

Control Basado en Eventos:
una aplicación práctica en el
campo de la robótica



Índice de Contenidos



1. Introducción a los NCS y al Control Basado en Eventos

- a) Principios y Arquitecturas de Control
- b) Ventajas e Inconvenientes frente a los esquemas de Control Clásico

2. El Problema de Navegación en Robótica Móvil

- a) Sistemas de Navegación y Algoritmos de Control
- b) Aplicación del Control Basado en Eventos al problema de Navegación
- c) Resultados Experimentales

3. Efectos del Ruido de Medida

- a) Efectos del Ruido en los Controladores Basados en Eventos
- b) Arquitecturas de Compensación
- c) Resultados Experimentales

4. Principales Conclusiones

5. Sigüientes Pasos en la Investigación



1 Introducción a los NCS y al Control Basado en Eventos

2 El Problema de Navegación en Robótica Móvil

3 Efectos del Ruido de Medida

4 Principales Conclusiones

5 Sigüientes Pasos en la Investigación



Los Sistemas de Control en Red (NCS)...

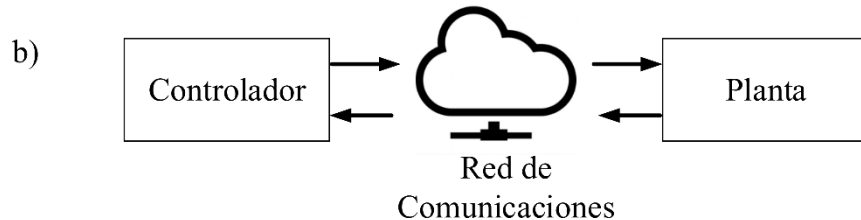
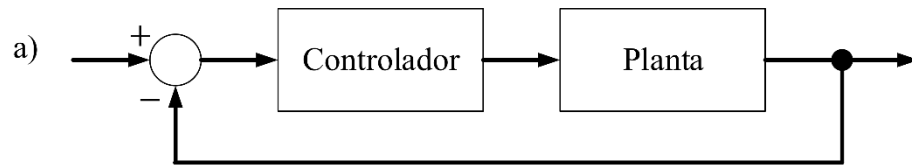
En los años 70 aparecen los Sistemas de Control por Computador Descentralizado (SCCD)

(Duffie, 1982 [1], Kopetz, 1983 [2])



Sistemas de Control en Red (NCS)

(Murray et al., 2003 [3])



Sistemas de Control. a) Esquema de control clásico, b) sistema de control en red (NCS)

Sistemas de Control en Red (NCS)


Elementos

- *Planta*
- *Controlador*
- *Red Comunicaciones*

<i>Red Comun.</i>	<i>Pro.</i>	<ul style="list-style-type: none">• <i>Bajo Coste</i>• <i>Fiabilidad</i>• <i>Menor Mantenimiento</i>• <i>Flexibilidad</i>• <i>Accesibilidad</i>
	<i>Cons.</i>	<ul style="list-style-type: none">• <i>Retardo</i>• <i>Perdidas de Paquetes</i>• <i>Canales BW limitado</i>• <i>Inestabilidades en el lazo de control</i>

Se combinan las disciplinas del Control y las Comunicaciones

...han motivado el uso del Control basado en Eventos.



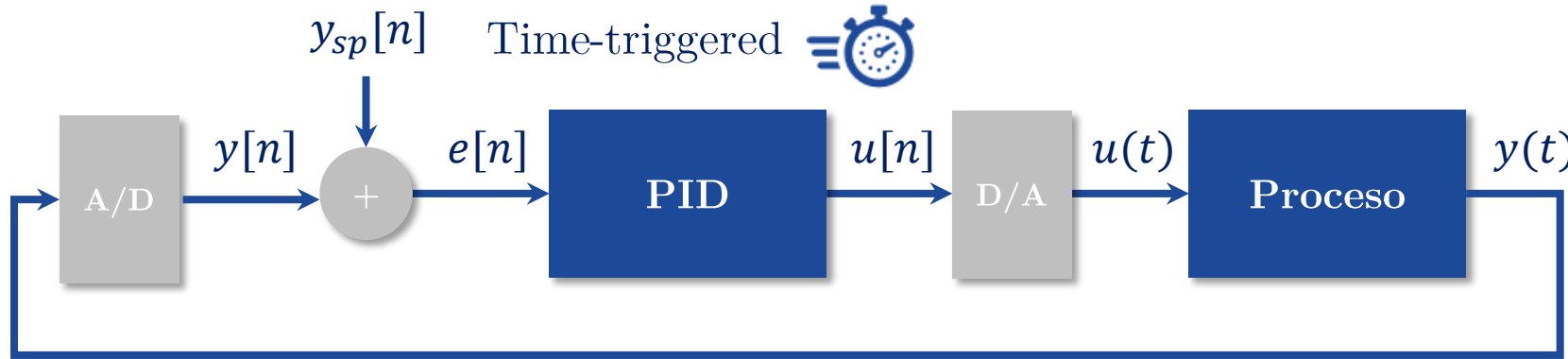
Campos de Investigación en NCS

- *Retardos y Pérdida de Paquetes.* (Yang [4], Mahmoud and Ismail [5], Li et al. [6], Zhang et al. [7], etc.)
- *Canales con Ancho de Banda Limitado.* (Braslavsky et al. [8], Hespanha et al. [9], Elia and Mitter [10], etc.)
- *Estabilidad de los Sistemas NCS.* (Wittenmark et al. [11], Kao and Lincoln [12], Heemels and van Wouw [13], etc.)
- *Eficiencia Energética.* (Shah and Rabaey [14] y Arisha et al. [15])
- *Redes de Sensores Inalámbricos.* (Mon et al. [16] y Chaudhary et al. [17])
- *Sistemas Distribuidos.* (Wu and Cheng [18], Orihuela et al. [19], etc.)
- *Control Basado en Eventos (EBC).* (Dormido et al. [20], Lunze and Lehmann [21], etc.)

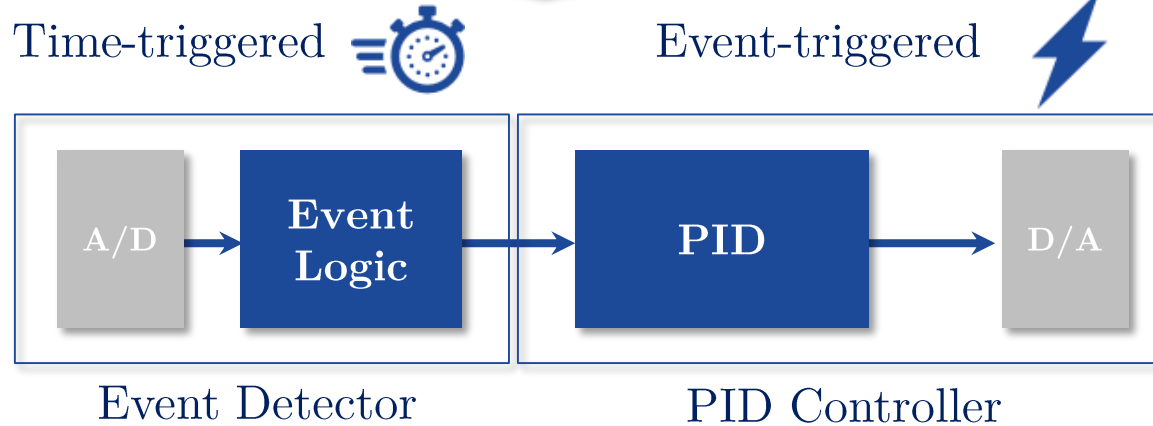
Las técnicas de **Control basadas en Eventos** (Event-Based Control, EBC) pueden resolver multitud de problemas en Sistemas de Control en Red (NCS) (Tipsuwan and Chow, 2003 [22])

Usaremos un clásico para explicar sus principios...

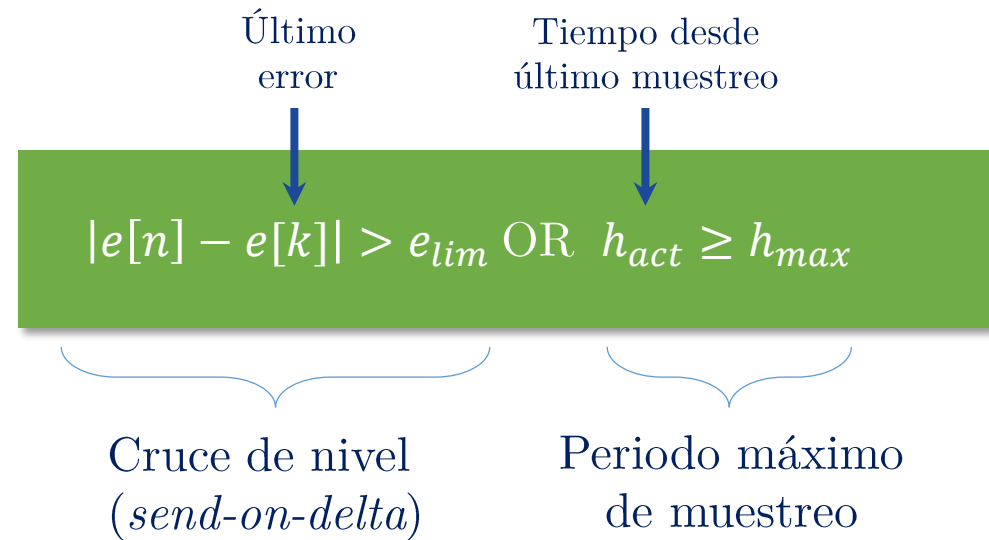
Arzén, K. E. (1999, January). *A simple event-based PID controller*. In *Proc. 14th IFAC World Congress* (Vol. 18, pp. 423-428).



- El controlador trabaja con un periodo de muestreo h_{nom}



Condición de Evento



...donde se compara con un PID periódico...

Arzén, K. E. (1999, January). *A simple event-based PID controller*.
In *Proc. 14th IFAC World Congress* (Vol. 18, pp. 423-428).



PID Periódico

```
(* Pre-calculated coefficients *)
bi := K*h/Ti;
ad := Td/(Td + N*h);
bd := K*Td*N/(Td + N*h);
(* Calculate control signal *)
ysp := ADIn(ch1);
y := ADIn(ch2);
up := K*(beta * ysp - y);
ud := ad*ud - bd*(y - yold);
u := up + ui + ud;
DAOut(u, ch3);
(* Update states *)
ui := ui + bi*(ysp - y);
yold := y;
```



PID Eventos

```
(* Pre-calculated parameter *)
bi := K / Ti;
(* Event detection *)
ysp := ADIn(ch1);
y := ADIn(ch2);
e := ysp - y;
hact := hact + hnom;
IF (abs(e - es) > elim) OR (hact >= hmax) THEN
  es := e;
  ad := Td/(Td + N*hact);
  (* Calculate control signal *)
  up := K*(beta * ysp - y);
  ud := ad*ud - ad*K*N*(y - yold);
  u := up + ui + ud;
  DAOut(u, ch3);
  (* Update states *)
  ui := ui + bi*hact*(ysp - y);
  yold := y;
  hact := 0.0;
ENDIF;
```



El PID basado en eventos trabaja en periodo transitorio con h_{nom} y en periodo estacionario con h_{max}

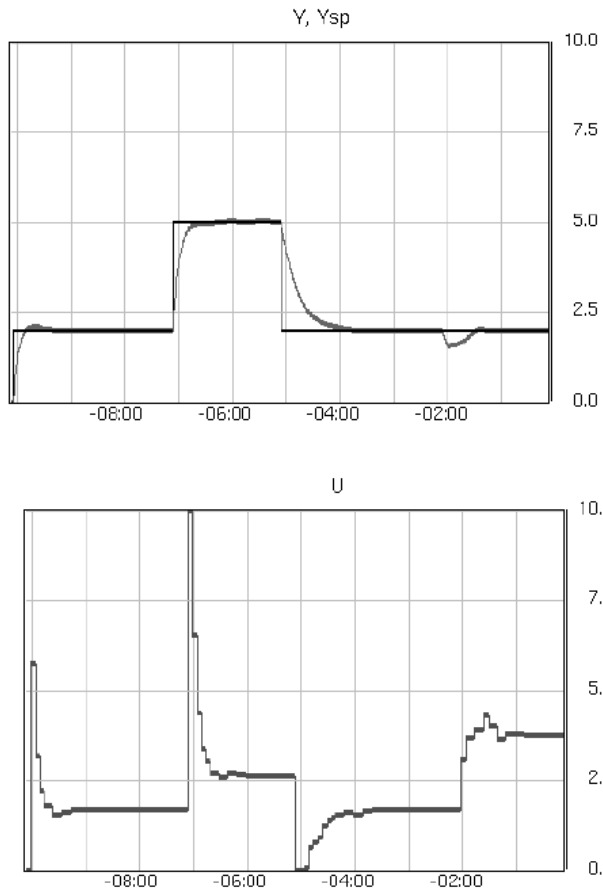
...aplicándolo al problema de los tanques en serie...

Arzén, K. E. (1999, January). *A simple event-based PID controller*. In *Proc. 14th IFAC World Congress* (Vol. 18, pp. 423-428).

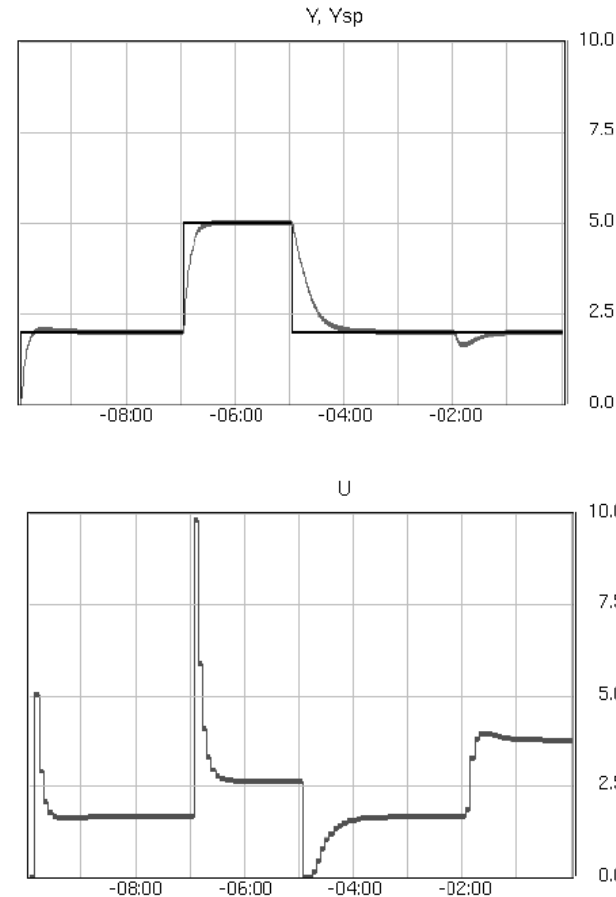


LUNDS
UNIVERSITET

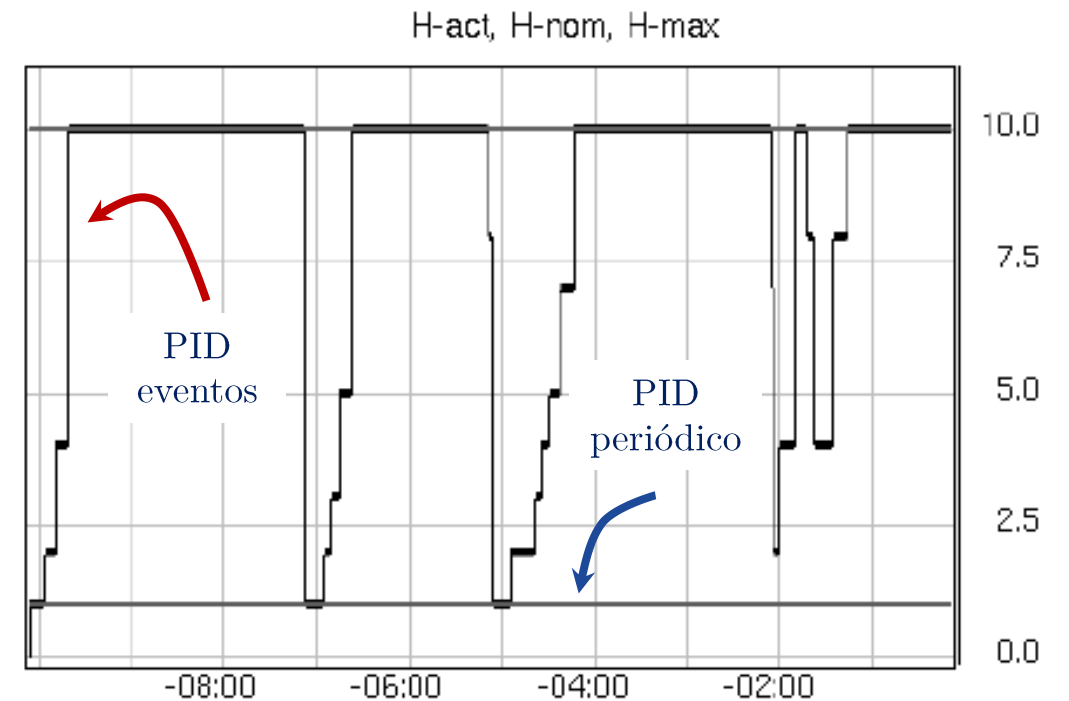
PI Periódico



PI Eventos



Actividad del Controlador



Reducción de
consumo de CPU

58%

$K = 4, T_i = 20, h_{nom} = 1s$ y $h_{max} = 20s$

...mostrando las ventajas e inconvenientes de esta estrategia.

Arzén, K. E. (1999, January). *A simple event-based PID controller*.
In *Proc. 14th IFAC World Congress* (Vol. 18, pp. 423-428).



LUNDS
UNIVERSITET

Pros

- ✓ Se consigues grandes eficiencias en el consumo de CPU sin que haya una degradación importante en la respuesta del sistema.
- ✓ Su implementación es sencilla
- ✓ Es una solución muy atractiva para los sistema de control en red (NCS) por la reducción del tráfico en el lazo de control (BW)
- ✓ Permite reducir el consumo de energía

Cons

- ✗ La implementación del PID basado en eventos convierte el sistema en no lineal con naturaleza híbrida
- ✗ Aparecen ciclos límite, oscilaciones y error en régimen permanente
- ✗ No existe una base teórica estándar
- ✗ El ruido de medida disminuye la eficiencia del controlador

Desde entonces, el EBC ha motivado muchas Líneas de Investigación.

1. *Control Send-on-Delta o por Cruce de Nivel* (Heemels et al. [23], Miskowicz [24] y Sandee [25])
2. *Métodos basados en Funciones de Lyapunov* (Tabuada [26] y Mazo et al. [27])
3. *Funciones de Disparo Variables con el Tiempo* (Guinaldo et al. [28] y Seyboth et al. [29])
4. *Self-Triggering* (Tabuada [30], Araújo [31] y Velasco et al. [32])
5. *Técnicas de Optimización para el Intervalo de Muestreo* (Anta and Tabuada [33], Donkers et al. [34] y Greco et al. [35])
6. *Control Periódico Basado en Eventos* (Heemels and Donker [36])
7. *Control basado en Modelo* (Lunze and Lehmann [37] y Montestruque and Antsaklis [38])

1 Introducción a los NCS y al Control Basado en Eventos

2 El Problema de Navegación en Robótica Móvil

3 Efectos del Ruido de Medida

4 Principales Conclusiones

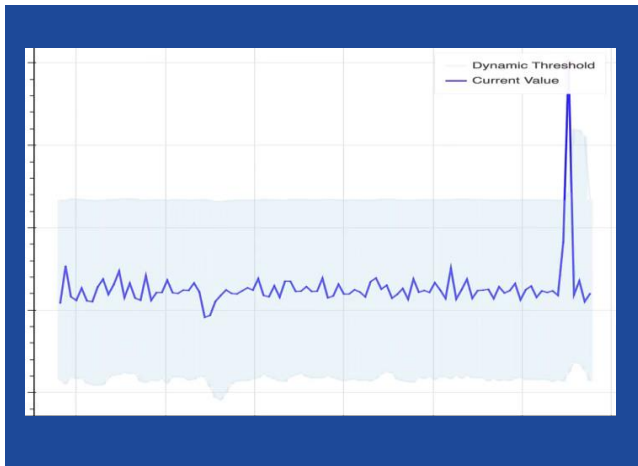
5 Sigüientes Pasos en la Investigación



¿Por qué aplicar EBC al problema de navegación?



- Las Estrategias EBC pueden aportar ventajas diferenciales en robótica móvil frente a los controladores clásicos.
 - a) La eficiencia en el consumo de recursos (transmisión, computacionales, energéticos...) son deseables en este tipo de aplicaciones
 - b) Las aplicaciones de navegación no requieren de un control estrictamente periódico.



- Otros aspectos que pueden ayudar a mejorar las respuestas de estos sistemas son:
 - a) Arquitecturas de Control basadas en Eventos adaptadas a robots móviles
 - b) El Ajuste Dinámico de Umbrales
 - c) Análisis y Modelado de las Perturbaciones

La Arquitectura de Navegación se basa en tres niveles...

Path Planning



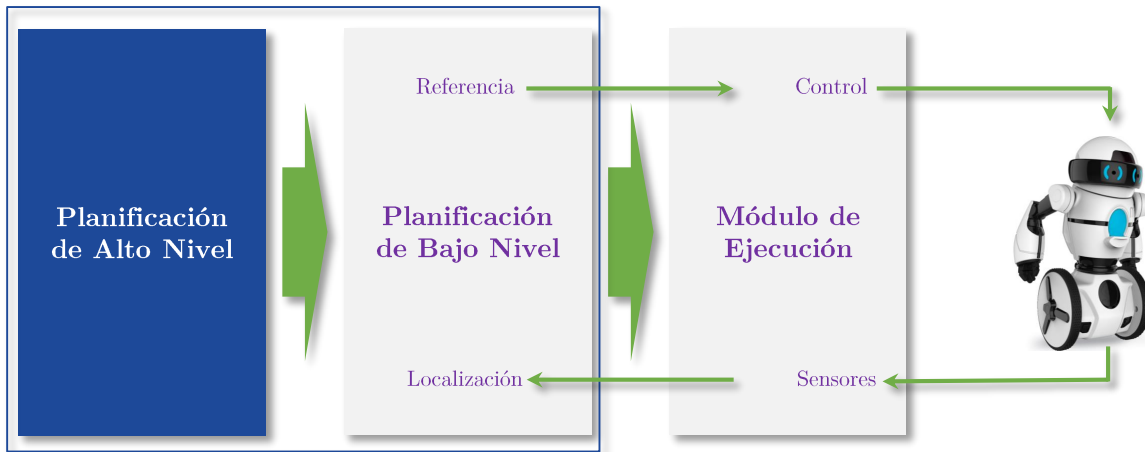
¿Dónde deben estar los *waypoints* objetivo?

¿Qué dirección debe seguirse para moverse entre los *waypoints* objetivo?

¿Cómo hacer que el robot se mueva con esas direcciones?

...el Path Planning de Alto Nivel...

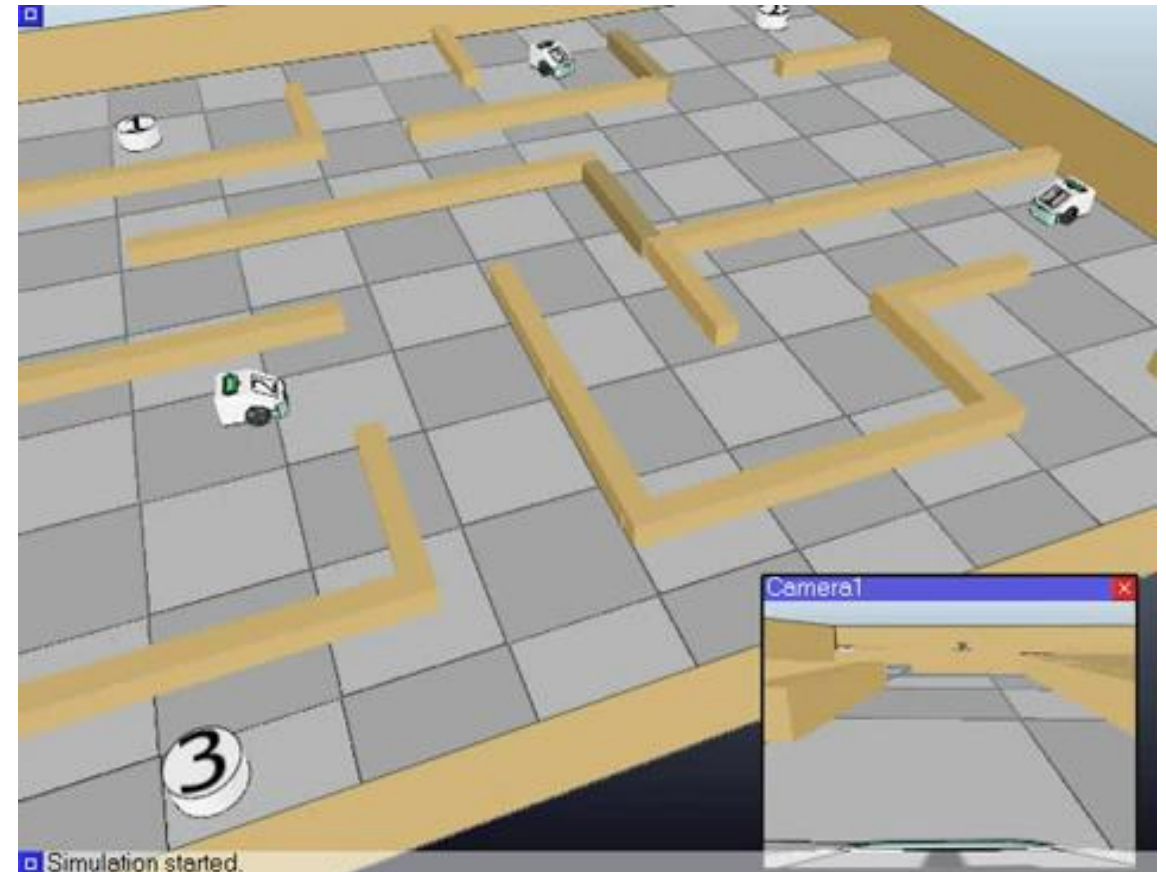
Path Planning



Existe un gran abanico de técnicas de Inteligencia Artificial (AI) para resolver el problema de navegación:

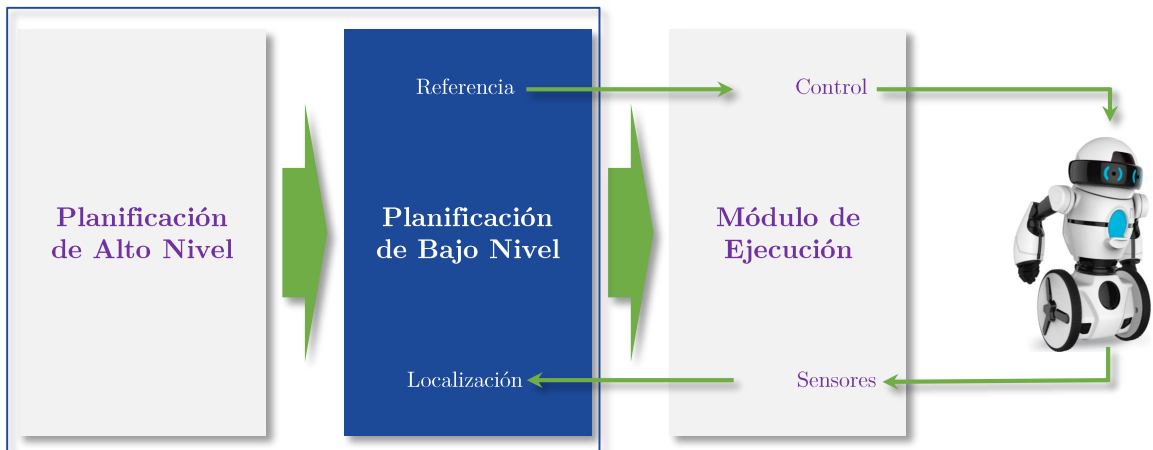
- Dijkstra,
- Dynamic Programming
- A*
- D*
- RRT
- Etc.

¿Dónde deben estar los *waypoints* de la ruta?



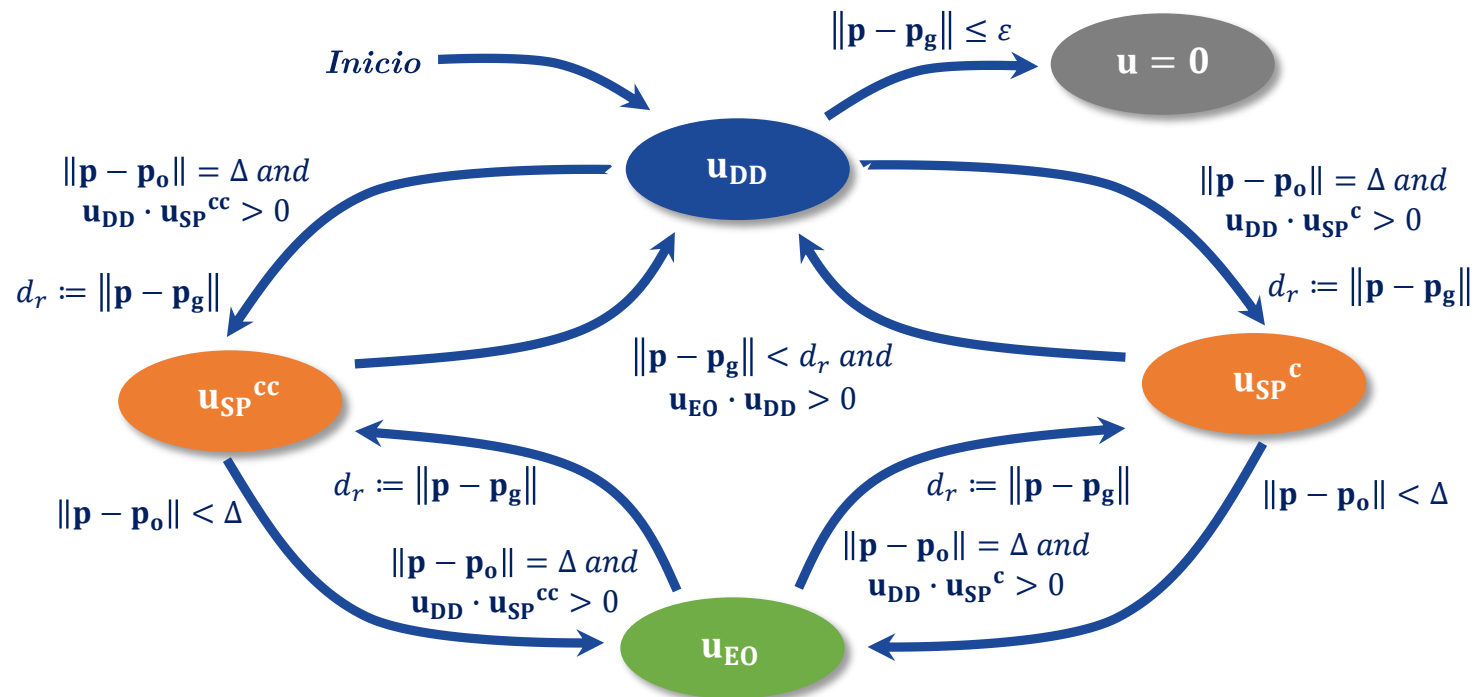
...el Path Planning de Bajo Nivel...

Path Planning



¿Qué dirección debe seguirse para moverse entre los *waypoints* objetivo?

