

IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL FUZZY EN EL LAZO DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN HELICÓPTERO COAXIAL NO TRIPULADO

Bartomeu Rubí Perelló

Departamento de Control Automático, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), TR11,
c/ Rambla de Sant Nebridi, 10, 08222 Terrassa, España, rubi.tomeu@gmail.com

Resumen

El objetivo de este trabajo es el de estudiar el comportamiento de un controlador Fuzzy en el control de las velocidades lineales de un vehículo aéreo no tripulado, en el caso concreto de aplicación en un helicóptero coaxial en miniatura. Para ello, se parte de un sistema de control en cascada compuesto por un control de trayectoria, un control de velocidad y un control de actitud, y del cual ya se validado su funcionamiento de forma experimental. Este control, resultado de otro proyecto, muestra un correcto comportamiento respecto a sus especificaciones, pero demuestra una respuesta mejorable en el control de las velocidades. Por ello, en este artículo se muestran los resultados obtenidos al substituir este controlador, el cual anteriormente estaba implementado con un conjunto de controladores de tipo Proporcional-Derivativo, por un controlador inteligente de tipo Fuzzy. Los resultados muestran un comportamiento algo más rápido y más suave, por lo tanto se consigue mejorar el controlador de velocidad anterior.

Palabras Clave: Helicóptero Coaxial, Control Fuzzy, Control Inteligente, Control en cascada, Vehículo No Tripulado, UAV

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de control de vuelo han despertado un gran interés en los últimos años, debido al reto que supone, tanto obtener vehículos aéreos totalmente autónomos o no tripulados (en inglés UAV - *Unmanned Aerial Vehicles*), como para poder ayudar a un pilotaje más sencillo e intuitivo de estos vehículos.

La evolución de los UAV se está intensificando considerablemente gracias al reciente interés militar y civil. Este tipo de vehículos son capaces de realizar diferentes tareas como la búsqueda y rescate, vigilancia comercial, espionaje, filmación cinematográfica, inspección en situaciones donde se realizan vuelos en condiciones hostiles, así como la realización de maniobras acrobáticas, entre otras.

Entre los diversos tipos de vehículos aéreos no tripulados, los UAV en miniatura son los más utilizados de cara a la investigación. Y entre ellos, se destaca el uso de aeronaves VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*) por encima de otro tipo de vehículos por su maniobrabilidad y mejor accesibilidad en la mayoría de espacios.

El desarrollo de sistemas de control para estos vehículos no es trivial, debido principalmente a la dinámica tan compleja en los sistemas aerodinámicos, afectados por las variaciones en la altura, el clima y los cambios en la configuración del vehículo [1]. Además, cabe tener en cuenta que son sistemas de control multivariables, inestables, subactuados y presentan diversas características no lineales. Es por ese motivo que, a pesar del esfuerzo dedicado en los últimos años en el estudio de este tipo de UAV, aún no existe un sistema de control que destaque por encima de los otros. Por eso en la actualidad podemos encontrar implementadas, en estos sistemas de control, diversas técnicas de control lineal y no lineal.

El presente artículo se basa en el estudio y diseño de un sistema de control para un helicóptero coaxial en miniatura, centrándose en el diseño de un Control Fuzzy para el lazo de velocidades. Para ello, se ha partido de un sistema de control en cascada previamente implementado sobre el helicóptero coaxial del trabajo, y se ha substituido el control de velocidad por un Control Fuzzy.

El trabajo de este artículo se trata de una adaptación de un trabajo realizado en el marco de la asignatura de Control Inteligente impartida por la profesora Matilde Santos de la Universidad Complutense de Madrid, formando parte de los estudios de Máster en Ingeniería de Sistemas y de Control. Y por lo que se refiere al trabajo previo, se ha partido del Trabajo de Final de Máster realizado para los estudios de Máster en Sistemas Automáticos y Electrónica Industrial de la Universitat Politècnica de Catalunya [6].

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma: En la presente sección se muestra una descripción del helicóptero coaxial del trabajo y el laboratorio donde este opera, seguidamente se muestra

una descripción del trabajo previo en el cual se basa el artículo donde encontramos una descripción del modelo obtenido y control diseñado, y finalmente se realiza una descripción del problema a resolver. En la Sección 2 se muestran el proceso de diseño de los controladores para resolver el problema. En la Sección 3 se muestran los resultados obtenidos. Y la conclusión del trabajo se encuentra en la Sección 4.

1.1 HELICOPTERO COAXIAL Y LABORATORIO

El helicóptero del trabajo es un helicóptero coaxial de la marca Walkera modelo 4#10 (Fig. 1). La característica principal de los helicópteros coaxiales es que disponen de dos rotores, situados uno encima del otro, que giran en el mismo eje y en sentido contrario. El hecho de que giren en sentido contrario solucionar el problema de contrarrestar el par que provocaría un solo rotor, es por ello que este tipo de helicópteros no necesitan un rotor de cola.



