

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## SIMULACIONES DEL MODELO FÍSICO

Luego de desarrollado un modelo físico resulta fundamental disponer de un entorno para realizar simulaciones. Las razones para construir un simulador son evidentes. En primer lugar resulta fundamental para comprobar que el modelo realizado se comporta acorde a lo que uno espera a priori del sistema. Para este tipo de pruebas se trabajará con las situaciones más sencillas en las cuales se puede calcular la trayectoria trivialmente. El segundo objetivo del simulador es poder conocer el comportamiento de nuestro sistema frente a algunas acciones de control determinadas. Por ejemplo conocer la trayectoria que desarrolla el cuadricóptero si accionamos solamente uno de los motores o cualquier combinación que sea pertinente de estudio. El simulador es utilizado también para verificar el funcionamiento del Filtro de Kalman Extendido realizado para la integración de los sensores (Ver capítulo ??). Se puede generar una trayectoria a la cual se le agrega ruido que simule el ruido de medida de los sensores. Luego se puede comparar la trayectoria obtenida con el filtrado de Kalman con la generada inicialmente. Por ltimo y fundamentalmente el simulador será clave para testear y mejorar los algoritmos de control desarrollados. Previo a testear con el sistema real y a fin de evitar daños sobre el mismo, se deben verificar dichos algoritmos en el simulador. Por los motivos expresados es necesario que el simulador represente fielmente el modelo físico y se comporte acorde a la realidad.

El diseño del simulador se realiza utilizando Simulink. Dado que se debe trabajar con funciones que no dependen exclusivamente del tiempo, no fue posible desarrollar un simulador que resolviera directamente las ecuaciones diferenciales que gobiernan al sistema utilizando un método más directo, como por ejemplo *ODE45*.

### 1.1. Estructura del Simulador

El simulador se compone de tres elementos fundamentales. El lazo abierto, es decir las ecuaciones que gobiernan al cuadricóptero. En dicho sistema tenemos como entradas las velocidades angulares del sistema sobre las cuales realizaremos las acciones de control y como salidas tenemos el vector de estados del sistema en todos los instantes desde el tiempo inicial establecido en la simulación hasta el tiempo

final. Se compone además de un bloque encargado de generar las rutas a seguir por el cuadricóptero a partir de los *waypoints* que se ingresen. Finalmente una tercer parte que se encarga de simular el control. Este último bloque se vale de los dos anteriores.

### 1.1.1. Lazo Abierto

La estructura que se eligió para desarrollar esta sección se corresponde en buena forma con el camino que se recorrió para determinar el modelo. Por dicho motivo la estructura de esta parte del simulador se descompone en tres bloques. En la figura 1.1 se observa la estructura global del lazo abierto. En la figura 1.2 se observa una captura de pantalla que representa la vista general de la parte encargada de simular el lazo abierto.

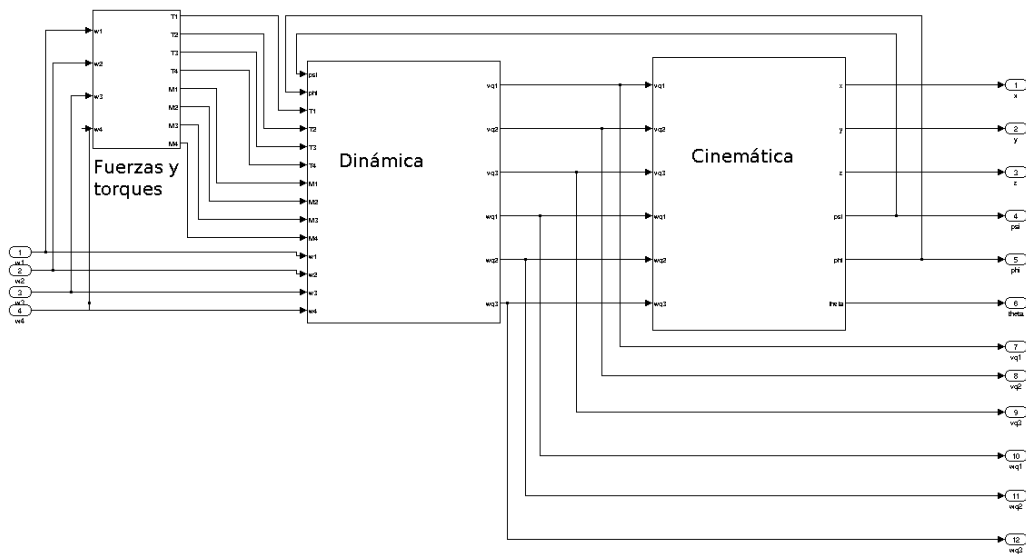


Figura 1.1: Bloque de lazo abierto

### Cinemática

En la figura 1.3a se puede observar un diagrama de bloques de la parte del sistema que transforma las velocidades lineales y angulares en posiciones y ángulos de Euler. Se distinguen dos sub-bloques principales, uno encargado de devolver la posición y otro encargado de devolver los ángulos de Euler.

