



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**  
**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**Artículo académico previo a la Obtención del Título de Ingeniero en  
Electrónica e Instrumentación**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO DE PATRONES  
CON CONTROL VISUAL BASADO EN IMAGEN, PARA UN VEHÍCULO AÉREO NO  
TRIPULADO EN AMBIENTES INTERIORES.**

**Autores:**

Margarita Gioconda Arroyo Paredes

Elvis Gustavo Cordonez Acosta

MsC. Milton Fabricio Pérez Gutiérrez, *Tutor*  
Dr. David Raymundo Rivas Lalaleo, *Co-Tutor*





**ICMRE 2020**

Barcelona, Spain  
February 12-15, 2020



**2020 The 6th International Conference on  
Mechatronics and Robotics Engineering**

The organizing committee invites prospective authors to submit original contributions to ICMRE 2020

**IEEE Xplore**<sup>®</sup>  
Digital Library

[DOI: 10.1109/ICMRE49073.2020.9065184](https://doi.org/10.1109/ICMRE49073.2020.9065184)



ELSEVIER

**Scopus**

The largest abstract and citation database of peer-reviewed literature from more than 5,000 publishers

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A PATTERN TRACKING SYSTEM WITH VISUAL CONTROL BASED ON IMAGES FOR AN UAV IN INDOOR ENVIRONMENTS.**

*Elvis Cordonez-Acosta, Margarita Arroyo- Paredes, Milton Pérez-Gutierrez, David Rivas-Lalaleo*  
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE  
Carrera de Ingeniería en Electrónica e Instrumentación  
Sangolquí, Ecuador  
{egcordonez, mgarroyo2, mfperez3, drivas}@espe.edu.ec



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# AGENDA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 PROCEDIMIENTO
- 3 EXPERIMENTACIÓN
- 4 RESULTADOS
- 5 CONCLUSIONES
- 6 TRABAJOS FUTUROS



# AGENDA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 PROCEDIMIENTO
- 3 EXPERIMENTACIÓN
- 4 RESULTADOS
- 5 CONCLUSIONES
- 6 TRABAJOS FUTUROS



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.2 PROBLEMÁTICA



### Ambientes Externos

Impactos con obstáculos  
Desplomes por fallo en la comunicación  
Desestabilización por ráfagas de viento



### Ambientes Internos

Pérdida de trayectoria por fallo en la comunicación  
GPS



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.3 HIPÓTESIS

El algoritmo de control basado en imágenes permitirá a una aeronave no tripulada seguir un patrón en espacios internos.



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.4 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema de seguimiento de patrones con control visual basado en imagen, para un vehículo aéreo no tripulado en ambientes internos



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Seleccionar los componentes de hardware para el sistema de seguimiento de patrones.

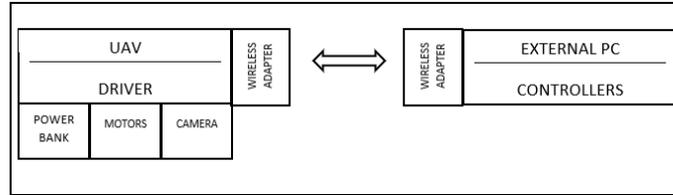
Diseñar la arquitectura de software mediante el uso del equipo computacional para la comunicación bidireccional con el Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT).

Desarrollar un algoritmo de control visual basado en imagen para la detección y seguimiento de patrones.

Ejecutar pruebas experimentales con los equipos para la validación de resultados.