Figura 1: Helicóptero coaxial Walkera 4#10.

Los cuatro elementos que se usan para controlar este helicóptero son, por un lado, el control longitudinal, el control lateral y el control de guiñada, que regulan la orientación del helicóptero con los ángulos *pitch* (θ), *roll* (ϕ) y *yaw* (ψ), respectivamente, y por otro lado el control de thrust o empuje, que controla la velocidad de giro de los rotores.

Por lo que respecta al laboratorio en el cual se debe trabajar, se trata de un recinto *indoor* en una zona delimitada por el espacio de visión de dos cámaras. Estas dos cámaras forman parte de un sistema de visión que es capaz de calcular la posición y la actitud (ángulos *roll*, *pitch* y *yaw*) del helicóptero con una frecuencia de 30 Hz. Por otro lado, se dispone de una aplicación desarrollada en Matlab que permite actuar directamente sobre los elementos de control del helicóptero, y por lo tanto, implementar un algoritmo de control. En [4] se dispone de más información del laboratorio de control.

1.2 TRABAJO PREVIO

Previo al presente trabajo, se desarrolló un proyecto con la plataforma de control vista en el apartado

anterior. El objetivo del proyecto era el de diseñar e implementar un sistema de control para el helicóptero coaxial. Por ello, entre otras tareas, inicialmente fue preciso obtener un modelo del helicóptero coaxial, y posteriormente, se realizó el diseño de un sistema en cascada consistente en tres lazos de control. Se realizaron diversos experimentos de este sistema de control demostrando su correcto funcionamiento. Se demostró que el controlador es capaz de mantener el helicóptero en su punto de equilibrio, así como de seguir sencillas trayectorias en el espacio. No obstante, se pudo apreciar que el control de lazo de velocidades resultaba ser ligeramente lento y verse muy afectado por el ruido en las medidas de los sensores.

A continuación, se muestra una breve descripción del modelo obtenido y el control diseñado en dicho proyecto. Más información acerca de este proyecto se puede encontrar en [5] [6].

1.2.1 Modelo del Helicóptero Coaxial

Un modelo de la planta es necesario para poder realizar los cálculos del diseño del sistema de control y por otro lado para realizar el conjunto de simulaciones pertinentes para validar dicho sistema de control. Para ello, se obtuvo un modelo no lineal completo del helicóptero coaxial del trabajo, el cual se usará en proceso de validación del control, y además se obtuvo un modelo lineal que se ha usado en el proceso de obtención de los controladores.

- **Modelo No Lineal**

El modelo no lineal del helicóptero coaxial fue obtenido a partir de la bibliografía relacionada con el modelado de este tipo de vehículos [2], obteniendo así las ecuaciones generales que modelan la dinámica de un helicóptero de estas características. Y posteriormente se hizo un proceso de identificación trabajando con el helicóptero real para determinar el valor de parámetros como inercias, masas, dimensiones, constantes de tiempo, parámetros de los motores eléctricos, parámetros aerodinámicos, y otros parámetros que aparecen en las ecuaciones que conforman el modelo dinámico no lineal del vehículo.

En la Figura 2 se muestra el esquema del modelo no lineal representado en bloques, donde cada uno de estos bloques contiene las ecuaciones que modelan la dinámica de cada uno de los elementos que encontramos en el helicóptero coaxial. Entre estos elementos se encuentran los motores eléctricos que alimentan los rotores, los propios rotores, la barra estabilizadora que ralentiza la dinámica del sistema, el plato cíclico que regula el ángulo de ataque de los rotores, el bloque que calcula la dinámica del cuerpo del helicóptero, y otros.

Como se observa, el modelo tiene un total de cuatro entradas, que son las señales de control del transmisor que actúan directamente sobre los cuatro elementos de control. Por otro lado, se puede ver que tenemos un total de seis salidas, que son las posiciones de helicóptero en los tres ejes (N, E, D), y los ángulos de actitud (ϕ, θ, ψ), que como se ha explicado estas son calculadas por el sistema de visión. En esquema también aparecen el resto de las variables de estado del sistema, que coinciden con las del modelo lineal descrito más abajo.

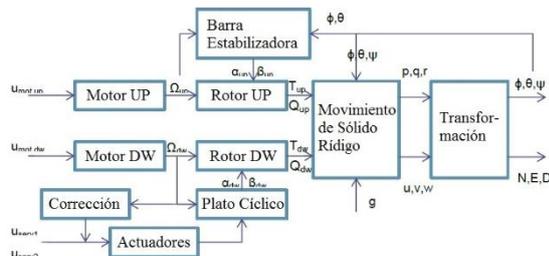


Figura 2: Esquema de bloques del modelo no lineal.

• **Modelo Lineal**

El modelo lineal se trata de una linealización del modelo anterior alrededor del punto de equilibrio del helicóptero. Es decir, alrededor del punto donde el helicóptero se encuentra estabilizado en un punto en el espacio.

