

SISTEMAS DE CONTROL NO LINEAL APLICADO A VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS EN EL CAMPO ENERGÉTICO

Universidad Cono Sur de las Américas



Laboratorio de Sistemas de
Potencia y Control



Autor:

- Ing. Enrique Gabriel Paiva Galeano



Asunción, Paraguay. Agosto - 2019



INDICE

- INTRODUCCION
 - DEFINICIÓN
 - APLICACIONES DE LOS UAV
- SISTEMAS DE CONTROL
 - PID
 - CONTROLADORES LINEALES
 - CONTROLADORES NO LINEALES
- APLICACIONES EN EL PARAGUAY
 - CONTROLADOR UTILIZADO
 - SIMULACION DEMOSTRATIVA
- CONCLUSION



INDICE

- **INTRODUCCION**
 - DEFINICIÓN
 - APLICACIONES DE LOS UAV
- SISTEMAS DE CONTROL
 - PID
 - CONTROLADORES LINEALES
 - CONTROLADORES NO LINEALES
- APLICACIONES EN EL PARAGUAY
 - CONTROLADOR UTILIZADO
 - SIMULACION DEMOSTRATIVA
- CONCLUSION

INTRODUCCIÓN

Un vehículo aéreo no tripulado (VANT) es una aeronave que vuela sin tripulación, reutilizable, capaz de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido.

Hoy en día, el número de aplicaciones de estos vehículos ha crecido de forma exponencial, operando en ambientes interiores y exteriores.



INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones son:

- Agricultura de precisión
- Seguridad y vigilancia
- Fotogrametría aérea
- Filmaciones y fotografías
- Líneas de transmisión
- Inspección y monitoreo
- Generación de Energía



Agricultura de precisión



Agricultura de precisión



Water stressed zones.

Areas with Green had the highest index value, followed by Yellow and Red had the lowest.

Areas of planter skips and headland tracks

Drowned out spot

Machine tracks from wet application

INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones son:

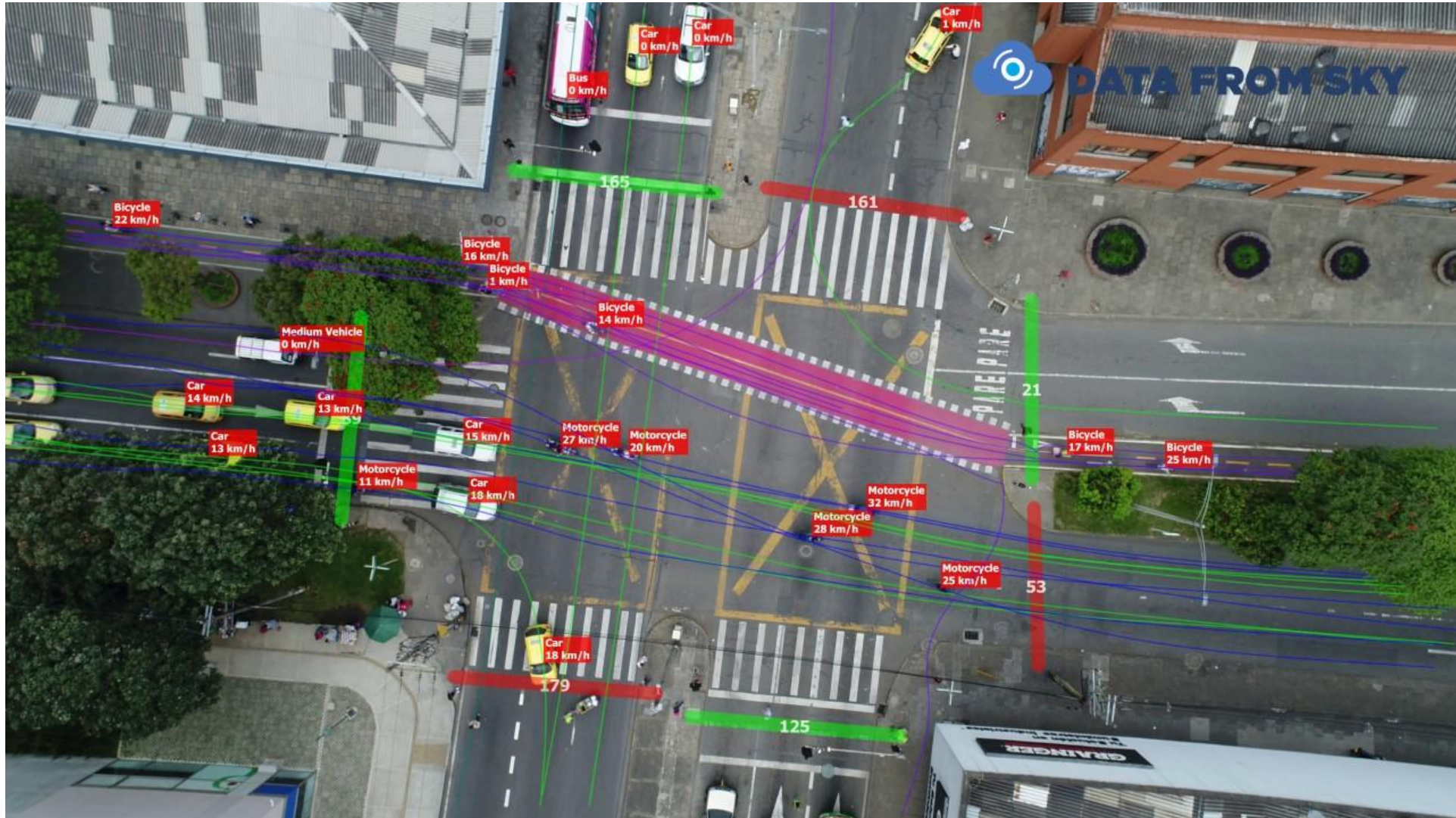
- Agricultura de precisión
- Seguridad y vigilancia
- Inspección y monitoreo
- Filmaciones y fotografías
- Fotogrametría aérea
- Líneas de transmisión
- Generación de Energía



Seguridad y vigilancia



Seguridad y vigilancia



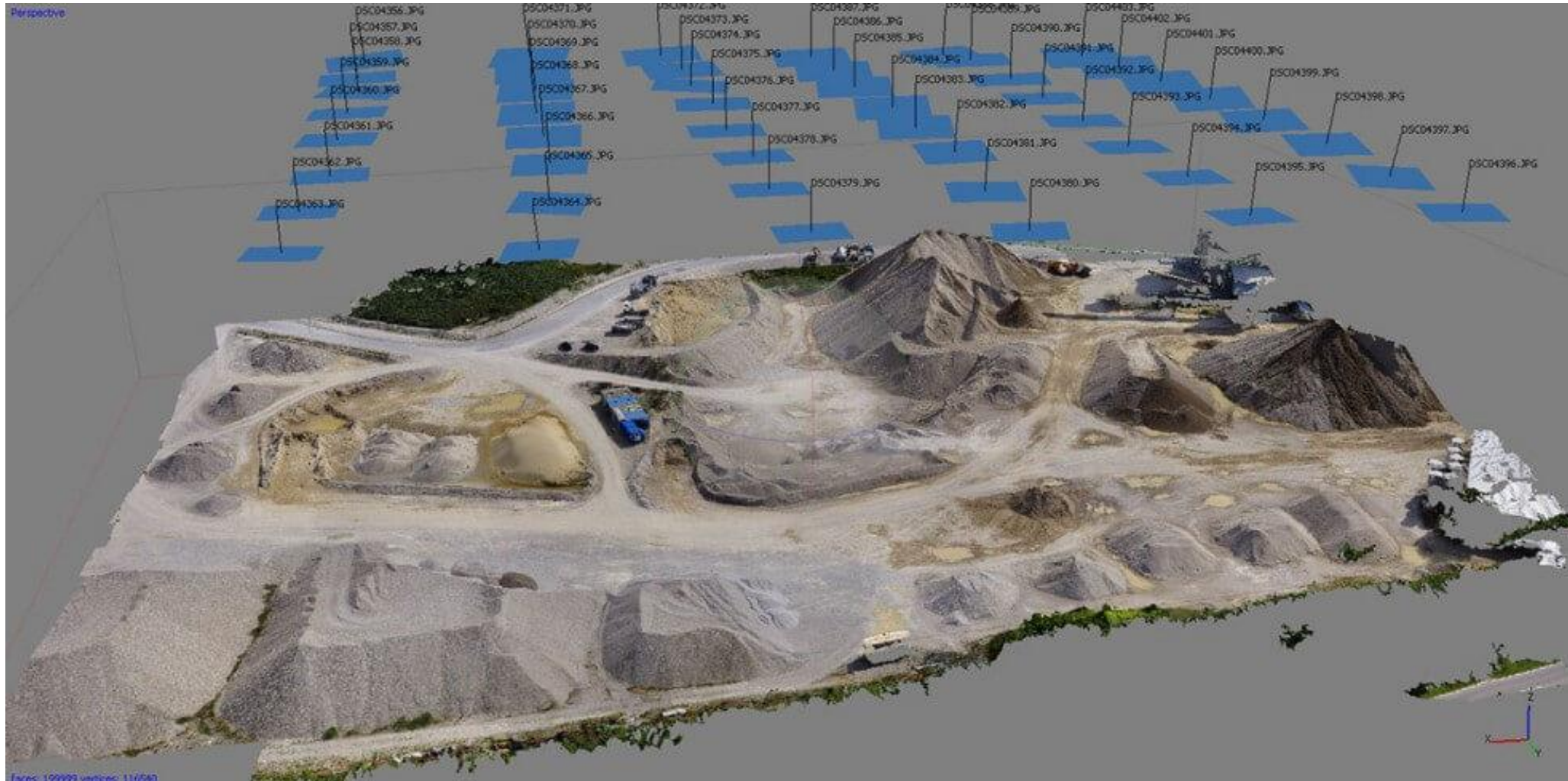
INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones son:

- Agricultura de precisión
- Seguridad y vigilancia
- **Fotogrametría aérea**
- Filmaciones y fotografías
- Líneas de transmisión
- Inspección y monitoreo
- Generación de Energía



Fotogrametría aérea



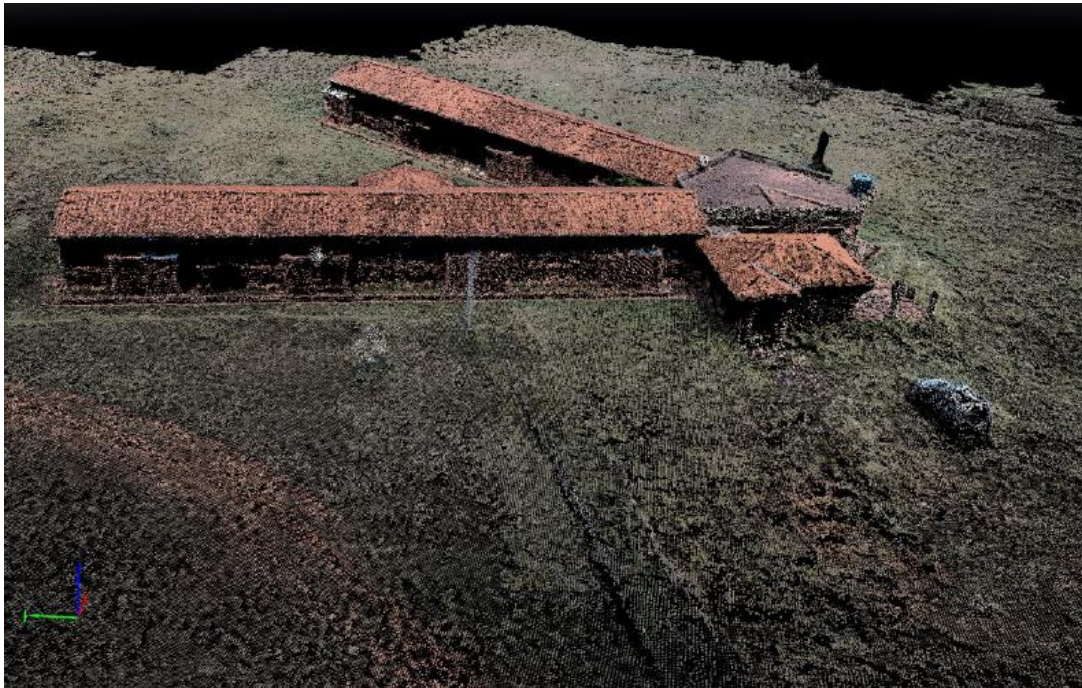
Fotogrametría aérea

Vehículos aéreos no tripulados (UAV) en aplicaciones de fotogrametría para el análisis planialtimétrico y cálculo de volumen. (PINV15-136) financiado por CONACYT.