- $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \|\mathbf{a}\| \|\mathbf{b}\| \cos(\angle(\mathbf{a}, \mathbf{b}))$: Producto escalar
- \mathbf{u}_{xx} : Vector de orientación
- \mathbf{p} : Posición actual del robot
- \mathbf{p}_g : Posición objetivo
- \mathbf{p}_o : Posición del obstáculo
- Δ : Distancia de guarda a los objetos
- ε : Condición de parada
- d_r : Distancia temporal al destino



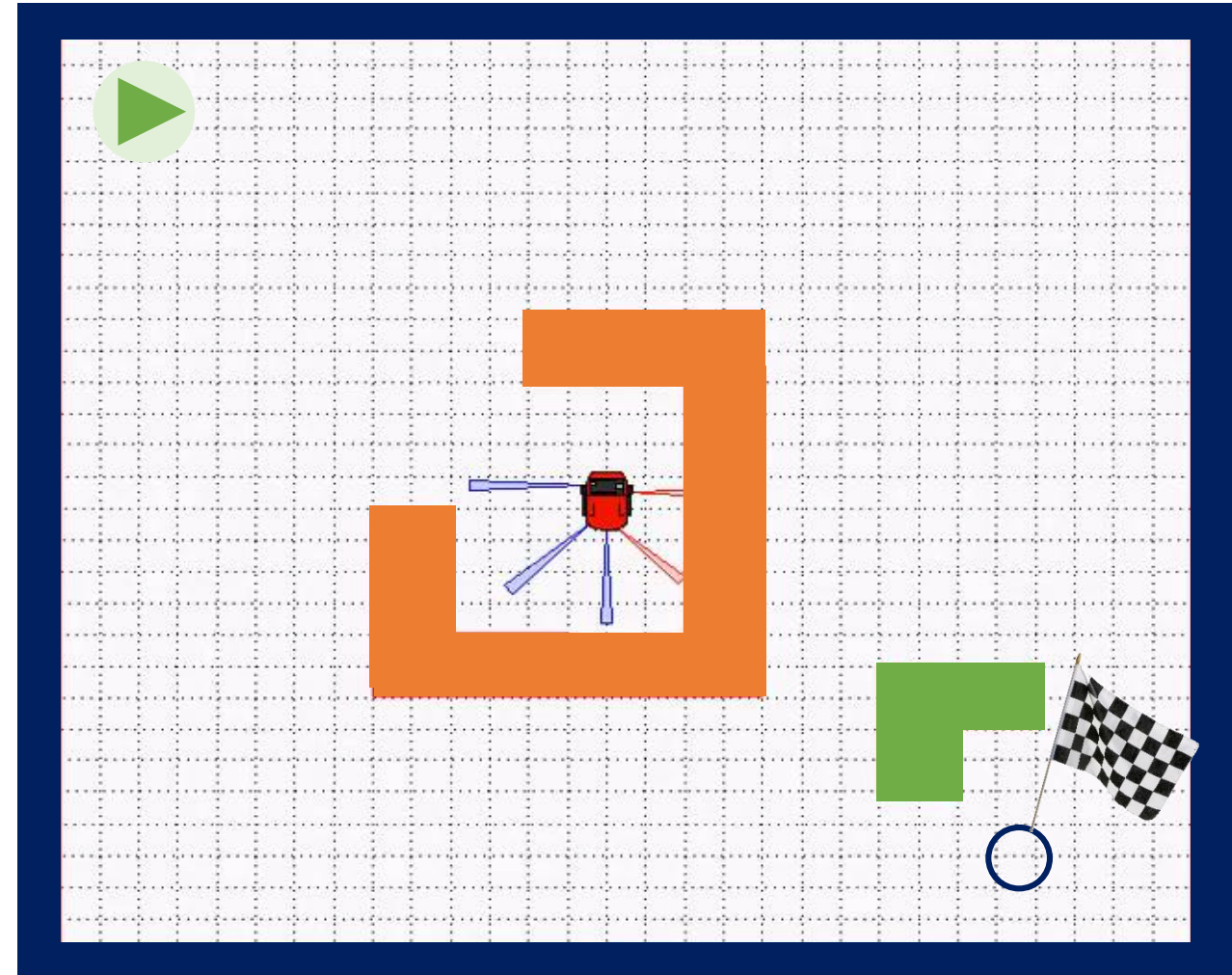
© Magnus Egerstedt, Georgia Institute of Technology

... y finalmente el Módulo de Ejecución.

Path Planning



¿Cómo hacer que el robot se mueva con esas direcciones?



1

Directo al Destino (DD)
(*Go To Goal*)

2

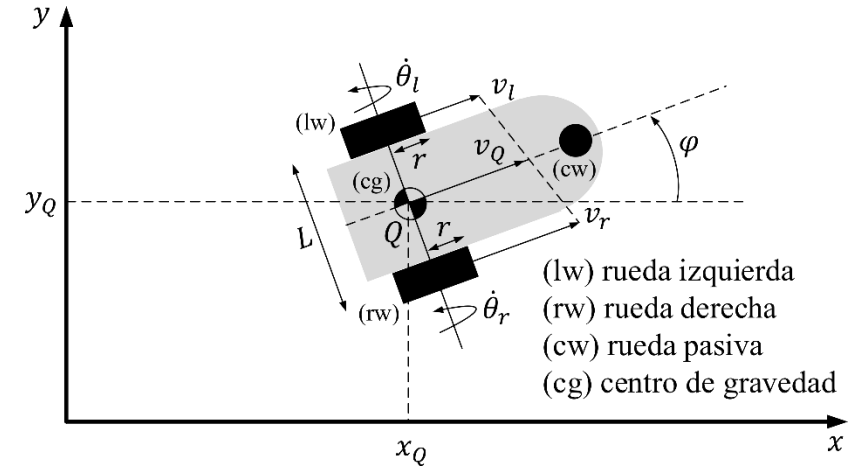
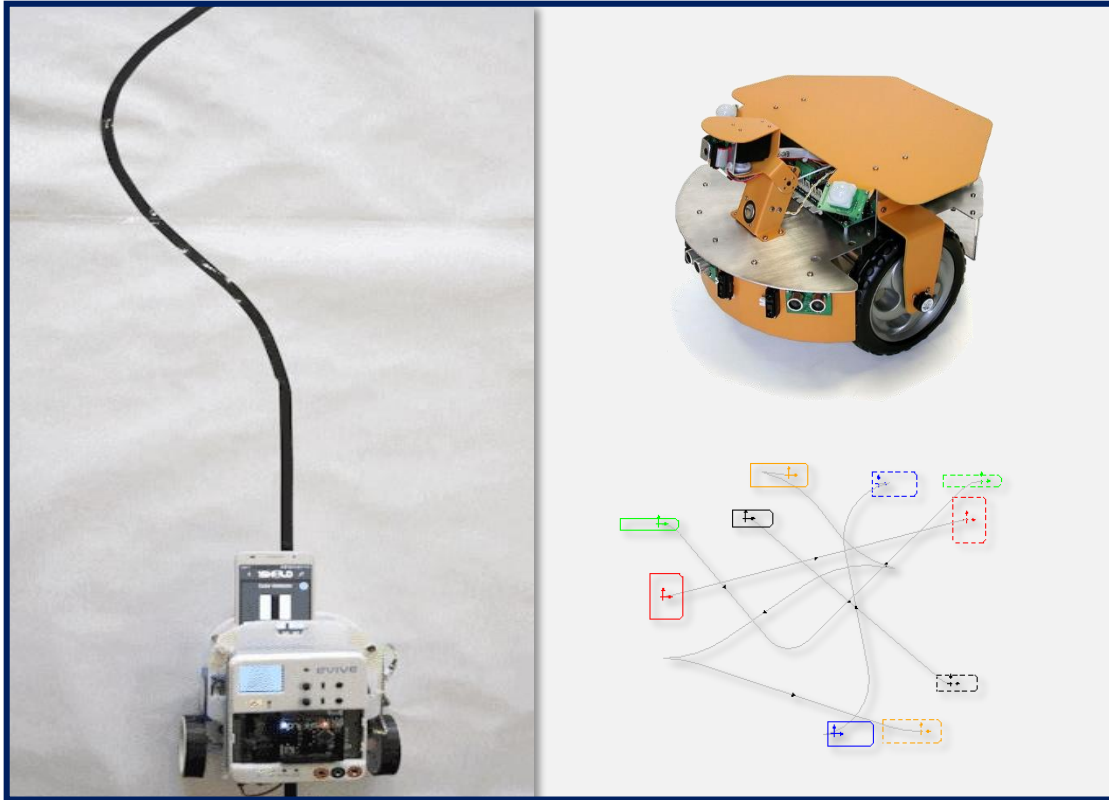
Evitar Obstáculos (EO)
(*Avoid Obstacles*)

3

Seguimiento de Paredes (SP)
(*Wall Following*)



Se plantea el sistema sobre Robots Móviles Diferenciales...



Modelo Cinemático Directo

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_Q \\ \dot{y}_Q \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r}{2} \cos(\varphi) & \frac{r}{2} \cos(\varphi) \\ \frac{r}{2} \sin(\varphi) & \frac{r}{2} \sin(\varphi) \\ \frac{r}{L} & \frac{-r}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{pmatrix}$$

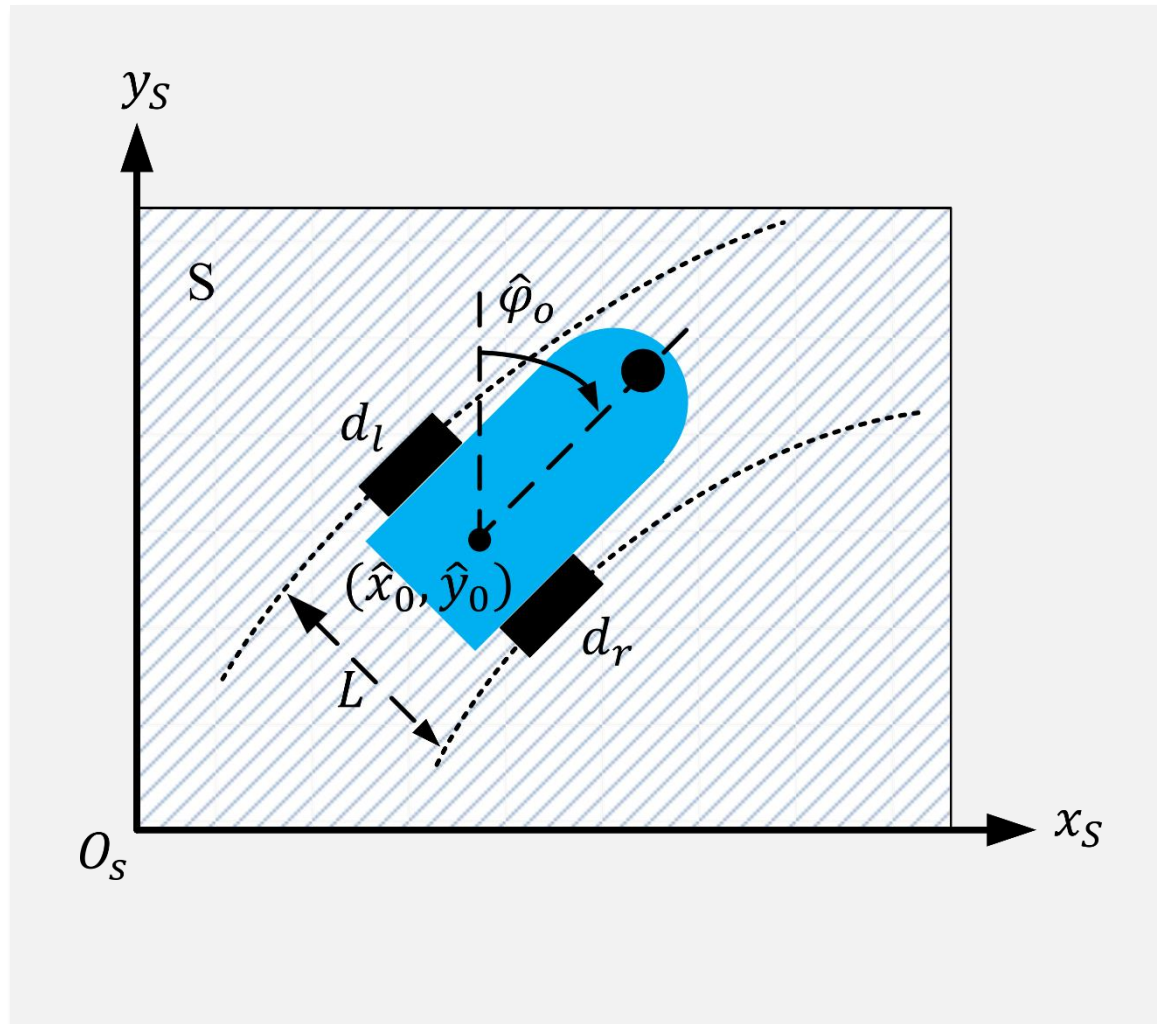
$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}}$$

Restricción no-holonómica



$$\dot{x}_Q \sin(\varphi) - \dot{y}_Q \cos(\varphi) = 0$$

...con un Posicionamiento basado en Odometría.



Basado en Odometría $[t_n, t_{n-1}]$ ($T_s = t_n - t_{n-1}$).

$$\hat{\varphi}_o[n] = \hat{\varphi}_o[n-1] + \frac{d_l[n] - d_r[n]}{L}$$

$$\hat{x}_o[n] = \hat{x}_o[n-1] + d_c[n] \sin(\hat{\varphi}_o[n])$$

$$\hat{y}_o[n] = \hat{y}_o[n-1] + d_c[n] \cos(\hat{\varphi}_o[n])$$

Donde

$d_l[n]$: distancia recorrida por la rueda izquierda en T_s

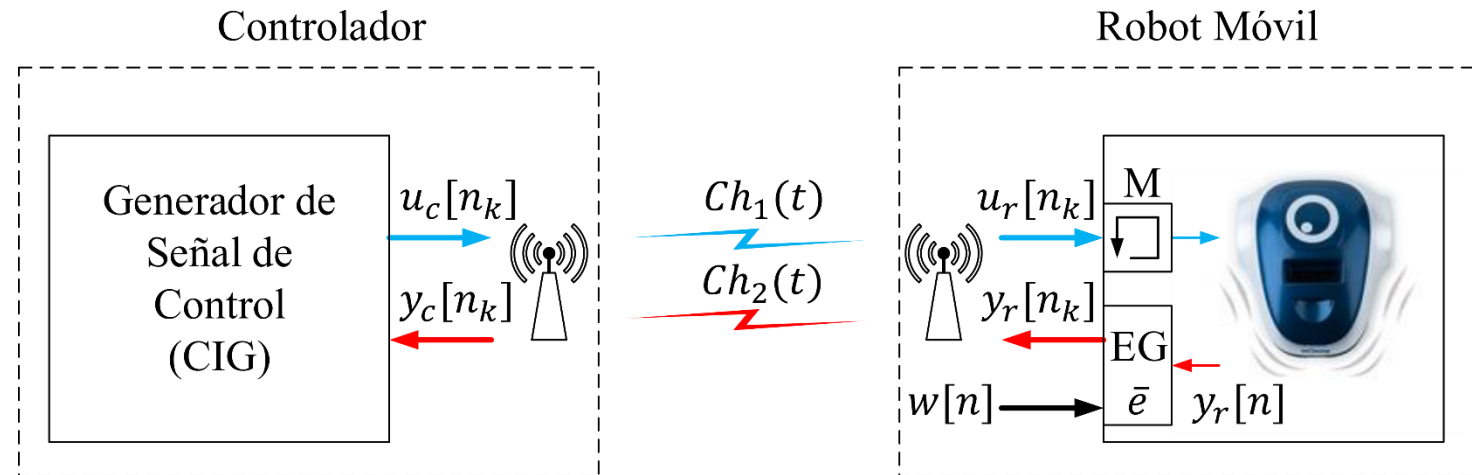
$d_r[n]$: distancia recorrida por la rueda derecha en T_s

$d_c[n] = \frac{d_l[n] + d_r[n]}{2}$: distancia media

L : distancia entre las ruedas

En este contexto, planeamos la siguiente arquitectura...

Basado en las ideas de Dormido et al. [20], y Durand and Marchand [39]



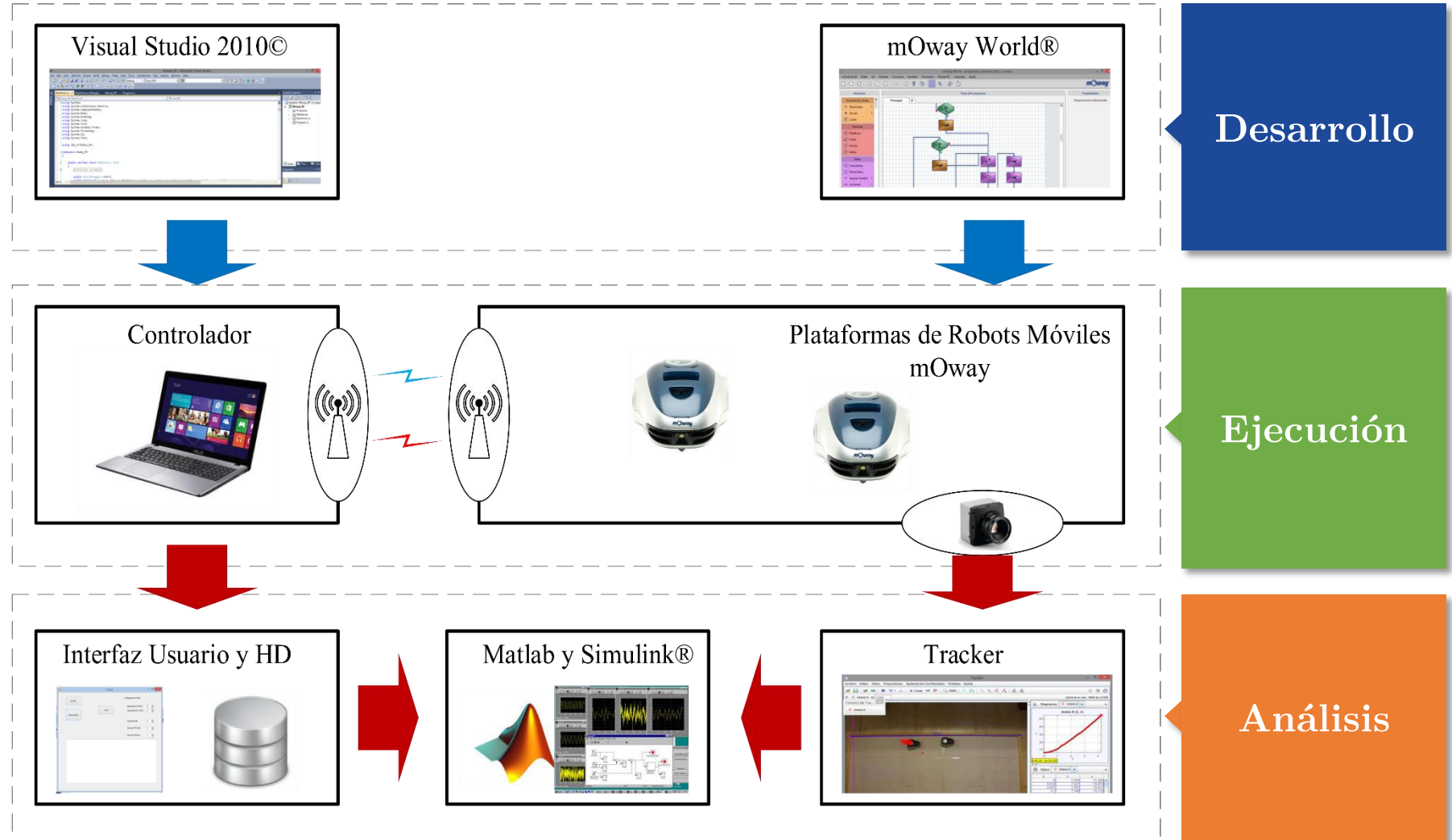
Características

- La planta (robot) trabaja de forma nativa en modo periódico (f_s)
- Generador de Eventos (EG) basado en Cruce por Nivel
- Comunicación bidireccional sobre canales RF
- Actividad supeditada a los eventos k

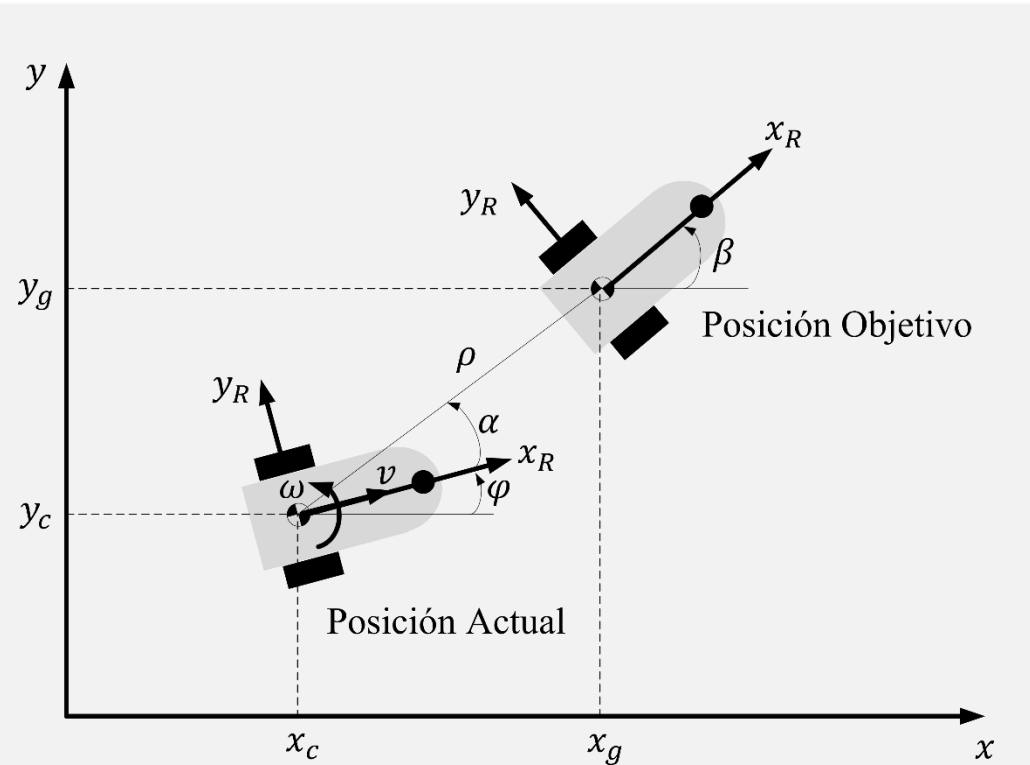
El sistema al tener naturaleza periódica **es inmune a los efectos Zeno**¹

(1) El fenómeno Zeno (chattering) consiste en una acumulación de impactos en tiempo finito o bien una acumulación de infinitos cambios en el sistema. Por ejemplo, si el sistema modela el funcionamiento de una pieza o el conmutador de una máquina en éste se producirá un excesivo desgaste.

...y un entono de Experimentación de Eventos vs. Periódico...



El Algoritmo DD continuo converge asintóticamente...



ρ : error de distancia
 α : error de orientación

Ecuaciones Dinámicas...

$$\dot{\rho} = -v \cos(\alpha)$$

$$\dot{\alpha} = \frac{-v \sin(\alpha)}{\rho} - \omega$$

... con Ley de Control $u = (v, \omega)$

$$v = K_{\rho} \rho \cos(\alpha) \quad , \quad K_{\rho} > 0$$

$$\omega = K_{\rho} \sin(\alpha) \cos(\alpha) + K_{\alpha} \alpha \quad , \quad K_{\alpha} > 0$$

K_{ρ} : factor de aproximación lineal y K_{α} : factor de aproximación angular

Convergencia Asintótica

(según MD de Lyapunov)

(Malu y Majumdar [40])

...como demuestran los planos de fase.

Los planos de fase demuestran la Estabilidad del Algoritmo

Ecuaciones Dinámicas

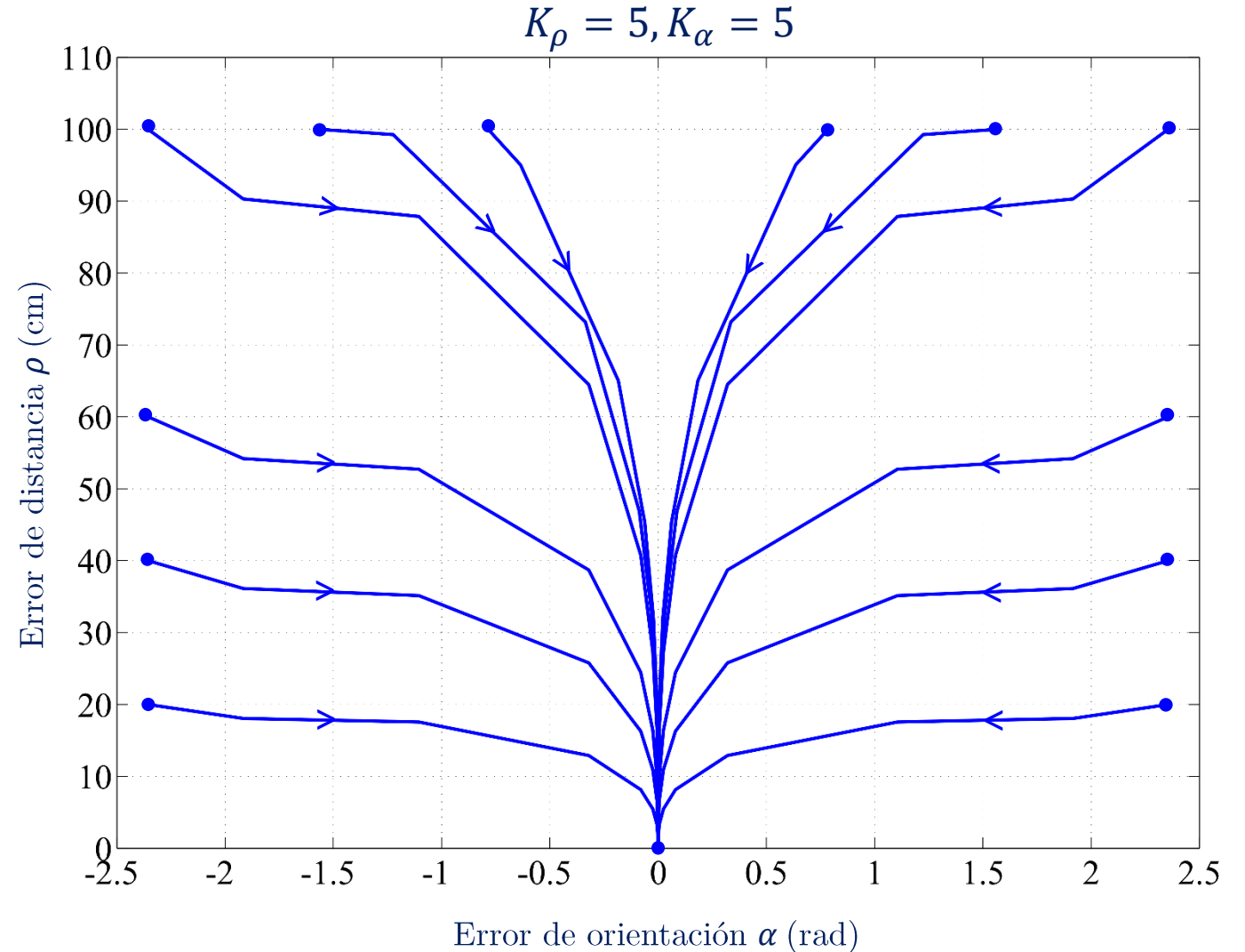
$$\dot{\rho} = -v \cos(\alpha)$$

$$\dot{\alpha} = \frac{-v \sin(\alpha)}{\rho} - \omega$$

Ley de Control

$$v = K_{\rho} \rho \cos(\alpha) \quad , \quad K_{\rho} > 0$$

$$\omega = K_{\rho} \sin(\alpha) \cos(\alpha) + K_{\alpha} \alpha \quad , \quad K_{\alpha} > 0$$



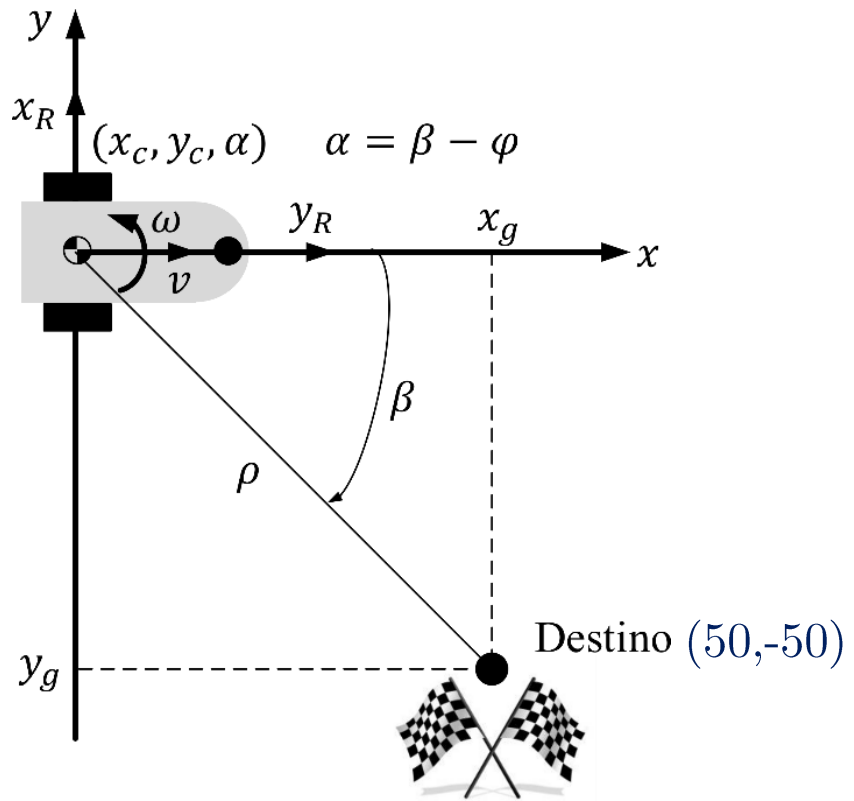
¿Y en tiempo Discreto?

