



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# Control en red para seguimiento de trayectorias en vehículos autónomos con eficiencia de recursos

*Ángel M. Cuenca Lacruz*

Grupo de Comunicación y Control por Computador (**CO3**)  
Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial (**ai2**)  
Universitat Politècnica de València (**UPV**)

# Índice

- ✓ Contexto
- ✓ Resultados de los últimos años
- ✓ Siguietes pasos

# Índice

- ✓ Contexto
- ✓ Resultados de los últimos años
- ✓ Siguietes pasos

# Contexto

20+ años trabajando en control en red  
(**Networked Control Systems - NCS**)




Control Engineering Practice  
Volume 11, Issue 11, **November 2003**, Pages 1335-1348

ELSEVIER

Multirate control implementation for an integrated communication and control system ☆

Vicente Casanova  , Julián Salt













ISA Transactions  
Volume 151, **August 2024**, pages 377-390

ELSEVIER

Practice article

Remote path-following control for a holonomic Mecanum-wheeled robot in a resource-efficient networked control system

Rafael Carbonell <sup>a</sup>  , Ángel Cuenca <sup>a</sup>  , Julián Salt <sup>a</sup>  , Ernesto Aranda-Escolástico <sup>b</sup>  , Vicente Casanova <sup>a</sup>  

# Contexto

30+ publicaciones en revista sobre NCS

co<sup>3</sup>



J. Salt



A. Cuenca



V. Casanova



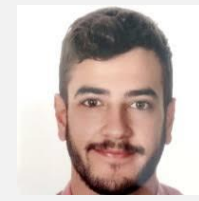
R. Pizá



J. Alcaina



R. Carbonell



G. Alite

ai2  
INSTITUTO DE  
AUTOMÁTICA E  
INFORMÁTICA  
INDUSTRIAL



P. Albertos



A. Sala



P. García



A. González

UNED



S. Dormido



E. Aranda

UNIVERSIDAD DE MURCIA  
1272



A. Baños

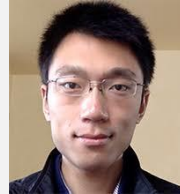
# Contexto

30+ publicaciones en revista sobre NCS

UC Berkeley



M. Tomizuka



W. Zhan



M. Zheng



C. Tang



J. Salt-Ducajú

TU/e  
EINDHOVEN  
UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY



M. Heemels



D. Antunes

NC STATE  
UNIVERSITY



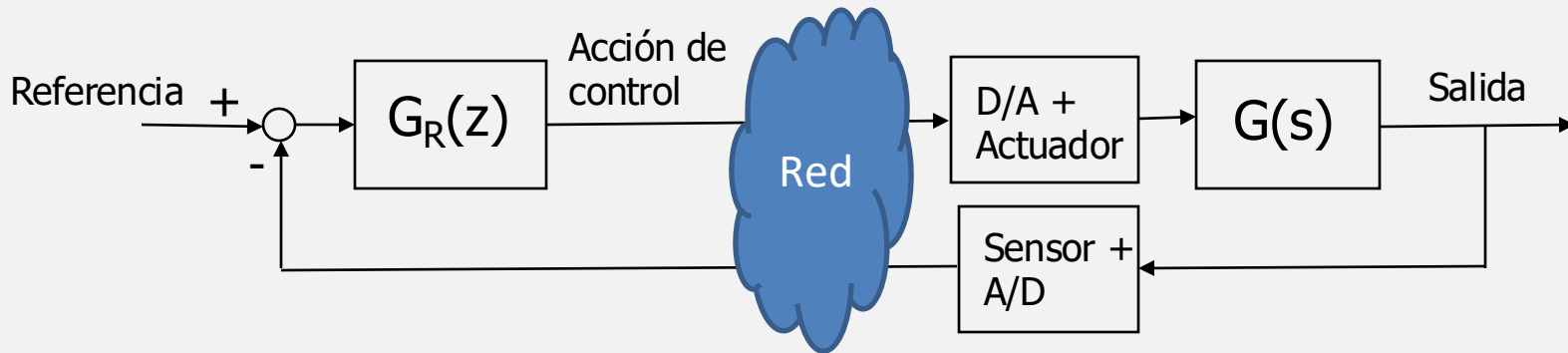
M-Y. Chow



U. Ojha

# Contexto

**NCS:** Sistema de control por computador que incluye un medio común (red inalámbrica) entre controlador y proceso

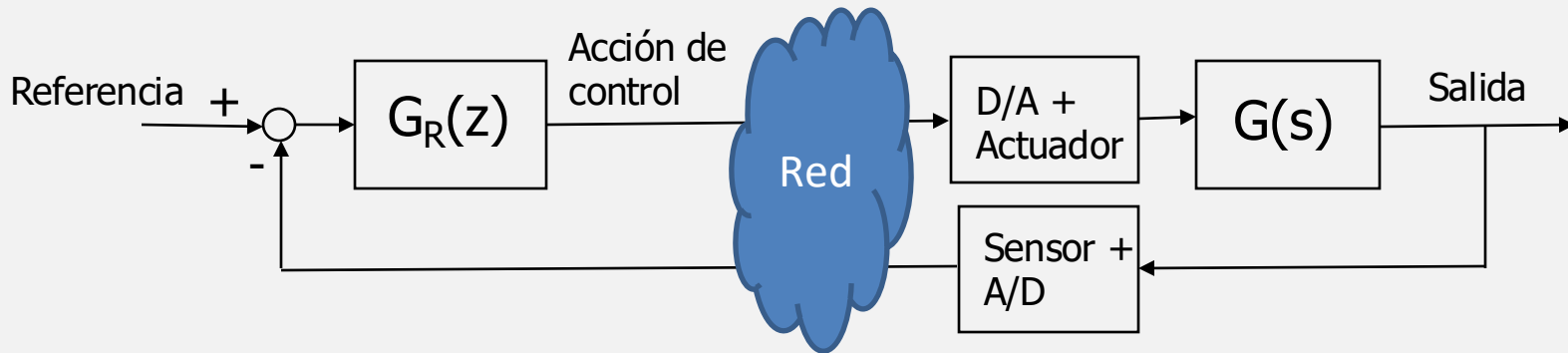


## Ventajas:

1. Reducción de cableado (coste, peso).
2. Facilidad de mantenimiento y actualización.

# Contexto

**NCS:** Sistema de control por computador que incluye un medio común (red inalámbrica) entre controlador y proceso



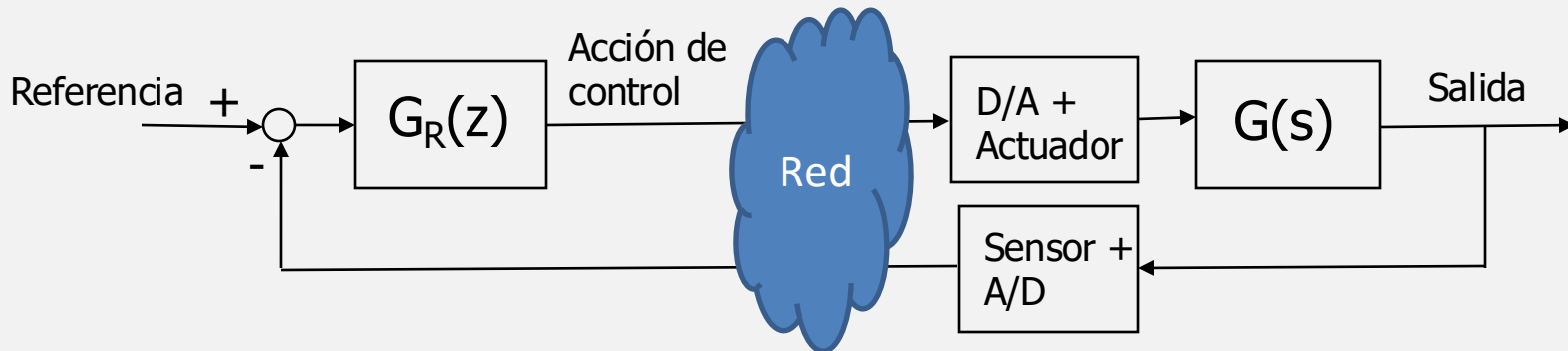
## Inconvenientes:

1. Acceso restringido al medio común.
2. Retardos variables y desorden de paquetes.
3. Pérdidas de paquetes.
4. Consumo de baterías.



# Contexto

**NCS:** Sistema de control por computador que incluye un medio común (red inalámbrica) entre controlador y proceso



- ✓ X. Zhang, Q-L. Han, X. Ge, D. Ding, L. Ding, D. Yue, C. Peng (2019) *“Networked control systems: A survey of trends and techniques”*. IEEE/CAA Journal of Automatica 7(1), 1-17.
- ✓ J. Salt, V. Casanova, A. Cuenca, R. Pizá (2008) *“Sistemas de control basados en red: Modelado y diseño de estructuras de control”*. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 5(3), 5-20.

# Contexto

## NCS en IFAC

CC	Líneas de investigación
1	<b>Systems and Signals (TC1.5. Networked Systems)</b>
2	Design Methods
3	<b>Computers, Cognition and Communication (TC3.3. Telematics: Control via Communication Networks)</b>
4	Mechatronics, Robotics and Components
5	Cyber-Physical Manufacturing Enterprises
6	Process and Power Systems
7	Transportation and Vehicle Systems
8	Bio and Ecological Systems
9	Social Systems


# Contexto

## Objetivo en CO3

Diseñar sistemas de control **eficientes** para:

- Conseguir **ahorro** de recursos (ancho de banda, energía, computación).
- Hacer frente a problemas de **red** (retardos, pérdidas, desorden).
- Logrando **prestaciones** deseadas.

## Técnicas utilizadas

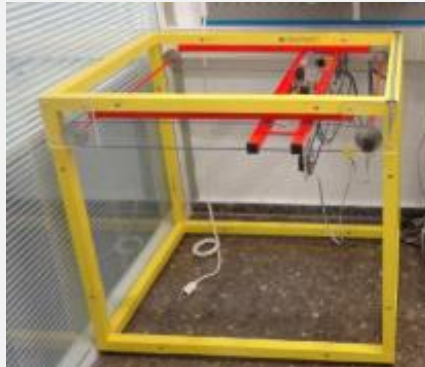
- Control, estimación y muestreo multifrecuenciales.  Línea inicial
- Comunicación basada en eventos.

# Contexto

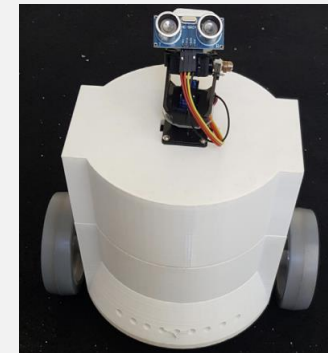
## Aplicación



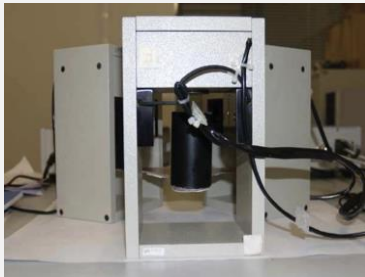
Péndulo  
invertido



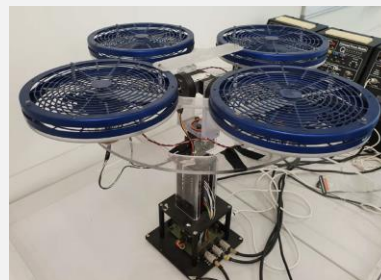
Robot porticado



Robot diferencial



Levitador magnético



3 DOF Hover



Quadrotor

# Contexto

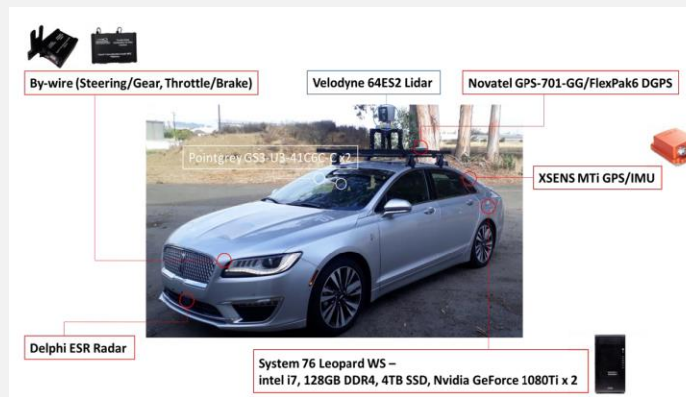
## Aplicación (últimos trabajos)



Robot diferencial Lego EV3



Robot holonómico 4 ruedas Mecanum



Coche 2017 Lincoln MKZ

# Contexto

## Últimos proyectos

- “C2 Advanced multi-domain environment and live observation technologies” (2017-2021), UE (H2020).
- “Diseño eficiente de sistemas de control en red inalámbrica aplicados a UxVs utilizando técnicas de control con muestreo no convencional y basadas en eventos” (2019-2022), AEI (Generación Conocimiento).
- “Control en red de vehículos autoguiados utilizando técnicas de control y estimación con muestreo no convencional para ahorro de recursos energéticos y computacionales” (2024-2027), AEI (Generación Conocimiento).

# Contexto

## Publicaciones relevantes

- **A. Sala**, A. Cuenca, J. Salt (2009) “*A retunable PID multi-rate controller for a networked control system*”. Information Sciences, 14(179), 2390-2402.
- A. Cuenca, J. Salt, **A. Sala**, R. Pizá (2011) “*A delay-dependent dual-rate PID controller over an ethernet network*”. IEEE Trans. Industrial Informatics, 1(7), 18-29.
- A. Cuenca, U. Ojha, J. Salt, **M-Y. Chow** (2015) “*A non-uniform multi-rate control strategy for a Markov chain-driven networked control system*”. Information Sciences, 321, 31-47.
- A. Cuenca, D. Antunes, A. Castillo-Frasquet, **P. García**, B. Asadi, **M. Heemels** (2018) “*Periodic event-triggered sampling and dual-rate control for a wireless networked control system with applications to UAVs*”. IEEE Trans. Industrial Electronics, 4 (66), 157 – 3166.