Fotogrametría aérea

Vehículos aéreos no tripulados (UAV) en aplicaciones de fotogrametría para el análisis planialtimétrico y cálculo de volumen. (PINV15-136)



INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones son:

- Agricultura de precisión
- Seguridad y vigilancia
- Fotogrametría aérea
- **Filmaciones y fotografías**
- Líneas de transmisión
- Inspección y monitoreo
- Generación de Energía



INTRODUCCIÓN

Las aplicaciones son:

- Agricultura de precisión
- Seguridad y vigilancia
- Filmaciones y fotografías
- Fotogrametría aérea
- **Líneas de transmisión**
- Inspección y monitoreo
- Generación de Energía



INTRODUCCIÓN

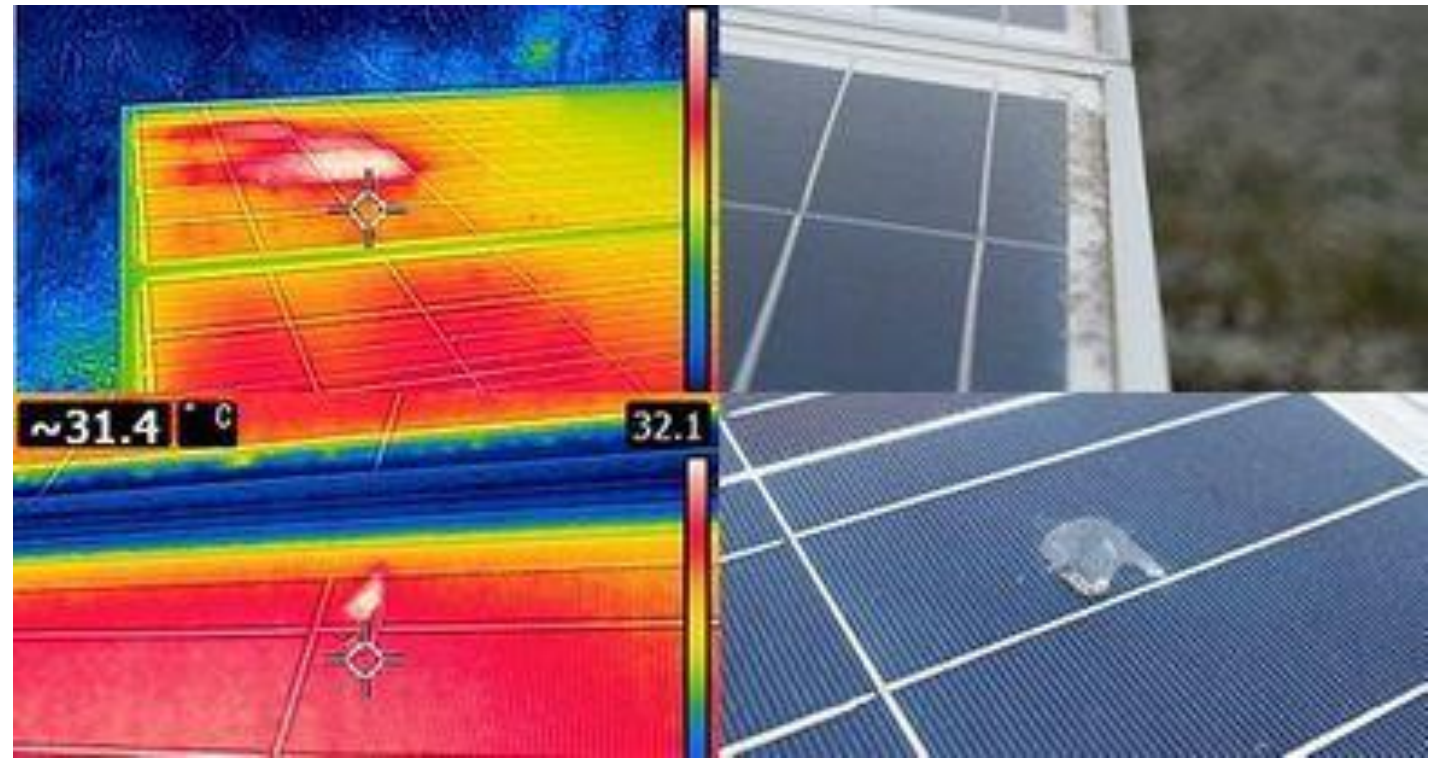
Las aplicaciones son:

- Agricultura de precisión
- Seguridad y vigilancia
- Filmaciones y fotografías
- Fotogrametría aérea
- Líneas de transmisión
- **Inspección y monitoreo**
- Generación de Energía



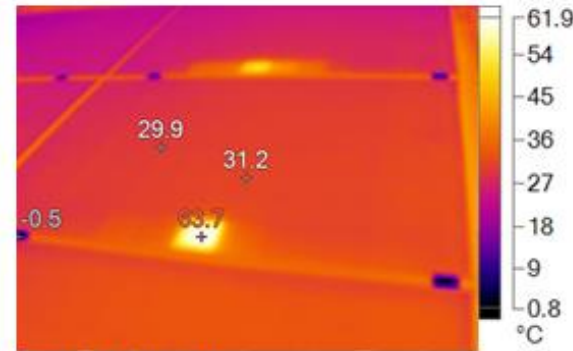
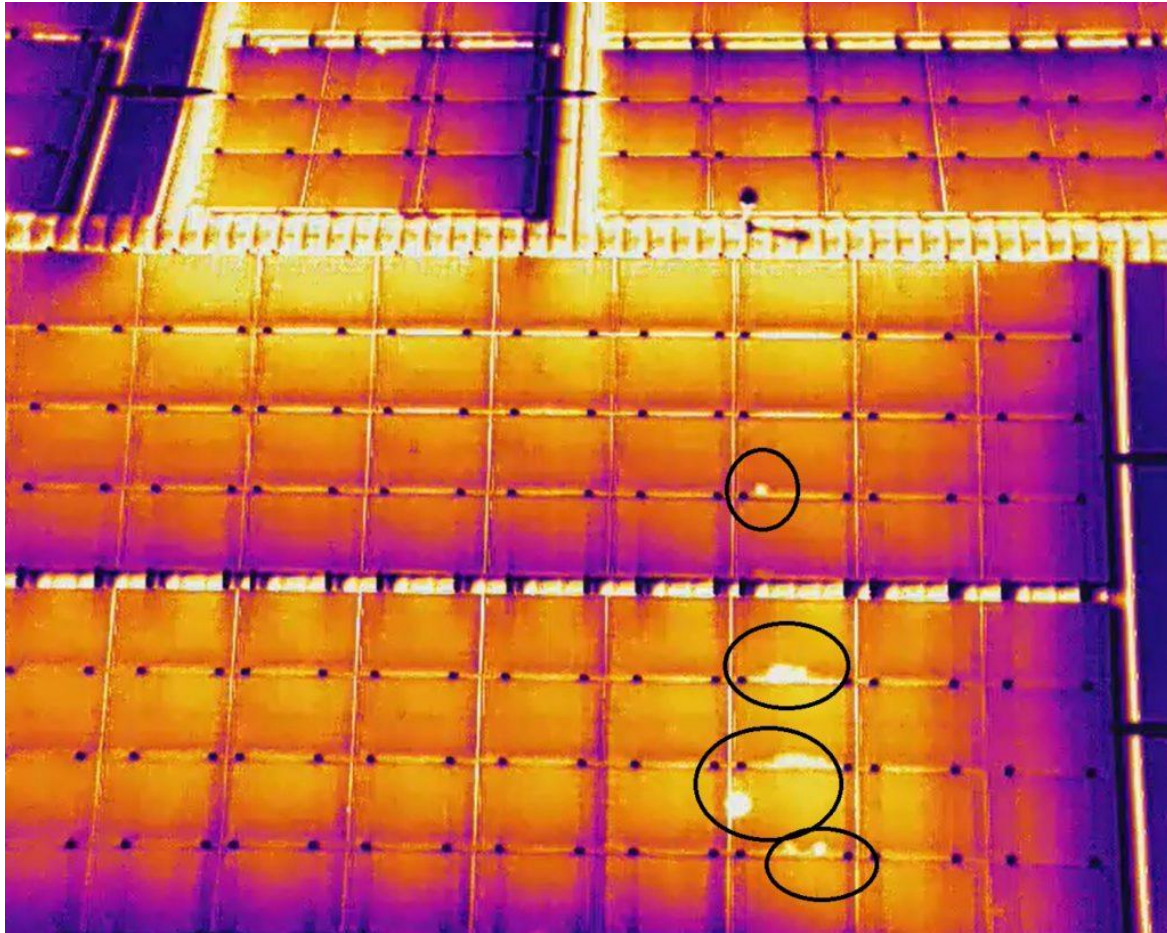
Inspección y monitoreo

Los puntos calientes o focos de calor son áreas de temperatura elevada que afectan solo una parte del panel solar. Son el resultado de una disminución localizada en la eficiencia, lo que resulta en una menor producción de energía y una aceleración de la degradación de los materiales en el área afectada.



Inspección y monitoreo

Los focos de calor son rara veces estables y generalmente se intensificarán hasta el fallo total del rendimiento del panel.



