



POSGRADOS

Maestría en --- **ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

RPC-SO-30-No.507-2019

OPCIÓN DE
TITULACION:

ARTÍCULO PROFESIONAL DE ALTO NIVEL

TEMA :

ANÁLISIS COMPARATIVO DE DESEMPEÑO ENTRE UN
CONTROLADOR PID CLÁSICO Y UN CONTROLADOR PID
MEDIANTE LÓGICA DIFUSA APLICADO A UN SISTEMA TRMS.

AUTOR:

ALEXANDER EMANUEL TORRES ROMERO

DIRECTOR:

FRANKLIN ILLICH KUONQUÍ GAÍNZA

GUAYAQUIL - ECUADOR
2022

Autor:



Alexander Emanuel Torres Romero.

Ingeniero Automotriz.

Candidato a Magíster en Electrónica y Automatización,
Mención en Informática Industrial por la Universidad
Politécnica Salesiana - Sede Guayaquil.

Docente Técnico Universidad Politécnica Salesiana.

atorresr@ups.edu.ec

Dirigido por:



Franklin Illich Kuonquí Gaínza.

Ingeniero en Telecomunicaciones.

Magíster en Automatización y Control Industrial.

Docente Universidad Politécnica Salesiana.

fkuonqui@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos e investigación por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana.

GUAYAQUIL – ECUADOR – SUDAMÉRICA

ALEXANDER EMANUEL TORRES ROMERO.

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE DESEMPEÑO DE DOS
SISTEMAS DE CONTROL USANDO TÉCNICAS DE CONTROL
CLÁSICO Y DE CONTROL INTELIGENTE PARA UN EQUIPO
TRMS**

Análisis comparativo de desempeño entre un controlador PID clásico y un controlador PID mediante lógica difusa aplicado a un sistema TRMS.

Comparative performance analysis between a classic PID controller and a PID controller using fuzzy logic applied to a TRMS system.

Torres R. Alexander E.¹, Kuonqui G. Franklin I.¹

¹Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, Robles 107 y Chambers, Guayaquil, Ecuador.

I. INTRODUCCIÓN

Abstract— The equipment TRMS is a MIMO system with multiple inputs and outputs, it is a difficult dilemma to control. Several studies are reported that contemplate the application of various control algorithms. In this work, it is proposed to carry out the control of a double rotor multivariable system (TRMS) using a classic PID controller and a fuzzy PID. The performance of each control structure is evaluated using IAE, ISE, ITAE, ITSE performance indices. Through data acquisition, we proceed to identify mathematical models using parametric models and neural networks. In order to determine the benefits and limitations of each algorithm. Matlab is used as control algorithm design tool. Matlab is used as the basis for real-time sample acquisition, as well as to fine-tune the controllers by determining exact calibration and tuning points. Finally, a comparison is made between the controllers using the performance indices evaluated to determine the efficiency of each controller in the TRMS equipment. To conclude, a comparison is made between the controllers through field tests to determine the efficiency of each controller in the TRMS equipment.

Keywords— TRMS, PID, Neural Networks, Fuzzy Logic, Matlab.

Resumen— El TRMS es un sistema MIMO de múltiples entradas y salidas, es un dilema difícil de controlar. Se reportan varios estudios que, contemplan la aplicación de diversos algoritmos de control en sistemas multivariables MIMO. En este trabajo se propone realizar el control de un sistema multivariable de doble rotor (TRMS) usando un controlador PID clásico y un PID difuso. Se evalúa el desempeño de cada estructura de control usando índices de desempeño IAE, ISE, ITAE, ITSE. Mediante adquisición de datos se procede a la identificación de modelos matemáticos usando modelos paramétricos y redes neuronales. Con la finalidad de determinar las bondades y limitaciones de cada algoritmo. Como herramienta de diseño de algoritmos de control se usa Matlab. Como fundamento de adquisición de muestras en tiempo real, así como para afinar los controladores determinando puntos exactos de calibración y puesta a punto se usa Matlab. Por último, se realiza una comparación entre los controladores mediante los índices de desempeño evaluados para determinar la eficiencia de cada controlador en el equipo TRMS.

Palabras clave— TRMS, PID, Redes Neuronales, Lógica difusa, Matlab.

En este documento se analiza el comportamiento entre un controlador PID clásico con desacopladores y un controlador PID difuso aplicados a un sistema TRMS.

El Twin Rotor MIMO 33-949S (TRMS) funciona como un modelo de helicóptero, con dos rotores [1]. El rotor que permite al TRMS realizar un movimiento vertical, se lo denomina PITCH y el rotor que permite al TRMS realizar un movimiento horizontal, se denomina YAW [2].

El uso de un controlador PID nos permite controlar sistemas en lazo cerrado, las ventajas de todo controlador son: obtener precisión, control de respuesta en un tiempo establecido. La literatura nos rebela el estudio de la evaluación de algoritmos de control PID lineal y PID no lineal para sistemas MIMO de doble rotor [18]. El ajuste de los controladores PID permiten alcanzar un control adecuado en sistemas no lineales, este tipo de control es considerado un control clásico [18].

El esquema de control clásico trabaja mediante la técnica de control PID. Esta técnica aplica una señal al proceso, que es proporcional a la señal de control, y agrega una integral y una derivada de la señal de control [7].

Las bondades del uso de un control difuso y estimación de modelos a partir de redes neuronales nos permiten obtener control sobre modelos no lineales con precisión [8-9]. El controlador PID con lógica difusa está basado en conjuntos de fronteras limitados por grado de pertenencia establecidos bajo las variables de entrada y salida del sistema TRMS [8-9].

En este artículo, se lleva a cabo un estudio comparativo de un controlador PID clásico mediante identificación de modelos matemáticos a partir de funciones paramétricas. Un controlador PID difuso mediante identificación de modelos matemáticos a partir de redes neuronales. Colacionando los controladores bajo índices de desempeño.

El artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección II, índice A, se realiza la adquisición de datos del equipo TRMS en tiempo real mediante interfaces. Se obtiene las señales lineales de los ángulos PITCH y YAW en el eje vertical y horizontal que se representan en las figuras 4, 5, 6 y 7.

En el índice B, se realiza la identificación y estimación de los modelos matemáticos mediante modelos paramétricos.

En el índice C, se diseña la estructura de control del PID clásico, se verifica su funcionamiento y se evalúan los índices de desempeño.

En el índice D, se realiza la identificación y estimación de los modelos matemáticos mediante redes neuronales.

En el índice E, se diseña la estructura de control del PID difuso, se verifica su funcionamiento y se evalúan los índices de desempeño.

En el índice F, se evalúa el desempeño de las estructuras de control mediante índices de desempeño.

II. METODOLOGÍA Y DETALLES DEL EXPERIMENTO

A. Adquisición de datos.

Los datos se obtienen de un equipo TRMS de la marca Feedback Instrument de origen inglés fabricado en el año 2012 que se encuentra en el laboratorio de control automático de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil. El muestreo se debe realizar sin perturbaciones que varíen de manera agresiva el comportamiento normal de la planta. Los datos adquiridos en tiempo real se obtienen mediante la tarjeta de adquisición de datos PCI1711 Feedback DAC.

Se estableció la toma de 50000 datos en tiempo real mediante un periodo de muestreo de 0.001s por cada motor. Para el motor que comanda el ángulo PITCH (motor que hace rotar aspas horizontales), se tomó los datos de los ángulos en sentido horizontal y vertical. Para el motor que comanda el ángulo YAW (motor que hace rotar aspas verticales), se tomó los datos de los ángulos en sentido vertical y horizontal. Con la toma de datos se deriva la identificación de las funciones de transferencia que representan los movimientos de los ángulos tanto en el sentido horizontal como en el sentido vertical. La toma de datos nos permite establecer los modelos matemáticos para el desarrollo de controladores PID con desacopladores y controlador PID con lógica.

La adquisición de datos se realiza mediante la programación de dos interfaces para cada uno de los motores que comanda los ángulos PITCH y YAW.

La calibración del TRMS debe ser en el punto de origen de las coordenadas (0,0) de los ángulos deseados para adquisición de los modelos lineales como se observa en la figura 1.

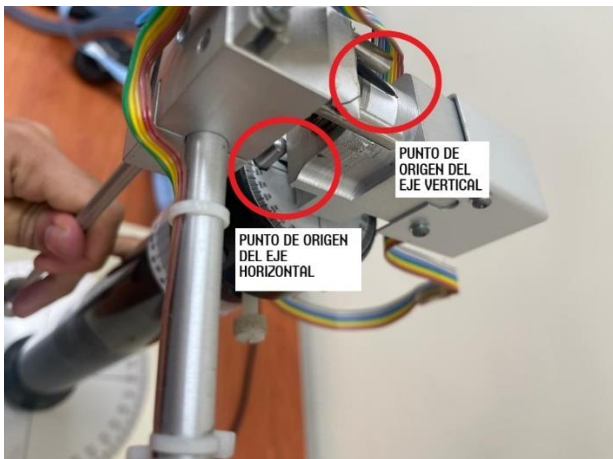


Figura 1.- Calibración del equipo TRMS.

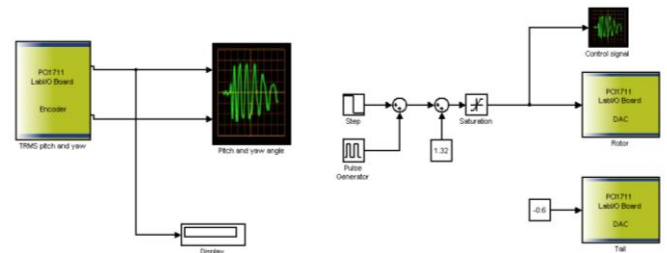


Figura 2.- Interfaz para adquisición de datos del motor que comanda el movimiento vertical del TRMS.[1]

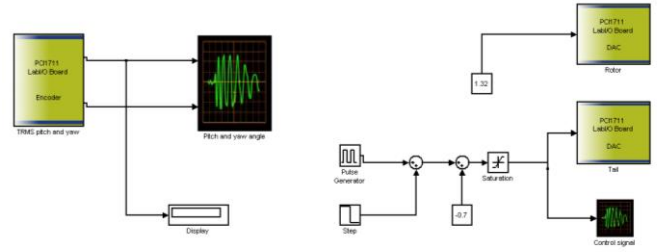


Figura 3.- Interfaz para adquisición de datos del motor que comanda el movimiento horizontal del TRMS.[1]

Las figuras (4), (5), reflejan las señales generadas en los ángulos PITCH y YAW basadas en el rotor que comanda el movimiento vertical.

Las figuras (6), (7), reflejan las señales generadas en los ángulos PITCH y YAW basadas en el rotor que comanda el movimiento horizontal.

Las figuras representan la variación del ángulo PITCH y YAW referente a su centro de origen en el equipo TRMS impulsadas por señales de tren de pulso para cada motor respectivamente.

En el eje de las ordenadas se observa la variación del ángulo en radianes, en el eje de las abscisas se observa el comportamiento de la señal a través del tiempo en segundos.

