
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 último 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 entradas 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 físico. El lazo abierto consta de tres bloques principales. En primer lugar tenemos un bloque encargado de generar las fuerzas y momentos a partir de las velocidades angulares de las hélices. Luego tenemos un bloque que se encarga de resolver la dinámica del sistema y un cuarto bloque encargado de la cinemática. 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.

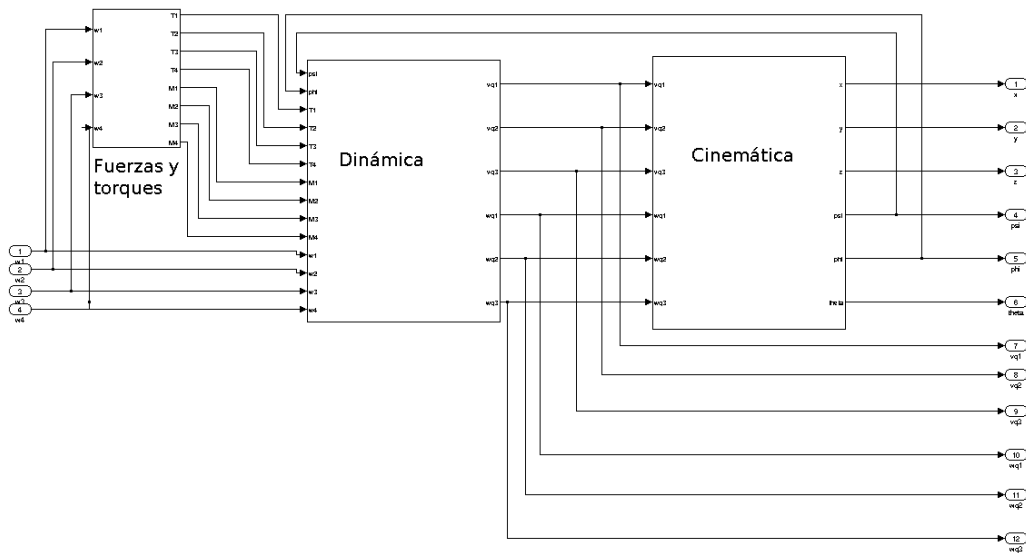


Figura 1.1: Bloque de lazo abierto

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.

