



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



# UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

## DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

### INGENIERÍA MECATRÓNICA

Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Mecatrónico

CONTROL NO LINEAL CON REALIMENTACIÓN VISUAL PARA EL SEGUIMIENTO DE PATRONES 3D EN  
MOVIMIENTO A TRAVÉS DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO

**AUTOR: GUEVARA ROMERO DANIEL DAVID**

**DIRECTOR: ING. ANDALUZ ORTÍZ VICTOR HUGO, PHD**





# IEA/AIE 2020

The 33th International Conference on Industrial, Engineering & Other Applications of Applied Intelligent Systems  
21-24, July, 2020 --> **22-25, September, 2020 (postponed!)**  
Kitakyushu, JAPAN



Lecture Notes in  
Computer Science

LNCS

LNAI

LNBI

© Springer Nature Switzerland AG 2020  
H. Fujita et al. (Eds.): IEA/AIE 2020, LNAI 12144, pp. 1–8, 2020.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-55789-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55789-8_10)

## Non-linear 3D Visual Control for an Unmanned Aerial Vehicle

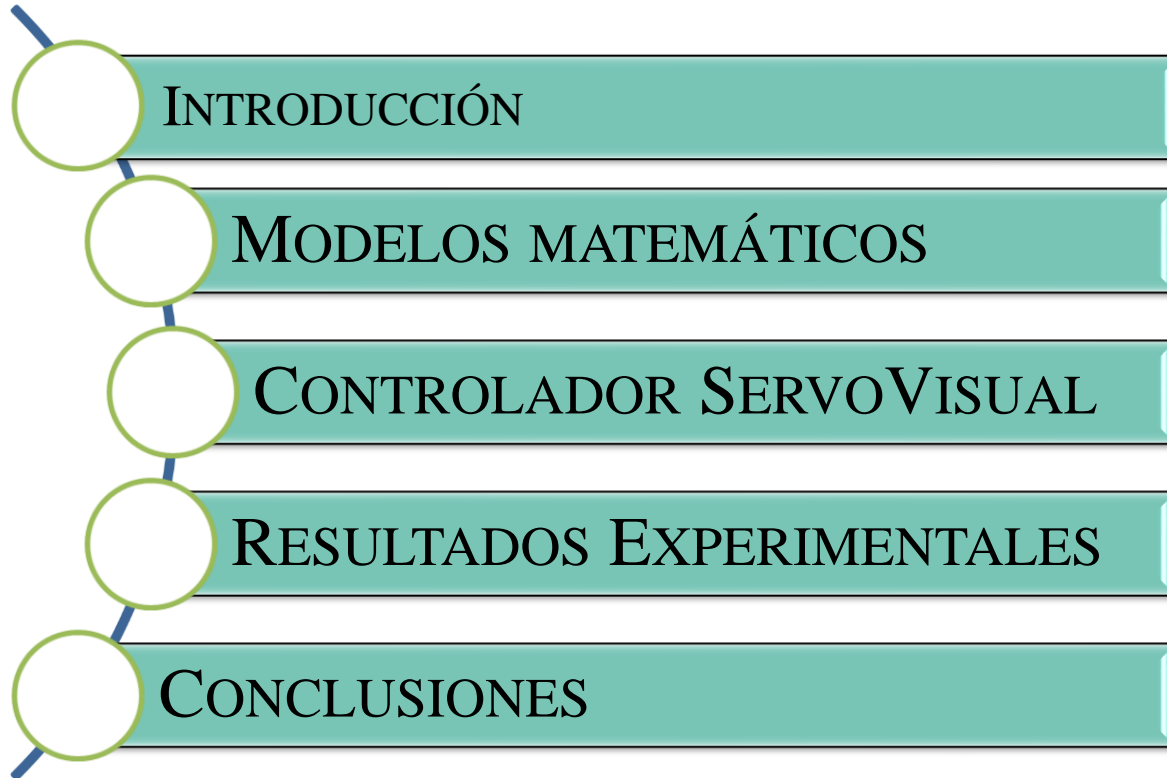
Daniel D. Guevara<sup>(✉)</sup> and Víctor H. Andaluz

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador  
{ddguevara1, vhandaluz1}@espe.edu.ec

