



**UNIVERSIDAD
DE LA RIOJA**

URpilot:

una controladora de vuelo flexible para UAVs de ámbito profesional

Javier Rico Azagra

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Universidad de La Rioja

10 de junio de 2024

Índice



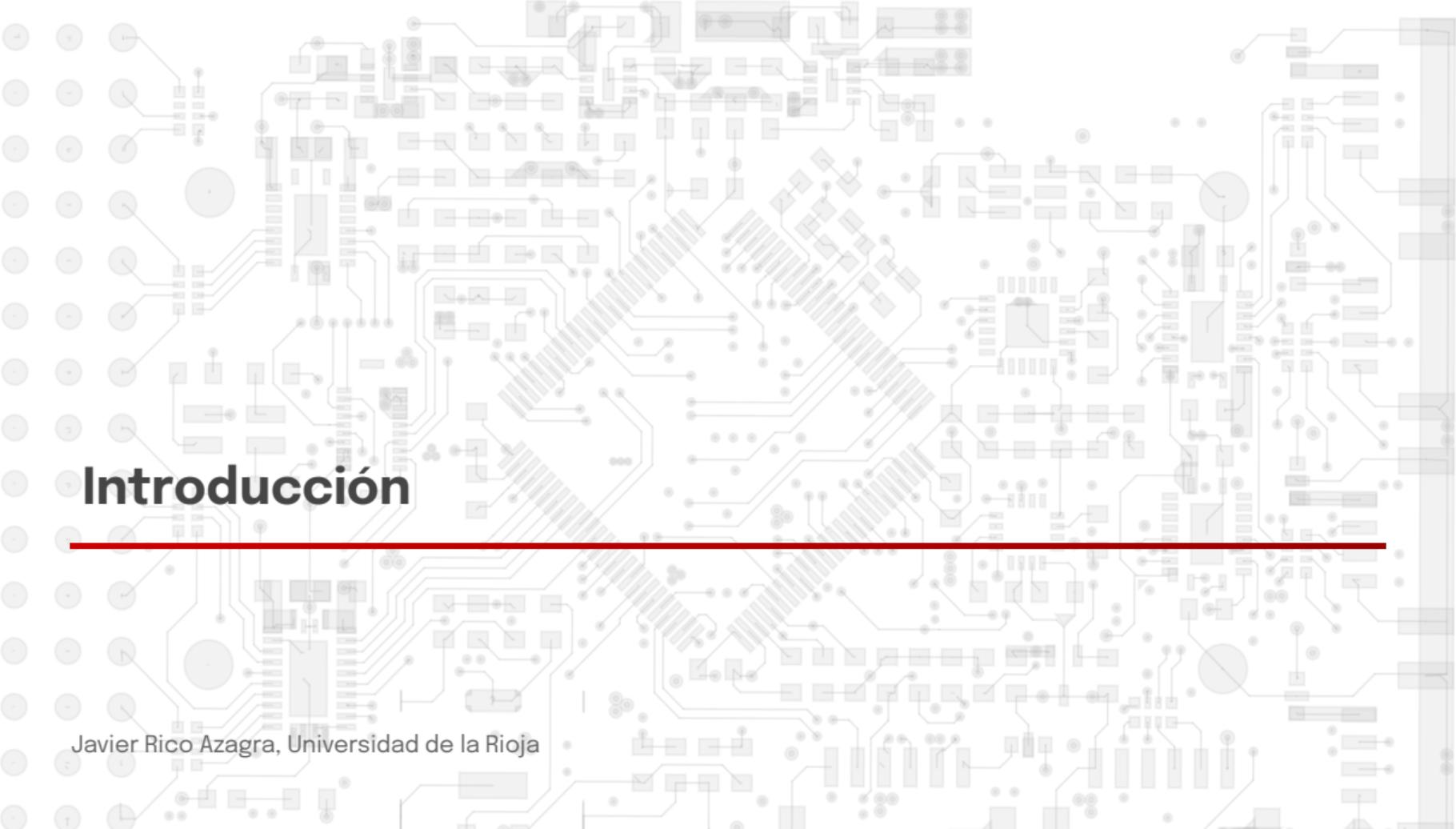
1. Introducción

2. Hardware de la controladora de vuelo

3. RTOS y sistema de estimación

4. Sistema de control

5. Conclusiones y trabajos futuros



Introducción

Javier Rico Azagra, Universidad de la Rioja

Objetivo de la presentación



- Presentar la controladora de vuelo URpilot y las líneas de investigación actuales
- Los resultados presentados se han generado en el desarrollo del proyecto:
«URpilot: Sistema de control de vuelo para UAVs de ámbito profesional»
- Financiado (84.587,54 € / 153.796,33 €) por :



**UNIVERSIDAD
DE LA RIOJA**



Gobierno de La Rioja
www.larioja.org

ader

Agencia de Desarrollo
Económico de La Rioja



Unión Europea

Fondo Europeo
de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"

Equipo de trabajo



En el trabajo han participado (4 + 1) investigadores del grupo de investigación en ingeniería de control «ICON» de la Universidad de La Rioja



Lineas de investigación:

- Control robusto → Quantitative Feedback Theory.
- Sistemas multilazo

¿Cómo hemos llegado hasta aquí?





¿Por qué quisimos desarrollar nuestra controladora de vuelo?

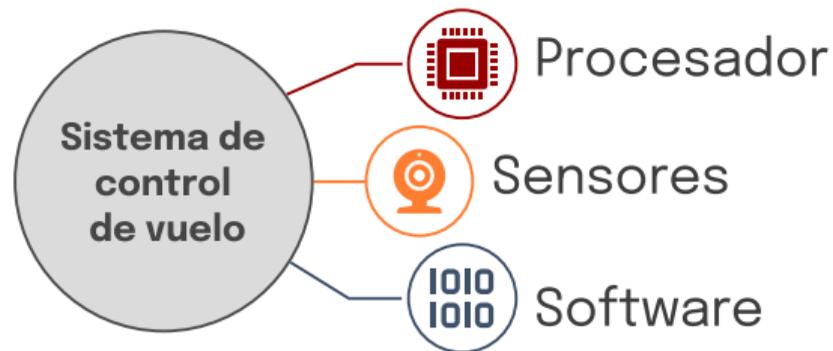
- Entorno cambiante → surgían nuevas plataformas cada poco tiempo
- Diversos *firmware* complejos
- Nada se adaptaba a nuestras necesidades
- **Necesitábamos estabilidad**
- Queríamos prototipar rápido integrando con Matlab-Simulink®



Objetivo del proyecto

- Desarrollo de un sistema de control de vuelo destinado al ámbito profesional

¿Qué es el sistema de control de vuelo?



Características

- Simple
- Robusto
- Escalable
- Flexible
- Mínima cantidad de *software*



Hardware de la controladora de vuelo

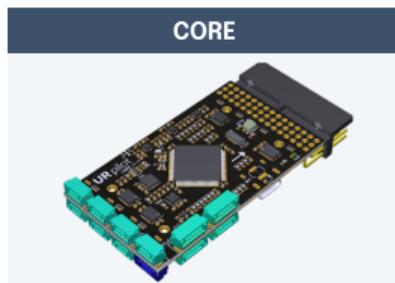
Javier Rico Azagra, Universidad de la Rioja

Hardware de la controladora de vuelo



Solución adoptada:

- Sistema de altas prestaciones
- Arquitectura modular → core + flex
- Capacidad de expansión
- Redundancia sensores
- Desacoplamiento mecánico

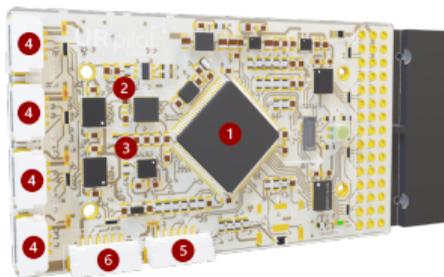


Unidad principal «Core»