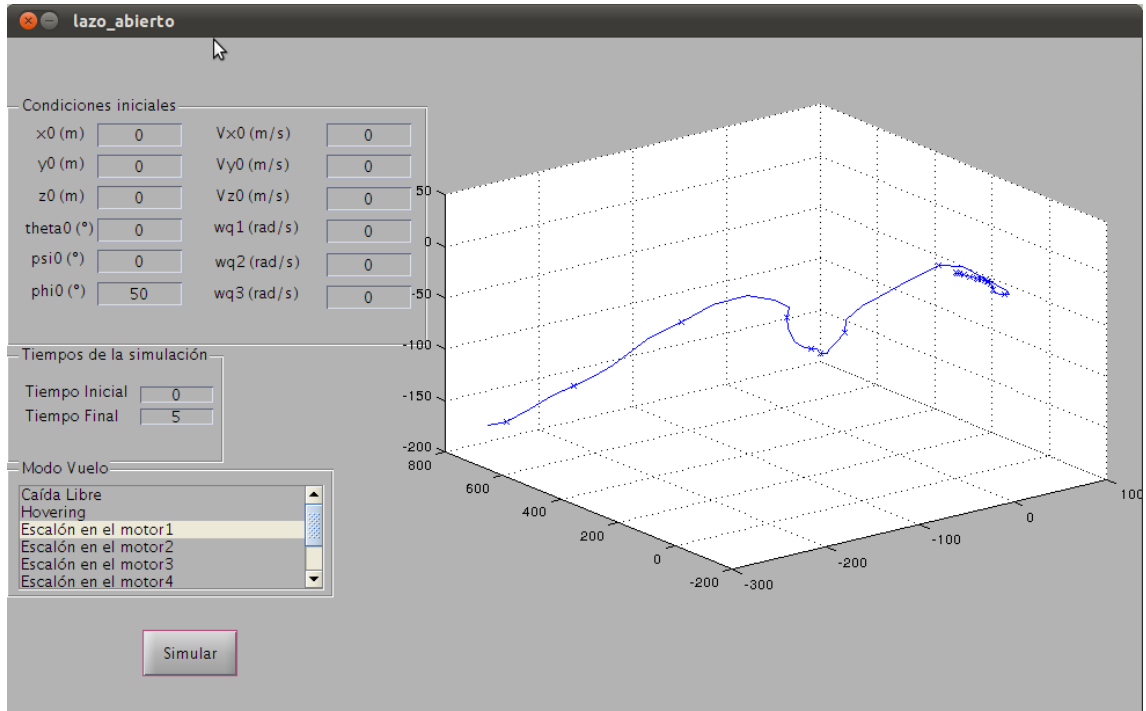


Figura 1.2: Interfaz del simulador de lazo abierto

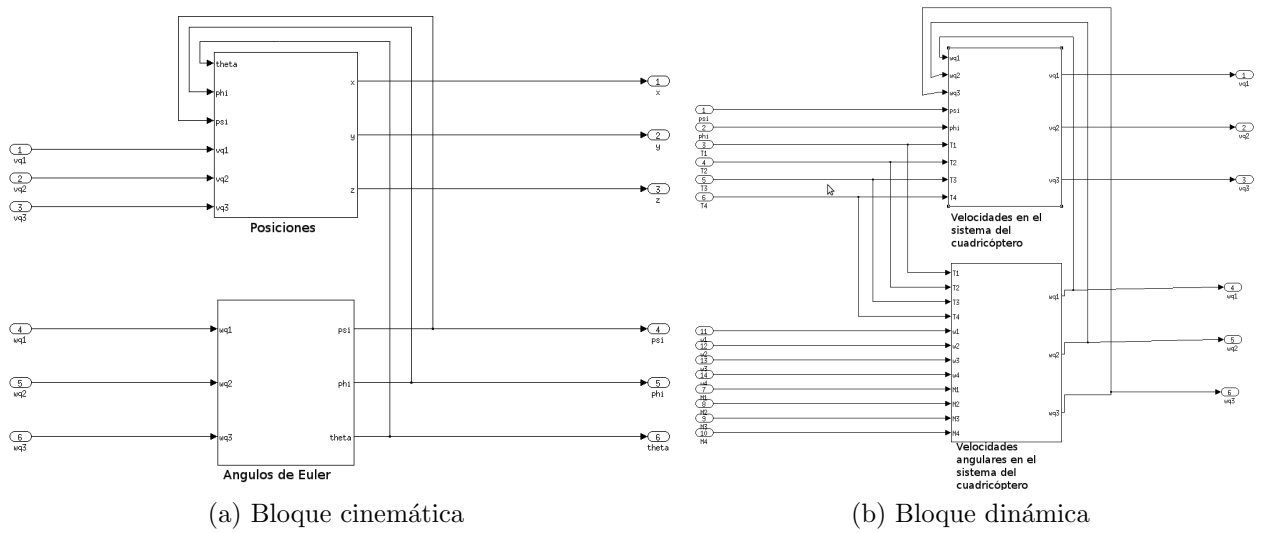


Figura 1.3: Bloques en mayor detalle

1.1.2. Lazo cerrado

Como se explica en el capítulo ?? para tratar las trayectorias circulares en el plano horizontal es necesario introducir un cambio de variables en el sistema, este cambio de variables consiste en expresar la posición del cuadricóptero en el sistema S_q solidario a él y considerando como origen el centro de la trayectoria circular, en lugar de expresar la posición en el sistema cartesiano inercial. Esta modificación implica realizar un cambio en el modelo para trabajar con dichas trayectorias, simplemente se agrega una matriz de rotación para trabajar con la posición expresada en el sistema solidario al cuadricóptero.