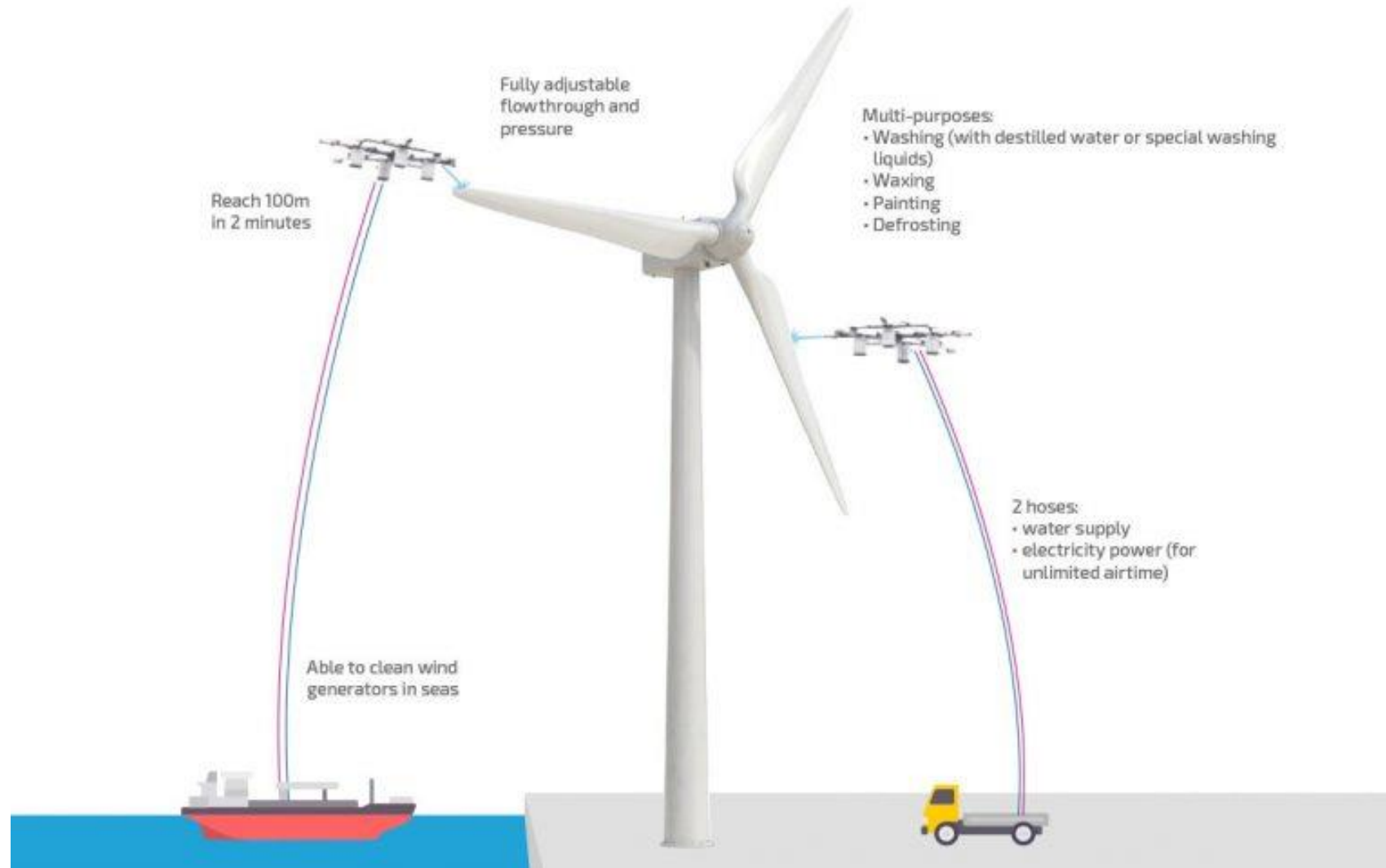
GDM00059.IS2

10/12/2017 12:45:33 PM

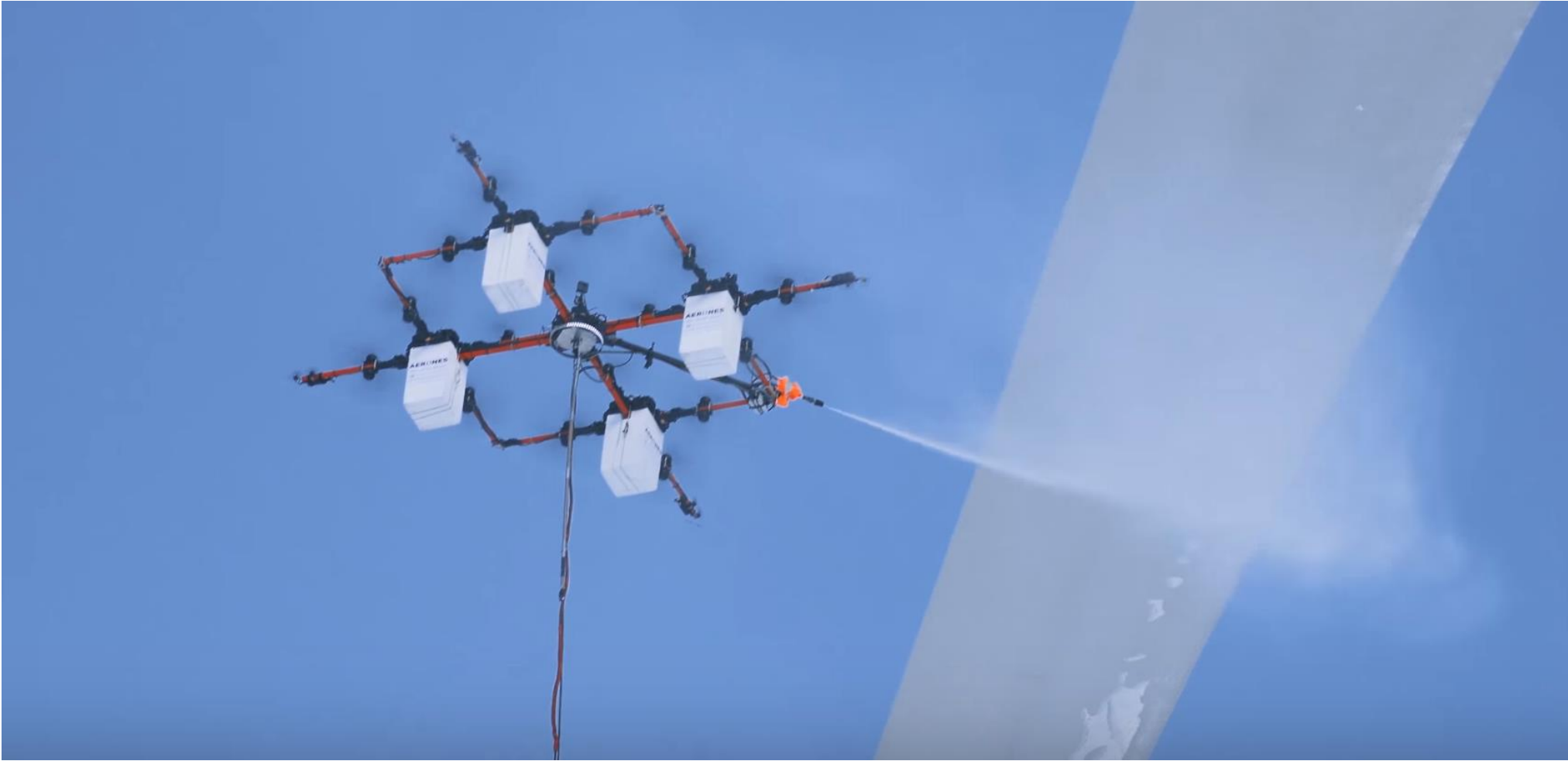


Visible Light Image

Inspección y monitoreo



Inspección y monitoreo



Inspección y monitoreo



INTRODUCCIÓN

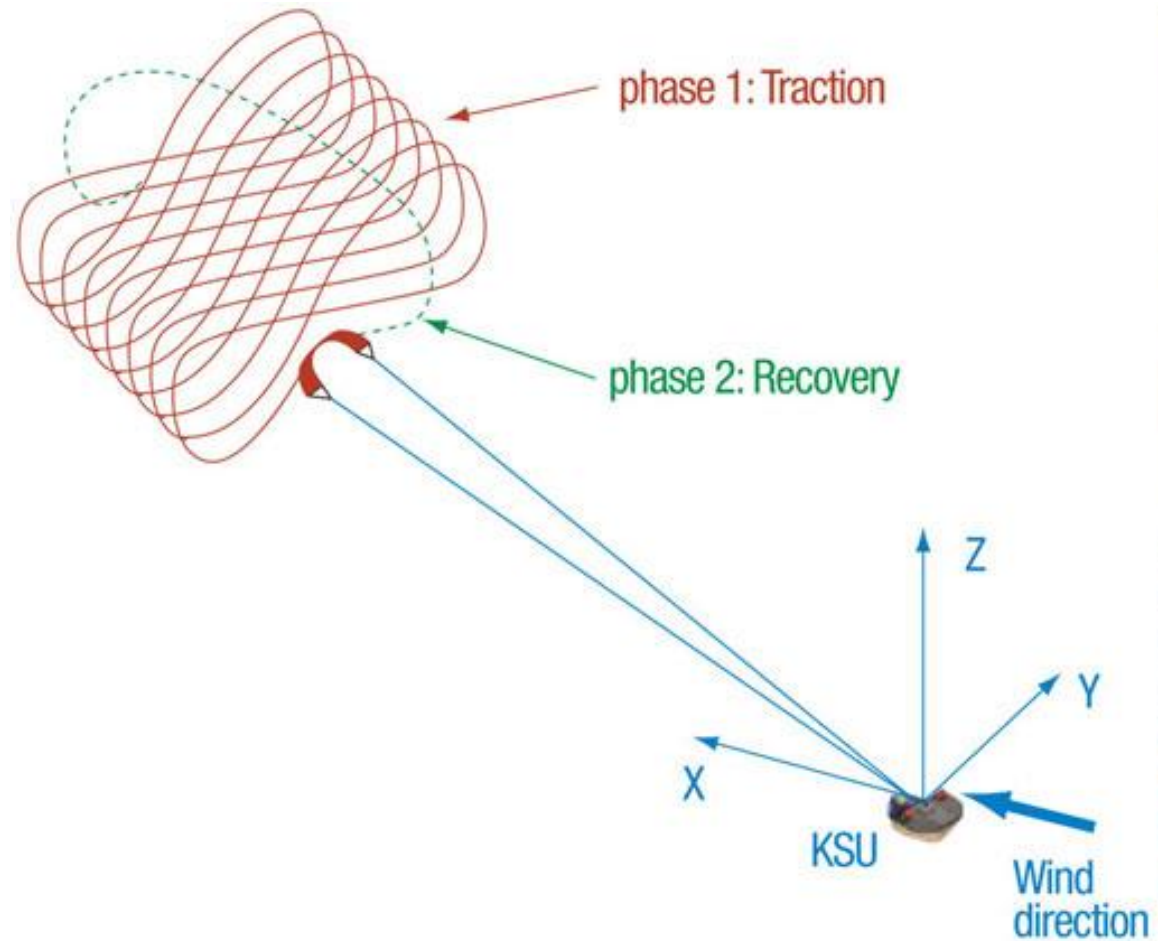
Las aplicaciones son:

- Agricultura de precisión
- Seguridad y vigilancia
- Filmaciones y fotografías
- Fotogrametría aérea
- Líneas de transmisión
- Inspección y monitoreo
- **Generación de Energía**



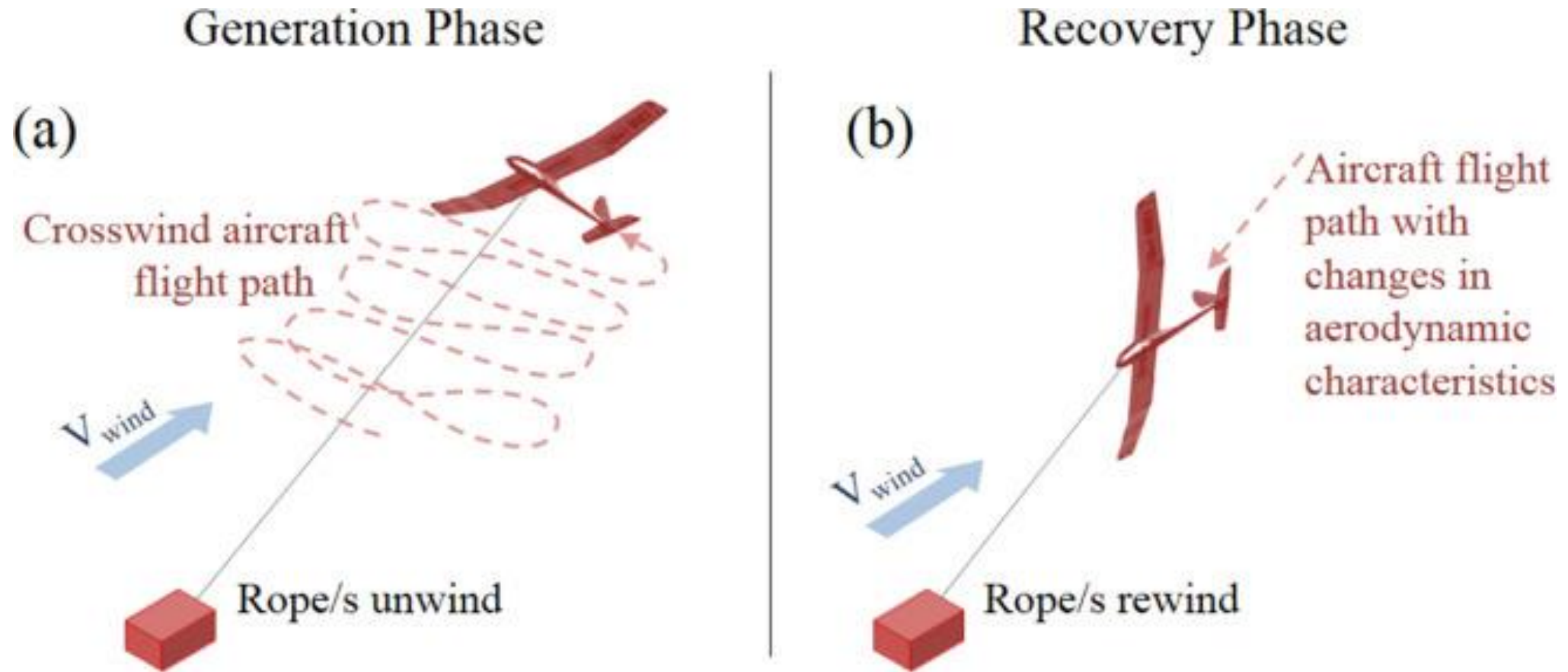
Generación de Energía

Airborne Wind Energy – Generación en Tierra



Generación de Energía

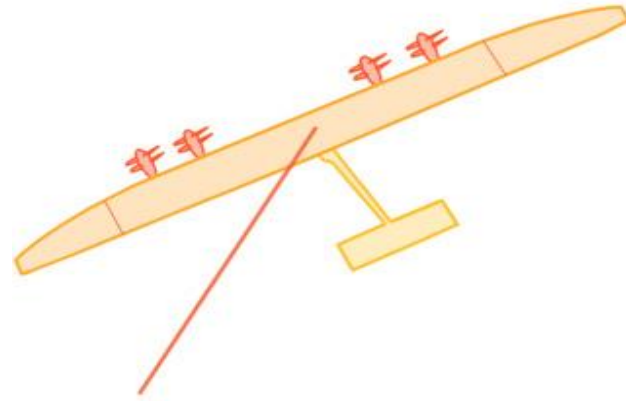
Airborne Wind Energy – Generación en Tierra



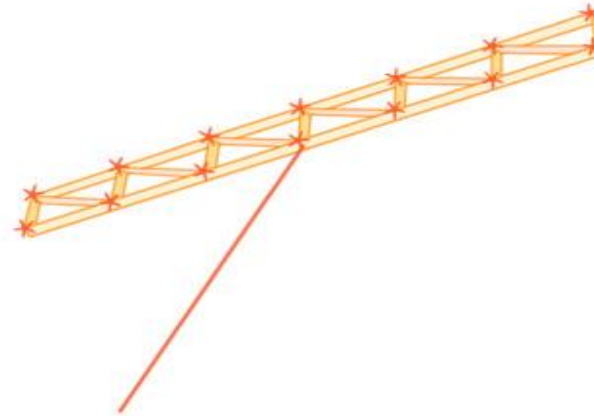
Generación de Energía

Airborne Wind Energy – Generación Aérea

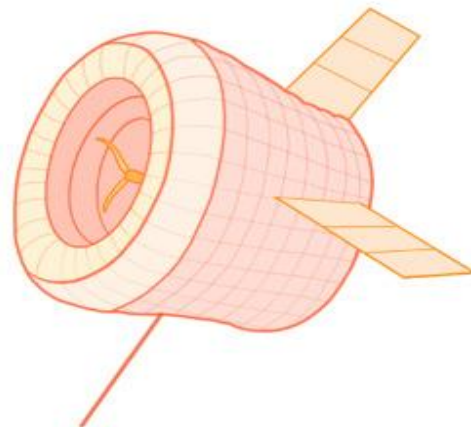
a) Plane with turbines



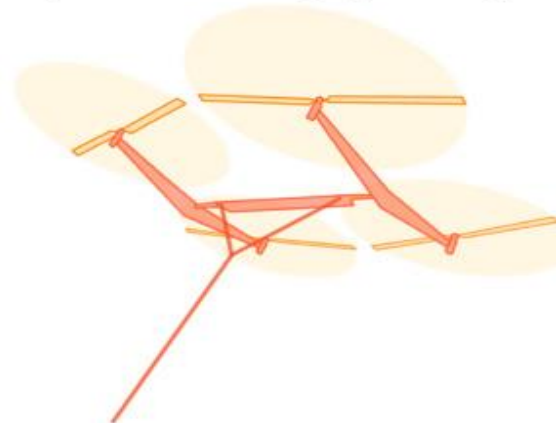
b) Multi-plane with turbines



c) Lifting balloon



d) Generating quadcopter



Generación de Energía

Altaeros Energy



Generación de Energía

Makani



Generación de Energía

1.6

DEMONSTRATING FLIGHT OFFSHORE

In August 2019, Makani demonstrated crosswind flight from a floating platform in Karmøy, Norway. Our successful test validated that our models match reality, bringing us a big step closer to commercialization.