Este modelo está representado como un sistema en espacio de estados. De nuevo, como en el modelo no lineal, las entradas son las cuatro señales de control del transmisor, y las salidas son las posiciones y los ángulos, siendo un total de seis. Por lo que respecta al vector de estados (Ec. 1), encontramos todas las variables del modelo que aparecen derivadas, con un total de 18. Entre estas variables de estado encontramos las 3 posiciones, 3 velocidades, 3 ángulos y 3 velocidades angulares del helicóptero, así como los 4 ángulos de los rotores y sus 2 velocidades.

$$x = [x, y, z, u, v, w, \phi, \theta, \psi, p, q, r, \dots, \alpha_{dw}, \beta_{dw}, \eta_{bar}, \zeta_{bar}, \Omega_{dw}, \Omega_{up}]^T \quad (1)$$

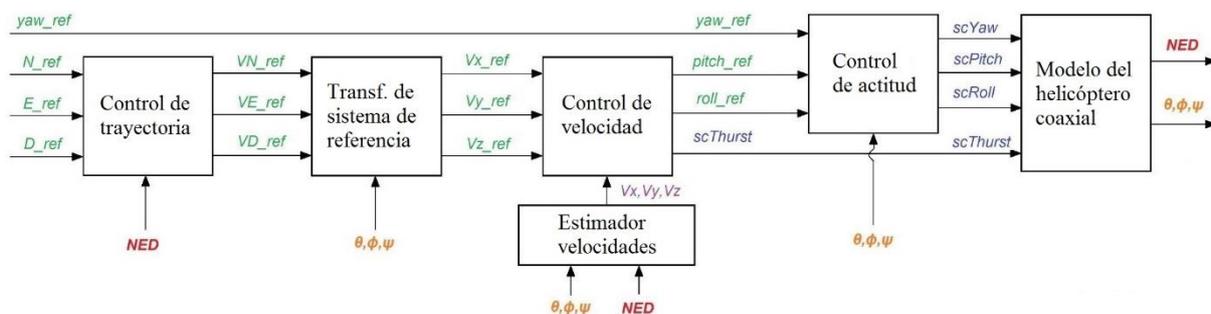


Figura 3: Esquema de la estructura de control.

1.2.2 Control

En la Figura 3 se puede observar el esquema de la estructura de control, que como ya se había comentado en otros apartados, se trata de una estructura de control en cascada. Es decir, una estructura de control donde los controladores se sitúan uno detrás de otro, y las salidas obtenidas por un controlador son las referencias del siguiente.

Se observa que el primer controlador que encontramos es el Control de Trayectoria, el cual proporciona las velocidades de referencia que debe tomar el helicóptero en función de la posición en la que se encuentra y la posición destino, es decir, en función del error de posición en los tres ejes.

Posteriormente, se encuentra un bloque de transformación de coordenadas, que transforma estas velocidades de referencia calculadas en el sistema de referencia *mundo*, o el eje fijo proporcionado por el sistema de visión, y lo transforma al sistema de coordenadas *body*, o eje de coordenadas propio del helicóptero.

A continuación, tenemos el Control de Velocidad que calcula los ángulos de referencia de *pitch* y *roll* del helicóptero, y el valor de señal de control del paso colectivo, en función del error que existe entre las velocidades lineales de referencia y las velocidades reales del vehículo. Cabe decir que, como el sistema de visión solamente nos proporciona las medidas de posición y ángulos del helicóptero, para poder implementar este control es necesario disponer de un estimador de las velocidades. En el caso de este trabajo se ha optado por estimar las velocidades a partir de la derivada discreta hacia atrás de las posiciones.

Finalmente, se encuentra el Control de Actitud, que se encarga de calcular el valor de las señales de control del control de guiñada, del cíclico longitudinal y del cíclico lateral, en función del error existente entre la referencia de los ángulos *yaw*, *pitch* y *roll*, y el valor real medido, respectivamente.

Tabla 1: Constantes de los controladores PD de las velocidades del helicóptero, en el anterior proyecto.

	Kp	Kd
V_x	-0.2819	-1.2406
V_y	0.2669	1.1692
V_z	-2.4325	-1.9217

Por lo que se refiere a los controladores diseñados, el control de trayectoria está implementado con un control proporcional basado en cálculos trigonométricos que intenta en todo momento que la trayectoria del punto origen al punto destino se realice en forma de línea recta. Por otro lado, el control de las velocidades está implementado con controladores del tipo Proporcional-Derivativo (PD), siendo sus constantes las que se muestran en la Tabla 1 (Proporcional- K_p , Derivativa- K_d). Finalmente, el controlador de actitud se ha implementado a partir de un control PD para el ángulo yaw y dos controladores Proporcional-Integrales (PI) para los ángulos $pitch$ y $roll$.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El objetivo del presente trabajo es el de substituir los controladores PD de las velocidades por unos controladores que no presenten los problemas debidos a la amplificación del ruido. Para ello, se mantendrán los controladores de trayectoria y de actitud, así como el bloque de transformación de coordenadas y el bloque de estimación de las velocidades lineales del helicóptero.

