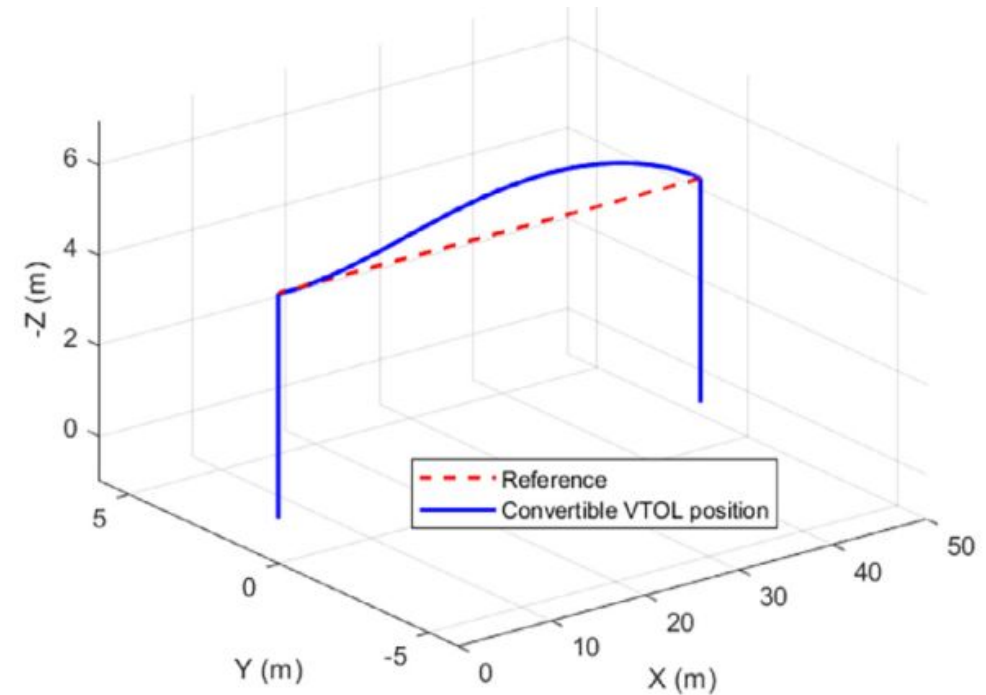
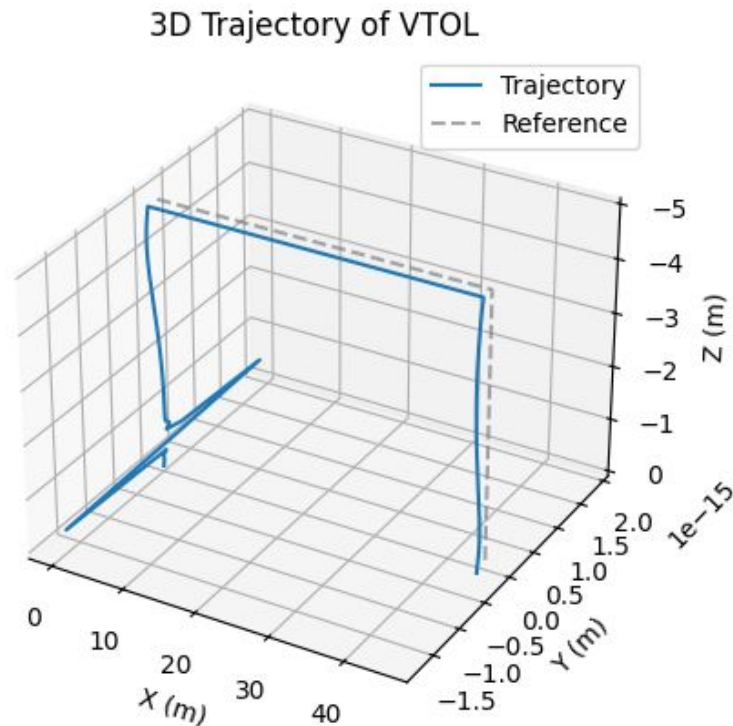
(a) Position.