Model: M600
Year Designed: 2019
Wingspan: 26 m
Rated Power: 600 kW



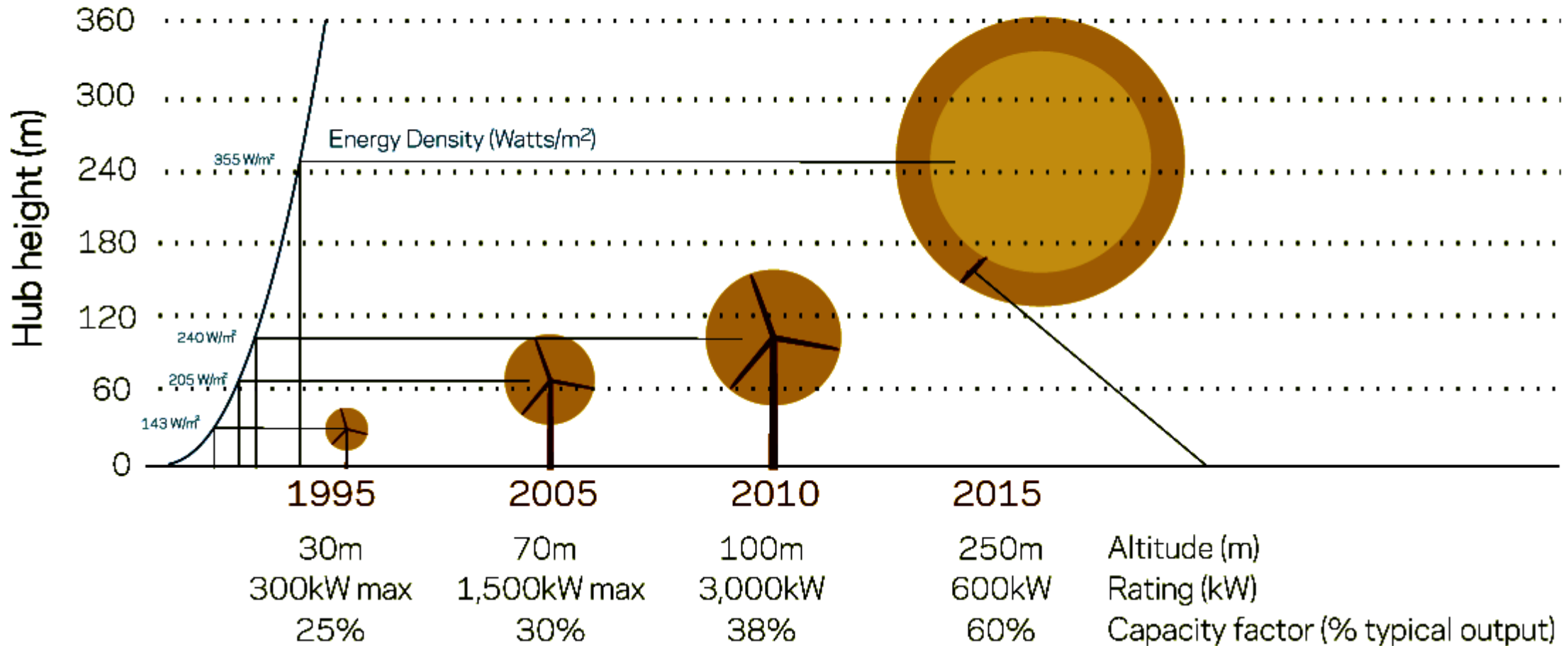
Generación de Energía

Airborne Wind Energy (Makani)



Generación de Energía

Representative turbine sizes





INDICE

Cada aplicación tiene su entorno de operación específico y el controlador se elige de acuerdo a ello.

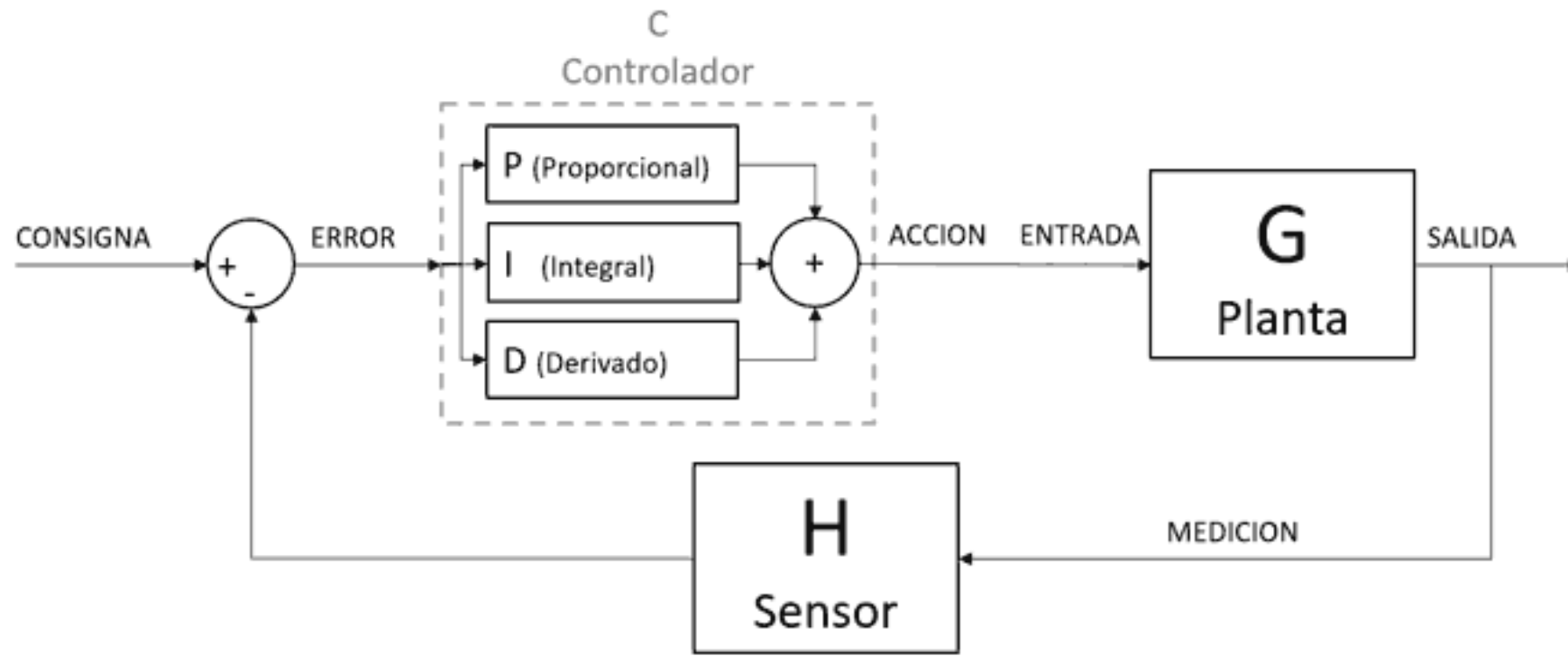


INDICE

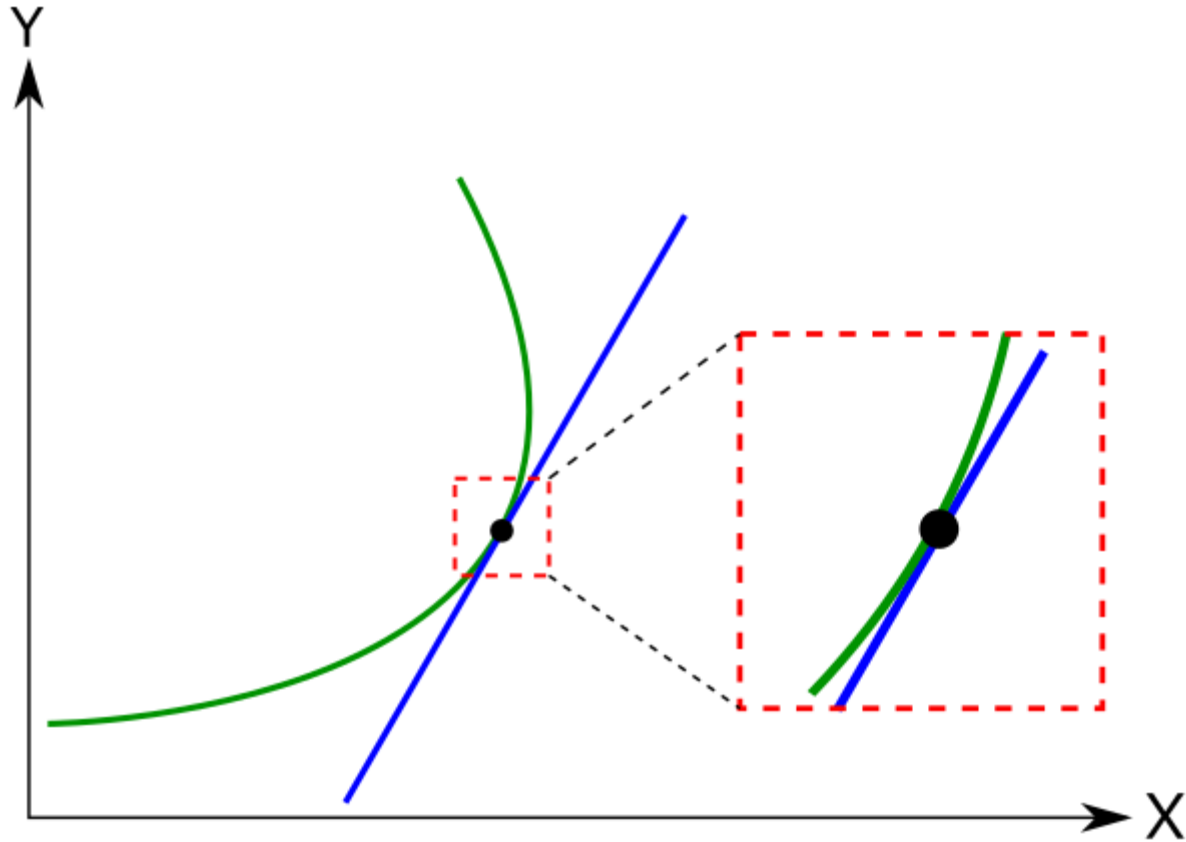
- INTRODUCCION
 - DEFINICIÓN
 - APLICACIONES DE LOS UAV
- **SISTEMAS DE CONTROL**
 - PID
 - CONTROLADORES LINEALES
 - CONTROLADORES NO LINEALES
- APLICACIONES EN EL PARAGUAY
 - CONTROLADOR UTILIZADO
 - SIMULACION DEMOSTRATIVA
- CONCLUSION

PID

$$u = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt}$$

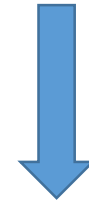


CONTROLADORES LINEALES



$$\dot{x} = x^2 + 4xy + 6y^2$$

Linealizando



$$\dot{x} = 30x + 72y - 243$$

Controladores:

- LQR
- Ubicación arbitraria de polos
- H_inf

Sistemas de Control No Lineal

$$\ddot{X} = \frac{\tau_1}{m} (\sin(\phi) \sin(\psi) + \cos(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi)) \quad (1)$$

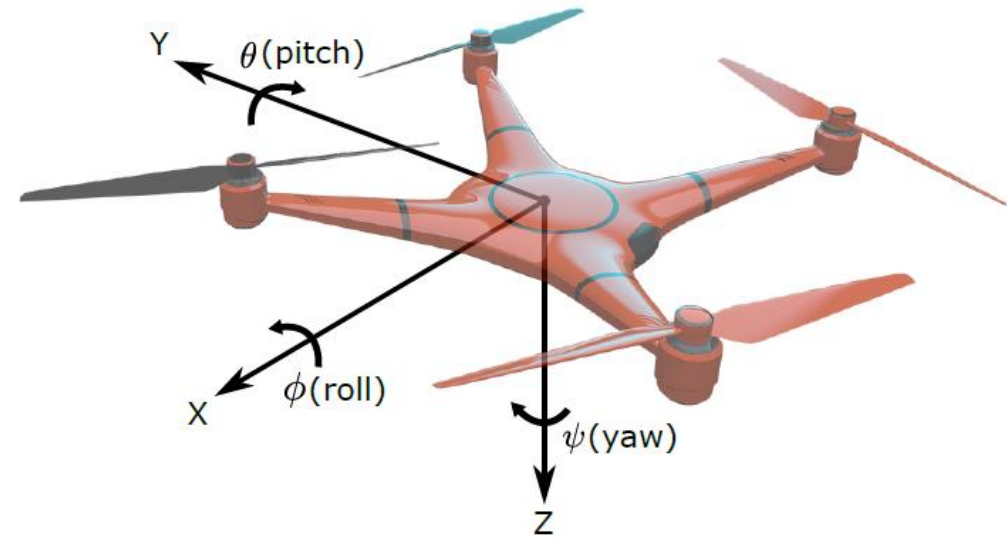
$$\ddot{Y} = \frac{\tau_1}{m} (\cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) - \sin(\phi) \cos(\psi)) \quad (2)$$

$$\ddot{Z} = \frac{\tau_1}{m} (\cos(\phi) \cos(\theta)) + g \quad (3)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{\tau_\phi}{J_x} + \frac{\tau_\theta}{J_y} \sin(\phi) \tan(\theta) + \frac{\tau_\psi}{J_z} \cos(\phi) \tan(\theta) \quad (4)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\tau_\theta}{J_y} \cos(\phi) - \frac{\tau_\psi}{J_z} \sin(\phi) \quad (5)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{\tau_\theta}{J_y} \sin(\phi) \sec(\theta) + \frac{\tau_\psi}{J_z} \cos(\phi) \sec(\theta) \quad (6)$$



Sistemas de Control No Lineal

- ✓ Feedback Linearization
- ✓ BackStepping
- ✓ Sliding Mode → Algoritmo Super-Twisting Modificado

Comparado a los demás algoritmos:

- Facilidad de calibración de sus parámetros.
- Facilidad de implementación.