### Dinámica

Al igual que el bloque anterior, se divide este en dos sub-bloques más (ver figura 1.3b). Los bloques en este caso son el que devuelve las velocidades angulares y las lineales.

## 1.2. Simulaciones

En esta sección procederemos a realizar algunas simulaciones a fin de verificar que los resultados arrojados se corresponden con lo esperado a priori.

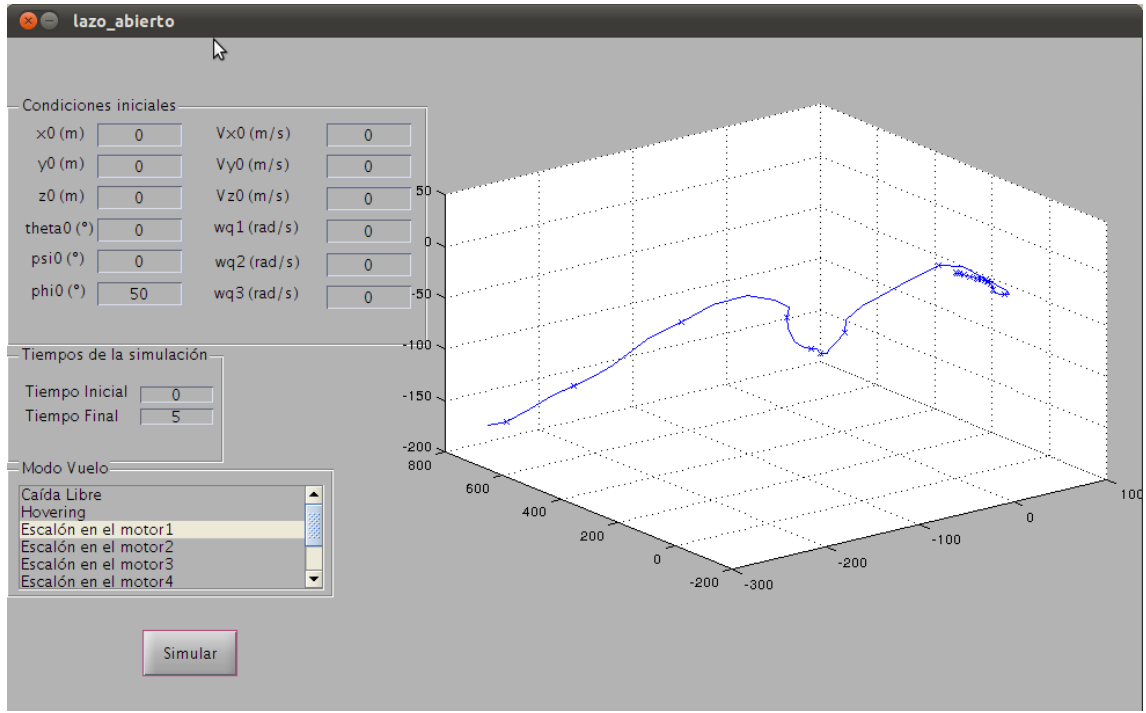


Figura 1.2: Interfaz del simulador de lazo abierto

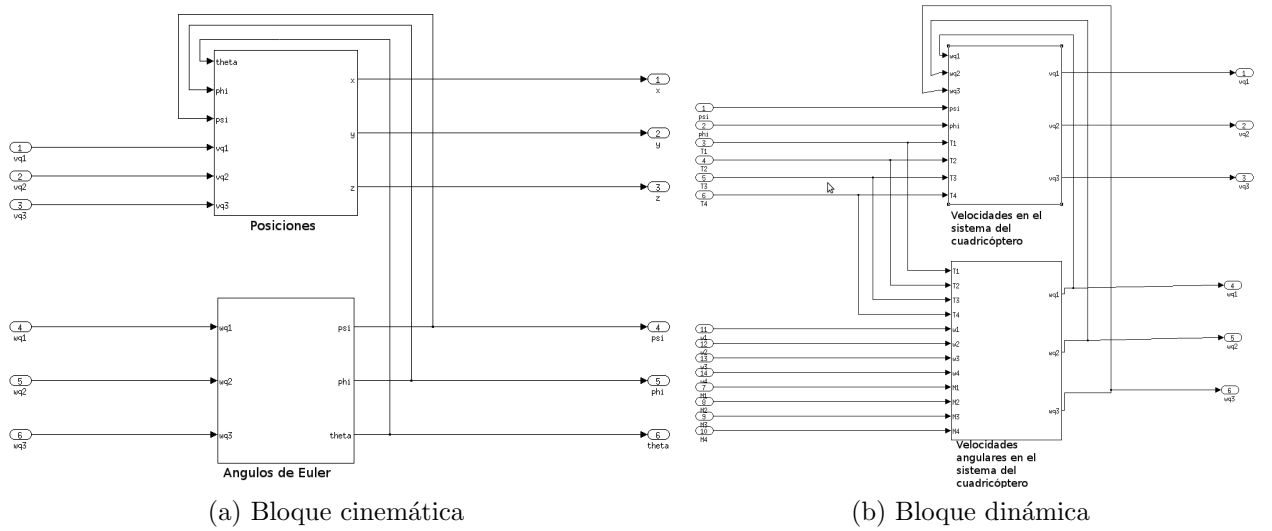
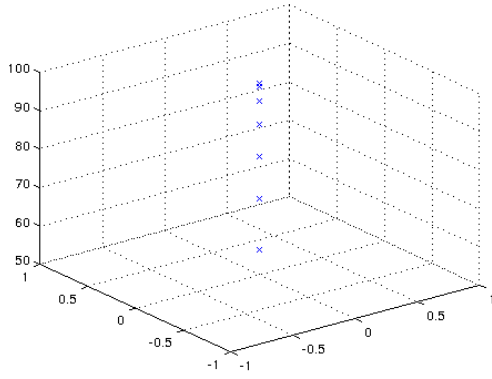


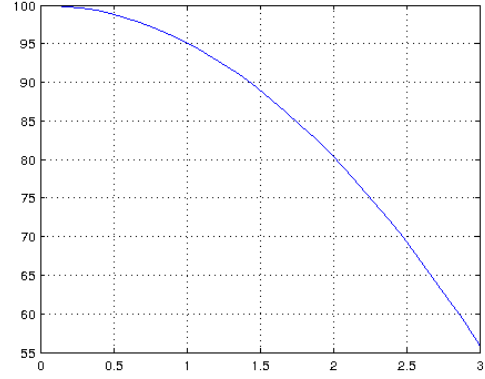
Figura 1.3: Bloques en mayor detalle

### Caída libre con velocidad inicial nula

Se simula una caída libre con condiciones iniciales nulas excepto la altura que