

# Diseño de Controlador Difuso y por Variables de Estado para un Sistema Ducted Fan

Jorge Mario Zamora Vélez, *Student Member, IEEE*

**Abstract**—In the present document it presents an approach of a Fuzzy Control and a Feedback Discrete-Time States-Space Control design by a Ducted Fan Planar Model, and its comparison between they both by using Matlab as algorithms computing tool to model and simulate the plant and the controllers.

**Keywords**—Ducted Fan, Fuzzy Control, Flight Control Systems, State-Space Feedback Control, Uninhabited Combat Aerial Vehicle.

## I. INTRODUCCIÓN

Primordialmente, este documento trata la aplicabilidad del control lógico difuso FIS al control de sistemas no lineales, enfocadas en el empleo de la herramienta computacional Matlab. Sin embargo, se da un vistazo al análisis de nuevas tecnologías militares

Uno de los objetivos principales de este texto es revelar la simplicidad con la cual puede ser controlado un sistema no lineal MIMO aplicando la lógica difusa.

Inicialmente se hará una descripción funcional de la planta, luego se hará un análisis no muy riguroso de la dinámica de la planta, centrándose fundamentalmente en su inercia. Después se hará un enfoque en la metodología de control por variables de estado y a continuación de lógica difusa. Finalmente se realizará una comparación de su rendimiento, observando tanto la controlabilidad, el error en estado estable, rango de operación, y esfuerzo de control.

El control difuso es una alternativa práctica para una gran variedad de aplicaciones de control enigmáticas y/o complejas, ya que proporciona un método conveniente para la construcción de controladores no lineales a través del uso de información heurística. Tal información heurística proviene de un operador que actúa como controlador dentro del lazo del proceso; o incluso del ingeniero de control quien ha realizado extensos análisis, modelamientos y desarrollo de algoritmos de control [6].

Sin tener en cuenta de donde proviene el conocimiento del control heurístico, la lógica difusa proporciona un formalismo simple y trivial para representar e implementar ideas mediante el empleo de descripciones lingüísticas que se tienen acerca de

cómo lograr un control eficaz y funcional del proceso dadas por el experto.

## II. DUCTED FAN

Desde los años 60's, impulsados por los conflictos bélicos mundiales y la carrera armamentista, la investigación y el desarrollo de tecnología militar son prioridad de las naciones de primer mundo. Gracias a esto y junto con las ideas creativas de la ciencia ficción se ha desarrollado gran parte de la tecnología actual tal como el ordenador y la Internet. A mediados de los años 80's se empezó a estudiar los UCAV's (Uninhabited Combat Aerial Vehicles), Vehículos No Tripulados de Combate Aéreo por sus siglas en inglés; dispositivos de vuelo autónomo e inteligente o comandados por un operador desde un cuarto de control basado en tecnología de realidad virtual. Estos sistemas serán capaces de realizar maniobras agresivas de alta pendiente y seguimiento de trayectorias, operando sobre los límites de los actuadores. Su uso inicialmente está enfocado a realizar tareas de reconocimiento y vigilancia, no obstante, el objetivo es emplearlo como arma de ataque. En la figura 1 se ilustra una idea artística (Fig.1).



Fig 1: Imagen Artística de un Ducted Fan operando como UCAV.

El sistema de vuelo UCAV de mayor expectativa hoy es denominado *Ducted Fan*, con el cual desde ya hace más de una década se vienen realizando experimentos en varios centros de investigación, tales como la University of Colorado y principalmente la California Institute of Technology (Fig.2).