# Contexto

## Publicaciones relevantes

- J.M. Salt-Ducajú, J. Salt, A. Cuenca, **M. Tomizuka** (2021) *“Autonomous ground vehicle lane-keeping LPV model-based control: Dual-rate state estimation and comparison of different real-time control strategies”*. *Sensors*, 21(4), 1531.
- **A. González**, A. Cuenca, J. Salt, **J. Jacobs** (2021) *“Robust stability analysis of an energy-efficient control in a networked control system with application to unmanned ground vehicles”*. *Information Sciences*, 578, 64-84.
- G. Alite, A. Cuenca, J. Salt, **M. Tomizuka** (2023) *“Resource-efficient path-following control for a self-driving car in a networked control system”*. *IEEE Access*, 12, 40255 - 40266.
- R. Carbonell, A. Cuenca, J. Salt, **E. Aranda-Escolástico**, V. Casanova (2024) *“Remote path-following control for a holonomic Mecanum-wheeled robot in a resource-efficient networked control system”*. *ISA Transactions*, 151C, 377-390.



# Índice


- ✓ Contexto
- ✓ Resultados de los últimos años
- ✓ Siguietes pasos

# Índice


- ✓ Contexto
- ✓ **Resultados de los últimos años**
- ✓ Siguietes pasos

# Resultados de los últimos años



- Artículo Q1 en JCR:

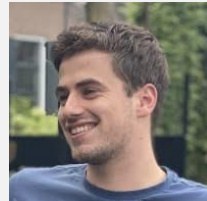


Information Sciences  
Volume 578, November 2021, Pages 64-84



**Robust stability analysis of an energy-efficient control in a Networked Control System with application to unmanned ground vehicles**

Antonio González <sup>a</sup>  , Ángel Cuenca <sup>a</sup>, Julián Salt <sup>a</sup>, Jelle Jacobs <sup>b</sup>

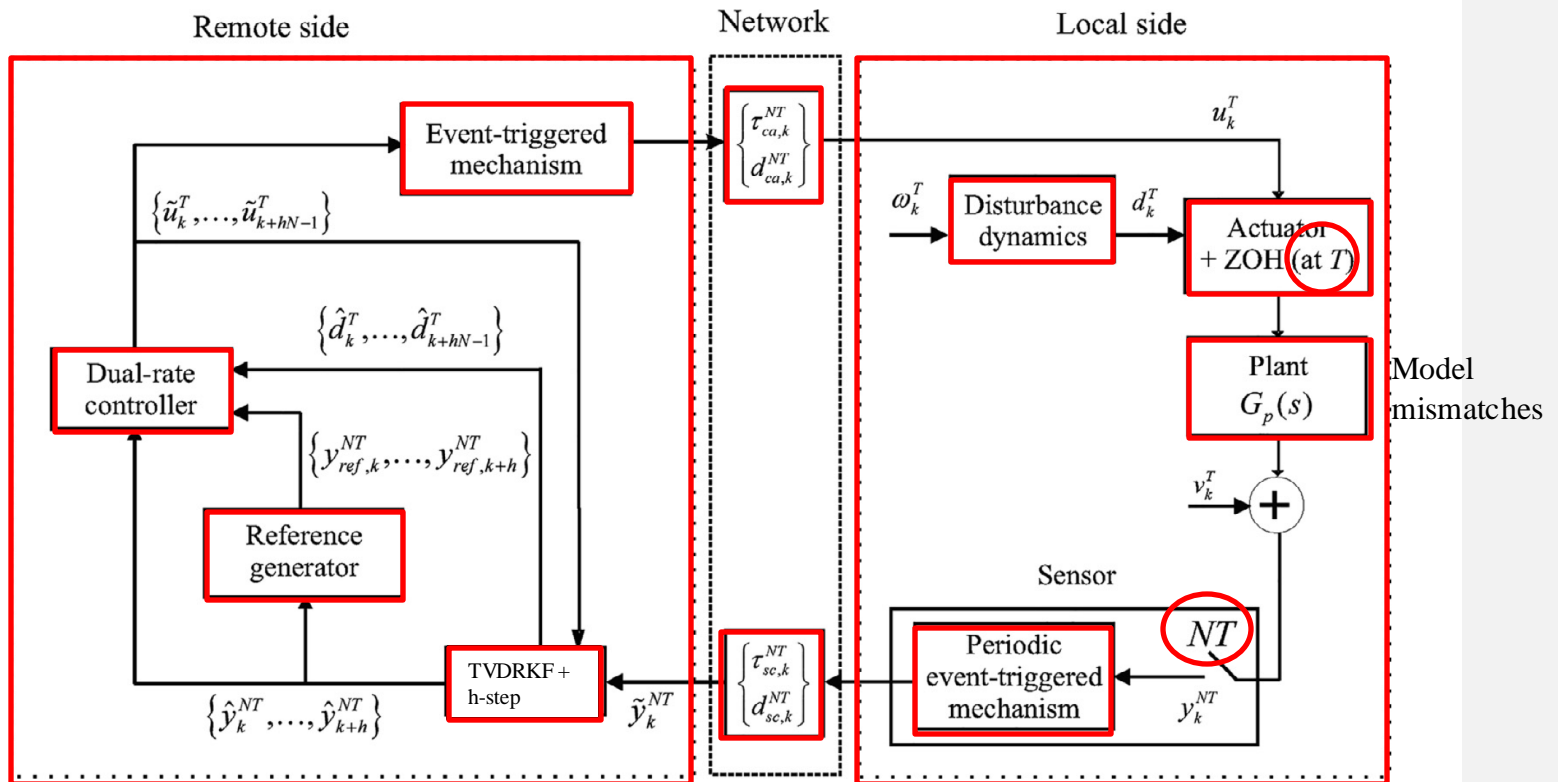


# Resultados de los últimos años

- Logros:
  - **Ahorro** de recursos (ancho de banda).
  - Haciendo frente a problemas de **red** (retardos, pérdidas), **perturbaciones e incertidumbres paramétricas**.
  - **Prestaciones** de control satisfactorias (cercanas a nominales).
- Técnicas utilizadas:
  - Comunicación **bidireccional** basada en **eventos** periódicos: sintonía vía **LMI** para **estabilidad robusta y rechazo de perturbaciones**. **NEW**
  - Estimación con filtro de Kalman (lineal) bifrecuencia variable en el tiempo (**TVDRKF**). **NEW**
  - Controlador **bifrecuencia**.
  - Algoritmo **Pure Pursuit** para seguimiento de trayectorias.

