Diseño y evaluación experimental de un controlador pid-difuso para el dron dji tello edu

Design and experimental evaluation of a fuzzy pid controller for the dji tello edu drone

Juan Jaime Fuentes Uriarte
Universidad Autónoma Indígena de México, Ahome, Sinaloa, México
juanjaime.fuentes@upve.edu.mx
ORCID: 0000-0001-6582-1844

Gilberto Bojórquez Delgado
Tecnológico Nacional de México –ITS de Guasave, Sinaloa, México
gilberto.bd@guasave.tecnm.mx
ORCID: 0009-0000-7829-6540

Yobani Martínez Ramírez
Universidad Autónoma de Sinaloa, México
yobani@uas.edu.mx
ORCID: 0000-0002-4967-9187

https://doi.org/10.36825/RITI.13.32.007

Recibido: Junio 15, 2025
Aceptado: Octubre 08, 2025

Resumen: Este estudio propone un controlador PID-Difuso para mejorar la estabilización del dron DJI Tello Edu, abordando las limitaciones de los controladores PID convencionales en entornos dinámicos. Los PID tradicionales presentan rigidez frente a perturbaciones externas (viento, variaciones de masa) y las no linealidades inherentes a los VANTs, generando oscilaciones residuales y errores de seguimiento. La solución integra una arquitectura híbrida de dos capas:

- Capa difusa: ajusta dinámicamente las ganancias PID (K_p, K_i, K_d) mediante reglas heurísticas basadas en el error angular (e) y su derivada (ė), empleando inferencia Mamdani con funciones de membresía triangulares.
- Capa PID: ejecuta la ley de control con parámetros adaptativos en tiempo real.

Los experimentos de vuelo autónomo, con trayectorias rectas y giros de 180°, demostraron mejoras significativas sobre el PID convencional:

- Error RMS en yaw reducido en 23.1%.
- Error MAE en yaw reducido en 25.9%.
- Tiempo de asentamiento reducido en 28.6%.
- Consumo de energía disminuido hasta en 13.1%, extendiendo la autonomía de vuelo.
- Error máximo en yaw durante maniobras críticas reducido en 44.4%.

El controlador híbrido optimiza el equilibrio entre precisión y adaptabilidad. La validación se realizó en condiciones controladas mediante telemetría WiFi a 20 Hz y métricas estandarizadas (RMSE, MAE, energía de

© RITI. CC BY-NC

control). Su implementación en una plataforma de bajo costo como el DJI Tello Edu democratiza el acceso a sistemas avanzados para la educación y la investigación.

Palabras clave: *Control PID-Difuso, Dron, DJI Tello Edu, Estabilización Adaptativa, Lógica Difusa.*

Abstract: This study proposes a PID-Difuso controller to enhance stabilization of the DJI Tello Edu drone, addressing limitations of conventional PID controllers in dynamic environments. Traditional PID controllers exhibit rigidity when confronted with external disturbances (wind, mass variations) and the inherent nonlinearity of UAVs, resulting in residual oscillations and tracking errors. The proposed solution integrates a two-layer hybrid architecture:

- Fuzzy layer: dynamically adjusts PID gains (K_p, K_i, K_d) through heuristic rules based on angular error (e) and its derivative (ė), employing Mamdani inference with triangular membership functions.
- PID layer: executes the control law with real-time adaptive parameters.

Autonomous flight experiments—including straight trajectories and 180° turns—demonstrated significant improvements over the conventional PID:

- RMS yaw error reduced by 23.1%.
- MAE yaw error reduced by 25.9%.
- Settling time decreased by 28.6%.
- Energy consumption decreased by up to 13.1%, extending flight autonomy.
- Maximum yaw error during critical maneuvers reduced by 44.4%.

The hybrid controller optimizes the trade-off between precision and adaptability. Validation under controlled conditions utilized 20 Hz WiFi telemetry and standardized metrics (RMSE, MAE, control energy). Implementation on a low-cost platform such as the DJI Tello Edu democratizes access to advanced control systems for education and research.

Keywords: *Fuzzy-PID Control, Drone, DJI Tello Edu, Adaptive Stabilization, Fuzzy Logic.*

1. Introducción

Los vehículos aéreos no tripulados (VANTs)), ampliamente conocidos como drones, ha experimentado un crecimiento significativo, impulsado por avances en electrónica miniaturizada, inteligencia artificial y sistemas de control adaptativos. Estos dispositivos han transformado sectores como agricultura de precisión, logística y vigilancia, donde su capacidad para ejecutar maniobras complejas con autonomía los convierte en herramientas estratégicas [1], [2]. No obstante, la estabilidad y precisión en condiciones dinámicas continúan representando desafíos, particularmente en entornos con perturbaciones externas, donde los controladores tradicionales presentan limitaciones [3], [4]

Entre las estrategias de control más utilizadas, el Proporcional-Integral-Derivativo (PID) ha sido ampliamente implementado debido a su simplicidad y eficacia en sistemas lineales [5]. Sin embargo, su desempeño se ve afectado por variaciones paramétricas y perturbaciones externas, generando oscilaciones y degradación en la estabilidad del dron [3], [6]. Para abordar estas limitaciones, se han explorado enfoques adaptativos como la lógica difusa, que permite ajustar dinámicamente los parámetros del controlador en función de reglas heurísticas basadas en el comportamiento del sistema [7], [8].