La estructura del lazo cerrado es la que se observa en la figura ???. Desde la interfaz gráfica se puede seleccionar el tipo de trayectoria que se desea realizar, los valores de las variables de estado con las que se desea realizar dicha trayectoria¹. Las velocidades angulares objetivo para cada motor serán determinadas a partir de la información anterior. Al igual que en el simulador de lazo abierto se tiene la posibilidad de establecer tanto el tiempo inicial de la simulación y las condiciones iniciales. Asimismo estará determinada por la trayectoria la matriz de realimentación.

Fue necesario además acotar la velocidad angular de los motores ya que esta no puede tener cualquier valor, para esto se agregaron los bloques de saturación a la entrada del subsistema que representa la dinámica del cuadricóptero.

Como se explicó en la sección ?? el control será realizado con un microprocesador, esto implica que las acciones de control no podrán ser modificadas en forma continua, cada cierto período se indicará un nuevo valor de velocidad angular para cada motor. Del mismo modo, no se tiene conocimiento del estado en todo instante sino que se tienen datos cada un cierto intervalo de tiempo (no necesariamente igual al período con el cual se actúa sobre los motores). Estas consideraciones hacen necesaria una modificación en el sistema que hasta ahora había sido considerado como continuo, es necesario convertir el sistema de tiempo continuo desarrollado a un sistema de tiempo discreto. Dicha modificación se logra sustituyendo los bloques integradores y derivadores que formaban parte del sistema por integradores y derivadores discretos con un período de muestreo que también puede ser impuesto desde la interfaz gráfica. En la figura 1.4 se puede observar la misma trayectoria para tres tiempos de muestreo diferentes. En dicha trayectoria se muestra la subida del cuadricóptero desde la altura inicial $z = 0m$ hasta $z = 3m$.

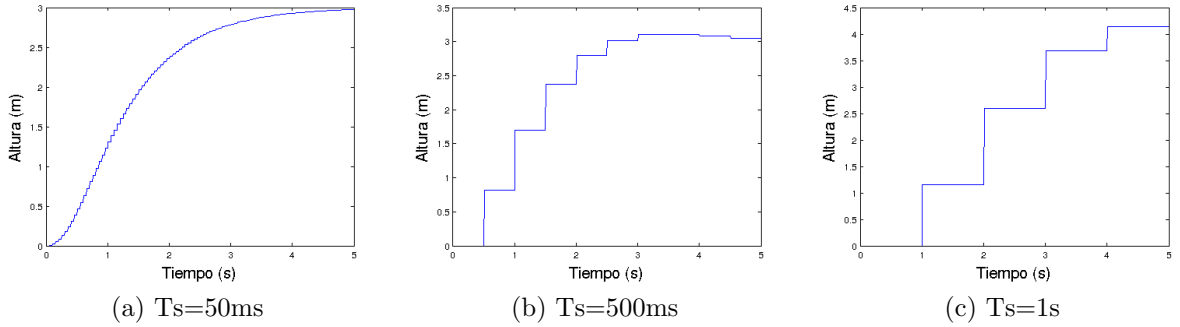


Figura 1.4: Trayectoria de ascenso del cuadricóptero desde $z = 0$ a $z = 3$

Se observa claramente un deterioro de la performance en la subida al aumentar el período de muestreo y de de acción sobre los motores. Por dicho motivo es importante incluir esta variable a la hora de realizar diversas simulaciones ya que el sistema real debe realizar una gran cantidad de operaciones y si bien su capacidad es considerable no es infinita. Esto puede producir que se tenga acotado interiormente el período de muestreo.

¹Evidentemente existen restricciones a la hora de elegir las variables de estado, a modo de ejemplo no seremos capaces de controlar una trayectoria en línea recta si las velocidades angulares no son nulas

Por último, se desea incluir la posibilidad de agregar ruido a los estados medidos y de perturbaciones en las velocidades angulares de los motores. Las medidas que se obtienen de los sensores no son exactas, por dicho motivo la posibilidad de agregar ruido es muy interesante de modo de testear la robustez del controlador implementado. Asimismo, la velocidad angular de los motores no es exactamente la que se espera de acuerdo a la caracterización de los motores realizada (ver ??), por lo contrario, se producen variaciones en la velocidad angular de los mismos dada una velocidad angular objetivo.