# Resultados de los últimos años

## Estructura de control



$$(y_k^{NT} - \tilde{y}_{k-1}^{NT})' \Omega_y (y_k^{NT} - \tilde{y}_{k-1}^{NT}) > \sigma_y^2 (y_k^{NT})' \Omega_y y_k^{NT} + \delta_y.$$

# Resultados de los últimos años

## Validación experimental

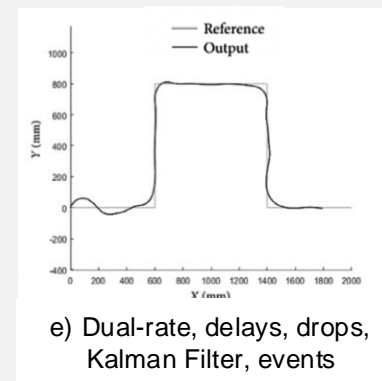
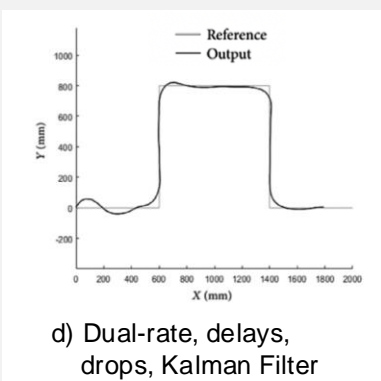
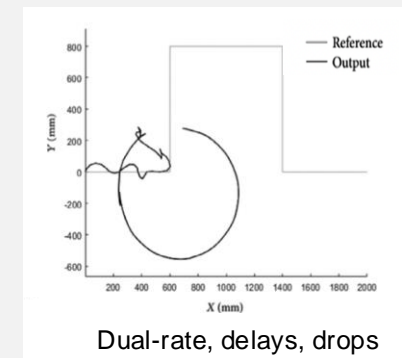
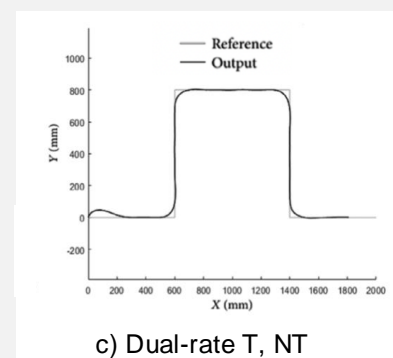
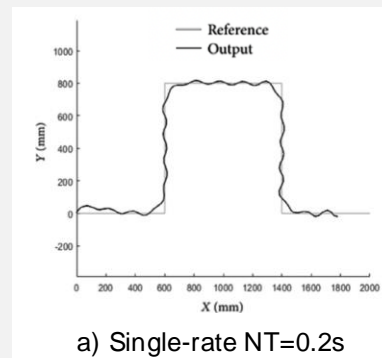
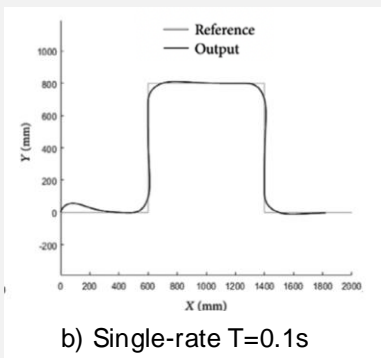


Table 1

Cost indexes from the experimentation.


	a	b	c	d	e
$J_1$	1328.3	1078.9	1085.0	1160.2	1189.9
$J_2$	47.13	38.30	38.88	39.62	40.98
$J_3$	22.4	22.0	22.0	22.0	22.0
$J_4$	50%	100%	50%	50%	37.1%

### Comparación TVDRKF+PETC (e) frente SR nominal (b):


- Considerable reducción del uso de **recursos** (**63%** en  $J_4$ ).
- Leve empeoramiento del **rendimiento** de control (**10%** en  $J_1$  y  $J_2$ ).
- Tiempo de **cómputo** ( $J_3$ ) sin variaciones.

# Resultados de los últimos años

- Artículo Q1 en JCR:



ISA Transactions  
Volume 151, August 2024, Pages 377-390



Practice article

## Remote path-following control for a holonomic Mecanum-wheeled robot in a resource-efficient networked control system

Rafael Carbonell <sup>a</sup>✉, Ángel Cuenca <sup>a</sup>✉, Julián Salt <sup>a</sup>✉,  
Ernesto Aranda-Escolástico <sup>b</sup>✉, Vicente Casanova <sup>a</sup>✉



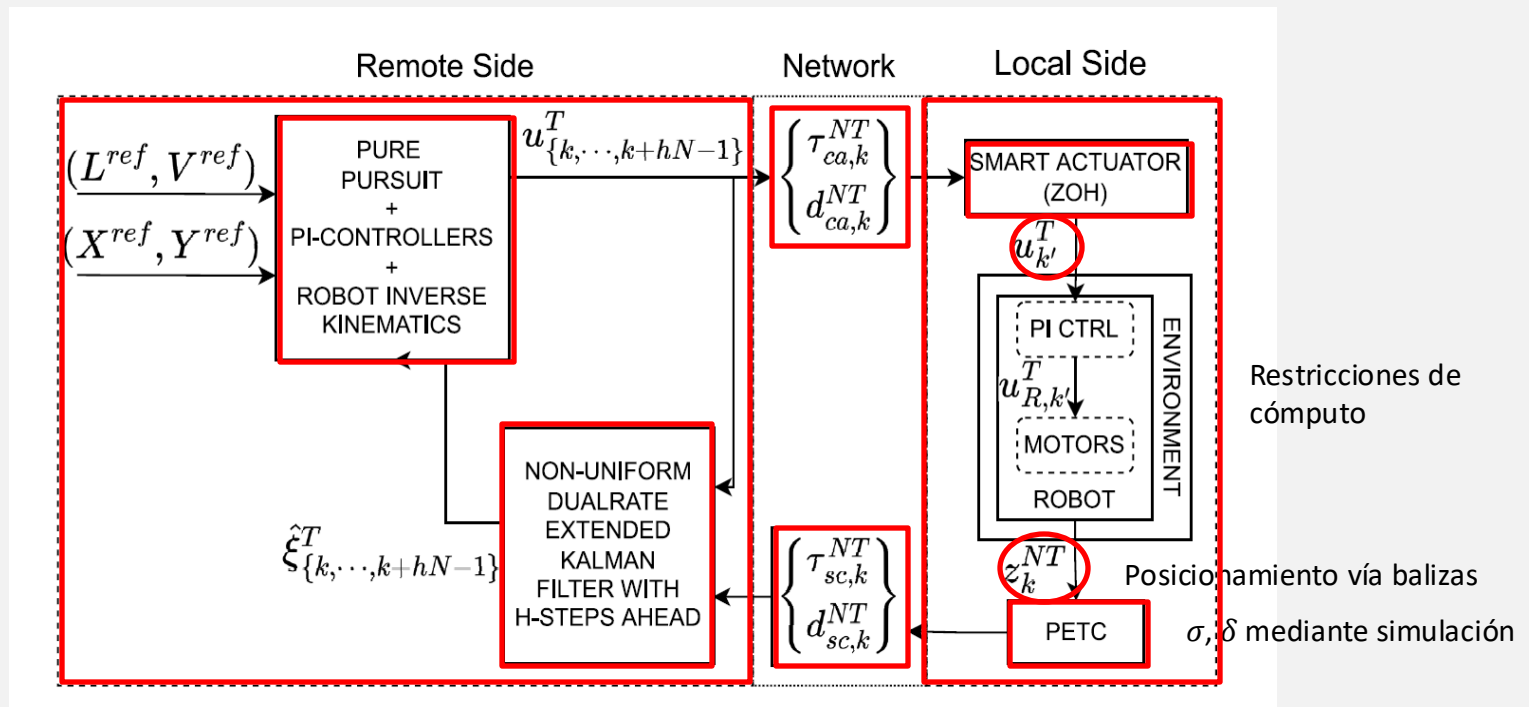
# Resultados de los últimos años

- Logros:
  - **Mayor ahorro** de recursos (ancho de banda, batería de balizas).
  - Haciendo frente a problemas de **red** (retardos, pérdidas).
  - **Prestaciones** de control satisfactorias (cercanas a nominales).
- Técnicas utilizadas:
  - Comunicación basada en **eventos** periódicos: sintonía por compromiso ahorro-prestaciones vía **simulación realista**. **NEW**
  - Estimación con filtro de Kalman extendido bifrecuencia no uniforme (**NUDREKF**). Implementación por **eventos**. Se asegura **estabilidad media cuadrática**. **NEW**
  - Control **PID convencional + cinemática inversa**.
  - Algoritmo **Pure Pursuit** para seguimiento de trayectorias.