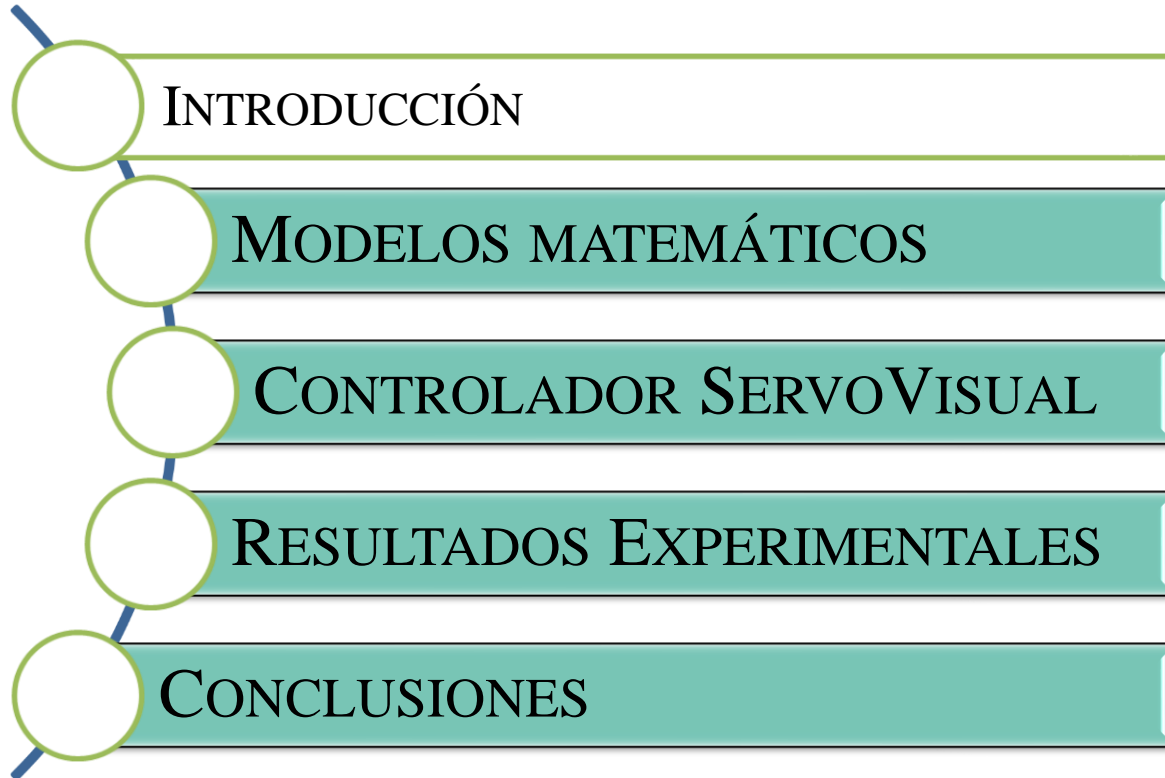


**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

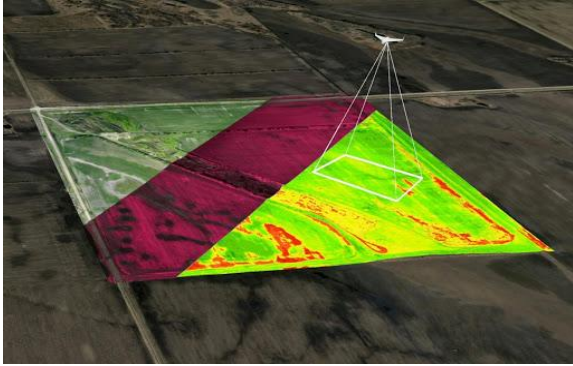
# AGENDA



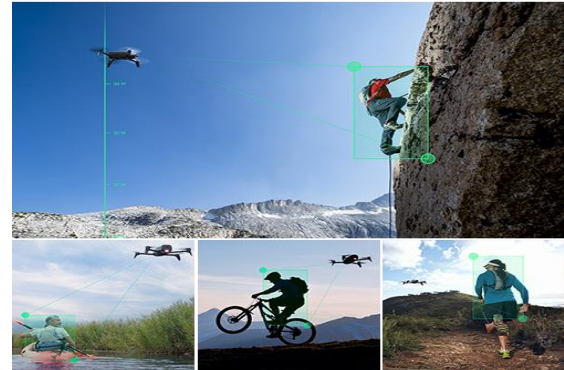
# AGENDA



# ANTECEDENTES



UAV



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

## PROBLEMÁTICA



Vigilancia en Puntos no Accesibles



Seguridad y cumplimiento de protocolos de seguridad en Áreas de riesgo



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

## OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un esquema de **control no lineal** con realimentación visual para el seguimiento de **patrón 3D** en movimiento con **visión artificial**, basado en la **cinemática del robot aéreo** y en el **modelo de proyección del sensor visual**.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

**Detectar patrones** en movimiento con el sensor visual del UAV utilizando visión artificial.

**Determinar el modelo cinemático** de un **robot aéreo** y del **sensor visual** para el **seguimiento autónomo de patrón 3D** en movimiento.

**Proponer un esquema de control en lazo cerrado con realimentación visual** para el seguimiento de patrón 3D en movimiento, basado en las **características de movimiento del UAV** y de la proyección visual en **espacios de trabajos parcialmente estructurados**.