TRAJETÓRIA 1



(b) Attitude.

TRAJETÓRIA 1

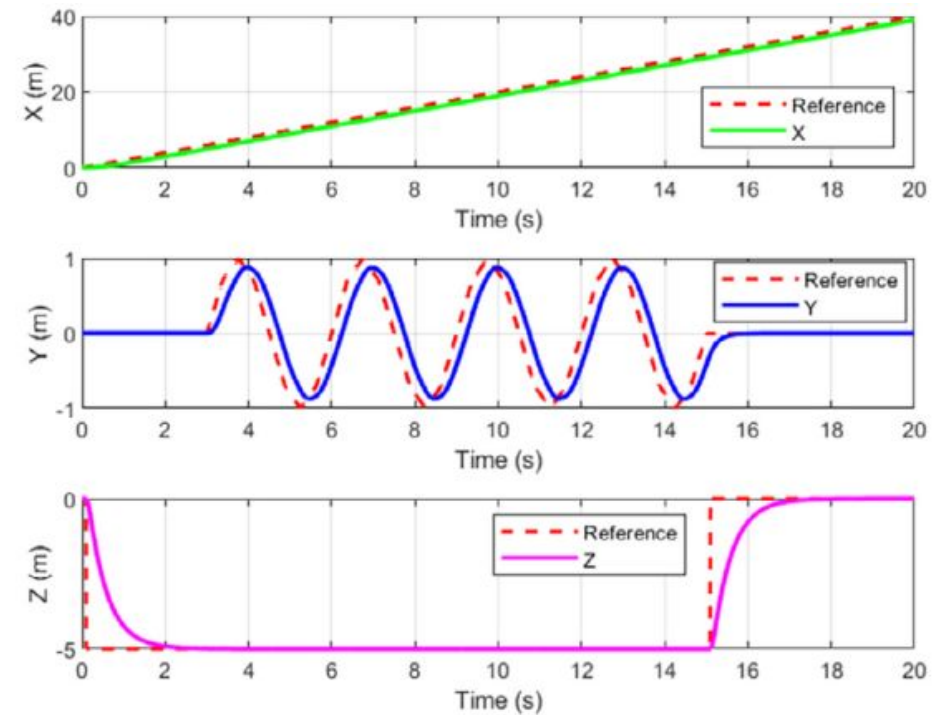
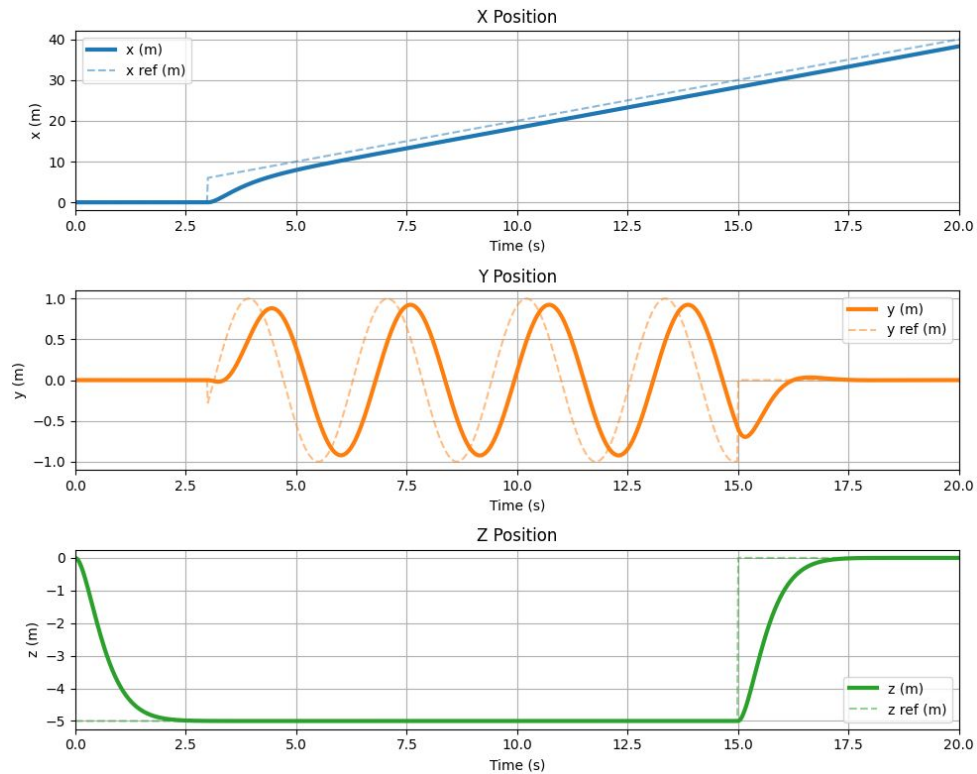