$f_s = 10 \text{ Hz}$

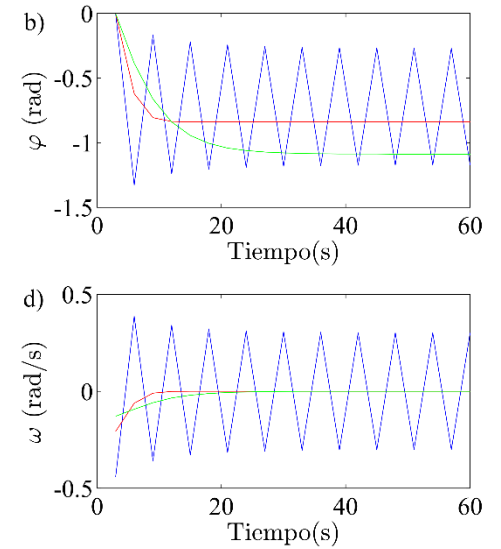
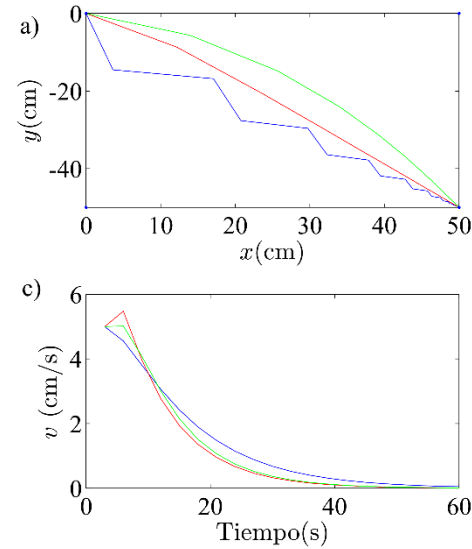
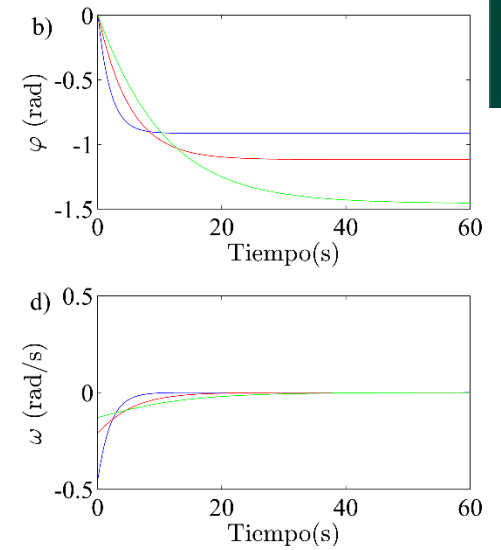
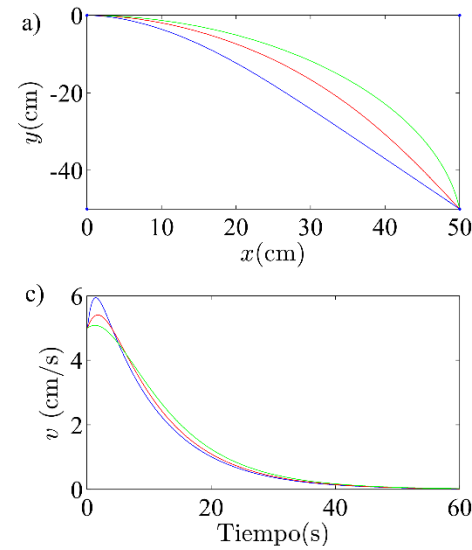
$f_s = 0,3 \text{ Hz}$

$$v[n] = K_\rho \rho[n] \cos(\alpha[n]), K_\rho > 0$$

$$\omega[n] = K_\rho \sin(\alpha[n]) \cos(\alpha[n]) + K_\alpha \alpha[n], K_\alpha > 0$$

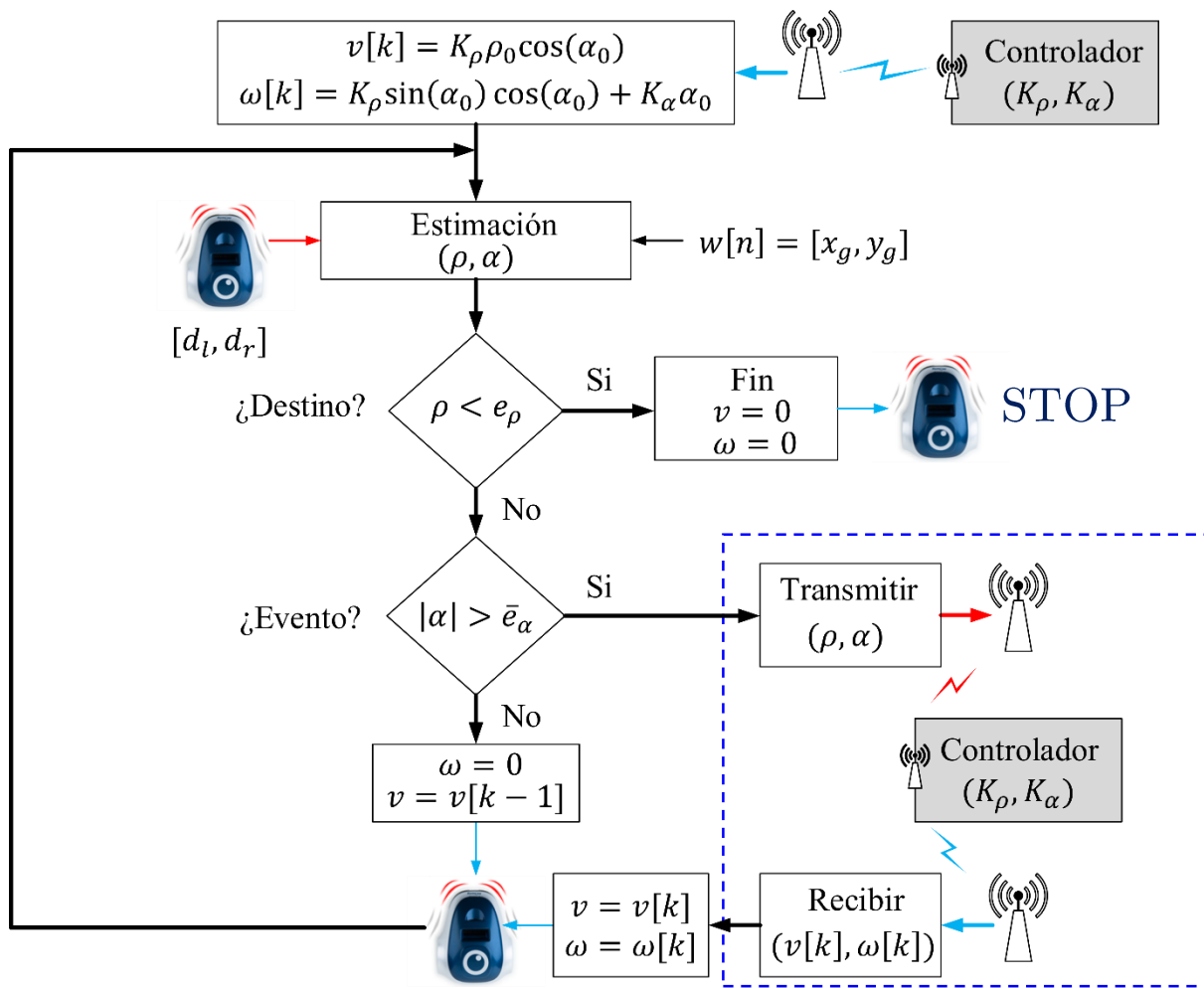


$K_\rho = 0,1s^{-1}$, $K_\alpha = 0,5s^{-1}$ azul, $K_\alpha = 0,2s^{-1}$ rojo, $K_\alpha = 0,1s^{-1}$ verde



Con una f_s elevada se garantiza la estabilidad del algoritmo

Planteamos el Algoritmo DD en el dominio de eventos...



Dos Nuevas Condiciones

- Condición de parada (e_ρ): $\rho < e_\rho$
- Event Threshold (\bar{e}_α): $|\alpha| > \bar{e}_\alpha$

Ley de Control (Discreta)

$$v[k] = K_\rho \rho[k] \cos(\alpha[k]) , K_\rho > 0$$

$$\omega[k] = K_\rho \sin(\alpha[k]) \cos(\alpha[k]) + K_\alpha \alpha[k] , K_\alpha > 0$$

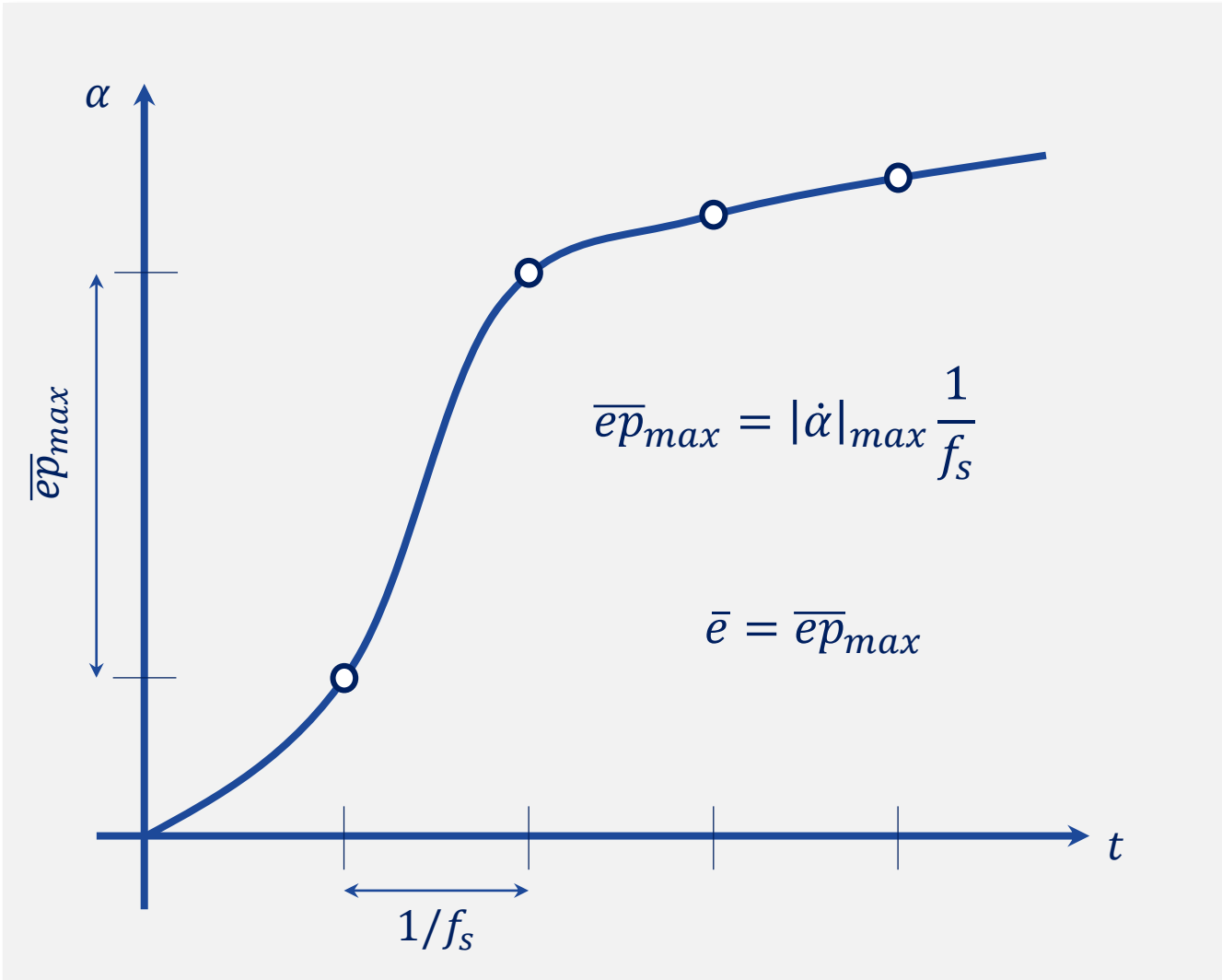


Si $|\alpha| > \bar{e}_\alpha$ se aplica la ley de control discreta garantizando la Estabilidad del Algoritmo

K_ρ factor de aproximación lineal y K_α factor de aproximación angular

...con un Criterio para fijar el event-threshold.

Para que ambos sistemas, periódico y basado en eventos, sean comparables se fija la misma cota de error máximo (Miskowicz [24])



$$f_s = 10 \text{ Hz}$$

$$|\omega|_{max} = 2,6 \text{ rad/s}$$

$$\bar{e}_\alpha = \bar{e}_p_{max} = |\dot{\alpha}|_{max} \frac{1}{f_s} = |\omega|_{max} \frac{1}{f_s} = 0,26 \text{ rad}$$

En un entorno experimental, el algoritmo DD...

Dos Escenarios de Análisis:

1. Control Periódico
2. Sistema Propuesto



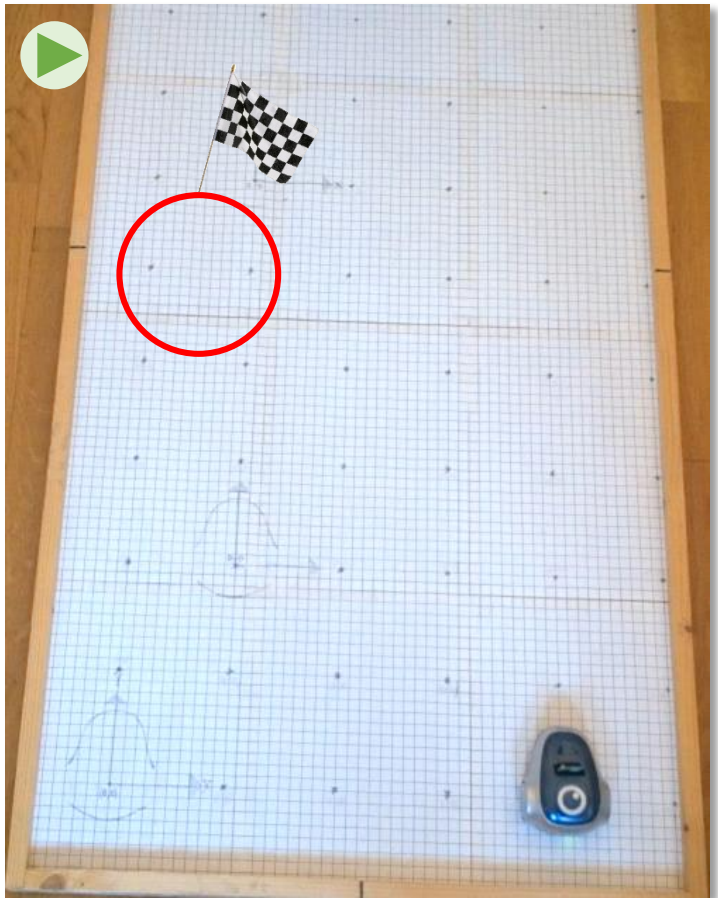
$$x_g = 50 \text{ cm}$$

$$y_g = 40 \text{ cm}$$

Sistema Periódico



Sistema Propuesto

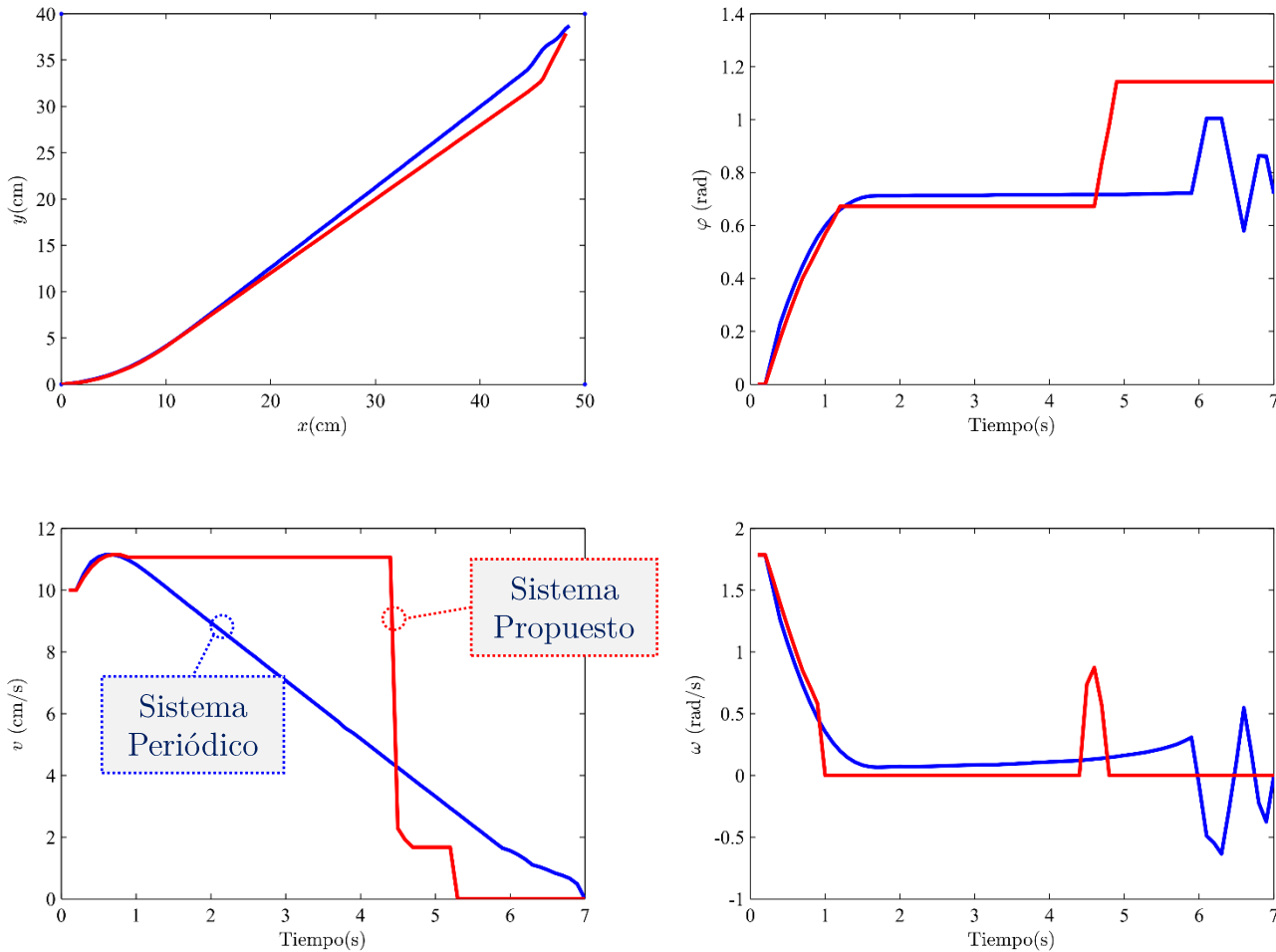


Escenario	Sistema	f_s (Hz)	K_p (1/s)	K_α (1/s)	\bar{e}_α (rad)	e_ρ (cm)
1	Periódico	10	0,2	2,5	-	1
2	Eventos	-	0,2	2,5	0,26	1

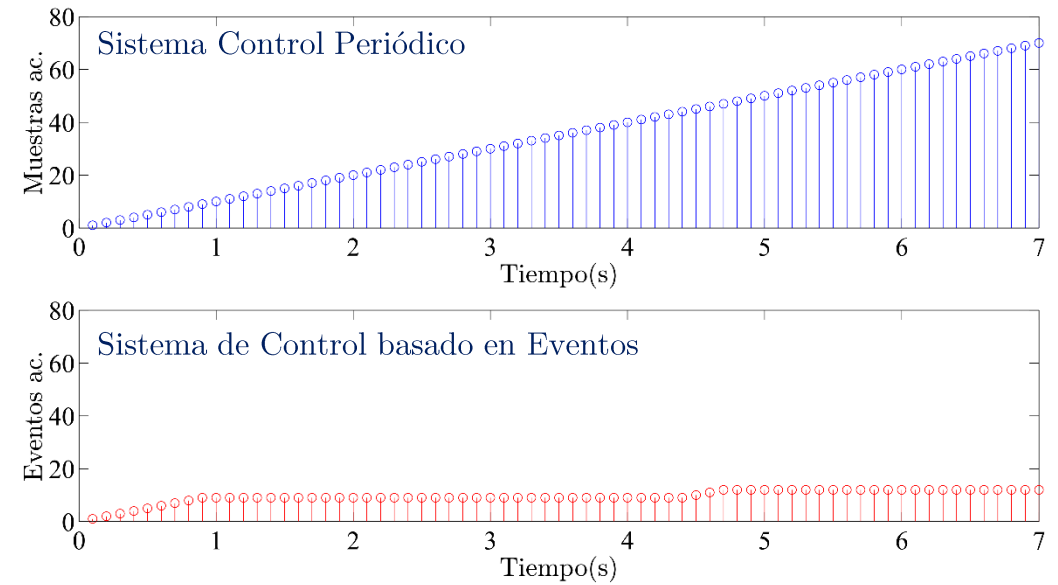
Ambos sistemas **convergen** al destino sin inestabilidades

...presenta los siguientes resultados.

Variables Dinámicas



Actividad Acumulada del Controlador

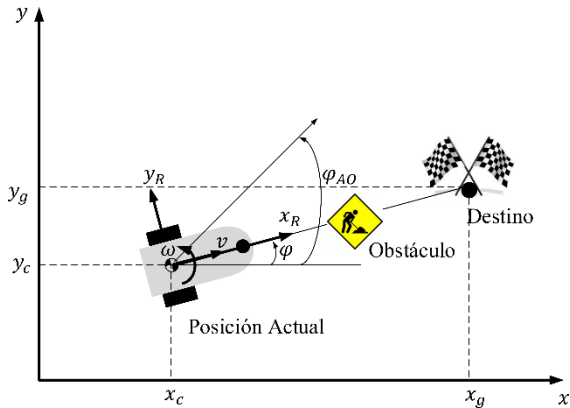


Tiempo Convergencia	-26%	Reducción Actividad	-83%
(5,2 s vs. 7 s)		(12 eventos vs. 70 muestras)	

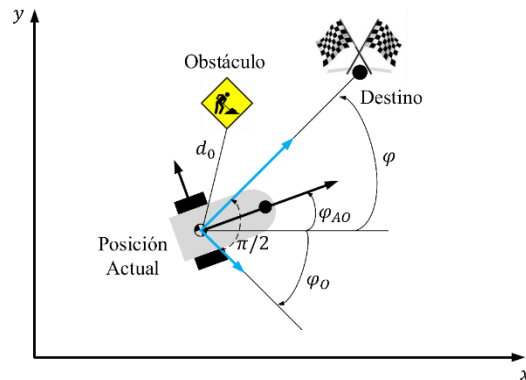
En azul sistema periódico y en rojo control basado en eventos

EO: Evitar Obstáculos

Hard Switches



Blending

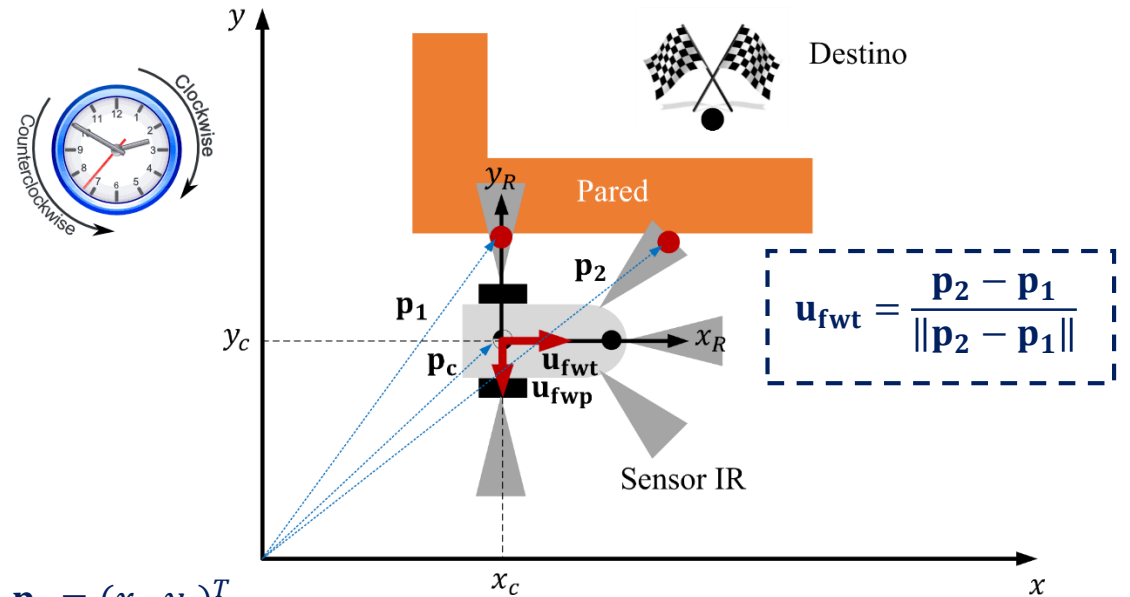


$$\sigma(d_0) = 1 - e^{-kd_0}$$

- *Hard Switches* $\varphi_{AO} = \varphi \pm \gamma$ donde γ puede ser π o $\frac{\pi}{2}$

- *Blending* $\varphi_{AO} = \sigma(d_0)\varphi + (1 - \sigma(d_0))\varphi_0$

SP: Seguimiento de Paredes



$$\mathbf{p}_c = (x_c, y_c)^T$$

$$\mathbf{v}_{rw} = (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_c) - ((\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_c) \cdot \mathbf{u}_{fwt})\mathbf{u}_{fwt}$$

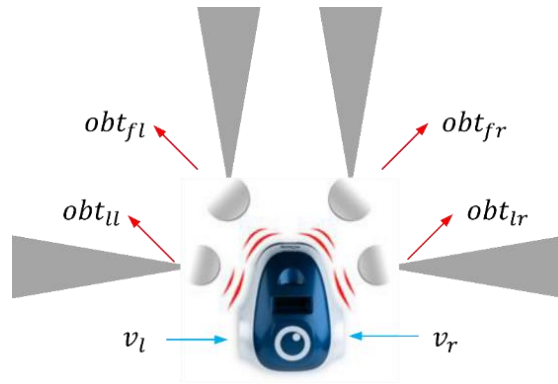
$$\mathbf{u}_{fwt} = \frac{\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1}{\|\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1\|}$$

$$\mathbf{u}_{fwp} = \mathbf{v}_{rw} - d_w \frac{\mathbf{v}_{rw}}{\|\mathbf{v}_{rw}\|}$$

$$\mathbf{u}_{fw} = k_1 \cdot \mathbf{u}_{fwt} + k_2 \cdot \mathbf{u}_{fwp}$$

Parámetros

- Event Threshold \bar{e}_{EO}

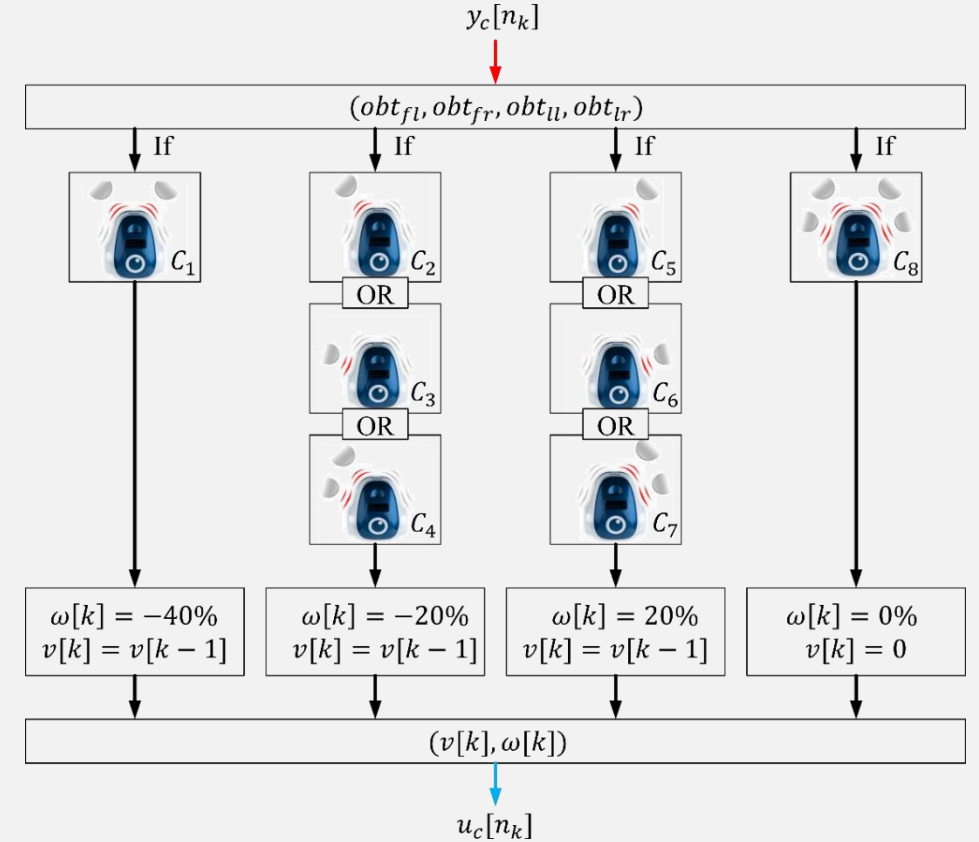


Condición de Evento

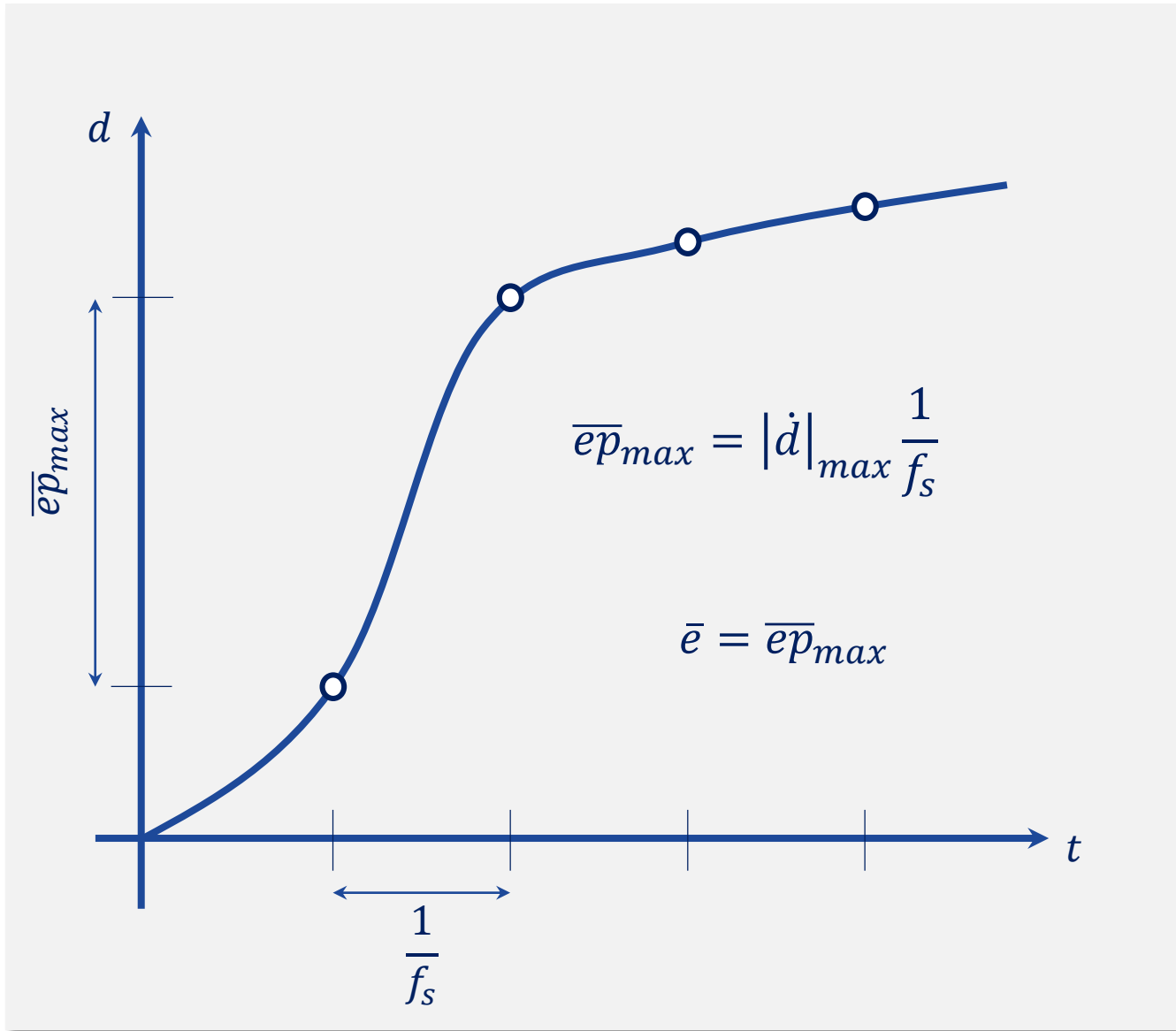
if $[(obt_{fl} > \bar{e}_{EO}) \text{ OR } (obt_{ll} > \bar{e}_{EO}) \text{ OR } \dots$
 $\dots (obt_{fr} > \bar{e}_{EO}) \text{ OR } (obt_{lr} > \bar{e}_{EO})]$
 $\{evento = true\}$
else $\{evento = false\}$



Ley de Control



...siguiendo el mismo Criterio para fijar el event-threshold.



$$f_s = 10 \text{ Hz}$$

$$|v|_{max} = 3 \text{ cm/s}$$

$$\bar{e}_{EO} = \bar{e}_{SP} = |\dot{d}|_{max} \frac{1}{f_s} = |v|_{max} \frac{1}{f_s} = 0,3 \text{ cm}$$

...y lo implementamos en la plataforma de experimentación...