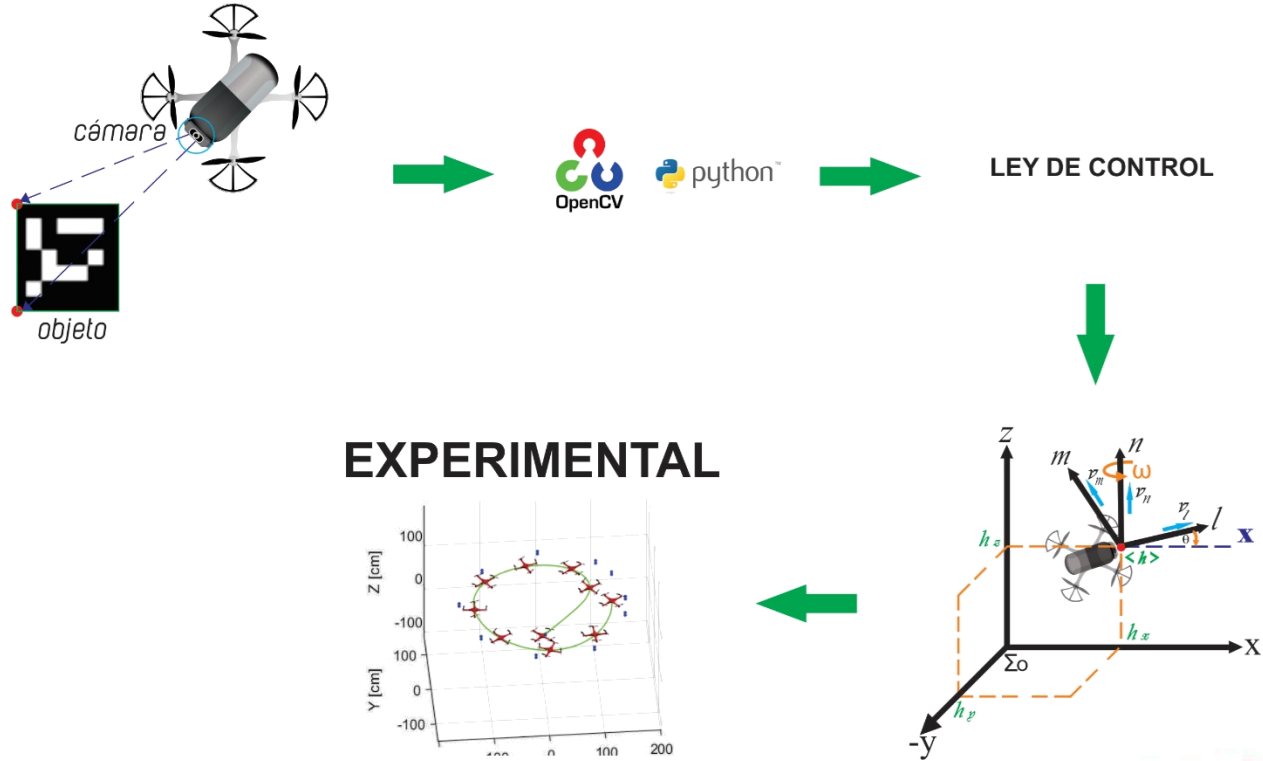


## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

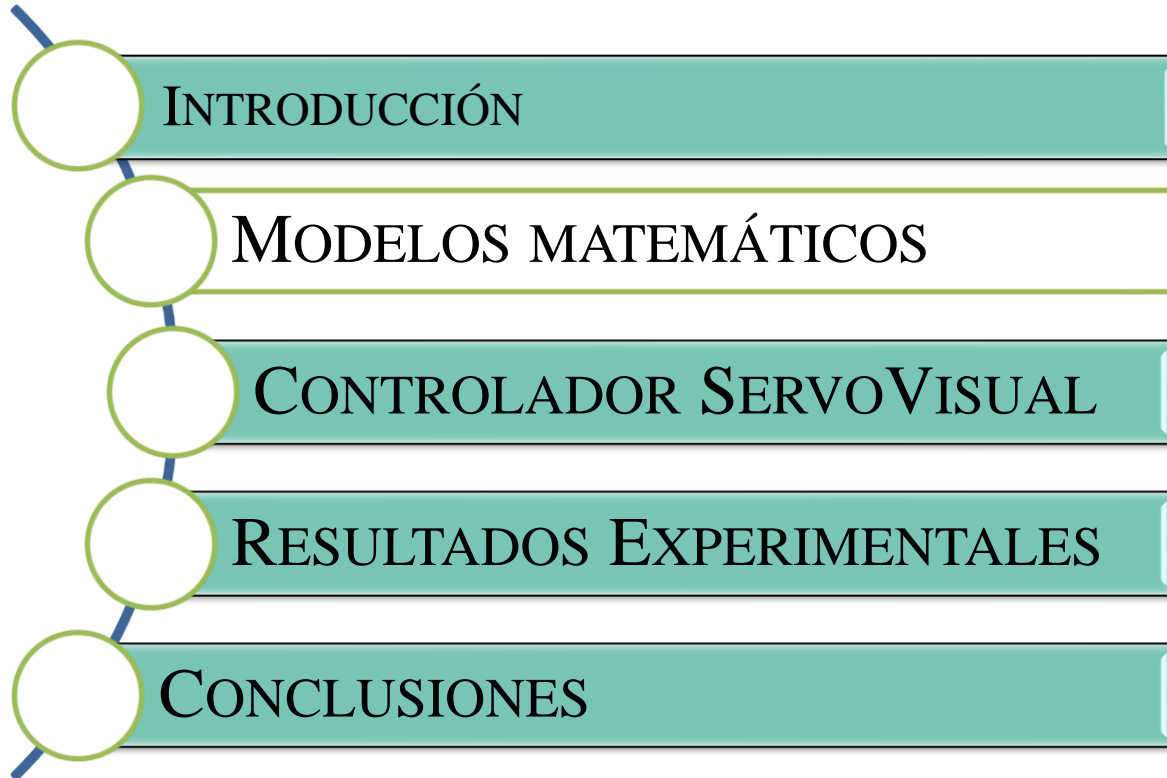
**Analizar matemáticamente la estabilidad y robustez del esquema de control** propuesto a fin de que los **errores de control tienden a cero**.

**Evaluar experimentalmente** el esquema de control propuesto a fin de analizar el desempeño del robot aéreo al seguir un patrón 3D en movimiento.

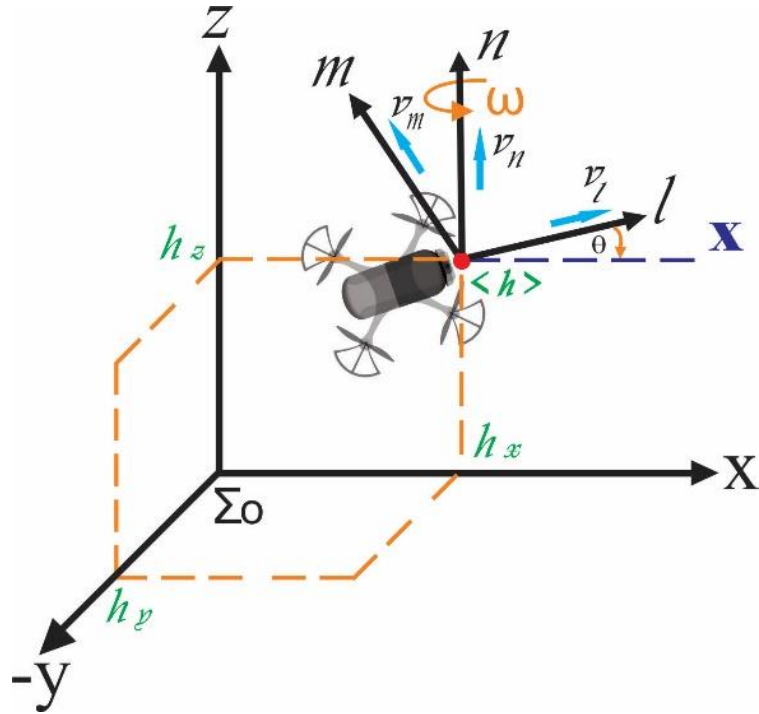
# Arquitectura Implementada



# AGENDA



## MODELO CINEMÁTICO DEL UAV



El modelo cinemático de un UAV da como resultado la ubicación del punto de interés en función de la ubicación del UAV.

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}_g(\theta) \mathbf{v}(t) \quad (1)$$

Donde,  $\dot{\mathbf{h}} = [\dot{h}_x \ \dot{h}_y \ \dot{h}_z \ \dot{\theta}]^T$

$$\mathbf{v} = [v_l \ v_m \ v_n \ \omega]$$

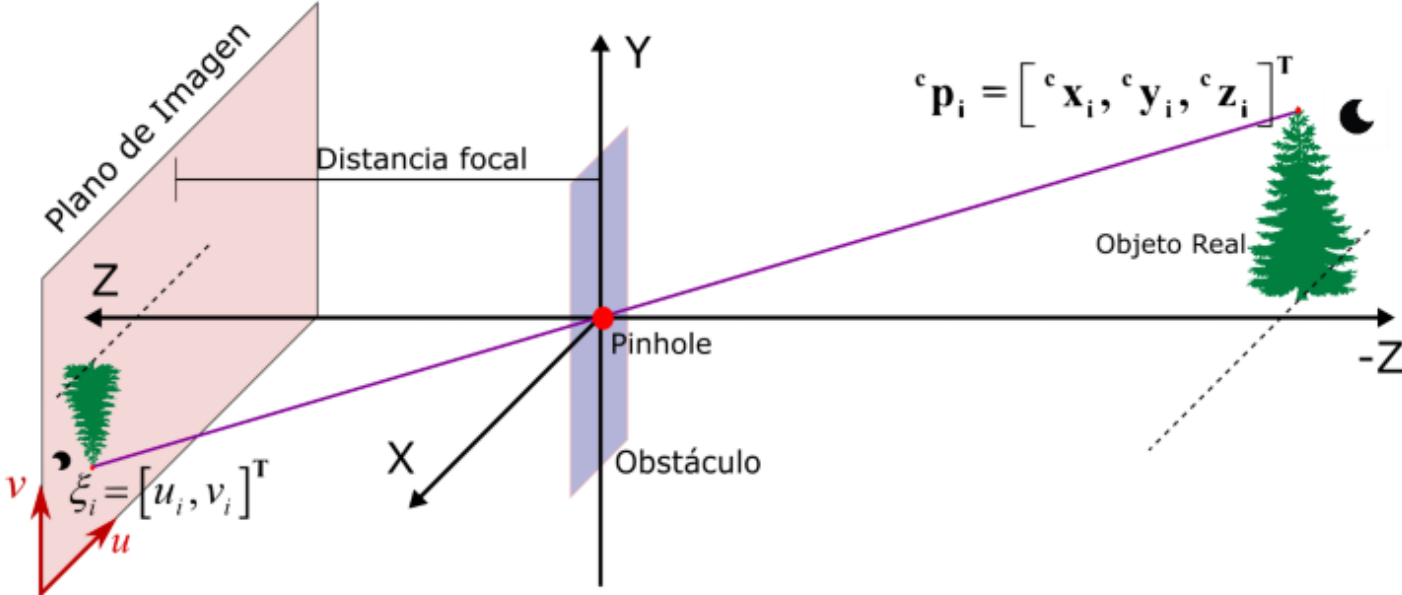
$$\dot{h}_x = v_l \cos \theta - v_m \sin \theta$$