El controlador PID-Difuso, que combina la predictibilidad del PID con la flexibilidad de la lógica difusa, ha demostrado mejoras en seguimiento de trayectorias y rechazo de perturbaciones en drones [9]. Investigaciones recientes han validado su efectividad, reportando reducciones del error RMS y MAE superiores al 20% en comparación con controladores PID convencionales [10], [11]. En este contexto, el presente estudio propone el diseño e implementación de un controlador PID-Difuso optimizado para el DJI Tello Edu, con el objetivo de mejorar la estabilización y precisión operativa en escenarios de incertidumbre paramétrica y condiciones controladas.

Este trabajo contribuye a la democratización de tecnologías avanzadas para UAVs accesibles, destacando la importancia de controladores híbridos en aplicaciones educativas e investigativas [12]. A partir de una validación experimental, se analiza el impacto del enfoque PID-Difuso en métricas clave como error de actitud, estabilidad y

© RITI. CC BY-NC

eficiencia energética, estableciendo un marco de referencia para futuras optimizaciones del sistema bajo condiciones adversas.

2. Estado del arte

Los drones, particularmente quadrotors como el dron Tello DJI, presentan dinámicas intrínsecamente inestables debido a su configuración subactuada (4 actuadores para 6 grados de libertad) y alta sensibilidad a perturbaciones ambientales. Estas características exigen estrategias de control que combinen precisión, adaptabilidad y eficiencia computacional [13]. Mientras controladores convencionales como el PID ofrecen simplicidad, su rendimiento se degrada en condiciones dinámicas no previstas durante la sintonización. Este capítulo fundamenta teóricamente el uso del control PID-Difuso (Fuzzy-PID) como solución robusta para el dron Tello DJI, integrando principios de lógica difusa, teoría de control clásico y arquitecturas embebidas.

2.1. Control PID

El controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) constituye uno de los enfoques más extendidos en el diseño de sistemas de control. Este tipo de controlador opera evaluando continuamente la diferencia entre el valor deseado y el valor medido, generando una salida que se compone de tres términos: el termino proporcional, que actúa en proporción a la magnitud del error; el termino integral, que acumula el error a lo largo del tiempo y ayuda a eliminar el error de estado estacionario; y el termino derivativo, que anticipa la evolución del error y mejora la estabilidad reduciendo el sobre impulsó [5]. Aunque la arquitectura PID es sencilla y efectiva para procesos lineales, su desempeño puede deteriorarse en sistemas donde los parámetros cambian en el tiempo o cuando se enfrentan perturbaciones fuertes, ya que las ganancias del controlador permanecen fijas una vez sintonizadas.

Los controladores PID son populares por su simplicidad y facilidad de implementación. No obstante, presentan dos debilidades críticas para drones:

- Falta de adaptabilidad: Sus ganancias, k_p,k_i,k_p son fijas, incapaces de ajustarse a cambios bruscos en las condiciones de vuelo [14].
- Robustez limitada: Exhiben error en estado estacionario y oscilaciones ante perturbaciones externas, como demuestran simulaciones en investigaciones de [13], [15].

Un desafío fundamental es el diseño de un controlador que combine la simplicidad inherente del PID con una adaptabilidad inteligente frente a las incertidumbres.

2.2. Control Difuso

Por otra parte, la lógica difusa es una técnica que se fundamenta en la teoría de conjuntos difusos, permitiendo representar y manejar imprecisiones en la información. Esta técnica traduce el conocimiento experto en reglas del tipo “si … entonces …”, lo que ofrece un marco flexible para tomar decisiones en procesos complejos. Por ejemplo, en un ambiente de vuelo, en lugar de definir límites estrictos para el error, la lógica difusa permite establecer rangos que facilitan la interpretación de conceptos como “error grande”, “error bajo” o “error nulo”. Esto permite ajustar de forma dinámica la respuesta del controlador según las condiciones reales del sistema [7], [16]. En control, esto permite:

- Manejar no linealidades sin modelos matemáticos precisos.
- Adaptar ganancias en tiempo real según el error (e) y su derivada ($\dot{e}$).
- Suavizar respuestas transitorias evitando oscilaciones [17].