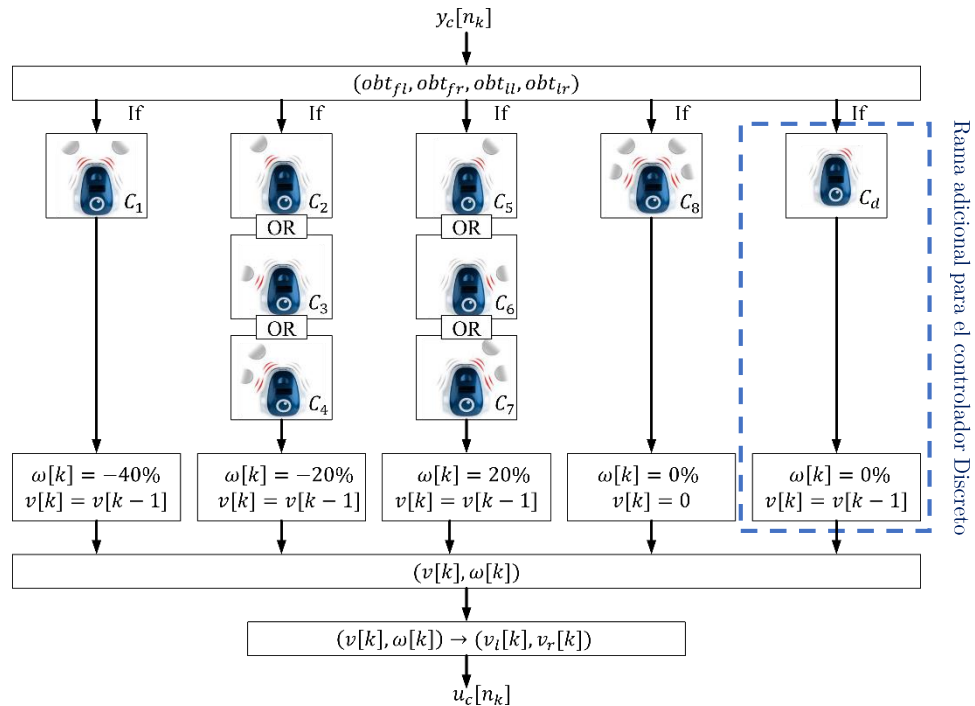
$$v = 3 \text{ cm/s}; |\omega_{max}| = 2,6 \text{ rad/s}$$

Escenario	Sistema	f_s (Hz)	\bar{e}_{EO} (cm)
1	Periódico	10	-
2	Eventos	-	0,3

Sistema Periódico



Sistema Propuesto

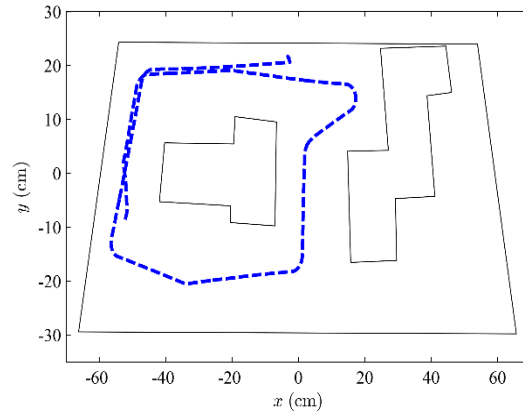
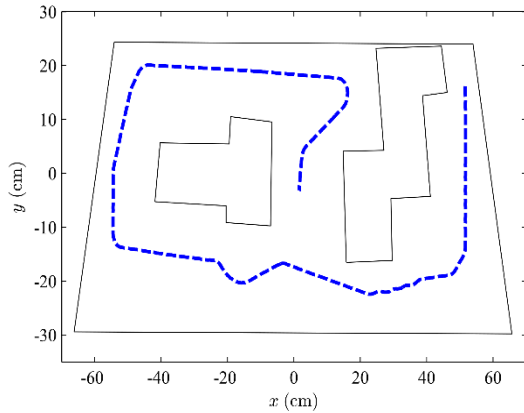


La solución propuesta resuelve el problema de navegación sin inestabilidades...

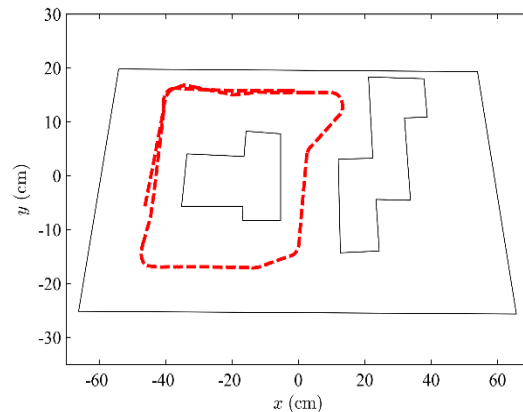
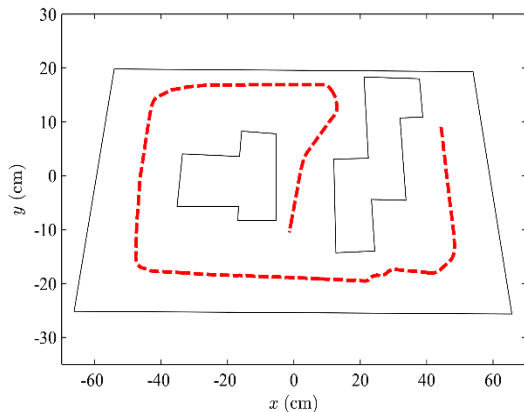
... y que presenta los siguientes resultados experimentales.

Trayectorias

Sistema Control Periódico

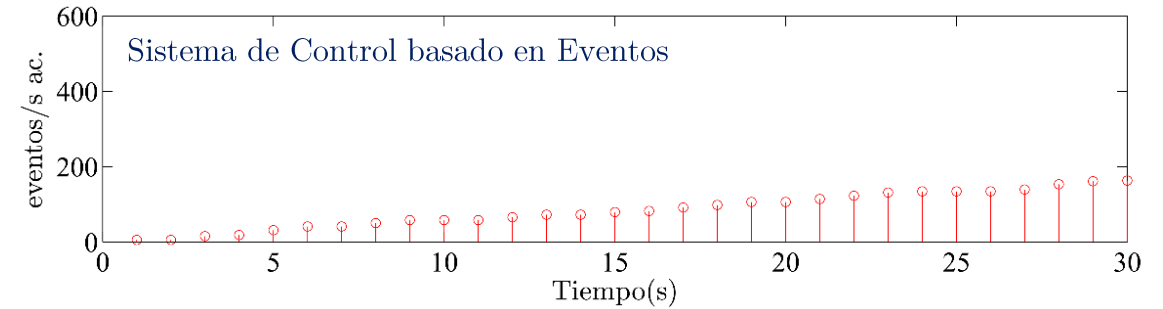
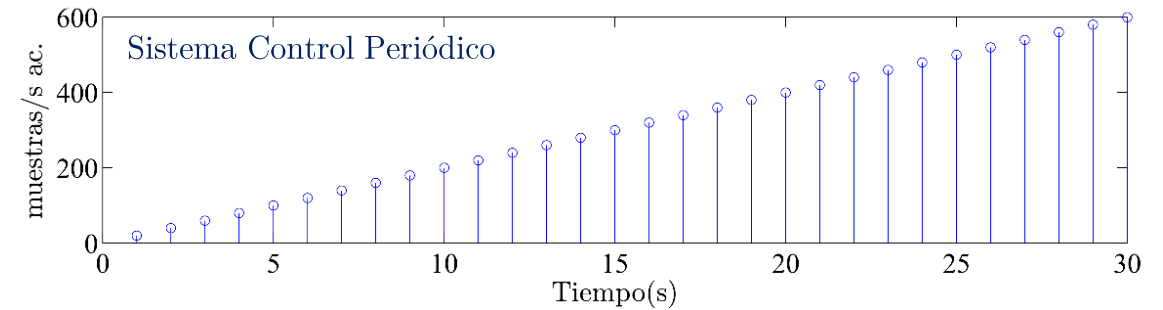


Sistema Control basado en Eventos



En azul sistema periódico y en rojo control basado en eventos

Actividad Acumulada del Controlador



...además con unas eficiencias muy notables en la actividad del controlador

Reducción
Actividad

-73%

(163 eventos vs. 600 muestras)

Por otro lado, el algoritmo SP se rige por...

Parámetros

- Event Threshold \bar{e}_{SP}
- Counter-clockwise
- Distancia a la pared w
- Velocidad de aproximación a la pared v_w

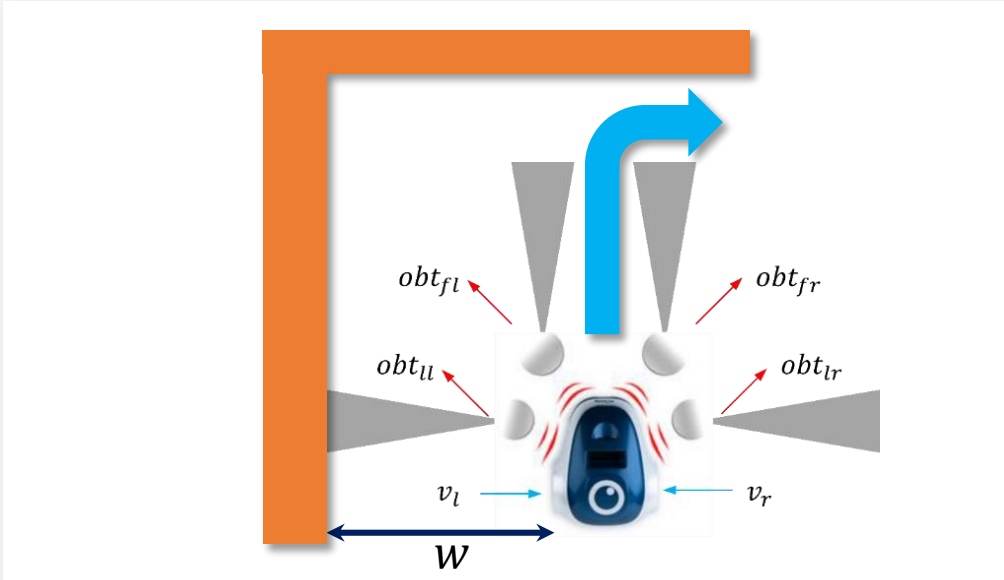


Condición de Evento

if $[(obt_{fl} > 0) \text{ OR } (abs(obt_{ll} - w) > \bar{e}_{SP})]$
 $\{evento = true\}$
else $\{evento = false\}$

Ley de Control

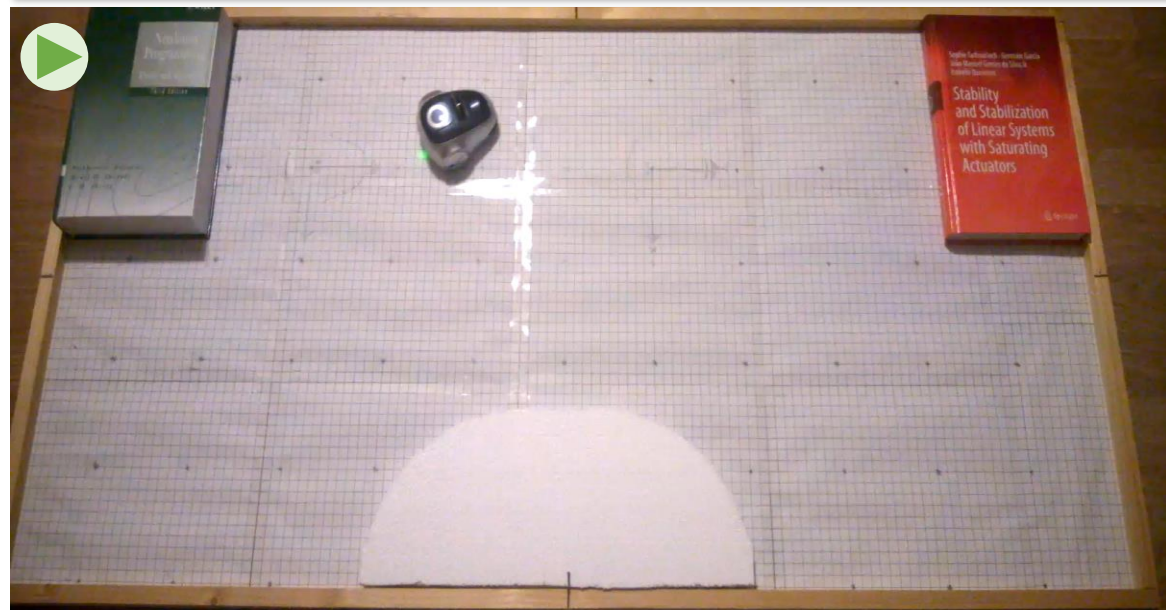
if $(obt_{fl} > 0)$
 $\{v_r[k] = 0, v_l[k] = v\}$
else
 $\{v_r[k] = v, v_l[k] = (obt_{ll} - w)v_w + v\}$



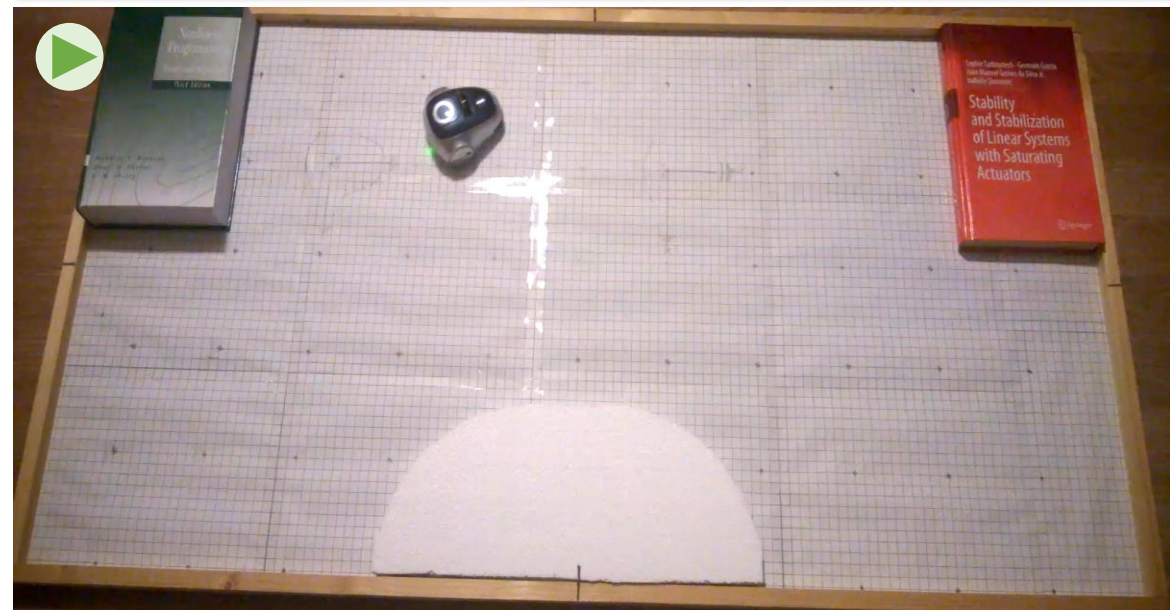
...y que implementamos en la plataforma...

Escenario	Sistema	f_s (Hz)	w (cm)	v (cm/s)	v_w (1/s)	\bar{e}_{SP} (cm)
1	Periódico	10	1,5	12	6	-
2	Eventos	-	1,5	12	6	0,30

Sistema Periódico

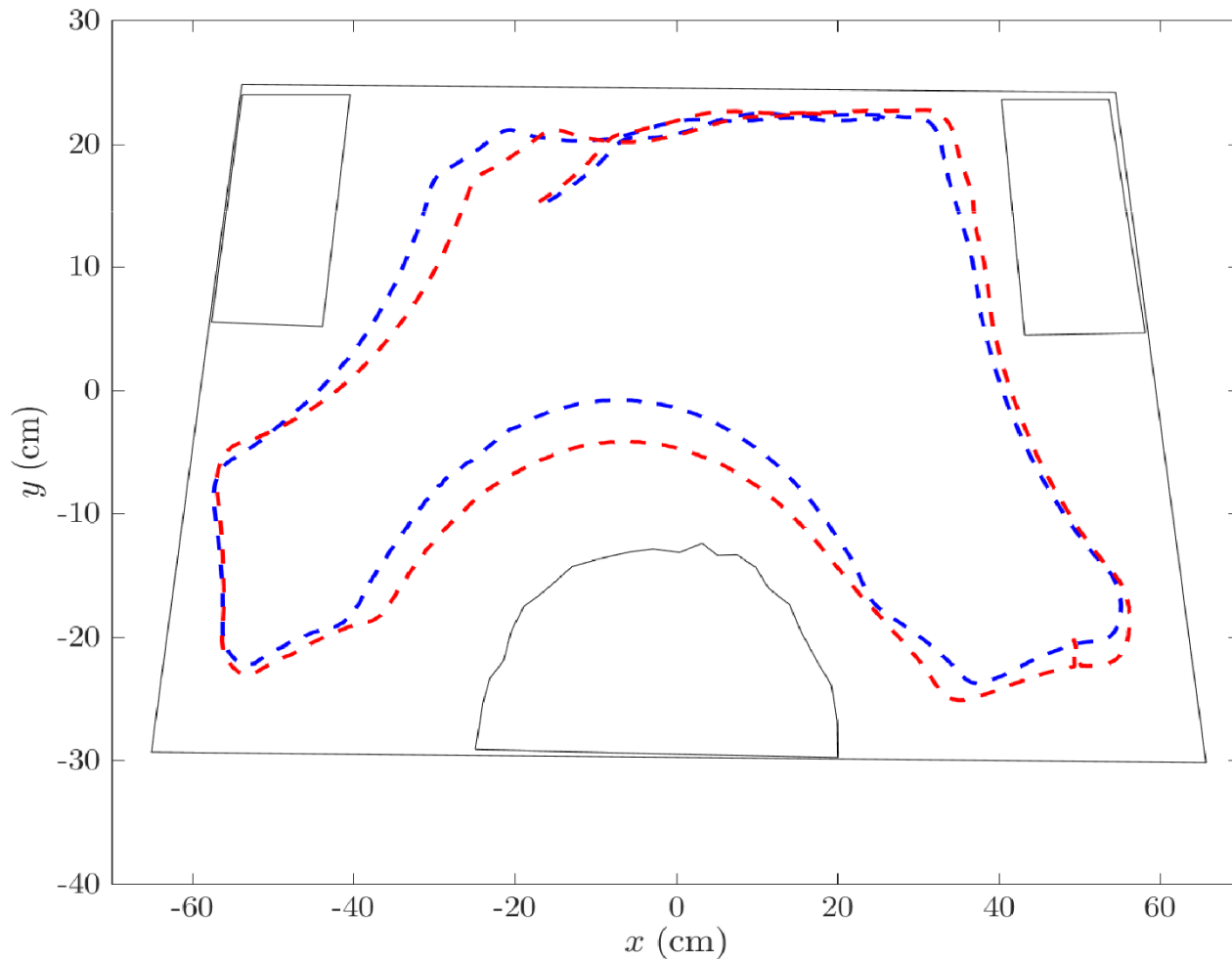


Sistema Propuesto



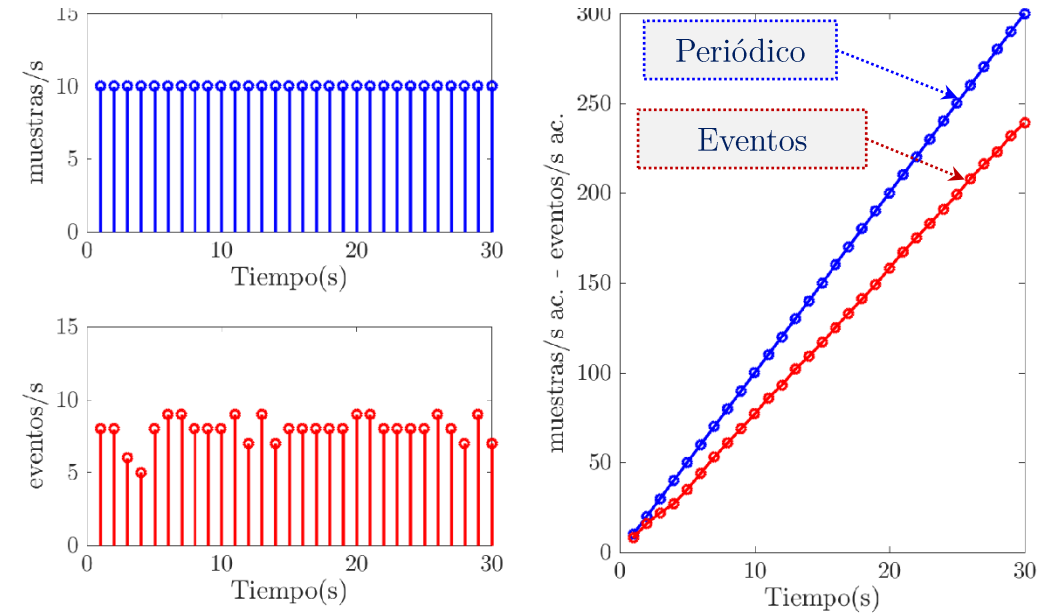
La solución propuesta **resuelve** el problema de navegación **sin inestabilidades**

Trayectorias



En azul sistema periódico y rojo control basado en eventos con $\bar{e}_{SP} = 0,30$ cm.

Actividad del Controlador

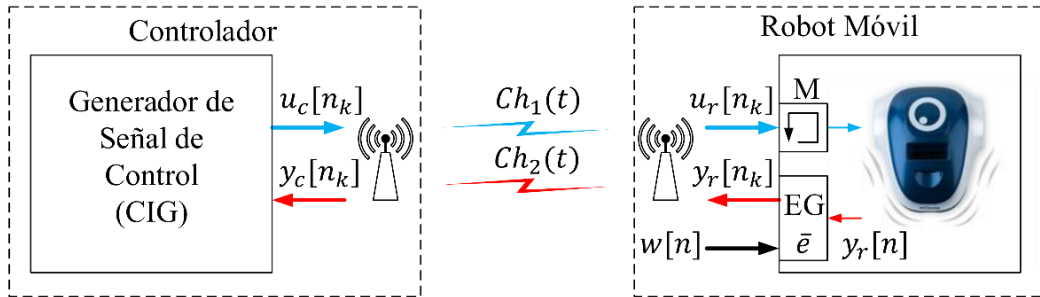
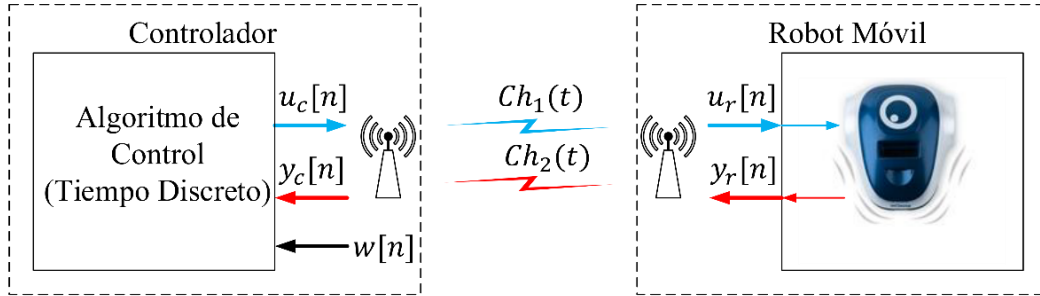


Reducción Actividad

-20%

(239 eventos vs. 300 muestras)

¿Cómo medimos el Consumo de Recursos?



$$N_N = \frac{N_{eve}}{N_{per}}$$

(Ratio de Eventos¹)

$$\eta_N(\%) = (1 - N_N)100$$

(Eficiencia Máxima)

$$N_R = \frac{\text{Consumo_Recurso_R}_{eve}}{\text{Consumo_Recurso_R}_{dis}}$$

(Ratio de Actividad de un Recurso R)

$$\eta_R(\%) = (1 - N_R)100$$

(Eficiencia Consumo Recurso R)

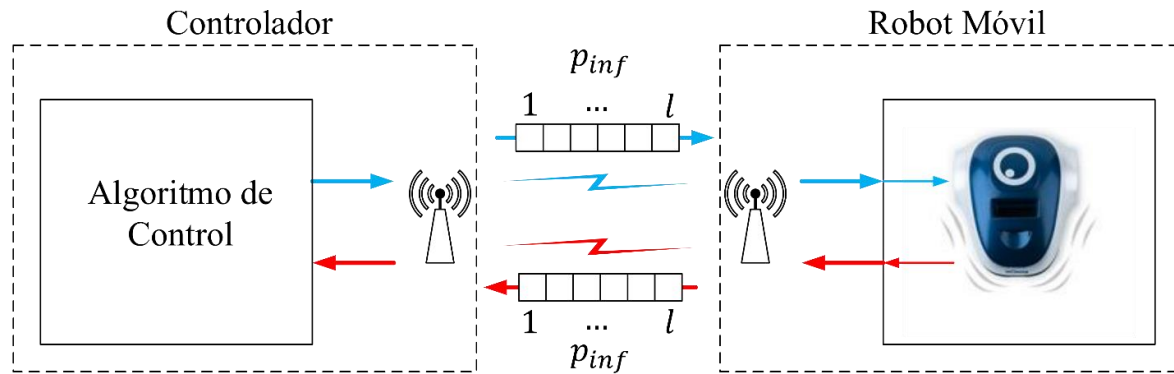
$$\eta_R(\%) \leq \eta_N(\%)$$

Eficiencia

- 1 Comunicaciones
- 2 Recursos de Computación
- 3 Energía

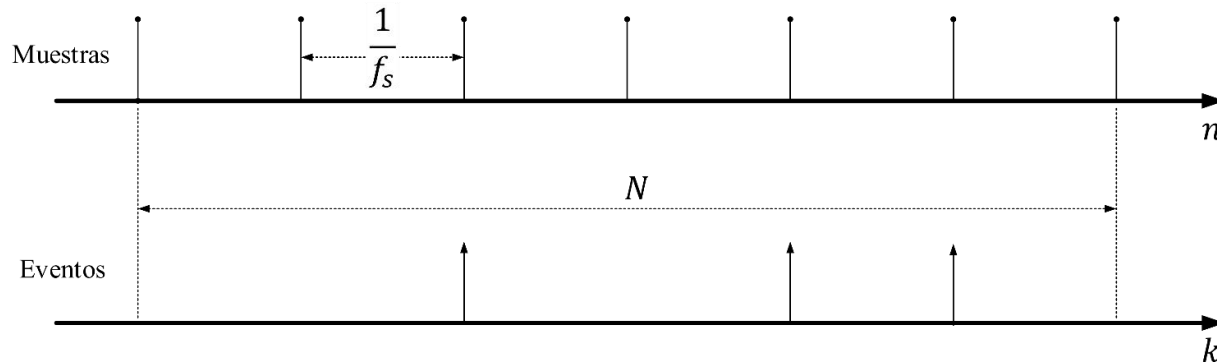
(1) Miskowicz [41], Pawlowski et al. [42], Lian et al. [43], Nguyen and Suh [44], Yook et al. [45]

El primer recurso es el Ancho de Banda (BW)...



$$BW_{per} \text{ (bps)} = \frac{lN_{per}}{N} ; BW_{eve} \text{ (bps)} = \frac{lN_{eve}}{N}$$

$$N_{BW} = \frac{BW_{eve}}{BW_{dis}} = \frac{N_{eve}}{N_{per}} = N_N$$

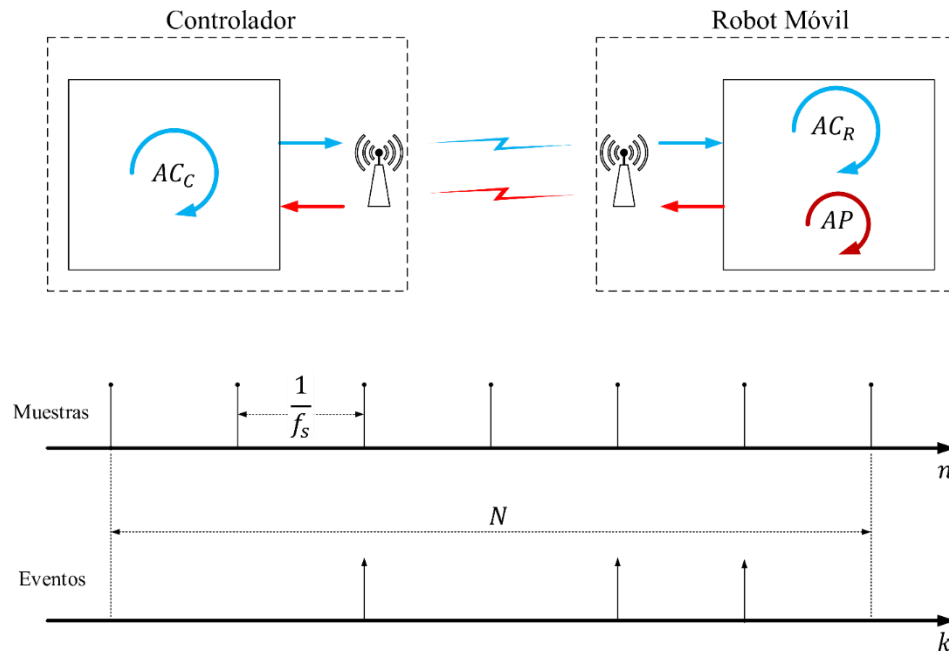


$$\eta_{BW}(\%) = \eta_N(\%)$$

Se obtiene **la eficiencia Máxima**

l longitud de la información a transmitir en bits, N_{per} número de periodos en el sistema discreto y N_{eve} número de eventos.