(e) Three-dimensional trajectory.

TRAJETÓRIA 2

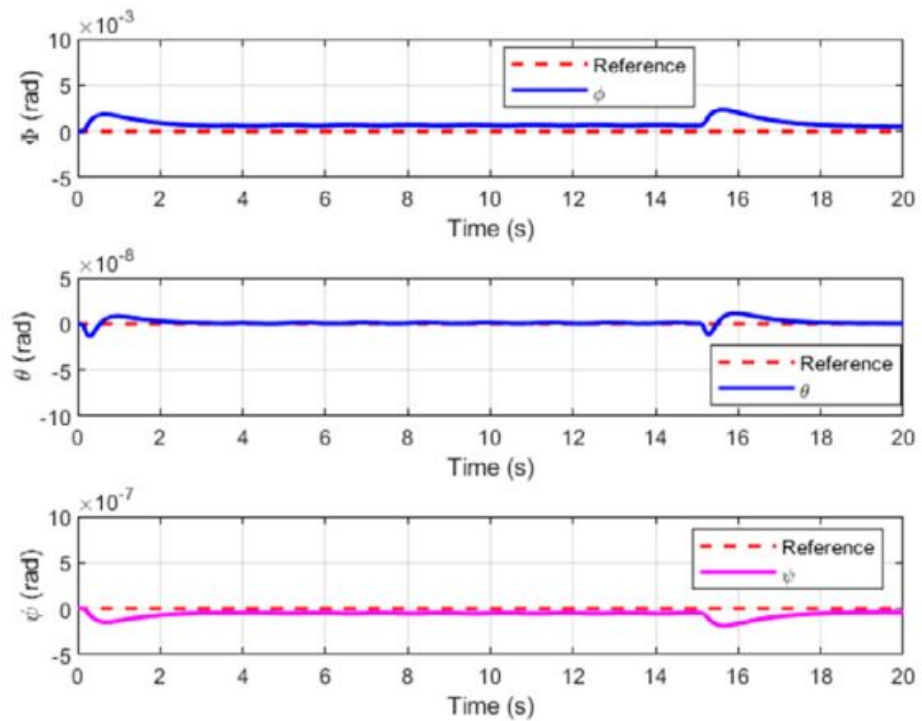
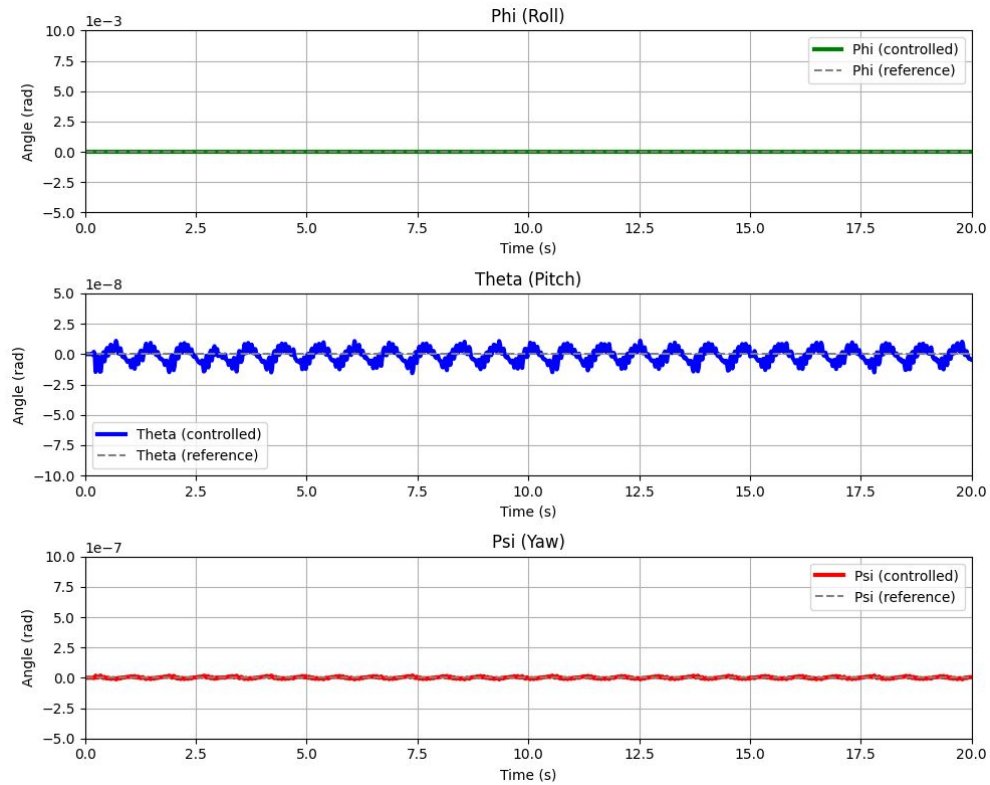
$$\lambda_* = \begin{cases} [0 \ 0 \ -5]^T, & 0 < t < 3 \\ [2t \ \sin(2t) \ -5]^T, & 3 \leq t < 15 \\ [2t \ 0 \ 0]^T, & 15 \leq t \leq 20 \end{cases}$$