En [7] se propone el uso de controladores Fuzzy combinados con controladores PID para helicópteros con resultados satisfactorios. En [3], Kadmiry realiza un estudio sobre la implementación de controladores Fuzzy en helicópteros mostrando también resultados satisfactorios. Se ha seleccionado esta técnica de control para substituir a los ya implementados controladores PD de las velocidades, y así estudiar sus resultados aplicados al helicóptero coaxial.

$$\frac{V_x}{pitch_ref} = \frac{1}{s} \left(\frac{-9.81}{13.17s + 1} \right) \quad (2)$$

$$\frac{V_y}{roll_ref} = \frac{1}{s} \left(\frac{9.81}{12.47s + 1} \right) \quad (3)$$

$$\frac{V_z}{sc_thrust} = \frac{1}{s} \left(\frac{-1.9774}{0.0813s + 1} \right) \quad (4)$$

Para realizar el diseño de los controladores Fuzzy partiremos de las funciones de transferencia en continuas de las velocidades. Dichas funciones de transferencia se han obtenido a partir del modelo lineal obviando los términos de acoplamiento entre

variables, los cuales se ha podido comprobar que son mínimos en el proceso de experimentación. Estas funciones de transferencia (Ec. 2, Ec. 3 y Ec. 4) relacionan la velocidad en los ejes x , y y z , con sus respectivas acciones de control, las cuales por orden son los ángulos de referencia de $pitch$ y de $roll$ y la señal de control del thrust o empuje.

Como se puede observar en los tres casos se trata de una función de primer orden más un integrador, siendo las funciones de las velocidades en los ejes x y y casi idénticas pero con ganancia opuesta, y la función de la velocidad en el eje z con una ganancia menor y con una constante de tiempo mucho menor y por lo tanto una respuesta más rápida.

2 CONTROL FUZZY

El Control Fuzzy es una técnica de control inteligente basada en la lógica Fuzzy o lógica borrosa. Una descripción del funcionamiento y del diseño la lógica Fuzzy, así como sus posibles aplicaciones, se encuentra en [8].

A continuación, se muestran los tres controladores Fuzzy que se han desarrollado en este trabajo para controlar las velocidades lineales del helicóptero coaxial en cada uno de los ejes: V_x , V_y y V_z .

2.1 CONTROL DE V_x

Tal como se puede ver en la ecuación (2), la planta que relaciona la velocidad en el eje x del helicóptero con el ángulo de $pitch$ tiene un integrador puro. Es por eso que al implementar un controlador con técnicas de control convencional se optó por diseñar un PD ya que la planta por sí sola ya es capaz de seguir consignas de tipo escalón. De la misma forma, en el controlador Fuzzy también será necesario diseñar un controlador de tipo proporcional y derivativo. Por ello, el bloque del controlador deberá tener dos entradas: el error de V_x y la variación o derivada de este error. En la Figura 5 se muestra el esquema en Simulink del controlador Fuzzy, donde la derivada o variación del error se obtiene mediante la fórmula de la ecuación (5). Para ello, usamos el bloque de Simulink *Transport Delay*, implementando un retardo (o *delay*) igual al periodo de muestreo del sistema discreto real.

$$\Delta e = e(k) - e(k-1) \quad (5)$$

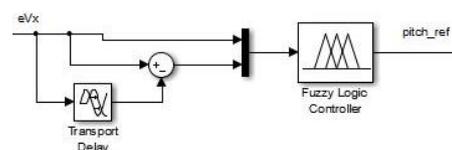


Figura 5: Esquema del controlador Fuzzy de V_x .

Cabe decir que, como en las tres plantas es necesario un control con acción proporcional y derivativa, el esquema de la Figura 5 será el que se usará en los tres controladores de las velocidades.

En la Figura 6 se observa la gráfica de las funciones de pertenencia de la entrada del error de V_x , donde se puede ver que se han creado tres etiquetas lingüísticas distribuidas equitativamente con a lo largo del rango del error de velocidad, limitado entre -1 y 1 m/s. Al tener las funciones de pertenencia equitativamente distribuidas conseguimos que la variación en la acción proporcional se produzca de forma suave. Por otro lado, en la Figura 7 se observa el conjunto de funciones de pertenencia de la variación del error de V_x , donde de nuevo tenemos un total de tres etiquetas lingüísticas, pero en este caso estas no se encuentran equitativamente distribuidas a lo largo del rango de -0.1 a 0.1 m/s². De esta forma, se consigue una acción derivativa mucho más abrupta.

