

## Capítulo 8

# Estudio de los sistemas de aumento de estabilidad en el modelo acoplado

En los dos capítulos anteriores, se hicieron sendos estudios por separado de la dinámica longitudinal y de la dinámica lateral-direccional, con el fin de diseñar sistemas de regulación de perturbaciones que funcionaran bien en esos modelos desacoplados.

Sin embargo, no hay que perder la noción del helicóptero en su conjunto, en el que esta hipótesis de desacoplamiento de modos no es del todo cierta, ya que en la realidad sí existe un acoplamiento apreciable. Así una prueba bastante apreciable para validar los reguladores anteriores sería incorporarlos por separado (aunque actuando simultáneamente) al modelo completo del helicóptero, el cual se expuso en la sección 5.3.

Lo que se espera tras realizar esta unión de reguladores, es que el sistema posiblemente presente un ligero deterioro en la respuesta, pero que en líneas generales siga mostrando un comportamiento adecuado, siendo capaz de reducir las perturbaciones de todas las variables de estado del helicóptero simultáneamente.

En la figura 8.1 se puede apreciar el esquema que se ha implementado en *Simulink* para controlar el helicóptero como sistema acoplado. Se puede ver así como el controlador no es más que una superposición del regulador longitudinal y el lateral-direccional (los cuales se diseñaron anteriormente), de modo que al entrar el vector del estado en el bloque de control, éste es dividido en variables longitudinales y laterales-direccionales, realizando con cada una de ellas los procesos que se describieron en los capítulos anteriores.

Una vez mostrado el esquema de control del modelo acoplado, se va a pasar a realizar simulaciones que permitan conocer el comportamiento del sistema.

Como paso inicial, resulta bastante ilustrativo realizar algunas simulaciones del modelo completo, con alguno de los dos reguladores desactivados. El fin de esto no es más que conocer de antemano el grado de acoplamiento que existe en el helicóptero. Así, si se desactiva el regulador lateral-direccional, durante la simulación existirán perturbaciones que provoquen la entrada en acción del regulador longitudinal, de forma que debido al acoplamiento, se induzcan cambios en las variables laterales. Resultaría interesante estudiar este fenómeno, comprobando el grado de acoplamiento, y la característica de es-