1 Hover flight: Vuelo Inmóvil  
2 Thrust Vectored  
3 Planar Model

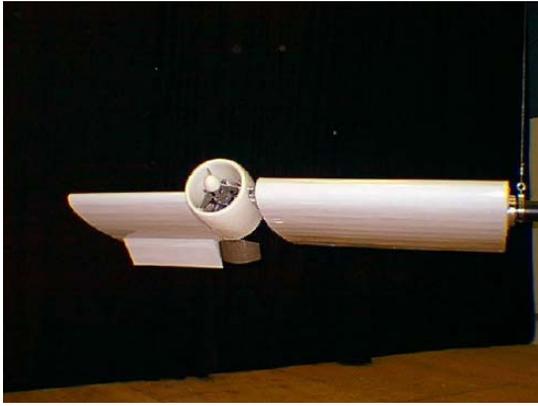


Fig. 2. Caltech Ducted Fan. Prototipo de Ducted Fan del California Institute of Technology [4].

Un Ducted Fan fundamentalmente consiste en una aeronave de vuelo autosostenido<sup>1</sup> (tal como el Harrier), y vuelo directo de empuje vectorizado<sup>2</sup> (como el F18-HARV) con libertad de movimiento traslacional y rotacional completo. Este consiste de un motor de alta eficiencia que produce la rotación de un par de hélices que actúan como ventilador (Fan), produciendo una fuerza de empuje ascendente. Un sistema de flaps permite controlar la dirección del empuje con el fin de fijar una trayectoria espacial definida.

Aquí se describirá el modelo plano<sup>1</sup> o bidimensional más simple tomando en cuenta principalmente la inercia del sistema y sus principales no linealidades como características fundamentales de un sistema de vuelo convencional, dejando por fuera las dinámicas de los actuadores, limitaciones de los sensores, algunas fricciones y los efectos aerodinámicos, que son de poca importancia durante el vuelo autosostenido y a velocidades lentas; también omite los términos giroscópicos que resultan del momento angular del giro de las hélices y además, ignora varias fuerzas adicionales existentes que actúan de manera incierta en diferentes puntos del sistema. Este modelo a pesar de no ser completo, es útil para determinar las características básicas de vuelo y probar las condiciones iniciales de diseño de controladores.

### III. MODELAMIENTO DEL DUCTED FAN

Inicialmente se definen las variables y parámetros que aplican sobre el modelo. Denotando  $(x,y)$  como la posición coordenada, referenciado a los ejes principales del Ducted Fan a una distancia  $l$  de su centro de masa; y  $\theta$ , la orientación del modelo con respecto a la vertical. Asumiendo que sobre el sistema actúan dos fuerzas  $f_1$  y  $f_2$  a una distancia  $r$  del origen del sistema coordenado, que son perpendicular y paralela al plano del Ducted Fan respectivamente (Fig. 3).

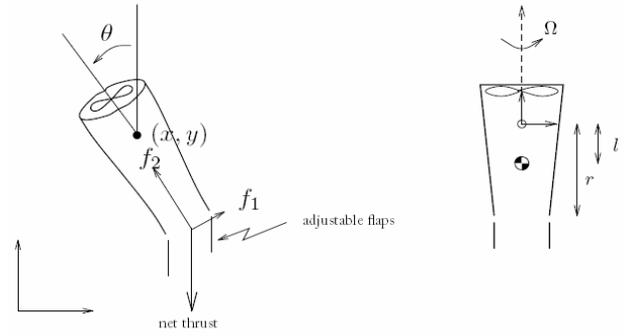


Fig. 3. Dinámica básica y eje de referencia coordinado para el Ducted Fan. [3].

El modelo analítico del sistema puede ser obtenido mediante un análisis físico de su dinámica o más fácilmente a través de la ecuación de lagrange [3], extrayendo sus funciones de energía potencial y cinética, para finalmente llegar al sistema de ecuaciones diferenciales no lineales (1).

