

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## PRUEBAS SOBRE EL CONTROLADOR

El objetivo de la presente sección es el de analizar el desempeño del controlador. Nos concentraremos entonces en analizar algunos parámetros fundamentales del mismo, es de particular interés conocer la respuesta al escalón del sistema para los tres tipos de trayectoria definidos. Modificando la altura del escalón se puede determinar la aceleración máxima a la cual podemos someter al sistema en cada trayectoria, esto resulta fundamental a la hora de imponer restricciones sobre la ruta que se desea seguir. Se analizará además la robustez del controlador implementado, para esto se añade un ruido a los estados realimentados, dicho ruido intenta representar el ruido asociado a las medidas de los sensores. El simulador desarrollado nos permite agregar a cada estado un ruido que cumple con el siguiente modelo:

$$\eta_i = A_i \cos(\omega t) + \varepsilon(\mu, \sigma) \quad (1.1)$$

Donde  $\varepsilon(\mu, \sigma)$  es un ruido gaussiano de media  $\mu$  y de desviación estándar  $\sigma$ .

### 1.1. Respuesta al escalón

Nos centraremos en estudiar las respuestas al escalón de los tres tipos de trayectorias. En esta sección no se consideran medidas con ruido, es decir que se conoce el estado a la perfección.

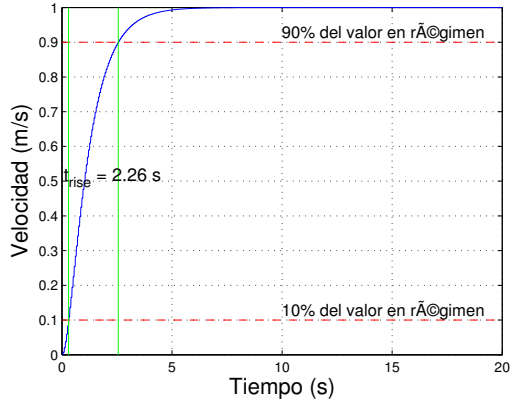
#### 1.1.1. Trayectoria de hovering

##### Desplazamientos en la dirección vertical

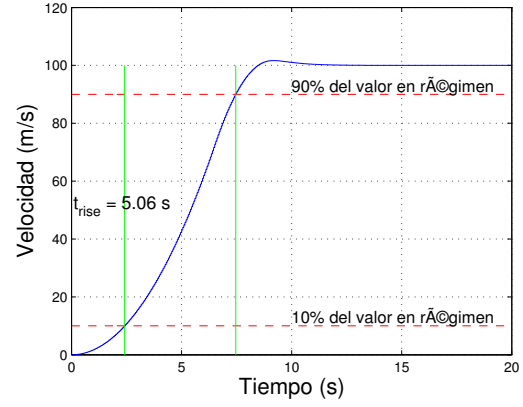
Se consideran condiciones iniciales nulas. Se fija como setpoint:

- Prueba 1:  $x_s = 0m$ ;  $y_s = 0m$ ;  $z_s = 1m$ ;  $\theta = 0^\circ_s$
- Prueba 2:  $x_s = 0m$ ;  $y_s = 0m$ ;  $z_s = 100m$ ;  $\theta = 0^\circ_s$

No se aprecian variaciones en ninguna de las variables de estado excepto en la posición vertical ( $z$ ) y en la velocidad  $v_{q_z}$ . Este resultado es perfectamente esperable ya que todas las variables excepto  $z$  son iguales al setpoint inicialmente. Para modificar la altura es necesario modificar la velocidad  $v_{q_z}$ , lo cual explica su variación. La respuesta al escalón para las pruebas uno y dos se muestran en la figura 1.1.

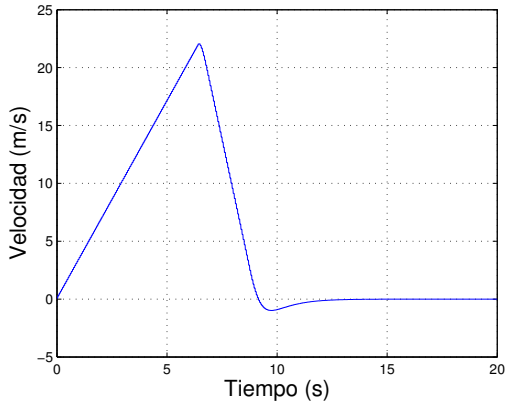


(a) Escalón de altura 1 m

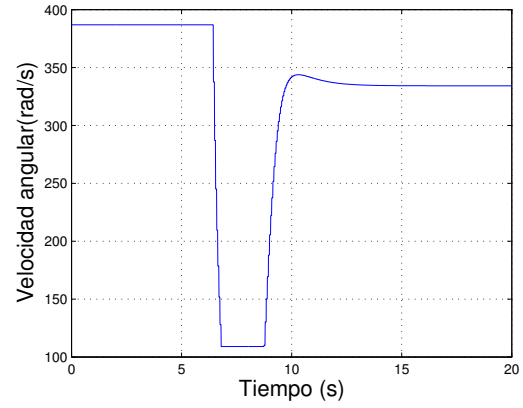


(b) Escalón de altura 100 m

Figura 1.1: Respuesta al escalón en la altura



(a) Velocidad en la dirección vertical



(b) Velocidad angular del motor 1

Figura 1.2: Respuestas de la velocidad vertical y la velocidad angular de los motores para el escalón de 100m

Tanto el tiempo de *rise* como el sobretiro presentado por la respuesta al escalón son considerados ampliamente satisfactorios. Para la primera prueba se obtiene un tiempo de *rise* de 2,26s y no hay sobretiro. Para el escalón de 100m el tiempo de *rise* es de 5,06s. En esta prueba aparece un sobretiro inferior a los dos metros.