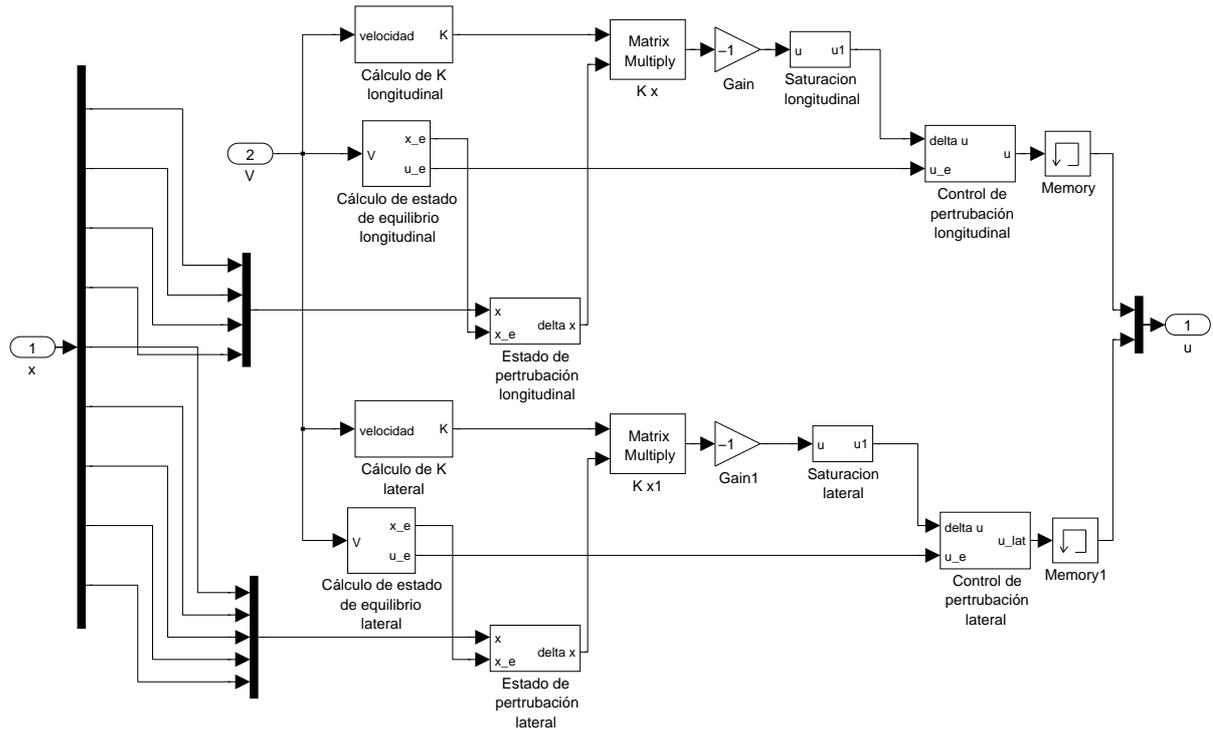


Figura 8.1: Esquema del controlador del helicóptero como sistema acoplado. Se puede apreciar la unión del regulador longitudinal con el lateral-direccional

tabilidad de la respuesta inducida en el otro modo.

En las figuras 8.2 y 8.3 se muestran los resultados una simulación hecha en el modelo acoplado del helicóptero con el regulador de perturbaciones lateral-direccional desactivado. Las condiciones iniciales para las variables longitudinales fueron:

$$u_0 = 30 \text{ m/s}; \quad w_0 = 0,1 \text{ m/s} \quad q_0 = 0 \quad \theta_0 = 0$$

mientras que las variables laterales-direccionales se consideraron nulas inicialmente. Además se sometió al helicóptero a una ráfaga de  $5 \text{ m/s}$  de amplitud que solo afecta al plano longitudinal. Los controles laterales se mantuvieron en todo momento en el valor de equilibrio, de modo que las únicas excitaciones de la dinámica lateral-direccional provienen exclusivamente del acople con los mandos longitudinales (los cuales sí son accionados para contrarrestar las perturbaciones longitudinales).

De este modo, se aprecia cómo al tratar de estabilizar las variables longitudinales (lo cual se hace satisfactoriamente, si se atiende a la figura 8.2), se están induciendo unas perturbaciones laterales-direccionales, las cuales se mantienen en el tiempo, adquiriendo la aeronave una velocidad lateral, un ángulo de balanceo y una velocidad de giro de guiñada constantes en el tiempo. Si se analiza detenidamente el significado de estas variables, se aprecia cómo la aeronave describe una curva parecida a una hélice descendente, situación que debe ser corregida por el piloto si para evitar una pérdida de altura y un cambio de rumbo excesivos.

El caso opuesto de la situación que se acaba de analizar se puede ver en las figuras 8.4 y 8.5, donde se puede ver el resultado de una simulación hecha tras desactivar el regulador longitudinal y mantener en funcionamiento el lateral-direccional. Al igual que en el caso anterior, solo se excitan las