$$\dot{h}_y = v_l \sin \theta + v_m \cos \theta$$

$$\dot{h}_z = v_n$$

$$\dot{\theta} = \omega$$

# SENSOR DE VISIÓN: MODELO DE PINHOLE



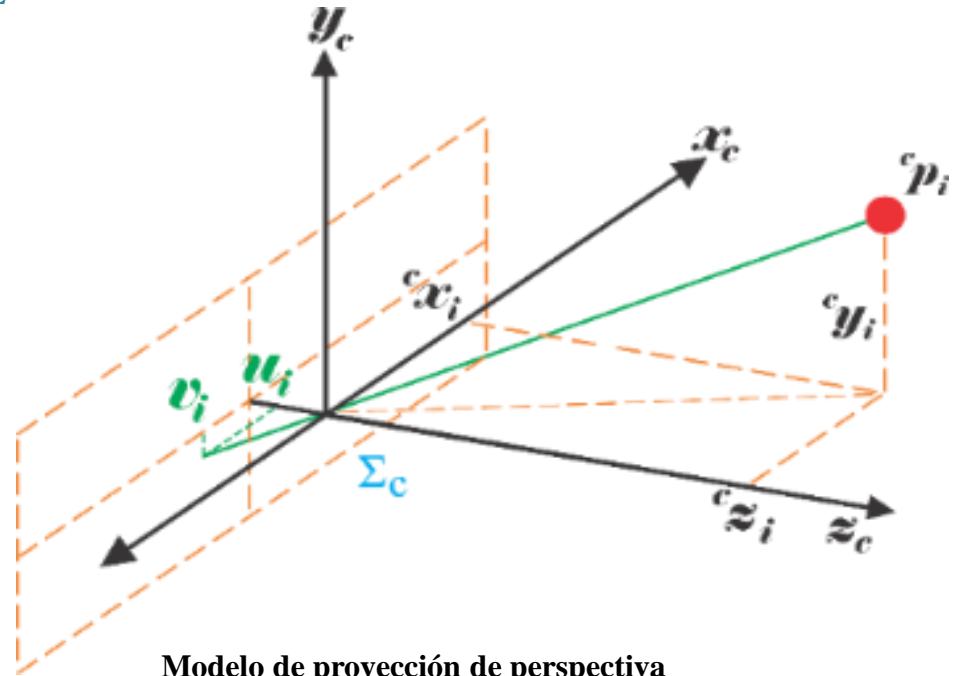
## SENSOR DE VISIÓN: MODELO DE PINHOLE

La proyección en perspectiva del punto característico  $i$  en el plano de la imagen nos da la coordenada del plano de la imagen

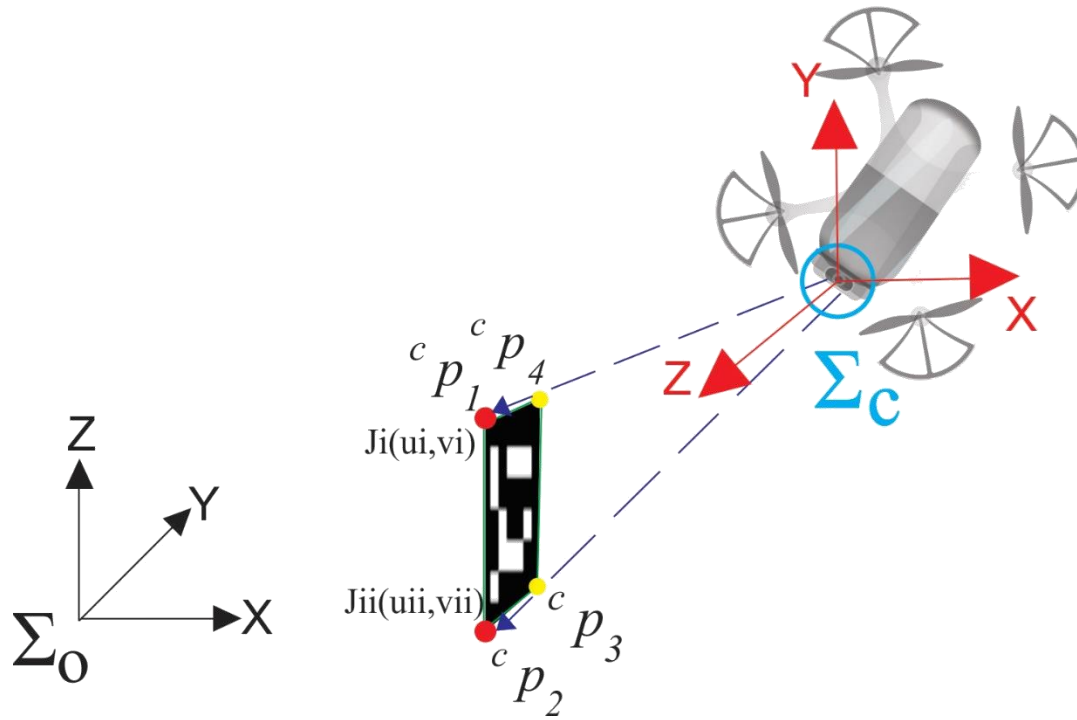
$$\xi_i = [u_i \quad v_i]^T \in \mathbb{R}^2$$