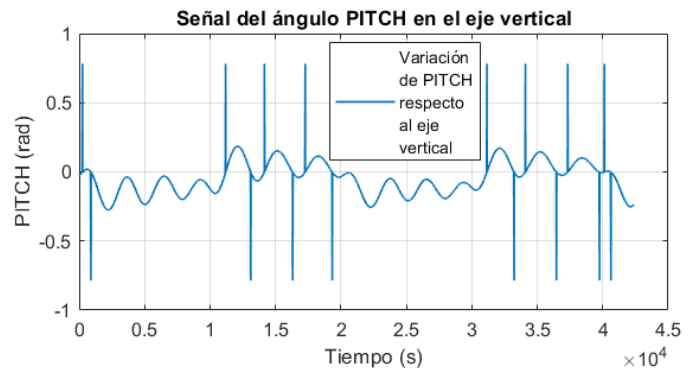


Figura 4.- Señal adquirida en tiempo real del ángulo PITCH en el eje vertical

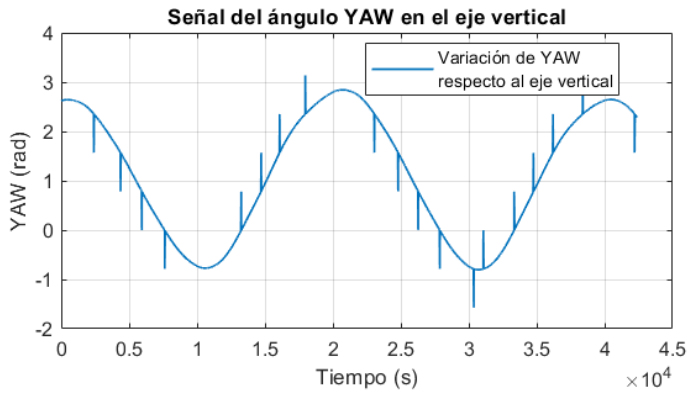


Figura 5.- Señal adquirida en tiempo real del ángulo YAW en el eje vertical

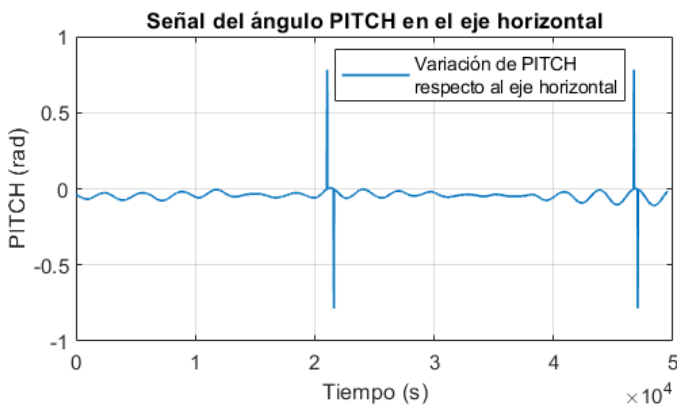


Figura 6.- Señal adquirida en tiempo real del ángulo PITCH en el eje horizontal

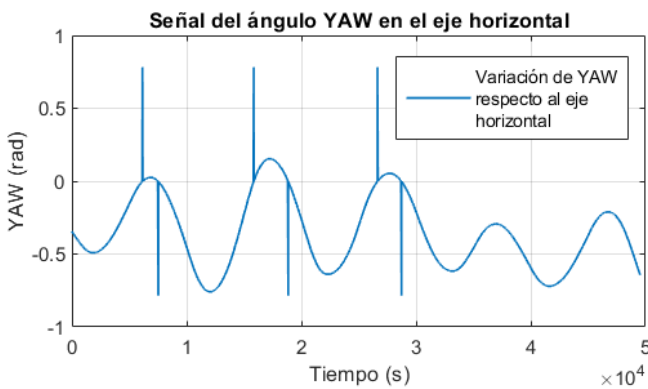


Figura 7.- Señal adquirida en tiempo real del ángulo YAW en el eje horizontal

B. Identificación del sistema TRMS mediante modelos paramétricos.

La identificación se realiza mediante CAD, para determinar las cuatro funciones de transferencia de manera idónea. Se aplica un filtro digital que disminuye los picos presentados por perturbaciones en la toma de datos en tiempo real.

Para la identificación se ingresan los datos adquiridos en el dominio del tiempo, la entrada es una señal cuadrada con un ancho de pulso de un segundo con 50 % de Duty Cycle de oscilación. La salida es la señal obtenida de cada ángulo.

Se analiza las señales ya filtradas, se remueve la media de cada señal y se selecciona un segmento estable para representar el sistema mediante una función de transferencia.

El porcentaje de estimación a la señal de entrada debe ser mayor al 60% de cada una de las señales de salida como se observa en la figura 8, 9, 10 y 11.

Se verifica la posición de los polos y ceros, el denominador de las funciones de transferencia no debe presentar valores negativos para garantizar que el sistema pueda estabilizarse.

1. Función de transferencia del motor del ángulo Pitch en el eje vertical.

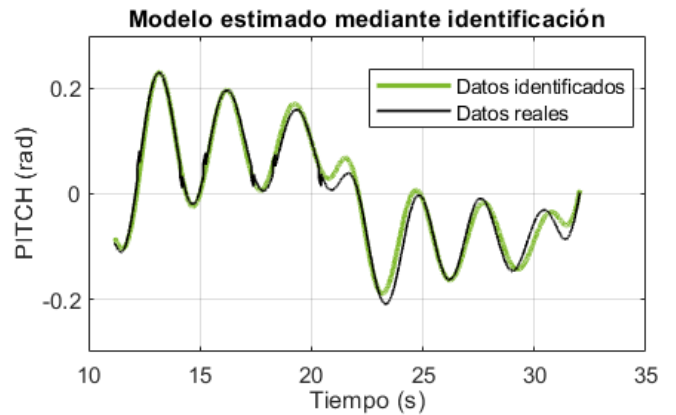


Figura 8- Estimación en un 84.02% del ángulo PITCH.