# 1. Introducción

## 1.5 Propuesta



# AGENDA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 PROCEDIMIENTO
- 3 EXPERIMENTACIÓN
- 4 RESULTADOS
- 5 CONCLUSIONES
- 6 TRABAJOS FUTUROS



## 2. PROCEDIMIENTO

### 2.1 CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA

UAV DJ-TELLO



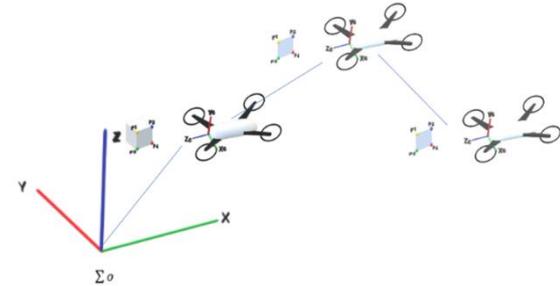
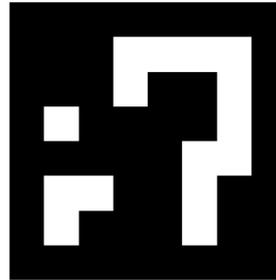
python



RETROALIMENTACIÓN VISUAL



PATRÓN



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## 2. PROCEDIMIENTO

### 2.1 CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA

- ✓ Colocar ante la cámara un patrón con N puntos de coordenadas 3D del mundo conocidas.
- ✓ Tomar un conjunto de imágenes y obtener en ellas las coordenadas en píxeles de cada punto.
- ✓ Parámetros intrínsecos: factores de escala, distancia focal, punto principal, distorsiones.
- ✓ Parámetros extrínsecos: desplazamiento de la cámara respecto del mundo (vector de traslación), orientación de la cámara respecto del mundo (Matriz de Rotación).



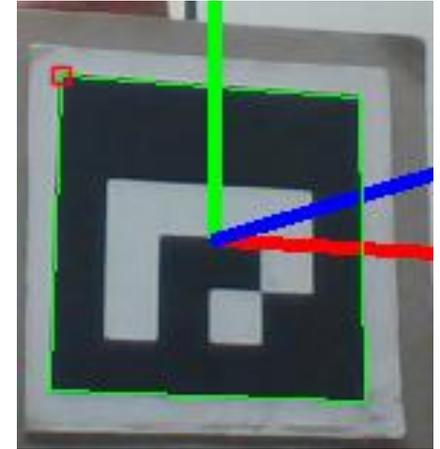
Matriz:

```
[[917.38837439 0. 489.57735426]
 [ 0. 917.03316856 368.95927445]
 [ 0. 0. 1. ]]
```

Distorsion:

```
[[ 0.03130738 -0.37294326 0.00290581 -0.00123596 1.12854006]]
```

- ✓ Matriz rotación corresponde a los ángulos de rotación yaw, pitch y roll.
- ✓ Matriz de traslación se encarga de los desplazamientos en X,Y, Z.