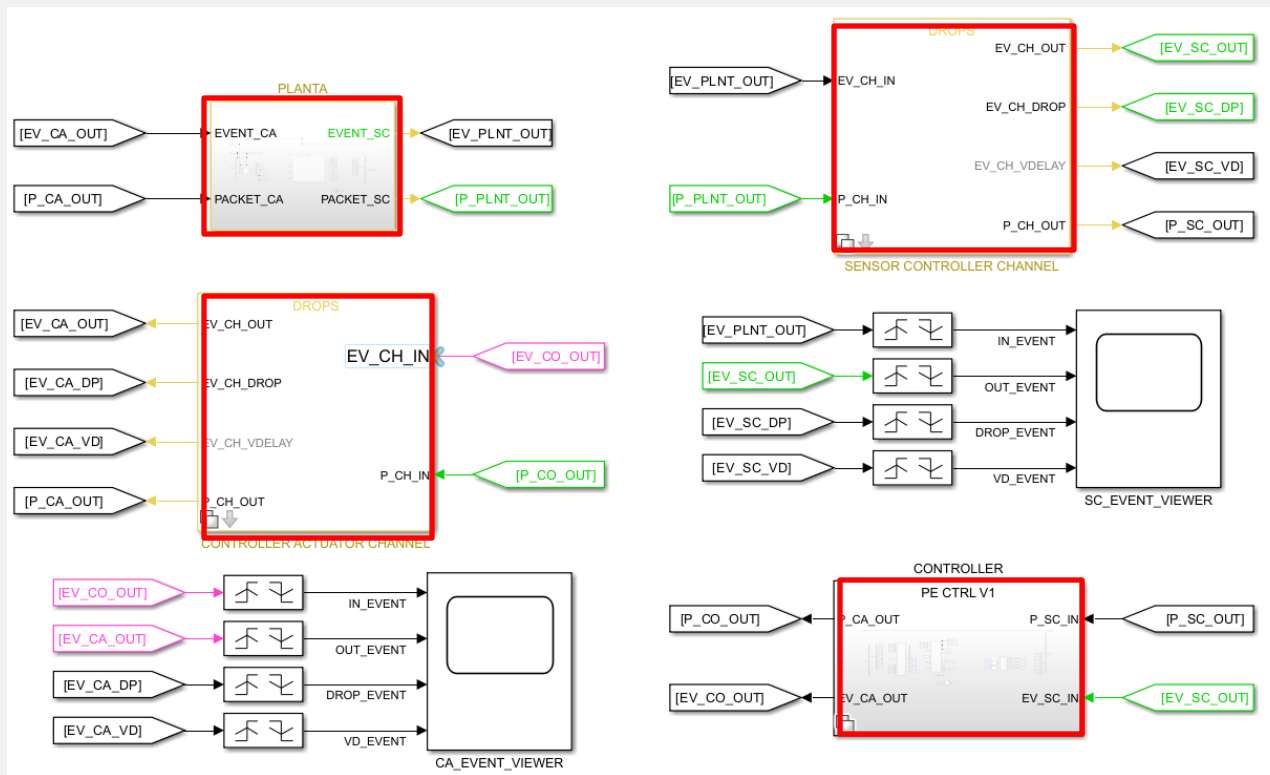
# Resultados de los últimos años

## Estructura de control



# Resultados de los últimos años

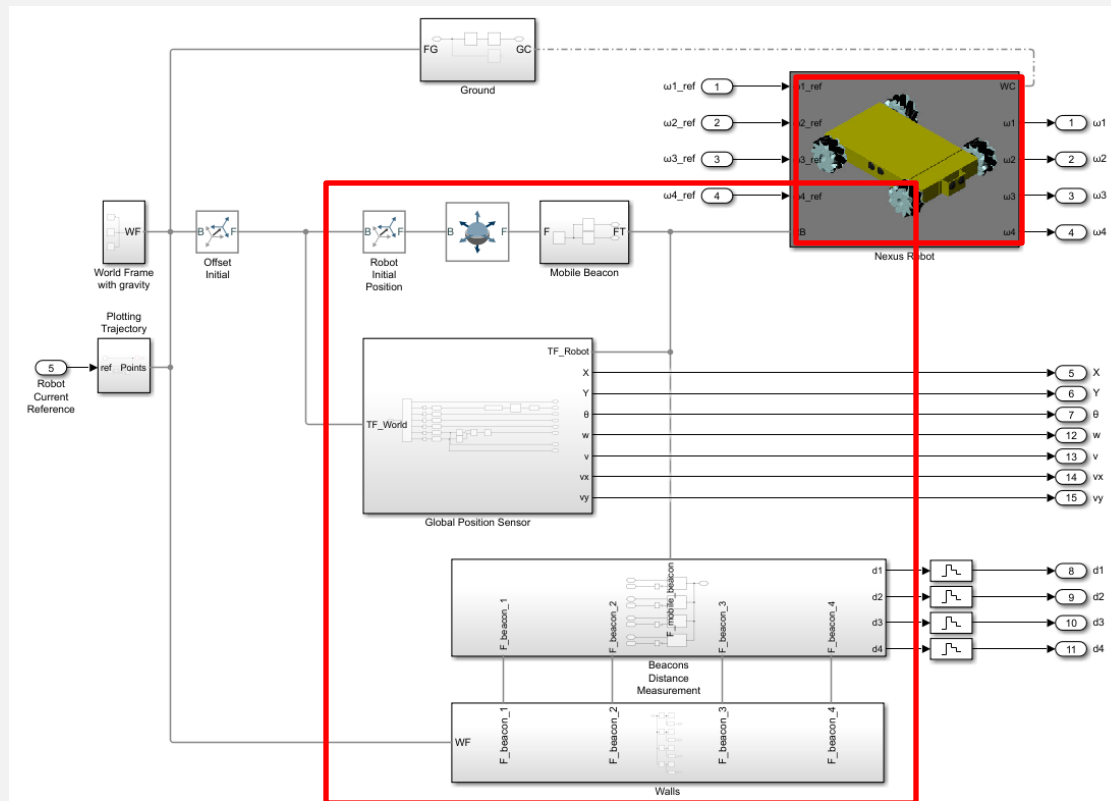
## Simulación realista Simscape Multibody (Matlab/Simulink)