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -mg\sin\theta - d\dot{x} + \cos\theta u_1 - \sin\theta u_2 \\ m\ddot{y} &= mg(\cos\theta - 1) - d\dot{y} + \sin\theta u_1 + \cos\theta u_2 \\ J\ddot{\theta} &= -mgl\sin\theta + ru_1 \end{aligned} \quad (1)$$

Donde  $m$  es la masa inercial del Ducted Fan,  $J$  su momento inercial,  $g$  la constante gravitacional,  $r$  la distancia donde actúan las fuerzas al origen,  $l$  la distancia entre el centro de masa al origen, y  $d_i$  el coeficiente de fricción y viscosidad para el eje  $i$ . Por simplicidad, se supondrá un coeficiente de fricción y viscosidad único, y por conveniencia, se redefinieron las entradas tal que el origen sea un punto de equilibrio del sistema con entradas cero.

A continuación se determina el modelo lineal de la planta. Primero se debe hacer el cambio de variables tal que el modelo quede como un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias (ODE's) (2).

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{U}) \quad (2)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones algebraicas se observa que el sistema posee infinitos puntos de equilibrio para las variables de estado  $X_1$  y  $X_3$ , correspondientes a la posición  $X$  y  $Y$ , mientras que para  $X_5$  ó  $\theta$  solo existen 2 únicos puntos de equilibrio (3).

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \bar{x}_3 \\ \bar{x}_4 \\ \bar{x}_5 \\ \bar{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ 0 \\ \mathbf{R} \\ 0 \\ 0, \pi \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -2mg \end{bmatrix} \quad (3)$$

Evidentemente se emplean los puntos de equilibrio para  $X_5$  en cero, de lo contrario, el Ducted Fan estaría de cabeza. A continuación se aplica el jacobiano generalizado al modelo no

<sup>1</sup> Planar Model

lineal alrededor de los puntos de operación del sistema [1] para determinar entonces el modelo lineal del Ducted Fan (4) (el punto de operación será el mismo punto de equilibrio por simplicidad).

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -d\dot{x} - mg\theta + u_1 \\ m\ddot{y} &= -d\dot{y} + u_2 \\ J\dot{\theta} &= mgl\theta + ru_1 \end{aligned} \quad (4)$$

Para efectuar un ejemplo de control, es necesario definir numéricamente los parámetros del modelo (1). Y dado que en la actualidad existen institutos de investigación en el área aplicada, se trabajará con los datos experimentales suministrados por [2], que se muestran en la tabla 1.

Se evalúan los parámetros sobre el modelo lineal (4) y se hace el cambio a variables de estado (5) para realizar el control.

TABLA 1  
PARÁMETROS DEL DUCTED FAN

Símbolo	Descripción	Valor
$m$	Masa Inercial del Ducted Fan	4.0 Kg
$g$	Constante Gravitacional	9.8 m/s <sup>2</sup>
$J$	Momento de Inercia	0.0475 Kg·m <sup>2</sup>
$r$	Distancia del Origen al Punto de Fuerza Aplicada	0.26 m
$l$	Distancia del Origen al Centro de Masa	0.0213 m
$d$	Coefficiente de Fricción y Viscosidad	0.3431 Kg·s
$U_{1\max}$	Rango de Operación de Fuerza Perpendicular Aplicada	-2N a 2N
$U_{2\max}$	Rango de Operación de Fuerza Paralela Aplicada	0N a 5N

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.25 & 0 & 0 & -9.8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -17.5781 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.25 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0.25 \\ 0 & 0 \\ 5.4737 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{Y} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{U} \end{aligned} \quad (5)$$

#### IV. CONTROLADOR POR REALIMENTACIÓN DE VARIABLES DE ESTADO SSF

Para lograr un control más robusto, se modifica el controlador lineal para un sistema seguidor [1], que consiste simplemente en la adición de un integrador para eliminar el error en estado estable ante variación de parámetros y perturbaciones, esto genera una transformación en el espacio de estados (6).