APLICACIONES ESPECÍFICAS

Condiciones que debe cumplir el algoritmo de control	Control Clásico (PID)	Control Lineal	Control No Lineal
Robusto frente a perturbaciones. (Como el viento y golpes)	✗	✗	✓
Manejo de las dinámicas no modeladas. (Cambio de Motores, Sensores, Ruido eléctrico)	✗	✓	✓
Estabilidad frente a incertidumbre del sistema. (Como las variaciones de inercia y masa respecto al tiempo)	✗	✗	✓



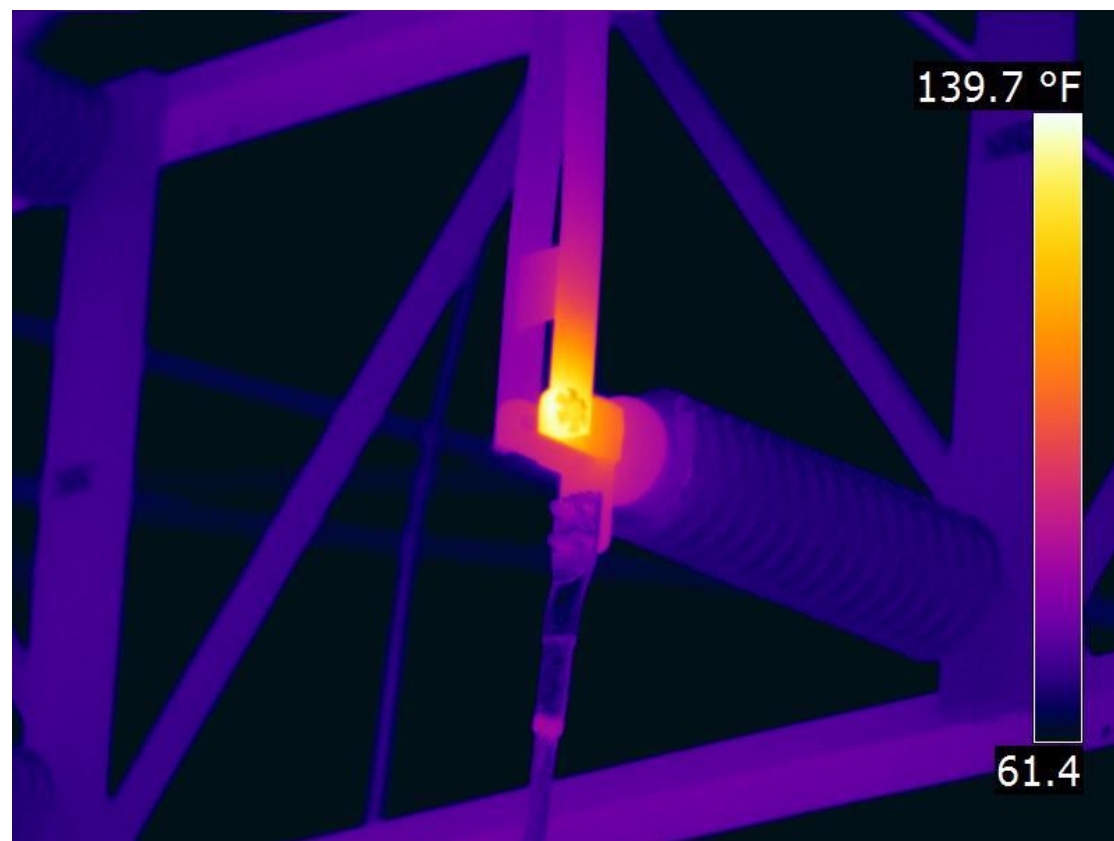
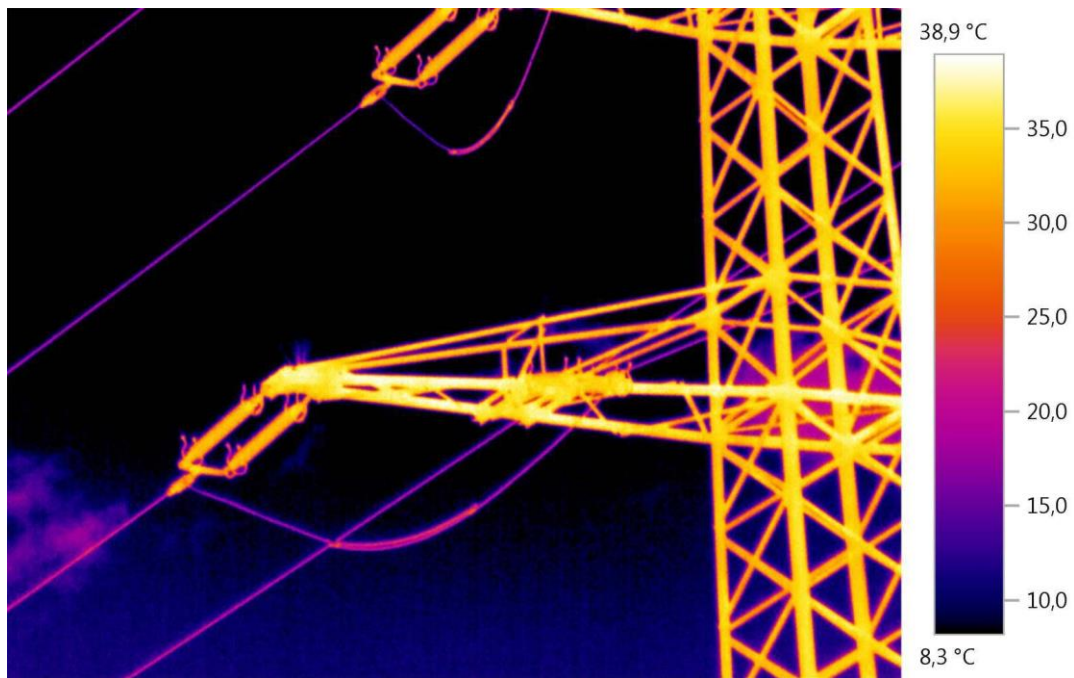
INDICE

- INTRODUCCION
 - DEFINICIÓN
 - APLICACIONES DE LOS UAV
- SISTEMAS DE CONTROL
 - PID
 - CONTROLADORES LINEALES
 - CONTROLADORES NO LINEALES
- **APLICACIONES EN EL SECTOR ENERGÉTICO PARAGUAYO**
 - CONTROLADOR UTILIZADO
 - SIMULACION DEMOSTRATIVA
- CONCLUSIONES

Inspección y Monitoreo de Torres de Alta Tensión



Inspección y Monitoreo de Torres de Alta Tensión



Inspección y Monitoreo de Torres de Alta Tensión



APLICACIONES EN EL SECTOR ENERGÉTICO PARAGUAYO

Situación actual del Paraguay en construcción de líneas de alta tensión



NACIONALES

Paraguay precisa de 4 líneas de 500 kV para usar toda su energía de Itaipú

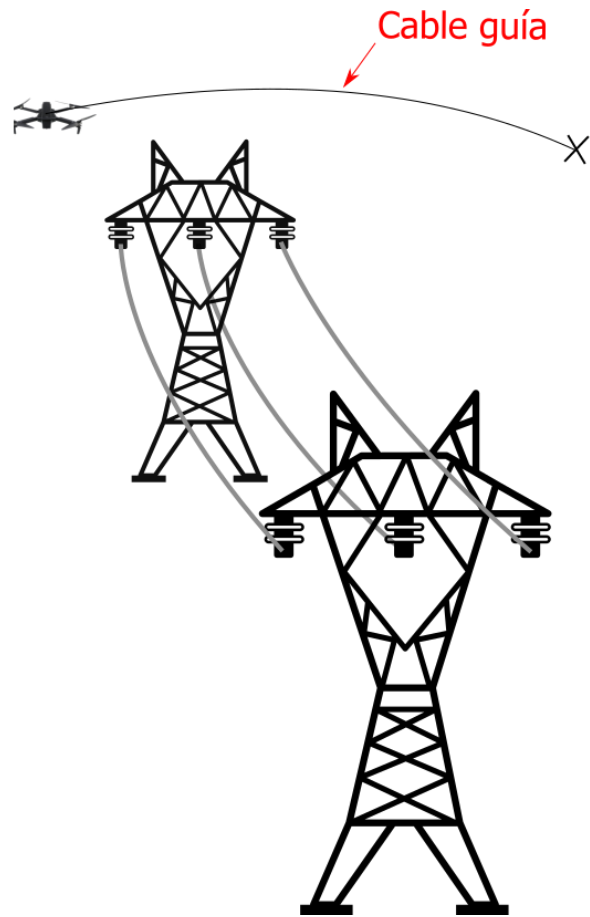
05 DE ENERO DE 2019

El presidente de la Administración Nacional de Electricidad (ANDE), Pedro Ferreira, aseguró que el Paraguay necesita cuatro líneas de 500KV para utilizar toda la energía que le corresponde de la producción de Itaipú. El país cuenta actualmente con uno solo.

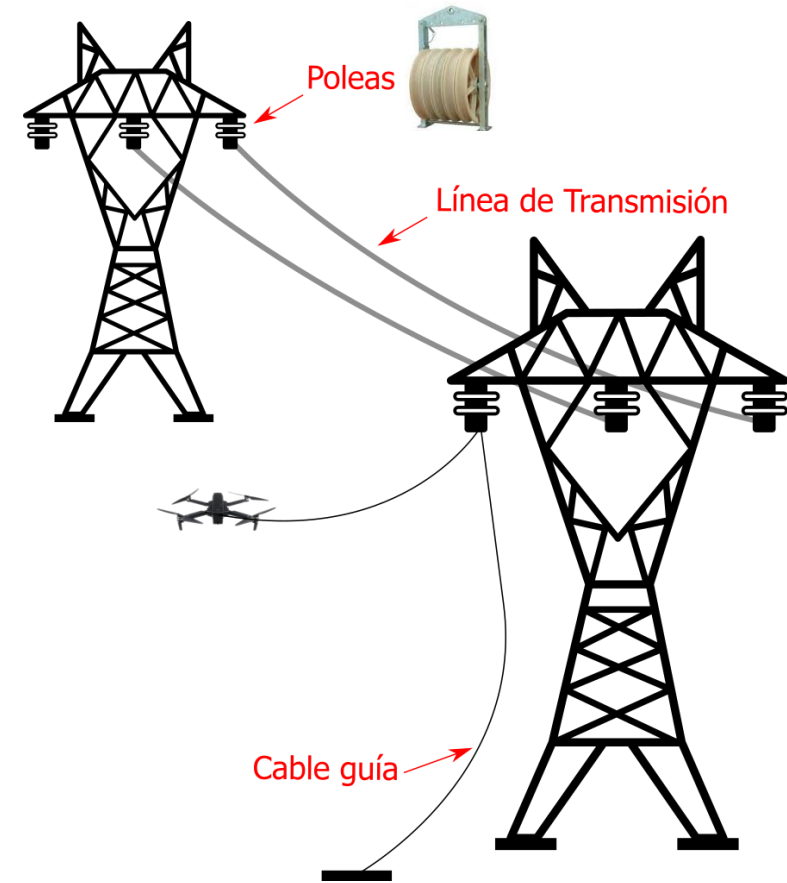
Esta última aplicación es de especial interés debido a que en la actualidad, Paraguay está en la etapa de ampliación de las redes de transmisión de alta tensión para acceder a la totalidad de la energía que le corresponde de las hidroeléctricas y la extensión de la energía eléctrica a lugares remotos de difícil acceso.

APLICACIONES EN EL SECTOR ENERGÉTICO PARAGUAYO

CRUCES DE LINEAS

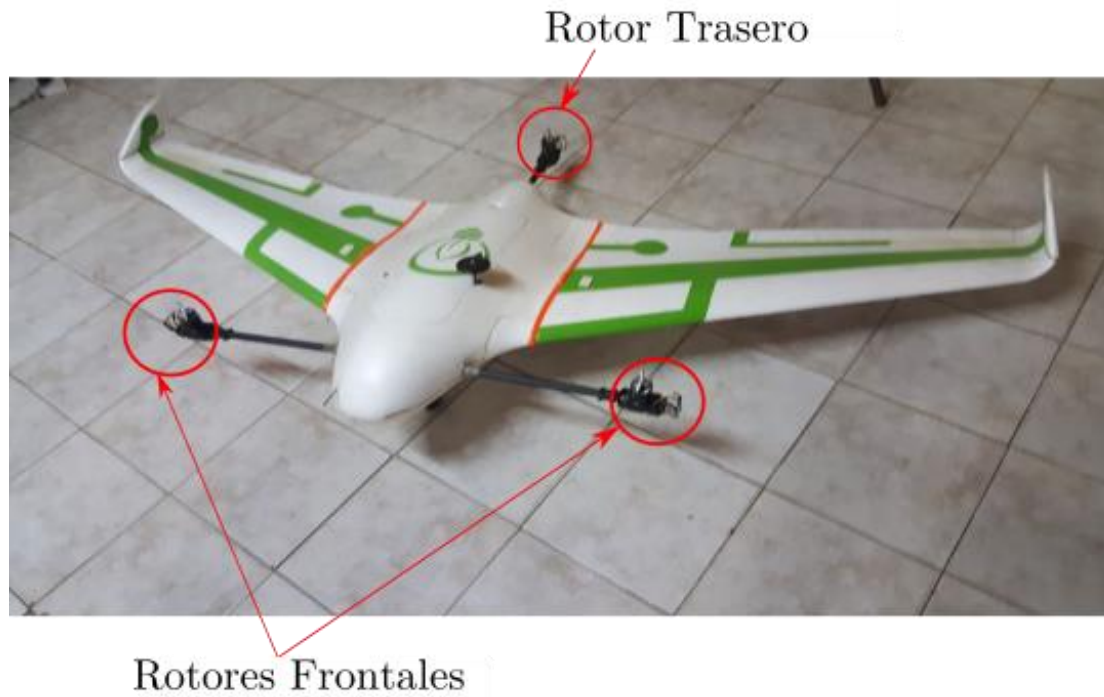


TENDIDO DE LINEAS

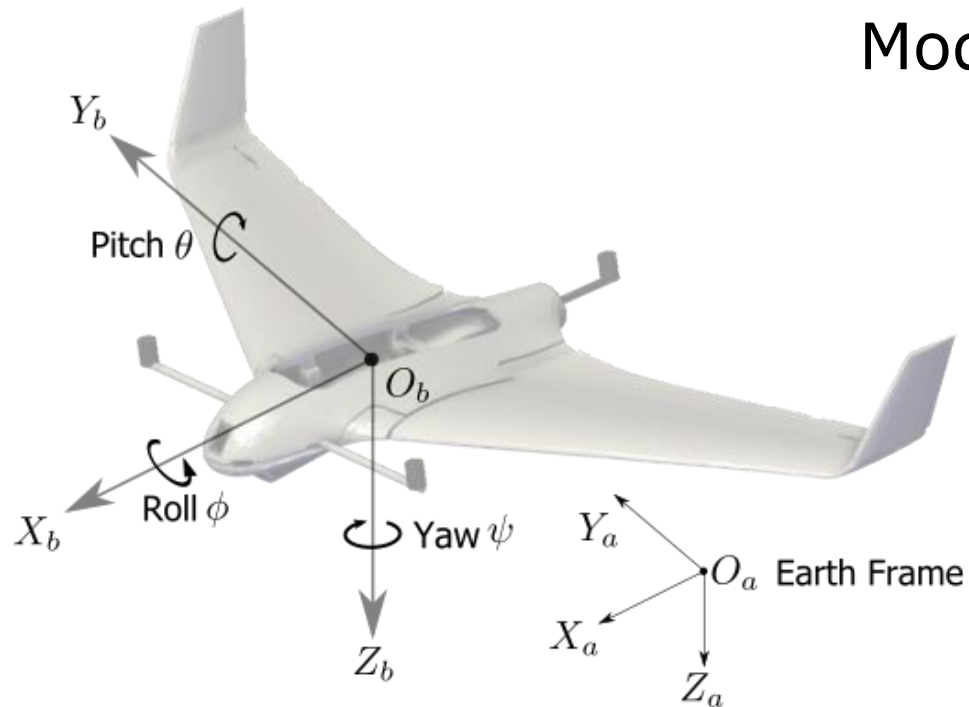


MATERIALES Y MÉTODOS

VANT Disponibles



MODELO MATEMÁTICO



Modelo dinámico simplificado de la posición

$$\ddot{X} = [\cos(\phi) \sin(\theta) \cos(\psi) + \sin(\phi) \sin(\psi)] \frac{\tau_1}{m}$$