Como,

$$\xi_i \begin{pmatrix} {}^c x_i \\ {}^c y_i \\ {}^c z_i \end{pmatrix} = -\frac{f_c}{z_i} \begin{bmatrix} {}^c x_i \\ {}^c y_i \end{bmatrix} \quad (2)$$



# SISTEMAS DE REFERENCIA



## EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE IMAGEN

Modelo de proyección en perspectiva

$$\xi_i \left( {}^c x_i, {}^c y_i, {}^c z_i \right) = -\frac{f_c}{{}^c z_i} \begin{bmatrix} {}^c x_i \\ {}^c y_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\zeta_i = -\frac{f_c}{{}^c z_i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{{}^c x_i}{{}^c z_i} \\ 0 & 1 & -\frac{{}^c y_i}{{}^c z_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c \dot{x}_i \\ {}^c \dot{y}_i \\ {}^c \dot{z}_i \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} {}^c \dot{x}_i \\ {}^c \dot{y}_i \\ {}^c \dot{z}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & -{}^c z_i & {}^c y_i \\ 0 & -1 & 0 & {}^c z_i & 0 & -{}^c x_i \\ 0 & 0 & -1 & -{}^c y_i & {}^c x_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^c \mathbf{R}_w & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & {}^c \mathbf{R}_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^w \mathbf{v}_c \\ {}^w \boldsymbol{\omega}_c \end{bmatrix} + {}^c \mathbf{R}_w(\boldsymbol{\theta}) {}^w \dot{\mathbf{p}}_o$$

$$\begin{bmatrix} {}^w \mathbf{v}_c \\ {}^w \boldsymbol{\omega}_c \end{bmatrix} = \mathbf{J}_g(\boldsymbol{\theta}) \nu$$

Reemplazando en la expresión de  $\ddot{\xi}$

$$\mathbf{J}_{I_i}(\xi_i, {}^c z_i) = \begin{bmatrix} \frac{f_c}{{}^c z_i} & 0 & \frac{u_i}{{}^c z_i} & \frac{u_i v_i}{f_c} & \frac{f_c^2 + u_i^2}{f_c} & v_i \\ 0 & \frac{f_c}{{}^c z_i} & \frac{v_i}{{}^c z_i} & \frac{f_c^2 + v_i^2}{f_c} & \frac{u_i v_i}{f_c} & -u_i \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{O_i}(\boldsymbol{\theta}, {}^c \mathbf{p}_i) = \frac{f_c}{{}^c z_i} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{{}^c x_i}{{}^c z_i} \\ 0 & 1 & -\frac{{}^c y_i}{{}^c z_i} \end{bmatrix} {}^c \mathbf{R}_w$$

## EVOLUCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE IMAGEN

Resolviendo la Ecuaciones anteriores,  $\dot{\xi}_i$  puede expresarse en términos de la velocidad del UAV como

$$\dot{\xi}_i = \mathbf{J}_{I_i}(\xi_i, {}^c z_i) \begin{bmatrix} {}^c \mathbf{R}_w & 0 \\ 0 & {}^c \mathbf{R}_w \end{bmatrix} \mathbf{J}_g(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{v} - \mathbf{J}_{o_i}(\boldsymbol{\theta}, {}^c \mathbf{p}_i) {}^w \dot{\mathbf{p}}_i \quad (4)$$

Donde,

$\mathbf{J}_g(\boldsymbol{\theta}) \rightarrow$  Jacobiano Geométrico del UAV

$\mathbf{J}_{I_i}(\xi_i, {}^c z_i) \rightarrow$  Jacobiano de Imagen

$\mathbf{J}_{o_i}(\boldsymbol{\theta}, {}^c \mathbf{p}_i) {}^w \dot{\mathbf{p}}_i \rightarrow$  Jacobiano del Objeto con respect a un punto en el plano de imagen

## MÚLTIPLES CARACTERÍSTICAS DE IMAGEN

$$\dot{\xi} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}, \xi, {}^c z) \mathbf{v} - \mathbf{J}_o(\boldsymbol{\theta}, {}^c \mathbf{p}) {}^w \dot{\mathbf{p}} \quad (5)$$

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}, \xi, {}^c z) = \mathbf{J}_I(\xi, {}^c z) \begin{bmatrix} {}^c \mathbf{R}_w & 0 \\ 0 & {}^c \mathbf{R}_w \end{bmatrix} \mathbf{J}_g(\boldsymbol{\theta})$$

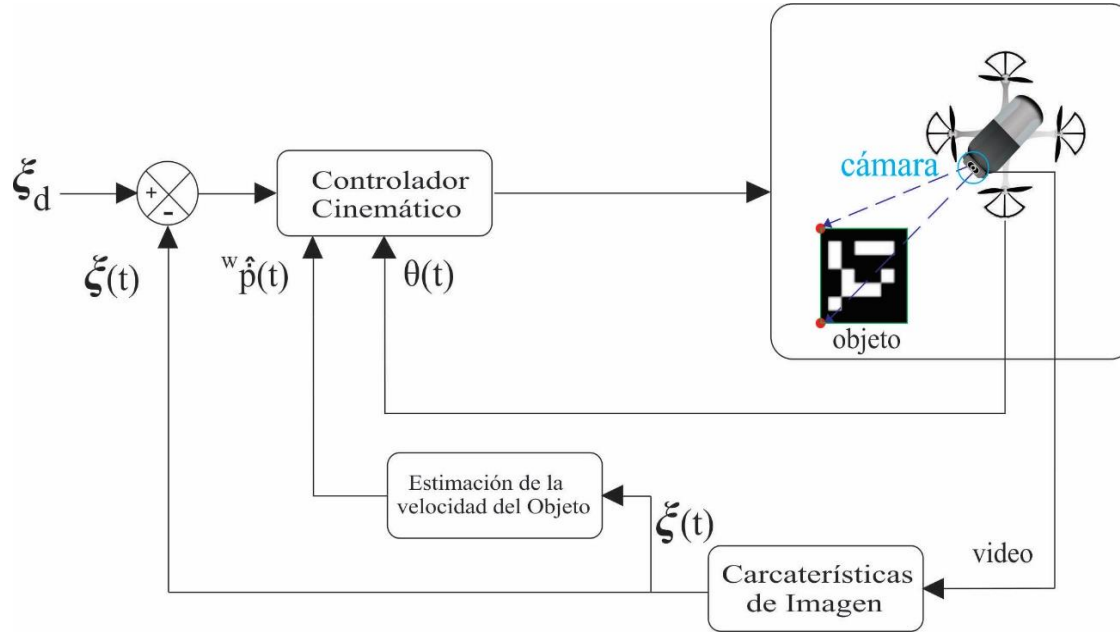
$$\mathbf{J}_I(\xi, {}^c z) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1([u_1 \ v_1]^T, {}^c z_1) \\ \vdots \\ \mathbf{J}_r([u_r \ v_r]^T, {}^c z_r) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_o(\boldsymbol{\theta}, {}^c \mathbf{p}) = \frac{f_c}{{}^c z_1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{{}^c x_1}{{}^c z_1} \\ 0 & 1 & -\frac{{}^c y_1}{{}^c z_1} \end{bmatrix} \dots \frac{f_c}{{}^c z_m} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{{}^c x_r}{{}^c z_r} \\ 0 & 1 & -\frac{{}^c y_r}{{}^c z_r} \end{bmatrix} \Bigg]^T {}^c \mathbf{R}_w$$

