

Control impulsivo y limitaciones lineales

Aplicaciones en control vehicular

Antonio Barreiro

abarreiro@uvigo.es

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Universidad de Vigo

UNED, 9 de mayo de 2017

Control impulsivo y limitaciones lineales

Objetivos:

Limitaciones temporales del control lineal (Planta con integradores)

Control impulsivo, basado en Reset o reinicio

Aplicaciones ACC (Control de Crucero Adaptativo)

Índice:

I. Introducción. Conceptos básicos

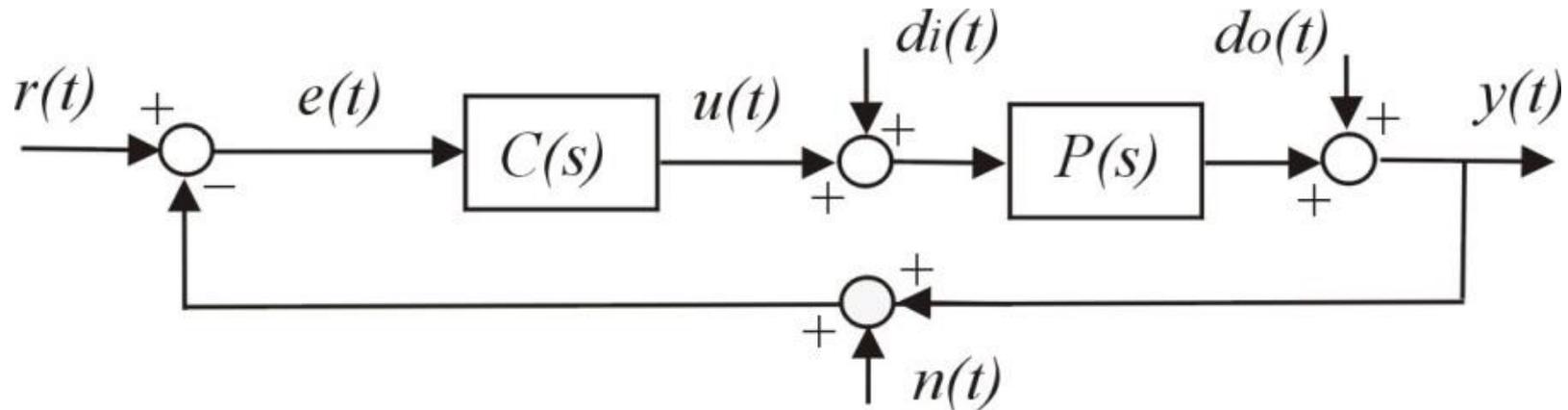
II. Control reseteado preliminar. Superación del control lineal.

III. Controlador impulsivo con reinicio no nulo

Parte I. Limitación temporal con integradores

Lazo estable, Acción integral: $\text{Tipo}\{L(s)\} = \text{Tipo}\{C(s)P(s)\} \geq 1$

$R(s)=1/s \Rightarrow E(s)$ cumple $E(0)=1/K_v$. $(K_v = \lim_{s \rightarrow 0} s L(s))$



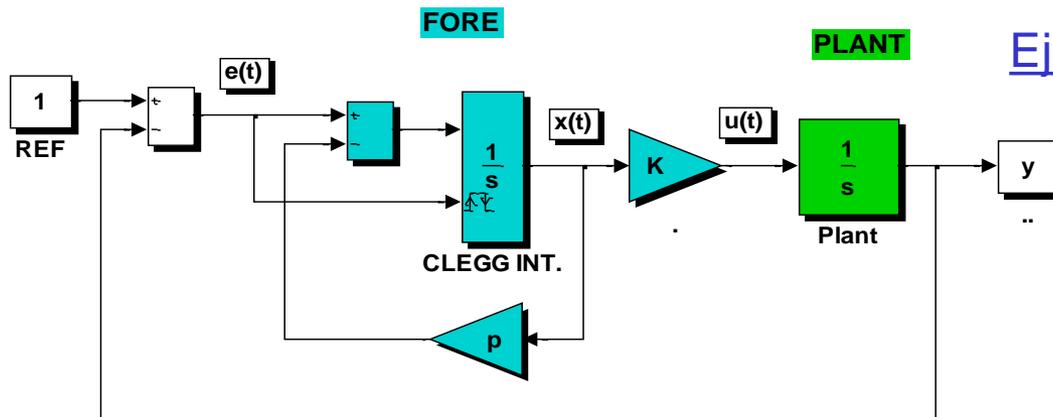
Conclusión válida para cualquier par de señales relacionadas por $S(s)=1/(1+L(s))$

$E(0)= 1/K_v$, $s=0$ en dominio convergencia $\Rightarrow \int_0^{\infty} e(\tau) d\tau = 1 / K_v$

Limitación integral \Rightarrow ¿Existen comportamientos deseables no alcanzables?

Control basado en reset o reinicio

Ejemplo 1: FORE-INTEGRADOR



$$L = \left[\frac{K}{s+p} \right]_{FORE} \circ \frac{1}{s}$$

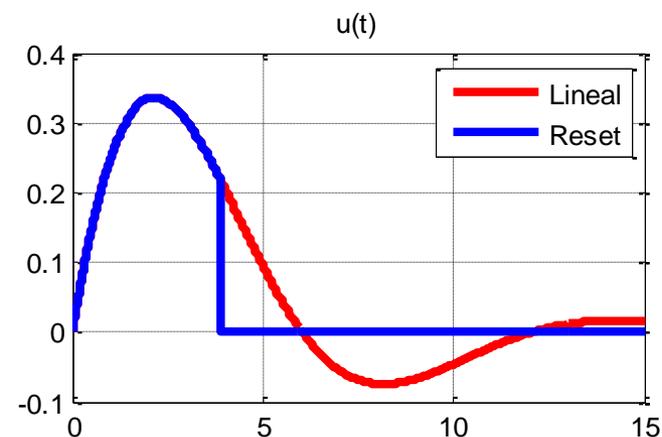
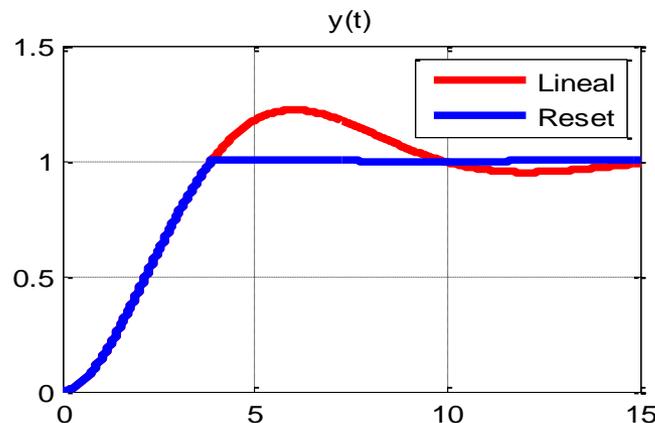
\circ = conexión serie