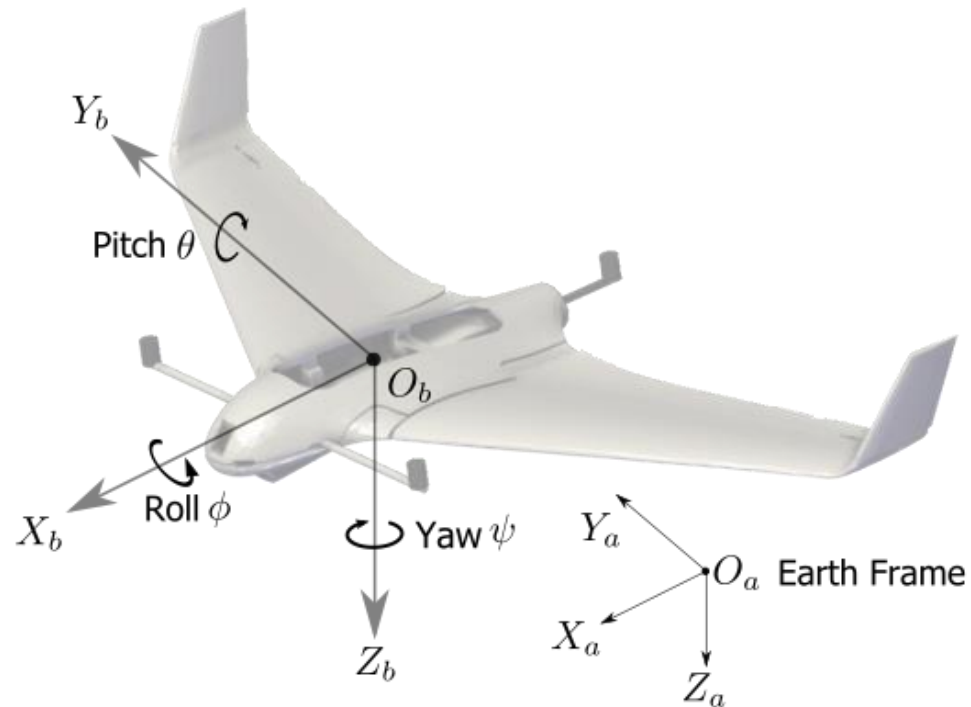
$$\ddot{Y} = [\cos(\phi) \sin(\theta) \sin(\psi) - \sin(\phi) \cos(\psi)] \frac{\tau_1}{m}$$

$$\ddot{Z} = g + [\cos(\phi) \cos(\theta)] \frac{\tau_1}{m}$$

MODELO MATEMÁTICO

Modelo dinámico completo de la actitud

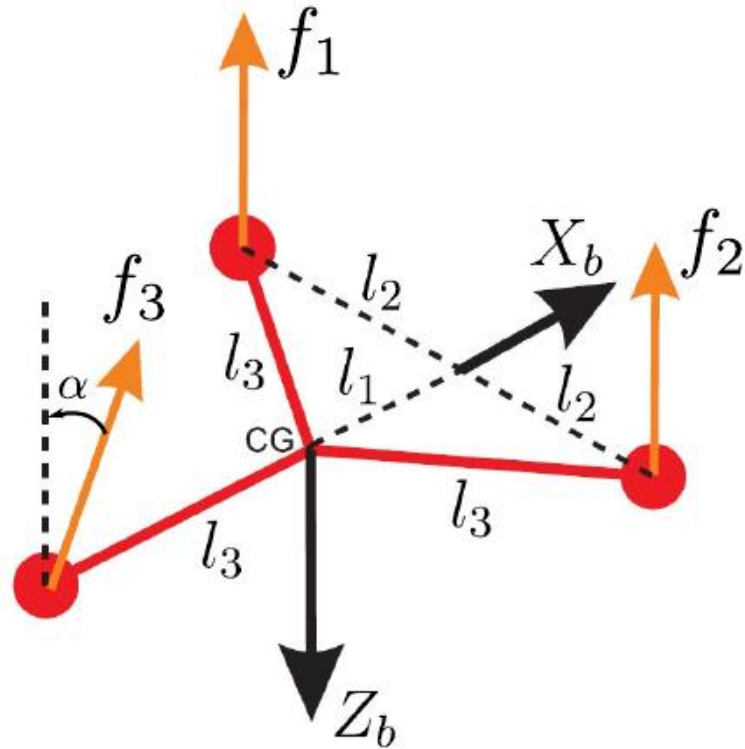
$$\ddot{\Theta} = (J W)^{-1} \left(\tau - J \dot{W} \dot{\Theta} - (W \dot{\Theta} \times J W \dot{\Theta}) \right)$$



$$\Theta = [\phi, \theta, \psi]^T \longleftarrow \text{Ángulos de Euler}$$

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & \cos(\theta) \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\theta) \cos(\phi) \end{bmatrix}$$

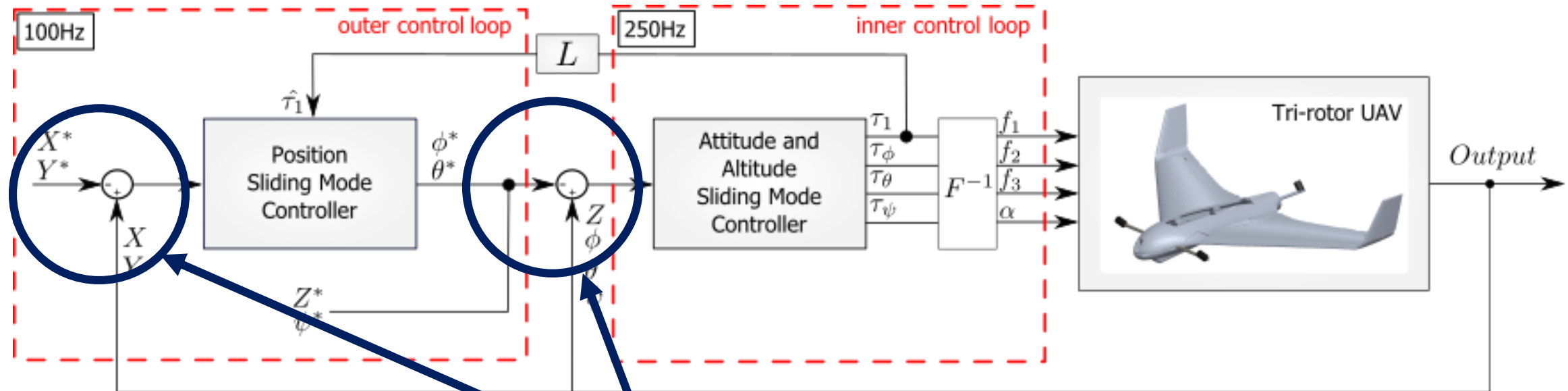
MODELO MATEMÁTICO



Entradas de control

$$\begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \\ \tau_1 \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} l_2 & -l_2 & 0 & 0 \\ l_1 & l_1 & 0 & -l_3 \\ 0 & 0 & -l_3 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}}_F \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \sin(\alpha) \\ f_3 \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

CONTROLADOR PROPUESTO



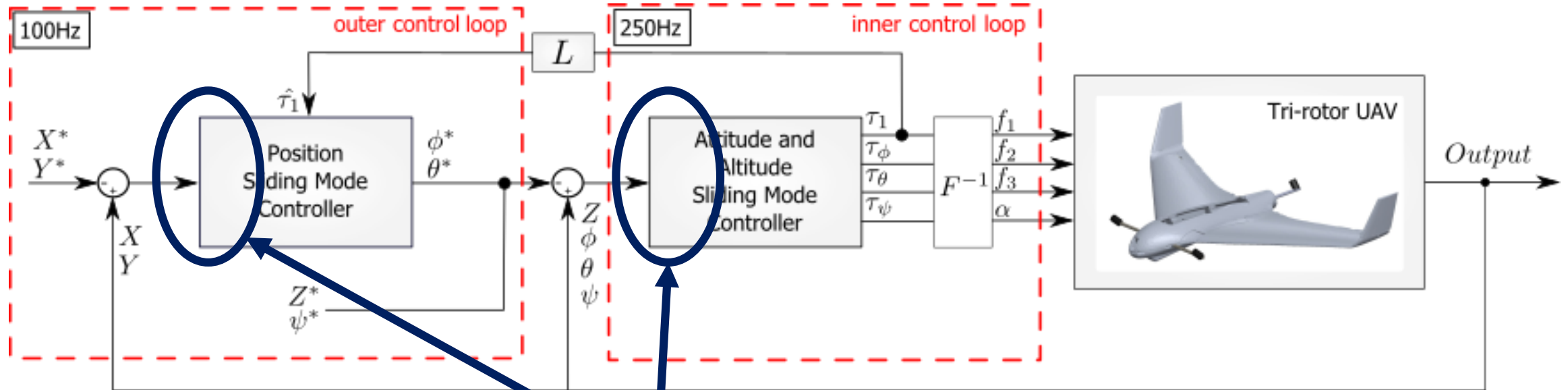
Paso 1:

- Calcular el error

$$e = \eta_1 - \eta_{1d}$$

$$\eta_1(t) = [X, Y, Z, \phi, \theta, \psi]^T$$

CONTROLADOR PROPUESTO

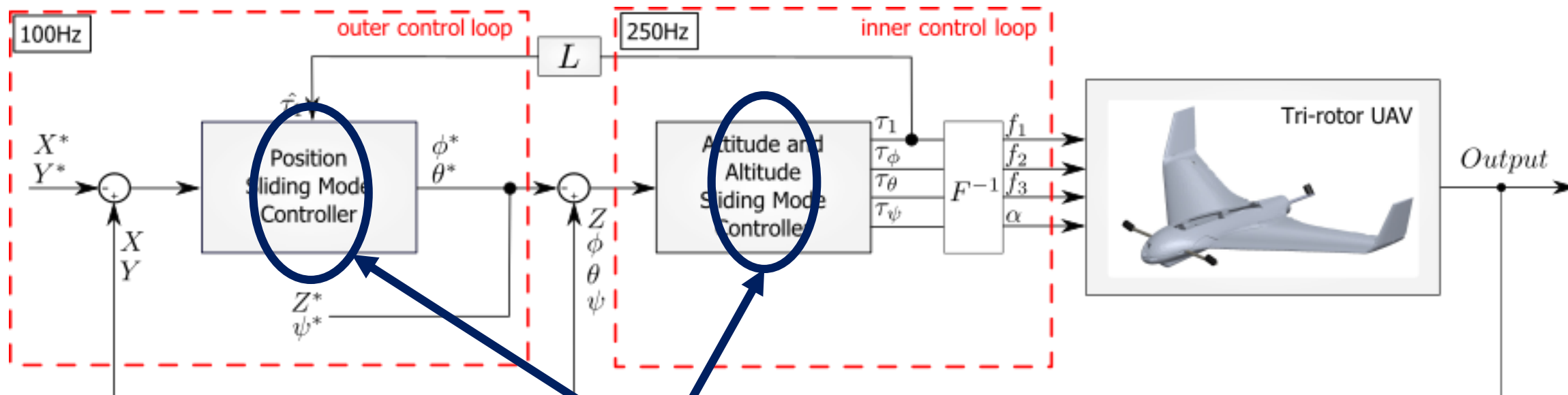


Paso 2:

- Calcular la superficie de deslizamiento

$$S = \dot{e} + K_p e + K_I \int_0^t e dt$$

CONTROLADOR PROPUESTO



Paso 3:

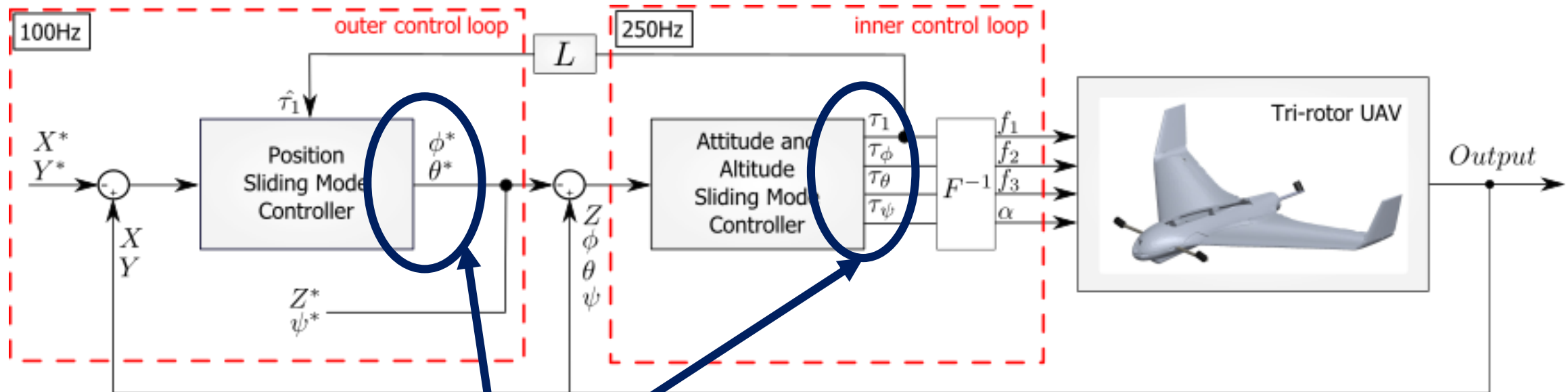
- Algoritmo Super-Twisting Modificado

$$\dot{S} = -K_1 \text{sig}(S) - K_2 S + \varpi$$

$$\dot{\varpi} = -K_3 \text{sign}(S) - K_4 \varpi$$

$$\text{sig}(S) = [|S_1|^{0.5} \text{sign}(S_1), \dots, |S_6|^{0.5} \text{sign}(S_6)]$$