TRAJETÓRIA 2



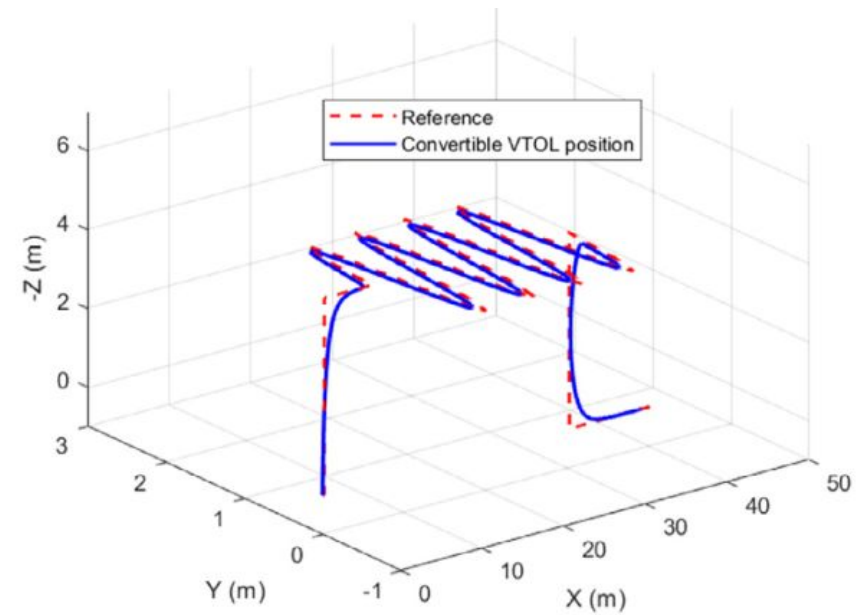
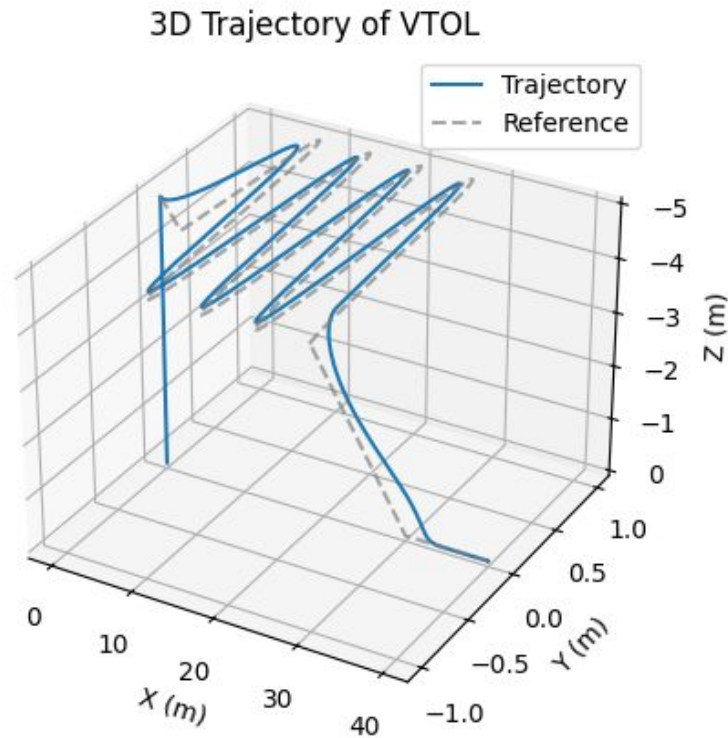
(a) Position.

TRAJETÓRIA 2



(b) Attitude.