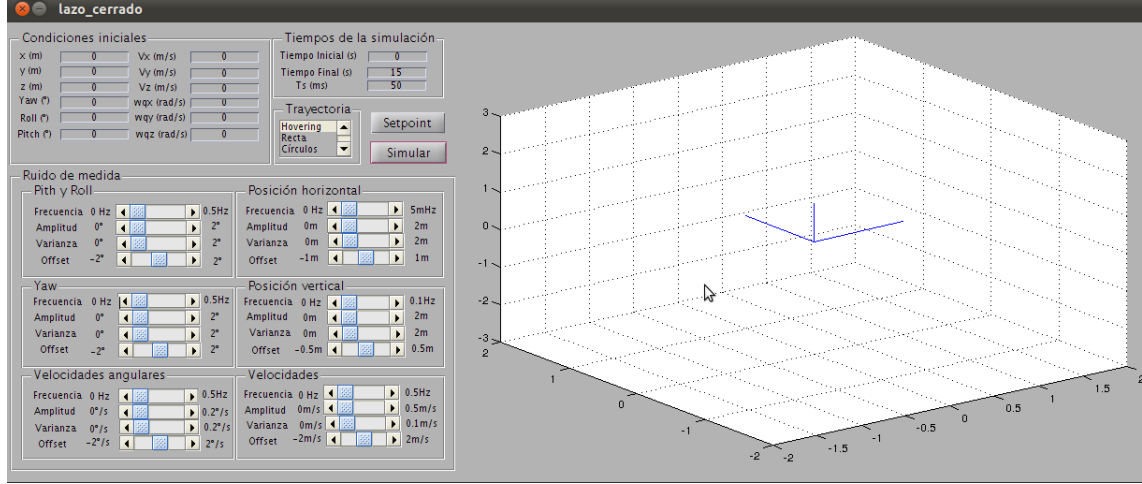


Figura 1.5: Interfaz del simulador de lazo cerrado

1.2. Simulaciones

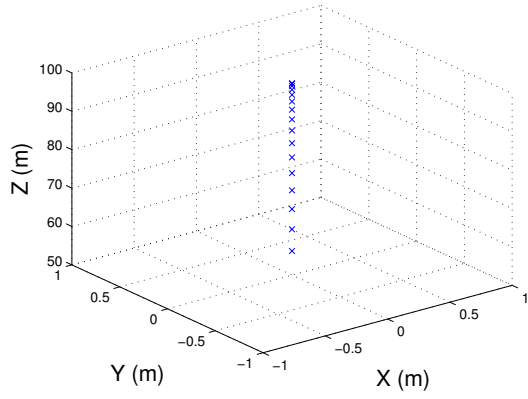
En esta sección procederemos a realizar algunas simulaciones a fin de verificar que los resultados arrojados se corresponden con lo esperado a priori.

Caída libre con velocidad inicial nula

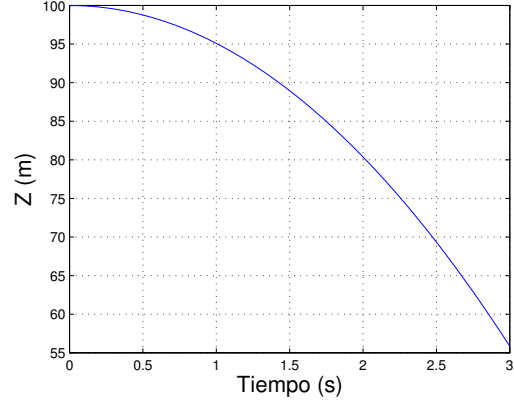
Se simula una caída libre con condiciones iniciales nulas excepto la altura que se fija a $100m$. El tiempo de simulación considerado es de tres segundos. En la figura 1.6a se observa la trayectoria obtenida. En este caso se grafica uno de cada veinte puntos obtenidos. La misma se corresponde con lo que se espera a priori: puntos equiespaciados en el tiempo se encuentran cada vez más apartados a medida que transcurre el tiempo. En la figura 1.6b se representa la altura en función del tiempo. La altura final es $z_f = 55,855m$. La altura en una caída libre puede calcularse como $z(t) = -\frac{gt^2}{2} + Z_0$. En este caso se obtiene $z(3) = 55,855m$.