$K/(s+p)$ = sistema base

Sistema reseteado primer orden (FORE)

$$\dot{x}(t) = -p x(t) + e(t), \quad (e(t) \neq 0) \quad x(t^+) = 0, \quad (e(t) = 0)$$

Control Reset liberado de limitaciones lineales, $p=0.5$, $K=1/3$:

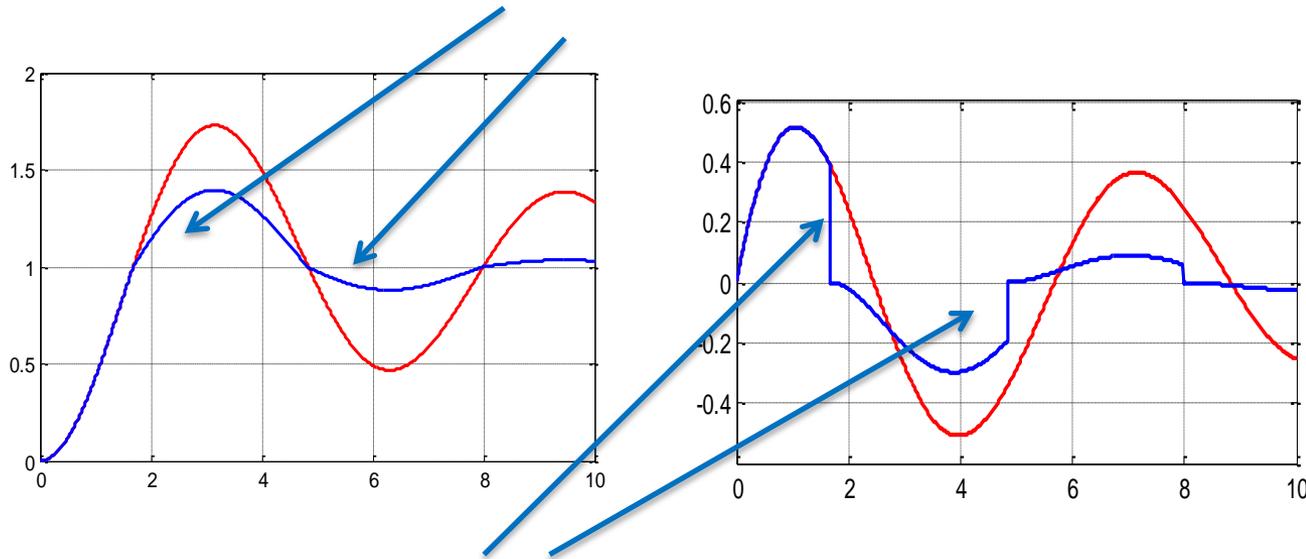


Control basado en reset o reinicio

Ejemplo 2: FORE-SEGUNDO ORDEN

$$L = \left[\frac{K}{s+p} \right]_{FORE} \circ \frac{(s+1)}{s(s+0.2)} \quad K=1, \quad p=1$$

El reseteo permite conseguir la misma fase de subida lineal, pero mejorando la fase media (sobreoscilación) y final (estacionario)



...gracias a 'descargar' la inercia del control, por medio del reseteo

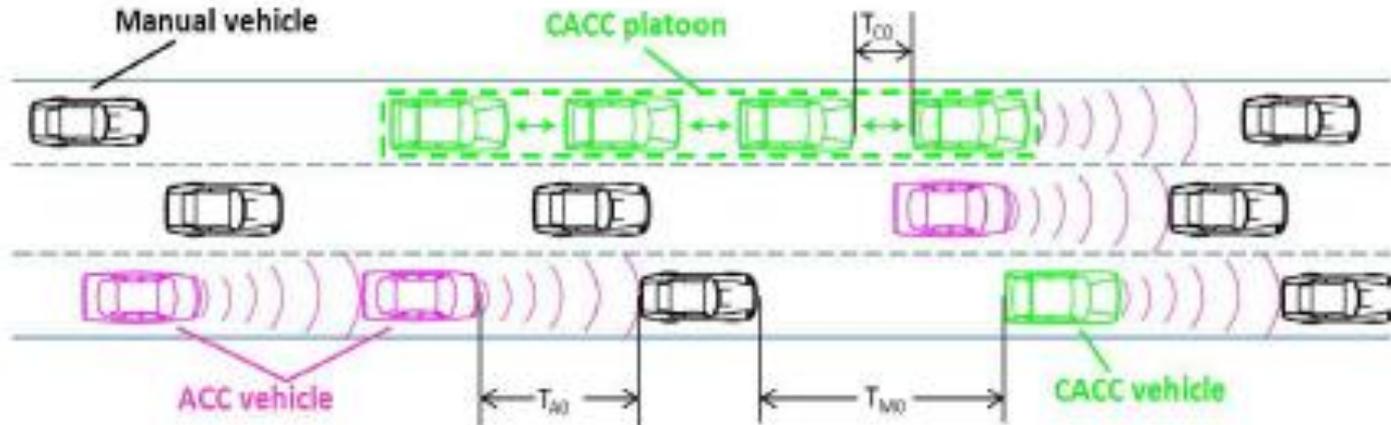
Problemas de Control/ Conducción Autónoma

CC: Control de Crucero. Se controla la velocidad

ACC: CC Adaptativo. Se controla la distancia. Múltiples vehículos.

CACC: ACC Cooperativo. ACC + Comunicación intervehicular.

