

WE CAN  
DO SO  
MUCH  
TOGETHER

---

# TEA PROJECT TECNALIA ELECTRIC AIRCRAFT

VUELO CONTROLADO DE AERONAVE DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA DISTRIBUIDA

presentación: David Culla  
[david.culla@tecnalia.com](mailto:david.culla@tecnalia.com)  
Área Negocio Aeroespacial  
Área Negocio Fabricación Avanzada

# Tecnalia Electric Aircraft

## Tecnalia:

- Centro tecnológico de 1445 Personas
- I+D
- 6 Divisiones:
  - ↳ Construcción
  - ↳ Energía y Medio Ambiente
  - ↳ ICT
  - ↳ Salud
  - ↳ Servicios Laboratorio
  - ↳ División Industria y Transporte
    - ↳ Proyecto TEA:
      - ↳ Área Aeronáutica
      - ↳ Área Fabricación Avanzada
      - ↳ 10 Investigadores



# *Tecnalia Electric Aircraft*

¿Qué hemos hecho en MATLAB?

¿Por qué? Contexto general de la nueva aeronáutica

¿Cómo funciona? Plataforma simulación sistema vuelo

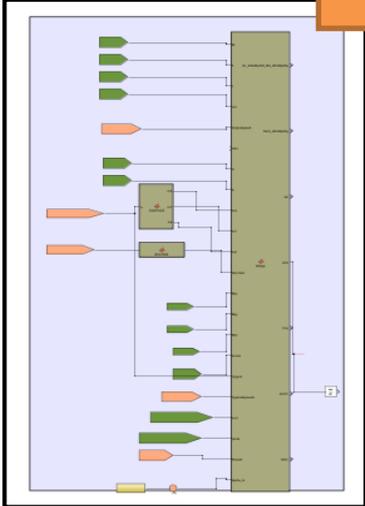
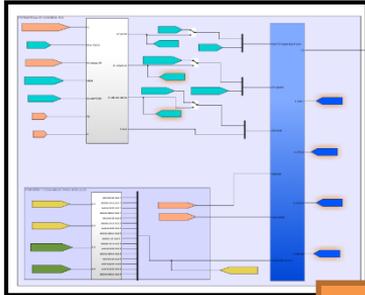
¿Cómo se ha desarrollado? Modelado en MATLAB / Simulink

Validación Simscape y puesta en marcha

Puesta en marcha. Primeros vuelos

# ¿QUÉ HEMOS HECHO EN MATLAB?

- Plataforma de desarrollo y validación de control de vuelo real de estructuras multicóptero.



# ¿QUÉ HEMOS HECHO EN MATLAB?

Dinámica de sistema

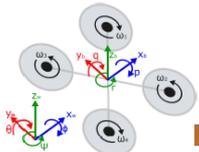


Fig. 1. Quadcopter body frame and the world frame

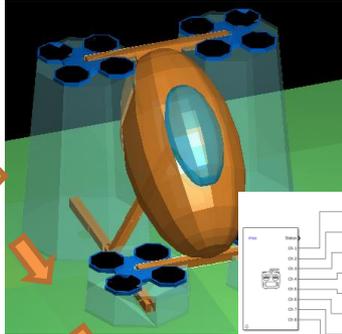
where  $X, Y, Z$  are linear velocities expressed in the w frame,  $p, q, r$  are angular velocities expressed in the bc frame. Position and orientation of the quadcopter with resp to the world frame is defined as

$$\xi = [X, Y, Z, \phi, \theta, \psi]^T$$

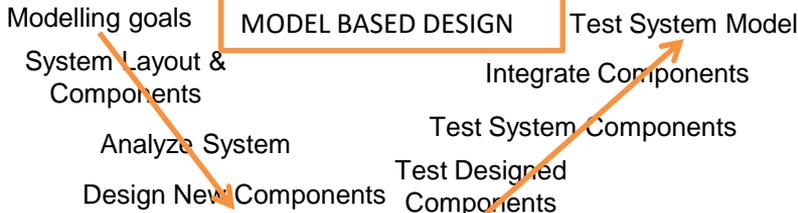
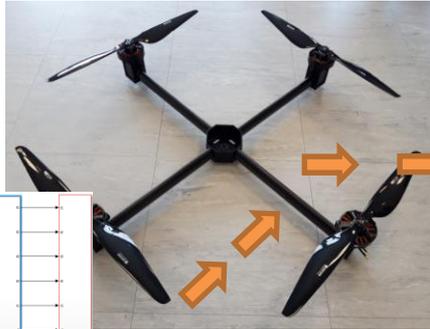
The relation between  $\xi$  and  $\zeta$  is given by the following Jacobian transformation

$$\dot{\xi} = J\dot{\zeta} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_{1x1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{1y1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_{2x1} & 0 & \beta_{2y1} & c_{\phi}c_{\theta} & -s_{\phi}c_{\theta} & 0 \\ \beta_{3x1} & 0 & \beta_{3y1} & c_{\phi}s_{\theta} & s_{\phi}s_{\theta} & c_{\theta} \\ 0 & 0 & 0 & -s_{\phi}/c_{\theta} & c_{\phi}/c_{\theta} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\zeta}_1 \\ \dot{\zeta}_2 \\ \dot{\zeta}_3 \\ \dot{\zeta}_4 \\ \dot{\zeta}_5 \\ \dot{\zeta}_6 \end{bmatrix}$$

Control / Modelo físico/matemático



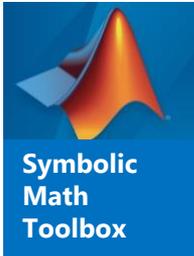
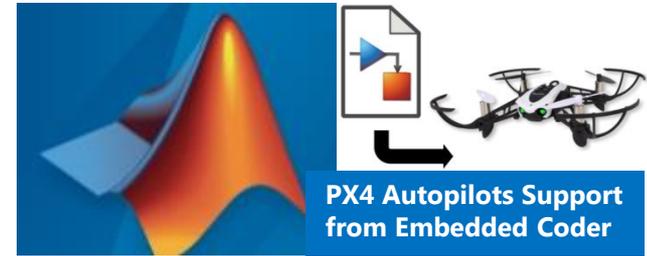
Diseño mecánico



Compilación



Puesta en marcha y vuelo



# *Tecnalia Electric Aircraft*

¿Qué hemos hecho en MATLAB?

¿Por qué? Contexto general de la nueva aeronáutica

¿Cómo funciona? Plataforma simulación sistema vuelo

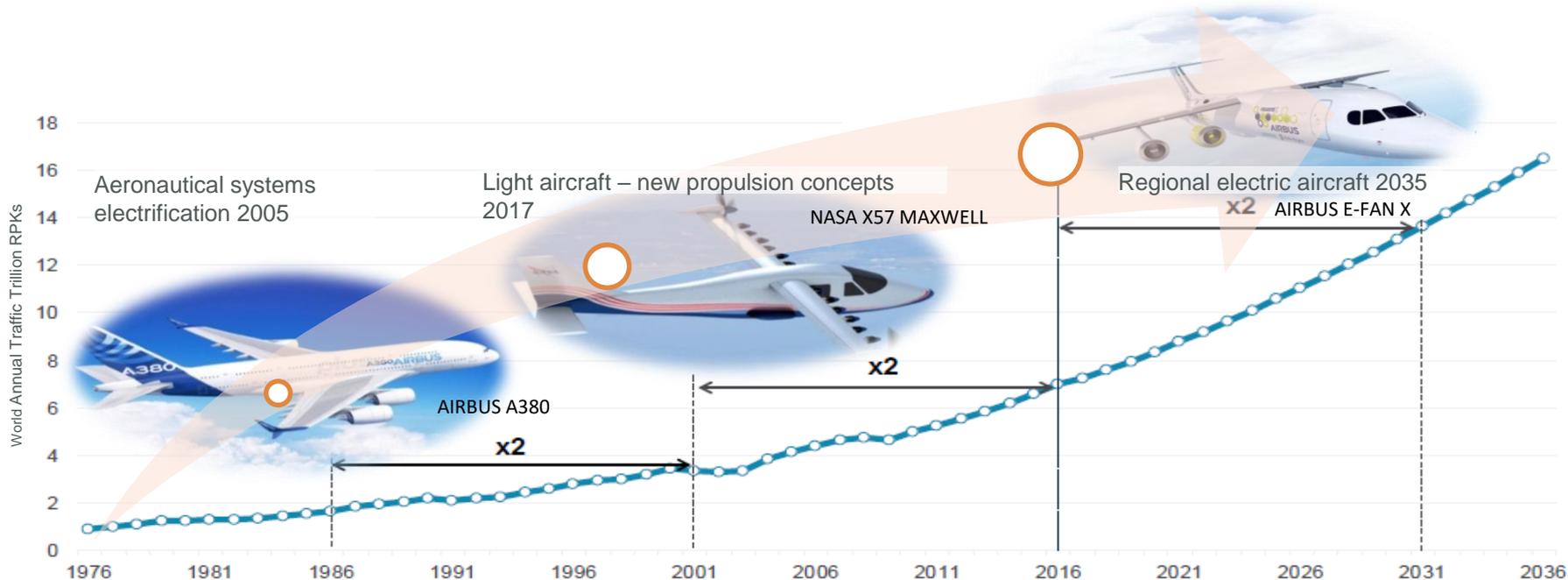
¿Cómo se ha desarrollado? Modelado en MATLAB / Simulink

Validación Simscape y puesta en marcha

Puesta en marcha. Primeros vuelos

# NUEVA AERONÁUTICA

- El mercado aeronáutico crece, con nuevas ideas y hacia un modelo eléctrico.
- ACARE + hoja de ruta FLIGHTPATH 2050: Reducción de 50-75% de emisiones CO2 (consejo asesor investigación aviación europeo)
- Nueva aeronáutica: nuevos requisitos. Versatilidad. Precisión.
- Tecnalía: grupo de investigadores con experiencia en sector aeronáutico, control, mecatrónico.
- Objetivo: desarrollar estrategias de control de propulsión eléctrica distribuida



# NUEVA AERONÁUTICA

- Con la propulsión eléctrica distribuida
  - Se eliminan barreras de acceso al sector aeronáutico
  - Nuevos agentes
  - Oportunidad de desarrollar nuevos sistemas orientados a certificación
- Desde Tecnalía se ve necesario desarrollar capacidades de:
  - Diseño basado en modelos aeronáuticos
  - Integración de propulsión eléctrica distribuida
  - Integración de estrategias de control
  - Simulación y validación
  - Desarrollo de sistemas de electrónica de potencia, gestión eléctrica y control orientados a certificación
- Proyecto TEA: plataforma de simulación, puesta en marcha y test de sistema de vuelo real basados en propulsión eléctrica distribuida

# *Tecnalia Electric Aircraft*

¿Qué hemos hecho en MATLAB?