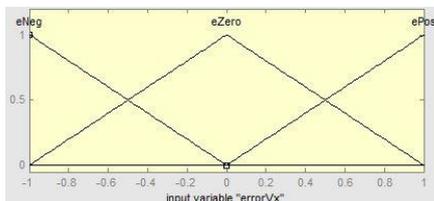


Figura 6: Funciones de pertenencia del error de V_x .

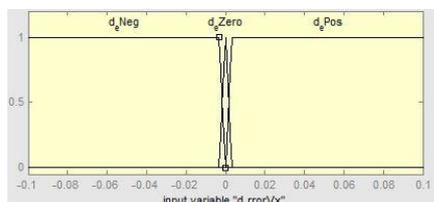


Figura 7: Funciones de pertenencia de la variación del error de V_x .

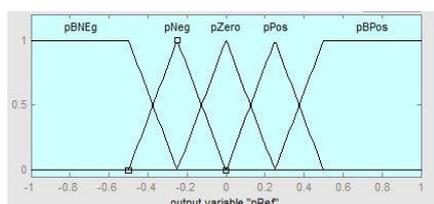


Figura 8: Funciones de pertenencia del referencia del ángulo $pitch$.

El conjunto de funciones de pertenencia de la salida del controlador de V_x se puede encontrar en la Figura 8. Como observamos para la salida se han supuesto un total de cinco etiquetas lingüísticas. Dado que se consideran como ángulos máximos de $pitch$ los valores de 0.6 rad y -0.6 rad, se han repartido las funciones de pertenencia equitativamente entre este rango.

En la Tabla 2 se observa el conjunto de reglas de este controlador, donde las columnas representan la

variable del error de V_x y las filas la variable de la variación del error. Cabe decir que este conjunto de reglas ha sido creado teniendo en cuenta que la ganancia de la planta es negativa. Por lo tanto, si por ejemplo el error es negativo (cuando la salida está por encima de la referencia) deberemos enviar una señal positiva para reducir el error.

Tabla 2: Conjunto de reglas del controlador de V_x .

	eNeg	eZero	ePos
deNeg	BPos	Pos	Zero
deZero	Pos	Zero	Neg
dePos	Zero	Neg	BNeg

Finalmente, en la Figura 9 se muestra la superficie de control para este controlador a partir de las funciones de pertenencia y el conjunto de reglas que se acaban de ver.

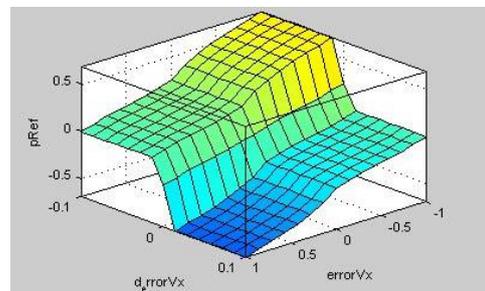


Figura 9: Superficie de control del controlador de V_x .

2.2 CONTROL DE V_y

Dado que la función de transferencia de la planta de V_y , que encontramos en la ecuación (3), es muy similar a la planta de V_x , se han diseñado el mismo conjunto de funciones de pertenencia tanto para el error de V_y , como la variación de error de V_y y para la referencia del ángulo $roll$ del helicóptero. De la misma forma, se ha diseñado un conjunto de reglas equivalente al de la planta de V_x pero teniendo en cuenta el cambio de signo en la ganancia. Por eso, la superficie de control de este controlador es igual a la que se muestra en la Figura 9, pero cambiando el signo el valor de la referencia de $pitch$.

2.3 CONTROL DE V_z

Para el control de la velocidad en el eje z se ha vuelto a implementar un control Fuzzy con acción proporcional y acción derivativa. Es decir, se usa como entrada el error de V_z y la variación del error. En las Figuras 10, 11 y 12 se muestra, respectivamente, el conjunto de funciones de pertenencia del error, la variación de error y la salida del controlador, que en este caso es la señal de control de $thrust$ o empuje. Vemos como de nuevo usamos tres etiquetas lingüísticas para las entradas y cinco para las salidas.

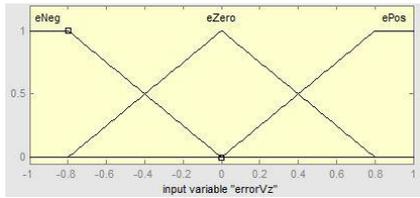


Figura 10: Funciones de pertenencia del error de V_z .

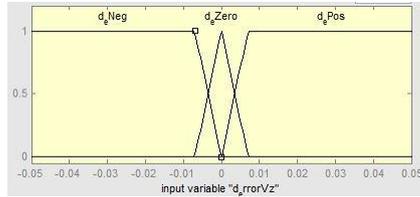


Figura 11: Funciones de pertenencia de la variación del error de V_z .

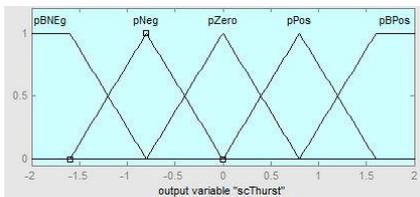


Figura 12: Funciones de pertenencia de la señal de control $scThrust$.