se fija a  $100m$ . El tiempo de simulación considerado es de tres segundos. En la figura 1.4a se observa la trayectoria obtenida. En este caso se grafica uno de cada cinco puntos obtenidos. La misma se corresponde con lo que se espera a priori. En la figura 1.4b se representa la altura en función del tiempo. La altura final es  $z_f = 55,855$ . La altura en una caída libre puede calcularse como  $z(t) = -\frac{gt^2}{2} + Z_0$ . En este caso se obtiene  $z(3) = 55,855$ .

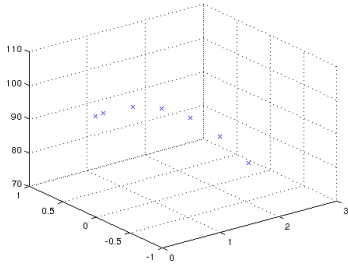


(a) Trayectoria de caída libre con velocidad inicial nula

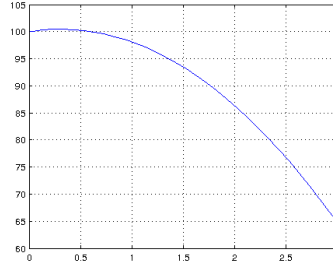


(b) Altura en función del tiempo

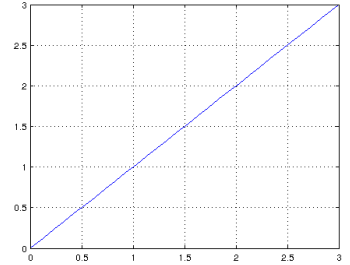
Figura 1.4: Caída libre con velocidad inicial nula