¿Por qué? Contexto general de la nueva aeronáutica

¿Cómo funciona? Plataforma sistema vuelo

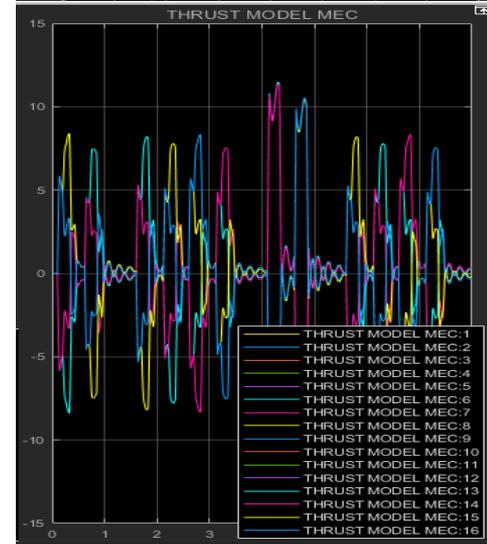
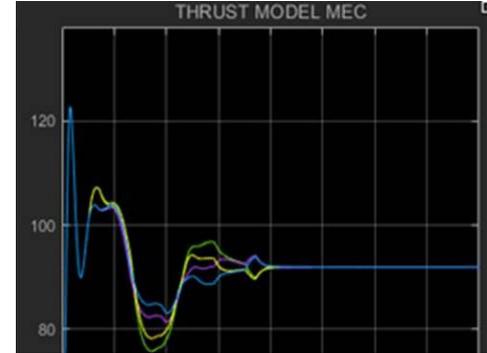
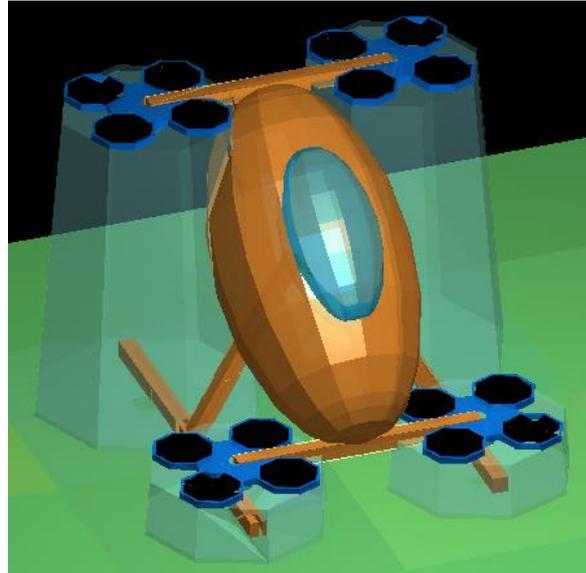
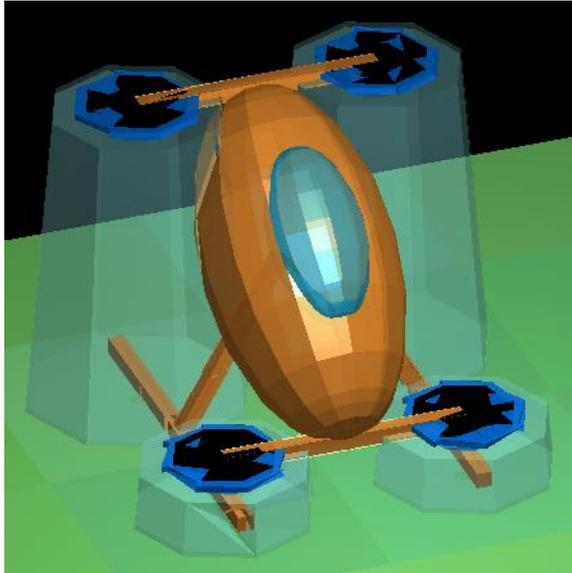
¿Cómo se ha desarrollado? Modelado en MATLAB / Simulink

Validación Simscape y puesta en marcha

Puesta en marcha. Primeros vuelos

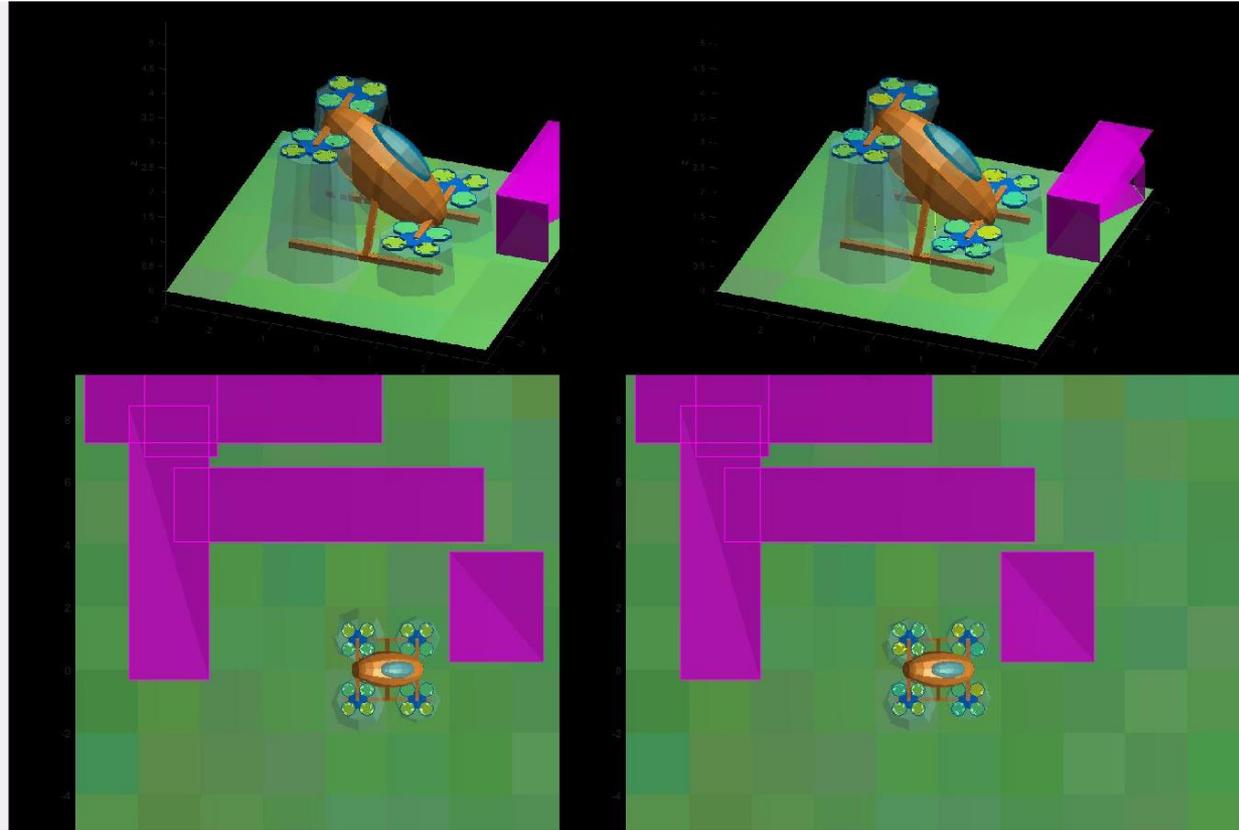
# PLATAFORMA VALIDACIÓN DE VUELO, SISTEMAS Y CONTROL Inspiring Business

- Plataforma: simulador de vuelo + componentes electromecánicos + compilador para simulación de arquitecturas multicóptero escalables
- Orientada:
  - Simulación de diferentes arquitecturas de propulsión
  - Prueba de estrategias de control y respuesta sistema
  - Precisión y control total de grados de libertad → “robótica aérea”
  - Claro objeto final: compilación y vuelo real