TRAJETÓRIA 2

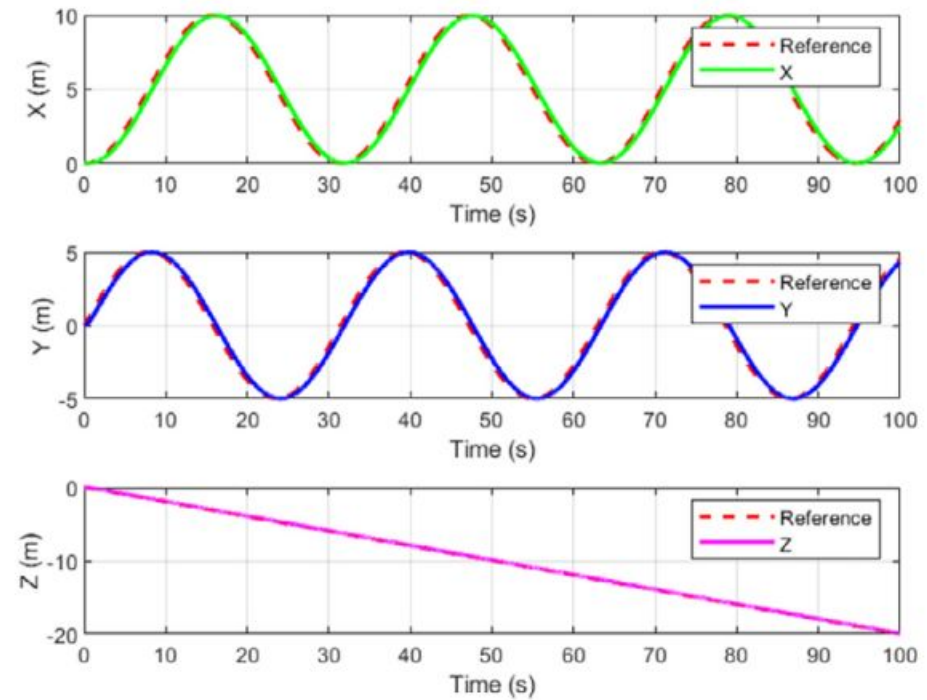
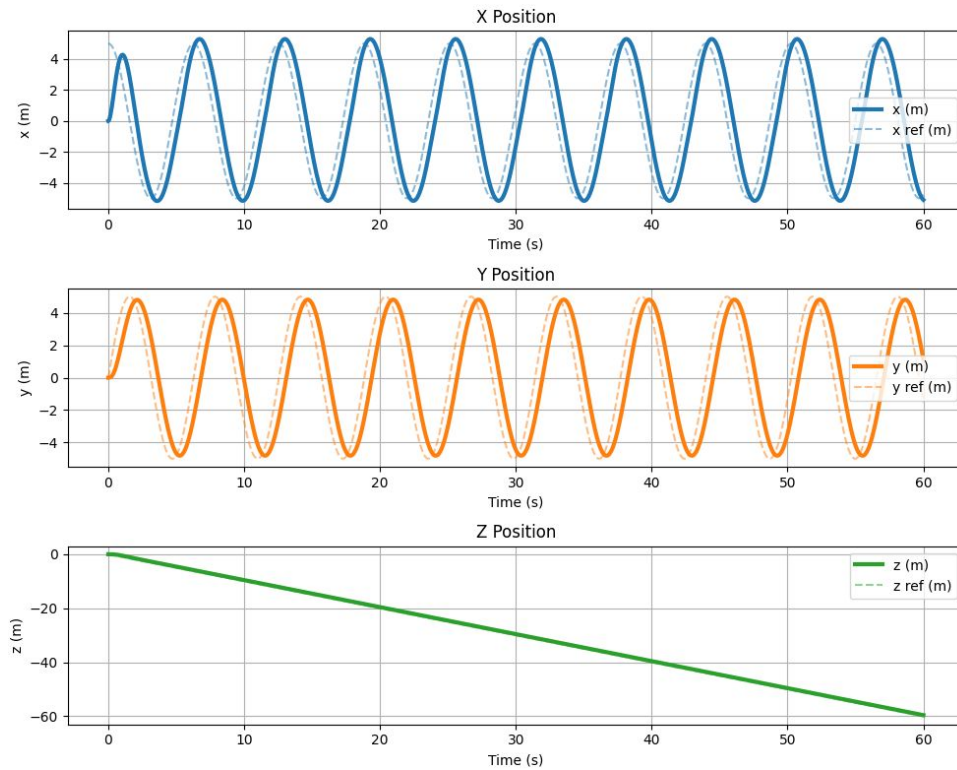


(d) Three-dimensional trajectory.