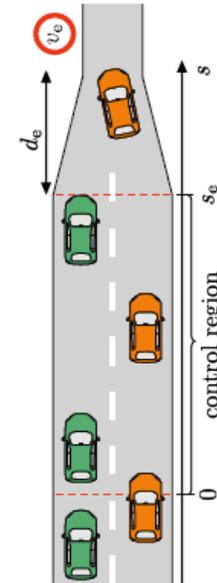
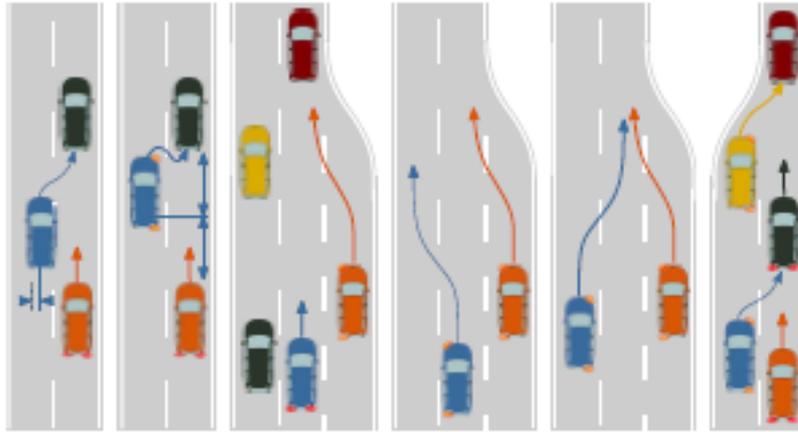
Platoon: Pelotón o Convoy (ACC #n, CACC #n)



Problemas de Control/ Conducción Autónoma

Maniobras con pelotones:

Partir, Concatenar, Disolver,...

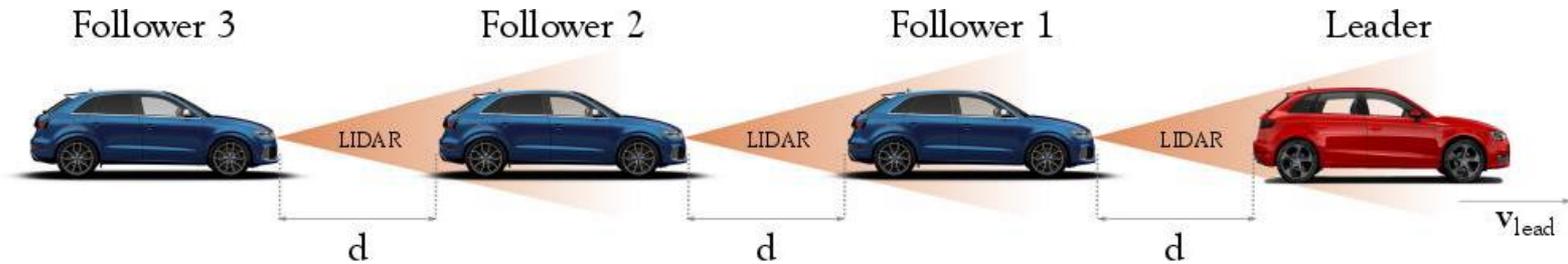


Maniobras cooperativas con control lateral (cambio carril):

Abandono/Incorporación, Merging (fusión),...

Beneficios conducción autónoma: +eficiencia, -consumo,...

PARTE II. Modelado sistema ACC



Planta doble integrador: $\ddot{x}_k(t) = a_k(t)$

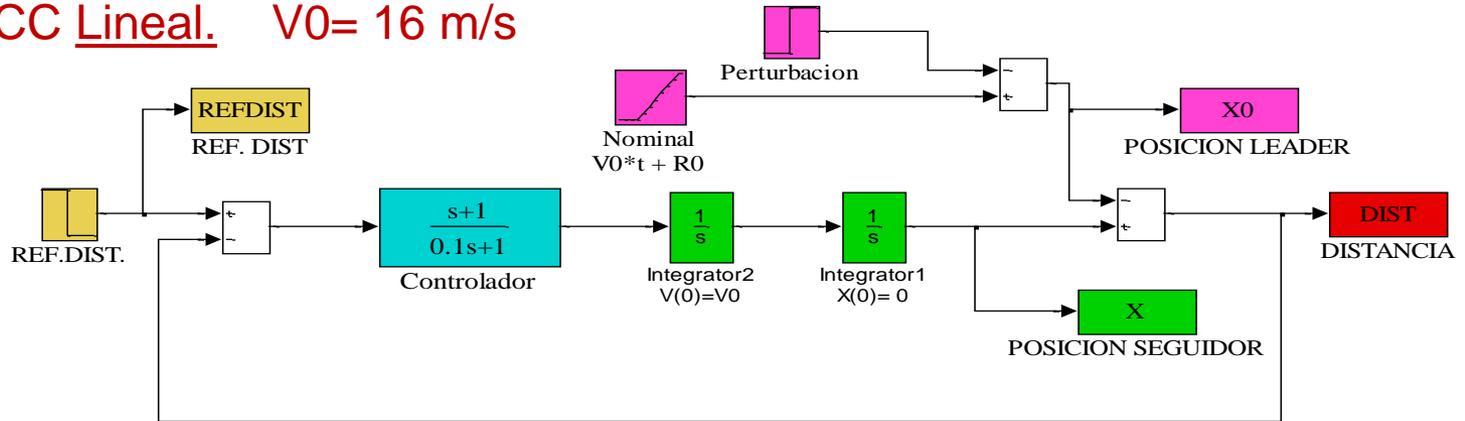
Control de distancia: $d_k = x_{k-1} - x_k$ $e_k = d_k^{ref} - d_k$

Actuación: aceleración $u_k(t) = C[e_k(t)]$ $u_k(t) \approx a_k(t)$

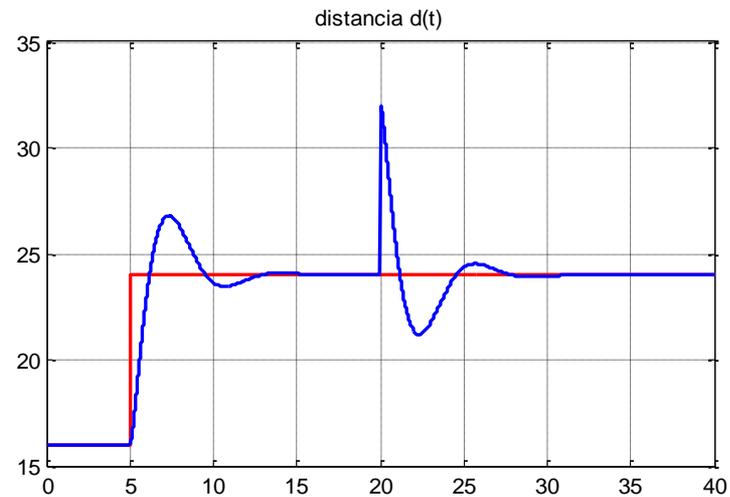
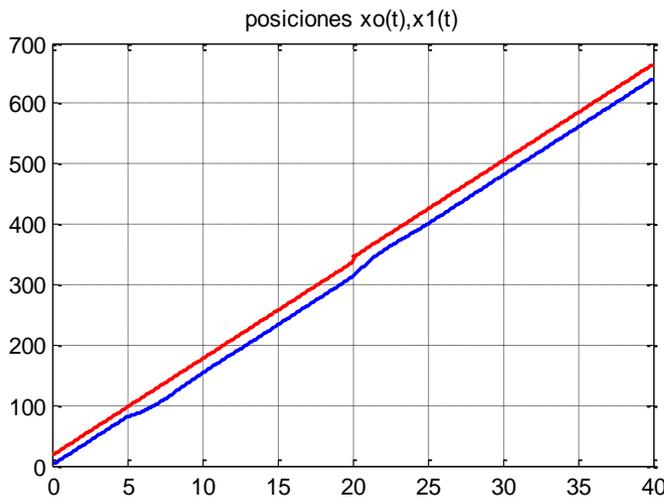
- Subsistema actuación opcional
- Régimen nominal= velocidad constante v_0
- Variables absolutas/ relativas a nominal
- Respuesta frente a consigna/ perturbación a salida