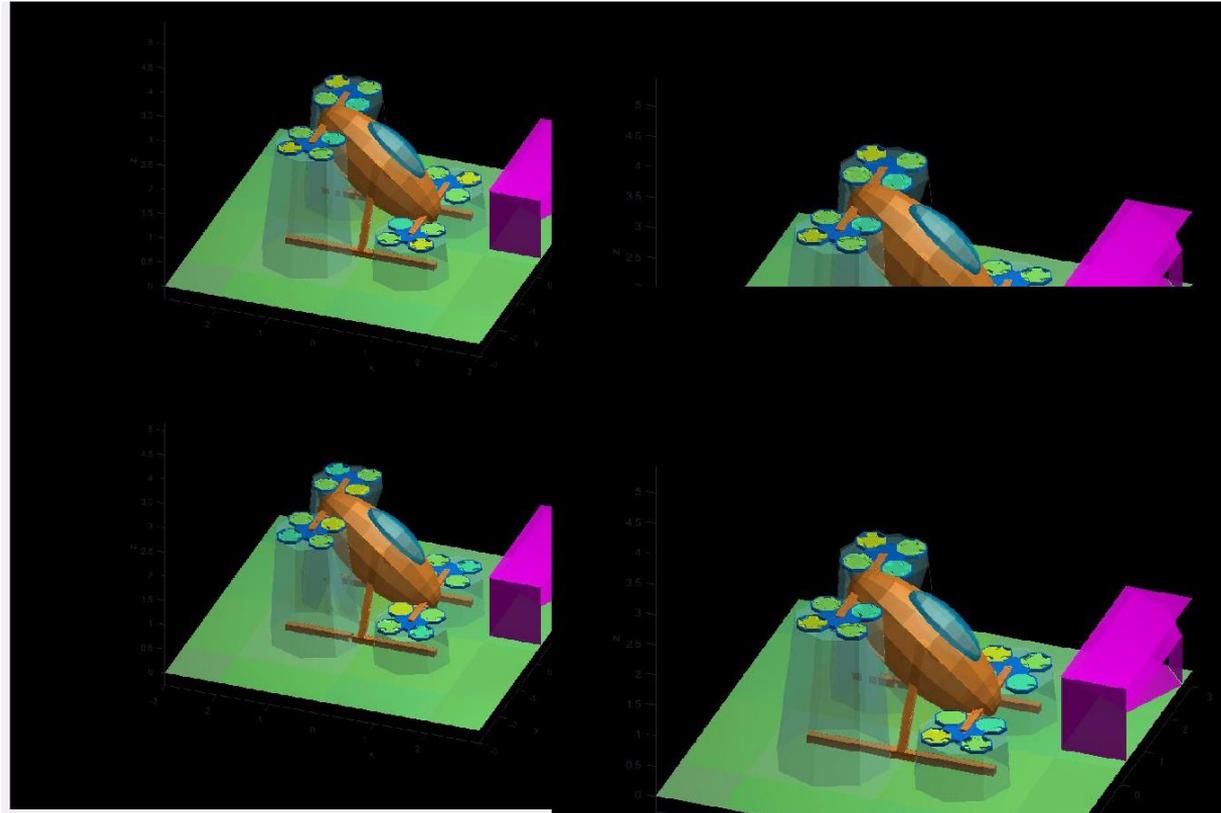


# PLATAFORMA VALIDACIÓN DE VUELO, SISTEMAS Y CONTROL Inspiring Business

- Nuevas geometrías variables / Multicóptero.
- Simulaciones realizada en plataforma + MATLAB/Simulink

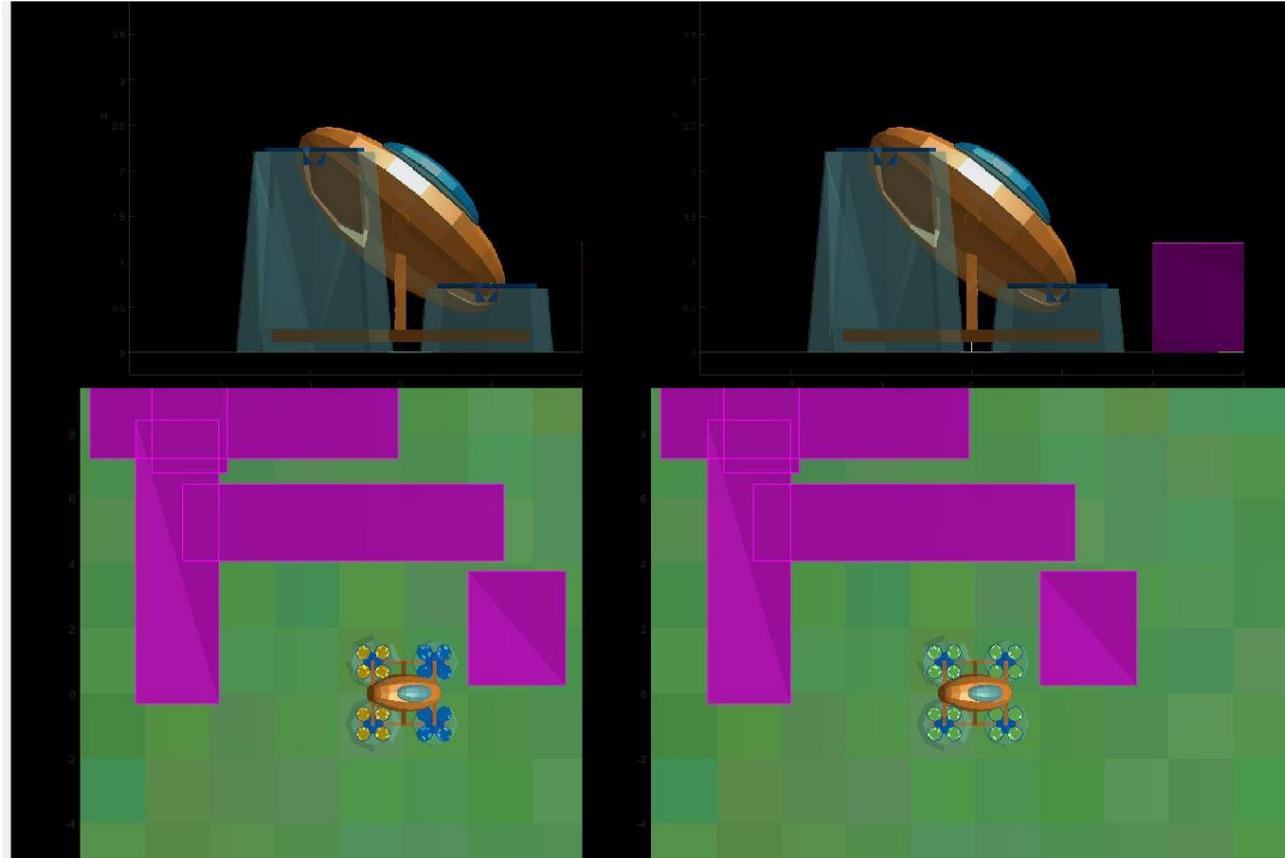


- Nuevas geometrías variables / Multicóptero.



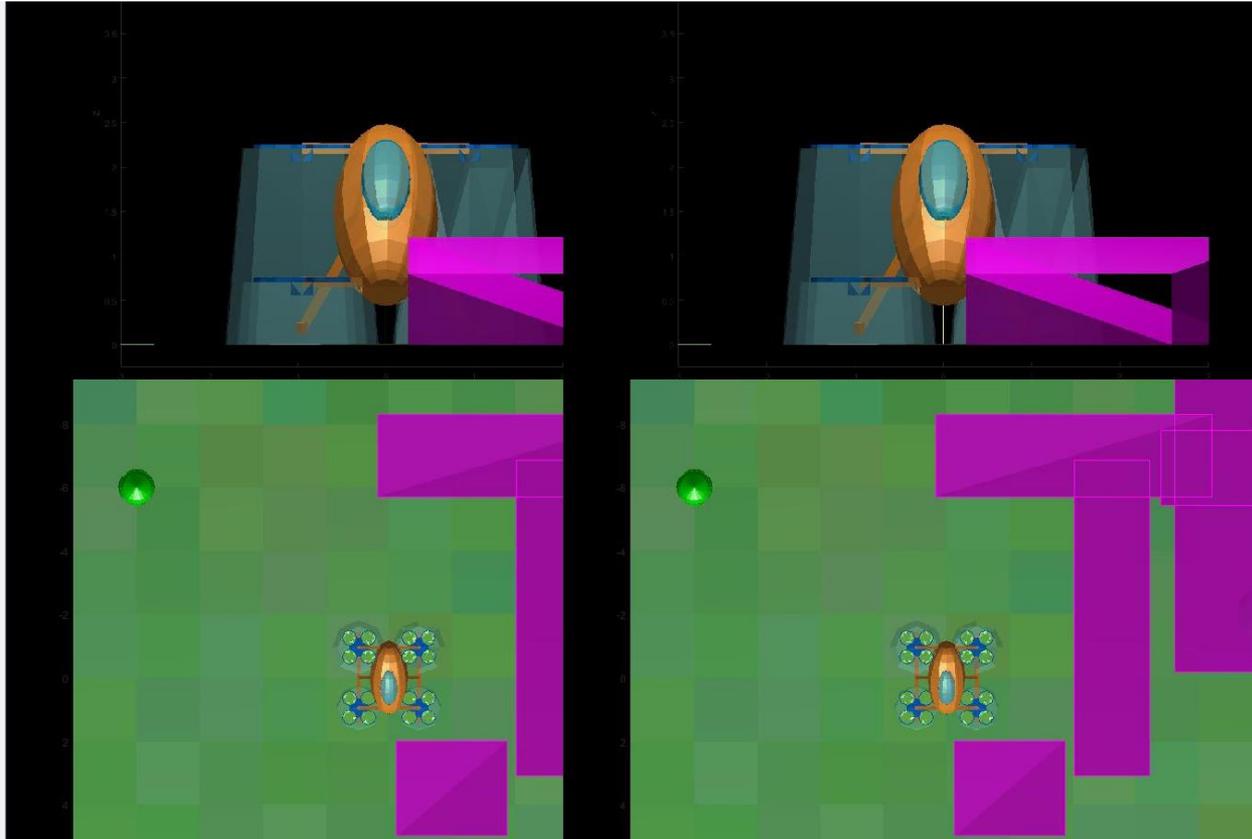
# CONTROL DRON vs NUEVAS ARQUITECTURAS

- Trayectoria: avance manteniendo orientación controlada. Comparación de dinámicas de vuelo.