TRAJETÓRIA 3

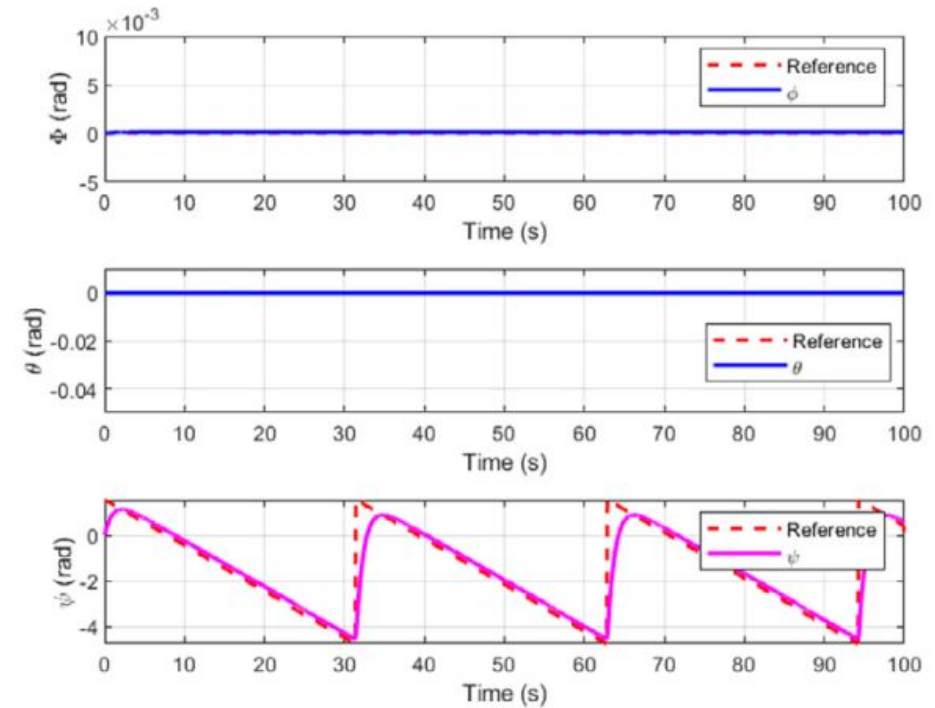
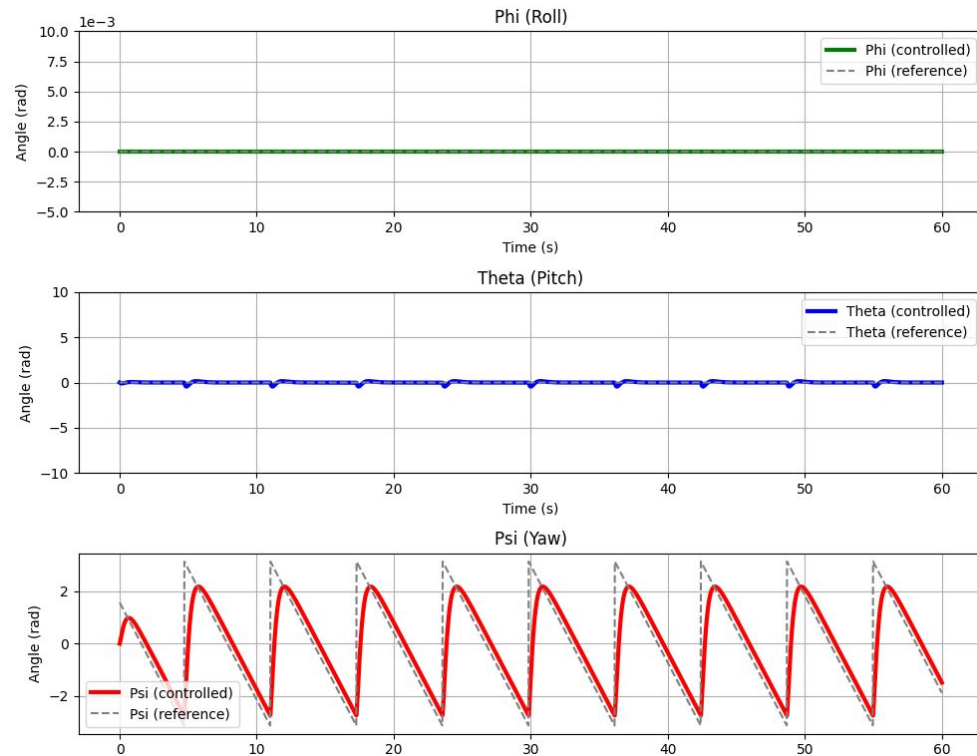
$$\lambda_* = \begin{bmatrix} 5 \cos(t) & 5 \sin(t) & t \end{bmatrix}^T, \quad 0 < t \leq 100$$