Modelado sistema ACC

ACC Lineal. $V_0 = 16 \text{ m/s}$



Cambio consigna 16m a 24m ($t=5$) Perturbación Leader ($t=20$)



Supera el reset al lineal? Es cuantificable la mejora en base a limitaciones?

Estrategia de diseño por prueba y error

1. Elección del controlador:

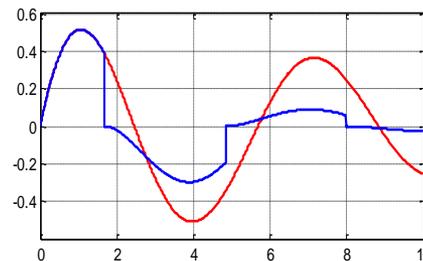
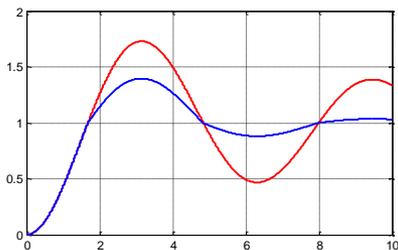
1A. Controlador base sencillo, respuesta subamortiguada

1B. Elegir estados a resetear (reseteo total, parcial,...)

2. Prueba del controlador reseteado. Verificar:

2A. Mejora evidente del reset frente al lineal base

2B. Valores de actuación aceptables...

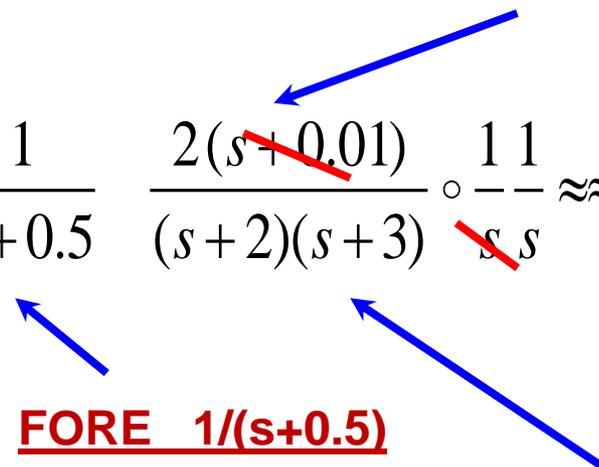


Si 2A,2B OK, diseño aceptable. Si no, volver a 1A, 2B y cambiar ajustes

3. Cuantificación de mejora, basada en limitaciones fundamentales

Diseño 1. Planteamiento

- Difícil encontrar solución reset que mejore drásticamente la lineal
- El FORE-Integrador es un ejemplo que maximiza la mejora....
- Buscar analogía planta $1/s$... controlador con cero lento ($s+0.01$).

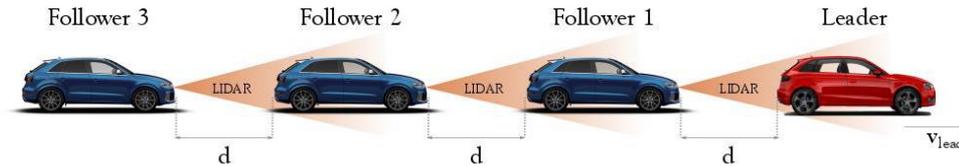
$$L(s) = C(s) \circ P(s) = \frac{1}{s+0.5} \cdot \frac{2(s+0.01)}{(s+2)(s+3)} \circ \frac{1}{s} \approx \frac{1}{s+0.5} \cdot \frac{1}{s}$$


- Controlador principal: **FORE** $1/(s+0.5)$
- Completar polos para confort/ límites de aceleración $[-9,3]$ y jerk $[-5,5]$

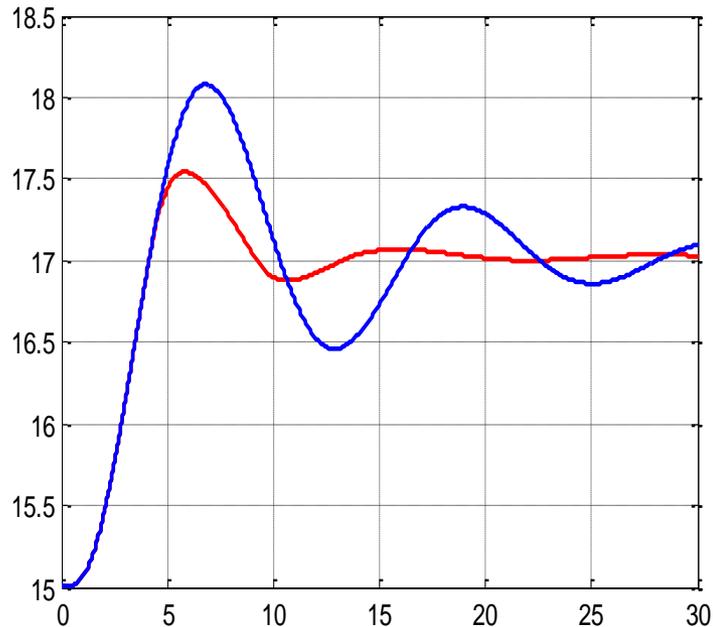
$$C = \left[\frac{1}{s+0.5} \right]_{FORE} \circ \frac{2(s+0.01)}{(s+2)(s+3)}$$