2.3. Controlador PID-Difuso

La combinación de un controlador PID con lógica difusa da origen a un sistema hibrido (PID-Difuso) que aprovecha lo mejor de ambos mundos. Mientras el PID clásico ofrece una respuesta inmediata en base a la diferencia cuantitativa entre la referencia y la salida, la lógica difusa modifica estos parámetros adaptativamente en función de criterios cualitativos y heurísticos. Este enfoque un controlador PID-Difuso utiliza un sistema difuso para ajustar dinámicamente las ganancias del PID según la magnitud y tendencia del error. Como demostraron

© RITI. CC BY-NC

[17] esto supera las limitaciones del PID convencional en robots manipuladores, y hoy se extiende a Drones.

2.4. Drones Tello Edu DJI

El Tello Edu DJI [18] representa un Drones compacta diseñada para la educación, el entretenimiento y la iniciación a la programación. A nivel conceptual, el Tello opera bajo principios aerodinámicos fundamentales de elevación y propulsión generados por cuatro rotores, cada uno con velocidad y dirección de giro controlables independientemente. Esta redundancia en los actuadores permite al dron ejecutar los seis grados de libertad de movimiento. La estabilidad en vuelo se logra mediante un sofisticado sistema de control de lazo cerrado que emplea sensores inerciales (acelerómetros y giroscopios) y un barómetro para estimar su orientación y altitud.
El Tello incorpora, además, un sistema de posicionamiento visual (VPS) basado en una cámara orientada hacia abajo, la cual procesa patrones visuales del terreno para estimar la posición horizontal relativa, mejorando la precisión en el vuelo estacionario (*hovering*) en interiores y la robustez ante perturbaciones de viento leve. El Tello DJI es un dron ideal para validar este enfoque. Características relevantes incluyen:

- Peso ligero (≈80 g), lo que lo hace susceptible a perturbaciones aerodinámicas.
- Procesador: CPU ARM Cortex-A7 a 1.2 GHz.
- Sensores integrados (IMU, cámara) que proporcionan datos para *feedback* en tiempo real.
- API abierta y de terceros que facilita la implementación de controladores personalizados.

No obstante, su controlador nato (basado en PID) exhibe limitaciones en trayectorias complejas o con viento lateral. Un estudio de [15] en modelos F16 reveló que técnicas de control multi-modelo (similar a lógica difusa) mejoran el seguimiento de trayectorias. Esto sugiere que un Fuzzy-PID podría optimizar el Tello en escenarios similares.

3. Materiales y métodos

La investigación empleó un enfoque experimental *hardware-in-the-loop* [19] la propuesta se basa en una arquitectura de dos capas Figura 1 para validar los controladores difusos en la estabilización del Drones Tello DJI.

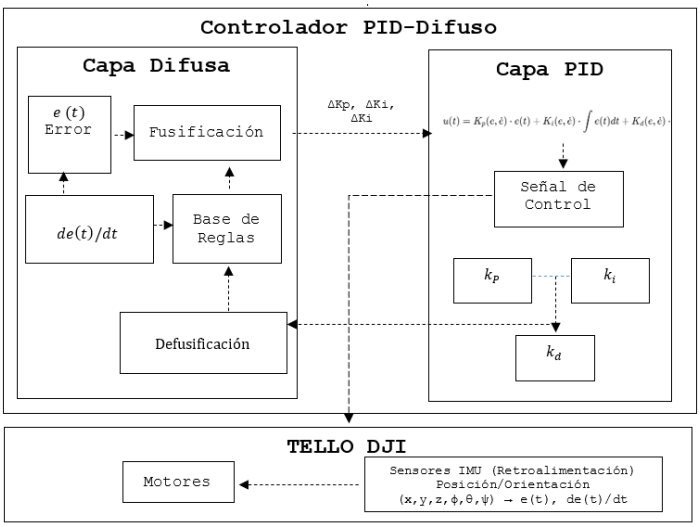


Figura 1. Arquitectura de dos capas controlador PID-Difuso.
Fuente: Creación Propia.

Donde:
La Capa Difusa:

- Entradas: Error (e(t)) y derivada del error (de(t)/dt).
- Fusificación: Convierte 2 entradas nítidas en grados de pertenencia a conjuntos difusos. (ej: MuyNegativo, Negativo, Cero, Positivo, MuyPositivo y CambiandoNegativo, EstableCero, CambiandoPositivo).

- Base de Reglas: Matriz de reglas heurísticas. (ej: "SI errorRoll es MuyNegativo y cambioError es CambiandoNegativo").
- Defusificación (Tringular): Convierte salidas difusas en valores nítidos (ej: GiroFuerteIzquierda, GiroModeradoIzquierda, GiroSuaveIzquiera, SinGiro, GiroSuaveDerecha, GiroModeradoDerecha, GiroFuerteDerecha).