(a) Trayectoria de caída libre con velocidad  $V_0 = 1ms^{-1}\vec{i} + 3ms^{-1}\vec{k}$



(b) Altura en función del tiempo



(c) Desplazamiento hacia el Este en función del tiempo

Figura 1.5: Caída libre con velocidad inicial no nula

## Caída libre con velocidad inicial

Se realiza la misma simulación que en la sección anterior excepto que se inicia el vuelo con  $V_0 = 1ms^{-1}\vec{i} + 3ms^{-1}\vec{k}$ . Tal como es de esperar en la posición según  $\vec{i}$  se tiene una posición que aumenta con el tiempo con pendiente igual a la velocidad inicial. La altura cumple que  $z(t) = -\frac{gt^2}{2} + 3ms^{-1}t + Z_0$ . Por lo tanto la misma aumenta hasta un tiempo  $t^*/z(t) = 0$ . Lo cual implica que  $t^* = \frac{3ms^{-1}}{g} \approx 0,31s$ . Por otra parte tiempo para el cual se da el máximo en la simulación es  $t_{max} \approx 0,33s$ . Considerando que las simulaciones se realizan con un paso variable el cual puede ser de hasta 0,1s se considera un resultado aceptable. Por otra parte la altura máxima en teoría vale  $z_{max_{teo}} = 100,459m$  mientras que la altura máxima obtenida a través de la simulación es de  $z_{max_{sim}} = 100,456m$ . Esta diferencia puede explicarse gracias a que estamos evaluando la trayectoria en tiempos distintos. A partir de este punto tenemos una caída libre como la que ya estudiamos en el caso anterior. Las alturas finales, tanto en la simulación como en la teoría valen 64,885m.

## Condición de Hovering

Se aplica una fuerza constante en los cuatro motores tal que la resultante es igual al peso. Las condiciones iniciales son todas nulas. Excepto  $Z_0 = 10m$ . Se logra el

equilibrio mecánico. Todas las variables permanecen constantes. Se simula durante diez segundos

### Giro según el eje $\vec{k}$

En las mismas condiciones que la simulación anterior, se aumenta repentinamente la velocidad angular de los motores que rotan en sentido horario con un valor tal que la fuerza de cada uno de esos motores aumenta en  $1N$ . Para los motores que rotan en sentido anti-horario se disminuye la velocidad angular de forma que la fuerza de cada uno de ellos disminuye  $1N$ . Estas velocidades son  $375,03\text{rad/s}^{-1}$  y  $287,68\text{rad/s}^{-1}$ . La fuerza neta y el momento según los versores  $\vec{i}_q$  y  $\vec{j}_q$  es nulo. Sin embargo aparece un torque negativo según el versor  $\vec{k}_q$ .

En la figura 1.6a se presenta la altura en función del tiempo. La misma debería permanecer constante sin embargo se observa una pequeña diferencia en la altura de  $3\text{cm}$ . Esta diferencia es atribuida a un error numérico a la hora de calcular las velocidades con las cuales deben girar los motores. Por otra parte en la figura 1.6b se observa como el ángulo decrece hasta el valor de  $-108,77\text{rad}$ . El torque neto vale  $Q = -0,38\text{Nm}$ . Por lo tanto en 5 segundos se debe rotar un ángulo de  $\theta_f = -108,42$ . Nuevamente se percibe una pequeña diferencia entre el valor teórico y el simulado. Sin embargo dicho error es completamente aceptable.