...seguido de los Recursos de Computación (CL)...



$$CL_{per}(\text{ops/s}) = \frac{(nC_p + nR_p + nP_p)N_{per}}{N}$$

$$CL_{eve}(\text{ops/s}) = \frac{(nC_e + nR_e)N_{eve} + nP_e N_{per}}{N}$$

$$N_{CL} = \frac{CL_{per}}{CL_{eve}} = \frac{(nC_e + nR_e)}{(nC_p + nR_p + nP_p)} N_N + \frac{nP_e}{(nC_p + nR_p + nP_p)}$$

$$\eta_{CL}(\%) = (1 - N_{CL})100$$

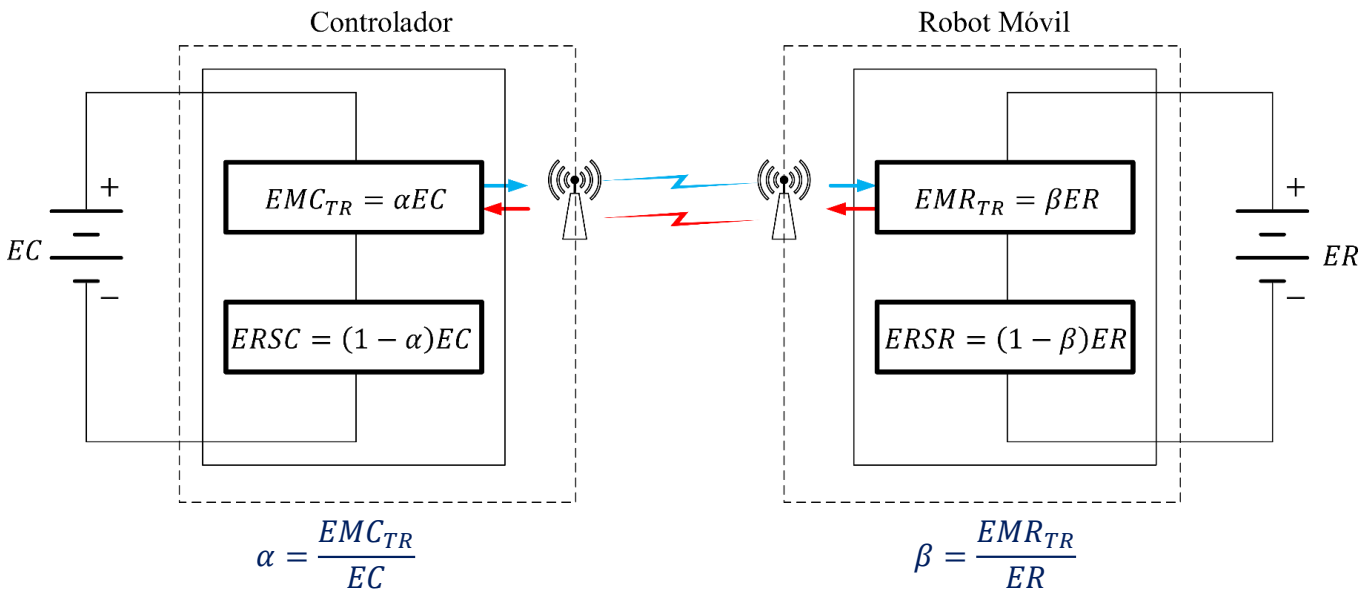
Se supone que $nC_p \approx nC_e$ y $nR_p \approx nR_e$

Si $nP_p \rightarrow 0$ y $nP_e \rightarrow 0 \Rightarrow \eta_{CL}(\%) \rightarrow \eta_N(\%)$
 Si $nP_p \uparrow$ y $nP_e \uparrow \Rightarrow \eta_{CL}(\%) \rightarrow 0$

La Eficiencia **depende de los algoritmos de *polling***

nC_x número de operaciones en el controlador, nR_x número de operaciones en el robot, nP_p y nP_e operaciones de *polling* en el caso periódico y el de eventos respectivamente.

...y finalmente el Consumo de Energía (EC y ER).



$$N_{EC} = \frac{\alpha N_{eve} + (1 - \alpha)}{\alpha N_{per} + (1 - \alpha)} \quad N_{ER} = \frac{\beta N_{eve} + (1 - \beta)}{\beta N_{per} + (1 - \beta)}$$

$$\eta_{EC}(\%) = (1 - N_{EC})100$$

$$\eta_{ER}(\%) = (1 - N_{ER})100$$

Se supone que salvo los modems, la energía del resto de sistemas no depende de la actividad

$$EC = EMC_{TR} + ER_{SC} = \alpha EC + (1 - \alpha)EC \Rightarrow ER_{SC} \neq f(N_N)$$

$$ER = EMR_{TR} + ER_{SR} = \beta ER + (1 - \beta)ER \Rightarrow ER_{SR} \neq f(N_N)$$

$$EC_{per} = \alpha EC N_{per} + (1 - \alpha)EC \quad EC_{eve} = \alpha EC N_{eve} + (1 - \alpha)EC$$

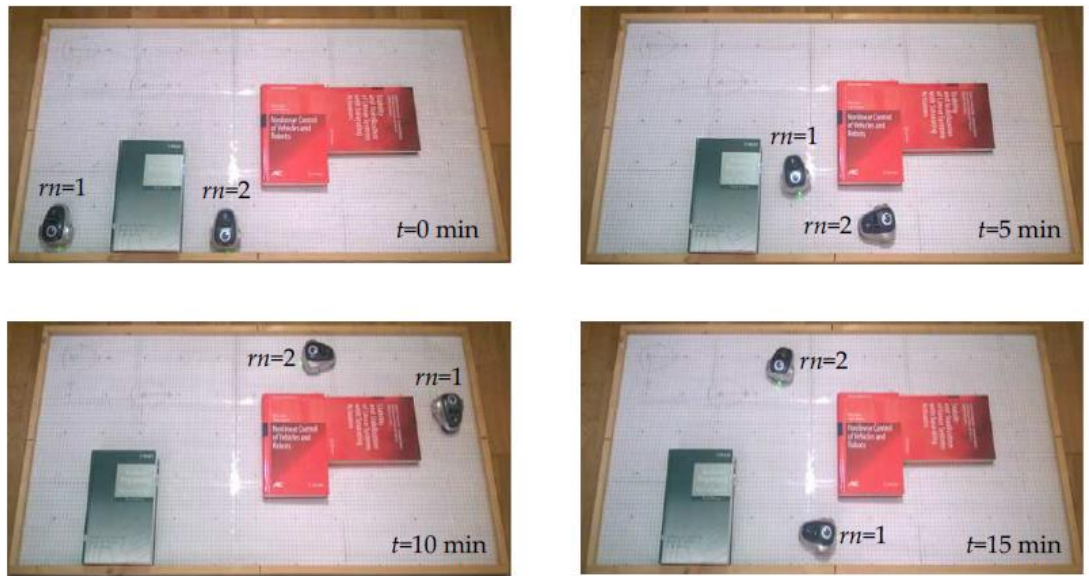
$$ER_{per} = \beta ER N_{per} + (1 - \beta)ER \quad ER_{eve} = \beta ER N_{eve} + (1 - \beta)ER$$

Si $\alpha \rightarrow 0 \Rightarrow \eta_{EC}(\%) \rightarrow 0$
 Si $\beta \rightarrow 0 \Rightarrow \eta_{ER}(\%) \rightarrow 0$
 Si $\alpha \rightarrow 1 \Rightarrow \eta_{EC}(\%) \rightarrow \eta_N(\%)$
 Si $\beta \rightarrow 1 \Rightarrow \eta_{ER}(\%) \rightarrow \eta_N(\%)$

A mayor consumo del modem, más eficientes son los controladores propuestos

EMC_{TR} y EMR_{TR} energía de los módems del Controlador y del Robot respectivamente. ER_{SC} y ER_{SR} energía resto de sistemas del Controlador y del Robot respectivamente.

Algoritmo EO: Tiempo análisis 15 min



Arquitectura	rn	$v(\text{cm/s})$	$\bar{e}_{EO}(\text{cm})$
Periódica	1	12	-
Eventos	2	12	0,3

Algoritmo SP: Tiempo análisis 15 min

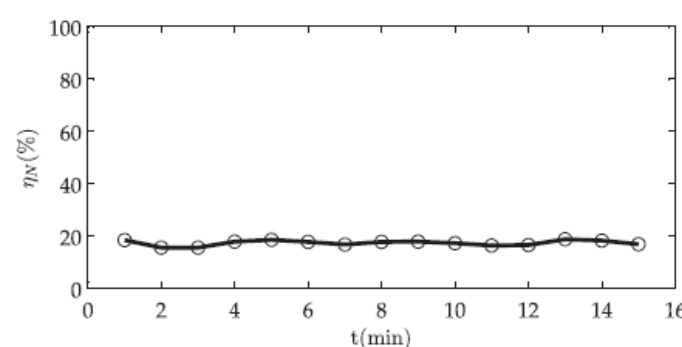
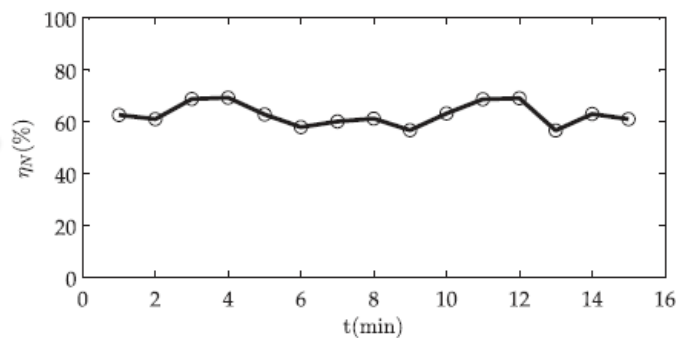
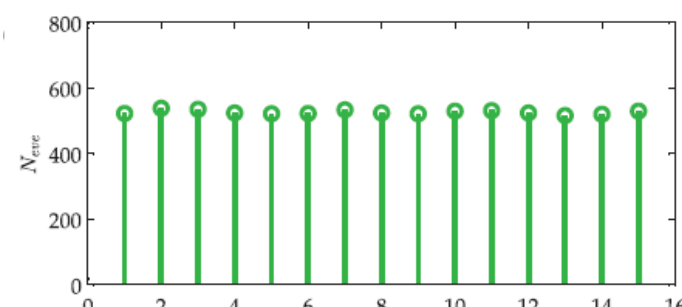
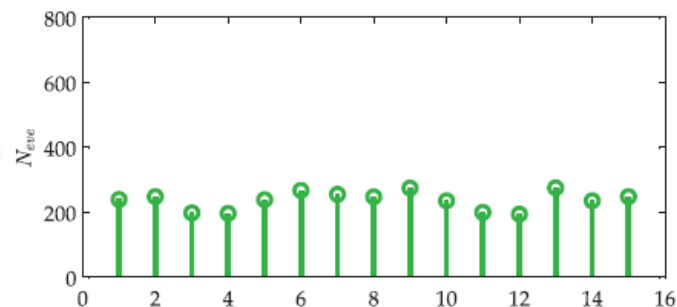
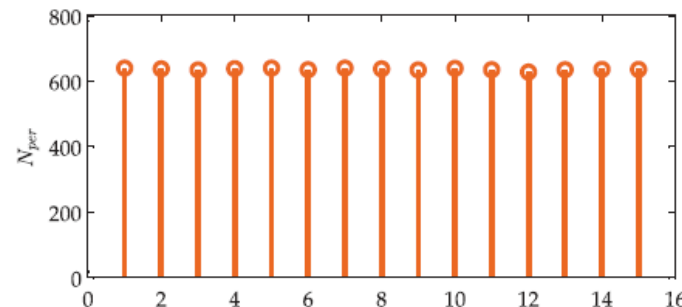
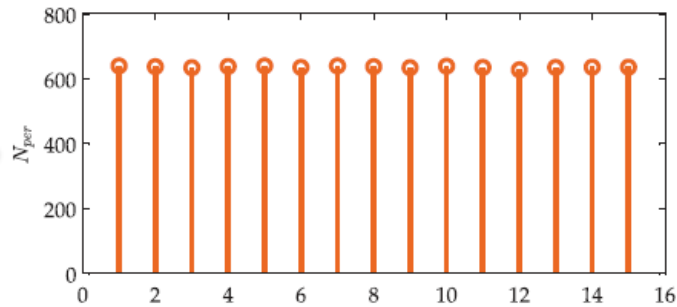


Arquitectura	rn	$v(\text{cm/s})$	$w(\text{cm})$	$v_w(1/\text{s})$	$\bar{e}_{SP}(\text{cm})$
Periódica	1	12	1,5	6	-
Eventos	2	12	1,5	6	0,3

...obtenemos la actividad de los diferentes controladores...

Algoritmo EO

Algoritmo SP



Actividad EO

Algoritmo	N_{per}	N_{eve}
EO	9.544	3.548

Ratio de Eventos Eficiencia Máxima
 $N_N = 0,37$ $\eta_N(\%) = 63\%$

Actividad SP

Algoritmo	N_{per}	N_{eve}
EO	9.544	7.889

Ratio de Eventos Eficiencia Máxima
 $N_N = 0,83$ $\eta_N(\%) = 17\%$

$$N_N = \frac{N_{eve}}{N_{per}}$$

$$\eta_N(\%) = (1 - N_N)100$$

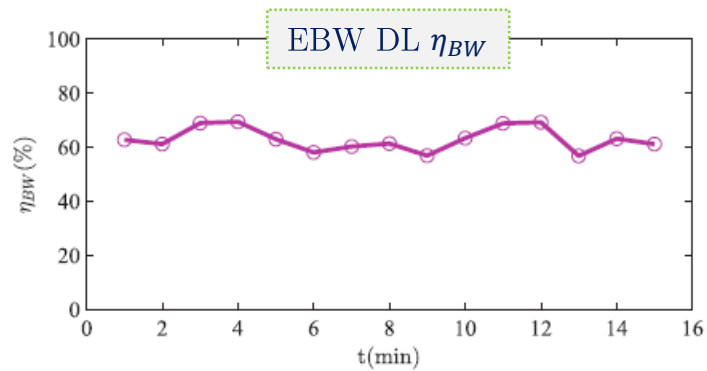
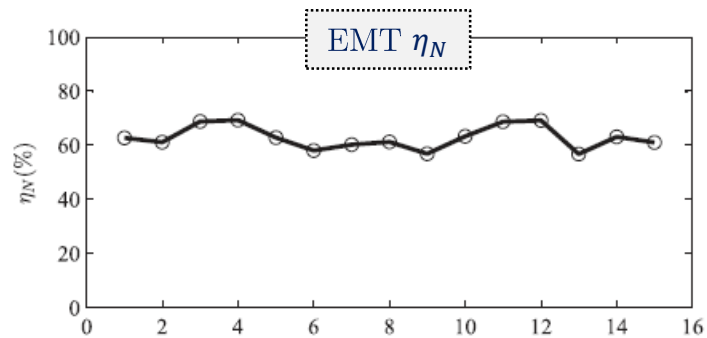
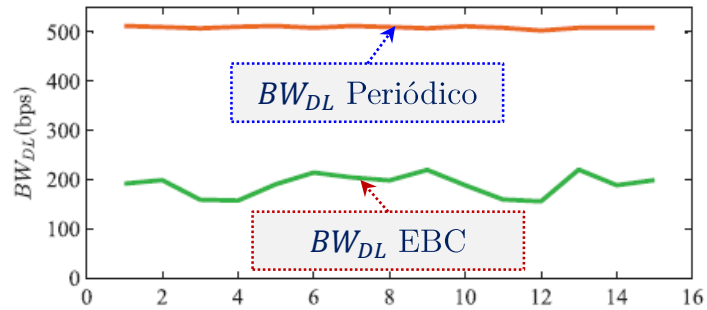
Sistema Periódico

Sistema Eventos

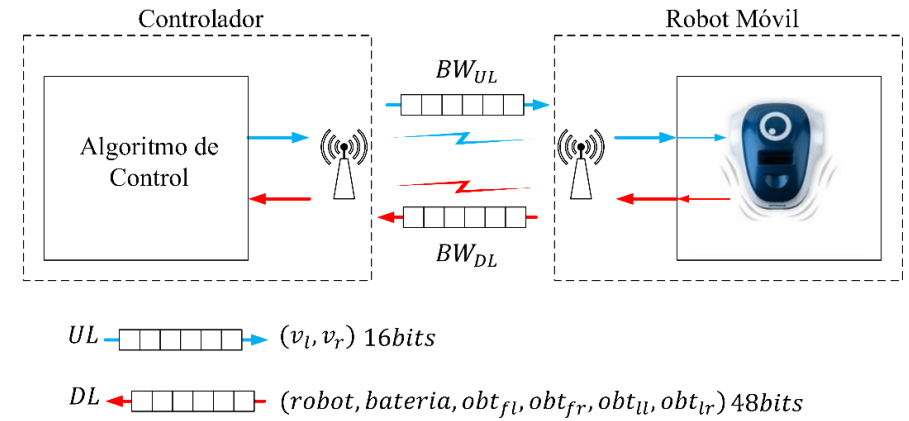
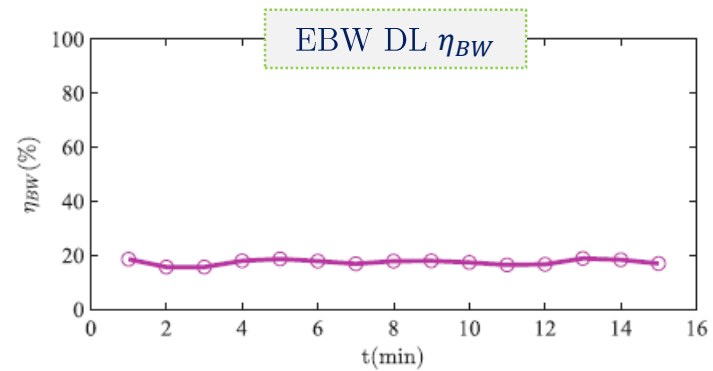
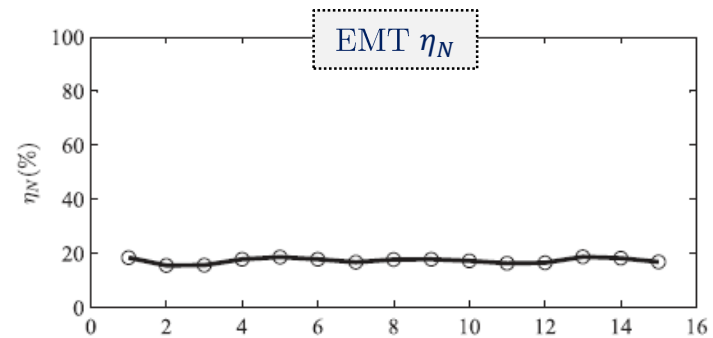
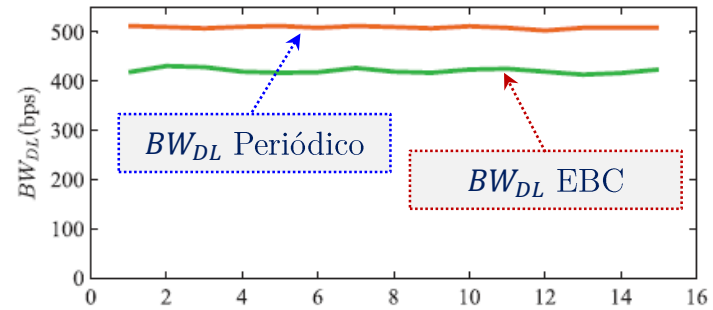
Eficiencia Máxima Teórica $\eta_N(\%)$

...además del uso del Ancho de Banda (BW), ...

Algoritmo EO



Algoritmo SP



$\eta_{BW}(\%)$

63%

(Algoritmo EO)

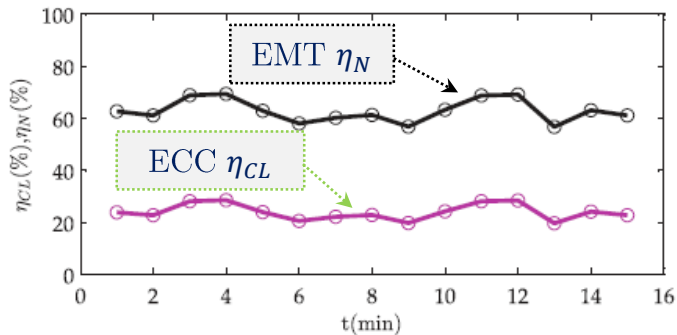
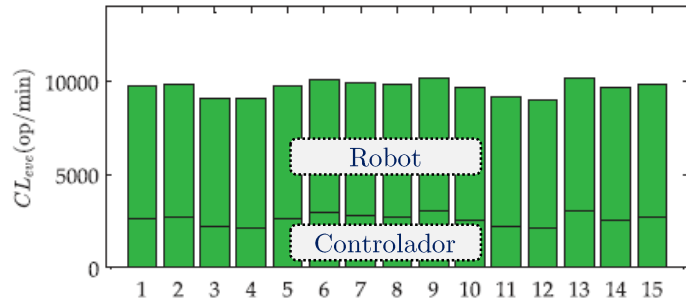
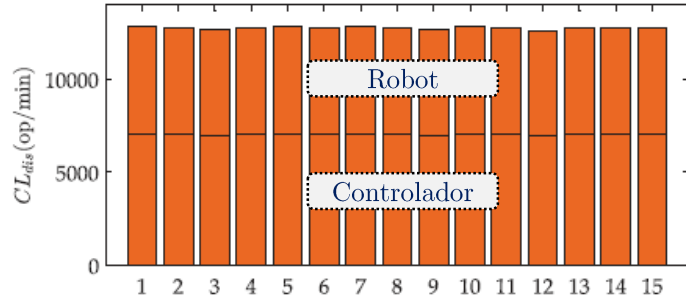
17%

(Algoritmo SP)

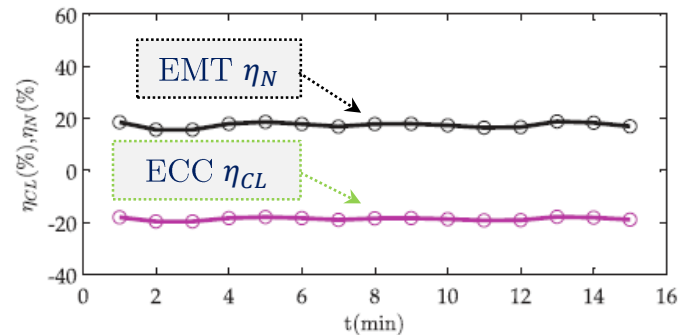
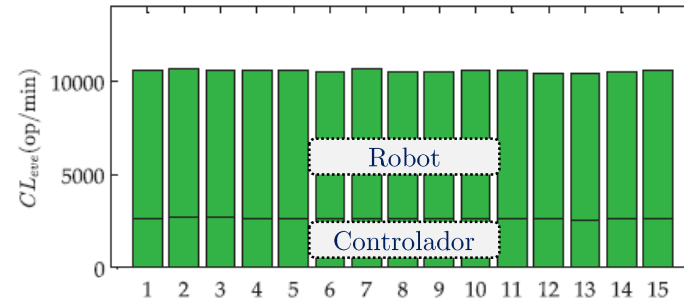
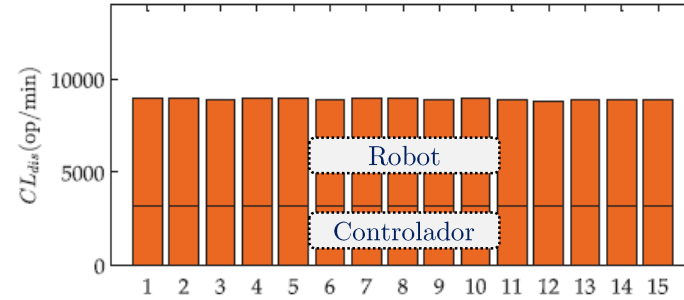
Se consigue **la Eficiencia Máxima**

...el consumo de Recursos Computacionales, ...

Algoritmo EO



Algoritmo SP



$\eta_{CL}(\%)$

24%

(Algoritmo EO)

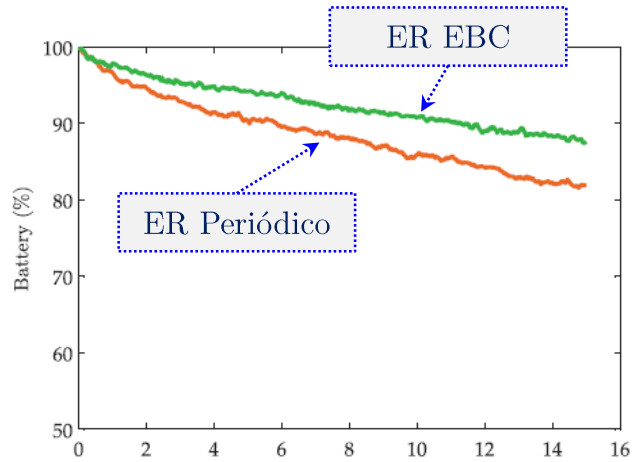
-19%

(Algoritmo SP)

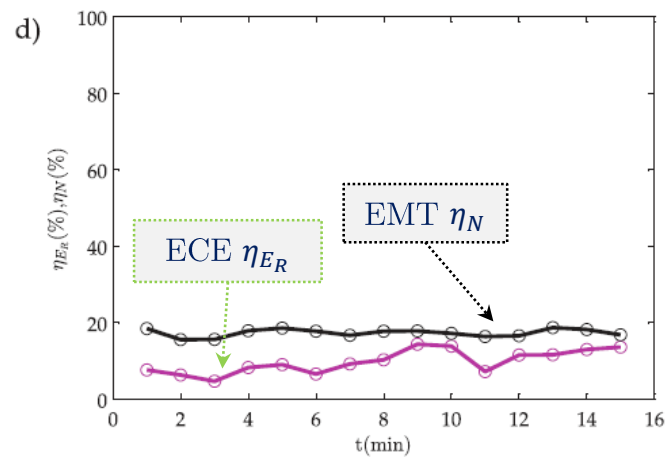
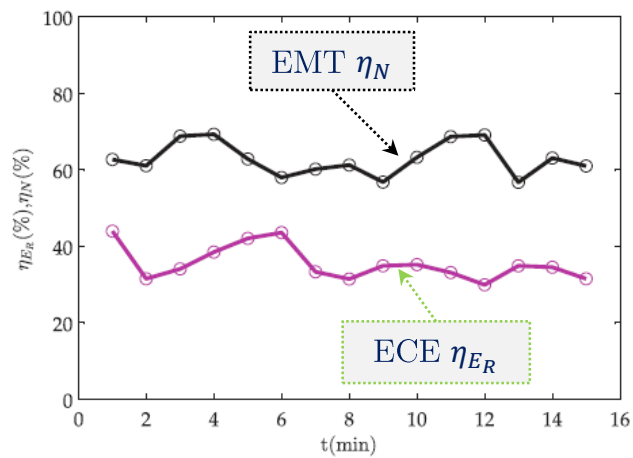
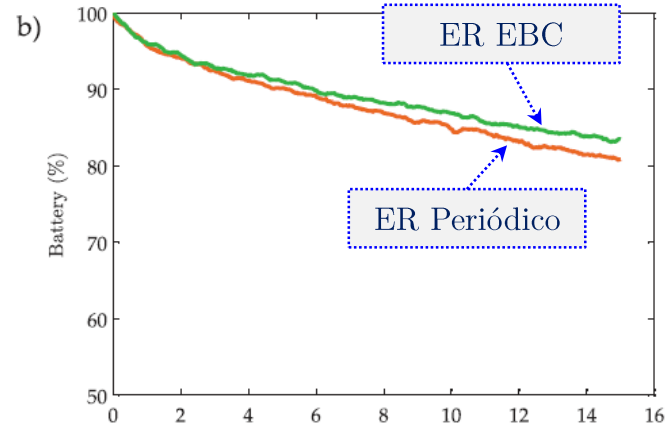
La diferencia con la eficiencia máxima (63% y 17%) se debe a los algoritmos de *polling*

...y la Energía consumida en el Robot.

Algoritmo EO



Algoritmo SP



$$(ER)_{per} = 100\% - (Battery(\%))_{per}$$

$$(ER)_{eve} = 100\% - (Battery(\%))_{eve}$$

Energía Consumida

Algoritmo	$(ER)_{per}$	$(ER)_{eve}$	N_{ER}
EO	18,09%	12,48%	0,69
SP	19,18%	16,56%	0,86

Se consigue una alta eficiencia en el consumo energético del robot

$\eta_{ER}(\%)$

31%

(Algoritmo EO)

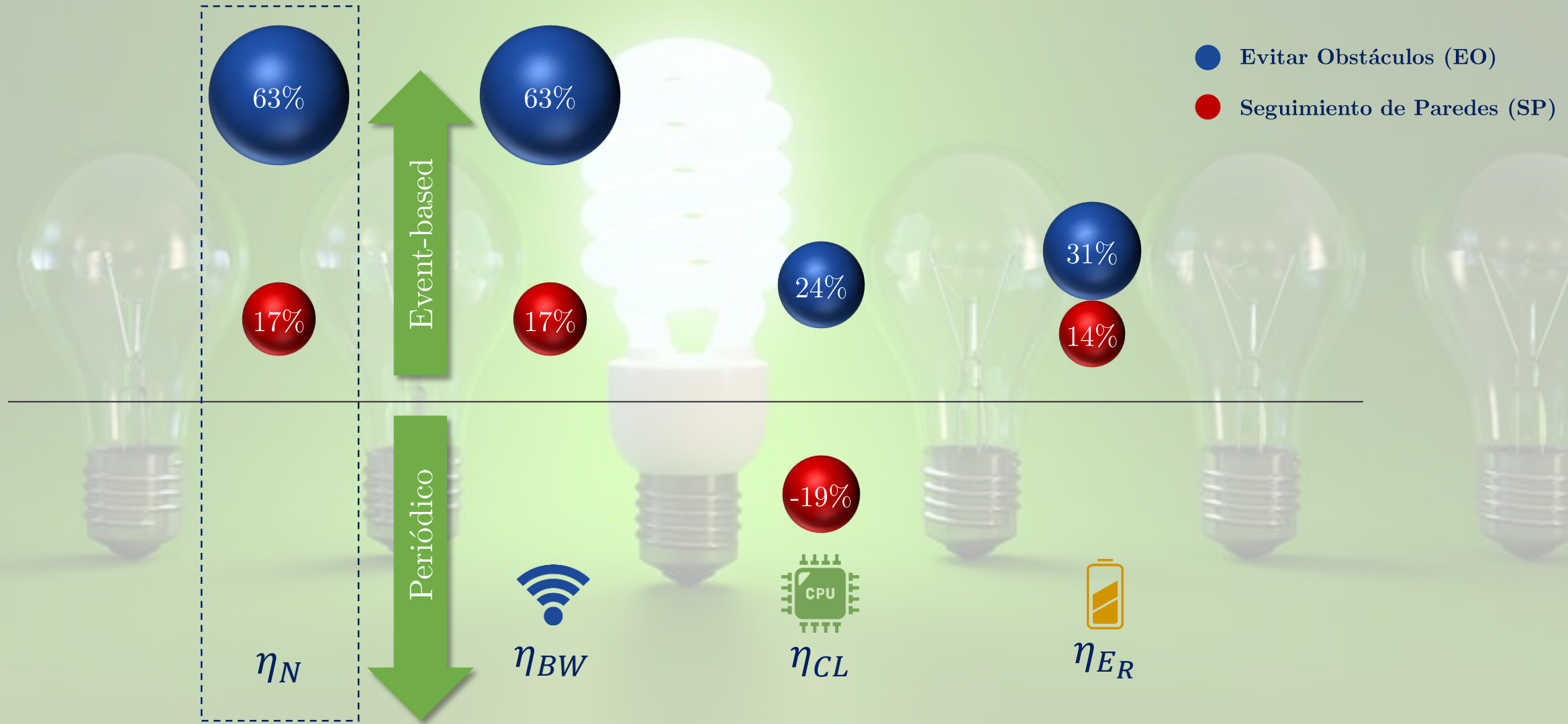
14%

(Algoritmo SP)

Modem del Robot 1mW ($\beta \approx 1\%$). Si se cambia en modem por uno de 100 mW ($\beta = 63\%$) $\rightarrow \eta_{ER} = 62\%$ (EO) y $\eta_{ER} = 17\%$ (SO)

$\eta_N = 63\%$ (EO) y $\eta_N = 17\%$ (SO)

Obteniendo una visión Global de la eficiencia del sistema.