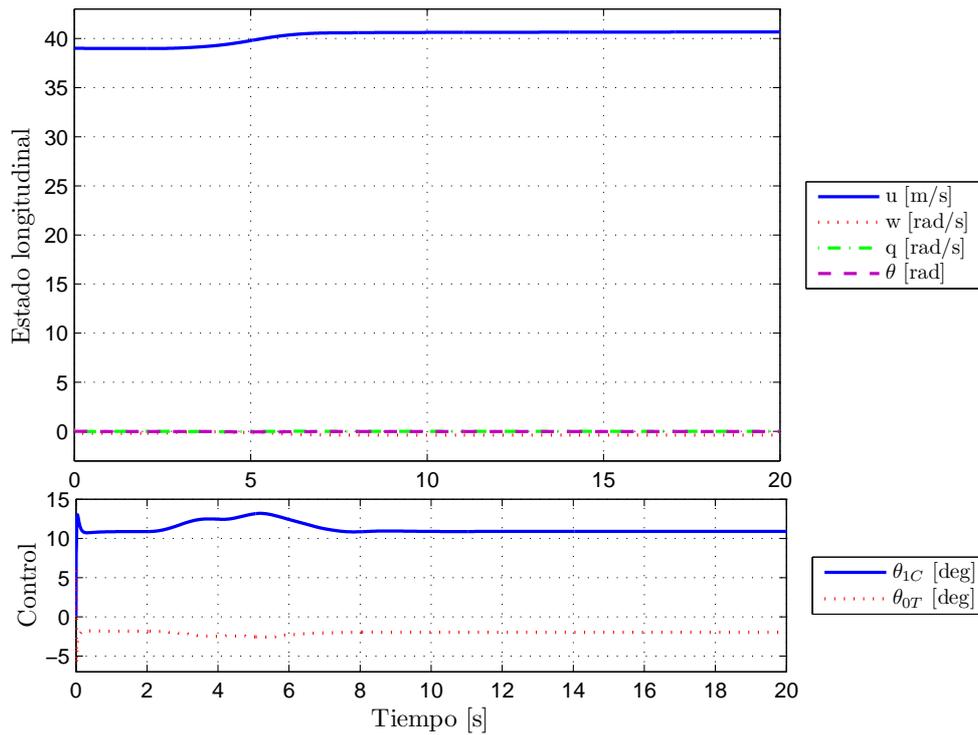


Figura 8.2: Evolución de las variables longitudinales durante una simulación del modelo acoplado del helicóptero donde únicamente se activó el regulador longitudinal

variables laterales-direccionales, con las siguientes condiciones iniciales:

$$v_0 = 3 \text{ m/s} \quad p_0 = 0,1 \text{ rad/s} \quad r_0 = 0,05 \text{ rad/s} \quad \phi_0 = 0,01 \text{ rad} \quad \psi_0 = 0,01 \text{ rad}$$

y la presencia de una ráfaga de viento lateral de  $5 \text{ m/s}$  de amplitud. El control longitudinal se deja constante en su valor de equilibrio, de modo que la única fuente de variación de las variables longitudinales proviene de la acción del regulador lateral-direccional, a través del acoplamiento existente. Nótese que para tener condiciones iniciales "de perturbación" nulas en el estado longitudinal, es necesario que los valores de las variables de estado "absolutas" en el instante inicial coincidan con un punto de equilibrio. Así, suponiendo un vuelo a una velocidad de avance de  $40 \text{ m/s}$ , las variables de estado iniciales que habrá que introducir son:

$$u_0 = 39,9989 \text{ m/s}; \quad w_0 = -0,3013 \text{ m/s} \quad q_0 = 0 \quad \theta_0 = -0,0075 \text{ rad}$$

A la vista de estas simulaciones, de nuevo puede verse cómo el acoplamiento introduce perturbaciones en las variables longitudinales que no tienden a recuperarse, de modo que de nuevo sería necesaria la actuación del piloto.

Una vez mostrado el efecto desestabilizador que produce el acoplamiento en los modos opuestos, es hora de probar el comportamiento del helicóptero ante la actuación simultánea del regulador longitudinal y el lateral-direccional. Como condiciones iniciales, se supondrán las mismas que las de los casos anteriores, esto es:

$$u_0 = 30 \text{ m/s}; \quad w_0 = 0,1 \text{ m/s} \quad q_0 = 0 \quad \theta_0 = 0$$

$$v_0 = 3 \text{ m/s} \quad p_0 = 0,1 \text{ rad/s} \quad r_0 = 0,05 \text{ rad/s} \quad \phi_0 = 0,01 \text{ rad} \quad \psi_0 = 0,01 \text{ rad}$$