Función de transferencia que representa el modelo:

$$G(1, 1) = \frac{-0.04726 s + 3.105}{s^3 + 2.204 s^2 + 4.683 s + 8.626} \quad (1)$$

2. Función de transferencia del motor del ángulo YAW respecto al eje vertical.

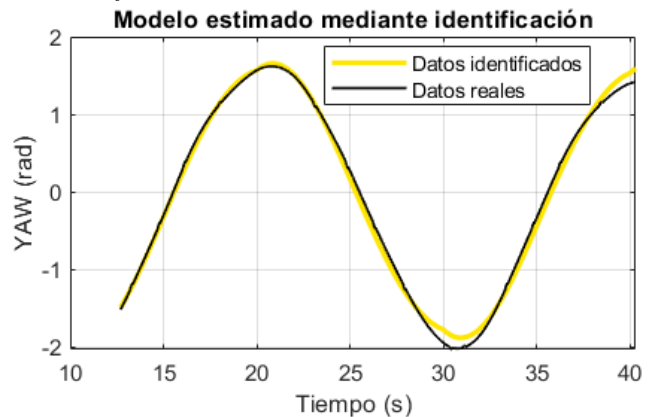


Figura 9- Estimación en un 93.44% del ángulo YAW.

Función de transferencia que representa el modelo:

$$G(1,2) = \frac{-0.2715s + 0.1989}{s^2 + 0.1234s + 0.1055} \quad (2)$$

3. Función de transferencia del motor del ángulo PITCH respecto al eje horizontal.

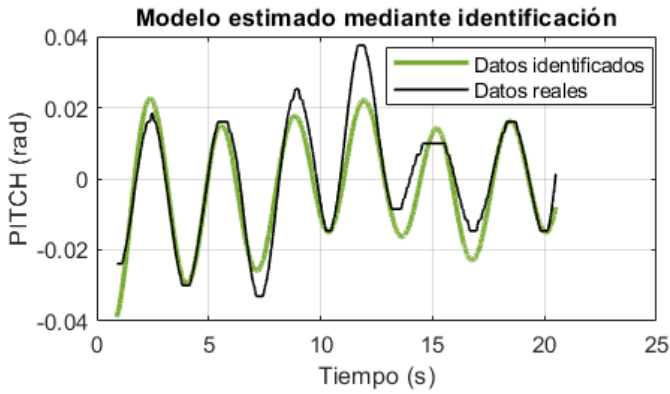


Figura 10- Estimación en un 61.66% del ángulo PITCH.

Función de transferencia que representa el modelo:

$$G(2,1) = \frac{0.147s - 0.02327}{s^3 + 0.4955s^2 + 3.647s + 1.279} \quad (3)$$

4. Función de transferencia del motor del ángulo YAW respecto al eje Horizontal.

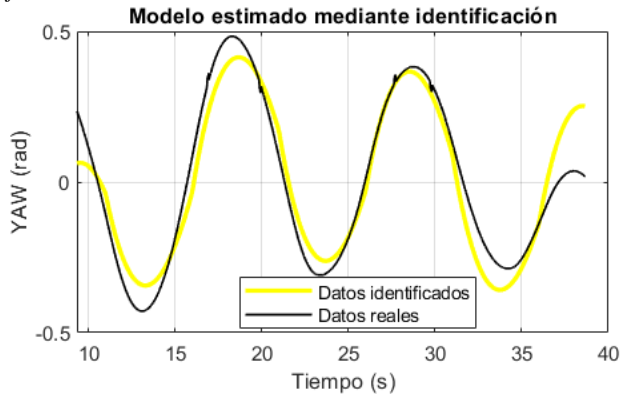


Figura 11- Estimación en un 70.49% del ángulo YAW.

Función de transferencia que representa el modelo:

$$G(2,2) = \frac{-0.7633s + 1.023}{s^2 + 0.189s + 1.288e-07} \quad (4)$$

C. Diseño de los controladores PID sin desacoplador y con desacoplador.

El diseño del controlador PID tradicional se realiza mediante CAD, para estabilización del ángulo PITCH se diseña y ajusta un controlador PID a partir de la función de transferencia representada en la ecuación (1).

Para la estabilización del ángulo YAW se diseña y ajusta un controlador PD a partir de la función de transferencia representada en la ecuación (4).

La afinación de los controladores PID y PD calculados a partir de las funciones de transferencia obtenidas mediante identificación se ajustan a prueba y error.

Resultando en el PID el valor de P= 0.2008*0.2, I= 4.189*0.2, D= 0.2, con un coeficiente N=100 ideal en nuestro caso de estudio.

Para el PD el valor de P= 0.54897*0.2963, D= 0.54897, con un coeficiente N=20.

La interfaz de control de PITCH y YAW diseñada sin desacopladores se representa en la figura 12.

La reacción de PITCH y YAW en respuesta a un escalón de referencia 0.4 rad se visualiza en la figura 13.

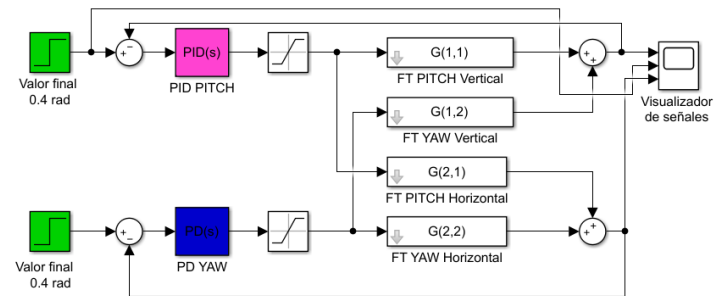


Figura 12- Diseño de la interfaz de control de los ángulos PITCH y YAW sin desacopladores.

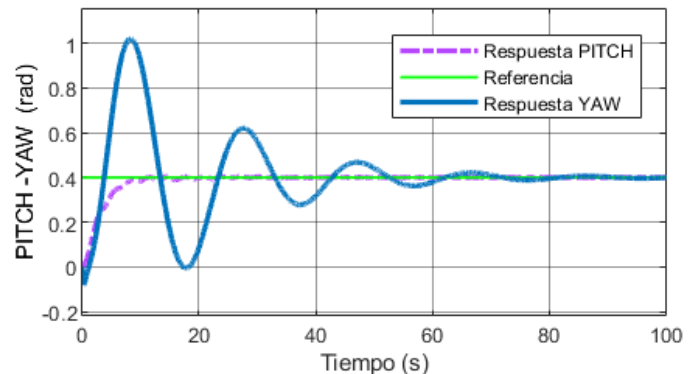


Figura 13- Respuesta de control simulada de PITCH y YAW del PID sin desacopladores.