η_N : Eficiencia Máxima Teórica, η_{BW} : Eficiencia en Consumo de BW, η_{CC} : Eficiencia en Carga Computacional y η_{ER} : Eficiencia en Consumo Energético Robot

1 Introducción a los NCS y al Control Basado en Eventos

2 El Problema de Navegación en Robótica Móvil

3 Efectos del Ruido de Medida

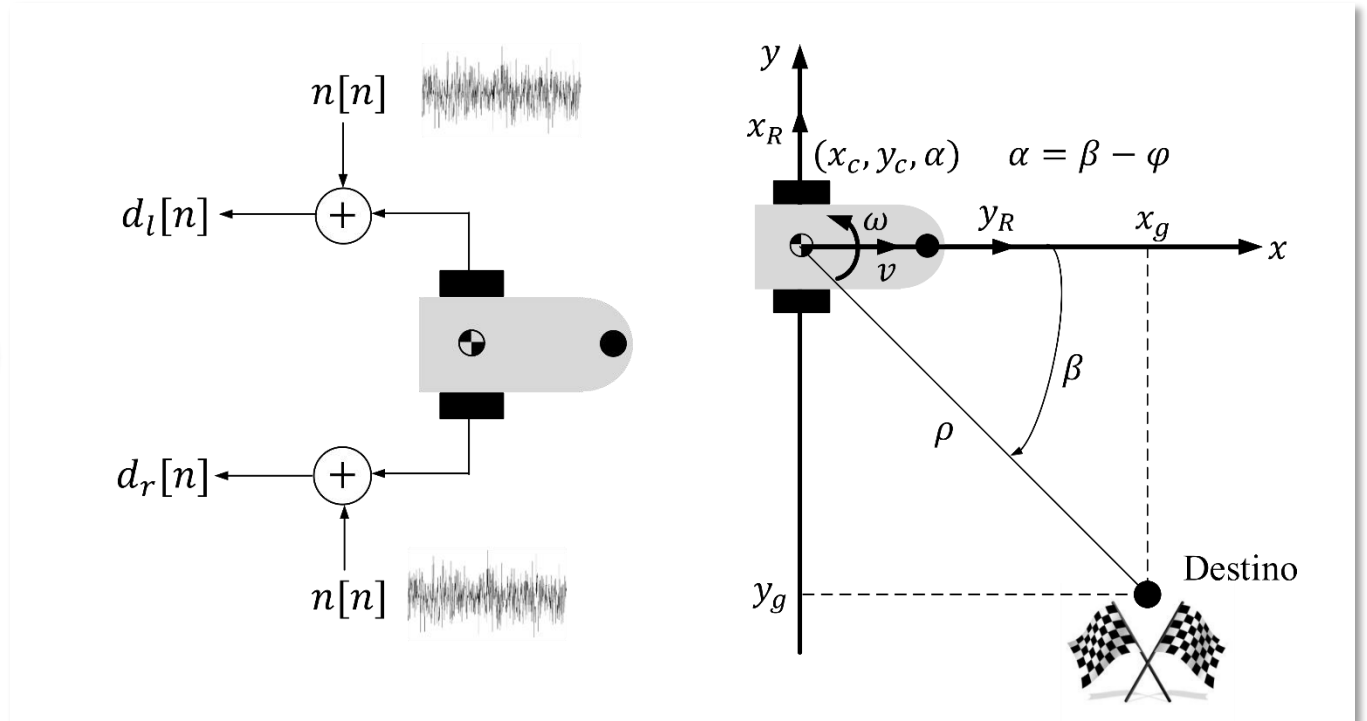
4 Principales Conclusiones

5 Sigüientes Pasos en la Investigación



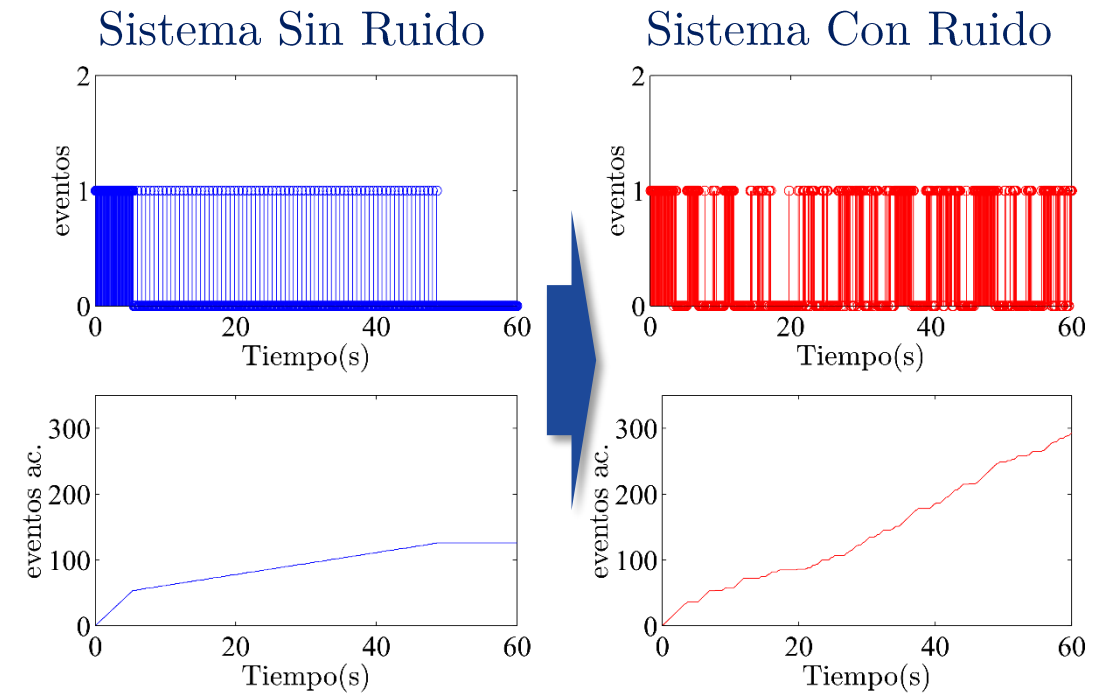
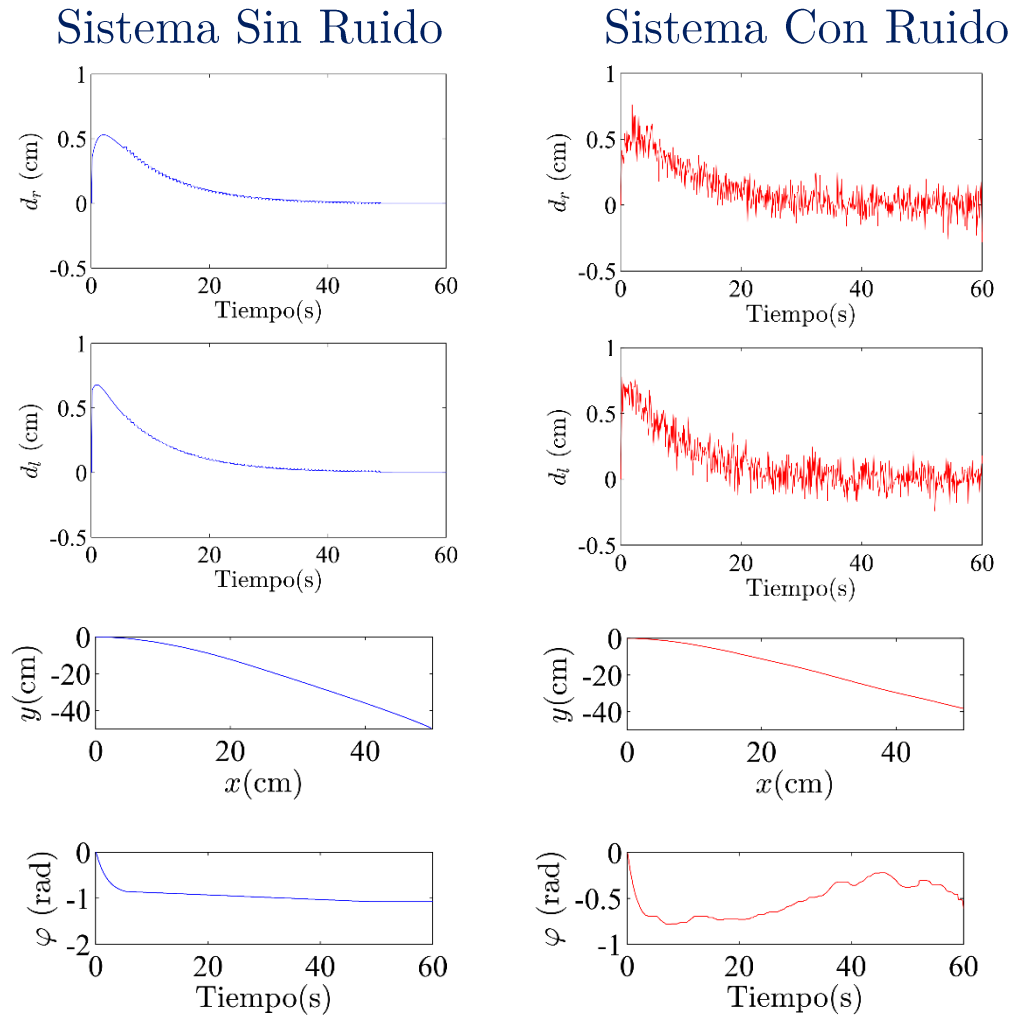
¿Cómo afecta el Ruido de Medida en los Algoritmos EBC?

Se analiza el algoritmo DD contaminando las medidas de los sensores con ruido $\mathcal{N}(\mu, \sigma)$



Escenario	$K_\rho(1/s)$	$K_\alpha(1/s)$	$\bar{e}_\alpha(\text{rad})$	$e_\rho(\text{cm})$	$\mu(\text{cm})$	$\sigma(\text{cm})$
1	0,1	0,5	0,05	0,5	0	0
2	0,1	0,5	0,05	0,5	0	0,08

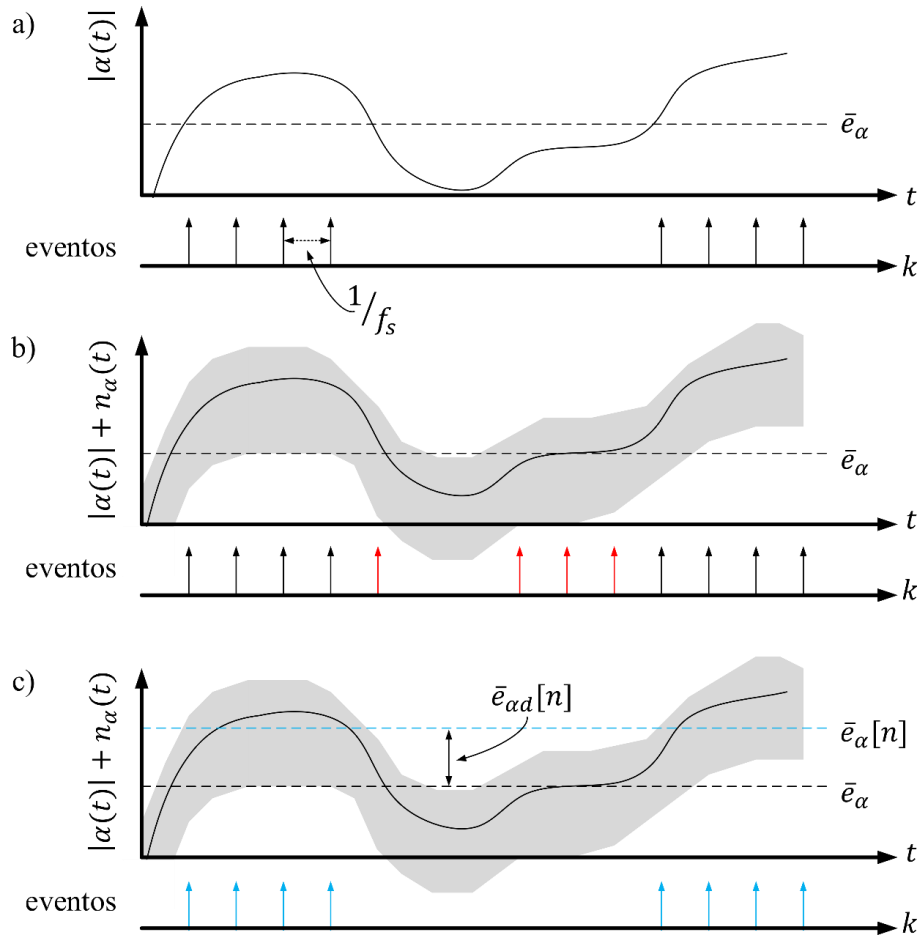
La perturbación incrementa el número de eventos.



El ruido incrementa el número de eventos y ocasiona que las ventajas diferenciales del controlador propuesto se diluyan

En azul escenario 1 (sistema sin ruido), en rojo escenario 2 (sistema con ruido).

¿Cómo compensar los efectos del Ruido?



```

if ( $|\alpha(t)| > \bar{e}_\alpha$ )
  {evento = true}
else {evento = false}
    
```

El ruido provoca un incremento de eventos y que disminuyan las prestaciones del sistema (figura b)

Si se estima la envolvente del ruido se puede compensar su efecto (figura c)

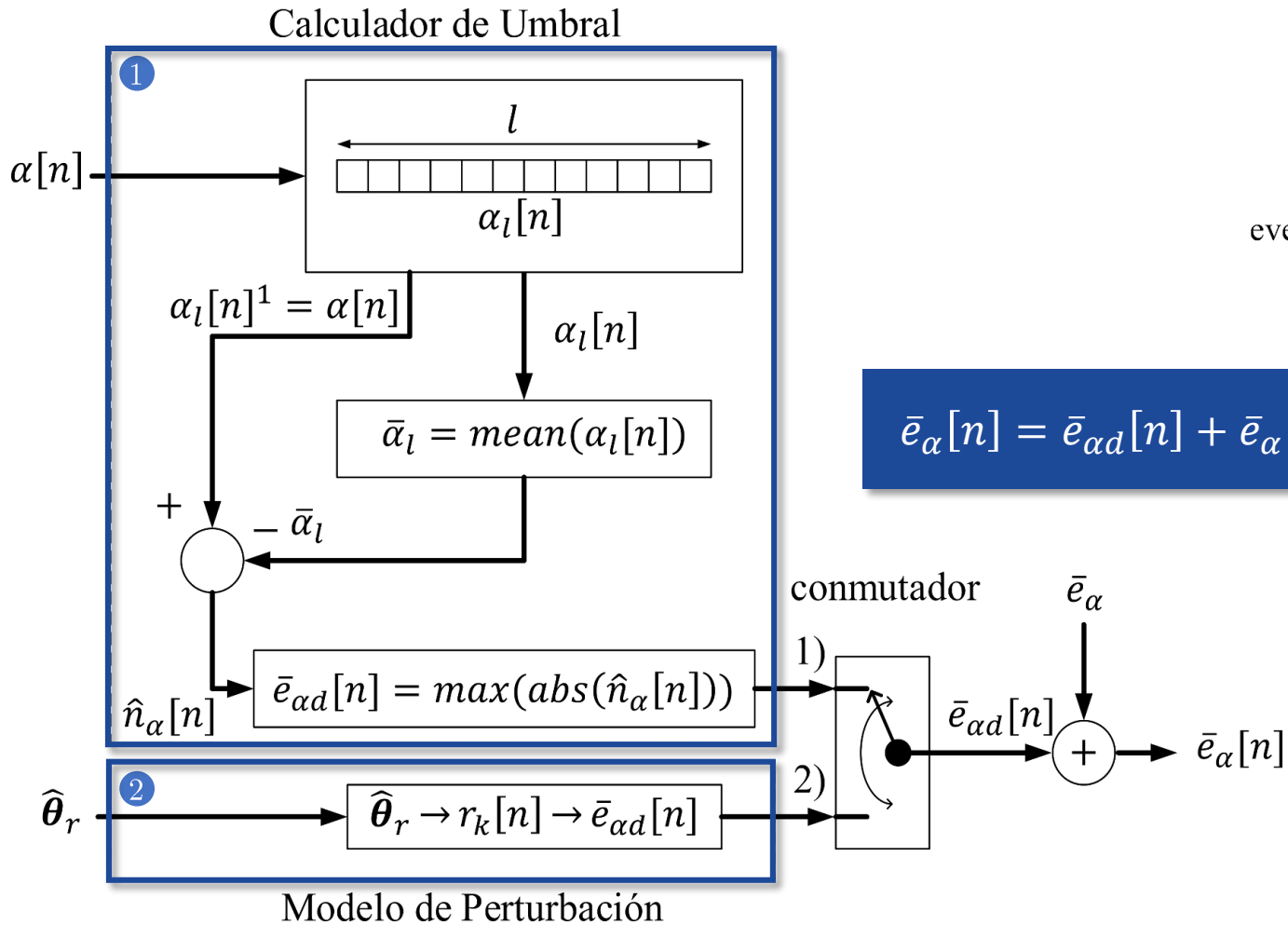
```

if ( $|\alpha(t)| + n_\alpha(t) > \bar{e}_\alpha + \bar{e}_{ad}[n]$ )
  {evento = true}
else {evento = false}
    
```

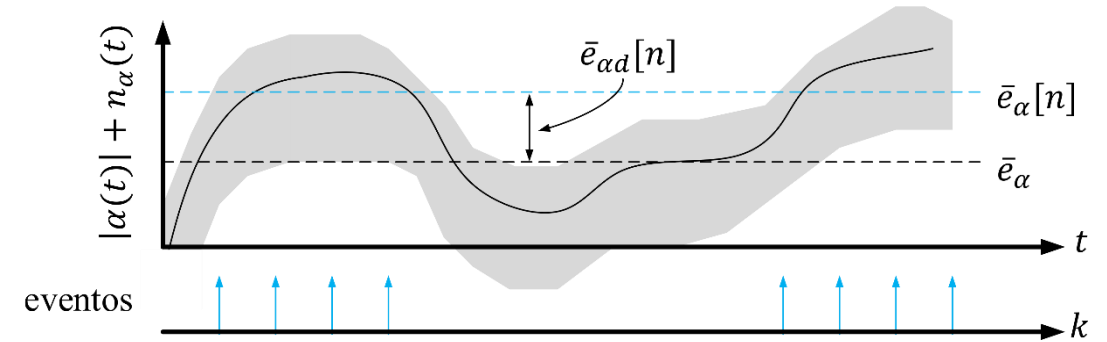
Solución: **Sistema con Umbrales Dinámicos**

a) Sistema sin ruido, b) sistema con ruido de medida, c) sistema con un umbral que compensa el efecto del ruido.

Se proponen dos alternativas...



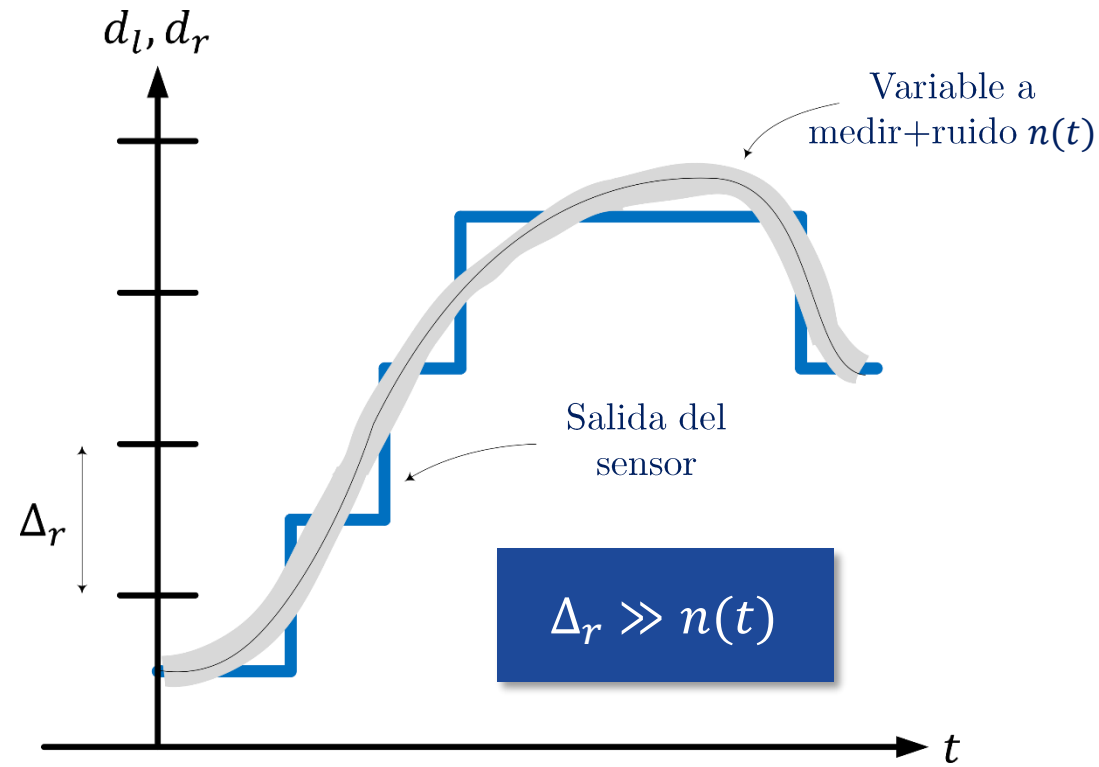
$$\bar{e}_\alpha[n] = \bar{e}_{ad}[n] + \bar{e}_\alpha$$



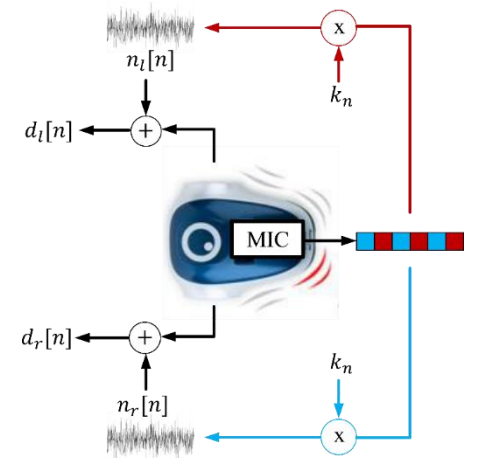
- Se plantean dos implementaciones para calcular $\bar{e}_{ad}[n]$:
- 1 *Calculador de Umbral*
 - 2 *Modelo de Perturbación*

...y se analiza en la plataforma de experimentación...

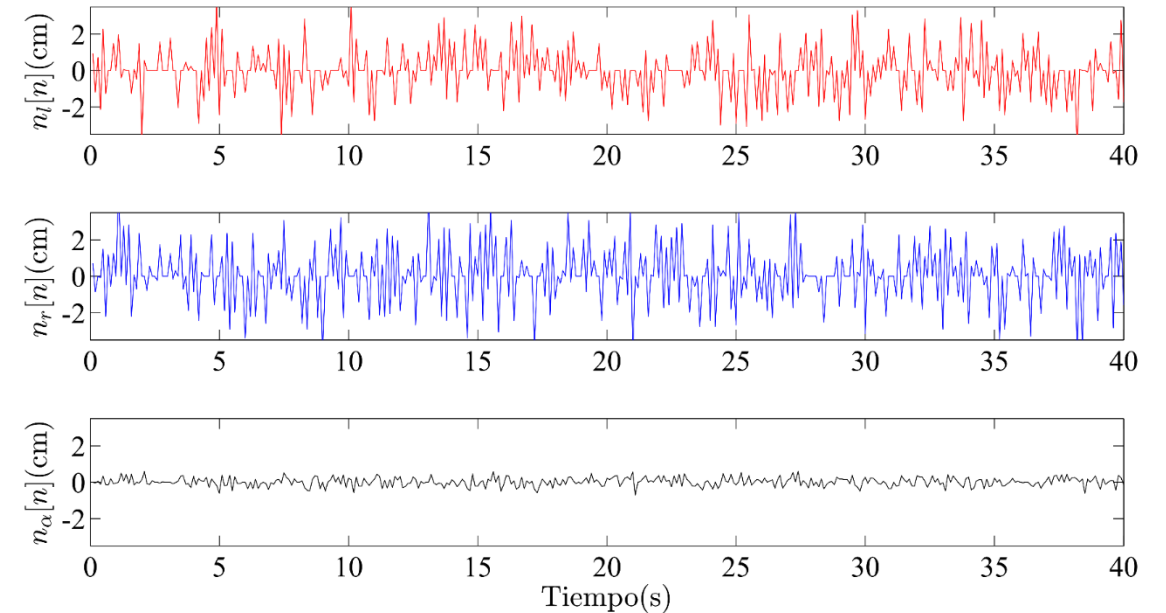
Los sensores de la plataforma de experimentación tienen muy baja resolución y por tanto, el efecto del ruido no es apreciable



Para poder analizar el sistema propuesto se implementa un generador de ruido

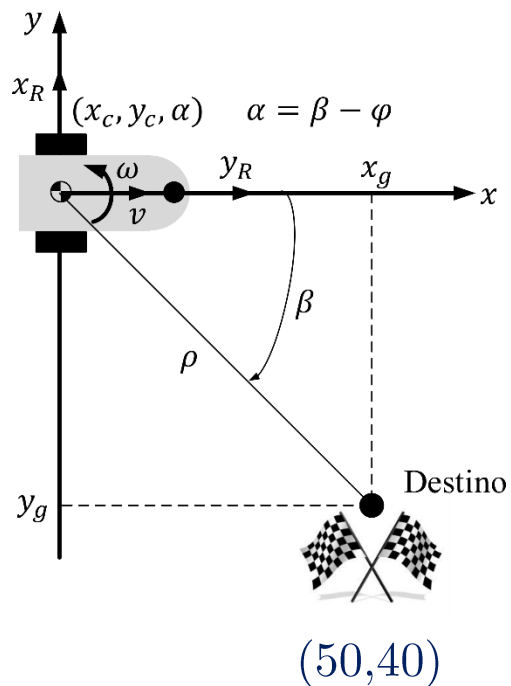


$$k_n = 1/80$$



...fijando el event threshold del sistema...

Algoritmo DD



Se plantean tres Escenarios para comparar los esquemas planteados

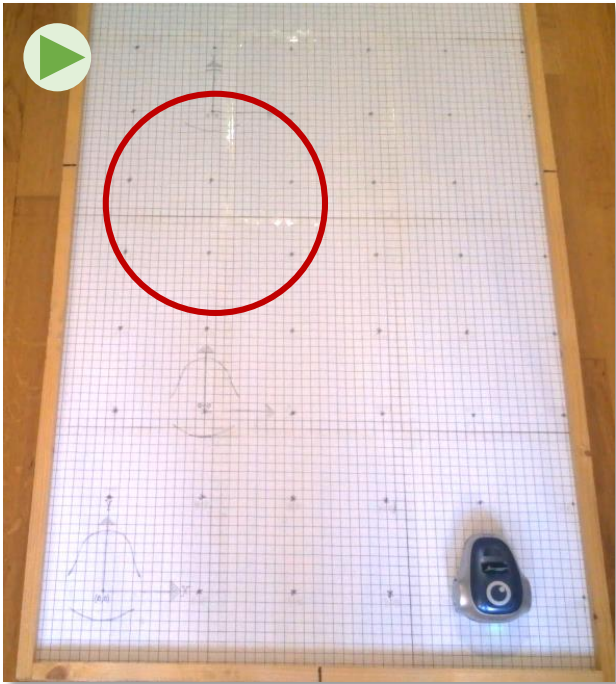
Para el Modelo de Perturbación, el parámetro $\bar{e}_{\alpha d}$, se fija mediante el percentil 70%. En este caso, se toma la media (0,245) de las dos distribuciones que mejor modelan la perturbación

Distribución	μ (rad)	σ (rad)	$length(r[n])$	$Per(abs(r[n]), 70\%)$
Normal	0,0167	0,2414	6.000	0,25
Logística	0,0179	0,1383	6.000	0,24

Escenario	Arquitectura	K_ρ (1/s)	K_α (1/s)	l	\bar{e}_α (rad)	e_ρ (cm)
1	U. Estático	0,2	3,8	-	0,26	8
2	C. Umbral	0,2	3,8	5	$0,26 + \bar{e}_{\alpha d}[n]$	8
3	Modelo P.	0,2	3,8	-	$0,26 + \bar{e}_{\alpha d}$	8

...obteniendo los siguientes resultados experimentales...

Umbrales Estáticos



Calculador de Umbral



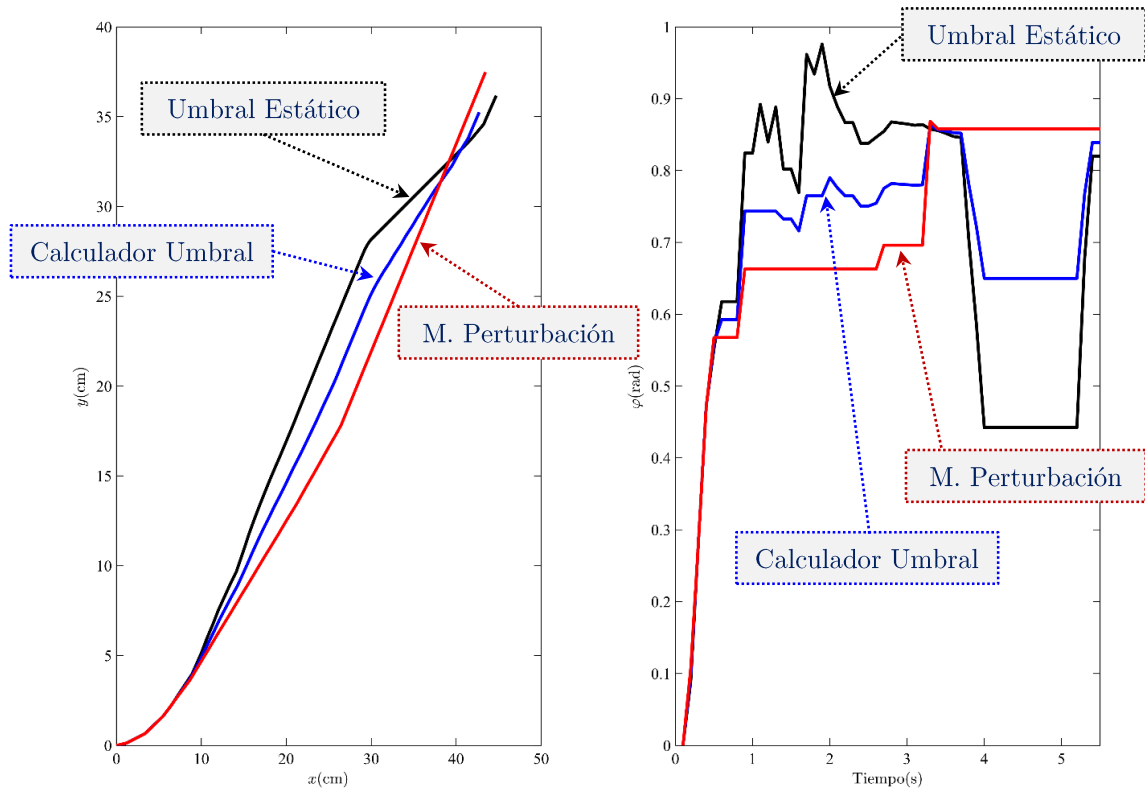
Modelo de Perturbación



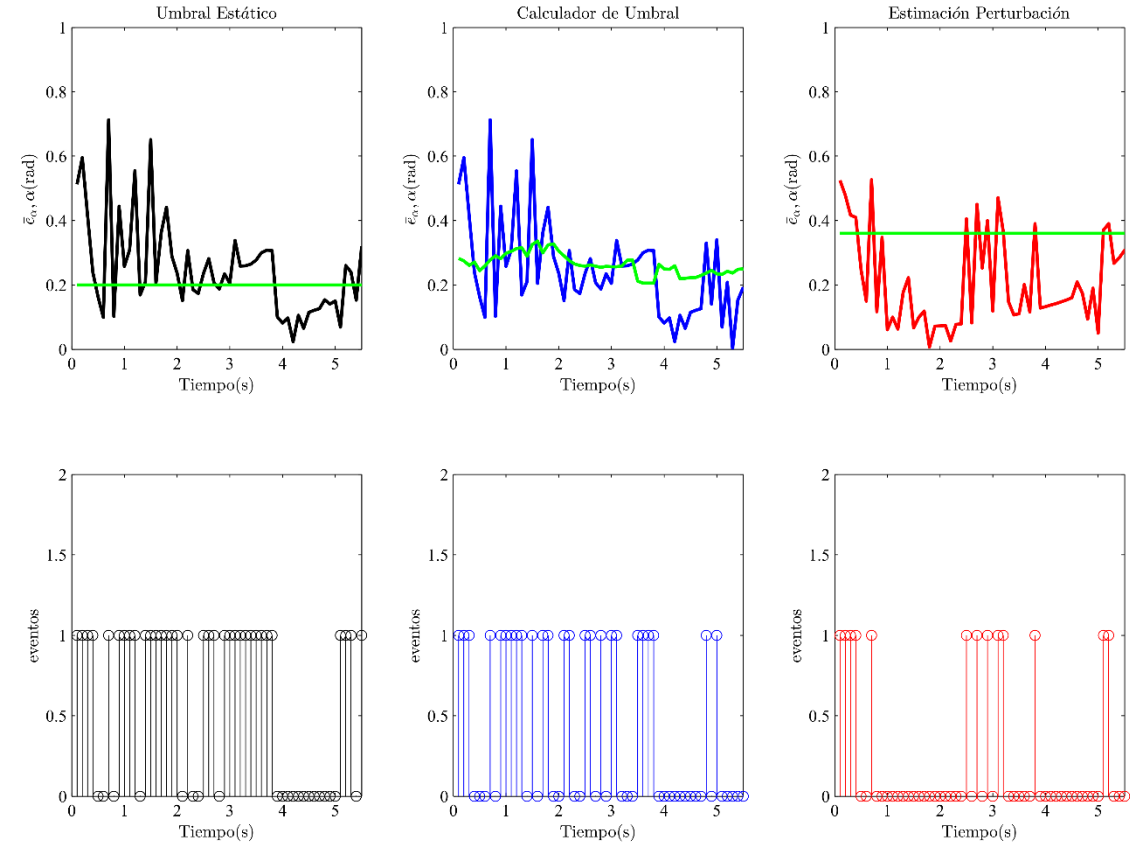
Las tres soluciones propuestas resuelven el problema de Navegación

...y la actividad para cada tipo de controlador...