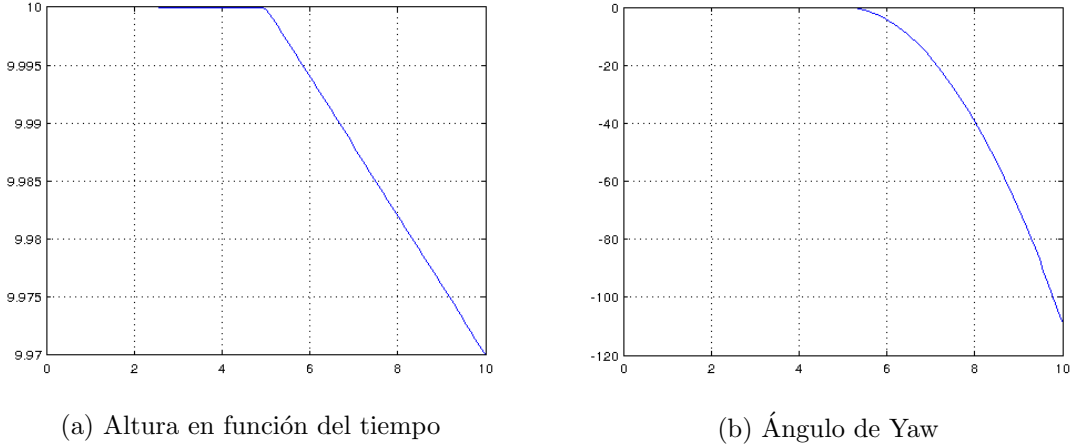


Figura 1.6: Giro según el  $\vec{k}_q$

### Vuelo en línea recta

Con condiciones inicial nulas, excepto por  $Z_0 = 10\text{m}$  y  $\varphi = 30^\circ$ . Se simula durante diez segundos. En la figura 1.7 se observa un vuelo en línea recta en la dirección  $\vec{i}$ . Como es de esperar el vuelo será uniformemente acelerado ya que la fuerza es siempre en el sentido de  $\vec{k}_q$ . La simulación arroja que al cabo de diez segundos el desplazamiento es de  $283,19\text{m}$ , mientras que en la teoría se obtiene un desplazamiento de  $218,20\text{m}$ . Nuevamente se concluye que los resultados arrojados por el simulador son satisfactorios.

Hasta aquí hemos testado el simulador en situaciones conocidas. De acuerdo a las pruebas realizadas puede afirmarse que su funcionamiento es el adecuado ya que

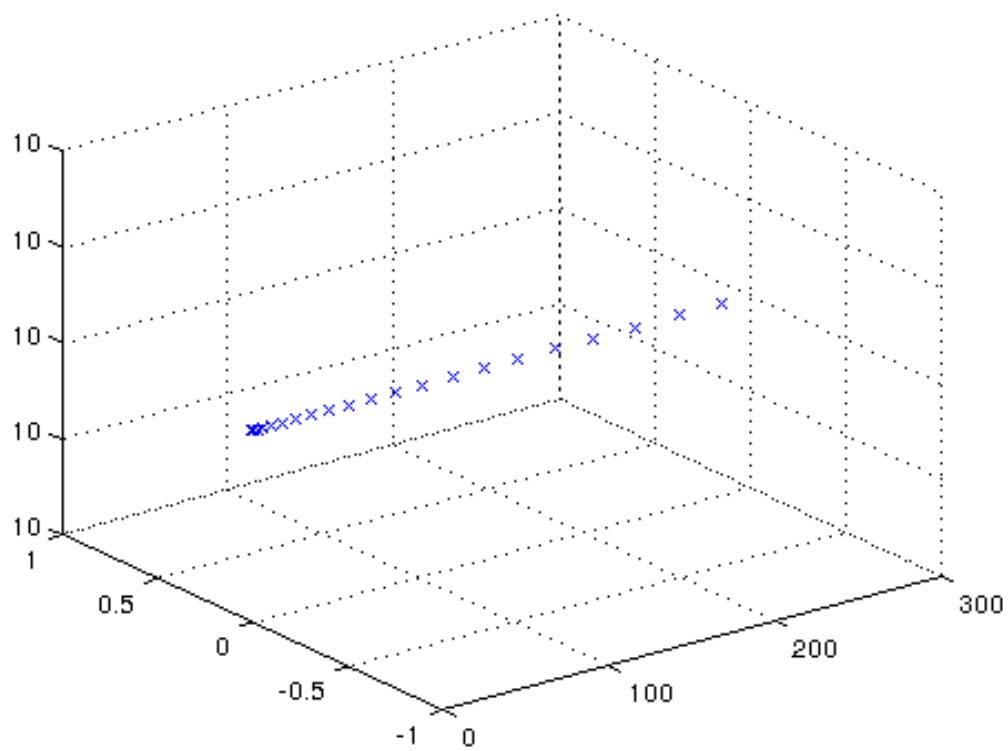


Figura 1.7: Vuelo en línea recta

en ninguna prueba se obtuvieron errores considerables.