La Capa PID:

- Ganancias Adaptativas: K_p K_(i) K_d ajustadas en tiempo real por la capa difusa
- Ley de Control.

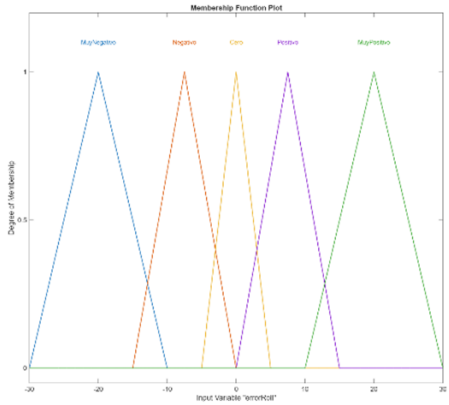
Tello DJI:

- Retroalimenta posición/orientación para calcular e(t) y de(t)/dt.
- Sensores IMU proveen datos críticos para el bucle cerrado

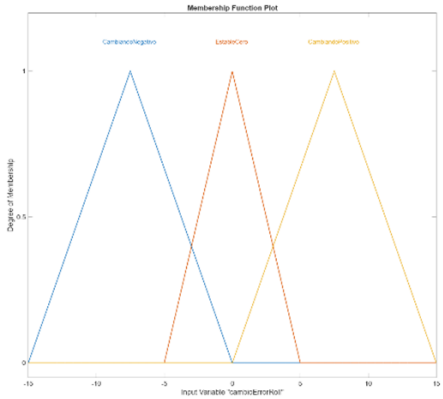
Todo esto para cada uno de los controladores difusos para los ejes *Roll*, *Pitch* y *Yaw* se diseñaron método de inferencia tipo Mamdani con 5 funciones de membresía triangulares para el error angular Figura 2a para su derivada del error Figura 2b, generando 15 reglas heurísticas por controlador Figura 2c que mapearon las entradas a 7 acciones de salida Figura 2d.

Durante el vuelo autónomo, el dron ejecutó trayectorias rectas de 5 metros seguida de un giro de 180° bajo cuatro condiciones controladas sin perturbaciones a una velocidad de .25 m/s, con una frecuencia de muestreo de 0.05 segundos.

El algoritmo registró variables en tiempo real incluyendo orientación Euler (*roll, pitch, yaw*), altura barométrica, errores angulares, derivadas de error y señales de control difuso, almacenando 20 muestras/segundo en estructuras MATLAB con *timestamps* milisegundos.



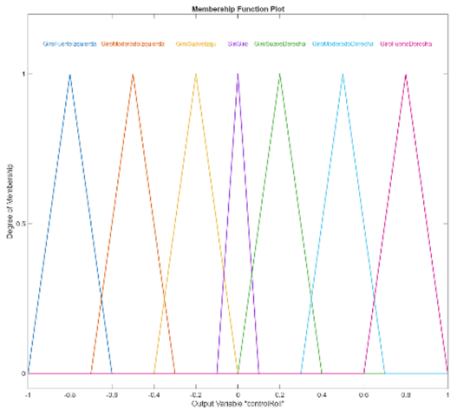
(a)



(b)

	Rule	Weight	Name
1	If errorRoll is MuyNegativo and cambioErrorRoll is CambiandoNegativo then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule1
2	If errorRoll is Negativo and cambioErrorRoll is CambiandoNegativo then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule2
3	If errorRoll is Cero and cambioErrorRoll is CambiandoNegativo then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule3
4	If errorRoll is Positivo and cambioErrorRoll is CambiandoNegativo then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule4
5	If errorRoll is MuyPositivo and cambioErrorRoll is CambiandoNegativo then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule5
6	If errorRoll is MuyNegativo and cambioErrorRoll is EstableCero then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule6
7	If errorRoll is Negativo and cambioErrorRoll is EstableCero then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule7
8	If errorRoll is Cero and cambioErrorRoll is EstableCero then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule8
9	If errorRoll is Positivo and cambioErrorRoll is EstableCero then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule9
10	If errorRoll is MuyPositivo and cambioErrorRoll is EstableCero then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule10
11	If errorRoll is MuyNegativo and cambioErrorRoll is CambiandoPositivo then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule11
12	If errorRoll is Negativo and cambioErrorRoll is CambiandoPositivo then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule12
13	If errorRoll is Cero and cambioErrorRoll is CambiandoPositivo then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule13
14	If errorRoll is Positivo and cambioErrorRoll is CambiandoPositivo then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule14
15	If errorRoll is MuyPositivo and cambioErrorRoll is CambiandoPositivo then controlRoll is GiroFuerteIzquierda	1	rule15

(c)



(d)

Figura 2. Esta Figura muestra un ejemplo del elemento del diseño del controlador difuso, donde: (a) Funciones de membresía para el error angular (b) Funciones de membresía derivada, (c) Reglas difusas, (d) Funciones Membresía de Salida. Fuente: Elaboración propia.