Los resultados obtenidos en la simulación son ampliamente satisfactorios ya que nos indican que se puede alcanzar un rango de alturas muy amplio en pocos segundos sin que el sistema presente comportamientos que impliquen inestabilidad. Por otra parte se observa en ambas pruebas que una vez alcanzado el valor objetivo se mantiene perfectamente.

Si estudiamos la velocidad vertical del sistema en la segunda prueba nos encontramos con que se alcanza la velocidad máxima (  $22,05ms^{-1}$  ) en 6,46s. Lo cual implica una aceleración de  $3,41ms^{-2}$ . Por otra parte, luego de alcanzada la velocidad máxima esta comienza a disminuir, la aceleración el tramo en cuestión es de  $-7,09ms^{-2}$ . Estas aceleraciones son la máxima y mínima posible en la dirección

vertical ya que, como puede observarse en la figura 1.2b la velocidad angular de los motores satura, llegando tanto a su velocidad máxima y mínima.

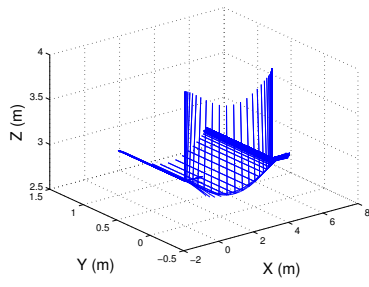
## Desplazamientos en la dirección horizontal

Partiendo de condiciones iniciales nulas excepto la altura donde se considera  $z = 3m$ , se fija el siguiente setpoint:

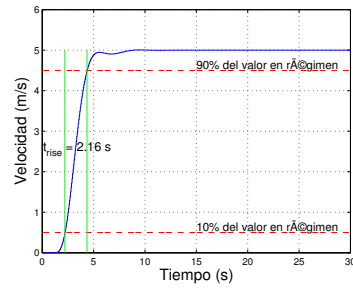
$$\blacksquare \quad x_s = 5m; \quad y_s = 0m; \quad z_s = 3m; \quad \theta = 0_s^\circ$$

En la figura 1.3a se observa la trayectoria del sistema solidario al cuadricóptero a lo largo del tiempo. El comportamiento es acorde a lo esperado. Se observa que el cuadricóptero tiende a descender inicialmente para luego recuperar su posición inicial. Esto se debe a que en el instante en el cual se produce el escalón en el setpoint, se tiene que  $z - z_s = 0$ , por lo tanto, los términos de  $K$  que dependen de las diferencias no se hacen presentes en la realimentación, a diferencia de lo que sucede con los términos que dependen de  $x - x_s$ . Todo sucede como si inicialmente el controlador no controlara la altura. En la figura 1.3c puede apreciarse que la variación de la altura es cercana a los  $0,3m$ . Se realizaron simulaciones para valores de  $x_s > 5m$ , pero los resultados en cuanto a la variación de las restantes variables de estado no fueron considerados satisfactorios. Por otra parte la aceleración máxima a la cual debería ser sometido el cuadricóptero en la dirección horizontal debes ser menor a los  $2ms^{-2}$ . Estos últimos aspectos no implican que el control para la condición de hovering sea defectuoso, el controlador fue diseñado linealizando en torno a una trayectoria en la cual  $\vec{V} = 0$ , por lo tanto es razonable suponer que para no sea adecuado para controlar desplazamientos importantes. En el caso del eje  $z$  se obtuvo un desplazamiento importante ya que solamente es necesario modificar la variable  $v_{q_z}$  la cual, al tener  $\vec{\omega} = 0$  no implica variaciones en ninguna otra variable de estado. Para realizar un desplazamiento según la dirección horizontal deben modificarse o bien el ángulo de Roll o bien el ángulo de Pitch. Sucede que tanto, las velocidades como las posiciones dependen de dichos ángulos, por lo tanto variaciones importantes en los mismos nos alejan de la condición para la cual se linealizó el sistema.

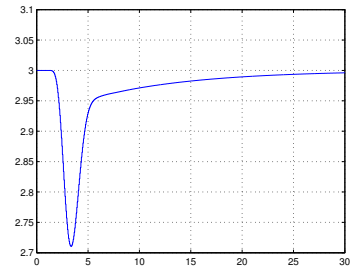
En resumen, se desarrolló un controlador que nos permite grandes desplazamientos en la dirección vertical ( $\approx 100m$ ) y desplazamientos inferiores a los  $5m$  en la horizontal, con tiempos de respuesta inferiores a los  $5,06s$  y  $2,16s$  respectivamente, al menos sin presencia de ruido de medición.



(a) Ejes solidarios al cuadricóptero a lo largo del tiempo



(b) Posición según  $\vec{i}_I$



(c) Altura en m

Figura 1.3: Escalón de 2m en la dirección horizontal