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{e} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{U}_e & \dot{\mathbf{e}} &= \hat{\mathbf{A}}\mathbf{e} + \hat{\mathbf{B}}\mathbf{U}_e \\ \mathbf{Y}_e &= \mathbf{C}\mathbf{e} & \mathbf{Y}_e &= \mathbf{C}\mathbf{e} \end{aligned} \quad (6)$$

##### A. Determinación de Parámetros de Diseño

Para el control de este sistema se optará para que alcance la referencia de manera sobreamortiguada, así que el único parámetro de diseño esta dado por el tiempo de establecimiento  $t_s$  para ( $t_s = 5\text{seg}$  con  $M_p = 0\%$ ) para ambas salidas.

$$P_{ds}(\text{Re}) = \frac{\ln|e_s|}{t_s} \quad (7)$$

Inicialmente se calcula el polo deseado (7), donde  $e_s$  corresponde al error en estado estable, el cual por convención se establece dentro del 2% de la señal de referencia.

Se adicionan algunos polos reales más estables que los dominantes calculados, que compensen el orden del sistema (8). Lo bastante rápidos como para que no afecten la respuesta del sistema y lo suficientemente alejados para que el esfuerzo de control no sea muy grande.

$$\alpha_d(s) = (s + P_d(s)) \prod_{k=1}^{n_p} (s + P_d(s) - k \cdot i_{ps}) \quad (8)$$

Donde  $i_{ps}$  es el intervalo de separación entre los polos adicionales (arbitrariamente  $i_{ps} = 0.1$ ) y  $N_p$  la cantidad de polos agregados (6 polos incluyendo 2 debido a la ganancia del integrador). Se computa (8) y se obtiene el polinomio característico deseado para la planta en lazo cerrado (9).

$$\alpha_d(s) = s^8 + 3.4396s^7 + 5.1728s^6 + 4.4426s^5 + \dots \quad (9)$$

$$2.3832s^4 + 0.8177s^3 + 0.1752s^2 + 0.0214s + 0.0011$$

##### B. Cálculo de Constantes de Realimentación

Ya calculado el polinomio deseado  $\alpha_d$  y junto con el espacio de estados modificado (5) se computan las constantes de realimentación  $\mathbf{K}$  para el sistema seguidor, asumiendo una entrada al sistema de la forma (10).

$$\mathbf{U}_e = -\hat{\mathbf{K}}\mathbf{e} \quad (10)$$

Igualando el polinomio característico del sistema autónomo con el polinomio deseado (11), se obtienen las constantes de realimentación para los estados (12).

$$[s\mathbf{I} - (\hat{\mathbf{A}} - \hat{\mathbf{B}}\mathbf{K})] = \alpha_d(s) \quad (11)$$

$$K = \begin{bmatrix} -5.8538 & -3.3056 & -0.0404 & -0.0102 & 6.3122 & 1.7869 \\ 0.01777 & 0.0058 & 49.8107 & 22.9787 & -0.0082 & -0.0014 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$K_i = \begin{bmatrix} -0.1917 & -0.0021 \\ 0.0009 & 1.8073 \end{bmatrix}$$

C. Simulación del Diseño

Para el cálculo y la simulación de la planta y el controlador se empleó la herramienta computacional Matlab 7.5 2007b.

Computadas las constantes de realimentación a través de algoritmos de la herramienta como “place”, se implementa el sistema completo en Simulink (Fig. 3) y se corre (Fig. 4-5).

Con el fin de probar la robustez del controlador, se toman condiciones iniciales y referencias algo exigentes.

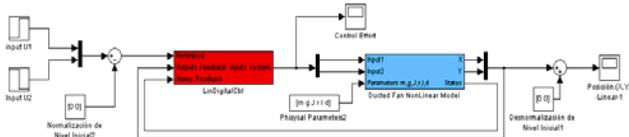


Fig. 4. Implementación del sistema completo (Controlador por Realimentación de Variables de Estado - Planta) de Lazo Cerrado en Simulink.