CONTROLADOR PROPUESTO



Paso 4:



- Calcular la salida

$$\dot{S} = A(\eta(t)) + B(\eta(t))u(t) - \ddot{\eta}_1^* + K_p \dot{e} + K_I e$$

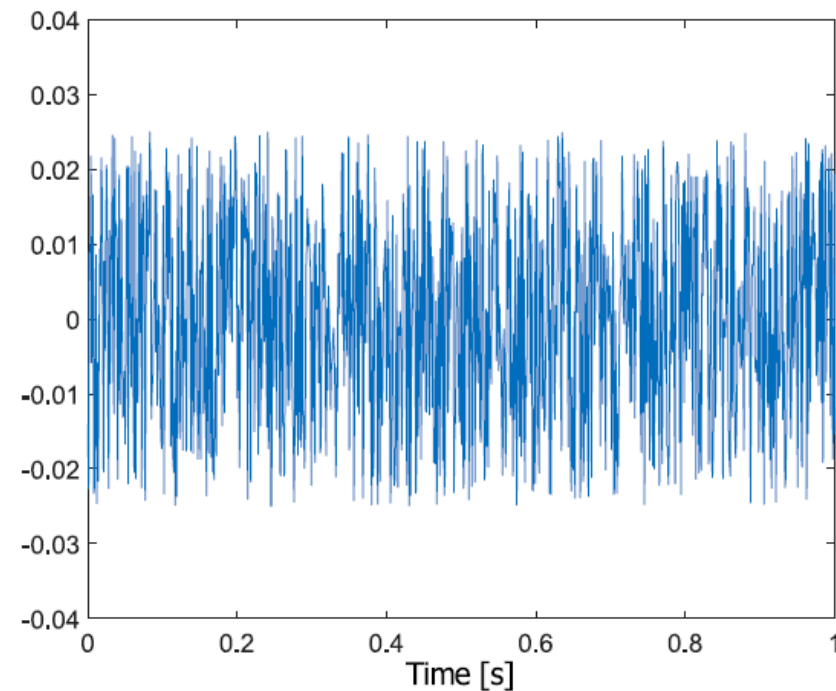
Se obtiene despejando $u(t)$

CONDICIONES DE SIMULACIÓN

Dinámicas no modeladas

<u>Variación de Inercia</u> [kg.m ²]	<u>Variación de Masa</u> [kg]
$\begin{bmatrix} 0.111132 & 0 & 0 \\ 0 & 0.13282 & 0 \\ 0 & 0 & 0.249039 \end{bmatrix}$	3.8
	
$\begin{bmatrix} 0.17877 & 0 & -0.0069234 \\ 0 & 0.03041 & 0 \\ -0.0080175 & 0 & 0.20701 \end{bmatrix}$	5

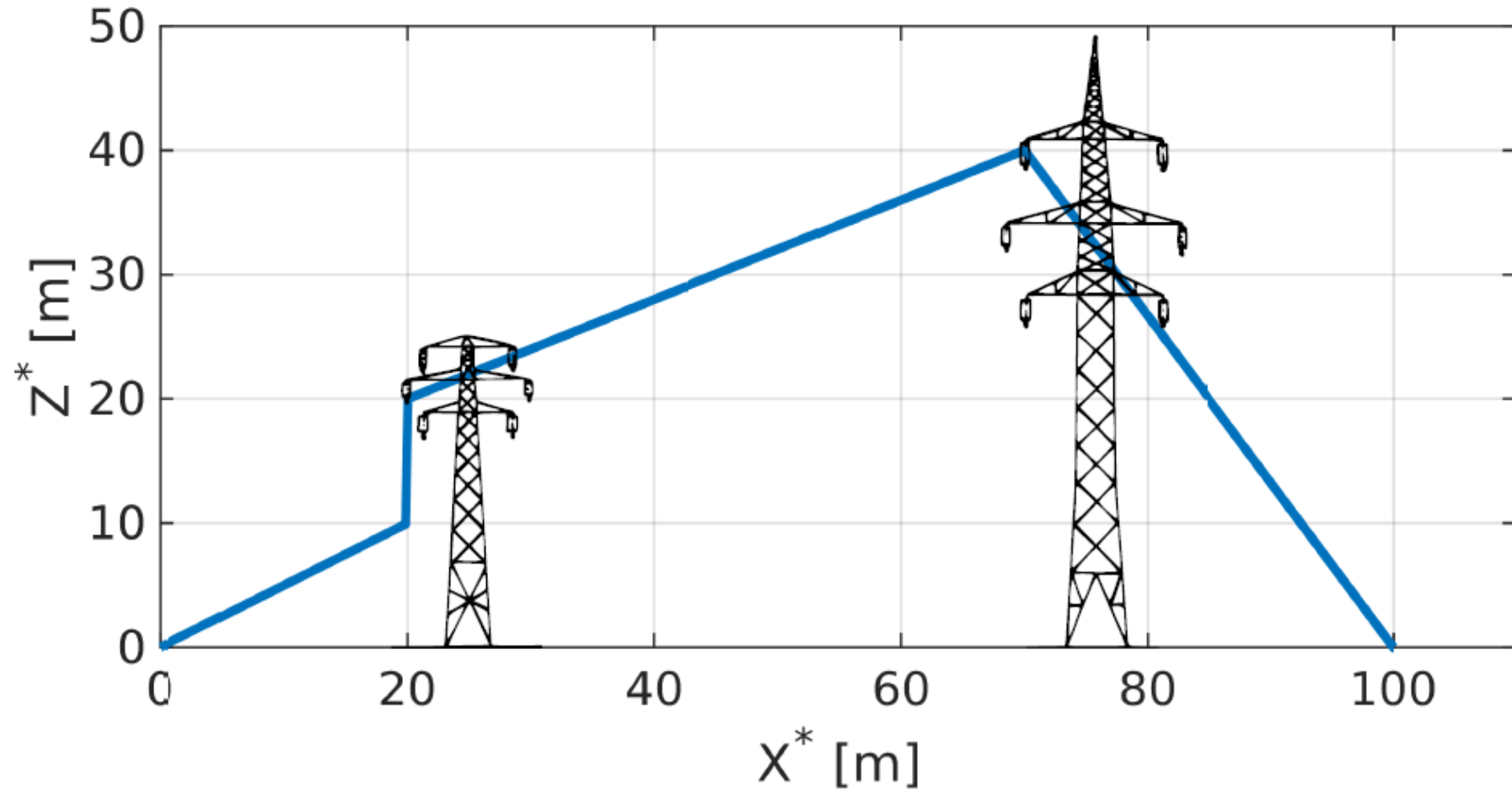
Incertidumbres



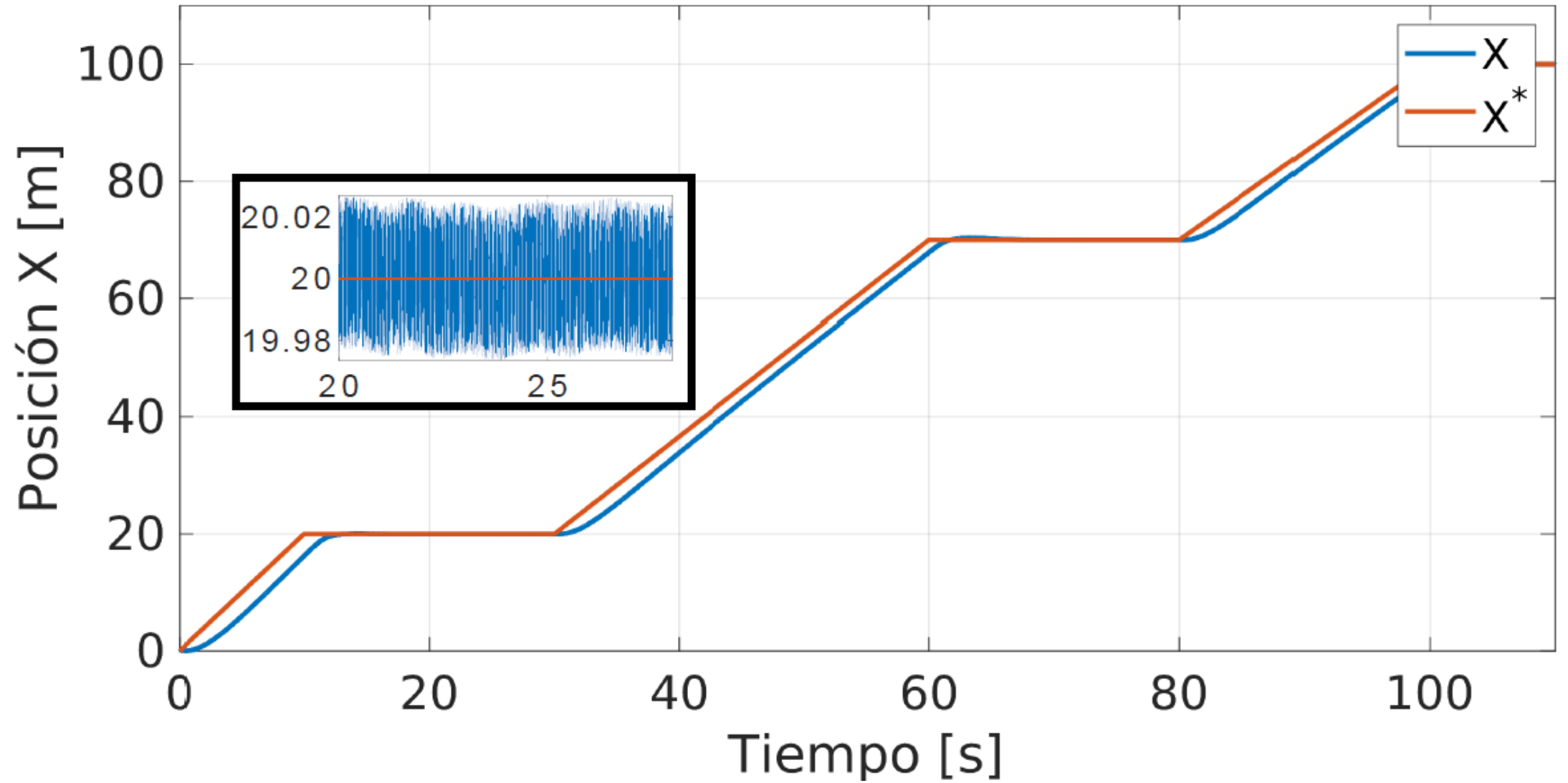
Ruido blanco gaussiano aplicado a cada una de las variables de estado medidas. (Simulando el ruido eléctrico)

CONDICIONES DE SIMULACIÓN

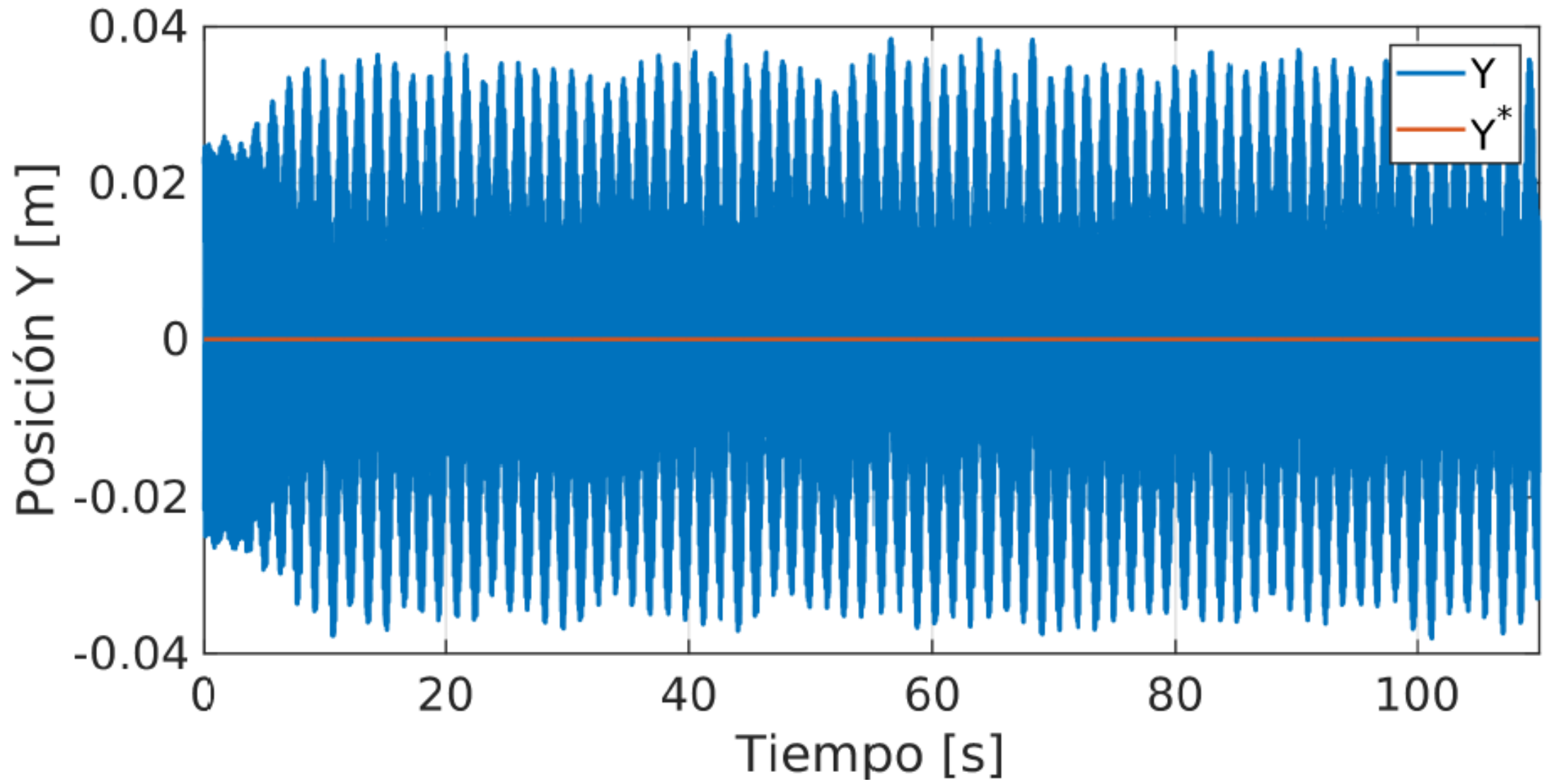
Trayectoria deseada que deberá seguir el VANT