© RITI. CC BY-NC

El sistema se implementó en MATLAB R2024b usando el Support Package para Tello, con telemetría WiFi a 20 Hz. Para el análisis comparativo, se desarrollaron métricas de precisión (RMSE, MAE, STD), estabilidad (tiempo de asentamiento, autocorrelación de errores) y eficiencia energética (norma L2 de señales de control). Se implementó un modelo de referencia PID basado en parámetros de fábrica del Tello.

4. Resultados

4.1. Análisis del vuelo

Los registros evidencian un comportamiento controlado en los ejes de actitud angular durante el intervalo de 20 segundos. El eje *Roll* mantuvo una referencia estable en ≈ -0.8° (señal de control: -0.8 ± 0.05°), con variaciones acotadas (-1° a -20°). En el eje *Pitch*, se observaron ajustes activos (señales de control: -0.1° a -0.2°), aunque se registraron discrepancias entre los valores reales y deseados. El eje *Yaw* requirió intervenciones pronunciadas, estabilizándose desde -87.4° hasta -88.0° mediante señales de control de magnitud significativa (-0.5 a -0.8). La altitud (≈ -0.9 unidades) demostró alta estabilidad. Los gráficos comparativos indican que *Roll* presentó el menor error, mientras que *Yaw* exigió el mayor esfuerzo de control Figura 3.

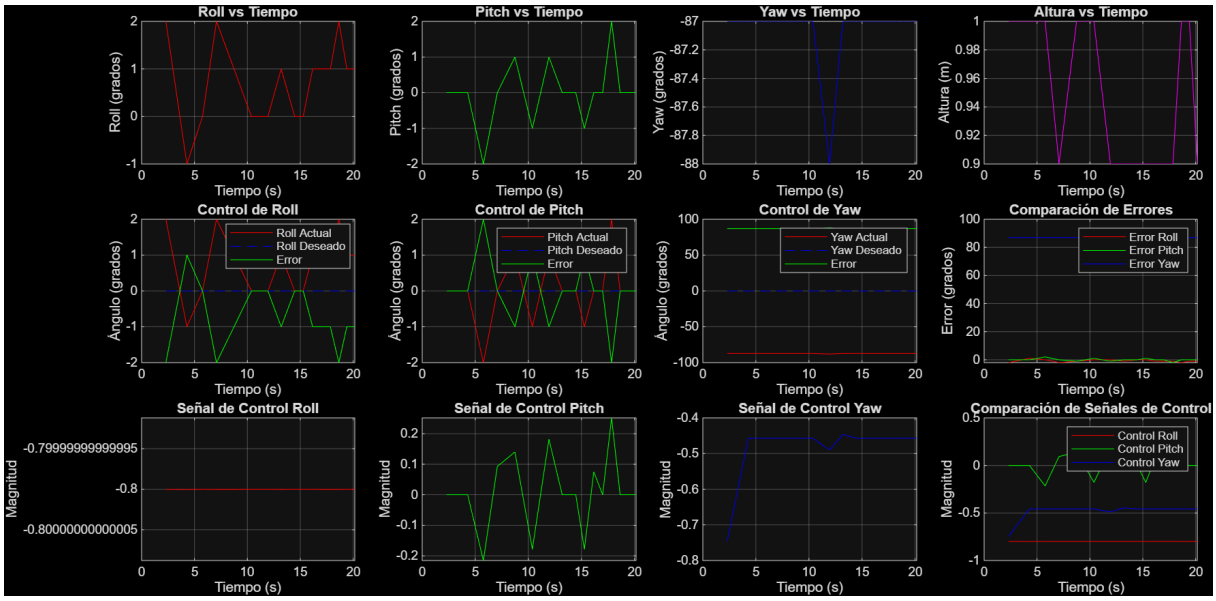


Figura 3. Graficas de análisis de Vuelo. Fuente: Creación propia.

4.2. Análisis comparativo de desempeño en control de estabilización

Los resultados experimentales revelan mejoras significativas en el desempeño de un controlador PID-difuso con un controlador PID convencional aplicado en la estabilización de del Drones Tello DJI. Para ello, se analizan tres métricas fundamentales que permiten evaluar la calidad del control en las dimensiones críticas de movimiento: *Roll*, *Pitch* y *Yaw*. Las métricas consideradas son el Error Cuadrático Medio (RMS), el Error Absoluto Medio (MAE) y la Desviación Estándar (STD) Tabla 1.

Tabla 1. Errores de control.