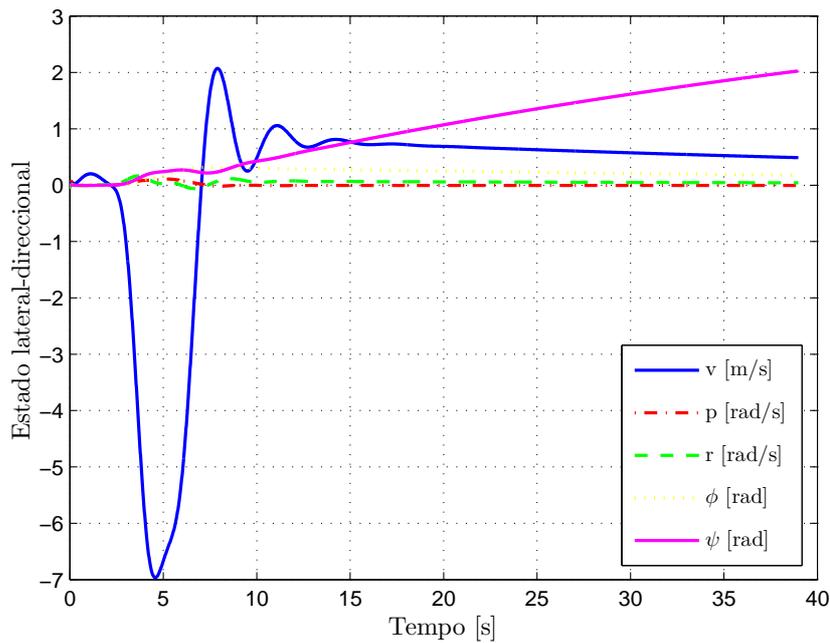


Figura 8.3: Evolución de las variables laterales-direccionales durante una simulación del modelo acoplado del helicóptero donde únicamente se activó el regulador longitudinal

Además, también se incluirá el efecto de las dos ráfagas empleadas anteriormente, eso sí, actuando simultáneamente.

El resultado de esta simulación puede verse en las figuras 8.6, 8.7 y 8.8, donde se muestran respectivamente las variaciones en el vector de estados longitudinal, lateral direccional, y la evolución de las señales de control y las perturbaciones atmosféricas. Puede comprobarse así cómo con la actuación conjunta de sendos reguladores produce un resultado satisfactorio, permitiendo una estabilización simultánea de los modos longitudinal y lateral-direccional.

También es de señalar que la actuación de estos sistemas de control no significa que necesariamente se tenga que mantener el punto de operación que inicialmente tenía la aeronave antes de encontrarse con las perturbaciones atmosféricas. Así, se puede comprobar como tras la ráfaga el helicóptero se queda permanentemente con una velocidad de vuelo mayor que la inicial. Esto es debido a que los sistemas de control empleados solo intentan mantener la aeronave en un punto de equilibrio cualquiera, de modo que si ante alguna perturbación se las variables de estado adquieren valores tales que se encuentran más cerca de un nuevo punto de equilibrio que del inicial, la respuesta del controlador será llevar el helicóptero a ese nuevo punto de equilibrio. Así, en líneas generales, lo que se obtiene es una aeronave muy dócil, que tiene una gran tendencia a la estabilidad pero que no tiene por qué permanecer siempre en el mismo punto de operación, y por consiguiente debe ser el piloto el encargado de realizar pequeñas modificaciones en los mandos si pretende seguir en todo momento un vuelo con unas condiciones fijas.

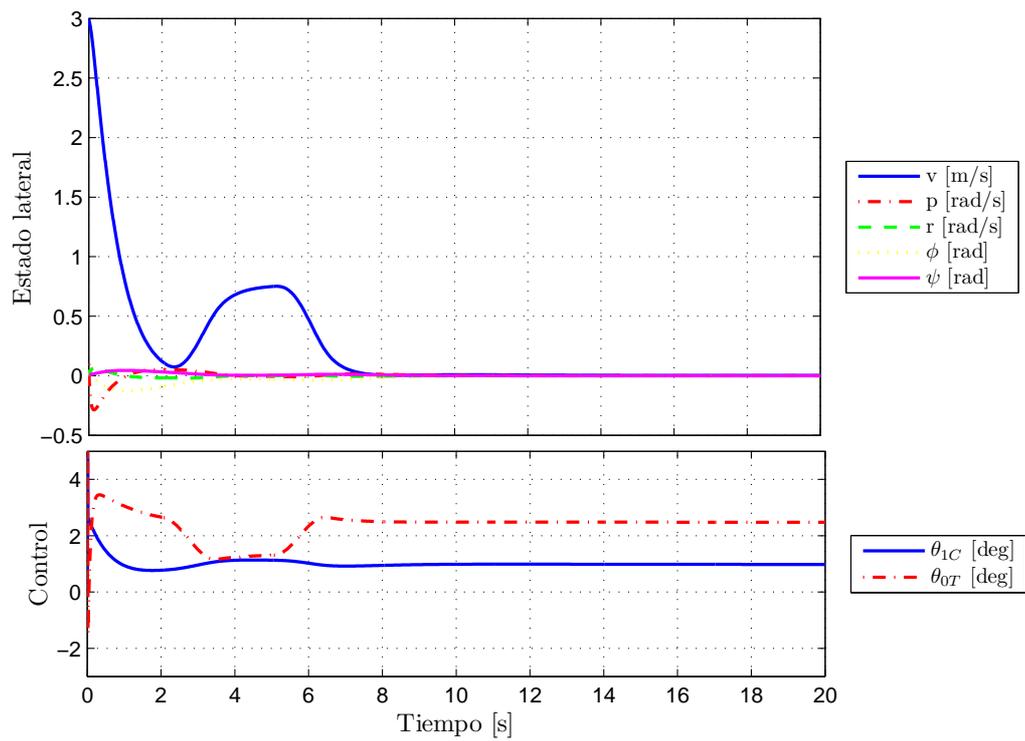


Figura 8.4: Evolución de las variables laterales durante una simulación del modelo acoplado del helicóptero donde únicamente se activó el regulador lateral-direccional