# AGENDA



# ESQUEMA DE CONTROL PROPUESTO



**Objetivo de Control:**

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\xi}(t) = 0 \quad \longrightarrow \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\xi}(\xi_d - \xi) = 0$$



Para ello se propone la siguiente ley de control para el control visual del UAV

$$\mathbf{v}_{ref} = \mathbf{J}^{\#} \left( \mathbf{J}_o{}^w \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{L}_K \tanh \left( \mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\boldsymbol{\xi}} \right) \right) \quad (6)$$

Donde,

$\mathbf{J}_o{}^w \dot{\mathbf{p}}$  → Representa la velocidad del objeto a seguir en el plano de imagen.

$\tilde{\boldsymbol{\xi}}$  → Vector de Errores de Control

Definido como:

$$\tilde{\boldsymbol{\xi}} = \boldsymbol{\xi}_d - \boldsymbol{\xi} \quad \mathbf{K} \in \mathbb{R}^{2r} \quad \mathbf{L}_K \in \mathbb{R}^{2r}$$

Por medio de la Ec.(6) y Ec.(5) se obtiene la ecuación para **Lazo Cerrado**.

$$\dot{\tilde{\xi}} = -\mathbf{L}_K \tanh\left(\mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\xi}\right) \quad (7)$$

Considerando la candidata de Lyapunov

$$V(\tilde{\xi}) = \frac{1}{2} \tilde{\xi}^T \tilde{\xi} \quad \xrightarrow{\text{derivando}} \quad \dot{V}(\tilde{\xi}) = -\tilde{\xi}^T \mathbf{L}_K \tanh\left(\mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\xi}\right) < 0$$

$$\boxed{\tilde{\xi}(t) \rightarrow \mathbf{0}}$$

Definimos los errores de estimación de velocidad del objeto en el plano de imagen

$$\varepsilon = \mathbf{J}\mathbf{o} \left( {}^w \hat{\mathbf{p}} - {}^w \dot{\mathbf{p}} \right) \quad (8)$$

Ecuación de Lazo cerrado, considerando (5), (6) y (8)

$$\dot{\tilde{\xi}} + \mathbf{L}_K \tanh(\mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\xi}) = \mathbf{J}\tilde{\mathbf{v}} + \varepsilon \quad (9)$$

Considerando la candidata de Lyapunov de nuevo

$$\dot{V}(\tilde{\xi}) = \tilde{\xi}^T (\mathbf{J}\tilde{\mathbf{v}} + \varepsilon) - \mathbf{L}_K \tanh(\mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\xi}) \quad \longrightarrow \quad \left| \tilde{\xi}^T \mathbf{L}_K \tanh(\mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\xi}) \right| > \left| \tilde{\xi}^T (\mathbf{J}\tilde{\mathbf{v}} + \varepsilon) \right|$$

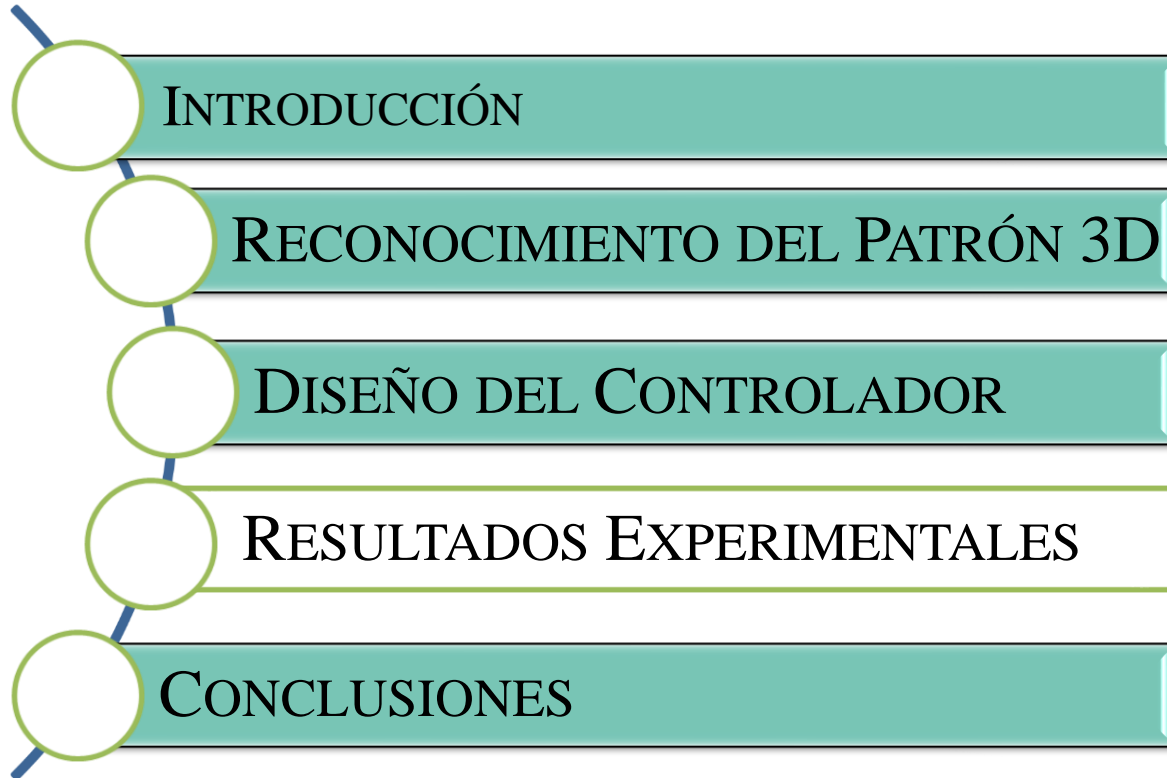
Saturación de errores de control:

$$\|\tilde{\xi}\| \leq \frac{\|\mathbf{J}\tilde{\mathbf{v}} + \varepsilon\|}{\lambda_{\min}(\mathbf{K})}$$

El sistema es robusto para errores de estimación de velocidad.