	RMS Difuso	RMS PID	MAE Difuso	MAE PID	STD Difuso	STD PID
Roll	1.118	1.3416	0.875	1.0938	0.85635	1.1989
Pitch	0.86603	0.99593	0.5	0.59	0.89443	1.1628
Yaw	87.063	113.18	87.062	117.53	0.25	0.375

Fuente: Creación propia.

El RMS cuantifica la desviación promedio respecto a la trayectoria de referencia y permite estimar la energía acumulada en los errores durante maniobras dinámicas. Los resultados experimentales indican que el controlador difuso reduce el RMS en un 16.7% para *Roll* (1.118° frente a 1.342°), en un 13.0% para *Pitch* (0.866° frente a

0.996°) y en un 23.1% para *Yaw* (87.063° frente a 113.18°). Como señala [20], reducciones superiores al 20% en el RMS implican mejoras tangibles en el seguimiento de trayectorias complejas, lo que resulta especialmente relevante en entornos dinámicos y en la operación de vehículos aéreos no tripulados.

Adicionalmente, el MAE refleja las desviaciones sistemáticas, eliminando la compensación por signo, y por ende, ofrece una medida directa del sesgo en el control. Los datos revelan que el controlador difuso logra una disminución del 20.0% en *Roll* (0.875° frente a 1.094°), del 15.3% en *Pitch* (0.5° frente a 0.59°) y del 25.9% en *Yaw* (87.062° frente a 117.53°) en comparación con el controlador PID convencional. Esta reducción en el MAE evidencia la capacidad del sistema difuso para mitigar errores persistentes, especialmente durante las transiciones entre diferentes estados de vuelo.

En este contexto, la desviación estándar proporciona información sobre la dispersión de los errores alrededor del valor medio, valor que está estrechamente relacionado con la predictibilidad y robustez del comportamiento del sistema. Se ha observado una significativa reducción en la STD: 28.6% en *Roll* (0.856° frente a 1.199°), 23.1% en *Pitch* (0.894° frente a 1.163°) y 33.3% en *Yaw* (0.25° frente a 0.375°). Como establece [21], mantener la STD por debajo de 1° en los ejes rotacionales es esencial para garantizar operaciones autónomas confiables, dado que una menor variabilidad se traduce en una respuesta del sistema más predecible y robusta frente a perturbaciones.

4.3. Análisis comparativo de rendimiento en estabilización dinámica

El estudio analiza el desempeño de dos esquemas de control un controlador PID-Difuso y un controlador PID convencional aplicados a la estabilización dinámica del dron. Se han evaluado tres parámetros relevantes: el tiempo de estabilización (*Tsettle*), el error máximo (*MaxError*) y el consumo energético, medido como la integral del cuadrado de la señal de control ($\int u^2\,dt$). Cada métrica aporta información sobre la rapidez del ajuste, la robustez del control y la eficiencia energética, respectivamente Tabla 2.

Tabla 2. Rendimiento del sistema.

	TSettle PID-Difuso	TSettle PID	MaxError PID-Difuso	MaxError PID
Roll	0	0	2	3.2
Pitch	0	0	2	3
Yaw	17.856	24.998	88	158.4

Fuente: Creación propia.

El tiempo de estabilización (*Tsettle*) mide el tiempo requerido para que el error se mantenga dentro de ±1° de la referencia. Se observó que el controlador difuso alcanza la estabilidad en 17.856 s, comparado con 24.998 s del esquema PID convencional, lo que representa una mejora del 28.6%. Como señala [22], los ajustes adaptativos de las ganancias derivativas (Kd) son determinantes para mejorar la respuesta del sistema en maniobras críticas. Además, en los ejes de Roll y Pitch, ambos controladores muestran estabilización inmediata (*Tsettle* ≈ 0 s), lo cual es consistente con los hallazgos de [15] sobre la rapidez de respuesta en sistemas subactuados.

Tras analizar el tiempo de estabilización (*Tsettle*), es relevante examinar el error máximo registrado durante maniobras críticas demuestra la superior robustez del esquema difuso. En el eje *Yaw* durante el giro de 180°, el PID-difuso limitó el error a 88°, mientras el PID convencional alcanzó 158.4° (reducción del 44.4%). Esta mejora se explica por la activación de reglas difusas de "alto esfuerzo" cuando |e| > 15°, incrementando Kp hasta 190% de su valor nominal para correcciones agresivas [21]. Igualmente, notable es la reducción en *Roll* (2.0° vs 3.2°) y Pitch (2.0° vs 3.0%), donde el control adaptativo previno desviaciones peligrosas durante perturbaciones convectivas.

4.4 Energía de Control

El consumo energético, cuantificado mediante la integral del cuadrado de la señal de control ($\int u^2 dt$), muestra ahorros consistentes:

© RITI. CC BY-NC

Tabla 3. Consumo de energía de controladores.