La matriz de ganancias relativas se calcula a partir de las funciones de transferencia representadas en las ecuaciones (1), (2), (3) y (4). La matriz nos permite la deducción de los desacopladores que se representan en la matriz (5).

$$D0 = \begin{bmatrix} 1 & 0.050546519634805 \\ -2.373296758498338e-07 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Siendo los desacopladores:

$D0(1,1) = 1;$
 $D0(1,2) = -2.373296758498338e - 07;$
 $D0(2,1) = 0.050546519634805;$
 $D0(2,2) = 0.$

La interfaz de control de PITCH y YAW diseñada con los desacopladores se representa en la figura 14.

La reacción de PITCH y YAW en respuesta a un escalón de referencia 0.4 rad se visualiza en la figura 15.

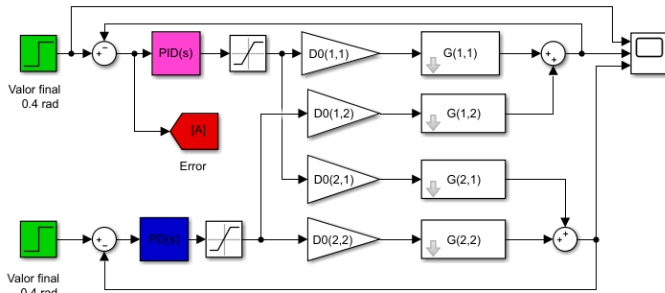


Figura 14- Diseño de la interfaz de control de los ángulos PITCH y YAW con desacopladores.

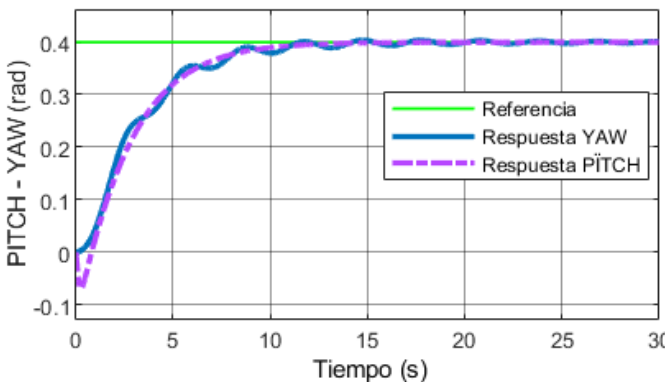


Figura 15- Respuesta de control de PITCH y YAW del PID con desacopladores

D. Identificación del sistema TRMS mediante redes neuronales.

La identificación de los modelos matemáticos a partir de redes neuronales se logra bajo un entrenamiento de diversas capas neuronales. Se desarrolla la programación que ejecuta el ingreso de las muestras. La declaración de las variables permite la identificación de entradas y salida.

Para este proceso se utilizaron los mismos datos usados para la identificación paramétrica.

Las entradas de aprendizaje de red neuronal son el tiempo y el ancho de pulso.

Los targets son las señales obtenidas en tiempo real de cada ángulo que se encuentra representadas en las figuras 4, 5, 6 y 7.

La red neuronal aprende el comportamiento de cada una de las señales y estima su aproximación basada en su entrenamiento con los datos ingresados.

El entrenamiento se realiza con 70% de datos de entrenamiento, 15% de datos de validación y 15% de datos para prueba.

El número de neuronas ocultas es de 20 neuronas por entrenamiento para una óptima identificación mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt.

Como resultado se obtiene las figuras 16, 17, 18 y 19 que representan la estimación de las redes neuronales bajo los datos ingresados.

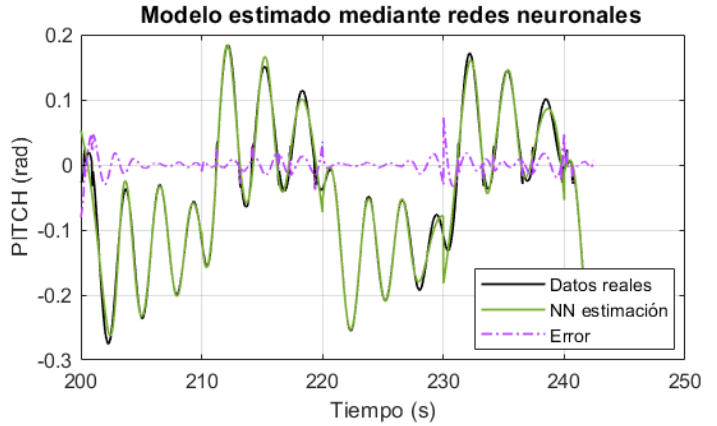


Figura 16- Estimación en un 86.46% del ángulo PITCH

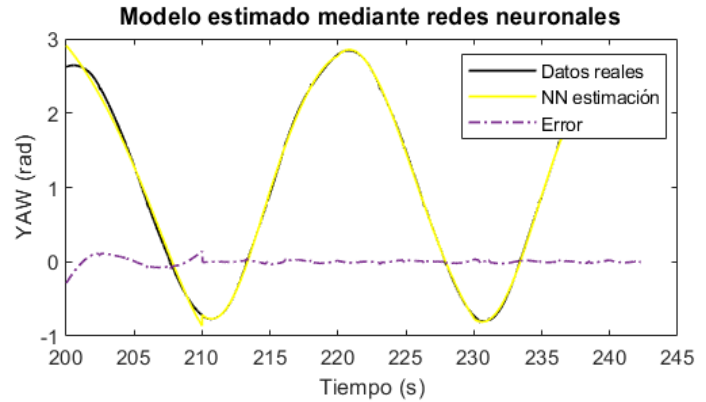


Figura 17- Estimación en un 91.02% del ángulo YAW.