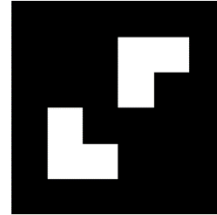


# AGENDA

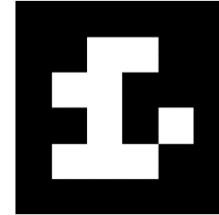


## MARCADOR ARUCO

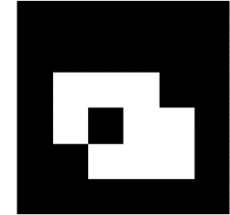
Detecta y decodifica patrones, que son pequeños códigos de barras 2D que se usan a menudo en realidad aumentada y robótica. El algoritmo de decodificación ArUco es capaz de localizar, decodificar y estimar la pose (ubicación y orientación en el espacio) de cualquier marcador ArUco en el campo de visión de la cámara.



ArUco 42



ArUco 18



ArUco 12



ArUco 27



ArUco 43



ArUco 5

<http://dx.doi.org/10.1016/j.patcog.2014.01.005>.



# RESULTADOS EXPERIMENTALES

The screenshot displays a software interface for drone control. At the top, a terminal window shows the following code:

```
control: ',(vel_y[- ]))  
control: ',(vel_z[- ]))  
control: ',(vel_r[- ]))
```

Below the terminal is a video feed showing a person in a red shirt holding a white target with a black symbol. The text "Control Automatico" is overlaid on the video. In the top-left corner of the video, the following numerical data is displayed:

- 1.0194 (blue)
- 1.3197 (green)
- 28.9792 (red)
- True (red)

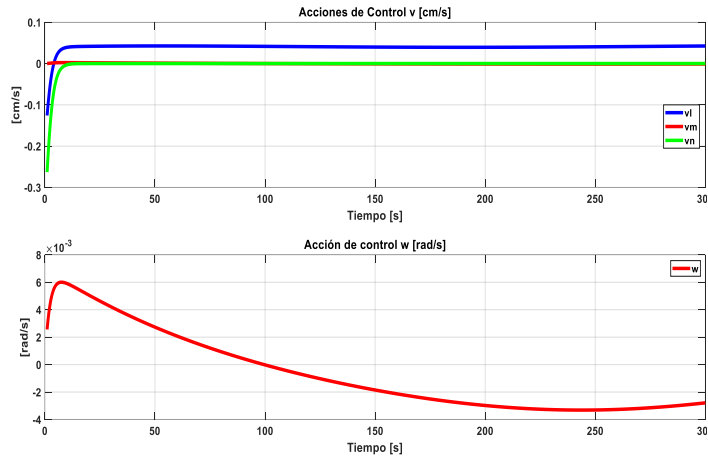
At the bottom-left of the video, the text "Vel\_X: 8" is visible. On the right side of the interface, a terminal window shows a list of control and response values:

```
control: -1  
control: 0.1  
response): r  
response): r  
-0.43138839  
0.01262818  
999]  
control: 9.2695  
control: -7.224  
control: -10.0  
control: 0.158  
response): rc 5  
response): rc 5  
response): rc 0  
response): rc 0  
response): rc 0
```

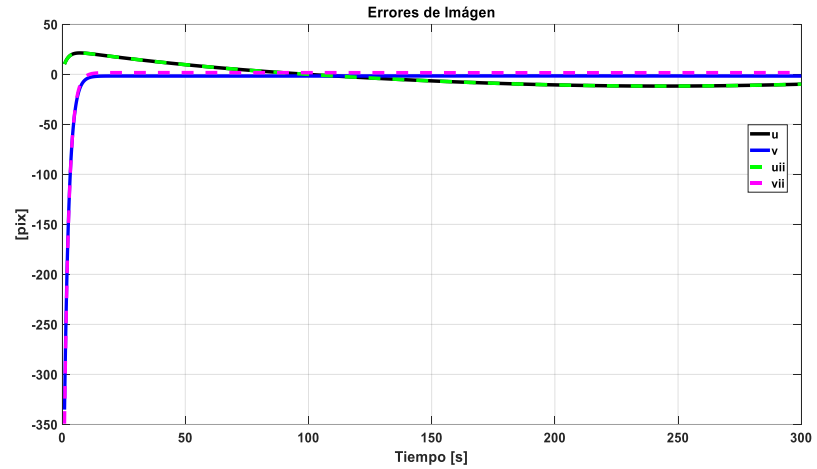
The bottom of the screenshot shows a Windows taskbar with various application icons.



# RESULTADOS EXPERIMENTALES

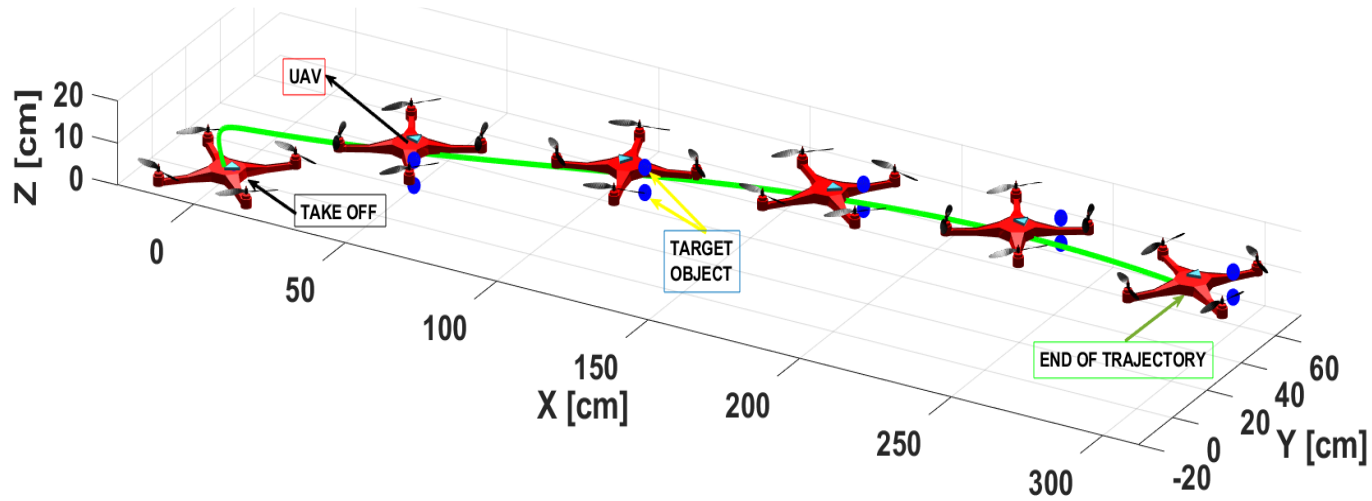


Acciones de control de velocidad lineal recibidas del UAV.