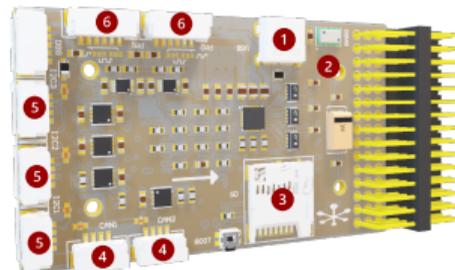


Características de la unidad principal:

- Encargada de gobernar el sistema
 - Incorpora el microcontrolador
 - Dispone de un paquete de sensores
 - Puede emplearse en solitario
-
- Diseño de PCB seis capas
 - Componentes SMD 06 y 04
 - Ensamblado a mano en la UR



- 1 STM32F767VGT6
- 2 ICM20689
- 3 IST8310
- 4 4 X UARTS
- 5 SPI
- 6 Telemetría



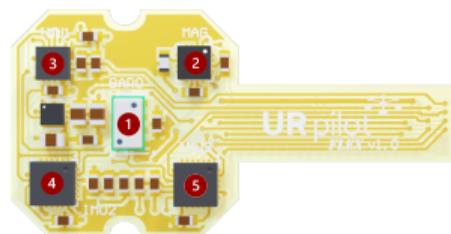
- 1 USB C
- 2 MS561101
- 3 SD
- 4 2 X CAN
- 5 3 X I2C
- 6 2 X PM

Unidad sensorial «Flex»



Características de la Unidad sensorial:

- Incorpora sensores redundantes
- Permite mejorar la estimación de estado
- Puede modificarse fácilmente para incorporar nuevos sensores

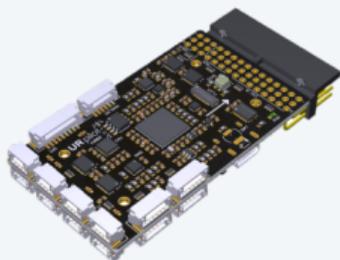


- 1 MS56110M
- 2 IST8310
- 3 ICM20602M
- 4 ICM20689
- 5 MPU600

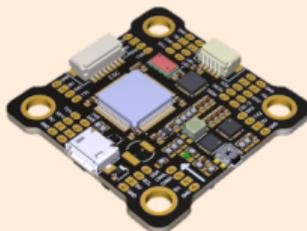
Otros dispositivos desarrollados



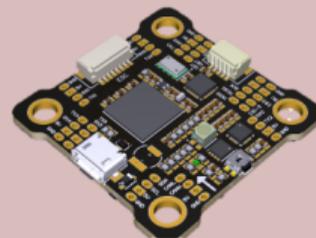
CORE PRO



RACING



RACING PRO



Accesorios que completan amplían las prestaciones del sistema

- GPS
- Bluetooth
- Unidad sensorial
- Power module
- Power module inteligente
- Hub CAN

UAVs en los que hemos embarcado el sistema



- UAV de 100 mm de envergadura. **Desarrollado y fabricado en la UR**
- UAVs de pequeño tamaño (*Diatone Roma v5*)
- Plataforma de ensayos sin desplazamiento
- Otros.

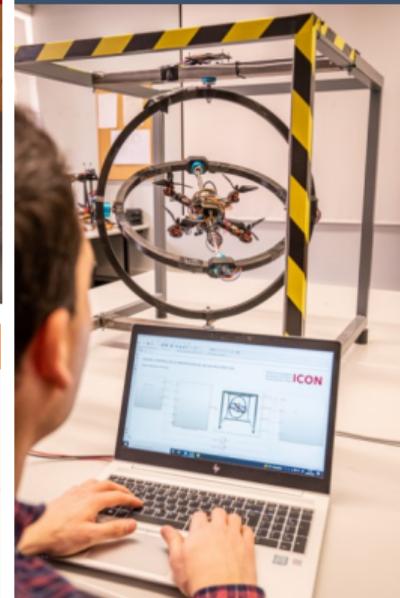
UAV PROFESIONAL



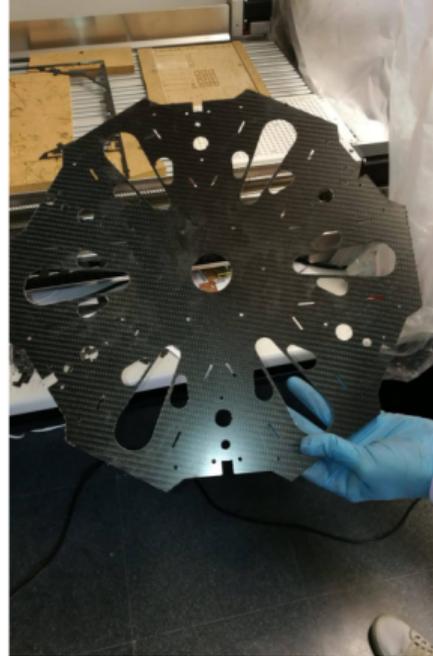
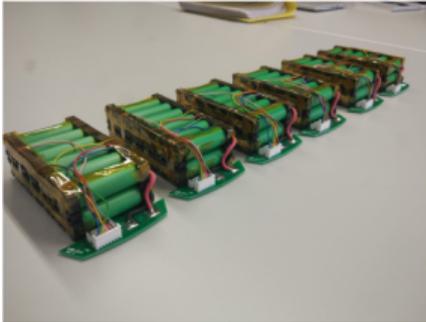
UAVs PEQUEÑOS



PLATAFORMA DE PRUEBAS



UAV desarrollado



The background of the slide is a light gray circuit board pattern. A large, semi-transparent 'X' shape is overlaid on the board, formed by a grid of lines. The text 'RTOS y sistema de estimación' is centered horizontally and partially overlaid by the 'X'.

RTOS y sistema de estimación

Javier Rico Azagra, Universidad de la Rioja

RTOS - Real Time Operating System



¿Que es el RTOS?

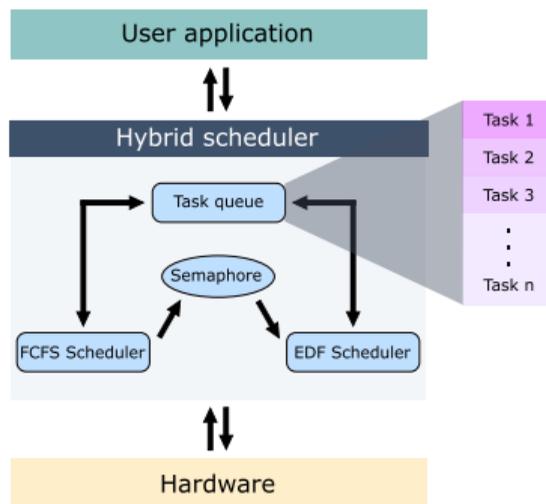
- El sistema operativo de tiempo real es el encargado de ejecutar las tareas de bajo nivel y de gestionar los recursos *hardwate*
- Su optimización es clave para un adecuado funcionamiento del sistema
- Existen tres alternativas:
 - RTOS genéricos como *freeRTOS*
 - Partir de un proyecto existente: *Arducopter, PX4, Betaflight*.
 - Desarrollo de solución a medida
- Se opta por desarrollar un RTOS a medida [Rico, 2022]

RTOS desarrollado



Características del *scheduler* empleado:

- Emplea una arquitectura híbrida
- El *scheduler* FCFS se encarga de las tareas de tiempo real
- El *scheduler* EDF se encarga de las tareas con prioridad dinámica
- Un semáforo gestiona la integración de los dos sub-sistemas
- Las tareas y las capas (*RTOS layer*, *Middleware layer*, *Flight control layer*) deben estar bien definidas