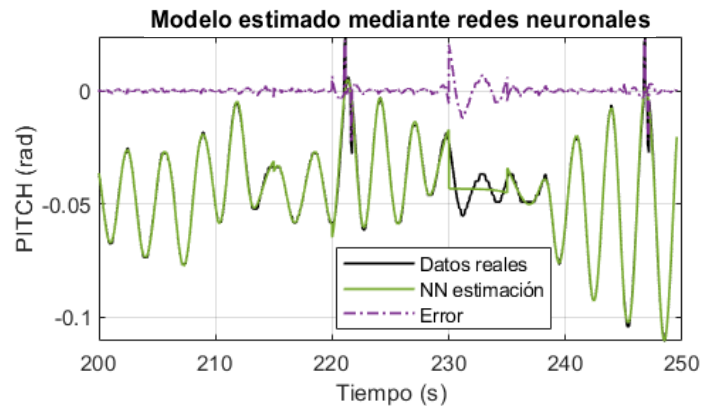


Figura 18- Estimación en un 88.44% del ángulo PITCH.

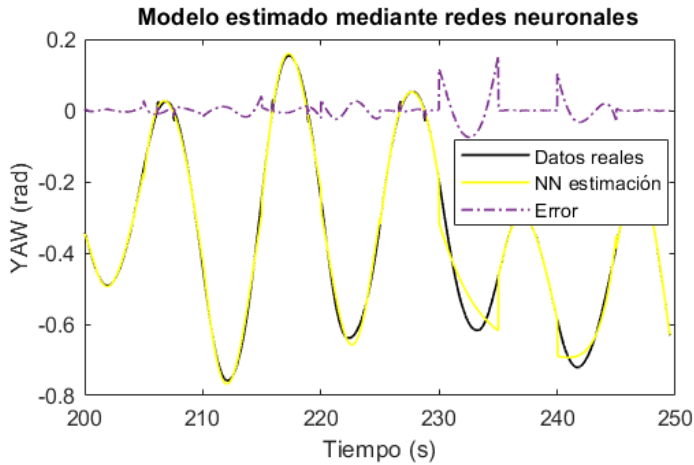


Figura 19- Estimación en un 89.70% del ángulo YAW

E. Diseño de los controladores PID difuso con redes neuronales.

El diseño del controlador de lógica difusa se realiza mediante funciones de pertenencia triangulares las mismas que definen el grado de pertenencia a conjuntos de nuestro sistema (figura 20).

Para este caso en particular definimos siete funciones de pertenencia. Para cada una de nuestras dos variables: error, salida (u) según el desempeño del TRMS.

El rango del error para las funciones de pertenencia es de (-0.8 a -0.6) radianes, El rango de salida para el controlador del ángulo PITCH es de (0.2 a -0.2) radianes. El rango de salida para el controlador del ángulo YAW es de (0.1 a -0.7) radianes, se observan en la figura 4 y 7.

Para cada variable se diseña siete variables lingüísticas que son: Error negativo grande, error negativo mediano, error negativo pequeño, error cero, error positivo pequeño, error positivo mediano, error positivo grande, para la variable de entrada del error (figura 20).

Para las variables de salida (u, du) declaramos las variables lingüísticas que son: negativo grande, negativo mediano, negativo pequeño, cero, positivo pequeño, positivo mediano, positivo grande.

Se establecen 49 reglas que cumplen la intersección entre las variables involucradas.

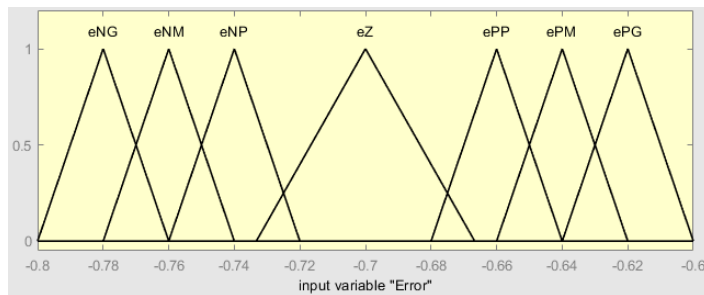


Figura 20- Ingreso de las variables lingüísticas en la variable de entrada del error

Posterior al desarrollo del entrenamiento mediante redes neuronales y el controlador difuso se obtiene el desempeño del sistema controlado para los ángulos PITCH y YAW que se muestra en la figura.

La interfaz de control de PITCH y YAW diseñada con los PID difusos en conjunto con la estimación por redes neuronales se representa en la figura 21.

La reacción de PITCH y YAW en respuesta a un escalón de referencia 0.4 rad se visualiza en la figura 22.

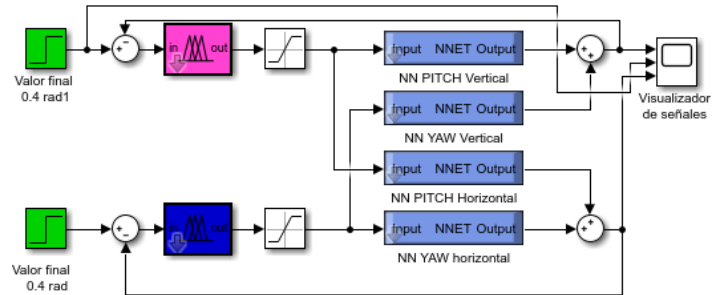


Figura 21- Diseño de la interfaz de control de los ángulos PITCH y YAW con Redes Neuronales.

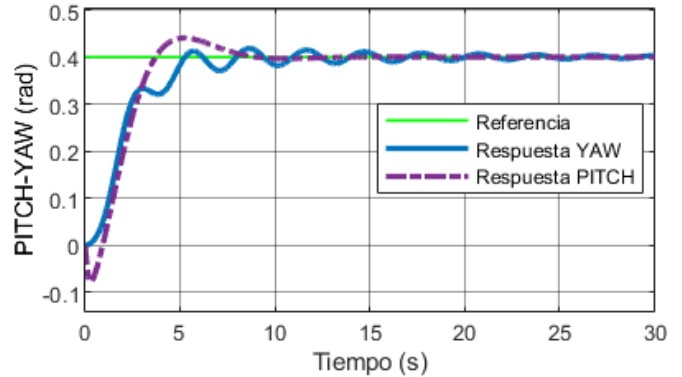


Figura 22- Respuesta de control simulada de PITCH y YAW del PID difuso

F. Evaluación de las estructuras de control mediante IAE, ISE, ITSE, ITAE.

Las interfaces comparativas entre controladores se observan en las figuras 23 y 25.