Posición y Orientación



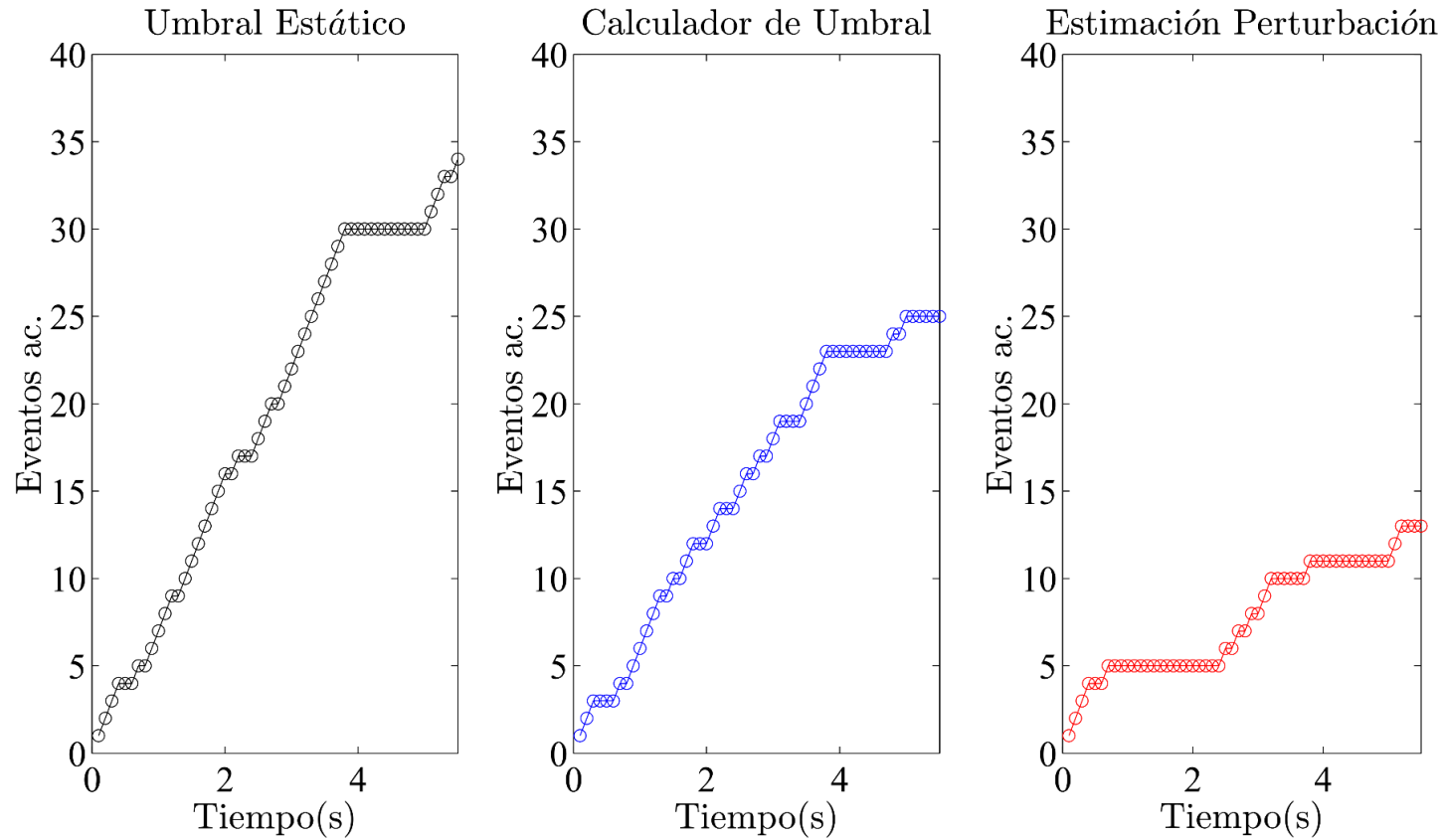
Umbrales y Número de Eventos



Las tres soluciones tienen una respuesta estable y con igual precisión

En negro Sistema con Umbral Estático, en azul con Calculador de Umbral y en rojo con Modelo de Perturbación

...que demuestran las ventajas de los sistemas planteados.



Calculador de Umbral vs.
U. Estático

-26%

(25 vs. 34 eventos)

Estimador Perturbación vs.
U. Estático

-62%

(13 vs. 34 eventos)

La solución basada en el **Estimador de Perturbación** obtiene la **mayor eficiencia**, aproximándose al sistema sin Ruido¹

(1) Sistema sin ruido con $e_p = 1$ cm , $\bar{e}_\alpha = 0,2$ rad , $K_p = 0,2$ s⁻¹ y $K_\alpha = 2,5$ s⁻¹ genera 12 eventos



Article

Event-Based Control Strategy for Mobile Robots in Wireless Environments

Rafael Socas *, Sebastián Dormido, Raquel Dormido and Ernesto Fabregas

Received: 26 October 2015; Accepted: 27 November 2015; Published: 2 December 2015

Academic Editor: Gonzalo Pajares Martinsanz

Departamento de Informática y Automática, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Juan del Rosal 16, Madrid 28040, Spain; sdormido@dia.uned.es (S.D.); raquel@dia.uned.es (R.D.); efabregas@bec.uned.es (E.F.)

* Correspondence: rsocas@telefonica.net; Tel.: +34-629-578-386



Article

New Control Paradigms for Resources Saving: An Approach for Mobile Robots Navigation

Rafael Socas * , Raquel Dormido and Sebastián Dormido

Departamento de Informática y Automática, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Juan del Rosal 16, Madrid 28040, Spain; raquel@dia.uned.es (R.D.); sdormido@dia.uned.es (S.D.)

* Correspondence: rsocas@telefonica.net; Tel.: +34-629-578-386

Received: 16 December 2017; Accepted: 11 January 2018; Published: 18 January 2018



Multidisciplinary | Rapid Review | Open Access Journal

Received December 22, 2016, accepted February 8, 2017, date of publication February 17, 2017, date of current version March 28, 2017.

Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2017.2671419

Optimal Threshold Setting for Event-Based Control Strategies

RAFAEL SOCAS, SEBASTIÁN DORMIDO, AND RAQUEL DORMIDO

Departamento de Informática y Automática, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), 28040 Madrid, Spain

Corresponding author: R. Socas (rsocas@telefonica.net)

This work was supported by the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness under Project DPI2012-31303 and Project FEDER.

1 Introducción a los NCS y al Control Basado en Eventos

2 El Problema de Navegación en Robótica Móvil

3 Efectos del Ruido de Medida

4 Principales Conclusiones

5 Siguiendo Pasos en la Investigación



Event-Based Control

Se posicionan como claros sustitutos de los esquemas clásicos en soluciones de navegación en robótica móvil...



Resuelven el problema de navegación



Ventajas respecto al consumo de recursos



Pueden ser sustitutos de los esquemas clásicos



El método de sintonía es sencillo e intuitivo



Se reducen los efectos del ruido de medida

1 Introducción a los NCS y al Control Basado en Eventos

2 El Problema de Navegación en Robótica Móvil

3 Efectos del Ruido de Medida

4 Principales Conclusiones

5 **Siguientes Pasos en la Investigación**



¿Qué nos planteamos como siguientes pasos?



1

Investigar sobre otras plataformas de robots más complejos (LMRs, UAVs o AUVs)

2

Plataformas no protegidas de efectos tipo Zeno y desarrollar mecanismos que permitan evitarlos

3

Profundizar en los aspectos teóricos

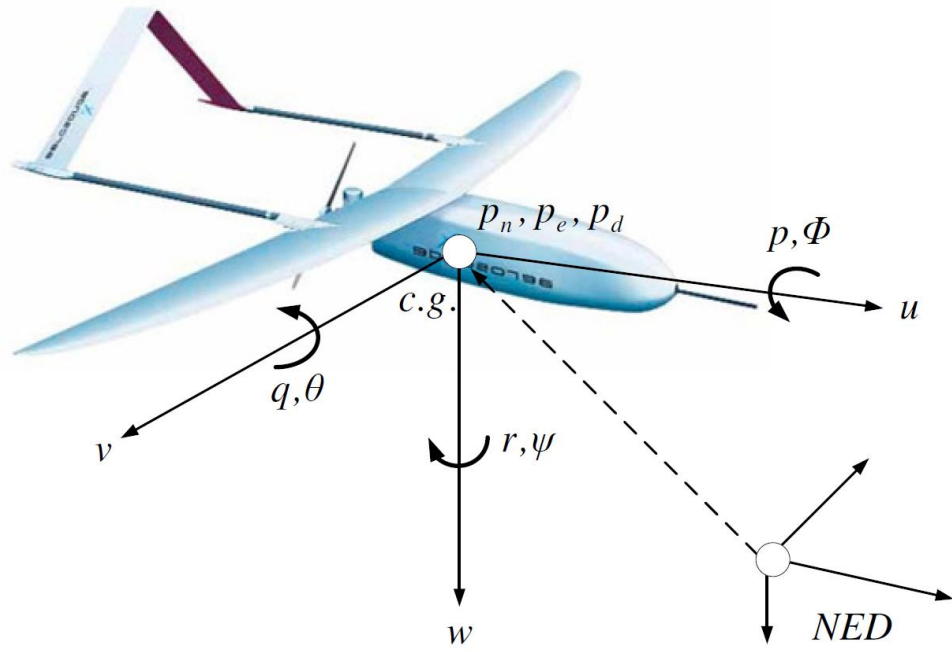
4

Investigar nuevos mecanismos de posicionamiento indoor

Planteamos el control EBC en otros sistemas más complejos...

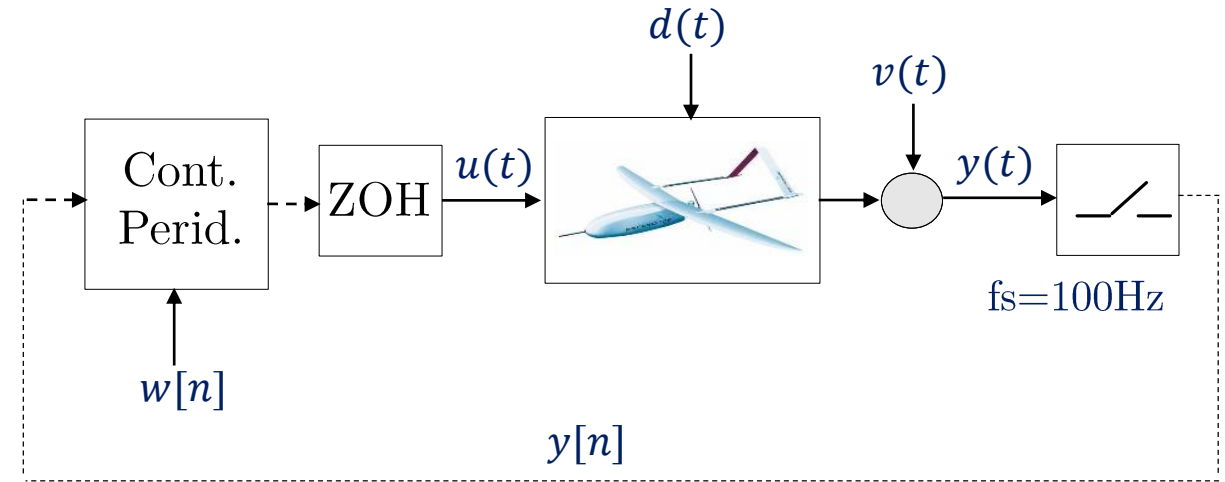
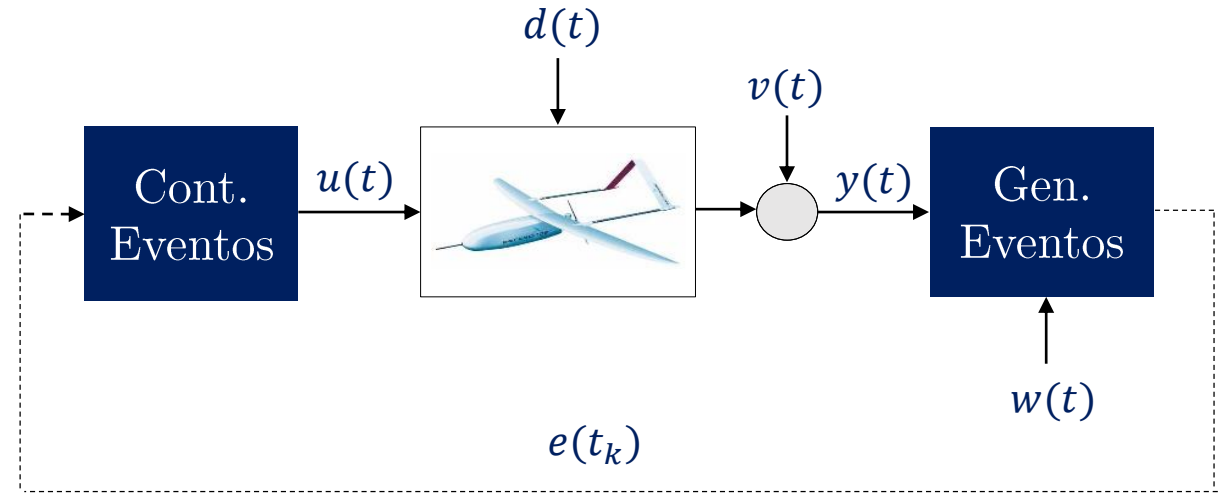


Rafael Socas, Sebastián Dormido, and Raquel Dormido. **Event-based control strategy for the guidance of the aerosonde uav.** *En Mobile Robots (ECMR), 2015 European Conference on*, pags. 1-6. IEEE, 2015.



$$\begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{h} \end{pmatrix} = A_{lo} \begin{pmatrix} u \\ w \\ q \\ \theta \\ h \end{pmatrix} + B_{lo} \begin{pmatrix} \delta_e \\ \delta_t \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = A_{la} \begin{pmatrix} v \\ p \\ r \\ \phi \\ \psi \end{pmatrix} + B_{la} \begin{pmatrix} \delta_a \\ \delta_r \end{pmatrix}$$

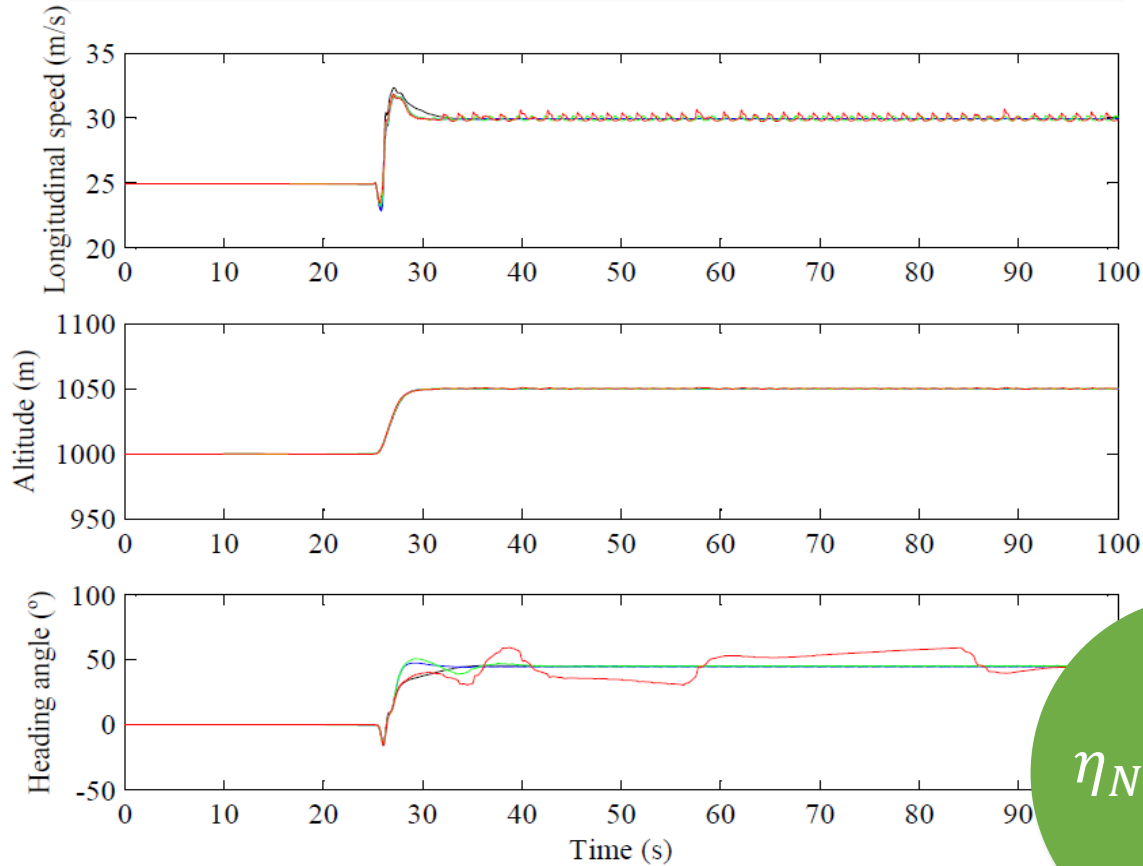


...obteniendo resultados interesantes sobre sistemas NLs.

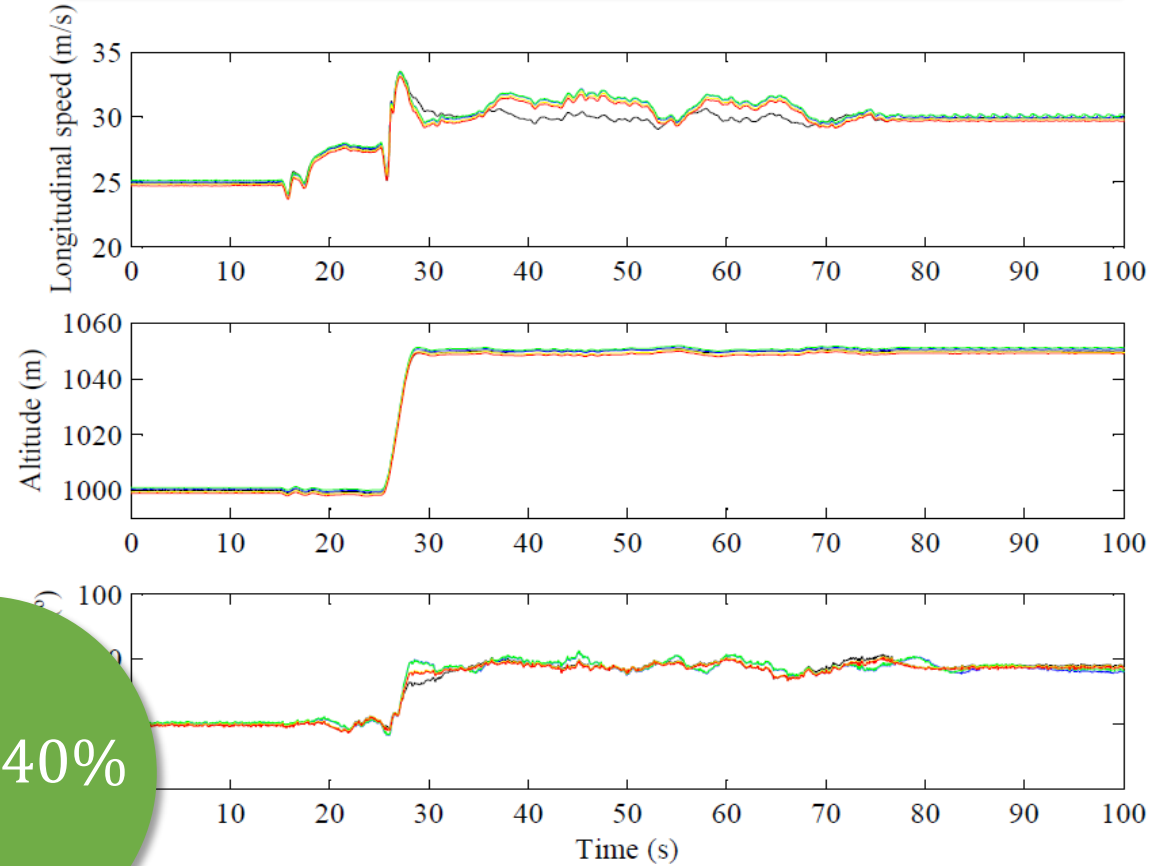


Rafael Socas, Sebastián Dormido, and Raquel Dormido. **Event-based control strategy for the guidance of the aerosonde uav.** *En Mobile Robots (ECMR), 2015 European Conference on*, pags. 1-6. IEEE, 2015.

Cambio de Consigna



Rechazo de Perturbaciones



$\eta_N \approx 40\%$

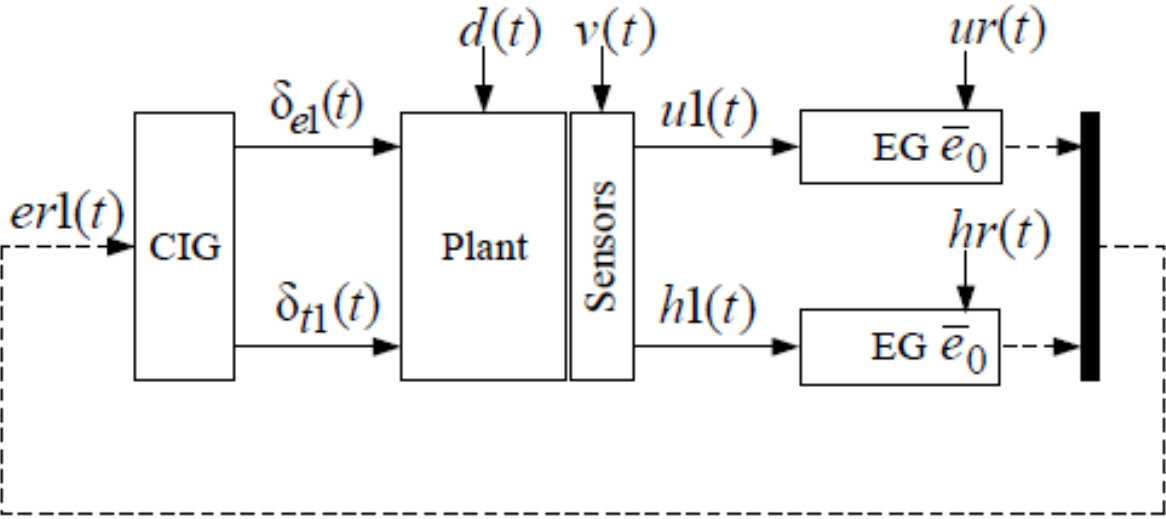
Línea negra respuesta del sistema periódico

También se ha probado la compensación de perturbaciones...

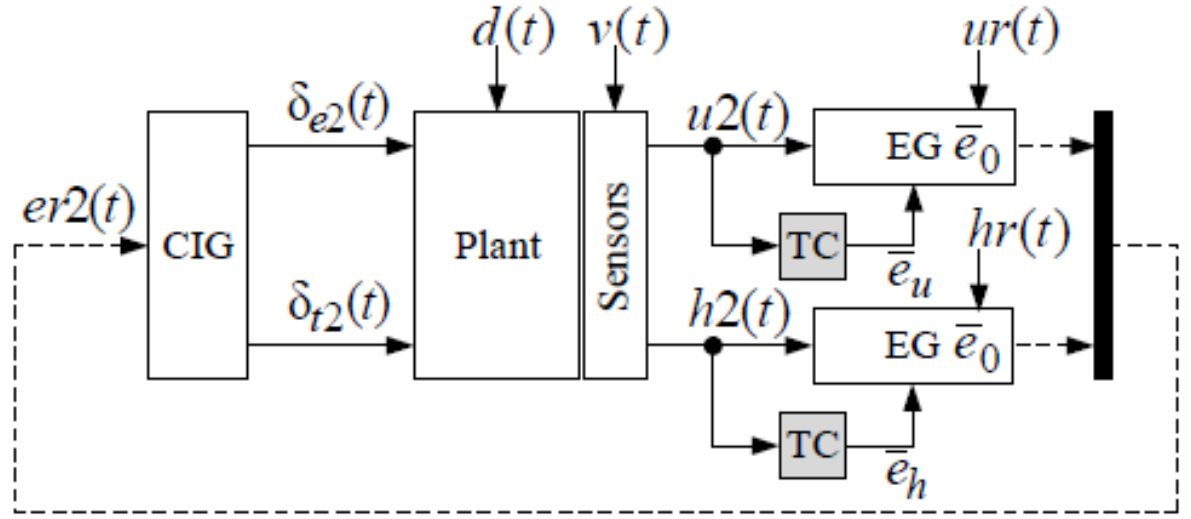


Rafael Socas, Sebastián Dormido, and Raquel Dormido. **Event-based controller for noisy environments.**
En Complex Systems (WCCS), 2014 Second World Conference on, pags. 280-285. IEEE, 2014.

PA Longitudinal: Umbral Estático



PA Longitudinal: Calculador Umbral



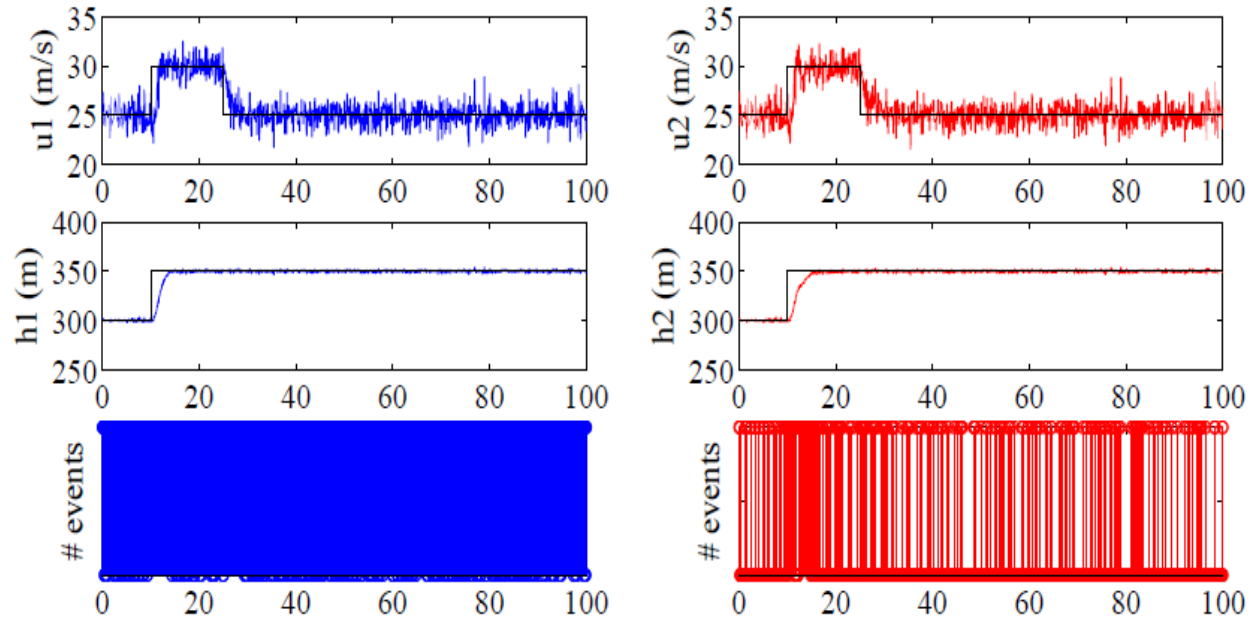
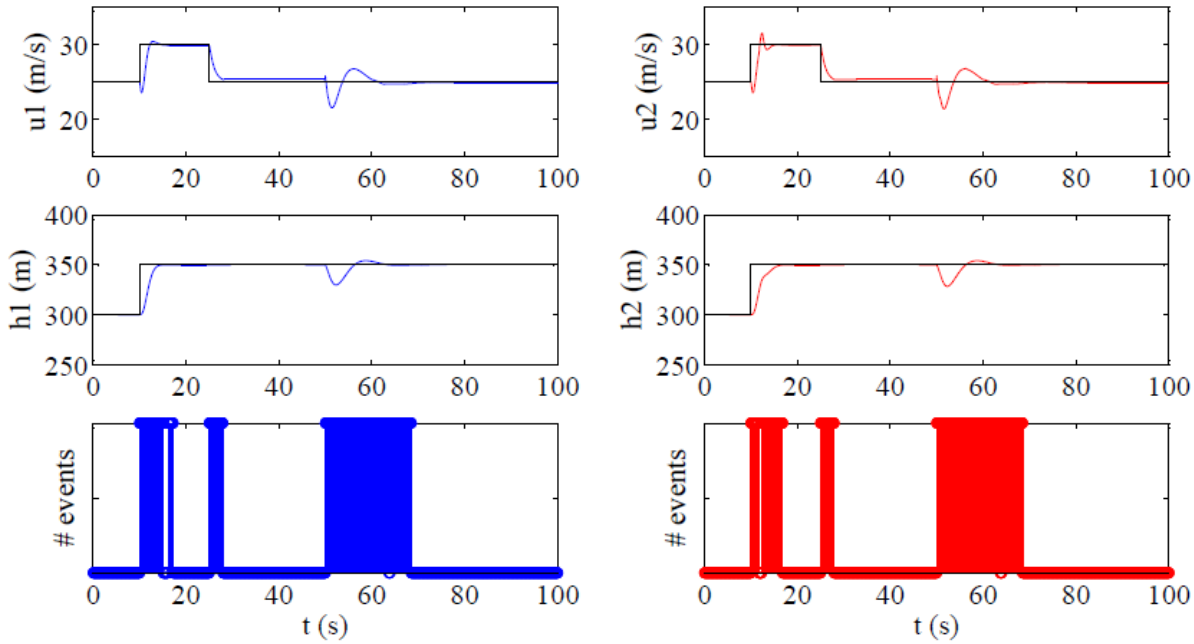
...donde los resultados son muy esperanzadores.