TRAJETÓRIA 3



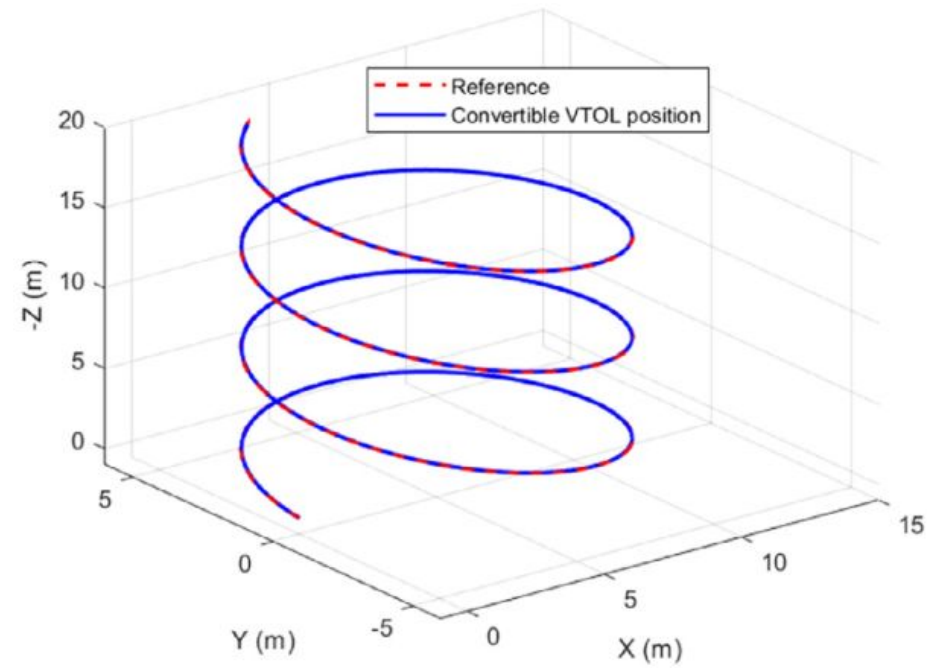
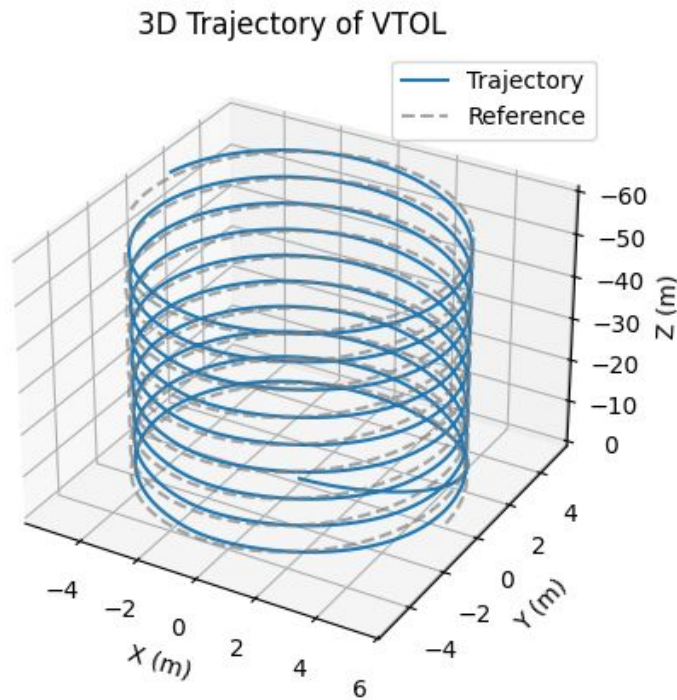
(a) Position.

TRAJETÓRIA 3



(b) Attitude.

TRAJETÓRIA 3



(c) Three-dimensional trajectory.

5 REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- DURÁN-DELFÍN, J. E. et al. Modeling and Passivity-Based Control for a convertible fixed-wing VTOL. **Applied Mathematics and Computation**, v. 461, p. 128298, 2024.
- https://github.com/thayronDG/control_e_nao_linear

CONTROLE NÃO LINEAR
Obrigado!

THAYRON HUDSON
thayron.hudson@ufv.br

Gabriel Víctor M. Muniz
gabriel.muniz@ufv.br