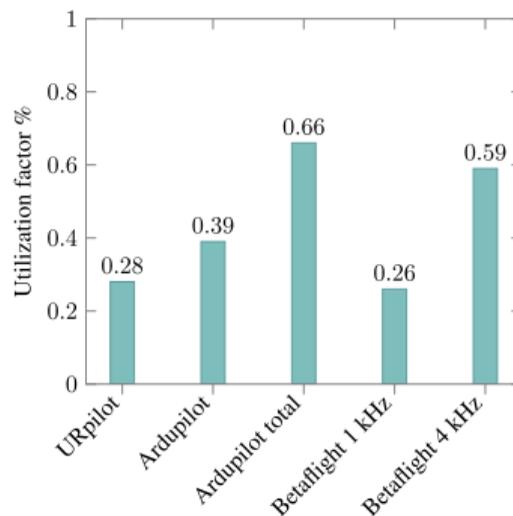
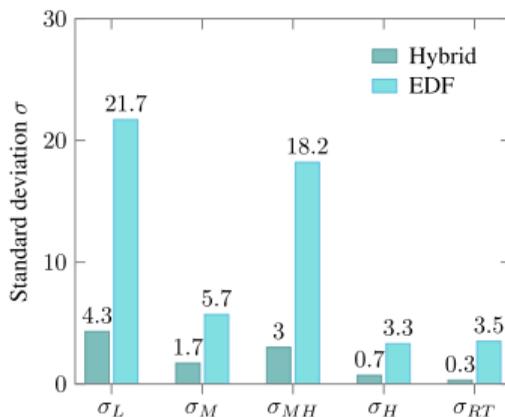
Parametrización de tareas en el RTOS

Task	Task name	Priority	Period (ms)	WCET (μ s)	σ
τ_1	Scheduler analysis	Low	100	10	5.02
τ_2	Stack	Low	100	7	4.95
τ_3	ADC	Low	1000	18	4.61
τ_6	Background barometer	High	10	50	0.66
τ_7	Foreground barometer	Medium-high	20	50	1.13
τ_8	Background magnetometer	High	10	350	0.66
τ_{11}	Background IMU	Real time	1	57	0.08
τ_{12}	Foreground IMU	Real time	2	37	0.55
τ_{13}	Calibration IMU	Low	50	22	3.48
τ_{14}	GPS	Medium	20	355	1.43
τ_{15}	Background radio	Medium	10	21	1.60
τ_{16}	Foreground radio	Medium	20	53	1.85
τ_{18}	Angle rate control	Real time	2	83	0.08
τ_{19}	Angle control	High	2	71	0.55
τ_{20}	Position control	High	10	11	0.76
τ_{21}	State machine	Low	20	11	4.83



Resultados del RTOS

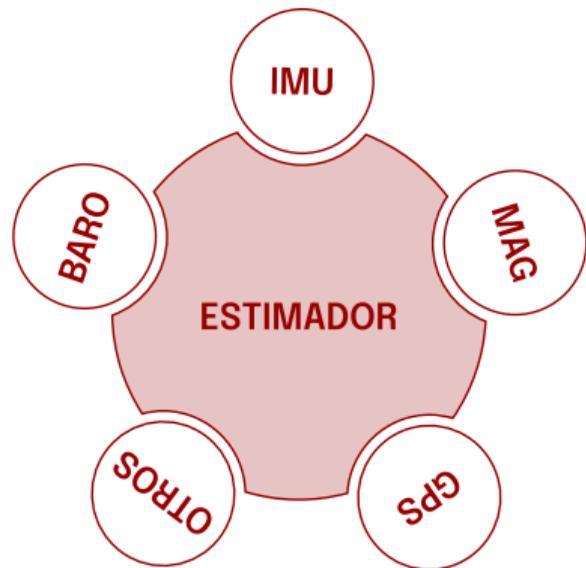
- Se minimiza la desviación de los periodos de ejecución de las tareas (baja, media, media-alta, alta y tiempo real)
- El factor de utilización se sitúa en el 26%, inferior al resto de alternativas



Sistema de estimación



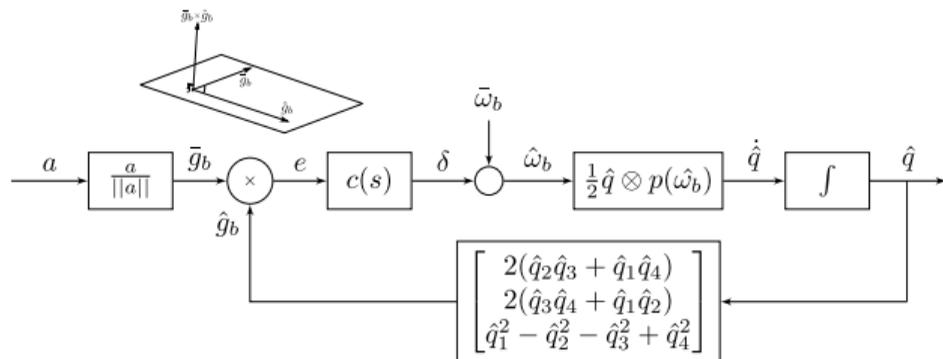
- Fusionar la información de los sensores para determinar el estado del UAV
- Es fundamental para el sistema de control
- Problema complejo
- Alternativas:
 - Complementary Filter
 - Extended Kalman Filter
 - Madgwick Orientation Filter [Rico-Azagra, 2016]
 - Mahony Orientation Filter
 - Etc.



¿Como funcionan estos estimadores simples?



- La actitud se obtiene por integración de las medidas de los giroscopios
- El acelerómetro permite estimar el vector gravedad
- El vector gravedad se estima a partir de la actitud
- El producto vectorial permite determinar la rotación necesaria para corregir las velocidades



Objetivos planteados para el nuevo estimador



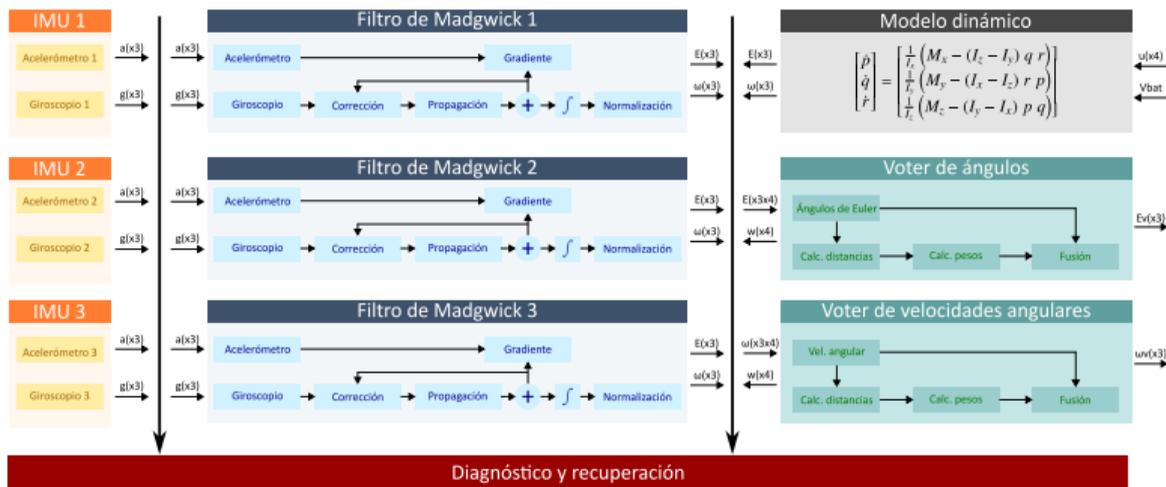
Objetivos planteados para el estimador:

- Mantenga la sencillez y robustez
- Fusione la información de sensores redundantes
- Sistema tolerante a fallos
- Reducción del ruido en la estimación

Solución adoptada:

- Estimadores en paralelo (3 IMUs) + Modelo
- Sistema de votación tolerante a fallos
- Ponderación de medias basada en las características de los sensores

Arquitectura del estimador tolerante a fallos



Sistema de votación



- Se comparan las diferencias entre los estimadores

$$d_{ik} = |\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_i| \quad \text{s.t.} \quad k \neq i \quad (1)$$

- Se cuantifica un umbral blando para cuantificar la discrepancia

$$s_{ik,j} = \begin{cases} 1 & \text{si } d_{ik,j} \leq a_j \\ \left(\frac{n_j}{n_j-1}\right) \left(1 - \frac{d_{ik,j}}{n_j a_j}\right) & \text{si } a_j < d_{ik,j} < n_j a_j \\ 0 & \text{si } d_{ik,j} \geq n_j a_j \end{cases} \quad (2)$$