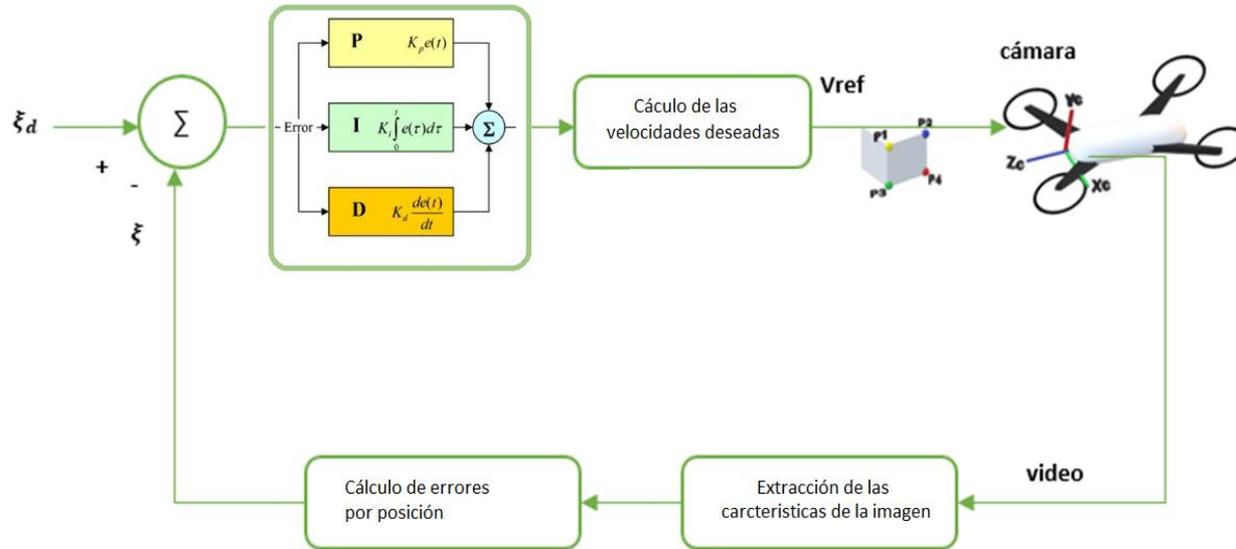


## 2. PROCEDIMIENTO

### 2.2 DESARROLLO DEL CONTROLADOR CLÁSICO PID

$$vel(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \dot{e}(t)$$

El controlador ajustará las velocidades para mantener enfocado el patrón.



## 2. PROCEDIMIENTO

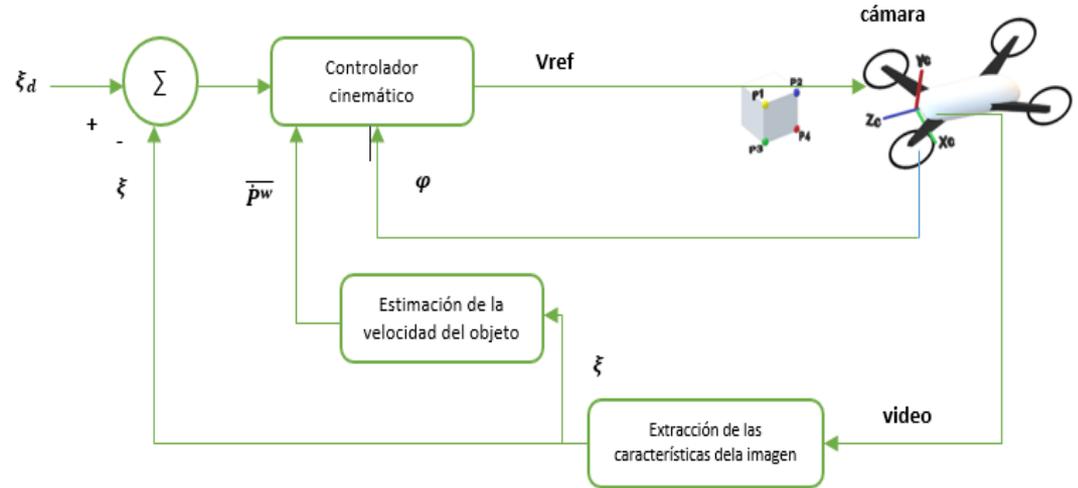
### 2.3 DESARROLLO DEL CONTROLADOR POR LA JACOBIANA INVERSA

Controla su posición o desplazamiento, siendo el punto de interés el centro óptico de la cámara a bordo del UAV.

$$vel = J^{-1} * k * \tanh(Error)$$

$$J = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & a_c \sin(\varphi) \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & a_c \cos(\varphi) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Error = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \\ E_r \end{bmatrix}$$



# AGENDA

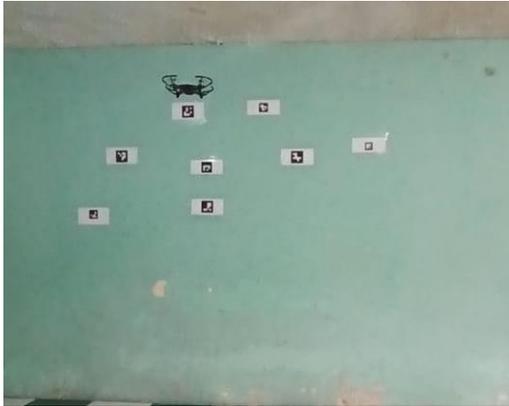
- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 PROCEDIMIENTO
- 3 EXPERIMENTACIÓN
- 4 RESULTADOS
- 5 CONCLUSIONES
- 6 TRABAJOS FUTUROS



# 3. EXPERIMENTACIÓN

## 3.1 IDENTIFICACIÓN DE PATRÓN

Cámara externa.