Caída libre con velocidad inicial

Se realiza la misma simulación que en la sección anterior excepto que se inicia el vuelo con $V_0 = 1ms^{-1}\vec{i} + 3ms^{-1}\vec{k}$. Los resultados de la simulación pueden encontrarse expresados graficamente en la figura 1.7. La coordenada de la posición según \vec{i} 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 $t^*/\dot{z}(t) = 0$. Lo cual implica que $t^* = \frac{3ms^{-1}}{g} \approx 0,31s$. Por otra parte tiempo para el

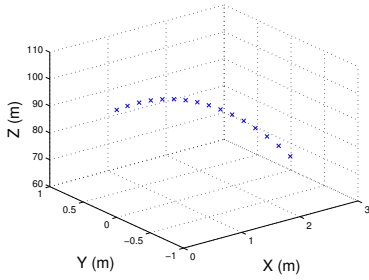


(a) Trayectoria de caída libre con velocidad inicial nula

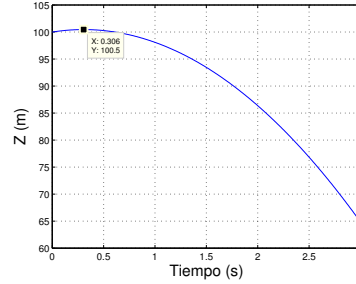


(b) Altura en función del tiempo

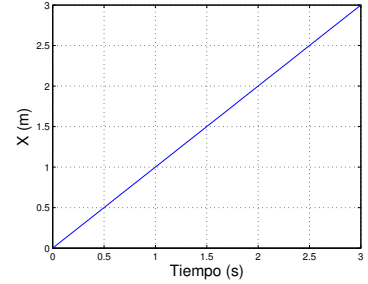
Figura 1.6: Caída libre con velocidad inicial nula



(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 1.7: Caída libre con velocidad inicial no nula

cual se da el máximo en la simulación es $t_{max} = 0,306s$. Considerando que las simulaciones se realizan con un paso variable el cual puede ser de hasta $0,01s$ se considera un resultado aceptable. El siguiente valor para el tiempo simulado es $0,316s$, por lo tanto es razonable que dicho valor se presente en t_{max} . La altura máxima teórica vale $z_{max_{teo}} = 100,459m$, la altura máxima obtenida a través de la simulación es igual². 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

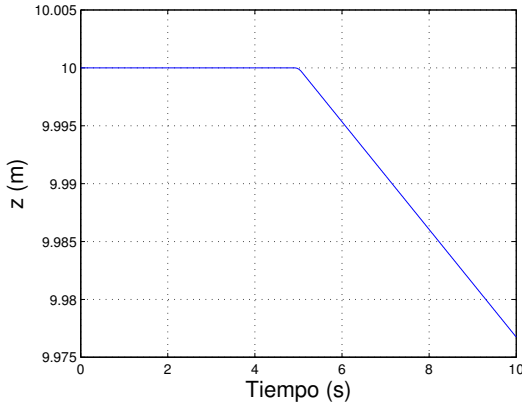
Se aplica una fuerza constante en los cuatro motores tal que la resultante es igual al peso. Las condiciones iniciales son todas nulas. Excepto $Z_0 = 10m$. Se logra el equilibrio mecánico. Todas las variables permanecen constantes. Se simula durante diez segundos