# Resultados de los últimos años

## Simulación realista Simscape Multibody (Matlab/Simulink)

### Planta



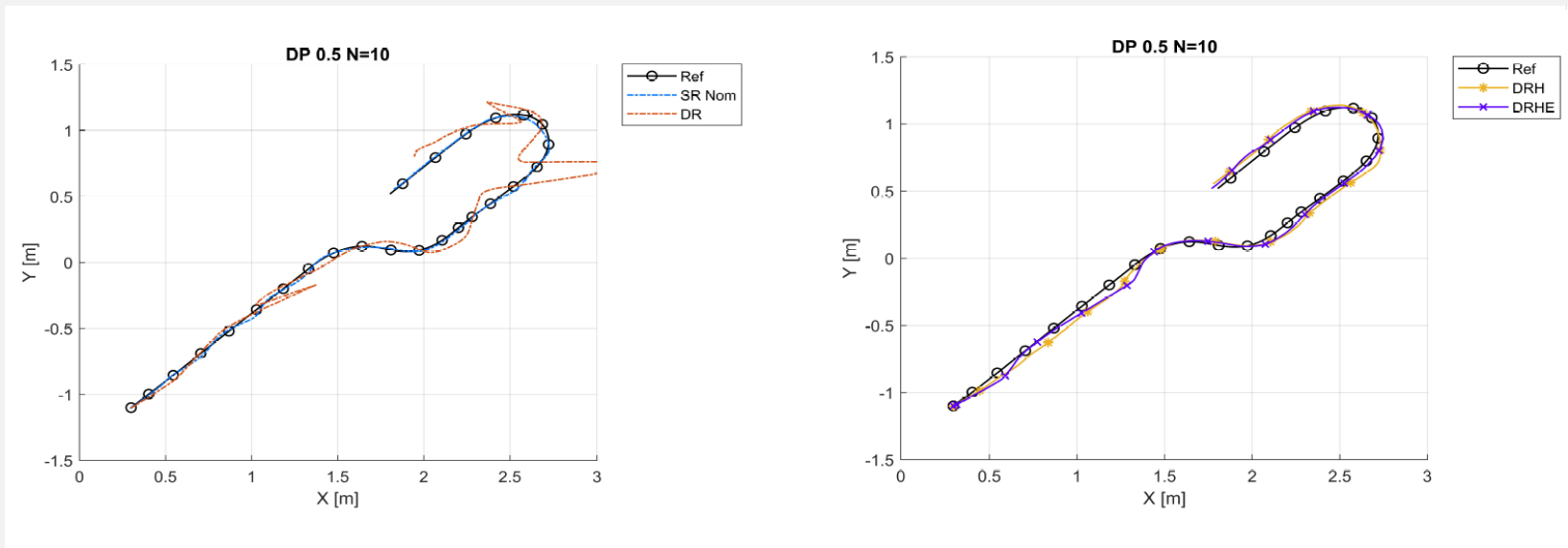
Partes  
eléctrica y  
mecánica  
+  
Sensitivity  
Analysis