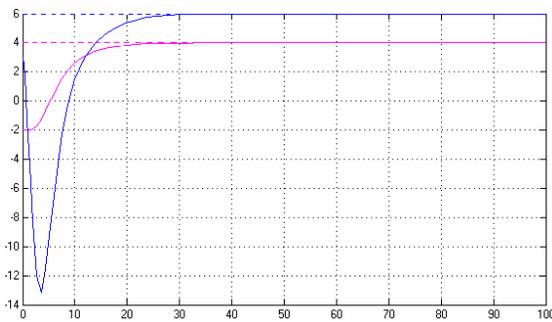


Fig. 4. Respuesta de posición (x, y) ante escalones (u<sub>1</sub>(t), u<sub>2</sub>(t)) = (4, 6) en condiciones iniciales de (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>) = (-2, 3). Posición X en morado y Y en azul.

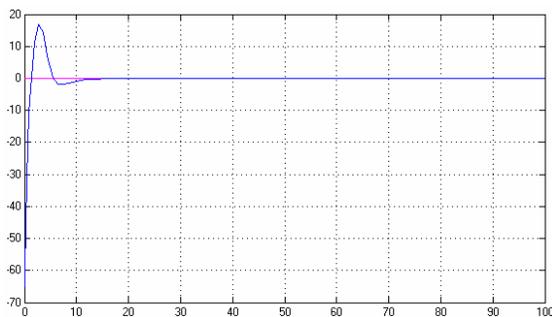


Fig. 5. Esfuerzo de Control (u<sub>1</sub>, u<sub>2</sub>) para Controlador por Realimentación de Variables de Estado ante escalones (u<sub>1</sub>(t), u<sub>2</sub>(t)) = (4, 6) en condiciones iniciales de (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>) = (-2, 3). Entrada de control u<sub>1</sub> en morado y u<sub>2</sub> en azul.

V. CONTROLADOR DIFUSO FIS

A. Planteamiento de los Metodología Difusa

Inicialmente se definen las entradas del sistema difuso como el error de posición del Ducted Fan con respecto a la

referencia de posición entrante e<sub>x,y</sub>. Y las salidas difusas, como la magnitud de las fuerzas paralela y perpendicular aplicadas al Ducted Fan. Por conveniencia normalizaremos el valor de las salidas a (-1,1), y por limitaciones del espacio de controlabilidad del sistema difuso las entradas variarán en (-10,10), (esta elección es arbitraria) (Tabla 2).

Se eligen cinco funciones de pertenencia MF de tipo triangular de manera arbitraria y conveniente para cada etiqueta de forma simétrica para ambas entradas (Fig. 6-7).

TABLA 2  
PARAMETROS DEL SISTEMA DIFUSO

<i>Sistema de Inferencia Difusa:</i>	Singleton (Takagüi-Sugeno)
<i>Tipo de Controlador:</i>	Proporcional
<i>Entradas del Sistema Difuso:</i>	Error de Posición X
1ra.	e <sub>x</sub> = x - Ref <sub>x</sub> Rango: (-10, 10)
2da.	Error de Posición Y e <sub>y</sub> = y - Ref <sub>y</sub> Rango: (-10, 10)
<i>Salidas del Sistema Difuso:</i>	1ra. U <sub>1</sub> Rango: (-1, 1)
2da.	U <sub>2</sub> Rango: (-1, 1)
<i>Metodología de Inferencia Difusa:</i>	Implicación
	Mínimo (min μ <sub>i</sub> (x))
	Asignación
	Máximo (max μ <sub>i</sub> (x))
	Defuzzificación
	Promedio Ponderado

La lógica del control es simplemente una descripción lingüística de la situación o acción de compensación. Esta se define mediante una serie de reglas, que definen en forma prepositiva la acción de control.

Situación: La salida U<sub>1</sub> solo varía proporcionalmente de forma negativa al error de posición X (U<sub>1</sub> ~ -e<sub>x</sub>), mientras que U<sub>2</sub> lo hace directamente proporcional con el error de posición Y (U<sub>2</sub> ~ e<sub>y</sub>).