- La selección del umbral a_{ij} y el parámetro n_j son cruciales, en este caso

$$a_j = \min \sigma_{ij}, \quad n_j = 5 \quad (3)$$

Sistema de votación

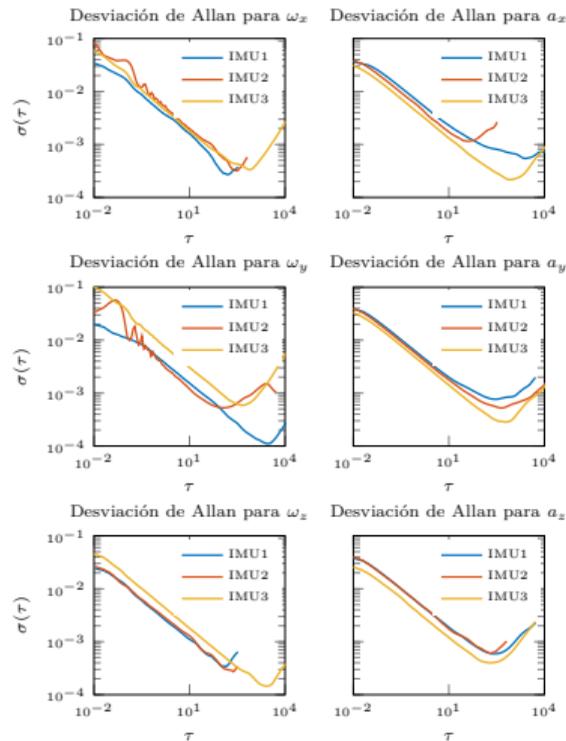


- Se asignan pesos en función $s_{ik,j}$ y de las características del sensor

$$w_{i,j}^o = \frac{\sum_{k=1, k \neq i}^4 s_{ik,j}}{3} \frac{1}{N_{i,j} B_{i,j}}. \quad (4)$$

- La estimación final se obtiene con la media ponderada

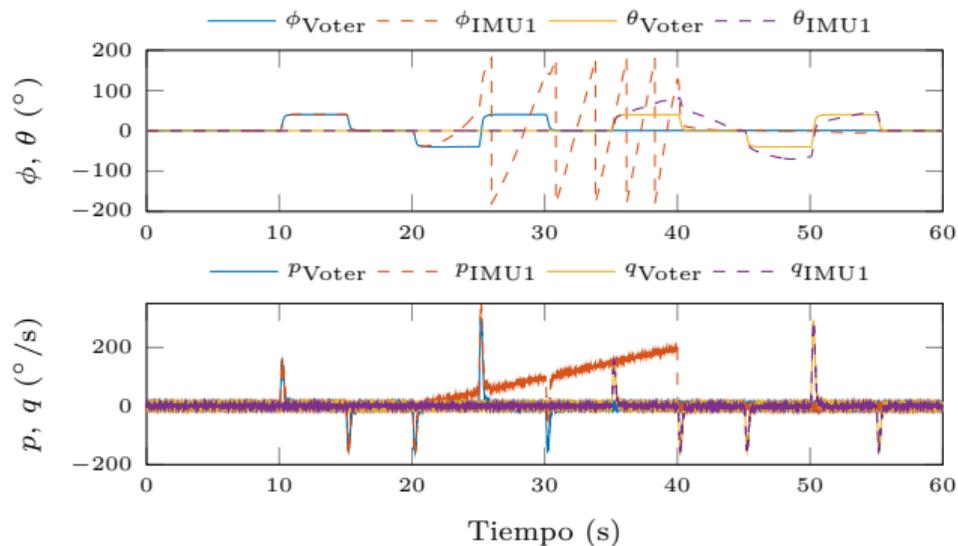
$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^4 x_{i,j} w_{i,j}^o}{\sum_{i=1}^4 w_{i,j}^o}. \quad (5)$$



Resultados del sistema tolerante a fallos



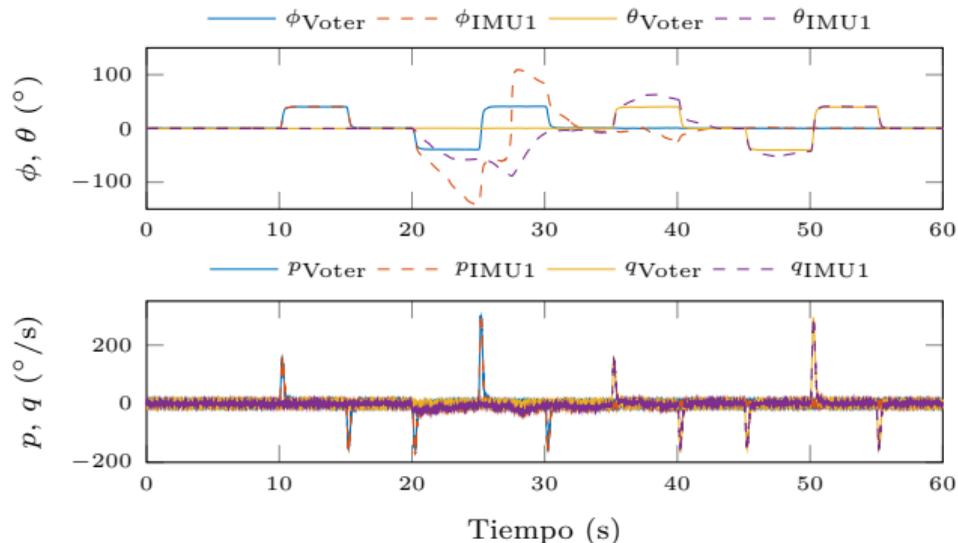
- Escenario 1: deriva en el giroscopio de la IMU 1



Resultados del sistema tolerante a fallos



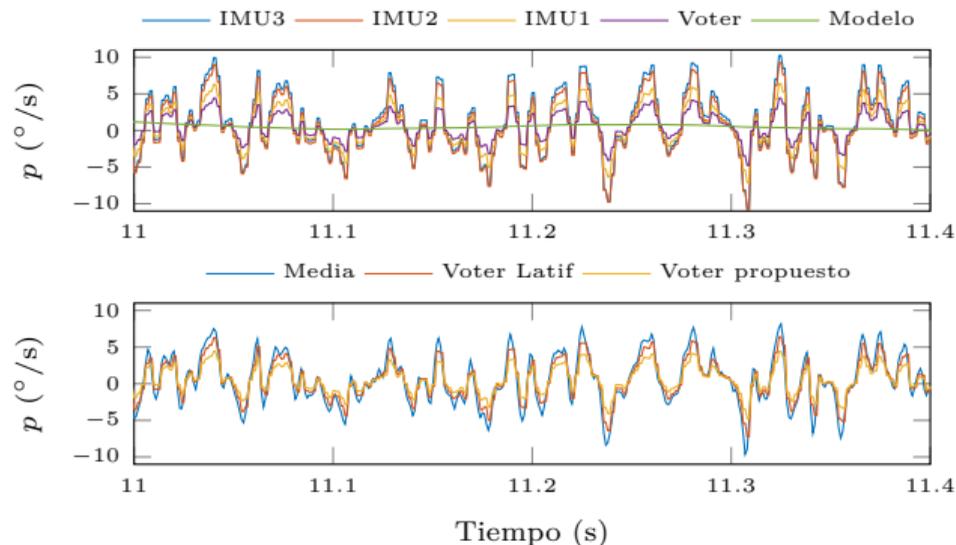
- Escenario 2: señal aleatoria con media cero en la IMU 1 ($\sigma^2 = 5 \text{ (m/s}^2\text{)}^2$) para los acelerómetros y $\sigma^2 = 8000 \text{ (deg/s)}^2$ para los giroscopios).