Sistema de balizas

# Resultados de los últimos años

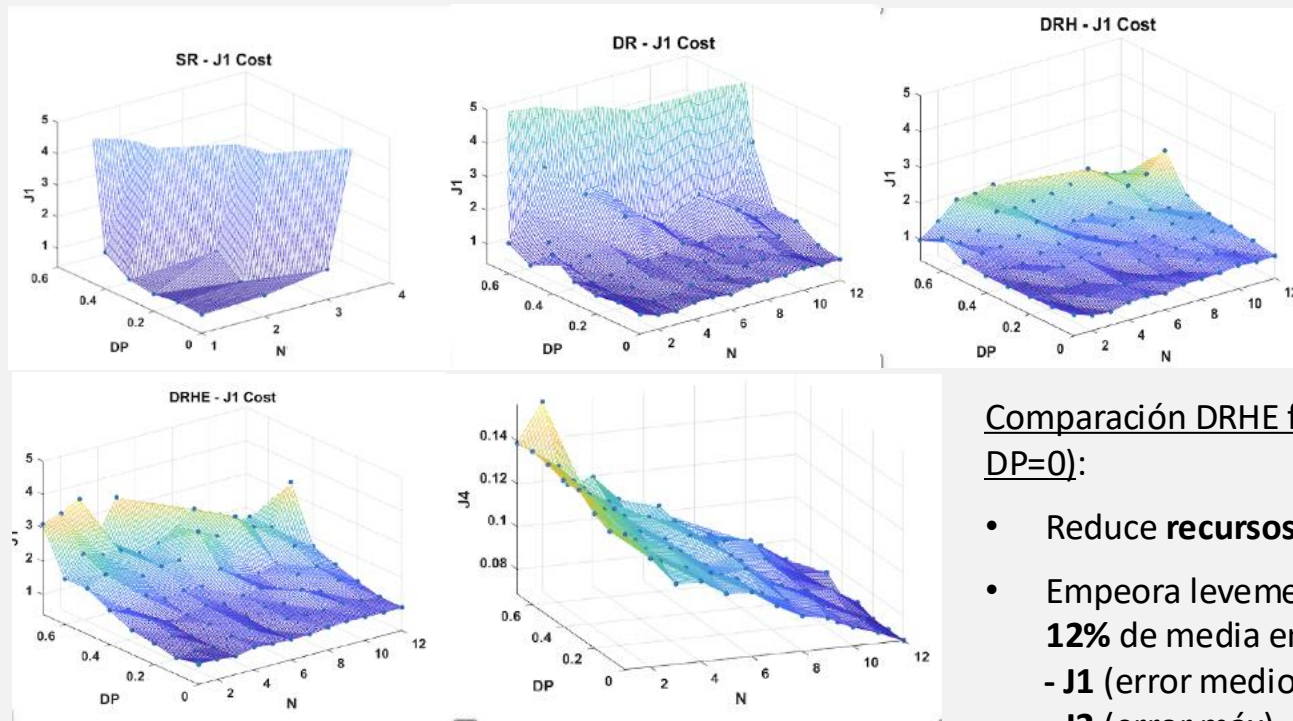
## Resultados de simulación

T=0.1s



# Resultados de los últimos años

## Resultados de simulación

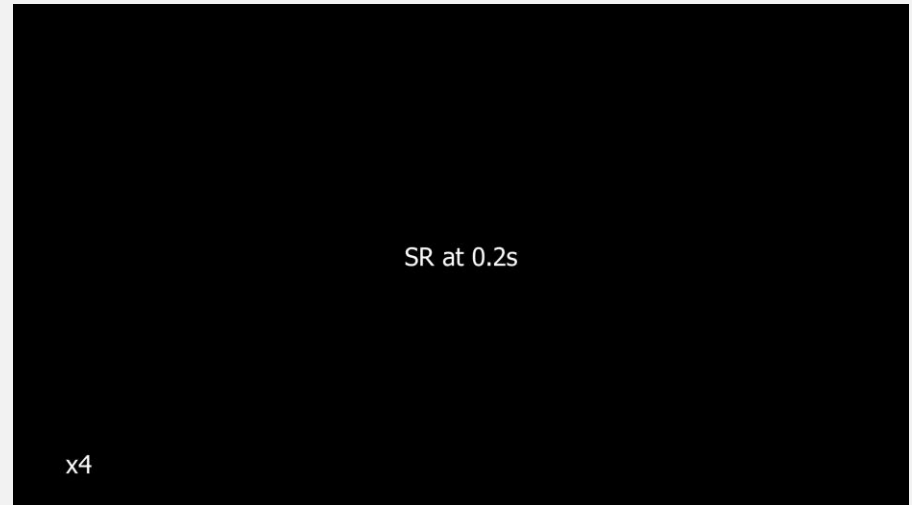
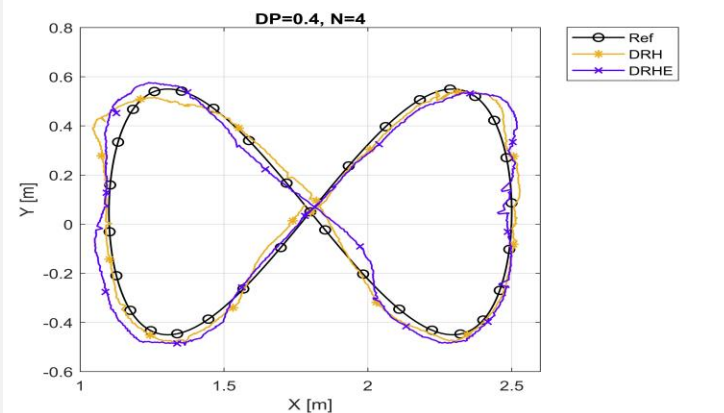
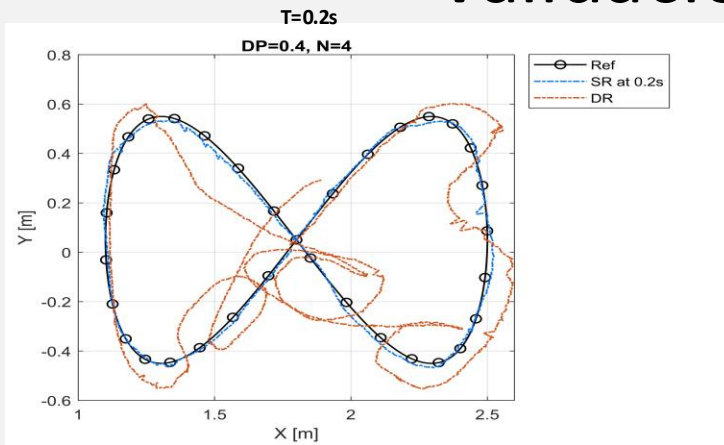


Comparación DRHE frente SR Nom (N=1, DP=0):

- Reduce **recursos**: [86-92]% en **J4**.
- Empeora levemente **prestaciones**:  
**12%** de media entre
  - **J1** (error medio).
  - **J2** (error máx).
  - **J3** (tiempo de cómputo).

# Resultados de los últimos años

## Validación experimental



# Resultados de los últimos años

- Artículo Q2 en JCR:

**IEEE Access**  
MultiDisciplinary | Rapid Review | Open Access Journal

Received 28 August 2023, accepted 25 September 2023, date of publication 2 October 2023, date of current version 6 October 2023.  
Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2023.3321269

**RESEARCH ARTICLE**

## Resource-Efficient Path-Following Control for a Self-Driving Car in a Networked Control System

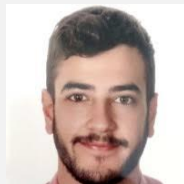
**GUILLERMO ALITE<sup>1</sup>, ÁNGEL CUENCA<sup>1</sup>, JULIÁN SALT<sup>1</sup>,  
AND MASAYOSHI TOMIZUKA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial, Universitat Politècnica de València (UPV), 46022 Valencia, Spain  
<sup>2</sup>Mechanical Engineering Department, University of California at Berkeley, Berkeley, CA 94720, USA  
Corresponding author: Guillermo Alite (guialce@doctor.upv.es)



Mechanical Systems Control (MSC) Lab  
Univ. California, Berkeley (UCB)

<https://msc.berkeley.edu/research/autonomous-vehicle.html>



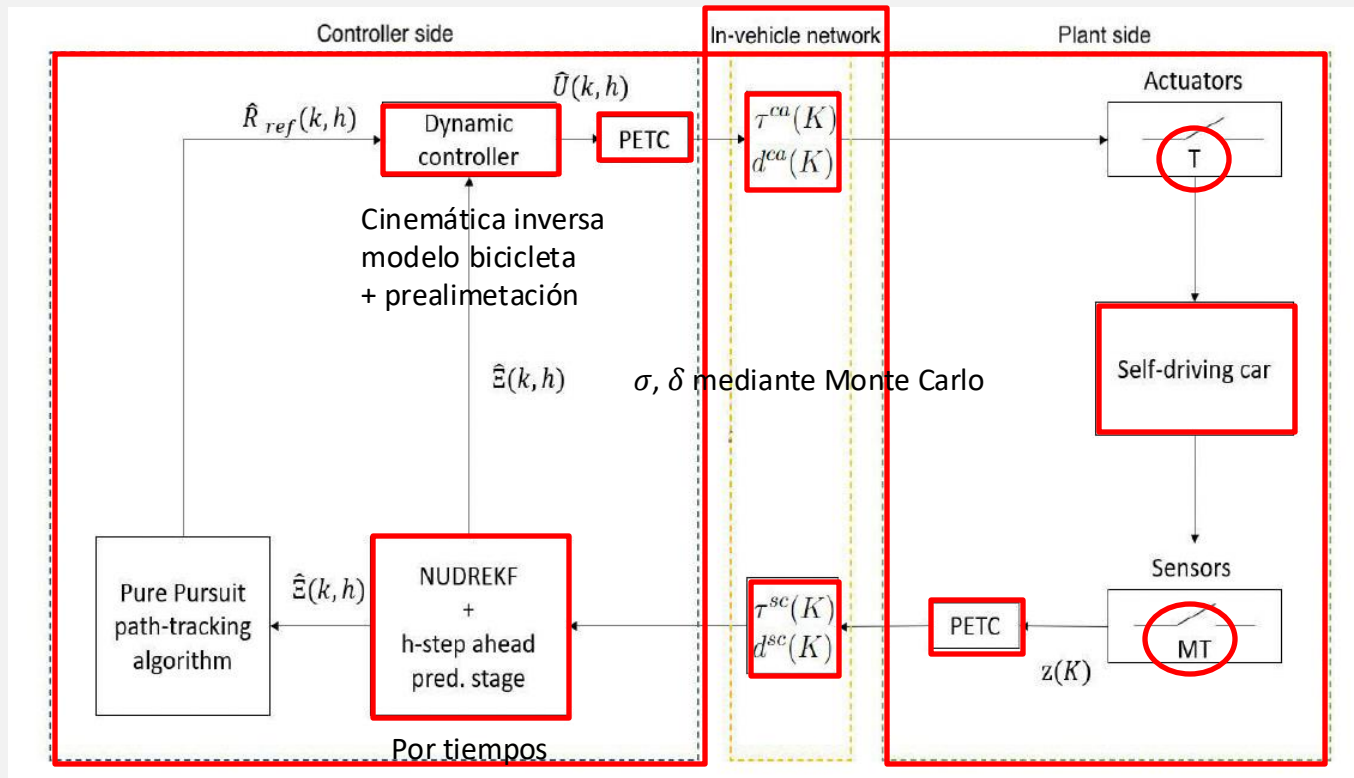
# Resultados de los últimos años

- Logros:
  - **Todavía mayor ahorro** de recursos.
  - Haciendo frente a problemas de **red** (retardos, pérdidas) y restricciones en **actuadores** (ángulo de giro y su derivada).
  - Compromiso **rendimiento-ahorro** satisfactorio.
- Técnicas utilizadas:
  - Comunicación **bidireccional** basada en eventos periódicos: sintonía de **parámetros óptimos** mediante **técnicas Monte Carlo**. **NEW**
  - Estimación con filtro de Kalman extendido bifrecuencia no uniforme (**NUDREKF**). Versión para implementación por **tiempos**. **NEW**
  - Control basado en **cinemática inversa + prealimentación**.
  - Algoritmo **Pure Pursuit** para seguimiento de trayectorias.