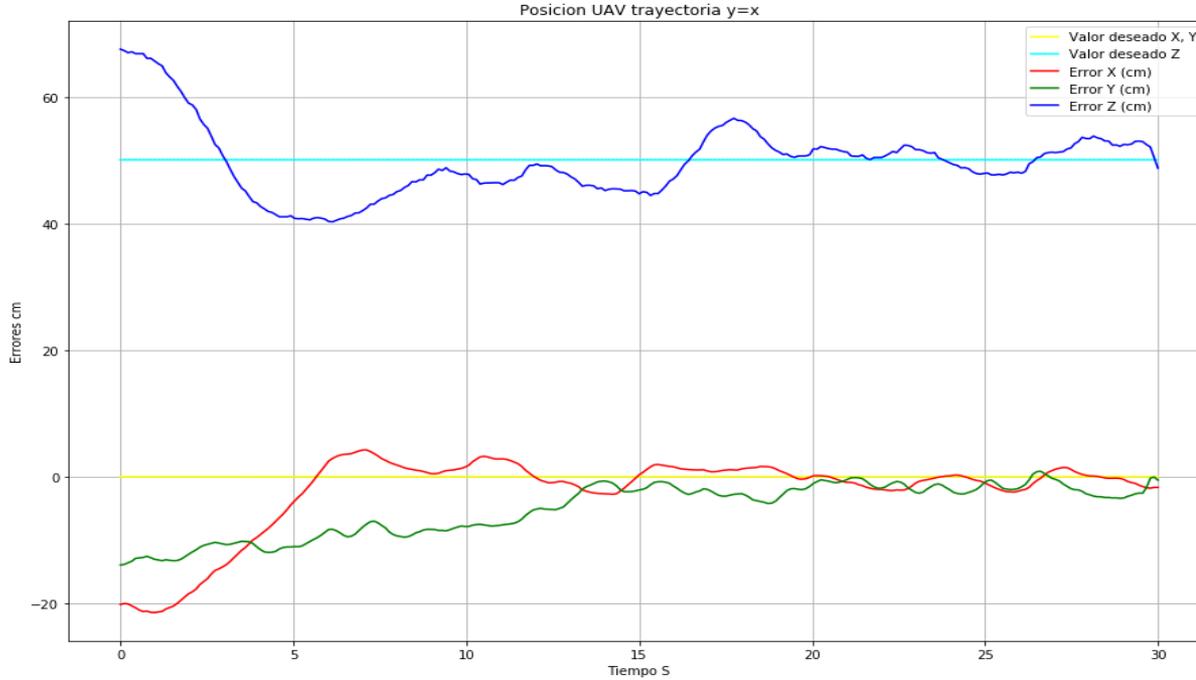
Cámara a bordo del VANT



# 3. EXPERIMENTACIÓN

## 3.1 UAV CON CONTROL PID

Trayectoria  $y=x$  , la distancia recorrida será de 1 metro en un tiempos de 30 segundos.