Diseño 1: Resultados

Convoy a $v_0=15\text{m/s}$, Escalón de distancia (de 15m a 17m)

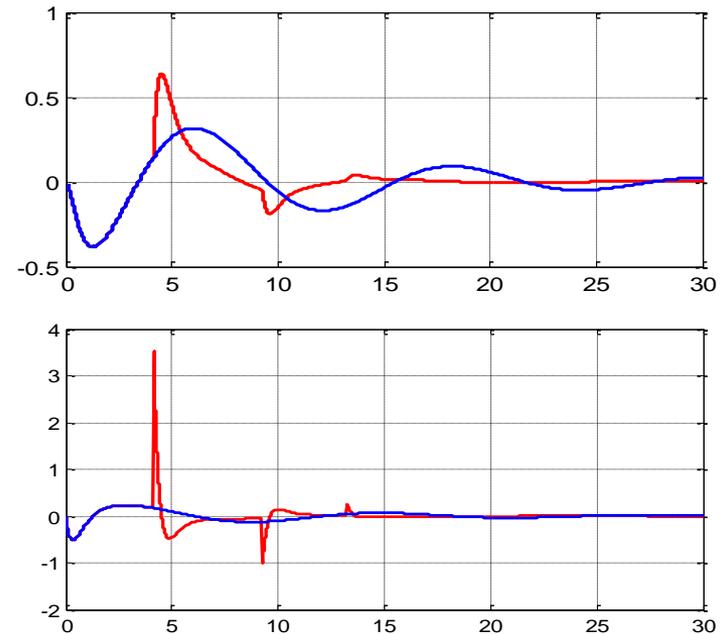


Distancia leader- primer seguidor



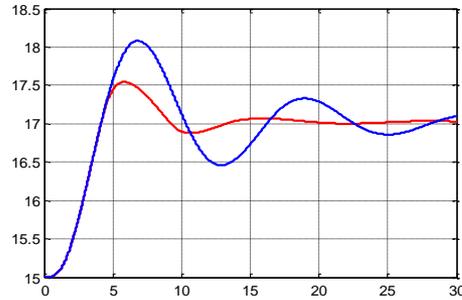
Efecto apreciable del reset
(reducción de sobreosc.)

Aceleración y jerk



Cumple restricciones confort
(hasta el tercer seguidor)

Diseño 1: Cuantificación mejora

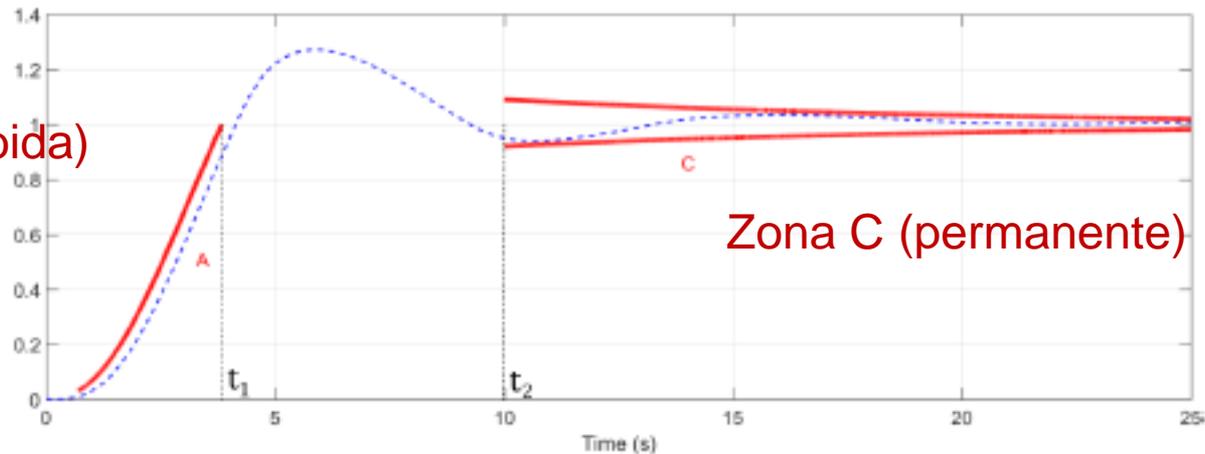


¿En qué sentido la solución reset es mejor que cualquier solución lineal?

La limitación lineal para el doble integrador ($K_v = \infty$)es integral de error nula, luego....

Zona B (sobreosc.)

Zona A (subida)



Barrera A de SEGURIDAD

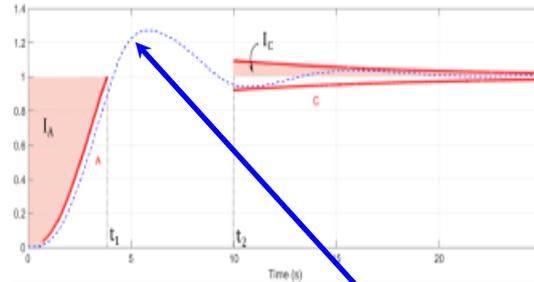
$$y(t) \leq f_a(t), \quad t \in [0, t_1]$$

Barrera C de PRECISIÓN

$$|e(t)| \leq f_c(t), \quad t \in [t_2, \infty)$$

Diseño 1: Cuantificación mejora

$$I_A = \int_0^{t_1} (1 - f_a(\tau)) d\tau$$



$$I_C = \int_{t_2}^{\infty} f_c(\tau) d\tau$$

Def: Sobreoscilación promedio (AOS):

$$AOS = - \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} e(\tau) d\tau$$

Limitación lineal:
Integral de error nula:

$$AOS_{lin} \geq \frac{I_A - I_C}{t_2 - t_1} =: AOS_{min}$$

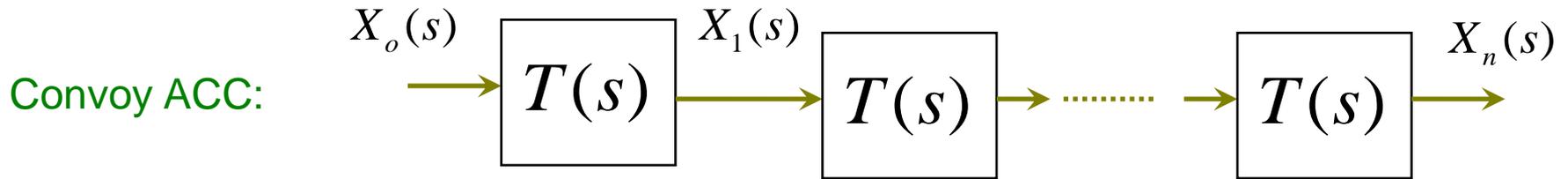
Objetivos: Seguridad (A), Precisión (C), $AOS < AOS_{min}$
Inalcanzables con cualquier controlador lineal