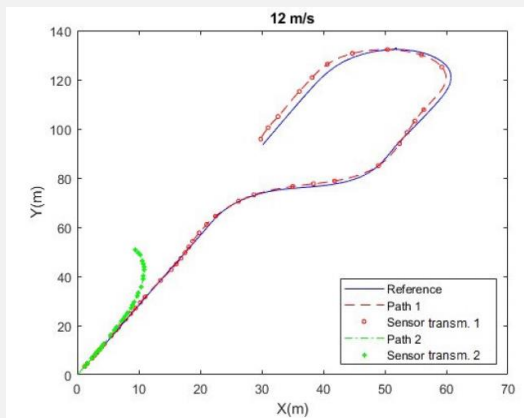
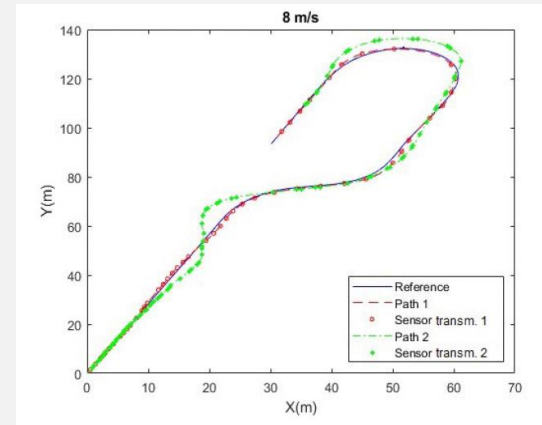
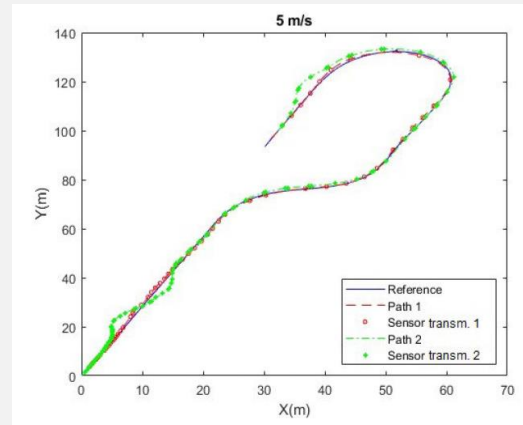
# Resultados de los últimos años

## Estructura de control



# Resultados de los últimos años

## Resultados de simulación



$V_x$ (m/s)	$J_1$	$J_2$ (m)	$J_{3c}$ (%)	$J_{3s}$ (%)	$J_4$	$J_5$
5	28.9577	3.7151	7.6301	1.7927	0.8705	0.3321
8	37.9523	5.8736	7.6141	2.6434	1.0908	0.3644
12	72.4898	6.6056	7.51	3.7396	1.7548	0.3914

- Mejores **prestaciones (J1, J2)** y mejor **confort (J5)** a menor velocidad.
- Reduce **recursos** frente a nominal:
  - ✓ **92,5%** controlador-actuador en **J3c**.
  - ✓ **[96,3-98,2]%** sensor-controlador en **J3s**.
- Compromiso **rendimiento-ahorro** aceptable (se prioriza J1): si  **$J_4 \leq 1$** .

# Índice

- ✓ Contexto
- ✓ Resultados de los últimos años
- ✓ Siguietes pasos

# Índice

- ✓ Contexto
- ✓ Resultados de los últimos años
- ✓ **Siguientes pasos**

# Siguientes pasos

- **Proyecto Generación Conocimiento (AEI, 2024-2027):**

“Control en red de vehículos autoguiados utilizando técnicas de control y estimación con muestreo no convencional para ahorro de recursos energéticos y computacionales”

- **Objetivos generales:**

1. **Diseñar soluciones avanzadas de control en red** para ahorro de recursos manteniendo rendimiento satisfactorio en el seguimiento de trayectorias en vehículos autoguiados.
2. **Validar experimentalmente** los diseños en plataforma de laboratorio y entorno cercano a la realidad.

# Siguientes pasos

- **Personal involucrado:**

2 CU



J. Salt



A. Cuenca

3 TU



V. Casanova



R. Pizá



E. Ivorra

1 postdoc



R. Carbonell

1 becario de  
colaboración



A. Planells

# Siguientes pasos

## 1. Diseño de estrategia avanzada de control

Estrategia	Actualmente	Propuesta	Motivo
<i>Seguimiento trayectoria</i>	Pure Pursuit	- <b>Line of Sight</b> - <b>Stanley</b>	Disminuir error de seguimiento
<i>Control dinámico</i>	PID (convencional o bifrecuencia) + Cinemática inversa del modelo + Prealimentación	- <b>MPC (Model Predictive Control)</b>  - <b>QFT (Quantitative Feedback Theory)</b>	- Alcanzar mayor velocidad - Dotar de mayor robustez - Incluir restricciones (ángulo de dirección, su derivada, etc) - Utilizar horizonte de predicción para retardos y pérdidas
<i>Comunicación por eventos</i>	Mecanismo de disparo con parámetros fijos	<b>Mecanismo de disparo dinámico</b>	- Parámetros variables - Mayor ahorro

# Siguientes pasos

- **Aspectos relacionados con diseño de control:**
  - ✓ Modelado **analítico** de vehículos tipo coche:
    - Modelo **no lineal**: para filtro de Kalman.
    - Modelo lineal de parámetros variables (**LPV**): para diseño MPC y QFT.
  - ✓ Desarrollos teóricos para garantizar **estabilidad y robustez** (colaboración con TUE y UNED):
    - Comportamiento ante **perturbaciones**.
    - Dimensiones de los **retardos** soportables.
    - Máximos **periodos** de muestreo admisibles.
    - Compromiso teórico **rendimiento-ahorro** que garantice experimentación.



# Siguientes pasos

## 2. Validación experimental

- ✓ Aplicación a escala de **laboratorio** en vehículo autoguiado tipo **coche**.
- ✓ Extrapolación a entornos cercanos a la **realidad** (mayor dimensión, en exteriores):
  - Caddy
  - 2017 Lincoln MKZ (colaboración con UCB)



# Siguientes pasos

## 2. Validación experimental

- ✓ Inclusión de algoritmos de **visión artificial** (deep learning) haciendo uso de cámaras 3D para:
  - Navegación SLAM.
  - Detección de objetos.





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# Control en red para seguimiento de trayectorias en vehículos autónomos con eficiencia de recursos

*Ángel Miguel Cuenca Lacruz*

Grupo de Comunicación y Control por Computador (**CO3**)  
Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial (**ai2**)  
Universitat Politècnica de València (**UPV**)