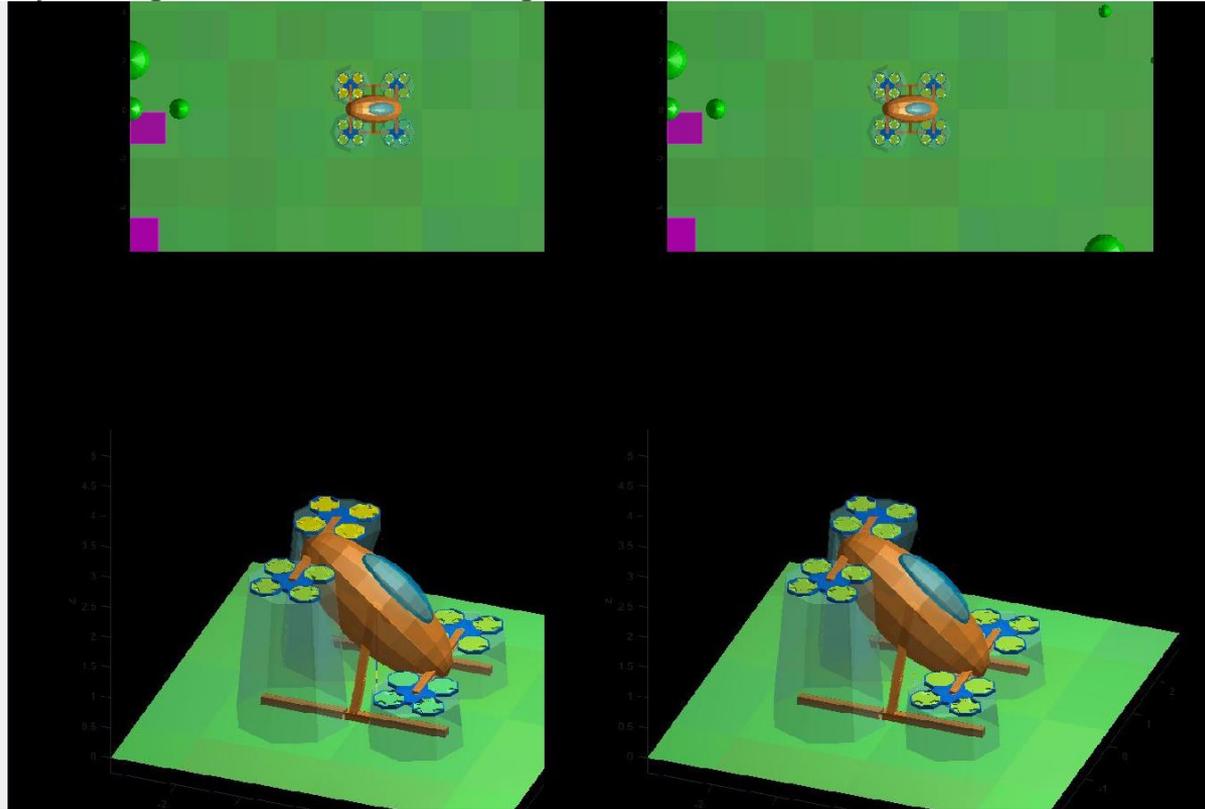
# CONTROL DRON vs NUEVAS ARQUITECTURAS

- Trayectoria: inclinación ángulo sobre horizontal manteniendo posición controlada



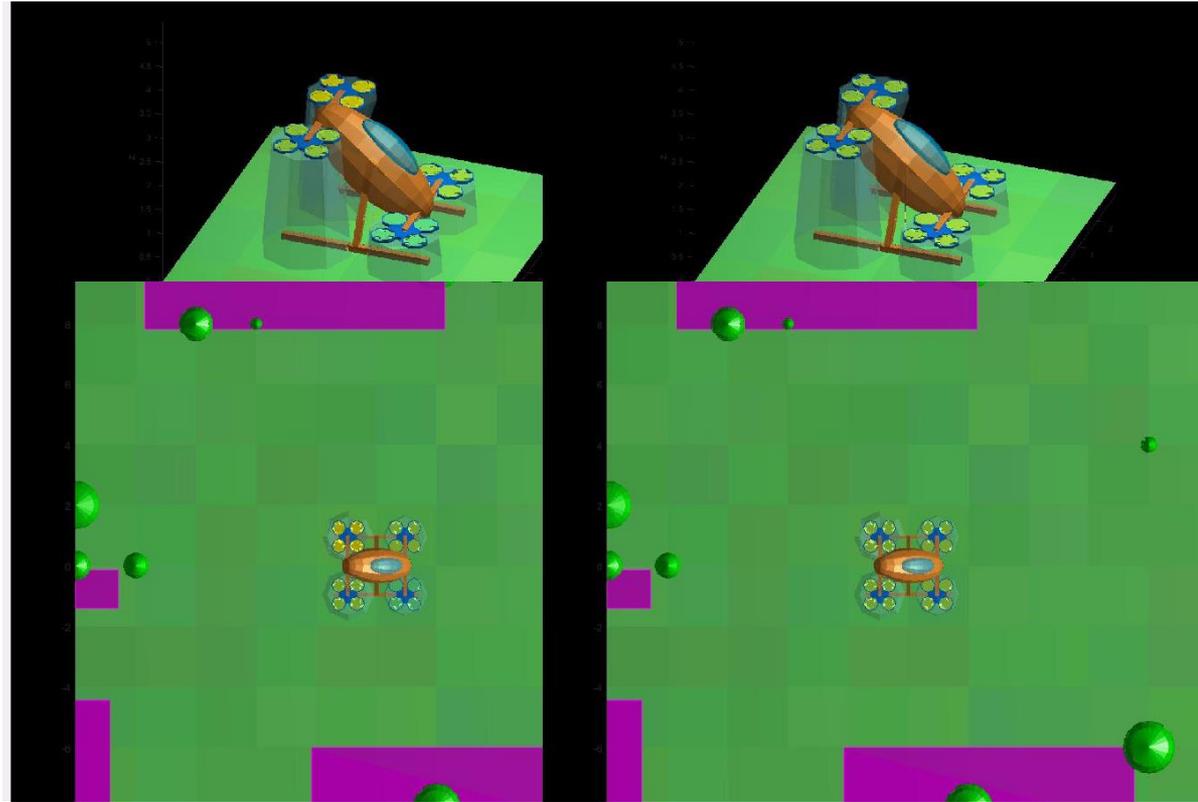
# CONTROL DRON vs NUEVAS ARQUITECTURAS

- Trayectoria: x y z, ángulos sin control vs ángulos controlados



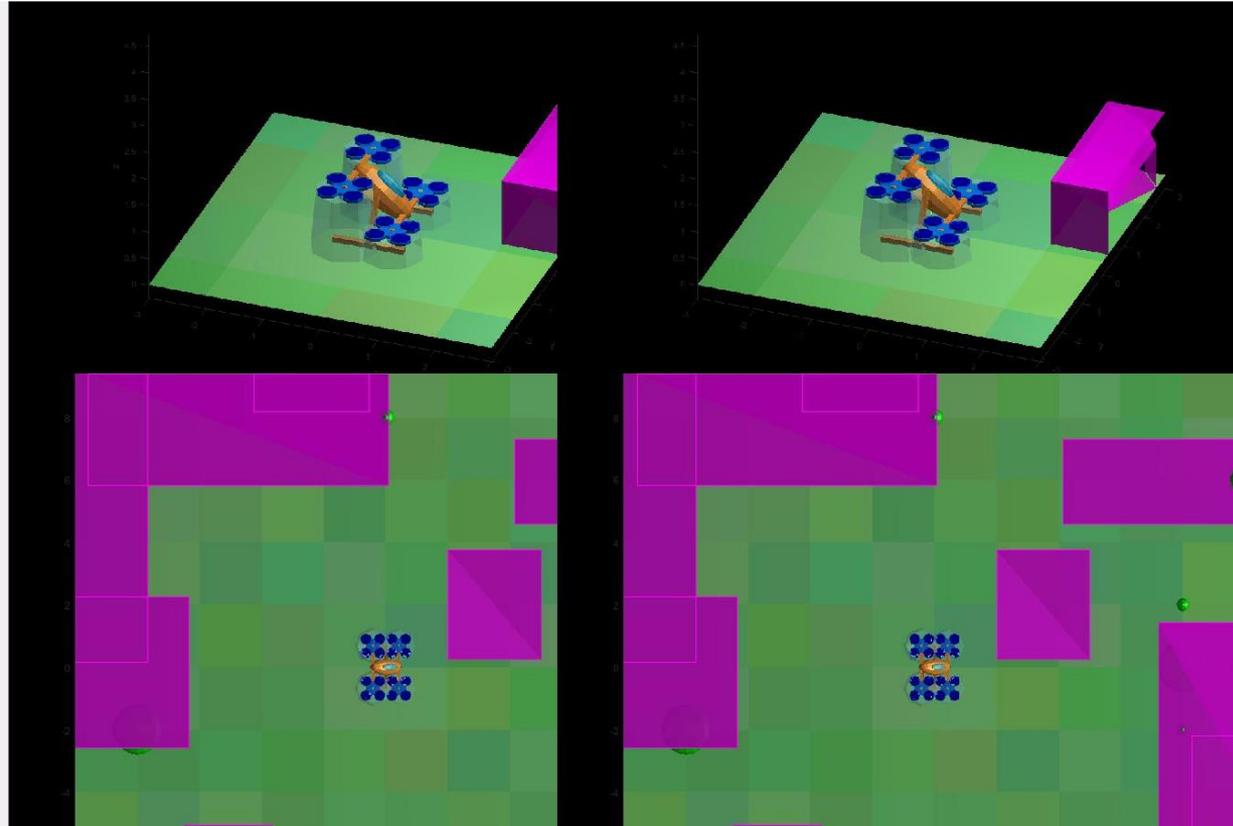
# CONTROL DRON vs NUEVAS ARQUITECTURAS

- Trayectoria: x y z manteniendo control de ángulos. Imposible para dron “estándar”.