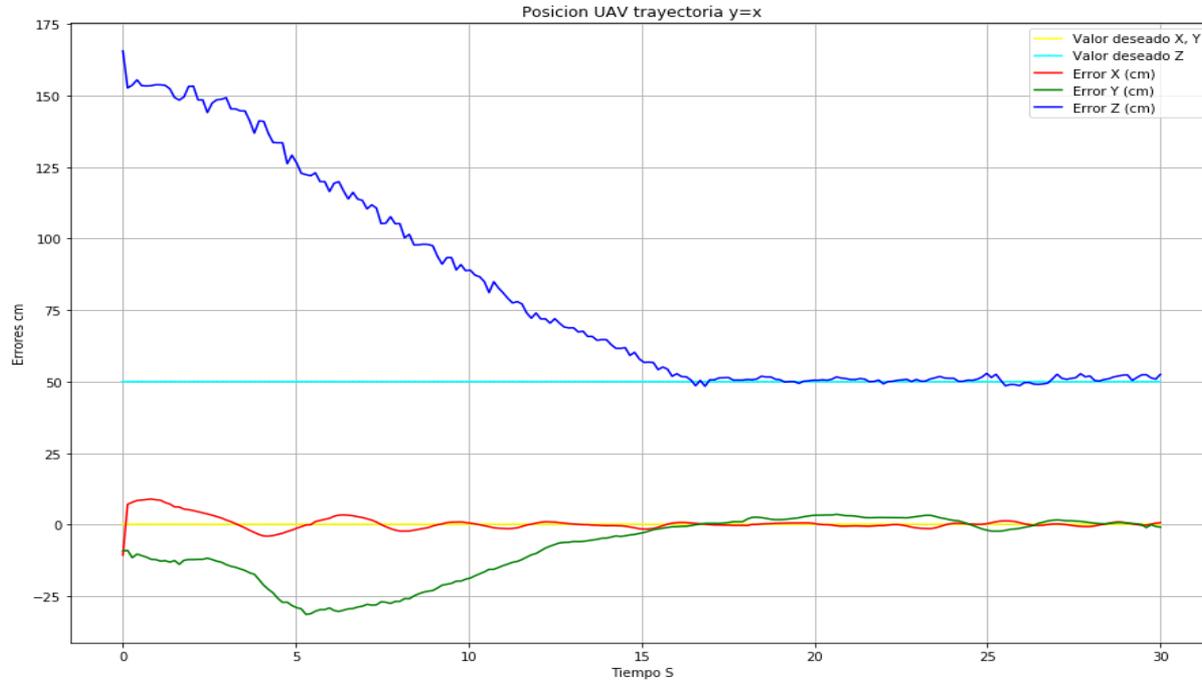
| eje | $k_p$ | $k_i$ | $k_d$ |
|-----|-------|-------|-------|
| $x$ | 1,50  | 0,005 | 0     |
| $y$ | 3,00  | 0,009 | 0     |
| $z$ | 1,25  | 0,004 | 0     |
| $w$ | 0,10  | 0,001 | 0     |



# 3. EXPERIMENTACIÓN

## 3.2 CÁLCULO POR LA JACOBIANA INVERSA

Trayectoria  $y=x$  , la distancia recorrida será de 1 metro en un tiempos de 30 segundos.



$$k = \begin{bmatrix} 0.500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.250 \end{bmatrix}$$