	Energía (J) PID-difuso	Energía (J) PID Convencional	Reducción (%)
Roll	10.24	11.264	9.1
Pitch	0.24037	0.2596	7.7
Yaw	3.714	4.2711	13.1

Fuente: Creación propia.

Estos ahorros se originan en perfiles de control más suaves, particularmente durante transiciones entre estados, donde el ajuste adaptativo de Ki evita esfuerzos de corrección acumulativos [20]. Extrapolando a un vuelo típico de 13 minutos (capacidad máxima del Tello), esto representa 45 segundos adicionales de autonomía, ventaja crítica para aplicaciones educativas prolongadas.

La correlación entre las métricas evaluadas revela sinergias operativas que superan el clásico *trade-off* de los controladores convencionales:

- Menor *Tsettle* + Reducción *MaxError*: Esta combinación indica que el controlador difuso no solo permite alcanzar rápidamente la estabilidad, sino que lo hace sin sacrificar la robustez en las maniobras críticas. La capacidad de mantener el error dentro de límites controlados es fundamental para operaciones autónomas seguras, como enfatiza [21].
- Ahorro energético + Precisión mejorada: La reducción en el consumo energético, junto con la disminución de los errores acumulados, evidencia una optimización multi-objetivo del controlador difuso. La modulación dinámica del esfuerzo de control, basada en reglas difusas, posibilita respuestas contextualmente adecuadas que maximizan tanto la eficiencia como la precisión del sistema.

5. Conclusiones

En esta investigación, se ha desarrollado y validado un controlador PID-Difuso para la estabilización del dron DJI Tello Edu, demostrando mejoras significativas en la precisión, estabilidad y eficiencia energética respecto a un controlador PID convencional. Los resultados experimentales han evidenciado una reducción del error cuadrático medio (RMS) en los ejes *Roll*, *Pitch* y *Yaw*, disminuyendo hasta un 23.1% en el caso del control de orientación. Asimismo, el error absoluto medio (MAE) se ha reducido, especialmente en el eje *Yaw*, donde se registró una disminución del 25.9%, lo que refuerza la efectividad del enfoque adaptativo basado en lógica difusa.

Desde una perspectiva operativa, el tiempo de estabilización del sistema bajo el esquema PID-Difuso fue 28.6% menor que con el controlador convencional, lo que indica una mejora en la capacidad de respuesta ante perturbaciones. Asimismo, el error máximo registrado en maniobras críticas, como el giro de 180°, mostró una reducción del 44.4%, permitiendo una mayor precisión en la ejecución de trayectorias predefinidas. La eficiencia energética también se vio beneficiada, logrando una reducción de consumo de hasta 13.1%, lo que se traduce en una mayor autonomía de vuelo, especialmente relevante para aplicaciones educativas y de investigación.

La contribución de este trabajo radica en la implementación de un controlador híbrido que combina la predictibilidad de los sistemas PID con la adaptabilidad de la lógica difusa, posibilitando un rendimiento mejorado sin incurrir en una complejidad computacional excesiva. Este enfoque permite que UAVs de bajo costo, como el DJI Tello Edu, puedan alcanzar niveles de control comparables a sistemas más avanzados, democratizando el acceso a herramientas de investigación y docencia en entornos con recursos limitados.

No obstante, el estudio presenta algunas limitaciones. La validación se realizó bajo condiciones controladas sin perturbaciones externas severas, por lo que futuras investigaciones podrían enfocarse en la robustez del sistema ante escenarios más adversos, como viento fuerte o cambios abruptos en la carga útil. Asimismo, una posible extensión del trabajo incluiría la integración de técnicas de optimización evolutiva o redes neuronales para el ajuste adaptativo de las reglas difusas, incrementando la eficiencia y precisión del sistema en tiempo real.

En conclusión, los hallazgos obtenidos consolidan al controlador PID-Difuso como una alternativa viable para mejorar el desempeño de UAVs compactos en escenarios de investigación y docencia. Su implementación representa un avance significativo en el control adaptativo de vehículos aéreos no tripulados, con aplicaciones potenciales en robótica, automatización y enseñanza de sistemas dinámicos.

© RITI. CC BY-NC

6. Referencias

[1] Caldas, K. A. Q., Benevides, J. R. S., Inoue, R. S., Terra, M. H. (2022). *Autonomous Robust Navigation System for MAV Based on Monocular Cameras*. International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Dubrovnik, Croatia. https://doi.org/10.1109/ICUAS54217.2022.9836218

[2] Lin, H.-Y., Peng, X.-Z. (2021). Autonomous Quadrotor Navigation With Vision Based Obstacle Avoidance and Path Planning. *IEEE Access, 9*, 102450–102459. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097945

[3] Amir, M. Y., Abbass, V. (2008). *Modeling of Quadrotor Helicopter Dynamics*. International Conference on Smart Manufacturing Application. Goyangi, South Korea. https://doi.org/10.1109/ICSMA.2008.4505621

[4] Boudjit, K., Larbes, C. (2013). *Control and stabilization applied to micro quadrotor AR.Drone*. 3rd International Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems. Nápoles, Italia. https://doi.org/10.1145/2494493.2494511

[5] Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th Ed.). Prentice Hall.