Mejora con reset:
(Barreras por vehículo)

Followers	AOS_{min}	AOS_{reset}
First	0,3707	0,1909
Second	0,2952	0,1983
Third	0,3922	0,2951

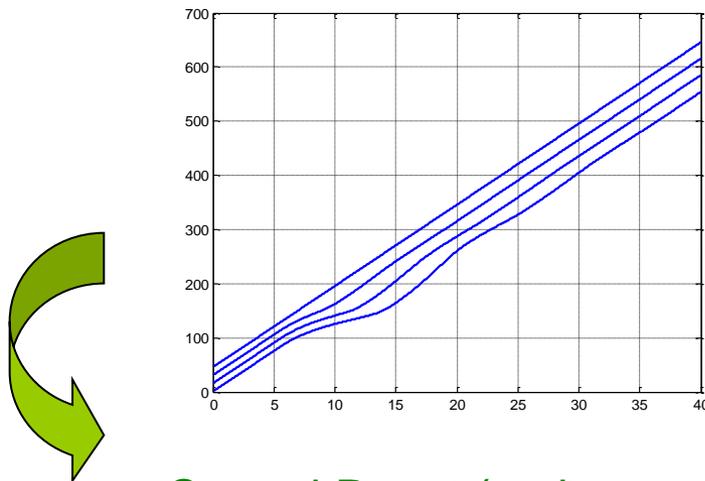
Reducción de un 50%

PARTE III. String (in)Stability

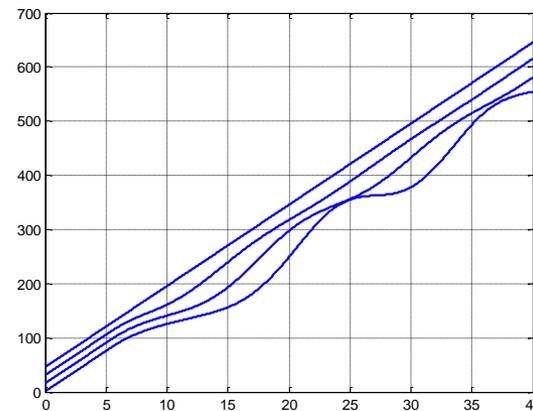


Tipo{ $L(s)$ }=2 $\Rightarrow T(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)}$ tiene resonancia: $|T(j\omega_m)| = |1 + L^{-1}(j\omega_m)|^{-1} > 1$

\Rightarrow Perturbaciones amplificadas con $n \rightarrow \infty \Rightarrow$ STRING INSTABILITY



Control Reset (aminora el efecto)

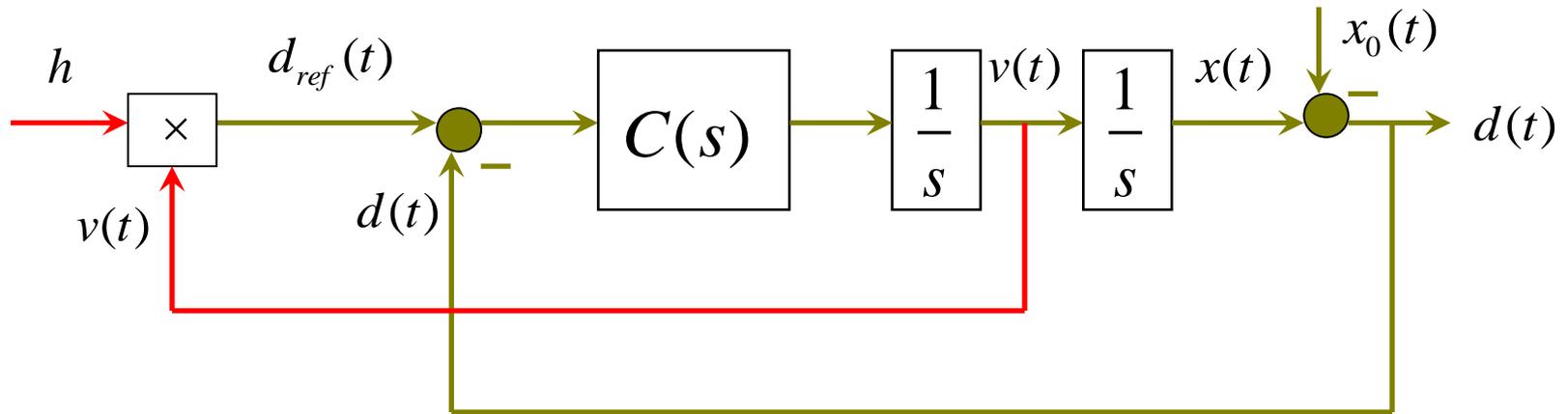


Control Lineal Base



String (in)Stability

ACC con distancia dependiente de la velocidad (headway) h [seg.]



- ACC+headway_time consigue String-Stability: $|T(j\omega)| \leq 1$
- Lazo 2 GdL, destruye tipo 2 (error no nulo a rampas)
- Headway+ Controlador Reset mejora lineal, pero...

...tratamiento complicado de $\|T_{reset}\| \leq 1$...estudios adicionales.

Limitaciones del reseteo a cero

Solución inicial (inspirada en FORE y planta 1/s):

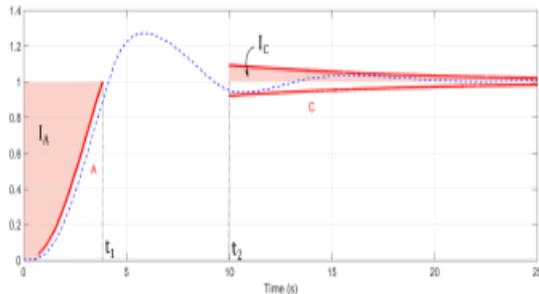
$$C(s)P(s) = \frac{1}{s+0.5} \frac{2(s+0.01)}{(s+2)(s+3)} \frac{1}{s} \frac{1}{s} \approx \frac{1}{s+0.5} \frac{1/3}{s}$$