²Considerando tres cifras después de la coma

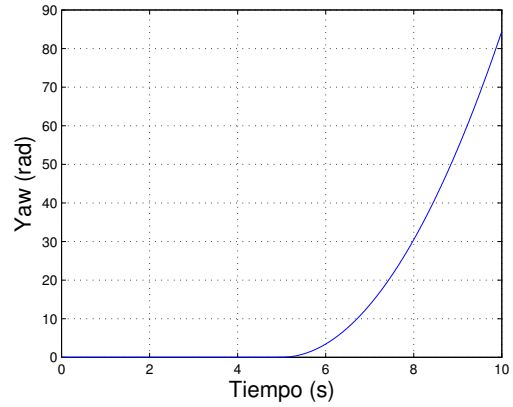
Giro según el eje \vec{k}

En las mismas condiciones que la simulación anterior, en el tiempo $t = 5s$ 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 $349,88\text{rad/s}$ y $278,09\text{rad/s}$. La fuerza neta permanece constante y el momento según los versores \vec{i}_q y \vec{j}_q es nulo. Sin embargo aparece un torque positivo según el versor \vec{k}_q .

En la figura 1.8a se presenta la altura en función del tiempo. La misma debería permanecer constante sin embargo se observa una pequeña diferencia en la altura de $2,3\text{cm}$. 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 1.8b se observa como el ángulo aumenta hasta el valor de $84,43\text{rad}$. El torque neto vale $Q = 0,29\text{Nm}$. Por lo tanto en 5 segundos se debe rotar un ángulo de $\theta_f = 84,16\text{rad}$. Nuevamente se percibe una pequeña diferencia entre el valor teórico y el simulado. Sin embargo dicho error es completamente aceptable.



(a) Altura en función del tiempo



(b) Ángulo de Yaw

Figura 1.8: Giro según el \vec{k}_q

Escalón en los cuatro motores

Con condiciones iniciales nulas, en condición de hovering se aumenta la velocidad angular de los motores en 100rad/s en $t = 5s$. Se simula durante diez segundos. En la figura 1.9 se presentan gráficamente los resultados obtenidos en la simulación. La altura máxima alcanzada por el cuadricóptero en la simulación es de $93,61m$ mientras que en la teoría dicha altura es de $93,78m$. Nuevamente la diferencia entre el valor simulado y el esperado difieren de manera despreciable y es atribuible a aproximaciones realizadas.

Vuelo en línea recta

Con condiciones inicial nulas, excepto por $Z_0 = 10m$ y $\varphi = 30^\circ$. Se simula durante diez segundos. En la figura 1.10 se observa un vuelo en línea recta en la dirección