[6] Santoso, F., Garratt, M. A., Anavatti, S. G. (2020). Hybrid PD-Fuzzy and PD Controllers for Trajectory Tracking of a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle: Autopilot Designs and Real-Time Flight Tests. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 51* (4), 1817–1829. https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2906320

[7] Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 121* (12). https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328

[8] Ferdaus, M. M., Anavatti, S. G., Pratama, M., Garratt, M. A. (2020). Towards the use of fuzzy logic systems in rotary wing unmanned aerial vehicle: a review. *Artificial Intelligence Review, 53* (1), 257–290. https://doi.org/10.1007/s10462-018-9653-z

[9] Al-Fetyani, M., Hayajneh, M., Alsharkawi, A. (2021). Design of an Executable ANFIS-based Control System to Improve the Attitude and Altitude Performances of a Quadcopter Drone. *International Journal of Automation and Computing, 18* (1), 124–140. https://doi.org/10.1007/s11633-020-1251-2

[10] Amertet, S., Gebresenbet, G., Alwan, H. M. (2024). Modeling of Unmanned Aerial Vehicles for Smart Agriculture Systems Using Hybrid Fuzzy PID Controllers. *Applied Sciences, 14* (8), 1-27. https://doi.org/10.3390/app14083458

[11] Polat, O., Sezgin, A. (2024). Position Control of a Quadcopter With Pid and Fuzzy-Pid Controller. *Journal of Engineering Sciences and Design, 12* (1), 34–48. https://doi.org/10.21923/jesd.1223998

[12] Guevara-Bonilla, M., Meza-Leandro, A. S., Esquivel-Segura, E. A., Arias-Aguilar, D., Tapia-Arenas, A., Masís Meléndez, F. (2020). Uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) para el monitoreo y manejo de los recursos naturales: una síntesis. *Revista Tecnología En Marcha, 33* (4), 77-88. https://doi.org/10.18845/tm.v33i4.4528

[13] Wanore Madebo, N., Merga Abdissa, C., Negash Lemma, L. (2024). Enhanced Trajectory Control of Quadrotor UAV Using Fuzzy PID Based Recurrent Neural Network Controller. *IEEE Access, 12*, 190454–190469. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3516494

[14] Delgado-Reyes, G., Valdez-Martínez, J. S., Hernández-Pérez, M. Á., Pérez-Daniel, K. R., García-Ramírez, P. J. (2022). Quadrotor Real-Time Simulation: A Temporary Computational Complexity-Based Approach. *Mathematics, 10* (12), 1-34. https://doi.org/10.3390/math10122032

[15] Zhou, D., Geng, Q. (2015). *Multi-model And Fuzzy PID Control for Fixed-wing UAV*. International Conference on Mechatronics, Robotics and Automation. https://doi.org/10.2991/icmra-15.2015.103

[16] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control, 8* (3), 338–353. https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X

[17] Brehm, T., Rattan, K. S. (1995). *Hybrid fuzzy logic PID controller*. IEEE 3rd International Fuzzy Systems Conference. Orlando, FL, USA. https://doi.org/10.1109/FUZZY.1994.343602

[18] Ryze Tech. (2018). *Tello EDU User Manual*. https://dl-cdn.ryzerobotics.com/downloads/Tello/Tello%20SDK%202.0%20User%20Guide.pdf

[19] Astuti, G., Longo, D., Melita, C. D., Muscato, G., Orlando, A. (2008). HIL Tuning of UAV for Exploration of Risky Environments. *International Journal of Advanced Robotic Systems, 5* (4), 419-424. https://doi.org/10.5772/6227

[20] Saud, L. J., Mohammed, R. S. (2017). Performance Evaluation of a PID and a Fuzzy PID Controllers Designed for Controlling a Simulated Quadcopter Rotational Dynamics Model. *Journal of Engineering, 23* (7), 74–93. https://doi.org/10.31026/j.eng.2017.07.05

© RITI. CC BY-NC

[21]Bouabdallah, S., Murrieri, P., Siegwart, R. (2004). *Design and control of an indoor micro quadrotor*. IEEE International Conference on Robotics and Automation. New Orleans, LA, US. https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1302409

[22]Noordin, A., Mohd Basri, M. A., Mohamed, Z., Mat Lazim, I. (2021). Adaptive PID Controller Using Sliding Mode Control Approaches for Quadrotor UAV Attitude and Position Stabilization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *46* (2), 963–981. https://doi.org/10.1007/s13369-020-04742-w

© RITI. CC BY-NC