# AGENDA

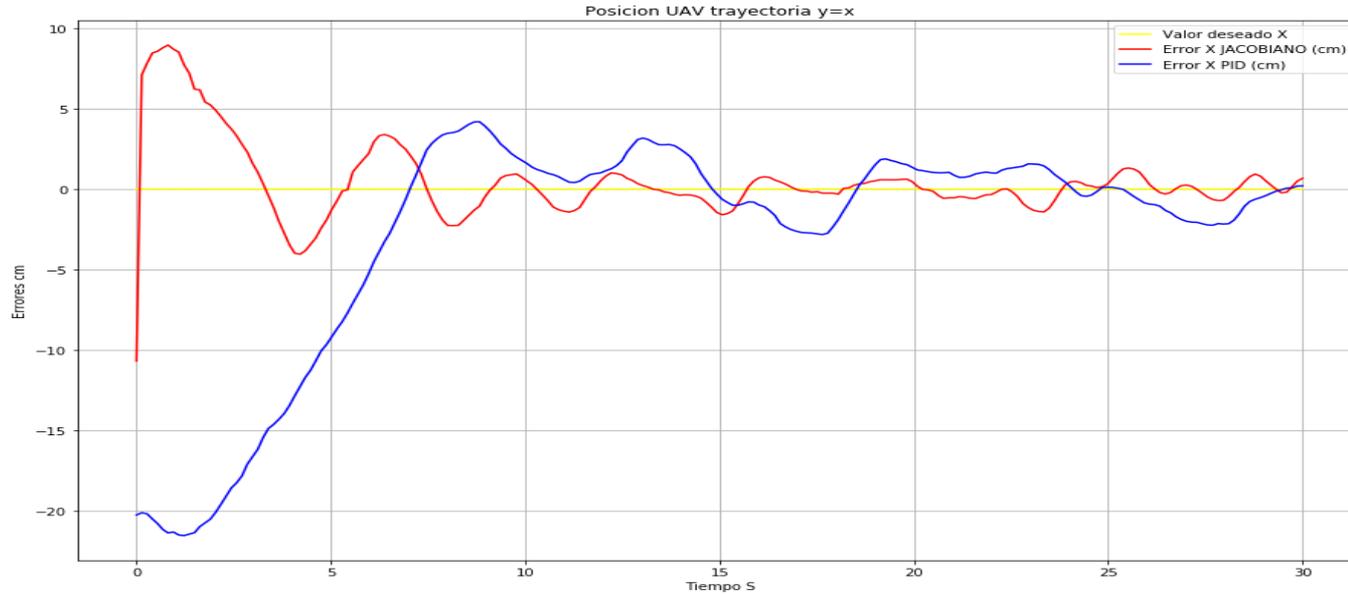
- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 PROCEDIMIENTO
- 3 EXPERIMENTACIÓN
- 4 RESULTADOS
- 5 CONCLUSIONES
- 6 TRABAJOS FUTUROS



# 4. RESULTADOS

## 4.1 ERRORES DE POSICIÓN EN EL EJE X

El error obtenido en el controlador PID es del 4% mientras que mediante el controlador Jacobiano es de 3% ambos en la escala de 100 cm; el tiempo de establecimiento es de 25 segundos y 10 segundos respectivamente.