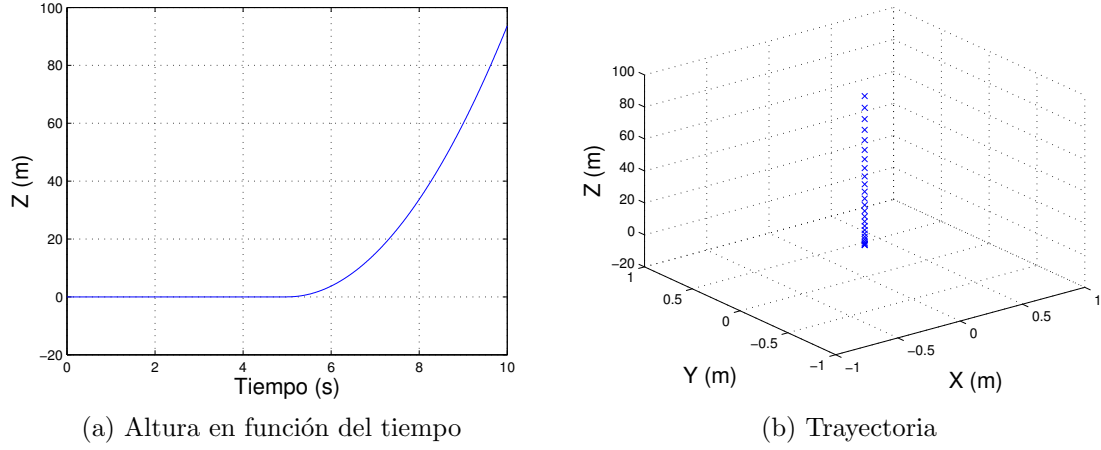


Figura 1.9: Escalón en los cuatro motores

\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 $293,19m$, mientras que en la teoría se obtiene un desplazamiento de $283,19m$. Nuevamente se concluye que los resultados arrojados por el simulador son satisfactorios.

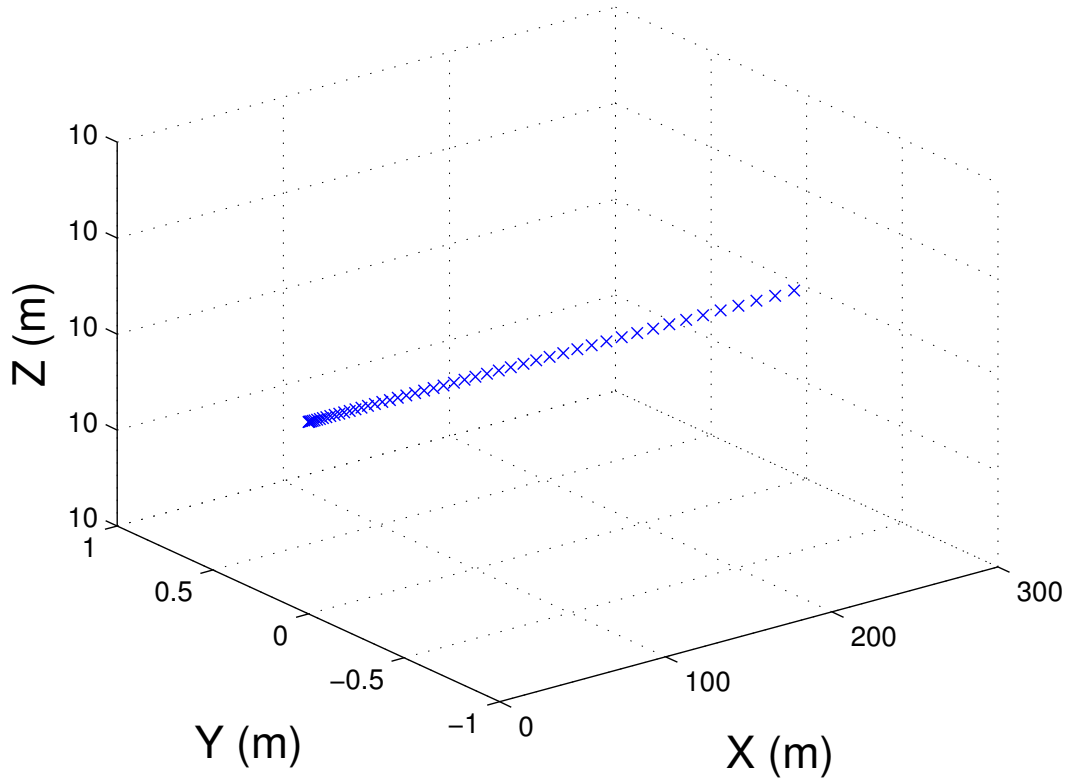


Figura 1.10: Vuelo en línea recta

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

en ninguna prueba se obtuvieron errores considerables. Sin embargo, es fundamental aclarar que hasta aquí no es posible afirmar que el modelado del sistema sea adecuado, lo único que puede concluirse es que el simulador representa fielmente las ecuaciones que han sido deducidas hasta el momento. Un error en las ecuaciones no se reflejará hasta el momento de testear el cuadricóptero. Sin embargo el trabajo realizado a la hora del modelado y la comparación con diversas bibliografías nos permite a esta altura estar convencido de que dichas ecuaciones son adecuadas para modelar el sistema.