Lo anterior señala que el sistema de inferencia difusa tendrá en total 10 reglas, 5 para cada entrada con su respectiva salida, las cuales se muestran en la tabla 3.

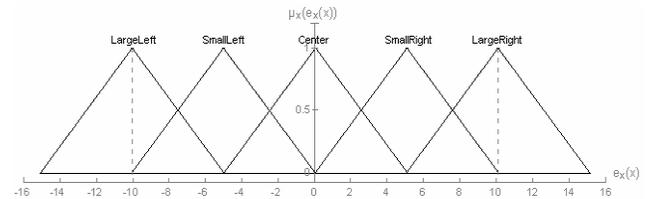


Fig. 6. Funciones de pertenencia MF's con sus etiquetas para la entrada de error de posición en X.

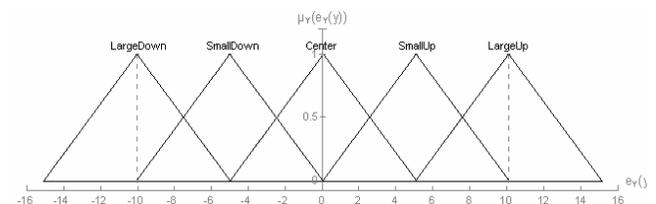


Fig. 6. Funciones de pertenencia MF's con sus etiquetas para la entrada de error de posición en Y.

TABLA 3  
REGLAS DE INFERENCIA DIFUSA

1	LargeRight		PosLarge
2	SmallRight		PosSmall
3	Si $e_x$ es Center	Entonces $U_1$ es	Null
4	SmallLeft		NegSmall
5	LargeLeft		NegLarge
6	LargeUp		NegLarge
7	SmallUp		NegSmall
8	Si $e_y$ es Center	Entonces $U_2$ es	Null
9	SmallDown		PosSmall
10	LargeDown		PosLarge

### B. Simulación del Diseño

Ya definidos todos los parámetros y metodologías de sistema de lógica difusa se procede a implementarlo en Matlab utilizando la herramienta del *Editor Básico de Sistemas de Inferencia Difusa* a través del comando *fuzzy* [5].

Introducidos los parámetros del sistema dentro del editor, se tendrán las reglas implementadas que son posibles de cotejar a través de las graficas de correspondencia o superficies (Fig. 8), la cual expone el comportamiento del controlador frente a cada entrada de manera recíproca a como se implementaron las reglas.

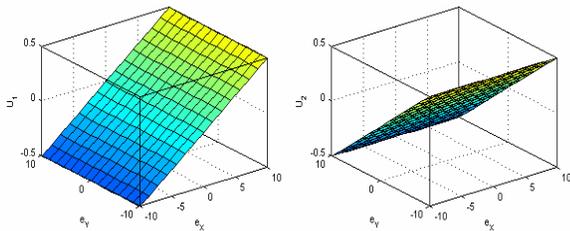


Fig. 9. Cotejo de reglas descriptivas con el comportamiento entrada-salida.

También es posible observar el proceso de defuzzificación, para cerciorarse de la acción sobre la planta (Fig. 9).

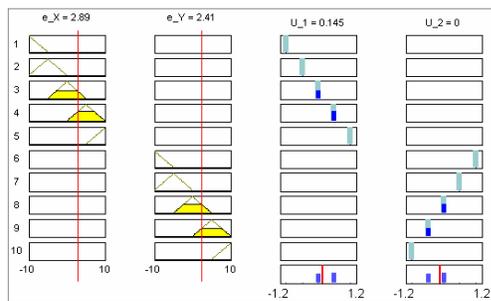


Fig. 10. Proceso de Defuzzificación

Finalmente se implementa en el Simulink de Matlab (Fig. 10) para comprobar el control. A continuación se analiza la respuesta del sistema y el esfuerzo de control (Fig. 11-12).