Tal como vemos en la Tabla 1, para el control de V_z con el control PD, la diferencia del valor entre las constantes proporcional y derivativa es menor que en los controladores de V_x y V_y . Por ello, para tener una acción proporcional menos suave, las funciones de pertenencia del error de V_z no se han distribuido en todo el rango del error. Y por otro lado, las funciones de pertenencia de la variación del error de V_z se han hecho menos abruptas que en los anteriores controladores. De esta forma conseguimos que la acción derivativa del controlador no sea tan importante. También, ya que la ganancia de la planta de V_z es menor que en las otras dos plantas, se ha optado por aumentar el rango de la salida de -2 a 2 para que el controlador sea algo más rápido.

El conjunto de reglas de este controlador es idéntico a la del controlador de V_x (Tabla 2), puesto que en ambos casos la ganancia de la planta es negativa.

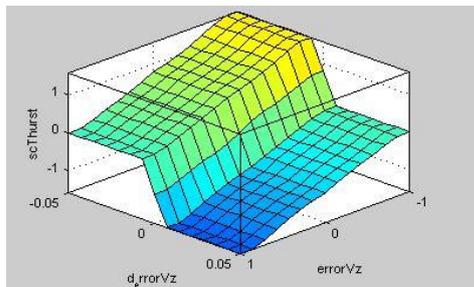


Figura 13: Superficie de control del control de V_z .

Finalmente, en la Figura 13 se muestra la superficie de control obtenida a partir de las funciones de pertenencia diseñadas y el conjunto de reglas elegido. Como se puede ver, es similar a las superficies de control de los controladores anteriores, pero esta vez se muestra más suave en el paso por cero de las variables de entrada.

3 RESULTADOS

Para comprobar el correcto funcionamiento de los controladores Fuzzy diseñados, estos se han validado en simulación. Para ello, se han realizado un conjunto de simulaciones con las plantas obtenidas del modelo lineal (ecuaciones 2, 3 y 4) dado que estas plantas están aisladas y desacopladas del resto del sistema y por lo tanto se puede evaluar el comportamiento del controlador sin depender del resto de controladores. Posteriormente, se ha validado el funcionamiento con el modelo no lineal completo del helicóptero coaxial.

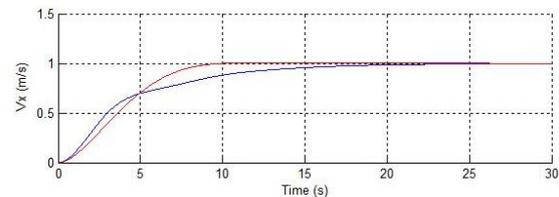
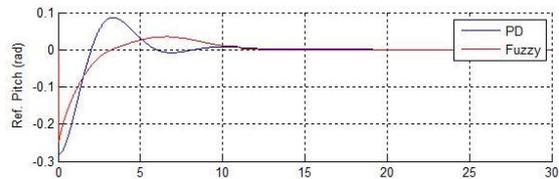


Figura 14: Comparación de las respuestas de V_x con los dos controladores, usando el modelo lineal. a) señal de control b) velocidad en el eje x .

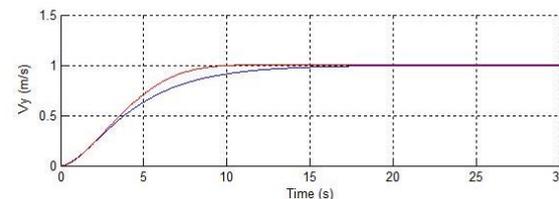
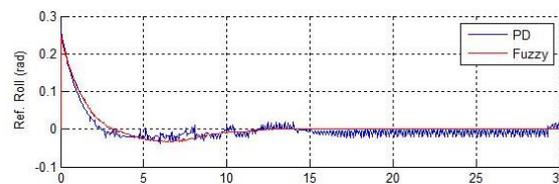


Figura 15: Comparación de las respuestas de V_y con los dos controladores, usando el modelo lineal. a) señal de control b) velocidad en el eje y .

En la Figura 14 encontramos una comparación de las respuestas obtenidas en el control de V_x con el controlador PD y con el control Fuzzy diseñado en

este trabajo, cuando la referencia de V_x es de 1 m/s. En la gráfica superior observamos la salida del controlador, que es el ángulo de referencia de *pitch*, y en la gráfica inferior observamos la evolución temporal V_x . Tal como se puede ver, con el controlador Fuzzy se consigue estabilizar antes el valor de V_x , a pesar de que inicialmente con el controlador PD conseguimos una pendiente mayor. Por otro lado, si vemos la salida de los controladores, observamos como la obtenida por el control Fuzzy contiene menos oscilaciones que la obtenida por el controlador PD.