Se evalúan los índices de desempeño IAE, ISE, ITAE, ITSE de los controladores PID clásico y PID difuso para cada ángulo en una misma estructura de control (con desacopladores).

Se escogen los parámetros de tal manera que minimicen los índices de desempeño como se observa en la figura 24 y 26.

Los valores de los índices de desempeño basados en la integral del error se observan en la figura 24, 25 y en la tabla 1.

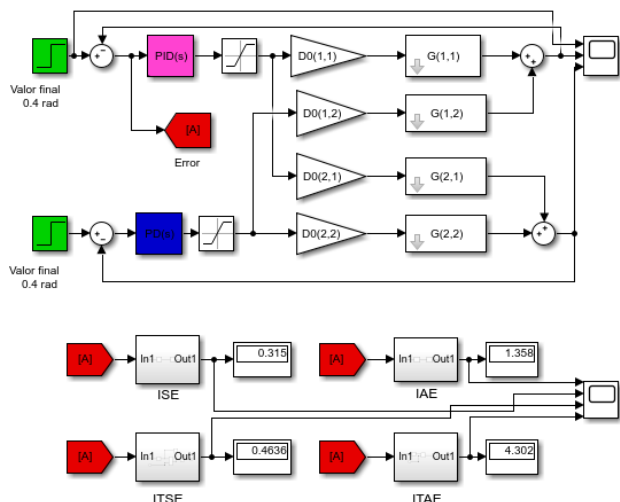


Figura 23- Interfaz comparativa basada en índices de desempeño de PID clásico

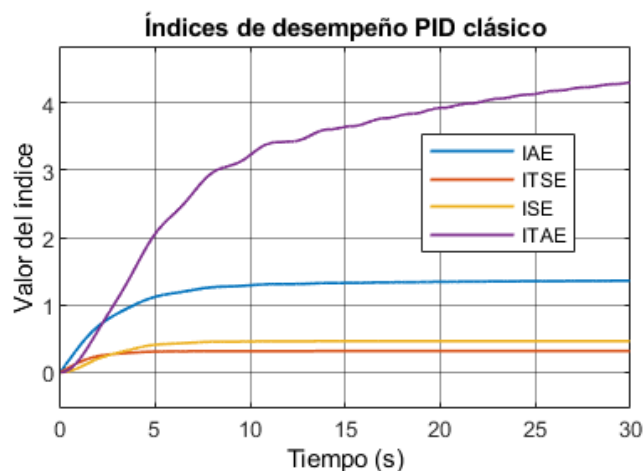


Figura 24- Índices de desempeño al error del PID clásico

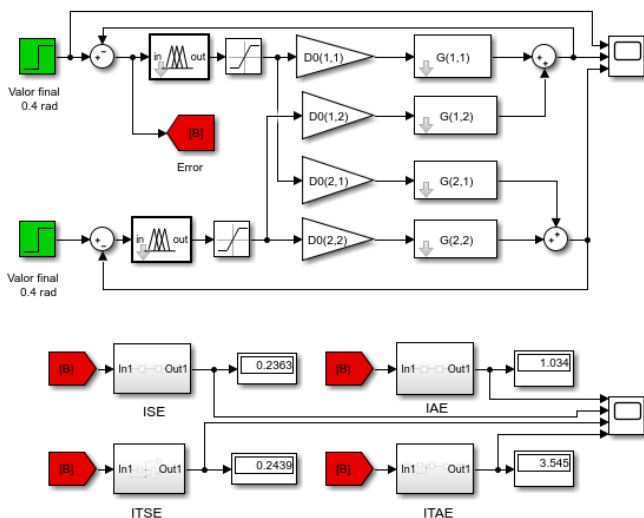


Figura 25- Interfaz comparativa basada en índices de desempeño de PID difuso

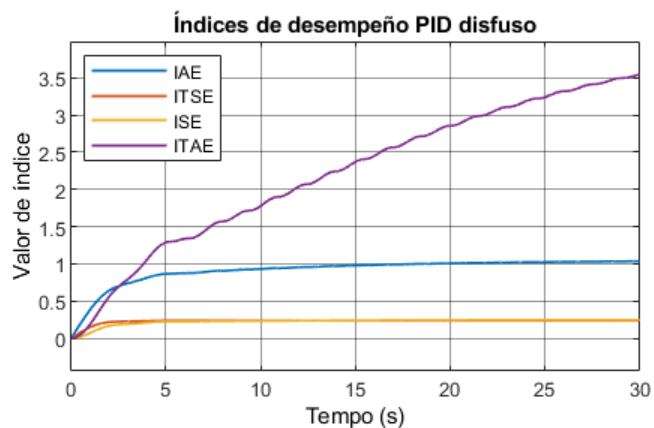


Figura 26- Índices de desempeño al error del PID difuso.

TABLA 1.
Valores índices de desempeño.

	PID CLÁSICO	PID DIFUSO
ITAE	4.302	3.545
IAE	1.358	1.034
ISE	0.315	0.236
ITSE	0.463	0.243

III. CONCLUSIONES

En la adquisición de datos en tiempo real de las señales que se obtiene de cada motor en el ángulo PITCH y YAW se presentan perturbaciones que se generan al momento del impulso de la onda senoidal de entrada. Se elimina dichas perturbaciones mediante filtros de aproximación en las cuatro señales, se obtienen señales sin perturbaciones para identificación por función de transferencia y entrenamiento mediante red neuronal.