# CONTROL DRON vs NUEVAS ARQUITECTURAS

- Trayectoria: elipsoidal con altura constante, cambio de yaw, posición "x", posición "y"



# *Tecnalia Electric Aircraft*

¿Qué hemos hecho en MATLAB?

¿Por qué? Contexto general de la nueva aeronáutica

¿Cómo funciona? Plataforma simulación sistema vuelo

¿Cómo se ha desarrollado? Modelado en MATLAB / Simulink

Validación Simscape y puesta en marcha

Puesta en marcha. Primeros vuelos

# Tecnalia Electric Aircraft

¿Qué hemos hecho en MATLAB?

¿Por qué? Contexto general de la nueva aeronáutica

¿Cómo funciona? Plataforma simulación sistema vuelo

¿Cómo se ha desarrollado? Modelado en MATLAB / Simulink ➔ Paso 1: Estado del arte

Paso 2: Support Package for Parrot minidrones

Paso 3: Obtención de ecuaciones de control

Paso 4: Desarrollo modelo Simulink

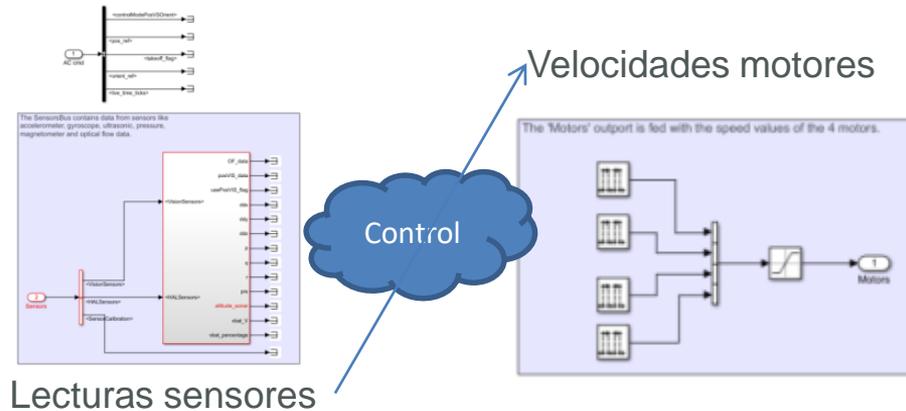
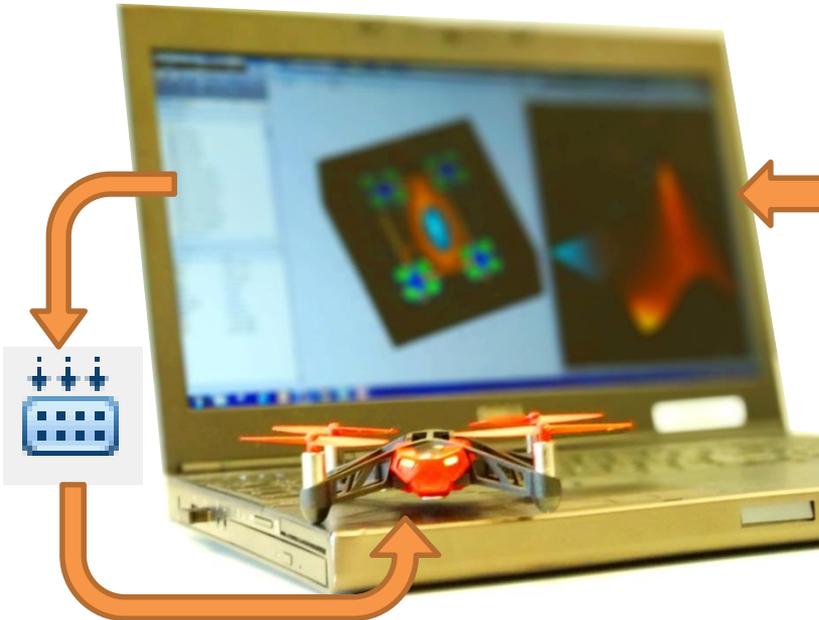
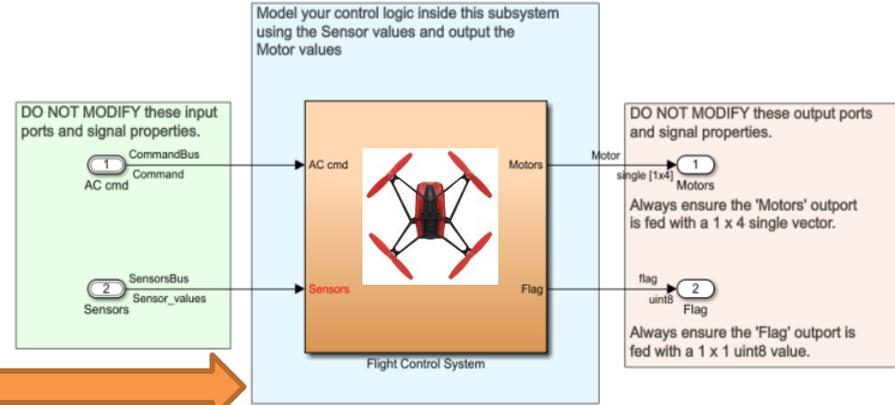
Validación Simscape y puesta en marcha

Puesta en marcha. Primeros vuelos

# SUPPORT PACKAGE FOR MINI DRONES

- Modelo de entradas y salidas
- Comprensión de la física/sensórica básica del dron
- Adecuación y compatibilidad de las estrategias de control a los sensores disponibles
- Compilación ágil y rápida

## Initial Parrot Control Tests



# Tecnalia Electric Aircraft

¿Qué hemos hecho en MATLAB?

¿Por qué? Contexto general de la nueva aeronáutica

¿Cómo funciona? Plataforma simulación sistema vuelo

¿Cómo se ha desarrollado? Modelado en MATLAB / Simulink ➔

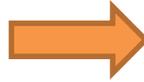
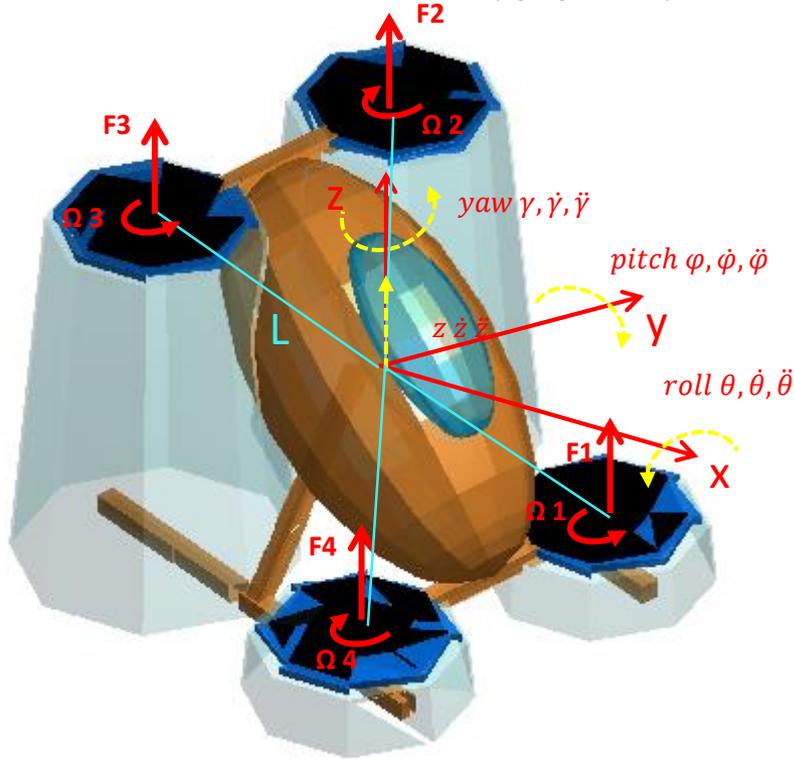
- Paso 1: Estado del arte
- Paso 2: Support Package for Parrot minidrones
- Paso 3: Obtención de ecuaciones de control**
- Paso 4: Desarrollo modelo Simulink