Nivel de ruido en la señal fusionada

- Arriba. Nivel de ruido aportado por cada estimador y el sistema propuesto
- Abajo. Comparativa con la media, el Voter propuesto y el Voter Latif (2024)

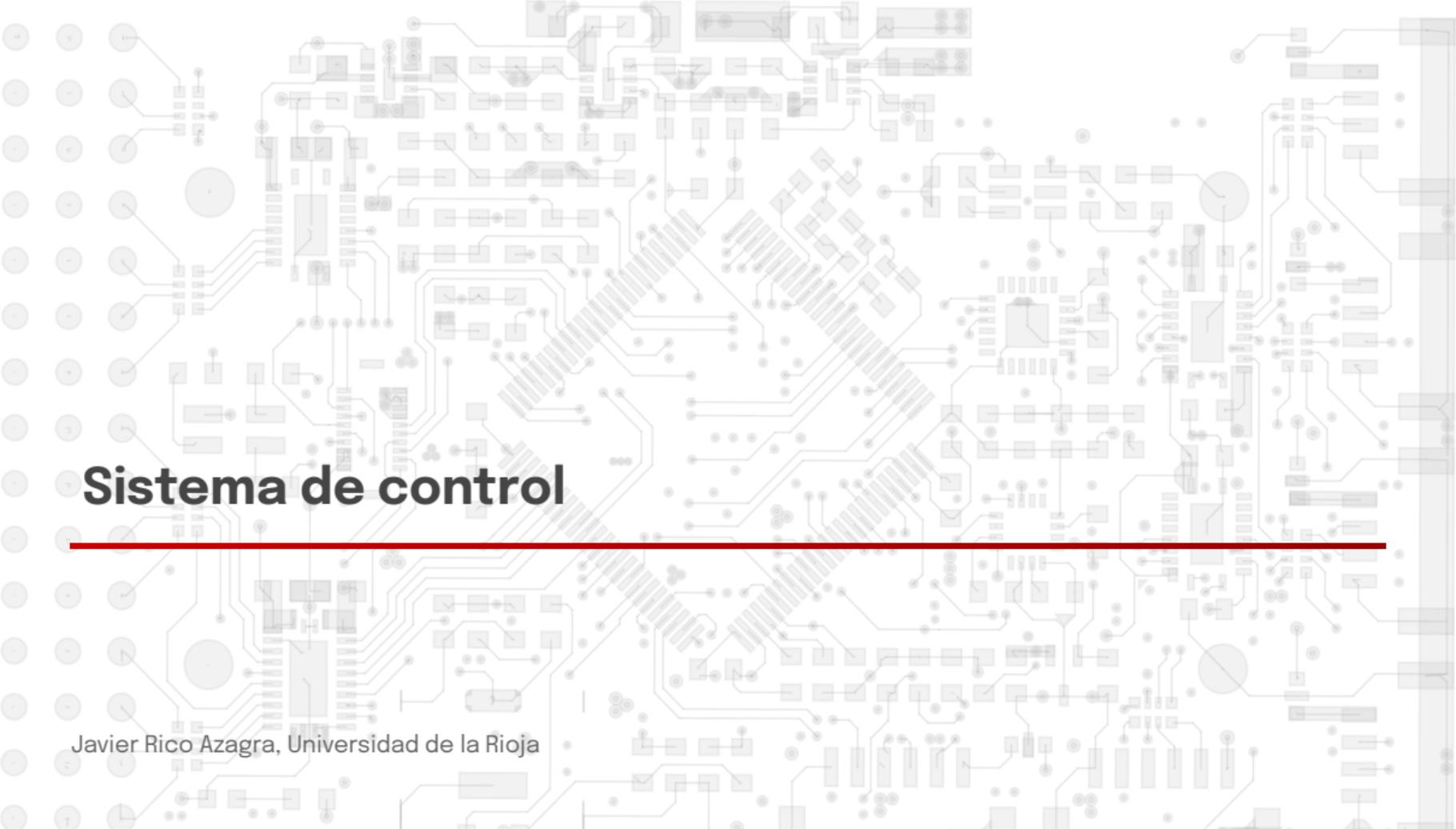




Análisis de resultados

- Detección y corrección de fallos en todos los escenarios contemplados
- Reducción de la varianza del ruido de las estimaciones
 - 50% al 62% con respecto al empleo de una IMU virtual que emplea valores medios.
 - 30% y el 37% con respecto a la propuesta de Latif-Hamadi

Algoritmo	σ^2 -Ángulo (deg) ²		σ^2 -Vel.Ang. (deg/s) ²	
	ϕ	θ	p	q
A0 (propuesto)	0.07	0.05	1.88	1.38
A1 (media arit.)	0.16	0.10	3.42	3.64
A2 (Latif-Hamadi)	0.10	0.08	2.83	1.97



Sistema de control

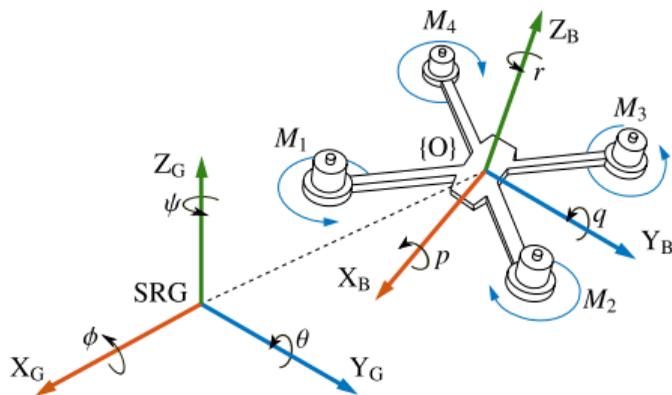
Javier Rico Azagra, Universidad de la Rioja

Control de multirrotores



Características del sistema a gobernar:

- Sistema sub-actuado, 4 acciones de control para gobernar 6 variables
- Diferentes modos de operación
- Dinámica bien definida con un acoplamiento entre ejes bajo
- Incertidumbre paramétrica debida al estado de la batería y a la carga transportada



Control de multirrotores



Soluciones empleadas anteriormente:

- Control jerárquico con lazos anidados \rightarrow velocidad, ángulo, posición
- Estrategias de control robusto para garantizar la integridad del equipo
- No hay una pauta clara para el diseño en cascada
- Dificultad para el seguimiento de referencias en modo rampa

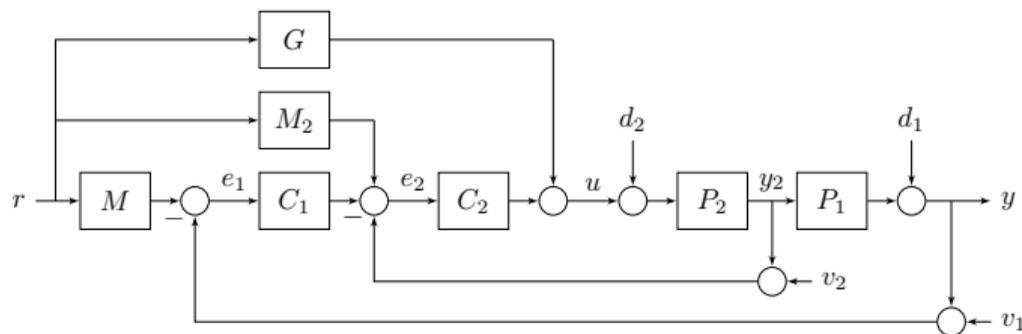
Objetivos propuestos para los nuevos desarrollos:

- Empleo de arquitecturas Model-Matching en cascada
- Reparto frecuencial de la banda de control
- Reducción de la amplificación de ruidos



Control Model - Matching en cascada

- Arquitectura MM en cascada presentada en [Rico-Azagra, 2023]



- El error de seguimiento si se fija $M_2 = M/P_1$ es:

$$\frac{e_1}{r} = \frac{M + ML_1 + ML_2 - ML_1 - M_2 C_2 P_1 P_2 - GP_1 P_2}{1 + L_1 + L_2} = \frac{M - GP_1 P_2}{1 + L_1 + L_2} \quad (6)$$

donde: $L_1 = C_1 C_2 P_1 P_2$, $L_2 = C_2 P_2$ y $L_t = L_1 + L_2$.