La estimación de las señales por modelos paramétricos presenta porcentaje mayor al 70%. La estimación de las señales por redes neuronales presenta un porcentaje mayor al 85%.

La respuesta de control sin desacopladores mostrada en la figura 13 nos revela que PITCH se estabiliza en 14 seg. mientras que YAW se estabiliza en 60 seg. a 0.4 radianes de referencia

La respuesta de control con desacopladores mostrada en la figura 14 nos permite observar que PITCH se estabiliza en 12 seg. Mientras que YAW se estabiliza en 15 seg. a 0.4 radianes de referencia.

Para los análisis realizados en entrenamiento mediante red neuronal, siempre es necesario que las redes neuronales sean entrenadas con mayor de 10 neuronas ocultas, esto en virtud de obtener una mayor tasa de estimación a la señal.

La afinación de los controladores difusos se desarrolla a partir del error de entrada, donde el rango es el de la señal de pulso, el rango de la salida es la variación del ángulo a controlar presentado en las señales adquiridas en radianes.

La respuesta de control con redes neuronales mostrada en la figura 22 nos permite observar que PITCH se estabiliza en 8 seg. Mientras que YAW se estabiliza en 7 seg. a 0.4 radianes de referencia. Concluyendo que el PID difuso posee una medida cualitativa mayor al PID clásico.

Los valores de los índices de desempeño en el PID difuso son menores a los valores en el PID clásico. Esto establece de manera cuantitativa que el desempeño del PID difuso es superior al PID clásico.

REFERENCIAS

- [1]. TRMS 33-949S User Manual, Feedback instruments Ltd., East Sussex, U.K
- [2]. Prasad, D.G.; Manoharan, P.S.; Ramalakshmi, A.P.S., "PID control scheme for twin rotor MIMO system using a real valued genetic algorithm with a predetermined search range," Power, Energy and Control (ICPEC), 2013 International Conference on , vol., no., pp.443,448, 6-8 Feb. 2013.
- [3]. A. Ramalakshmi and P. Manoharan, "Non-linear modeling and PID control of twin rotor MIMO system," in IEEE Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies, 2012, pp. 366– 369.
- [4]. Saroj, D.K.; Kar, I., "T-S fuzzy model based controller and observer design for a Twin Rotor MIMO System," Fuzzy Systems (FUZZ), 2013 IEEE International Conference on , vol., no., pp.1,8, 7-10 July 2013.
- [5]. Rahideh, A.; Shaheed, M.H., "Hybrid Fuzzy-PID-based Control of a Twin Rotor MIMO System," IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on , vol., no., pp.48,53, 6-10 Nov. 2006.
- [6]. R. Cajo and W. Agila, "Evaluation of Algorithms for Linear and Nonlinear PID Control for Twin Rotor MIMO System," 2015 Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering, Quito, Ecuador, 2015, pp. 214-219, doi: 10.1109/APCASE.2015.45.
- [7]. [3] A. Odwyer, Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. London, U.K.: Imperial College Press, 2003.
- [8]. Ranković, V.M. & Nikolić, I.. (2008). Identification of nonlinear models with Feedforward Neural Network and Digital Recurrent Network.
- [9]. Khodabandehlou, H., & Fadali, M.S. (2019). Nonlinear System Identification using Neural Networks and Trajectory-based Optimization. *ICINCO*.
- [10]. S. F. Toha and M. O. Tokhi, "MLP and Elman recurrent neural network modelling for the TRMS," 2008 7th IEEE International Conference on Cybernetic Intelligent Systems, London, UK, 2008, pp. 1-6, doi: 10.1109/UKRICIS.2008.4798969..
- [11]. A. Rahideh, M. H. Shaheed and A. H. Bajodah, "Neural network based adaptive nonlinear model inversion control of a twin rotor system in real time," 2008 7th IEEE International Conference on Cybernetic Intelligent Systems, London, UK, 2008, pp. 1-6, doi: 10.1109/UKRICIS.2008.4798952..
- [12]. M. H. Shaheed, "Performance analysis of 4 types of conjugate gradient algorithms in the nonlinear dynamic modelling of a TRMS using feedforward neural networks," 2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (IEEE Cat. No.04CH37583), The Hague, Netherlands, 2004, pp. 5985-5990 vol.6, doi: 10.1109/ICSMC.2004.1401153.
- [13]. F. A. Shaik and S. Purwar, "A Nonlinear State Observer Design for 2-DOF Twin Rotor System Using Neural Networks," 2009 International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies, Bangalore, India, 2009, pp. 15-19, doi: 10.1109/ACT.2009.219.
- [14]. S. Abderrahmene, C. Mohammed, K. Abderrahmane and H. Rachida, "Neural network NARMA-L2 control of a Twin Rotor MIMO System," 2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE), Algiers, Algeria, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICAEE47123.2019.9015131.
- [15]. M. S. Meon, T. L. T. Mohamed, M. H. M. Ramli, M. Z. Mohamed and N. F. A. Manan, "Review and current study on new approach using PID Active Force Control (PIDAFC) of twin rotor multi input multi output system (TRMS)," 2012 IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research, Kuala Lumpur, Malaysia, 2012, pp. 163-167, doi: 10.1109/SHUSER.2012.6268848.
- [16]. Azamat Tastemirov, Andrea Lecchini-Visintini, Rafael M. Morales-Viviescas, Complete dynamic model of the Twin Rotor MIMO System (TRMS) with experimental validation, Control Engineering Practice, Volume 66, 2017, Pages 89-98, ISSN 0967-0661.
- [17]. K. Kalyani and S. Kanagalakshmi, "Control of Trms using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)," 2020 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN), Pondicherry, India, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICSCAN49426.2020.9262417.
- [18]. Cajo, R., Agila, W. (2015). Evaluation of Algorithms for Linear and Nonlinear PID Control for Twin Rotor MIMO System. In Computer Aided System Engineering (APCASE), vol., no., pp.214-219..