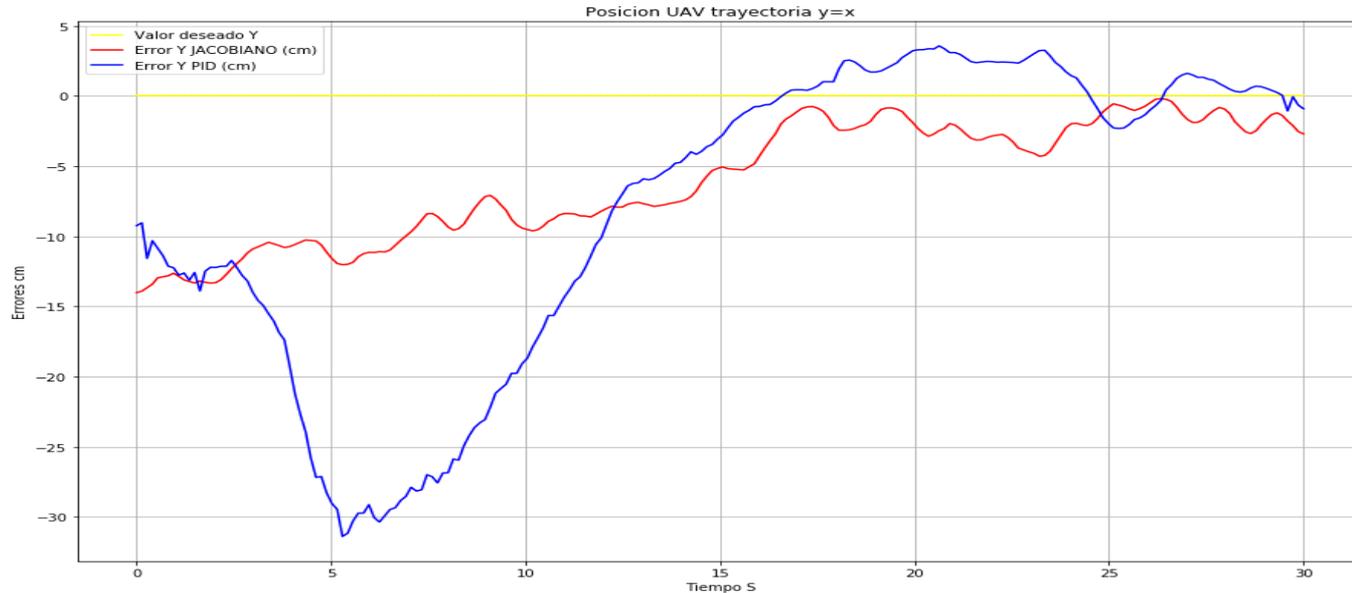


*Comparación de los errores en el Eje X mediante controlador por PID y controlador Jacobiano.*

# 4. RESULTADOS

## 4.2 ERRORES DE POSICIÓN EN EL EJE Y

El error obtenido en el controlador PID va en el rango de 5% mientras que mediante el controlador Jacobiano es de 3% ambos en la escala de 100cm ; el tiempo de establecimiento es de 25 segundos y 20 segundos respectivamente.

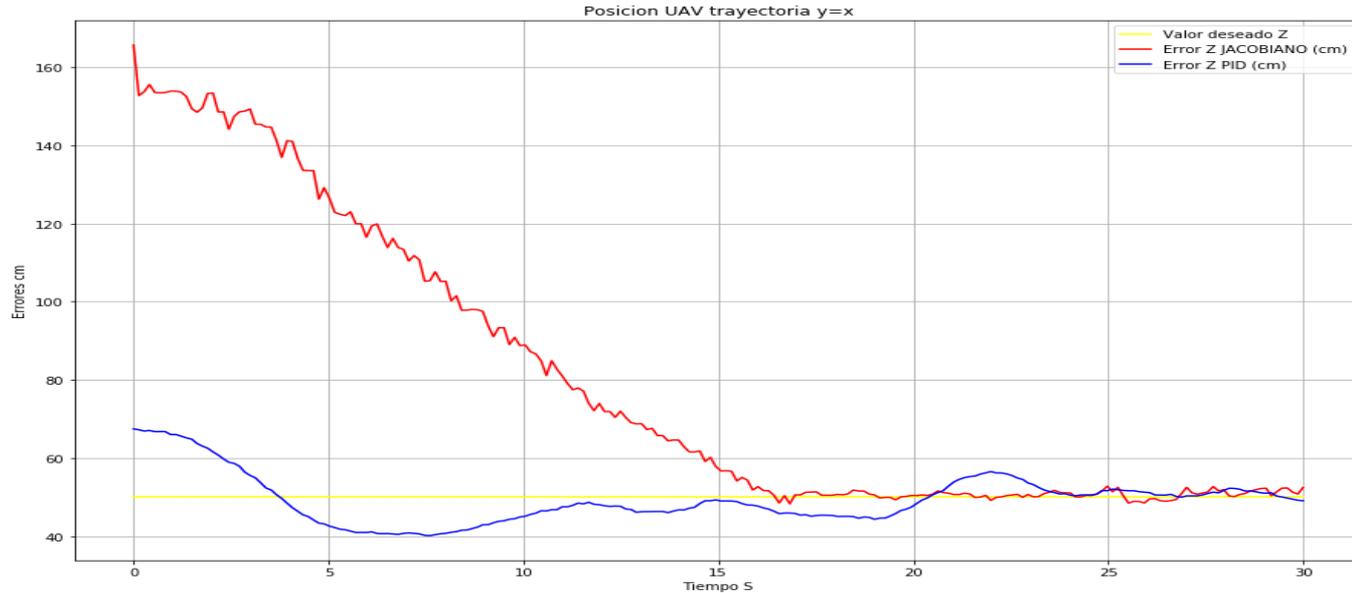


*Comparación de los errores en el Eje Y mediante controlador por PID y controlador Jacobiano.*