Control Model - Matching en cascada



- La especificación de seguimiento de referencias

$$\left| \frac{e_1}{r} \right| = \left| \frac{M - GP_1P_2}{1 + L_1 + L_2} \right| \leq B, \forall \mathbf{q} \in \mathcal{Q}, \quad (7)$$

puede satisfacerse buscando un controlador G que minimice

$$\min\{|M - GP_1P_2|\}, \forall \mathbf{q} \in \mathcal{Q}, \quad (8)$$

o aumentando la ganancia de la realimentación $|L_t| \uparrow$

- Ruido total amplificado

$$V_t^2 = V_{t_1}^2 + V_{t_2}^2 = \int_0^\infty \left| \frac{C_1(j\omega)C_2(j\omega)}{1 + L_t(j\omega)} \right|^2 \Phi_1(\omega) d\omega + \int_0^\infty \left| \frac{C_2(j\omega)}{1 + L_t(j\omega)} \right|^2 \Phi_2(\omega) d\omega,$$



Control Model - Matching en cascada

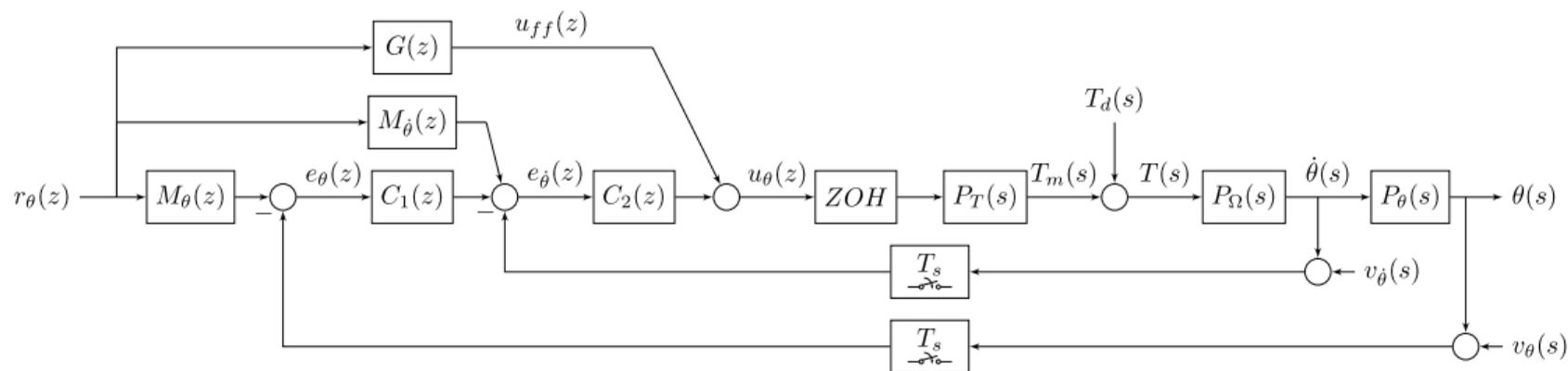
- El diseño busca minimizar $|L_t|$, para ello se emplean dos pasos
 1. Se diseña L_t para que exista G
 2. Se diseña G para satisfacer la especificación (7)
- La condición para la existencia de G se obtiene empleando el procedimiento propuesto en [Rico-Azagra, 2021]

$$\left| \frac{AG_f + B}{C + DG} \right| \leq W, \rightarrow \left| G_f + \frac{B}{A} \right| \leq W \frac{|C + DG|}{|A|}. \quad (9)$$

Dadas dos combinaciones u y v dentro del espacio de la incertidumbre, existe G si se cumple

$$\left| \frac{B_u}{A_u} - \frac{B_v}{A_v} \right| \leq W \frac{|C + D_u G|}{|A_u|} + W \frac{|C_v + D_v G|}{|A_v|}. \quad (10)$$

Aplicación al control de actitud

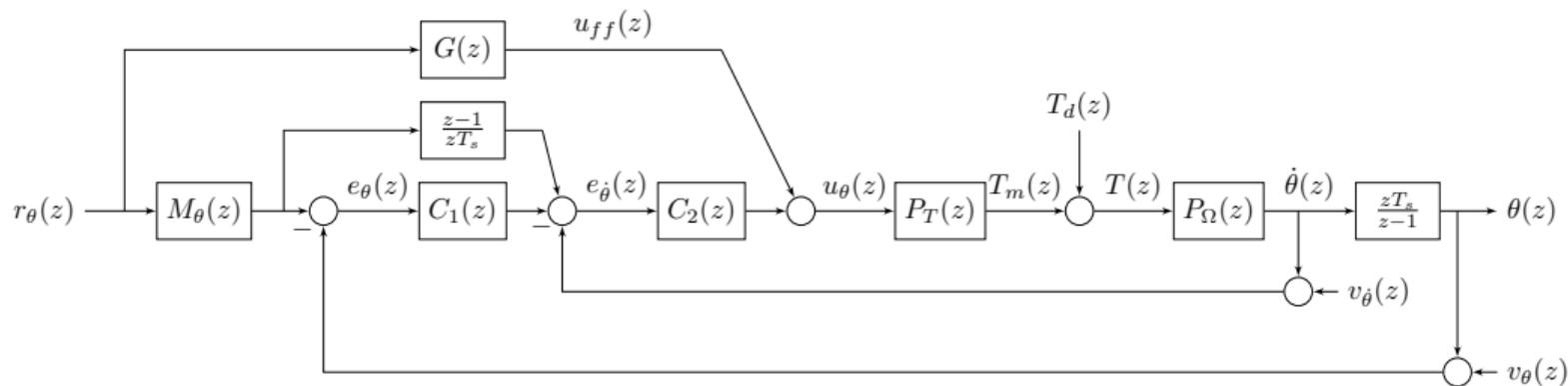


$$P_T(s) = \frac{4d_\theta k}{(\tau s + 1)}; \quad k \in [6.8170, 11.3616], \quad \tau = 0.05, \quad d_\theta = 0,067 \quad (11)$$

$$P_\Omega(s) = \frac{180/\pi}{I_{yy}s}; \quad I_{yy} \in [0, 75, 1, 25] \times 0,025 \quad (12)$$

$$P_\theta(s) = \frac{1}{s} \quad (13)$$

Estructura de control en tiempo discreto



$$P_T(z; \mathbf{q}) = \mathcal{Z} \{ \text{ZOH}(s) P_T(s; \mathbf{q}) \}; \quad \mathbf{q} \in \mathcal{Q}, \quad (14)$$

$$P_\Omega(z; \mathbf{q}) = \frac{180/\pi}{I_{xx}} \frac{zT_s}{z-1}; \quad \mathbf{q} = [k, I_{xx}] \in \mathcal{Q}, \quad (15)$$

$$P_\theta(z) = \frac{T_s z}{z-1}. \quad (16)$$

Especificaciones de control en lazo cerrado



- Seguimiento robusto de referencias

$$\left| \frac{M_\theta(z) - G(z)P_T(z)P_\Omega(z)P_\theta(z)}{1 + C_2(z)P_T(z)P_\Omega(z) + C_1(z)C_2(z)P_T(z)P_\Omega(z)P_\theta(z)} \right| \leq B_r(\omega), \quad \forall \mathbf{q} \in \mathcal{Q}, \quad (17)$$

Se emplea el modelo de seguimiento ($t_{s2\%} = 1$)

$$M_\theta(z) = \frac{3.384e - 05}{(z^2 - 1.988z + 0.9884)}, \quad (18)$$

y la cota para el error se establece como

$$B_r(\omega) = \left| \frac{0.0969s(0.0125s + 1)}{(0.125s + 1)(0.375s + 1)} \right|_{s=j\omega}. \quad (19)$$