Cero lento $c = -0.01$, polo lento lazo cerrado $-0.01 < -p < 0$

No influye en $T_{r,y} = L/(1+L)$, se cancela $(s+c)/(s+p)$

..pero sí influye en $T_{di,y} = P/(1+L)$... rechazo lento perturbación entrada

..y la barrera final, $\exp(-\mu t)$ debe ser muy lenta, $\mu < p$

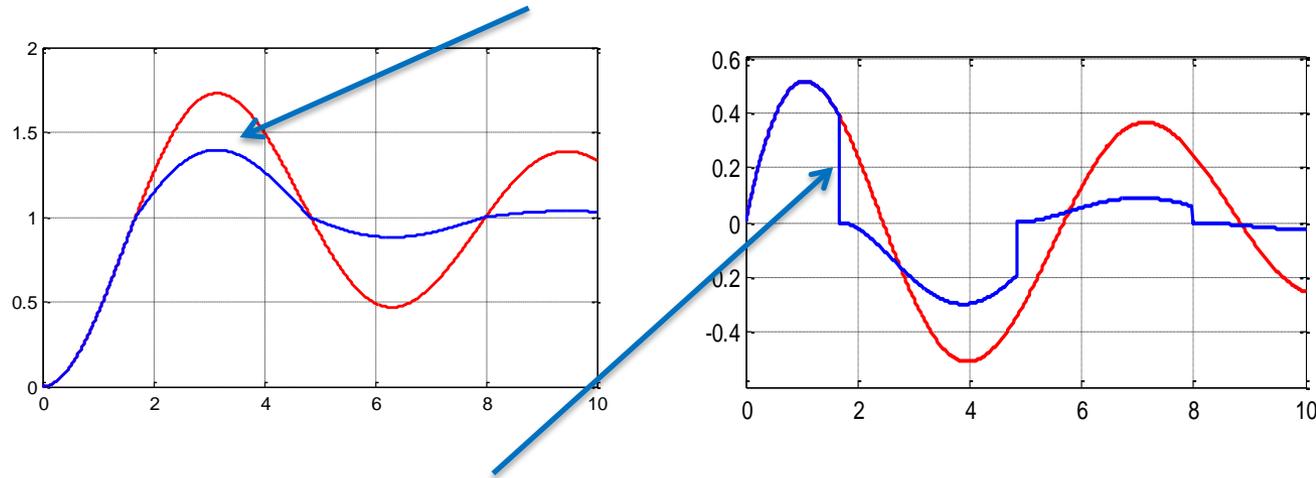


$$I_C \rightarrow \varepsilon \frac{e^{-\mu t_2}}{\mu} \rightarrow \infty \quad I_A - I_C \rightarrow 0$$

..no hay buena conclusión sobre AOS

Limitaciones del reseteo a cero

¿Por qué el reseteo no trae mejora drástica, como en casos típicos?



...relación con el tamaño del salto de actuación $u(t)$ cuando $e(t)=0$

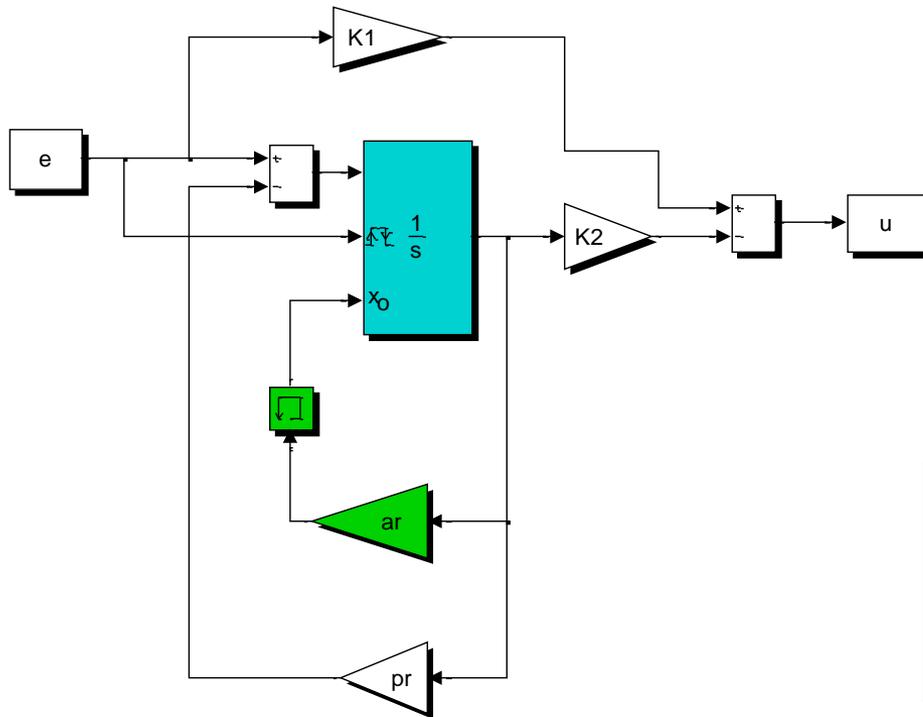
Para el caso de la planta doble integrador (sin cero lento):

$$\left. \begin{array}{l} y(t) \approx 1 - \cos \omega_0 t \\ \text{Tipo 2, } P(s)=1/s^2 \end{array} \right\} \Rightarrow u = \ddot{y} \approx \omega_0^2 \cos \omega_0 t \quad \text{Desfase (u,y) de unos 180 grados !}$$

..cuando $y(t)$ cruza 1 entonces $u(t)$ cruza aproxim. 0:
resetear una señal pequeña no produce efecto !!

Diseño 2: Reseteo impulsivo

Reseteo no nulo. Lazo abierto base:



$$C(s) \circ P(s) = K \frac{(s + c_r)}{(s + p_r)} \circ \frac{1}{1 + \tau s} \frac{1}{s^2}$$

Controlador base:

$$C(s) = K_1 + \frac{K_2}{s + p_r}$$

$$K_1 = 0.68, K_2 = -3, p_r = 5, c_r = 0.5$$

Etapla actuación

$$(\tau=0.5)$$

Reseteo no nulo:

$$x(t^+) = a_r x(t^-), \quad a_r = 25$$

Aceleración y jerk (ISO 22179)