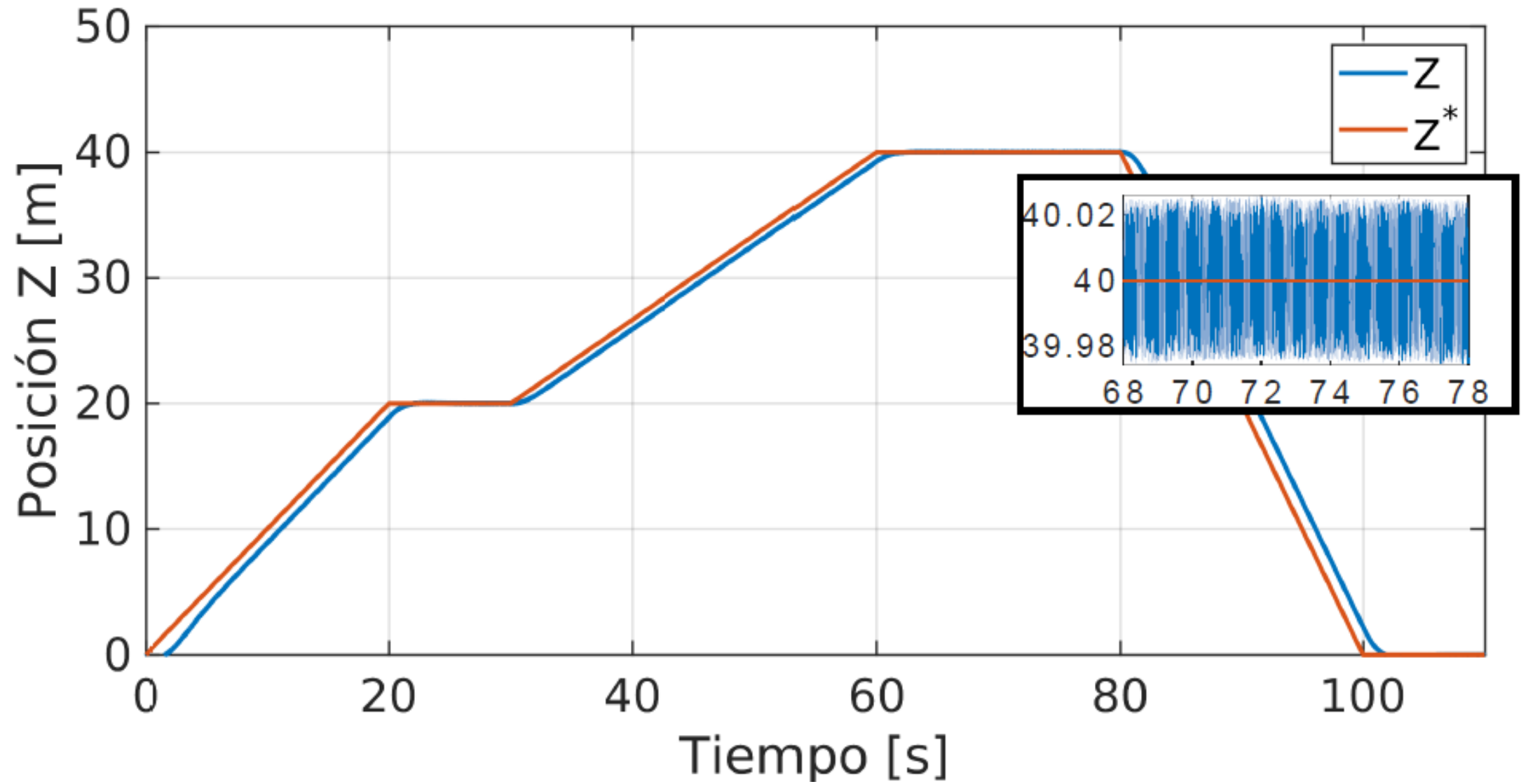
RESULTADOS



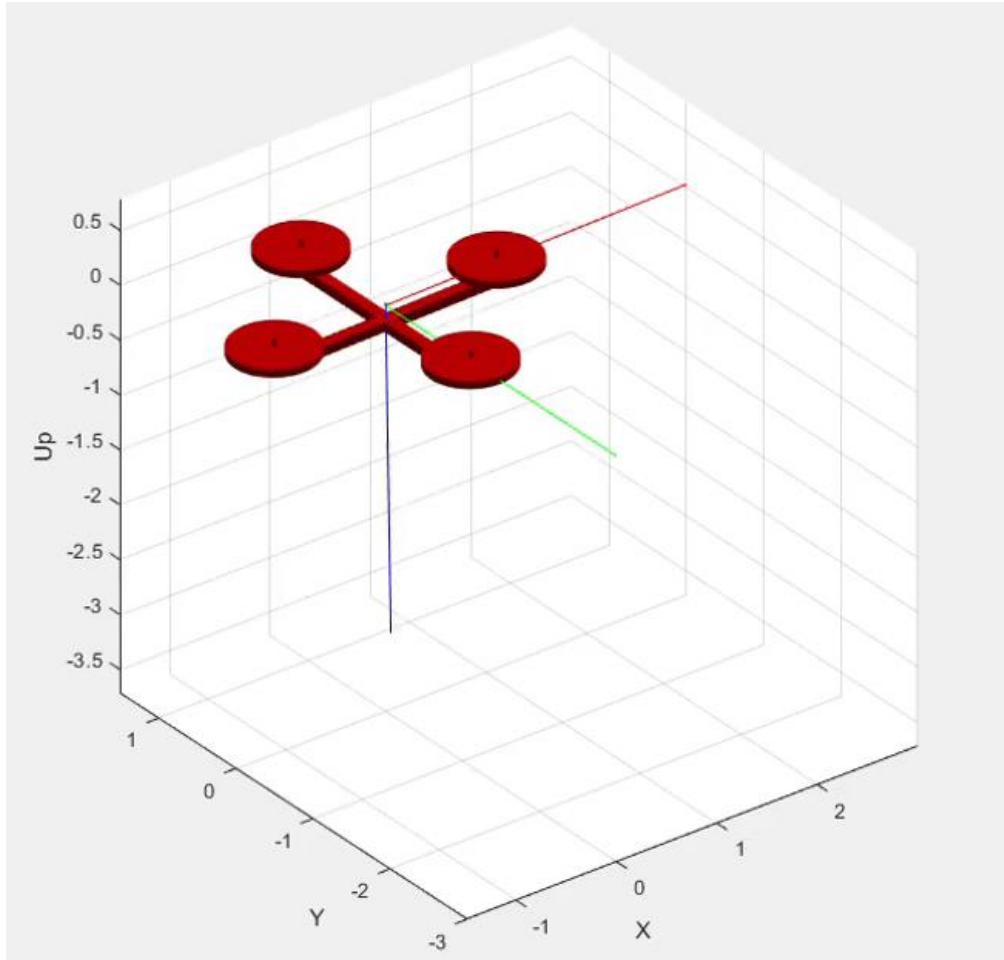
RESULTADOS



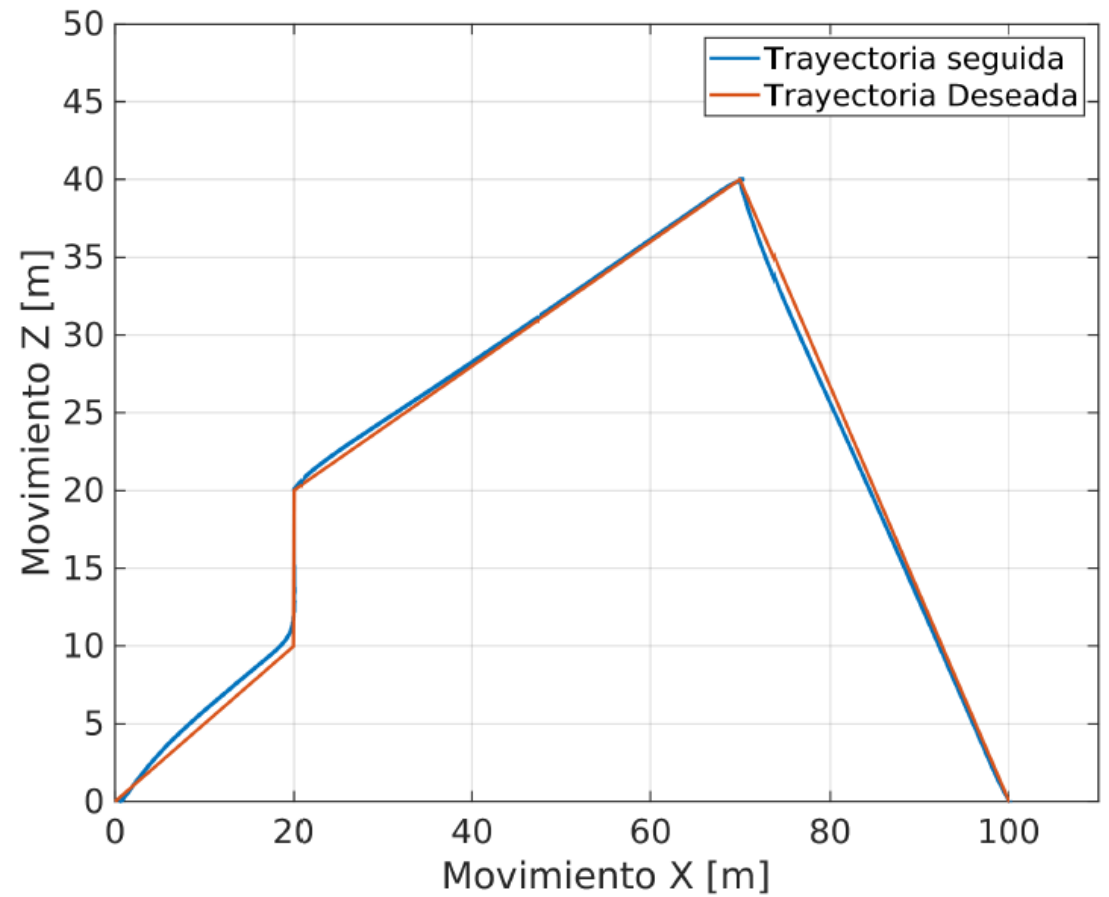
RESULTADOS



RESULTADOS



Velocidad: x3



CONCLUSIÓN

La aplicación de estas tecnologías ...

... esta permitiendo automatizar tareas de inspección y reparación, reduciendo los costes y favoreciendo la producción energética.

... y son fuentes inagotables de innovación para aportar ideas e investigaciones.

Muchas Gracias!!

REFERENCIAS

- ✓ Paraguay precisa de 4 líneas de 500 kV para usar toda su energía de Itaipú (5 de enero de 2019). Última Hora. <https://www.ultimahora.com/paraguay-precisa-4-lineas-500-kv-usar-toda-su-energia-itaipu-n2789683.html>
- ✓ Segalés, A. (2016). Implementación de Algoritmos de Control Digital Aplicados a Vehículos Aéreos No Tripulados. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción.
- ✓ Beard, R.W. (2012). Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice. Princeton University Press.
- ✓ Kali et al. (2018). Finite-Time Altitude and Attitude Tracking of a Tri-Rotor UAV using Modified Super-Twisting Second Order Sliding Mode. in Proceedings of the 15th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics - Volume 1: ICINCO., INSTICC. SciTePress, 2018, pp. 435–442.
- ✓ Paiva, E., Llano, M., Rodas, J., Gregor, R., Rodríguez-Piñeiro, J. (2018). Design and Implementation of a VTOL Flight Transition Mechanism and Development of a Mathematical Model for a Tilt Rotor UAV. IEEE International Conference on Automation /Congress of Chilean Association of Automatic Control: IEEE ICA-ACCA 2018.

REFERENCIAS

- ✓ <https://www.seabreezesolarpanelcleaning.com/panel-care>
- ✓ <https://www.diyphotography.net/dji-teams-up-with-flir-to-release-the-zenmuse-xt-a-thermal-imaging-drone-system/>
- ✓ <https://www.securitymagazine.com/>
- ✓ <https://www.mapir.camera/products/survey3w-camera-red-green-nir-rgn-ndvi>
- ✓ www.aerones.com
- ✓ <https://www.solarian.com.tr/en/solar-power-plant-control-and-measurement-services/>
- ✓ <https://dronelife.com/2018/03/26/aerones-moves-on-from-skydiving-stunts/>
- ✓ <https://www.testo.com/es-AR/aplicaciones/aplicaciones-industria-produccion-energia>
- ✓ https://www.lavozdegalicia.es/noticia/somosagro/agricultura/2017/12/22/aerocamaras-pionera-inspeccionar-lat-sensores-drones/0003_201712D22C2991.htm
- ✓ <https://www.luisllamas.es/teoria-de-control-en-arduino-el-controlador-pid/>
- ✓ <http://www.akku.com.ar/site/2017/10/01/lineas-de-tension-y-transformadores/>
- ✓ <https://electronics360.globalspec.com/article/13841/powerful-cameras-and-drones-vastly-simplify-power-line-inspections>
- ✓ <https://accelcraft.com/photogrammetry-technology/>