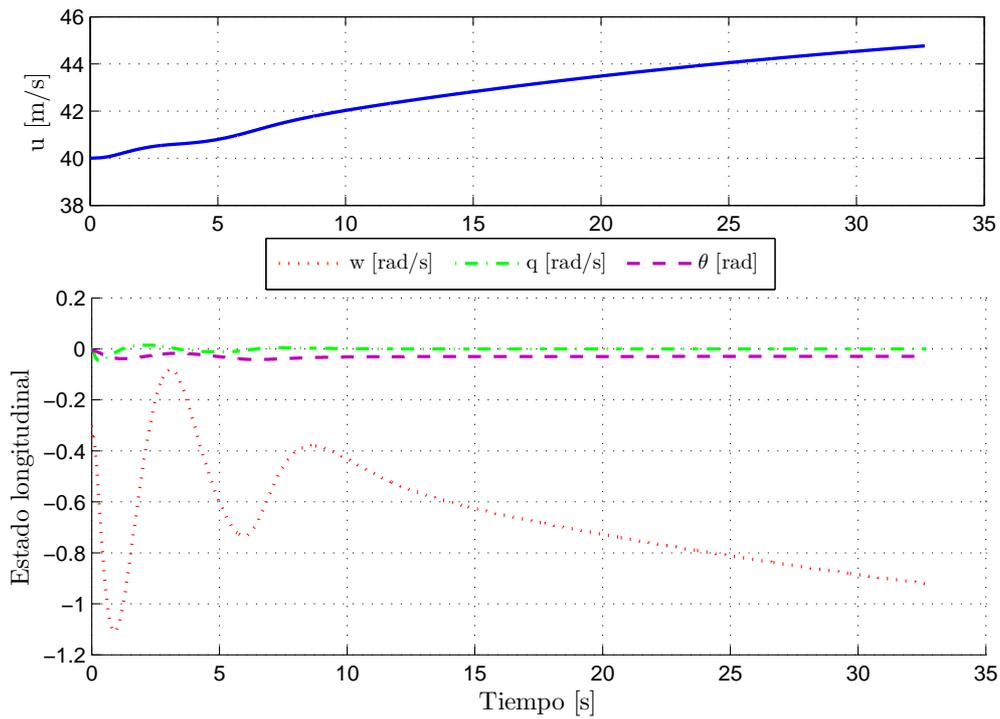


Figura 8.5: Evolución de las variables longitudinales durante una simulación del modelo acoplado del helicóptero donde únicamente se activó el regulador lateral-direccional

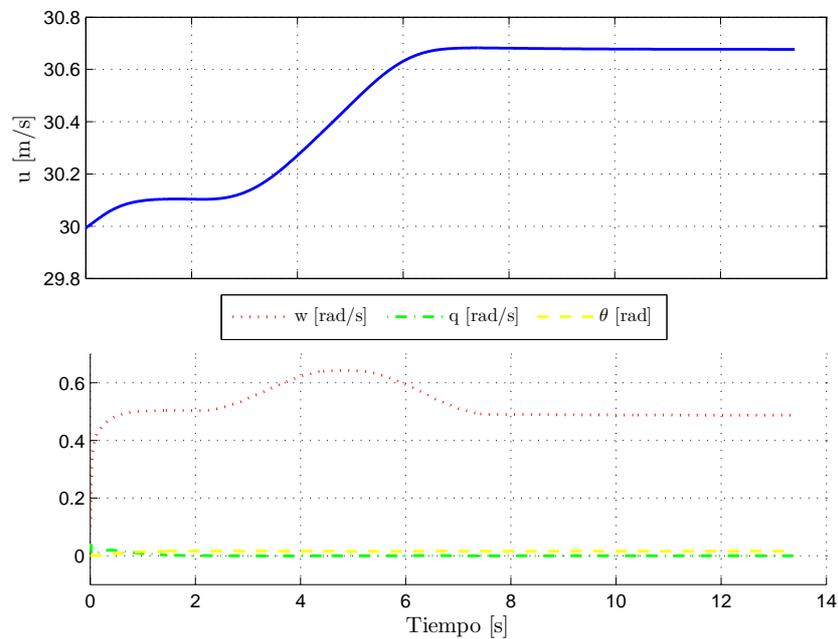


Figura 8.6: Evolución de las variables longitudinales durante una simulación del modelo acoplado del helicóptero provisto del regulador longitudinal y del lateral-direccional