Especificaciones de control en lazo cerrado



- Estabilidad robusta ($B_{s_1}(\omega) = B_{s_2}(\omega) = 1,46 \rightarrow MF = 40^\circ$)

$$\left| \frac{C_1(z)C_2(z)P_T(z)P_\Omega(z)P_\theta(z)}{1 + C_2(z)P_T(z)P_\Omega(z) + C_1(z)C_2(z)P_T(z)P_\Omega(z)P_\theta(z)} \right| \leq B_{s_1}(\omega), \forall \mathbf{q} \in \mathcal{Q} \quad (20)$$
$$\left| \frac{C_2(z)P_T(z)P_\Omega(z)}{1 + C_2(z)P_T(z)P_\Omega(z)} \right| \leq B_{s_2}(\omega), \forall \mathbf{q} \in \mathcal{Q},$$

- Rechazo robusto de perturbaciones

$$\left| \frac{P_\Omega(z)P_\theta(z)}{1 + C_2(z)P_T(z)P_\Omega(z) + C_1(z)C_2(z)P_T(z)P_\Omega(z)P_\theta(z)} \right| \leq B_d(\omega), \forall \mathbf{q} \in \mathcal{Q}, \quad (21)$$

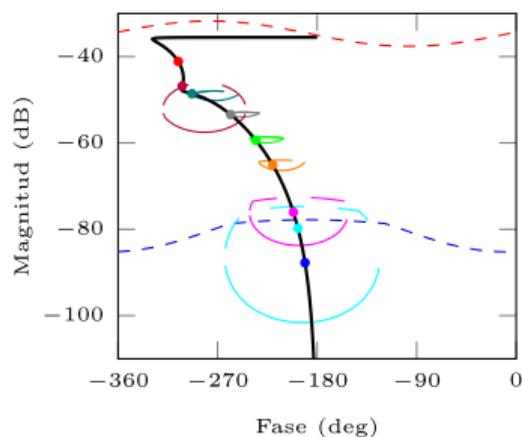
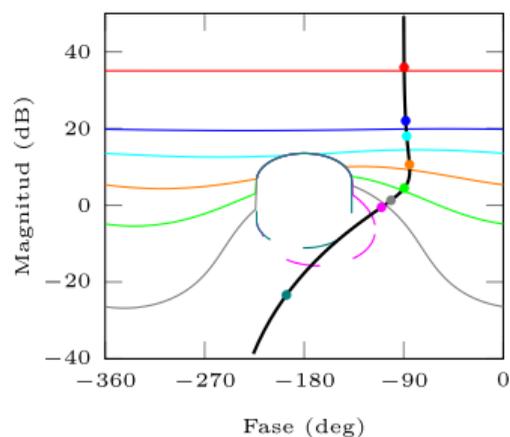
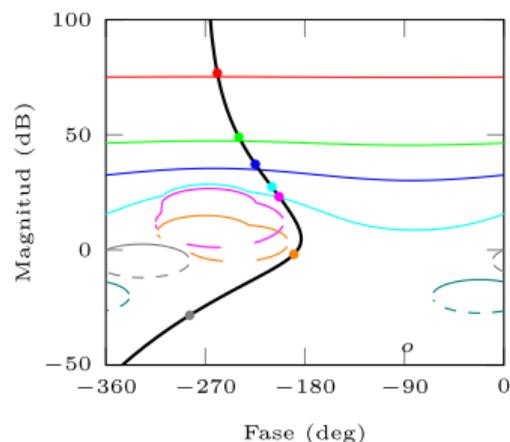
empleando la cota

$$B_d(\omega) = \left| \frac{k_d \omega_n^2 s}{(s + \omega_n)^2} \right|_{s=j\omega} = \left| \frac{32258s}{(s + 8)^2} \right|_{s=j\omega}. \quad (22)$$



Loop-Shaping de controladores

- El diseño de C_1 y C_2 se realiza de la forma habitual (C_2 en primer lugar)
- El punto crítico de estabilidad y los contornos asociados se desplazan
- Los *bounds* para G suelen tomar forma circular





Controladores resultantes

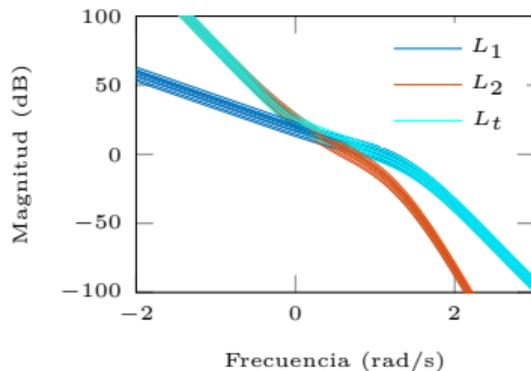
- Controladores de realimentación

$$C_1(z) = \frac{k_1 z(z - c_1)(z - c_2)}{(z - 1)(z - p_1)(z - p_2)}, \quad (23)$$

$$C_2(z) = \frac{k_2(z - c_3)}{(z - p_3)(z - p_4)}; \quad (24)$$

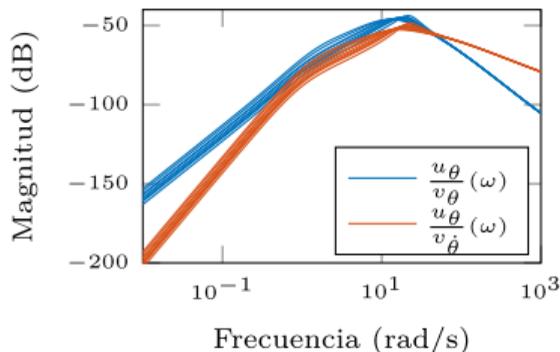
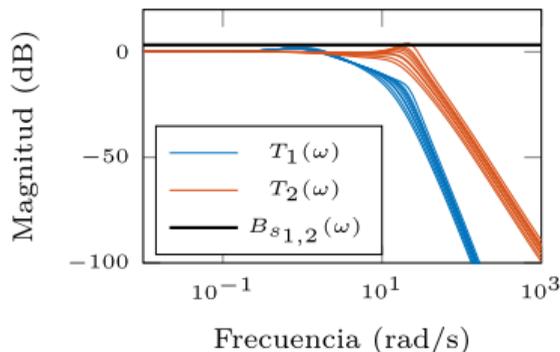
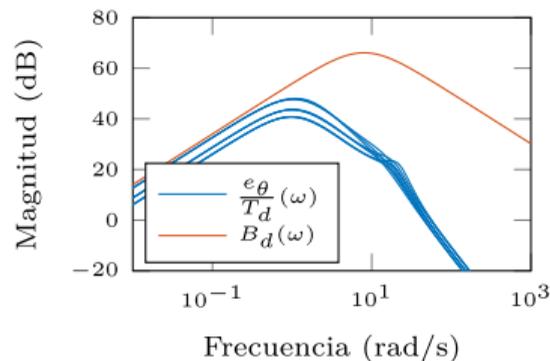
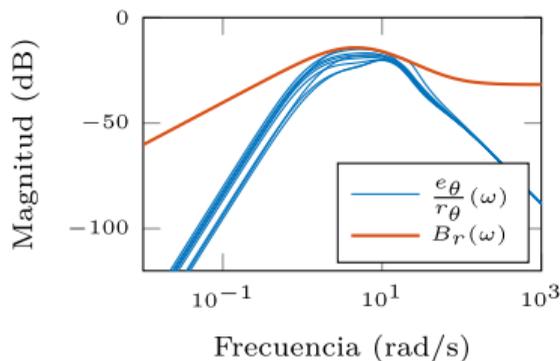
- Controlador de prealimentación

$$G(z) = \frac{k_3(z - 1)^2(z - \alpha_1 + j\beta_1)(z - \alpha_1 - j\beta_1)}{(z - p_5)(z - p_6)(z - \alpha_2 + j\beta_2)(z - \alpha_2 - j\beta_2)};$$