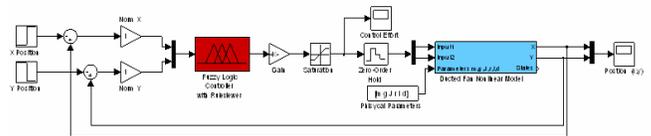


Fig. 7. Implementación del sistema completo (Controlador Difuso - Planta) de Lazo Cerrado en Simulink

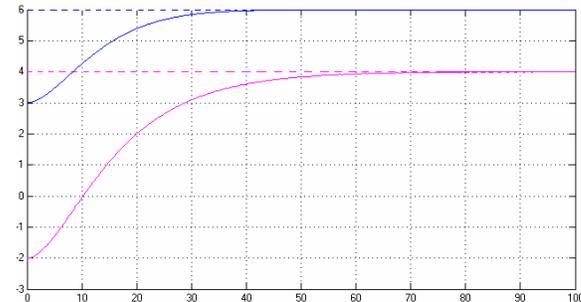


Fig. 11. Respuesta de posición (x, y) ante escalones ( $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ) = (4, 6) en condiciones iniciales de  $(x_0, y_0) = (-2, 3)$ . Posición X en morado y Y en azul.

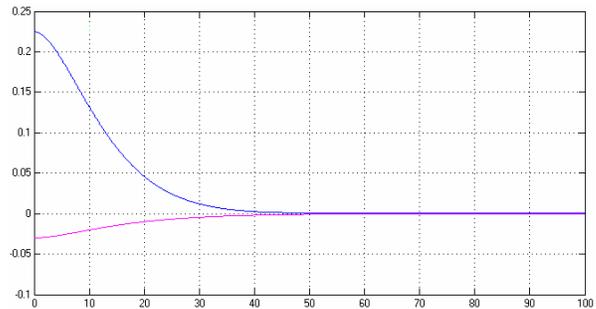


Fig. 8. Esfuerzo de control ( $u_1$ ,  $u_2$ ) para Controlador Difuso ante escalones ( $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ) = (4, 6) en condiciones iniciales de  $(x_0, y_0) = (-2, 3)$ . Entrada de control  $u_1$  en morado y  $u_2$  en azul.

## VI. ANALISIS DE RESULTADOS

Claramente se observa (Fig. 4) observar que la respuesta del control lineal es mucho más rápida que la del control FIS para ambas salidas, mientras que la respuesta del control lineal es de aproximadamente 10seg, para el control FIS tarda alrededor de 60seg para la referencia X, y 40seg para la referencia Y.

Cabe notar que el control lineal posee un transitorio de fase no mínima no deseable para la salida de posición X. Esto se debe a que el sistema de ecuaciones diferenciales es singular y posee puntos de equilibrio infinitos para los estados X y Y, por lo que las constantes de realimentación para estos estados son arbitrarias. No obstante, estas afectan tergiversadamente la respuesta deseada del sistema.

Este transitorio, conlleva un gran esfuerzo de control innecesario. A pesar de que la respuesta del control lineal es bastante vertiginosa, la magnitud del esfuerzo máximo de control necesario para lograr esta resultado es más amplio que el del control FIS. Analizando la respuesta del control FIS, se observa que la señal oscila alrededor de la trayectoria de convergencia. Esto se debe al cruce entre decisiones opuestas

de las funciones de pertenencia.

## VII. CONCLUSIONES

La velocidad del Ducted Fan bajo un controlador difuso (FIS) es más lenta con respecto a la del controlador por variables de estado, no obstante, el esfuerzo de control necesario para producir la respuesta es menor.

Ninguno de ambos controladores posee un error en estado estable significativo. Aunque cabe notar, que dependiendo de la ganancia del controlador difuso, este tendrá una mínima oscilación de forma uniforme alrededor de la trayectoria de convergencia sobre la referencia, tal y como se menciona en la sección anterior. Y además que el controlador lineal contiene un integrador, que lo hace un seguidor de la referencia.