En la Figura 15 observamos la misma comparación que en el caso anterior, pero esta vez del control de la velocidad en el eje y . Tal como observamos en la gráfica inferior, que muestra la respuesta de V_y , de nuevo la respuesta obtenida por el controlador Fuzzy diseñado es ligeramente más rápida que la obtenida por el controlador PD. Por otro lado en la salida del controlador, que en este caso es la referencia del ángulo *roll*, vemos como en el controlador PD se produce un exceso de vibraciones rápidas debido al valor alto de la acción derivativa. No obstante, con el controlador Fuzzy estas vibraciones desaparecen.

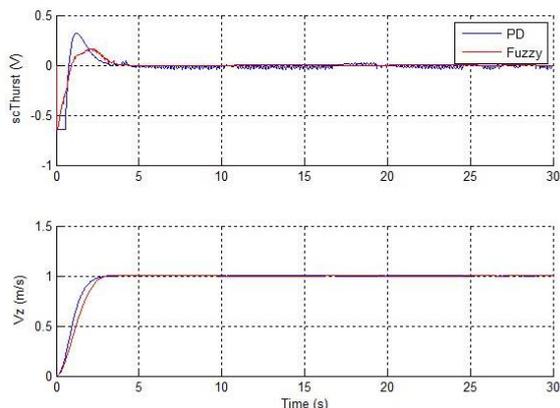


Figura 16: Comparación de las respuestas de V_z con los dos controladores, usando el modelo lineal. a) señal de control b) velocidad en el eje z .

En la Figura 16 observamos el resultado obtenido después de realizar el mismo experimento de simulación. Es decir, comparar el resultado de los controladores PD (de color azul) y Fuzzy (de color rojo), cuando la referencia de V_z es de 1 m/s. Tal como podemos observar en la gráfica inferior, donde se muestra la respuesta temporal de V_z , en este caso la respuesta obtenida por el controlador PD es ligeramente más rápida que la obtenida por el controlador Fuzzy. Cabe decir que se han diseñado varias configuraciones de las funciones de pertenencia del controlador Fuzzy de V_z , pero en ninguna de ellas se ha sido capaz de obtener un controlador más rápido que el anteriormente conseguido con el control PD. Por lo tanto se podría decir que en este caso el controlador obtenido con la técnica de control

convencional es mejor que el obtenido usando el control Fuzzy. No obstante, esta afirmación se debería matizar, puesto que si observamos la salida obtenida por los controladores, podremos ver como la salida obtenida por el controlador PD de nuevo muestra una alta cantidad de vibración de alta frecuencia que no interesan. Pero en la respuesta obtenida por el controlador Fuzzy estas vibraciones desaparecen. De esta forma, si en el sistema real se tiene un conjunto de medidas de la velocidad que varían mucho, las vibraciones de alta frecuencias se magnificarían aún más. Es por eso que en la práctica es posible que el controlador Fuzzy demuestre mejores resultados.

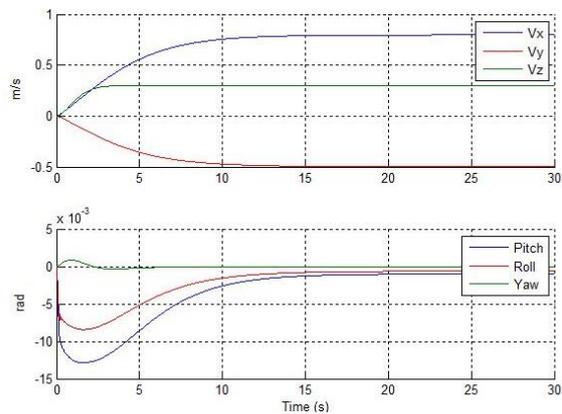


Figura 17: Respuesta del conjunto de velocidades con el modelo no lineal.

En la Figura 17 se muestran las gráficas obtenidas, con las velocidades lineales del helicóptero en la parte superior y los ángulos del mismo en la gráfica inferior, una vez realizado un experimento de simulación usando el modelo no lineal. En este experimento se ha prescindido del lazo de control de trayectoria, y se ha supuesto unas referencias de las velocidades que son las siguientes: $V_x = 0.8 \text{ m/s}$, $V_y = -0.5$, $V_z = 0.5 \text{ m/s}$. Tal como se puede comprobar, los controladores Fuzzy diseñados responden perfectamente con el modelo no lineal, el cual es un modelo muy completo y que se ajusta mucho al comportamiento del helicóptero real. Se observa como las respuestas de V_x y V_y se estabilizan en su referencia en aproximadamente 15 segundos, mientras que la velocidad en el eje z lo hace en aproximadamente 3 segundos.