Rafael Socas, Sebastián Dormido, and Raquel Dormido. **Event-based controller for noisy environments.** *En Complex Systems (WCCS), 2014 Second World Conference on*, pags. 280-285. IEEE, 2014.

Cambio de Consiga y Perturbación

Ruido en los Sensores



Sistema sin Compensación

Sistema con Compensación

Sistema sin Compensación

Sistema con Compensación

1.379
eventos

VS.

1.375
eventos

4.081
eventos

-75%

943
eventos

Ahora, queremos experimentar en un entorno real...

Crazyflie 2.0



IMU: Giróscopo/Acelerómetro/Magnetómetro 3 ejes.



Procesador: 168 MHz y 1MB de RAM.



Enlace Radio: 20 dBm, 1Km de LOS y 2Mbps.



Expansión: I2C (400KHz), SPI y VCC (3V y 100mA).



Prestaciones: Peso de 27g y payload de 15g.



Desarrollo: Python, C/C++, Java, Ruby.



Código abierto: Proyecto OpenSource.



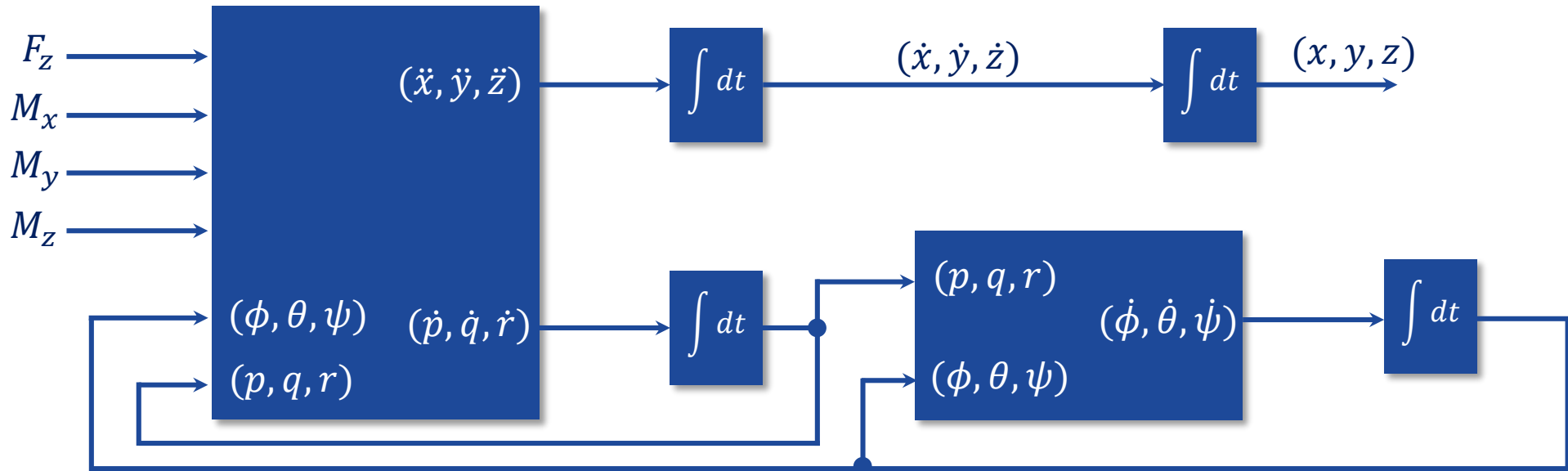
Controladores: PC/mobile Windows, Android and iOS.

...aunque la planta es bastante compleja...

$$\begin{aligned} \dot{p} &= qr \frac{(I_{yy} - I_{zz})}{I_{xx}} + \frac{M_x}{I_{xx}} \\ \dot{q} &= rp \frac{(I_{zz} - I_{xx})}{I_{yy}} + \frac{M_y}{I_{yy}} \\ \dot{r} &= pq \frac{(I_{yy} - I_{xx})}{I_{zz}} + \frac{M_z}{I_{zz}} \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & T_{\theta} S_{\phi} & T_{\theta} C_{\phi} \\ 0 & C_{\phi} & -S_{\phi} \\ 0 & S_{\phi}/C_{\theta} & C_{\phi}/C_{\theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ q \\ r \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{F_z}{m} (C_{\psi} S_{\theta} C_{\phi} + S_{\psi} S_{\phi}) \\ \ddot{y} &= \frac{F_z}{m} (S_{\psi} S_{\theta} S_{\phi} + C_{\psi} S_{\phi}) \\ \ddot{z} &= \frac{F_z}{m} (C_{\theta} C_{\phi}) - g \end{aligned}$$



Implementación en
MATLAB®
& SIMULINK®

Donde $S_i = \sin(i)$, $C_i = \cos(i)$ y $T_i = \tan(i)$

...existen modelos sencillos que permiten diseñar su control...

Se define el punto de equilibrio donde se iguala el empuje de los rotores con el peso del UAV

$$F_z = mg = 4C_T\Omega_i^2$$



Obtenemos la Ω_i de equilibrio

Consiguiendo de esta forma desacoplar las dinámicas de los diferentes modos de vuelo

Subsistema Vertical

$$\begin{pmatrix} \dot{w} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1/m \\ 0 \end{pmatrix} F_z$$

Subsistema Lateral

$$\begin{pmatrix} \dot{p} \\ \dot{\phi} \\ \dot{v} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p \\ \phi \\ v \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1/I_{xx} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} M_x$$

Subsistema Direccional

$$\begin{pmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r \\ \psi \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1/I_{zz} \\ 0 \end{pmatrix} M_z$$

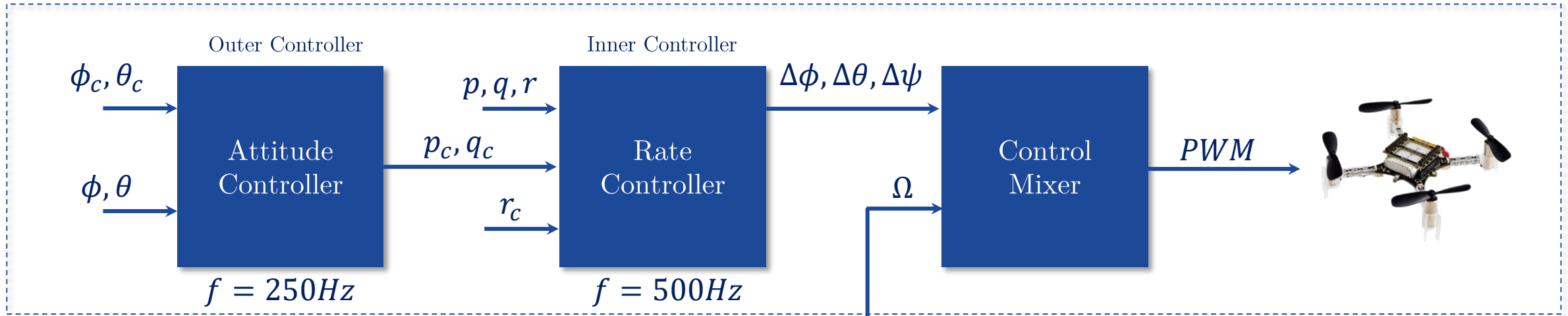
Subsistema Longitudinal

$$\begin{pmatrix} \dot{q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{u} \\ \dot{x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q \\ \theta \\ u \\ x \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1/I_{yy} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} M_y$$

Donde $S_i = \sin(i)$, $C_i = \cos(i)$ y $T_i = \tan(i)$

...obteniendo soluciones estándar basadas en PID's periódicos.

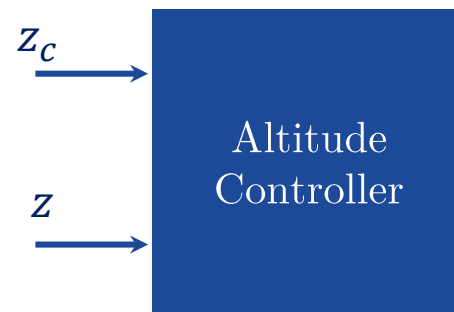
On Board Controller



Señales de los sensores
 $\phi, \theta, \psi, p, q, r, z$

Señales de consigna
 $\phi_c, \theta_c, r_c, z_c$

Off Board Controller



Altitude Controller
 $\Omega = PID(z_c - z) + PWM_e$

Control Mixer

$$PWM = \begin{pmatrix} PWM_1 \\ PWM_2 \\ PWM_3 \\ PWM_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 & -1 \\ 1 & -1/2 & +1/2 & 1 \\ 1 & +1/2 & +1/2 & -1 \\ 1 & +1/2 & -1/2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Omega \\ \Delta\phi \\ \Delta\theta \\ \Delta\psi \end{pmatrix}$$

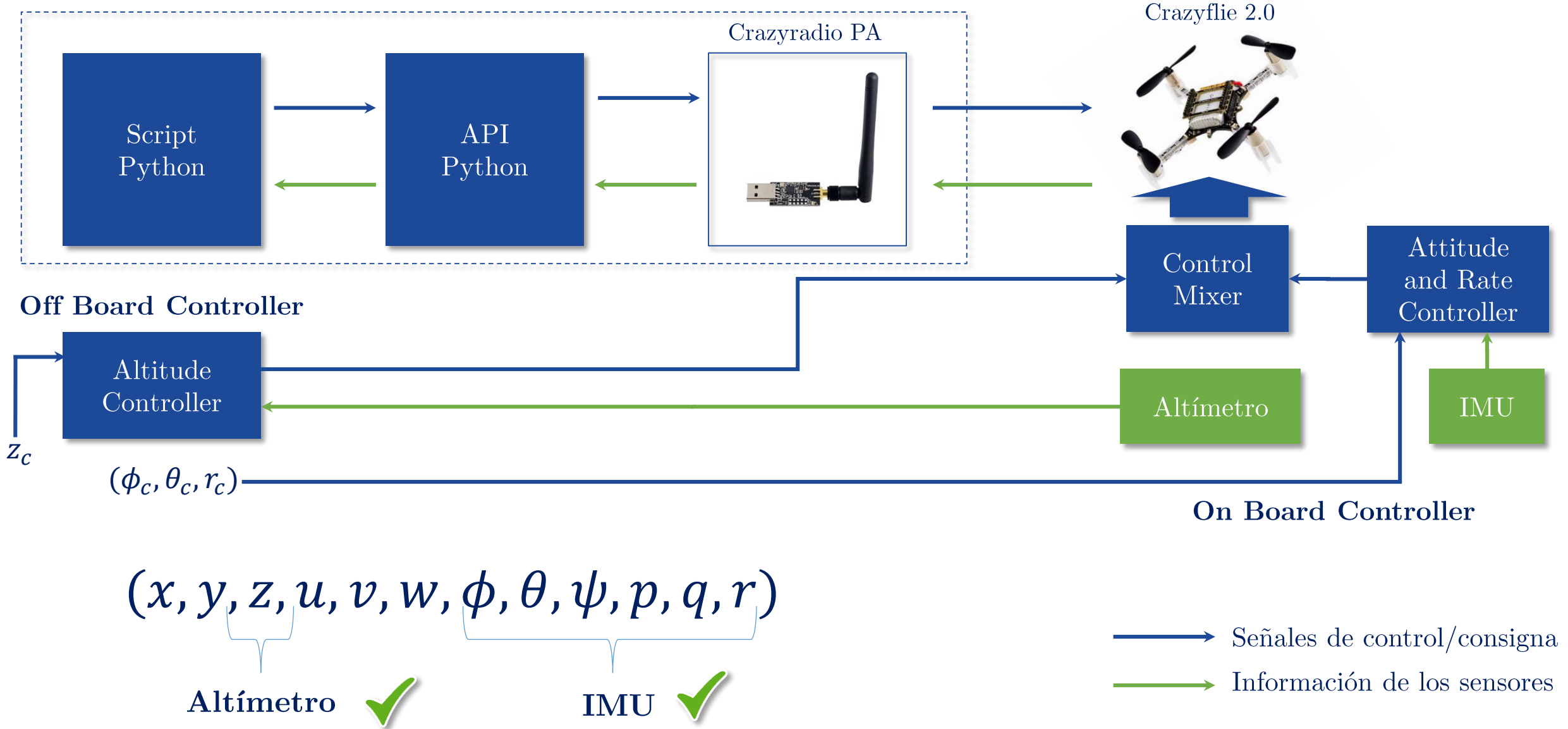
Rate Controller

$$\Delta\phi = PID(p_c - p), \Delta\theta = PID(q_c - q), \Delta\psi = PID(r_c - r)$$

Attitude Controller

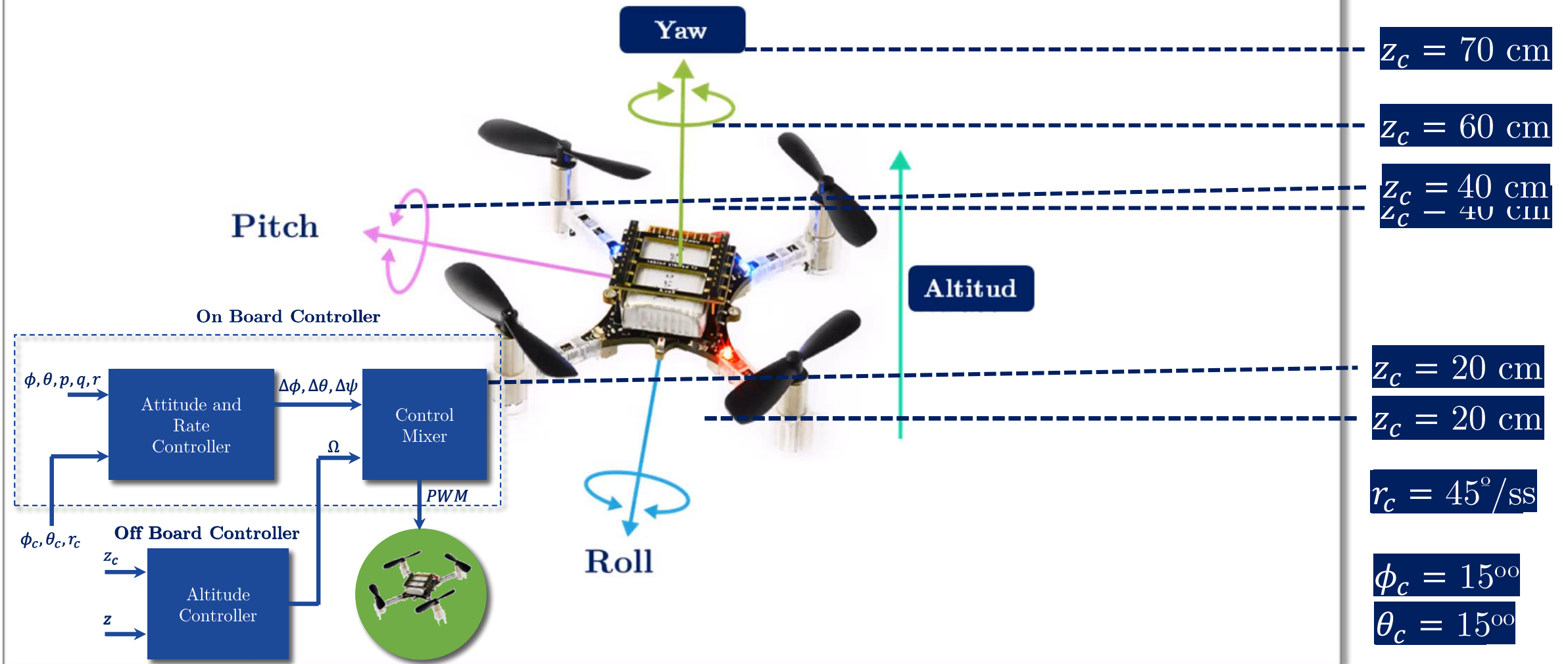
$$p_c = PID(\phi_c - \phi), q_c = PID(\theta_c - \theta)$$

Hemos planteado una plataforma de experimentación...



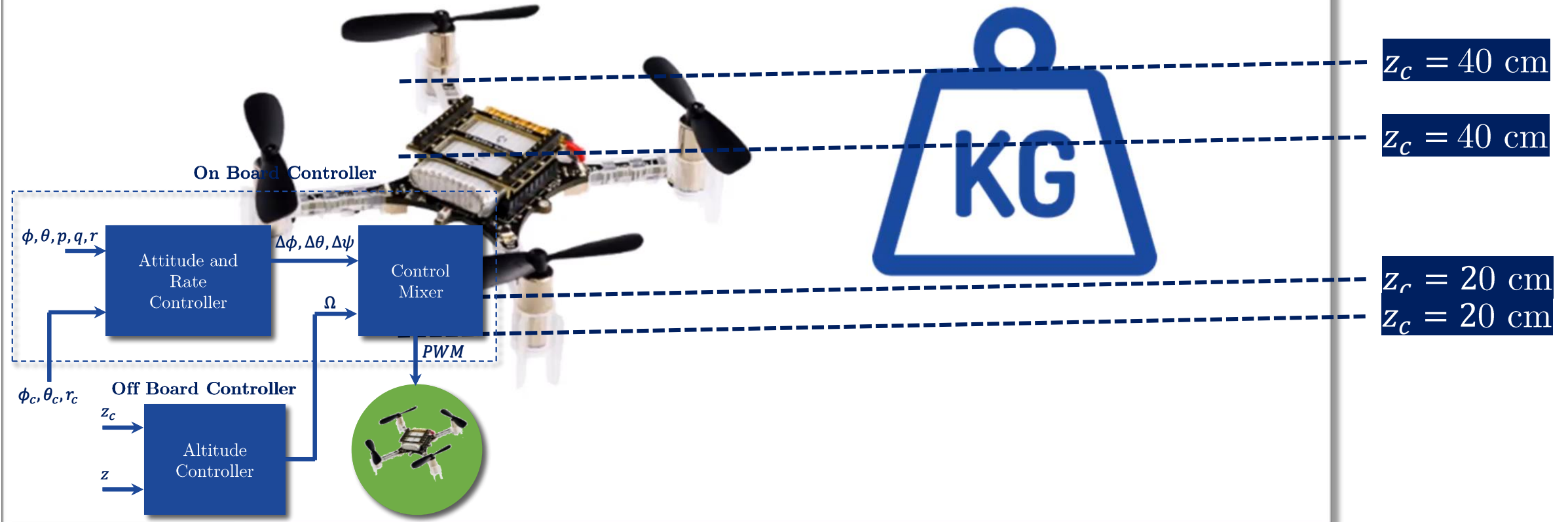
...con una respuesta estable al cambio de consigna...

Cambio de Consigna en Altitud y Yaw

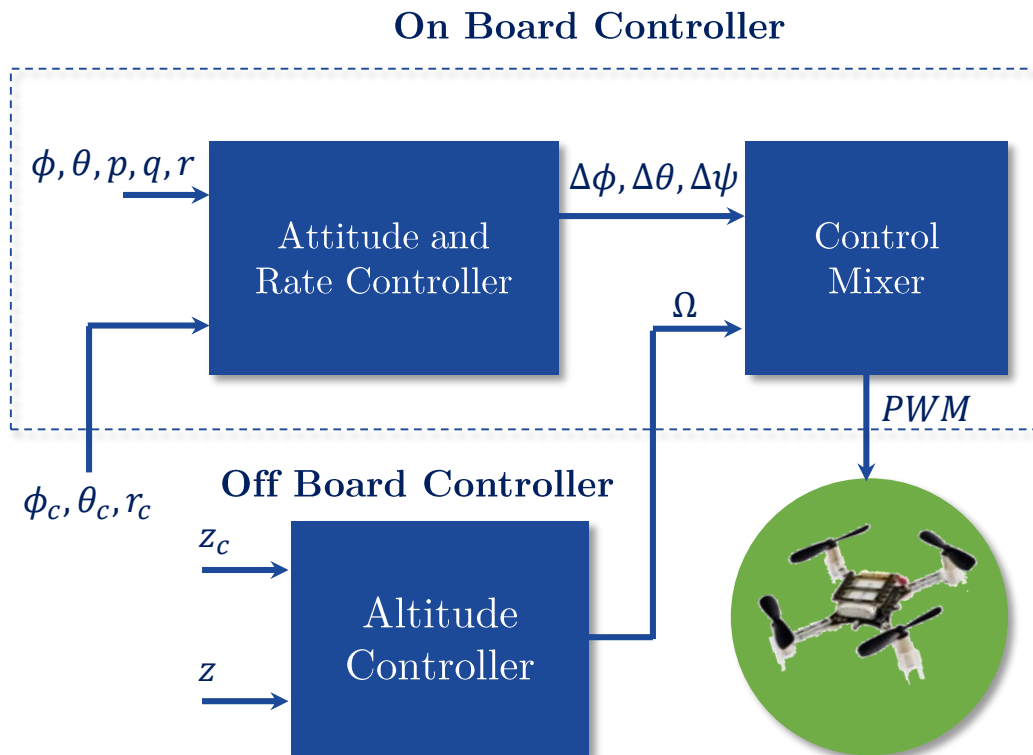


...y a la Compensación de Perturbaciones.

Cancelación de Perturbaciones: Carga de Pago



Implementación basada en Eventos



Mejoras en la Localización

$$(x, y, z, u, v, w, \phi, \theta, \psi, p, q, r)$$

Sistema de Localización Autónomo Indoor



Precisión
10 cm



Gracias...

- [1] Neil A Duffie. **An approach to the design of distributed machinery control systems.** *Industry Applications, IEEE Transactions on*, (4):435-442, 1982.
- [2] Hermann Kopetz. **Real time in distributed real time systems.** *En Requirements Engineering*, pags. 240-247. Springer, 1983.
- [3] Richard M Murray, Karl J Astrom, Stephen P Boyd, Roger W Brockett, and Gunter Stein. **Future directions in control in an information-rich world.** *IEEE Control Systems Magazine*, 23(2):20-33, 2003.
- [4] Fang Yang and Chaoli Wang. **Adaptive tracking control for uncertain dynamic nonholonomic mobile robots based on visual servoing.** *Journal of Control Theory and Applications*, 10(1):56-63, 2012.
- [5] Magdi S Mahmoud and Abdulla Ismail. **Role of delays in networked control systems.** *En Electronics, Circuits and Systems, 2003. ICECS 2003. Proceedings of the 2003 10th IEEE International Conference on*, tomo 1, pags. 40-43. IEEE, 2003
- [6] Shanbin Li, Zhi Wang, and Youxian Sun. **Fundamental problems of networked control system from the view of control and scheduling.** *En IECON 02 Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference of the*, tomo 3, pags. 2503-2508. IEEE, 2002
- [7] Li Zhang, Tao Cui, and Xianda Zhang. **Distributed estimation for sensor networks with channel estimation errors.** *Tsinghua Science & Technology*, 16(3):300-307, 2011.
- [8] Julio H Braslavsky, Rick H Middleton, and Jim S Freudenberg. **Feedback stabilization over signal-to-noise ratio constrained channels.** *En American Control Conference, 2004. Proceedings of the 2004*, tomo 6, pags. 4903-4908. IEEE, 2004.
- [9] Joao Hespanha, Antonio Ortega, and Lavanya Vasudevan. **Towards the control of linear systems with minimum bit-rate.** En 15th Int. Symp. Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS). 2002.

- [10] Nicola Elia and Sanjoy K Mitter. **Stabilization of linear systems with limited information**. Automatic Control, IEEE Transactions on, 46(9):1384-1400, 2001.
- [11] Björn Wittenmark, Johan Nilsson, and Martin Törngren. **Timing problems in real-time control systems**. En Proceedings of the American Control Conference. Citeseer, 1995.
- [12] Chung-Yao Kao and Bo Lincoln. **Simple stability criteria for systems with time-varying delays**. Automatica, 40(8):1429-1434, 2004.
- [13] WPMH Heemels and N van de Wouw. **Stability and stabilization of networked control systems**. En Networked Control Systems, pages. 203-253. Springer, 2010.
- [14] Rahul C Shah and Jan M Rabaey. **Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks**. En Wireless Communications and Networking Conference, 2002. WCNC2002. 2002 IEEE, tomo 1, pages. 350-355. IEEE, 2002.
- [15] Khaled Arisha, Moustafa Youssef, and Mohamed Younis. **Energy-aware tdma-based mac for sensor networks**. En System-level power optimization for wireless multimedia communication, pages. 21-40. Springer, 2002.
- [16] Yi-Jen Mon, Chih-Min Lin, Imre J Rudas, et al. **Wireless sensor network (wsn) control for indoor temperature monitoring**. Acta Polytechnica Hungarica, 9(6):17-28, 2012.
- [17] DD Chaudhary, SP Nayse, and LM Waghmare. **Application of wireless sensor networks for greenhouse parameter control in precision agriculture**. International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN) Vol, 3(1):140-149, 2011.
- [18] Tao Wu and Qi Cheng. **Distributed estimation over fading channels using one-bit quantization**. *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, 8(12):5779-5784, 2009.

- [19] Luis Orihuela, Pablo Millan, Carlos Vivas, and Francisco Rubio. **Reduced-order H_2 distributed observer for sensor networks.** *International Journal of Control*, 86(10):1870-1879, 2013.
- [20] Sebastian Dormido, J Sanchez, and Ernesto Kofman. **Muestreo, control y comunicacion basados en eventos.** *Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial RIAI*, 5(1):5-26, 2008.
- [21] Jan Lunze and Daniel Lehmann. **A state-feedback approach to event-based control.** *Automática*, 46(1):211-215, 2010.
- [22] Yodyium Tipsuwan and Mo-Yuen Chow. **Control methodologies in networked control systems.** *Control engineering practice*, 11(10):1099-1111, 2003.
- [23] WPMH Heemels, JH Sandee, and PPJ Van Den Bosch. **Analysis of event-driven controllers for linear systems.** *International journal of control*, 81(4):571-590, 2008.
- [24] Marek Miskowicz. **Send-on-delta concept: an event-based data reporting strategy.** *sensors*, 6(1):49-63, 2006.
- [25] Jacobus Henk Sandee. **Event-driven control in theory and practice.** Diss. PhD Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Netherlands, 2006.
- [26] Paulo Tabuada. **Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks.** *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 52(9):1680-1685, 2007.
- [27] Manuel Mazo, Adolfo Anta, and Paulo Tabuada. **On self-triggered control for linear systems: Guarantees and complexity.** En *Control Conference (ECC), 2009 European*, pags. 3767-3772. IEEE, 2009.
- [28] Mara Guinaldo, Dimos V Dimarogonas, Karl H Johansson, Jose Sanchez, and Sebastian Dormido. **Distributed event-based control strategies for interconnected linear systems.** *Control Theory & Applications, IET*, 7(6):877-886, 2013.

- [29] Georg S Seyboth, Dimos V Dimarogonas, and Karl H Johansson. **Event-based broadcasting for multi-agent average consensus.** *Automática*, 49(1):245-252, 2013.
- [30] Adolfo Anta and Paulo Tabuada. **To sample or not to sample: Self-triggered control for nonlinear systems.** *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 55(9):2030-2042, 2010.
- [31] Jose Araujo. **Design, implementation and validation of resource-aware and resilient wireless networked control systems.** 2014.
- [32] Manel Velasco, Josep Fuertes, and Pau Marti. **The self triggered task model for real-time control systems.** En *Work-in-Progress Session of the 24th IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS03)*, tomo 384. 2003.
- [33] Adolfo Anta and Paulo Tabuada. **On the minimum attention and anytime attention problems for nonlinear systems.** En *Decision and Control (CDC), 2010 49th IEEE Conference on*, pages. 3234{3239. IEEE, 2010.
- [34] MCF Donkers, Paulo Tabuada, and WPMH Heemels. **Minimum attention control for linear systems.** *Discrete Event Dynamic Systems*, 24(2):199-218, 2014.
- [35] Luca Greco, Daniele Fontanelli, and Antonio Bicchi. **Design and stability analysis for anytime control via stochastic scheduling.** *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 56(3):571-585, 2011.
- [36] WPMH Heemels and MCF Donkers. **Model-based periodic event-triggered control for linear systems.** *Automática*, 49(3):698-711, 2013.
- [37] Jan Lunze and Daniel Lehmann. **A state-feedback approach to event-based control.** *Automática*, 46(1):211-215, 2010.
- [38] Luis A Montestruque and Panos J Antsaklis. **On the model-based control of networked systems.** *Automática*, 39(10):1837-1843, 2003.

- [39] Sylvain Durand and Nicolas Marchand. **Further results on event-based pid controller.** *En Control Conference (ECC), 2009 European*, pags. 1979-1984. IEEE, 2009.
- [40] Sandeep Kumar Malu and Jharna Majumdar. **Kinematics, localization and control of differential drive mobile robot.** *Global Journal of Research and Engineering-GJRE-H*, 14(1), 2014.
- [41] Marek Miskowicz. **Improving the performance of the networked control system using event-triggered observations.** *PDS'2004*, pags. 53-58, 2004.
- [42] Andrzej Pawlowski, Jose Luis Guzman, Francisco Rodriguez, Manuel Berenguel, J Sanchez, and Sebastian Dormido. **The influence of event-based sampling techniques on data transmission and control performance.** *En Emerging Technologies & Factory Automation, 2009. ETFA 2009. IEEE Conference on*, pags. 1-8. IEEE, 2009.
- [43] Feng-Li Lian, John K Yook, Dawn M Tilbury, and James Moyne. **Network architecture and communication modules for guaranteeing acceptable control and communication performance for networked multi-agent systems.** *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 2(1):12-24, 2006.
- [44] Vinh Hao Nguyen and Young Soo Suh. **A modified multirate controller for networked control systems with a send-on-delta transmission method.** *En Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Theoretical and Methodological Issues*, pags. 304-315. Springer, 2007.
- [45] John K Yook, Dawn M Tilbury, and Nandit R Soparkar. **Trading computation for bandwidth: Reducing communication in distributed control systems using state estimators.** *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 10(4):503-518, 2002.

- Aström, K. J. (2008). **Event based control**. In *Analysis and design of nonlinear control systems* (pp. 127-147). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Dormido, S., Sánchez, J., & Kofman, E. (2008). **Muestreo, control y comunicación basados en eventos**. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 5(1), 5-26.
- Durand, S., & Marchand, N. (2009, May). **An event-based PID controller with low computational cost**. In *8th International Conference on Sampling Theory and Applications (SampTA'09)* (pp. Special-session).
- Sánchez, J., Visioli, A., & Dormido, S. (2011). **A two-degree-of-freedom PI controller based on events**. *Journal of Process Control*, 21(4), 639-651.
- Sánchez, J., Visioli, A., & Dormido, S. (2012). **Event-based PID control**. In *PID Control in the Third Millennium* (pp. 495-526). Springer, London.
- Lehmann, D., & Johansson, K. H. (2012). **Event-triggered PI control subject to actuator saturation**. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(3), 430-435.
- Sombría, J. C., Moreno, J. S., Visioli, A., & Bencomo, S. D. (2012). **Decentralised control of a quadruple tank plant with a decoupled event-based strategy**. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(3), 424-429.
- Cervin, A., & Astrom, K. J. (2007, December). **On limit cycles in event-based control systems**. In *Decision and Control, 2007 46th IEEE Conference on* (pp. 3190-3195). IEEE.