Evolución del error de control en función del tiempo.

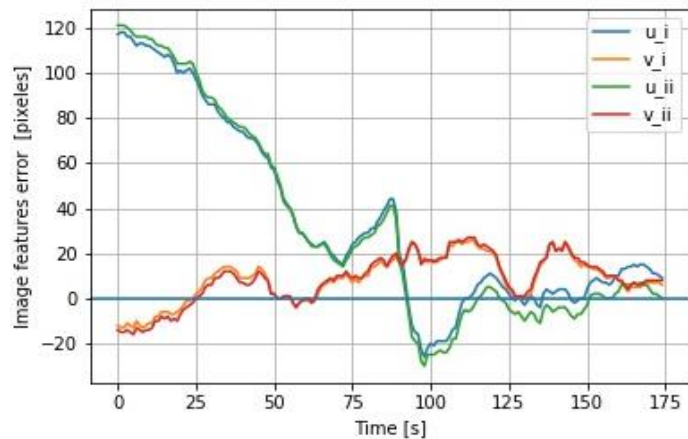
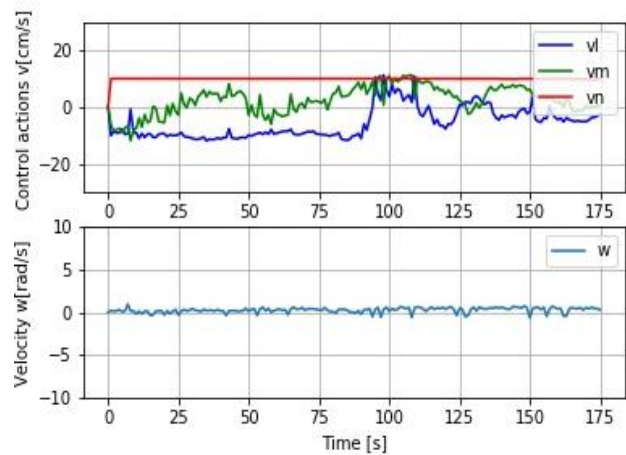
# RESULTADOS EXPERIMENTALES



Movimiento Estroboscopico del UAV y de los puntos de seguimiento del patron 3D.



# RESULTADOS EXPERIMENTALES

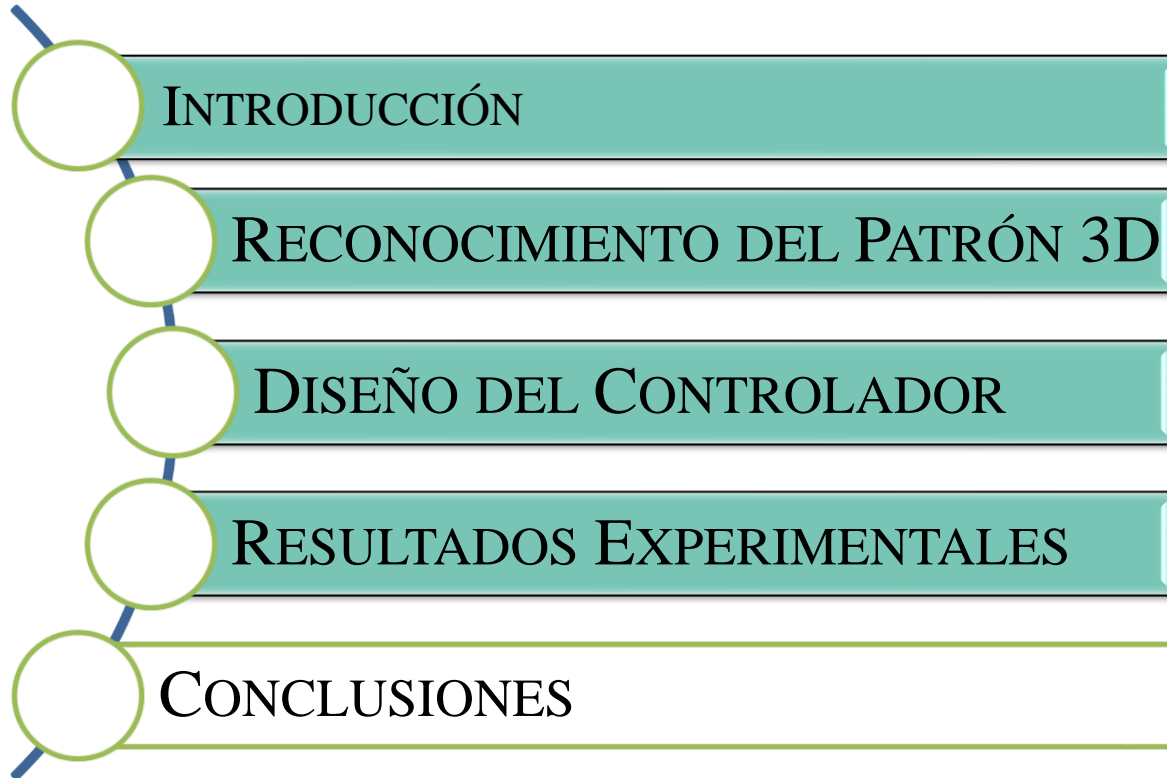


## RESULTADOS EXPERIMENTALES



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

# AGENDA





## CONCLUSIONES

Mediante el marcador ArUco de la biblioteca de OpenCV utilizando el software de código abierto Python se obtienen los puntos característicos del objeto respecto al sensor visual.

El control Servo Visual permite el seguimiento de patrón 3D a través de un UAV de manera autónoma.

El análisis de robustez determina que los errores de control son acotados, en función del error de estimación de la velocidad del objeto.

El periodo de muestreo del sistema de control servo visual determina la velocidad de seguimiento del UAV hacia el objeto 3D, es decir, mientras mas pequeño sea el periodo de muestreo mas rápido será el movimiento del UAV.



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



# UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

## DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

### INGENIERÍA MECATRÓNICA

**Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero Mecatrónico**

**CONTROL NO LINEAL CON REALIMENTACIÓN VISUAL PARA EL SEGUIMIENTO DE PATRONES 3D EN MOVIMIENTO A TRAVÉS DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO**

**AUTOR: GUEVARA ROMERO DANIEL DAVID**

**DIRECTOR: ING. ANDALUZ ORTÍZ VICTOR HUGO, PhD**