Validación Simscape y puesta en marcha

Puesta en marcha. Primeros vuelos

# DINÁMICA DE UN DRON

- Leyes de newton
- Dos sistemas de referencia (fijo y local)



```

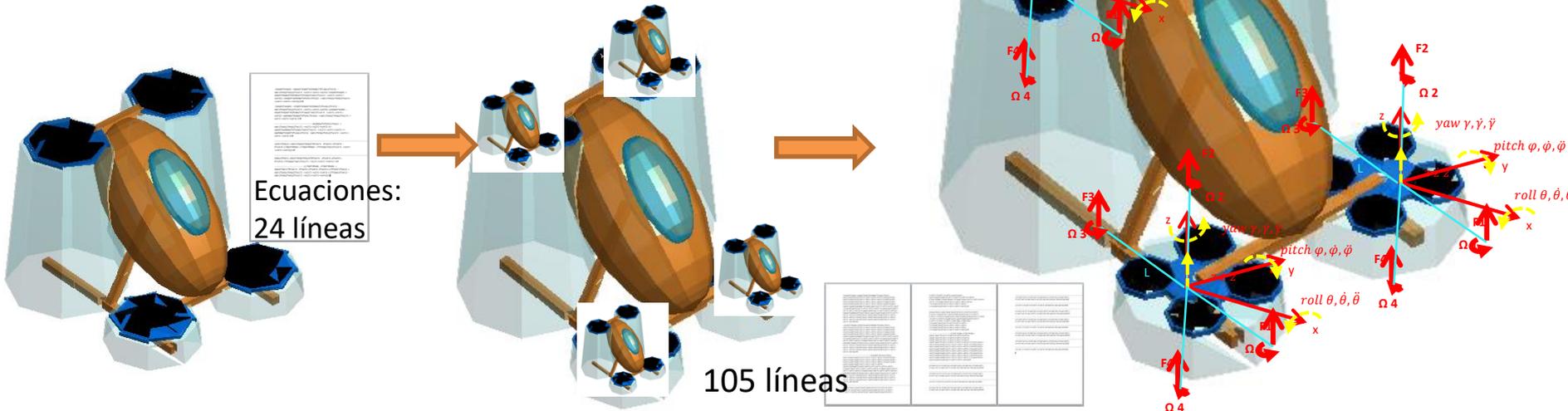
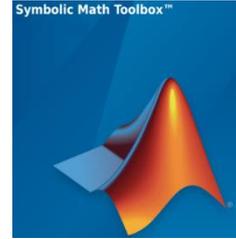
%Ecuaciones diferenciales expresadas en
Q
ddx=0;
ddy=0;
ddz=-g+U1/M;

ddphi=dtheta*dpsi*(ly-lz)/lx+L*d*U2/lx
ddtheta=dpsi*dphi*(lz-lx)/ly+L*d*U3/ly
ddpsi=dtheta*dphi*(ly-lx)/lz+b*U4/lz

CON
U1=d * (Ω 1^2 + Ω 2^2 + Ω 3^2 + Ω 4^2)
U2=d * (      Ω 2^2 +      - Ω 4^2 )
U3=d * ( - Ω 1^2      + Ω 3^2      )
U4=b * (-Ω 1^2 + Ω 2^2 - Ω 3^2 + Ω 4^2 )
    
```

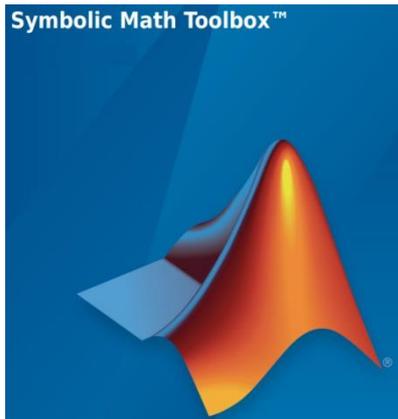
# NUEVA DINÁMICA MULTICÓPTERO

- Partiendo de la arquitectura estándar de dron, se integra un número de módulos de propulsión de orientación independiente en una sólido/cabina
- La arquitectura estándar tiene 4 grados de libertad controlados.
- La nueva arquitectura presenta N grados de libertad ( $N= 6, 12, 14, 16\dots$ )
- El tamaño de las operaciones complica la obtención de las E.D. de manera sencilla y manual. Se decide utilizar MATLAB Symbolic Math Toolbox



# ÉCUACIONES DINÁMICAS

- Obtención de las ecuaciones dinámicas
- MATLAB Symbolic Math Toolbox permitió obtener las ecuaciones diferenciales de manera sencilla, parametrizada y segura aplicando simplificaciones y reagrupando términos sin error
- Obtención de la **matriz del sistema** que relaciona variables de aceleración, velocidad y posición con las velocidades de los motores, lo que permite establecer las primeras estrategias de control



$$m_b \ddot{x}_o = R_{b \rightarrow o} \cdot F_b = R_{b \rightarrow o} \cdot \sum_{q=1}^n (R_{q \rightarrow q'} \cdot F_q)$$

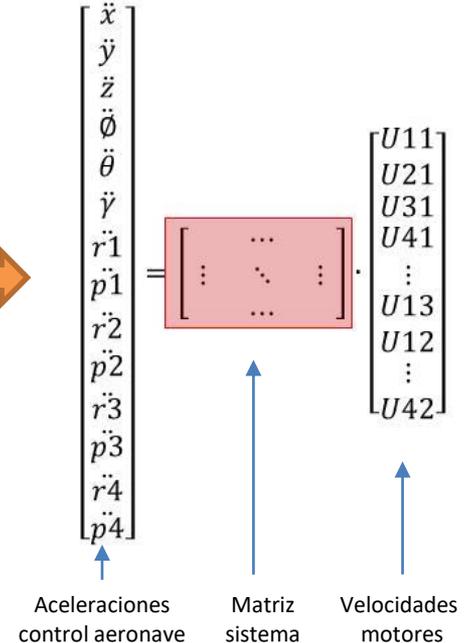
$$I_b \ddot{\Phi}_b + \Phi_b \times (I_b \dot{\Phi}_b) = \sum_{q=1}^4 \left( R_{q \rightarrow q'} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T_{qz} \end{bmatrix} + L_q \times (R_{q \rightarrow q'} \cdot F_q) \right)$$

$$I_Q \ddot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_1 \times (I_Q \dot{\Phi}_1) + \dot{\Phi}_1 \times (J_r \cdot \Omega_{Q1}) = T_1$$

$$I_Q \ddot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_2 \times (I_Q \dot{\Phi}_2) + \dot{\Phi}_2 \times (J_r \cdot \Omega_{Q2}) = T_2$$

$$I_Q \ddot{\Phi}_3 + \dot{\Phi}_3 \times (I_Q \dot{\Phi}_3) + \dot{\Phi}_3 \times (J_r \cdot \Omega_{Q3}) = T_3$$

$$I_O \ddot{\Phi}_4 + \dot{\Phi}_4 \times (I_O \dot{\Phi}_4) + \dot{\Phi}_4 \times (J_r \cdot \Omega_{O4}) = T_4$$



Aceleraciones control aeronave

Matriz sistema

Velocidades motores

# Tecnalia Electric Aircraft

¿Qué hemos hecho en MATLAB?

¿Por qué? Contexto general de la nueva aeronáutica

¿Cómo funciona? Plataforma simulación sistema vuelo

¿Cómo se ha desarrollado? Modelado en MATLAB / Simulink ➡

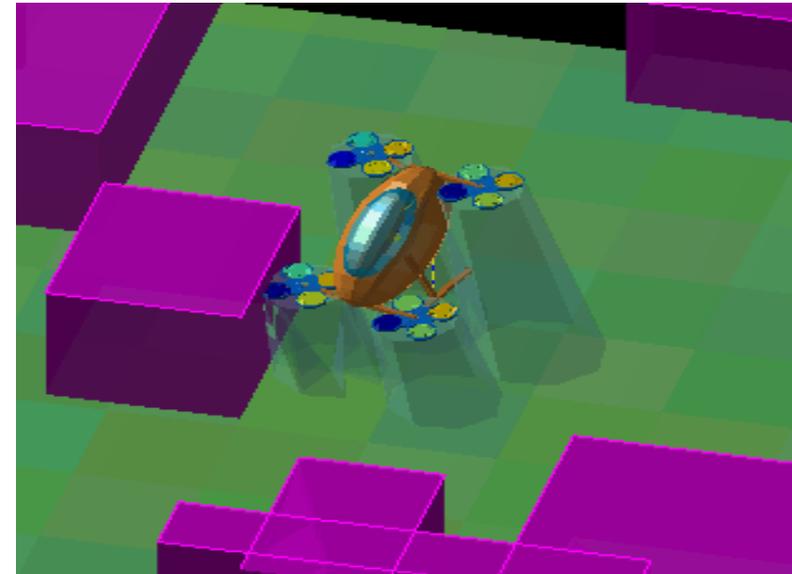
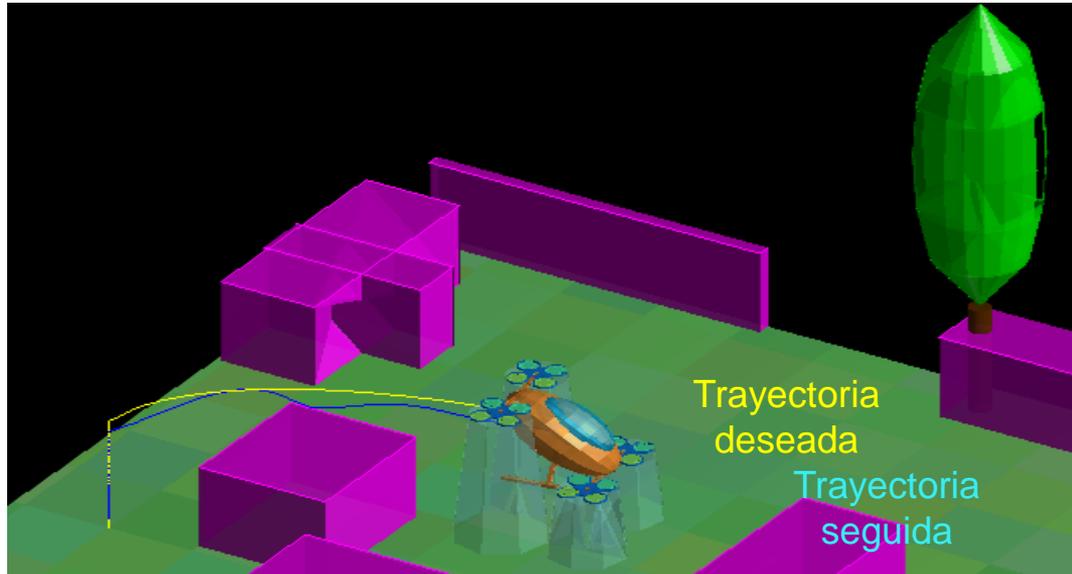
- Paso 1: Estado del arte
- Paso 2: Support Package for Parrot minidrones
- Paso 3: Obtención de ecuaciones de control
- Paso 4: Desarrollo modelo Simulink**