Finalmente, en la Figura 18 se muestra un experimento de simulación realizado con el sistema de control en cascada completo, incluyendo los controladores Fuzzy diseñados, sobre el modelo no lineal de la planta. En este caso se ha supuesto unas referencias de las coordenadas espaciales, o de posición, que son las siguientes: $North = 6 \text{ m}$, $East = 3 \text{ m}$, $Down = -1 \text{ m}$. Podemos observar como de nuevo el sistema con el control de velocidad Fuzzy funciona correctamente, y el helicóptero conseguiría estabilizarse en su posición destino alrededor de los 60 segundos. Cabe decir que

la diferencia principal que se observa de este sistema de control, respecto al diseñado en el proyecto previo, no es solamente ese pequeño incremento de velocidad, sino el hecho de que ahora la respuesta de los ángulos y de las velocidades es mucho más limpia. Es decir, ya no se producen esas vibraciones de frecuencias altas debido a la elevada acción derivativa de los controladores.

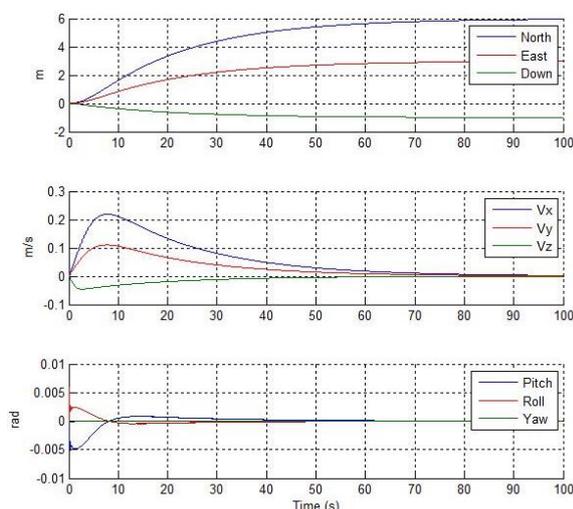


Figura 18: Respuesta del sistema completo con el modelo no lineal.

4 CONCLUSIONES

La contribución de este artículo consiste en mostrar cómo sustituir el control clásico PD por un control Fuzzy y analizar la mejora en las prestaciones en el caso del control de las velocidades de un helicóptero coaxial. Los resultados en simulación muestran que con el nuevo controlador Fuzzy se obtienen unas respuestas ligeramente más rápidas para las velocidades en los ejes x e y , y una respuesta similar para la velocidad en el eje z . No obstante, se muestran unas respuestas mucho más limpias que con el controlador PD, debido a que se eliminan las variaciones de alta frecuencia debida a la alta acción derivativa en todos los controladores. Finalmente, se muestra que el sistema de control en cascada completo incluyendo este control Fuzzy muestra un correcto funcionamiento con el modelo no lineal del helicóptero coaxial.

Como líneas futuras de este trabajo se plantea la validación de los controles diseñados en situaciones más próximas a aplicaciones reales para conocer la bondad de la parametrización realizada, así como la realización de un estudio de estabilidad del control.

Agradecimientos

Al profesorado de la Universidad Complutense de Madrid y en especial a la profesora Matilde Santos por

ofrecerme la oportunidad de realizar este estudio en el marco de la asignatura de Control Inteligente.

A la Universitat Politècnica de Catalunya por poner a mi disposición la plataforma de control, y en especial a los profesores Bernardo Morcego y Ramón Pérez por asesorarme en la redacción del presente documento.

Este trabajo ha sido subvencionado por el Gobierno Español (MINISTERIO DE ECONOMIA Y COMPETITIVIDAD) y FEDER bajo el proyecto DPI2014- 58104-R (HARCRICS).

Referencias

- [1] del-Cerro, J., Barrientos, A., Martínez, A., (2009), "Modelling and Control Prototyping of Unmanned Helicopters", *Aerial Vehicles*, Thanh Mung Lam (Ed.), InTech.
- [2] Fankhauser, P., Boubdallah, S., Leutenegger, S., Siegwart, R., "Modeling and Decoupling Control of the Coax Micro Helicopter", *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, 2011.
- [3] Kadmiry, B., (2002), "Fuzzy Control for an Unmanned Helicopter", Thesis for degree of Licentiate of Engineering, *Linköpings universitet*.
- [4] Morcego, B., "Coaxial UAV helicopter control laboratory design," *Control & Automation (MED), 2012 20th Mediterranean Conference on, Barcelona*, 2012, pp. 1591-1596.
- [5] Rubí, B., Morcego, B., Pérez, R., (2016), "Modelling and Control of a Coaxial Helicopter UAV in an Indoor Laboratory", *2016 3rd SYSTOL International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems*, Barcelona, 2016.
- [6] Rubí, B., (2015), "Study for the modeling and control of a coaxial helicopter Unmanned Aerial Vehicle (UAV)", Trabajo Final de Máster, *UPC*.
- [7] Sanchez, E. N., Becerra, H. M., Velez, C. M., "Combining fuzzy and PID control for an unmanned helicopter", *NAFIPS 2005-2005 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society*, 2005.
- [8] Takagi, T, Sugeno, M, "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-15, no. 1, 1985.