Un controlador por variables de estado presenta inconvenientes cuando su sistema de ecuaciones es definido singular. Esto hace que existan soluciones infinitas para ciertas variables de la ecuación, en este caso la posición X y Y, que no obstante, afectan la dinámica de la planta.

Un sistema difuso solo requiere la información que involucra la entrada, la salida y una vaga correspondencia entre ellas. No es necesario conocer a fondo o analíticamente la dinámica y los estados del sistema para elaborar un controlador FIS. Lo que lo hace ideal para la manipulación de sistemas de caja negra. Tampoco es necesario el uso extenso de ecuaciones y cálculos para establecer la compensación del sistema, a diferencia del control por variable de estados, el cual requiere extensos cálculos y análisis.

Existen diferencias notables en la implementación de estos controladores. Mientras que el controlador difuso solo requiere 2 sensores para cotejar las salidas de la planta, el controlador por variables de estado requiere 6 sensores para cada estado. Esto puede hacer más económico y versátil el controlador difuso. Sin embargo, el costo computacional de este es mayor, debido a la implementación algorítmica de las reglas y funciones de pertenencia en sistemas de procesamiento embebidos. Por lo que podríamos decir, que su implementación va en función del costo-beneficio y simplicidad(controlador)-complejidad(planta).

La ganancia del controlador FIS nos da una medida de la dinámica de la planta, afecta el sobreimpulso y tiempo de establecimiento, los cuales, son inversamente proporcionales entre si, por lo que su regulación dará la proporción de ambos. La calibración de estas ganancias depende de la experiencia del experto.

El espacio de trabajo para un sistema difuso es limitado a los rangos de las funciones de pertenencia, por lo que un sistema con un espacio infinito, presenta problemas en la cobertura del control.

A pesar de que un control lineal no es siempre exacto, si es determinístico, y es posible calcular y modelar sistemáticamente una dinámica deseada con él, tal como sobreimpulso y tiempo de establecimiento en el sistema. Por otro lado, el control por lógica difusa no presenta esta ventaja, y a pesar de ser un método eficaz y sencillo, es incierto a la

hora de la planeación de requerimientos de diseño.

La implementación difusa es un proceso casi por completo empírico, ya que gran parte de sus parámetros dependen de la experiencia del experto. No hay una forma sistemática de definir los parámetros del sistema de inferencia difusa, como por ejemplo, el tipo y cantidad de funciones de pertenencia, métodos de implicación, asignación y fuzzificación, número de entradas, ganancia del controlador FIS, etc.

Finalmente, es posible ratificar que el control difuso es una alternativa práctica y sencilla para la construcción de controladores no lineales a través del uso de información heurística y que su lógica depende únicamente de la pericia del operador experto del sistema.

## REFERENCIAS

- [1] Katsuhiko Ogata, Ingeniería de Control Moderna, 3th ed., Ed. Pearson: Prentice Hall Mexico, 1998, pp.
- [2] K. Morgansen. CDS 110a – Introduction to Control of Physical Systems (2002)
- [3] Henri Choi, Peter Sturdza and Richard M. Murray. Design and Construction of a Small Ducted Fan Engine for Nonlinear Control Experiments (1994)
- [4] Mark Milan and Richard M. Murray. A Testbed for Nonlinear Flight Control Techniques : The Caltech Ducted Fan (1999)
- [5] The MathWorks Inc. Fuzzy Logic Toolbox for Use with MATLAB® User's Guide v.2.0 (2006)
- [6] Kevin M. Passino and Stephen Yurkovich (1998). Fuzzy Control.

**Jorge M. Zamora V.** Student Member IEEE desde el año 2007. Nació en Calarcá, Colombia el 13 de septiembre de 1986. Realizó estudios técnicos de Auxiliar de Sistemas en el Instituto Técnico *Asociación Educativa* en el año 2000 en Armenia, Colombia; y actualmente se encuentra cursando último año de Ingeniería Electrónica en la Universidad del Quindío en la misma ciudad.