## 4. RESULTADOS

### 4.3 ERRORES DE POSICIÓN EN EL EJE Z

El error obtenido en el controlador PID va en el rango de 8% mientras que mediante el controlador Jacobiano es de 2% ambos en la escala de 100 cm; el tiempo de establecimiento será de 25 segundos y 20 segundos respectivamente.



Comparación de los errores en el Eje Z mediante controlador por PID y controlador Jacobiano.

## 4. RESULTADOS

### 4.4 VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

#### Y RESULTADOS-IDENTIFICACIÓN DE PATRÓN



**ESPE**  
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA

## 4. RESULTADOS

### 4.4 VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS Y RESULTADOS-SEGUIMIENTO DE PATRÓN

**Trayectoria horizontal**



**Trayectoria diagonal**



# AGENDA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 PROCEDIMIENTO
- 3 EXPERIMENTACIÓN
- 4 RESULTADOS
- 5 CONCLUSIONES
- 6 TRABAJOS FUTUROS



## 5. CONCLUSIONES

La elección de los elementos para el sistema se basó en la velocidad de respuesta óptima que tuvo el intercambio de datos entre el VANT y la PC a través de una comunicación inalámbrica.

La validación de resultados tras las experimentaciones realizadas permitió determinar que un controlador de tipo Jacobiano presenta mejores características que un controlador PID clásico, pues los errores son menores pese a que los tiempos de estabilización son mayores.

Por la dinámica del VANT, este solo puede rotar en el eje  $X$ , es decir, rotación en yaw con respecto a la imagen. De esta manera se descartan todos los ejes de rotación en  $Y$  (*pitch*) y en  $Z$  (*roll*) para el control.

## 5. CONCLUSIONES

La velocidad de comunicación entre el UAV y el computador se volvió muy importante para desarrollar los controladores puesto que ante un cambio de posición del patrón el UAV respondió inmediatamente debido al poco retardo que presentaba el video transmitido desde el UAV.

Uno de los controladores presenta un error inferior al 5% en cada uno de sus ejes en una escala de 100 cm para trayectorias mayores a 1 metro, cabe recalcar que estos errores disminuirán con otra plataforma aérea con mejores prestaciones.

# AGENDA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 PROCEDIMIENTO
- 3 EXPERIMENTACIÓN
- 4 RESULTADOS
- 5 CONCLUSIONES
- 6 TRABAJOS FUTUROS



## 6. TRABAJOS FUTUROS

Como complemento de este estudio, se propone el análisis de las velocidades de comunicación entre el UAV y la computadora para mejorar la eficiencia del controlador. Además, este estudio comparativo puede extenderse al análisis de controladores inteligentes.

# AGRADECIMIENTOS

Extendemos nuestro agradecimiento a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por financiar el proyecto 2018-207-ESPE-a-1 del cual este artículo forma parte. Además del grupo de investigación Wicom Energy.





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**  
**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en  
Electrónica e Instrumentación**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO DE PATRONES  
CON CONTROL VISUAL BASADO EN IMAGEN, PARA UN VEHÍCULO AÉREO NO  
TRIPULADO EN AMBIENTES INTERIORES.**

**Autores:**

Margarita Gioconda Arroyo Paredes

Elvis Gustavo Cordonez Acosta

Ing. Fabricio Pérez, *Tutor*  
Dr. David Rivas, *Co-Tutor*