Validación Simscape y puesta en marcha

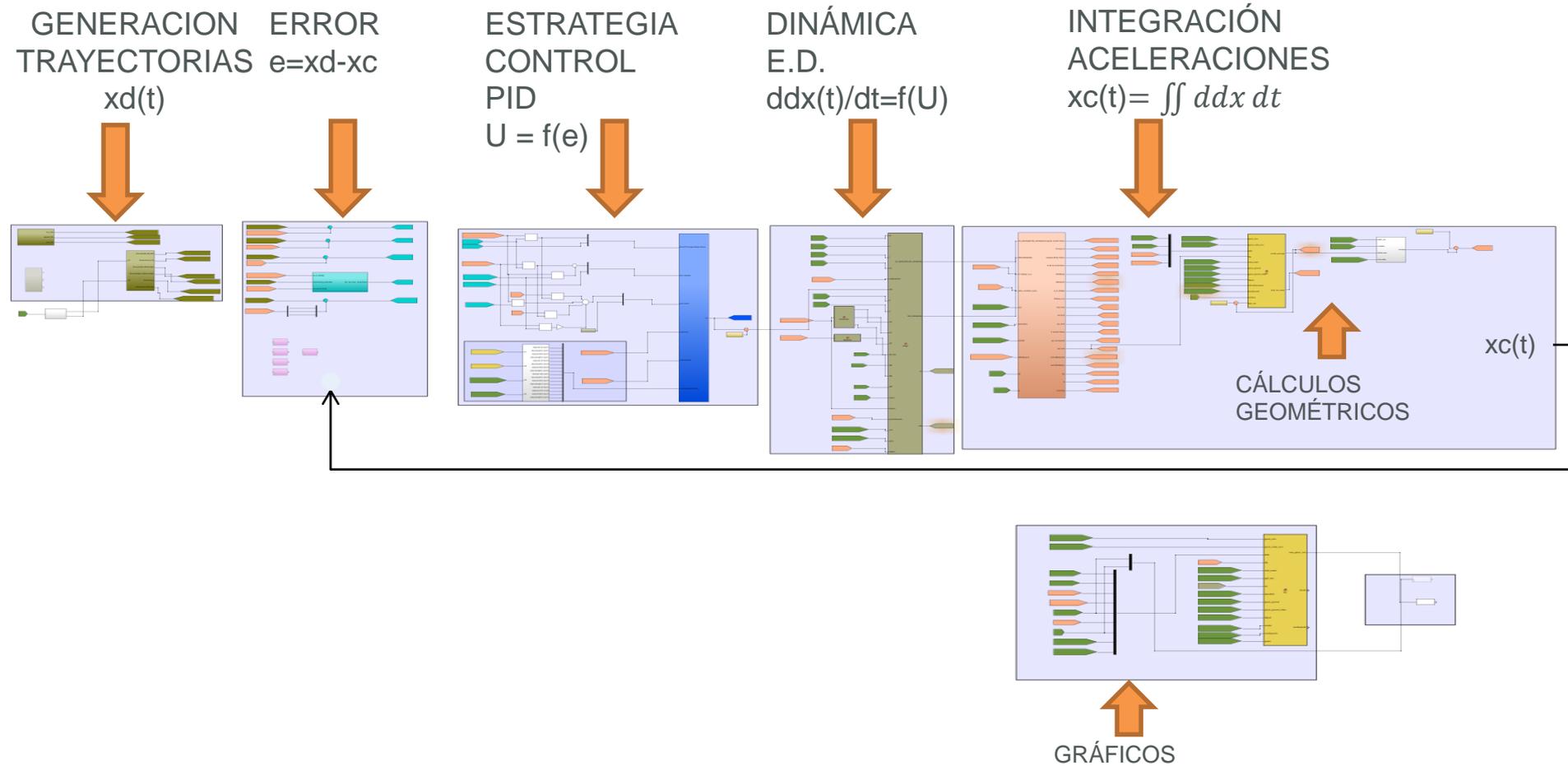
Puesta en marcha. Primeros vuelos

# MODELO DE PLANTA EN SIMULINK

- Simulación de trayectorias, perturbaciones, ruidos, interacciones con entorno
- N grados de libertad
- Desarrollo de diferentes estrategias de control
- Implementación de modelos mecánicos/electricos adicionales (sensórica, actuadores, propulsores...)



# MODELO DE PLANTA EN SIMULINK



# *Tecnalia Electric Aircraft*

¿Qué hemos hecho en MATLAB?

¿Por qué? Contexto general de la nueva aeronáutica

¿Cómo funciona? Plataforma simulación sistema vuelo

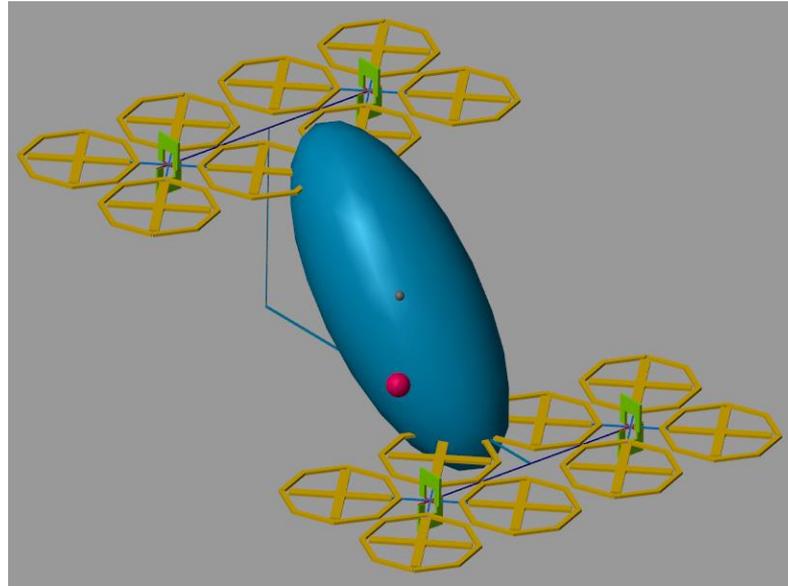
¿Cómo se ha desarrollado? Modelado en MATLAB / Simulink