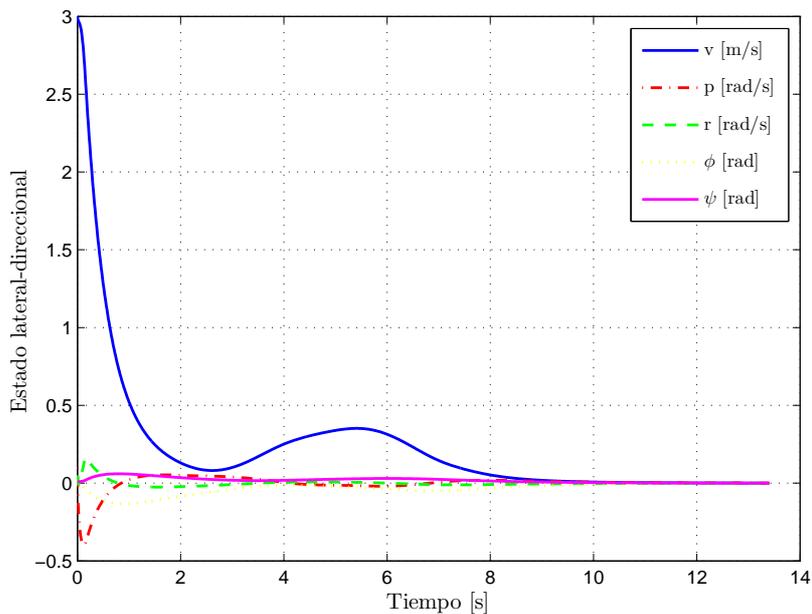


Figura 8.7: Evolución de las variables laterales-direccionales durante una simulación del modelo acoplado del helicóptero provisto del regulador longitudinal y del lateral-direccional

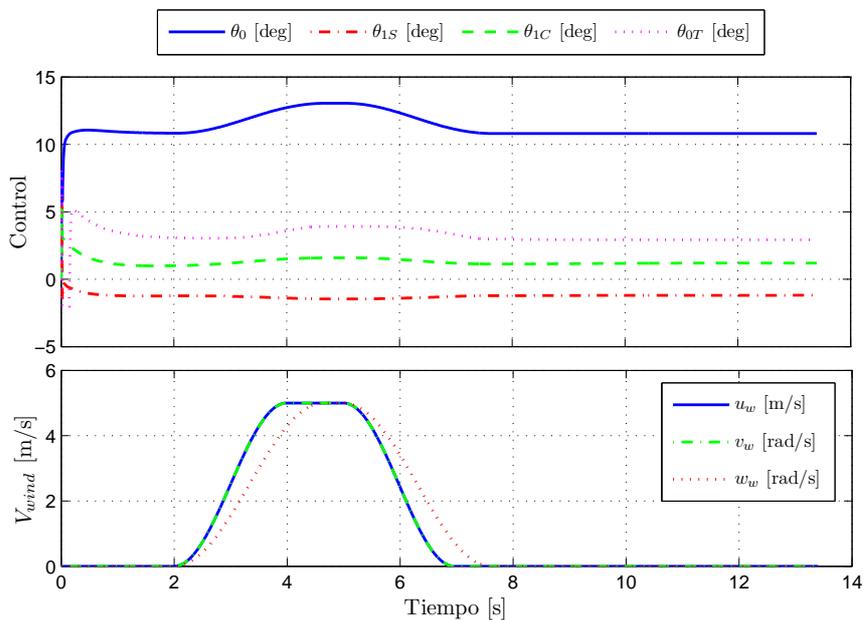


Figura 8.8: Evolución de las señales de control, así como de las perturbaciones atmosféricas durante una simulación del modelo acoplado del helicóptero provisto del regulador longitudinal y del lateral-direccional