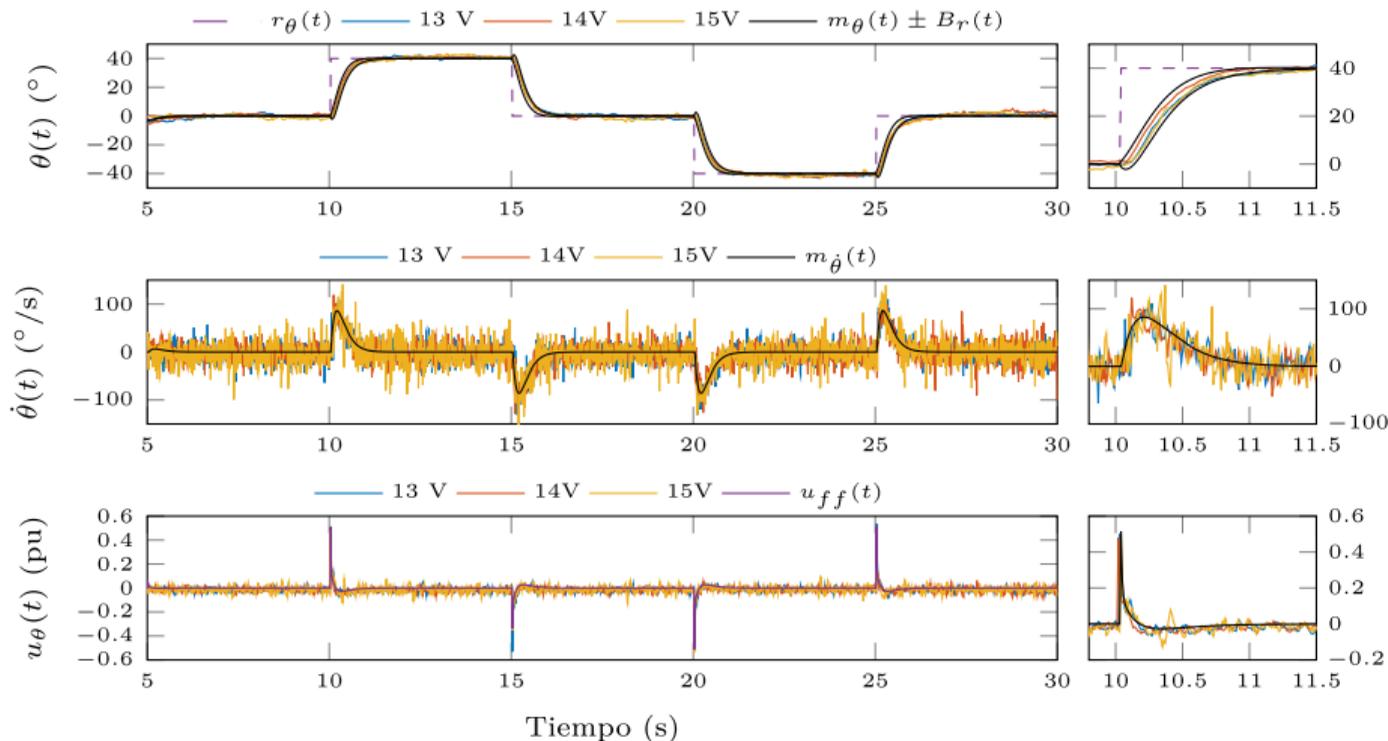


Véase como L_2 trabaja en alta frecuencia y L_1 en baja frecuencia ($\omega_{sw} \approx 1$)

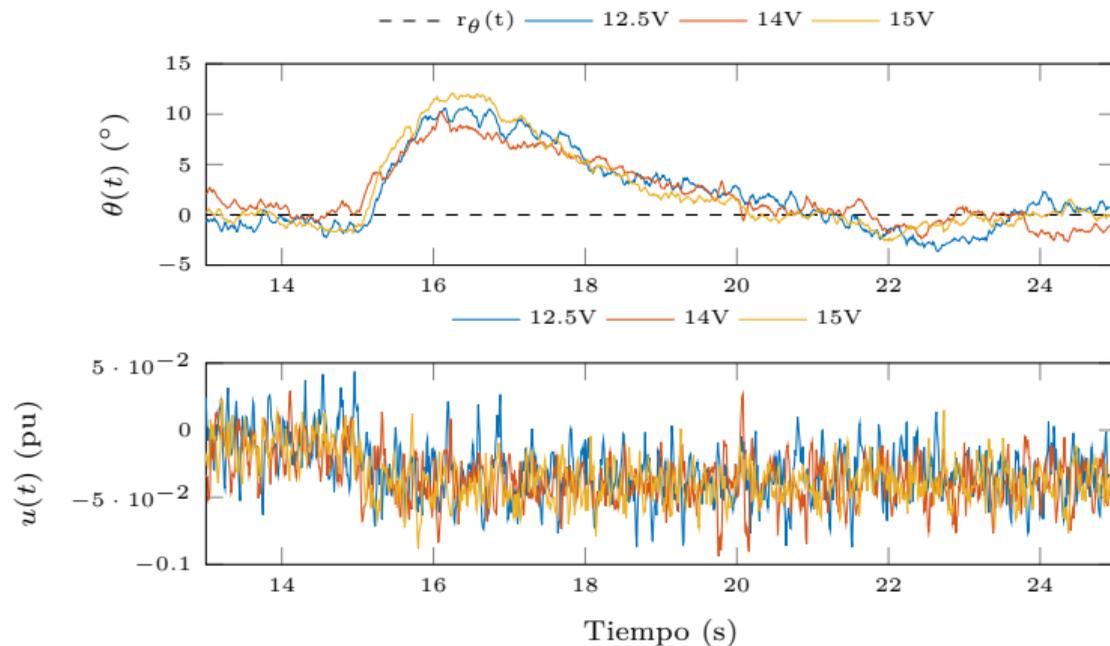
Cumplimiento de especificaciones



Seguimiento de referencias



Rechazo de perturbaciones





Conclusiones y trabajos futuros

Javier Rico Azagra, Universidad de la Rioja

Conclusiones



- El *hardware* desarrollado es flexible y adaptable
- El RTOS optimiza el empleo del *hardware* de la controladora de vuelo
- El estimador tolerante a fallos permite detectar y corregir problemas en los sensores, así como reducir el ruido en las medidas
- Las arquitecturas de control model-matching en cascada permiten alcanzar las especificaciones de diseño de forma robusta, repartiendo el esfuerzo de control entre los lazos y reduciendo la amplificación de ruidos.

Trabajos en curso y futuros



- Ajuste dinámico de los parámetros del sistema de votación
- Extensión del sistema tolerante a fallos para la estimación de la posición y altura
- Incorporación de la aceleración angular al sistema de control en cascada
- Desarrollo de nuevas especificaciones para el rechazo de perturbaciones
- Seguimiento de referencias para consignas de tipo rampa
- Extensión de las arquitecturas *model-matching* al control de posición



Publicaciones



J. Rico-Azagra y M. Gil-Martínez (2023)

Robust Cascade Control inside a New Model-Matching Architecture

Mathematics, 11, 2023, ID 2523.



J. Rico-Azagra, M. Gil-Martínez, R. Rico, S. Nájera y C. Elvira (2021)

A benchmark for orientation control of a multicopter in a three degrees-of-freedom rotation structure

RIAI - Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industria, 18(3), 2021, 265 - 276.



R. Rico, J. Rico-Azagra y M. Gil-Martínez (2022)

Hardware and RTOS Design of a Flight Controller for Professional Applications

IEEE Access, 12, 2022, 134870 - 134883.



J. Rico-Azagra y M. Gil-Martínez (2018)

Feedforward for robust reference tracking in multi-input feedback control

IEEE Access, 2021, 92553 - 92567.

Publicaciones II



 J. Rico-Azagra, M. Gil-Martínez, R. Rico P. Maisterra (2018)
Hardware and RTOS Design of a Flight Controller for Professional Applications
International Journal of Robust and Nonlinear Control, 28, 2018, 1116 – 1125.

 J. Rico-Azagra, M. Gil-Martínez, R. Rico P. Maisterra (2016)
Low-cost attitude estimation for a ground vehicle
Robot 2015: Second Iberian Robotics Conference: Advances in Robotics, 11, 2023, 121 – 132.
Feedforward for robust reference tracking in multi-input feedback control



**UNIVERSIDAD
DE LA RIOJA**

Muchas gracias por su atención

Javier Rico Azagra

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial
Universidad de La Rioja

10 de junio de 2024