Validación Simscape y puesta en marcha

Puesta en marcha. Primeros vuelos

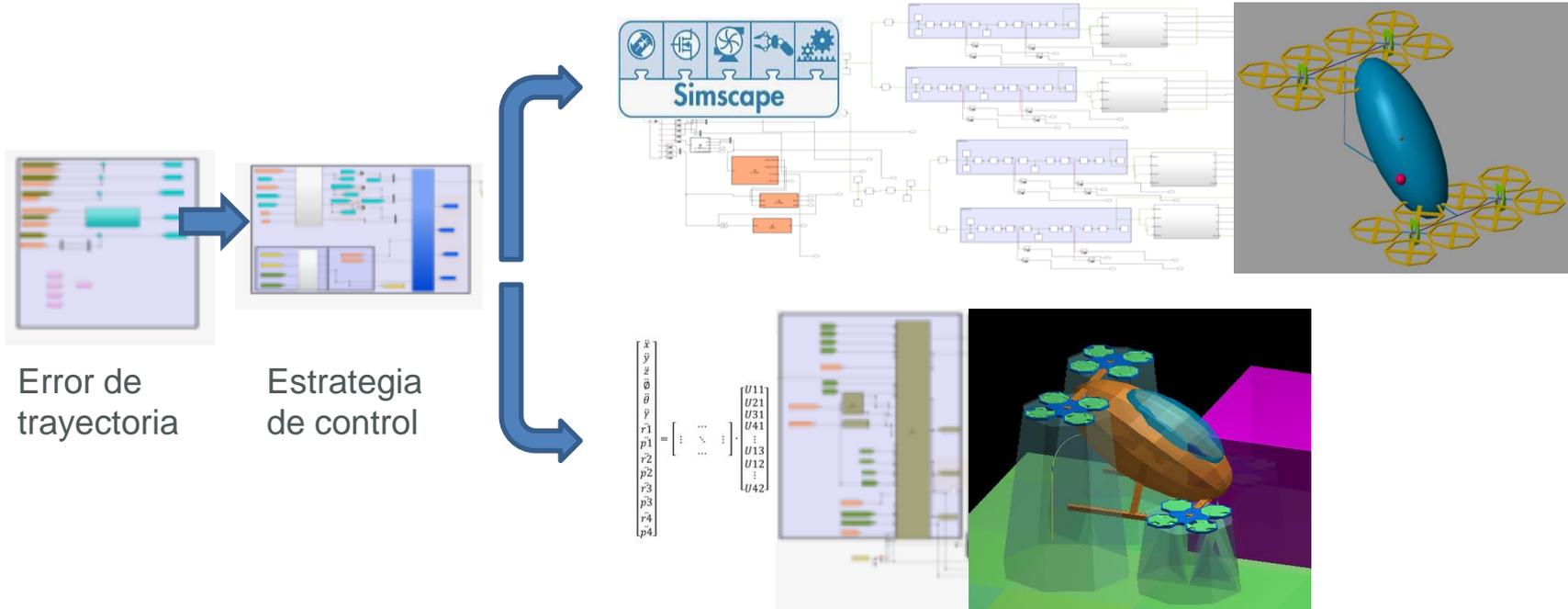
# VALIDACIÓN DE LA PLANTA

- MODELO EN ECUACIONES DIFERENCIALES (E.D.):
- En el modelo en E.D. se realizan simplificaciones que deben ser aprobadas.
- Simscape se perfila como la mejor opción para comparar el modelo de ecuaciones diferenciales desarrollado con un modelo mecánico.
  - El modelo en E.D. y Simscape comparten la plataforma Simulink
  - Conexión directa con las estrategias de control en Simulink: permite enviar las mismas órdenes a los motores en cada instante de tiempo.



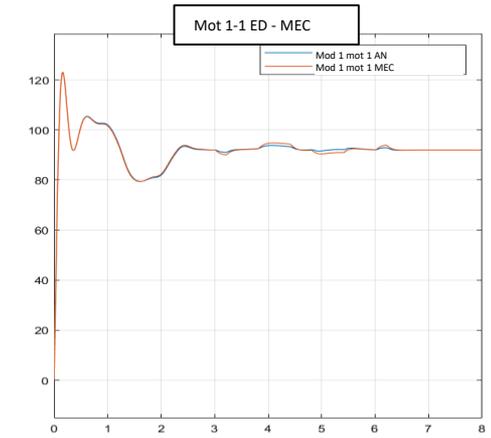
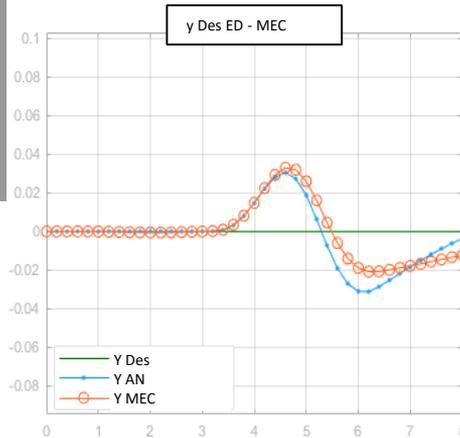
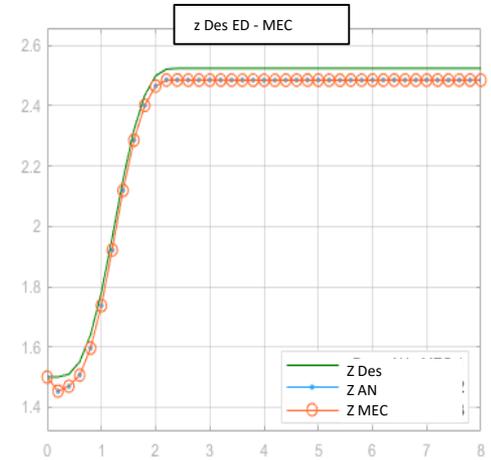
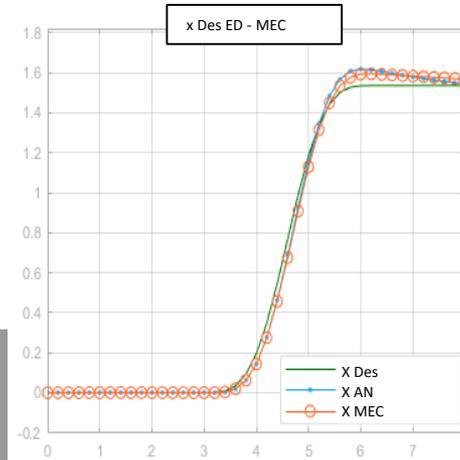
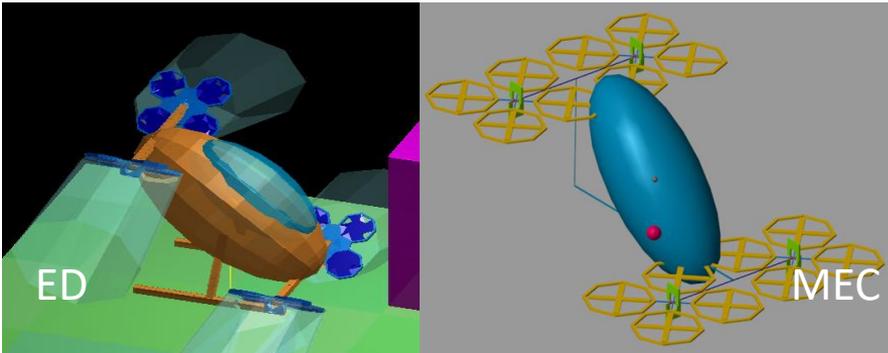
# VALIDACIÓN DE LA PLANTA

- Dos modelos:
  - Modelo de planta con ecuaciones dinámicas (ED)
  - Modelo Simscape Multibody (MEC)
- Una misma orden de trayectoria comandada en ambos modelos
- Misma estrategia de control y mismas ganancias en ambos modelos
- Se compara respuesta de motores y error de seguimiento



# VALIDACIÓN DE LA PLANTA

- Respuesta observada en:
  - ED: modelo ecuaciones diferenciales
  - MEC: modelo mecánico Simscape
- Conclusión:
  - Validación del modelo ED correcta



# *Tecnalia Electric Aircraft*

¿Qué hemos hecho en MATLAB?

¿Por qué? Contexto general de la nueva aeronáutica

¿Cómo funciona? Plataforma simulación sistema vuelo

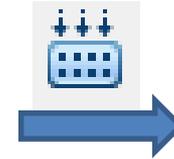
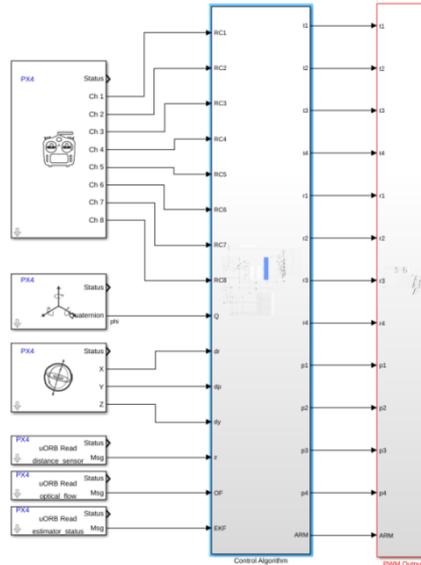
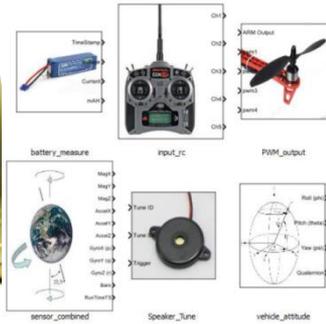
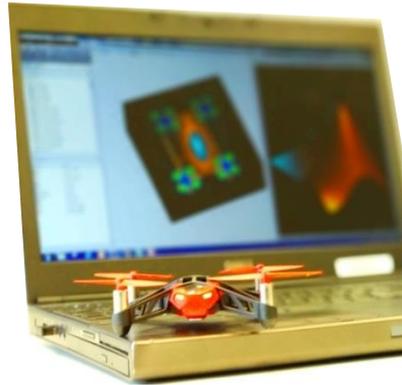
¿Cómo se ha desarrollado? Modelado en MATLAB / Simulink

Validación Simscape y puesta en marcha

Puesta en marcha. Primeros vuelos

# PUESTA EN MARCHA Y VALIDACIÓN

- PX4 Autopilots Support from Embedded Coder
- Compilación y puesta en marcha
- De modelo matemático a prototipo físico
- **Plataforma de simulación y validación de nuevos sistemas de vuelo de propulsión eléctrica distribuida / múltiple.**
- **“De simulación a vuelo real”**
- **Las optimizaciones de diseño (consumo, respuesta, etc ...) se verifican directamente**
- **Minimiza tiempos de desarrollo**
- **Primer día: vuelo en hovering**



# PUESTA EN MARCHA Y VALIDACIÓN





Visita nuestro blog:  
<http://blogs.tecnalia.com/inspiring-blog/>



[www.tecnalia.com](http://www.tecnalia.com)