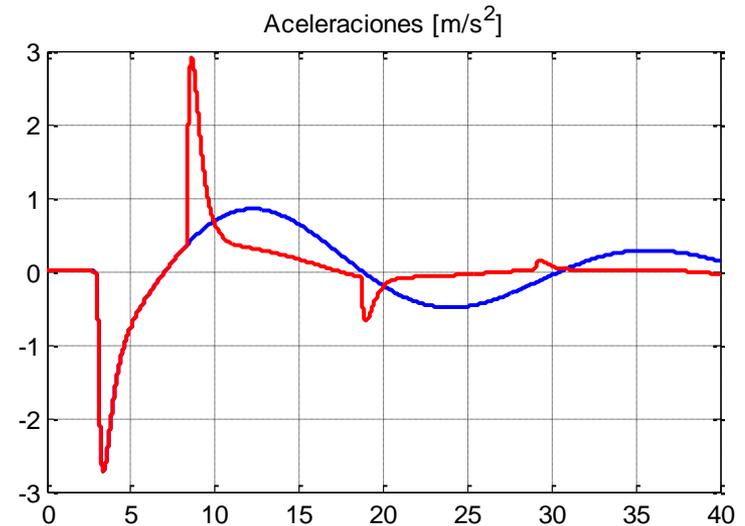
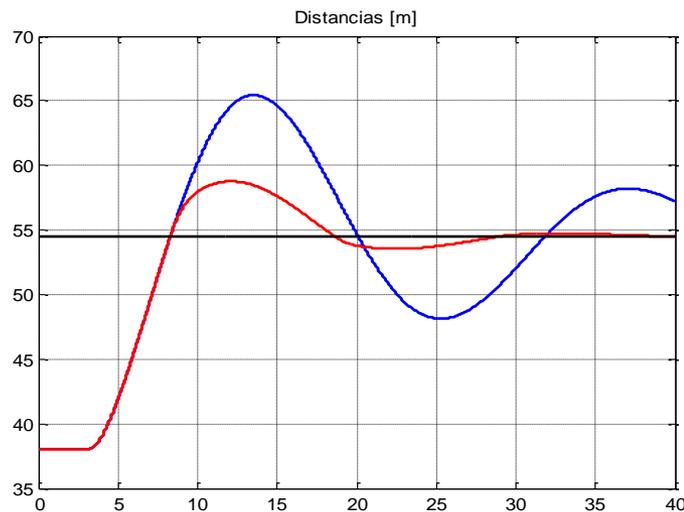
$$|a_{av}| \leq 3.5 m/s^2, \quad |j_{av}| \leq 2.5 m/s^2,$$

a_av: promedio ventana 1s, j_av: promedio ventana 2s

Diseño 2: Reseteo impulsivo

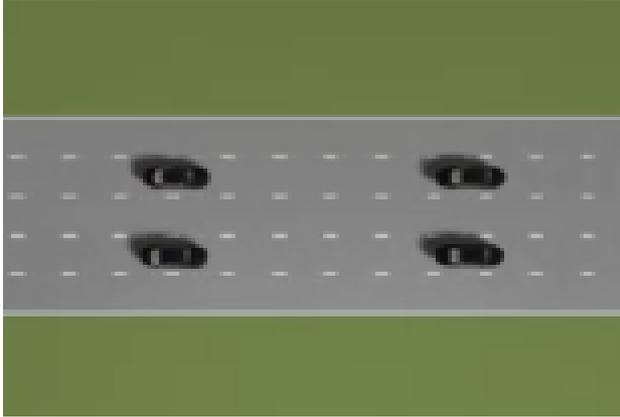
Velocidad crucero: $v_0=33\text{m/s}$ (120km/h)

Consigna: $d= h*v + 5$, $h=$ de 1s a 1,5s, $d=$ de 38m a 54,5m

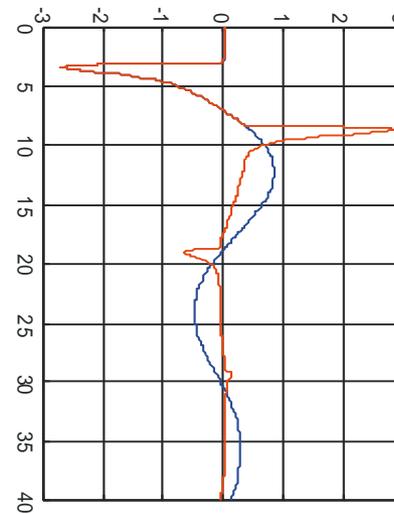
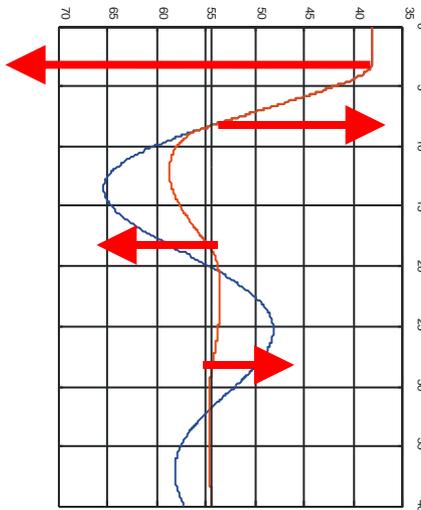


Efecto de “control por impulsos”, en lazo cerrado, con reinicio no nulo
Mejor que cualquier control lineal, si se imponen barreras inicial y final

Diseño 2: Reseteo impulsivo



Efecto de impulsos
(frenado/aceleración)
generados con FORE



Conclusiones

Existen ciertas maniobras tracking en ACC no realizables en lineal
(objetivos combinados de seguridad-robustez-precisión)

El Control Reset es una forma sencilla de conseguir los objetivos
(efecto impulsivo en los instantes de cruce)

Estudios adicionales:

Efecto de perturbaciones a la entrada

Efecto de ruido de sensores

Aplicación a otros procesos, con otras limitaciones lineales:
.... polos inestables, polos imaginarios,

Referencias

A. Costas, M. Cerdeira, A. Barreiro, E. Delgado, A. Baños
Control basado en reset para seguimiento de consigna en ACC
Jornadas de Automatica, Madrid, 2016

A. Costas, M. Cerdeira, A. Barreiro, E. Delgado, A. Baños
Car Platooning reconfiguration applying reset control techniques
ETFA Conference, Berlín, 2016

O. Beker, C.V. Hollot, Y. Chait, *Plant with Integrator: An example of Reset control overcoming limitations of linear feedback.*
IEEE Trans. AC, 46(11), 2001

Figuras auxiliares tomadas de:

L. Zhao, J. Sun, *Simulation Framework for vehicle platooning and car-following behaviors under connected.vehicle environment*, CICTP Conference, 2013

S. Ulbrich, S. Grossjohann, C. Appelt, K.Homeier, J. Rieken, M.Mauer,
Structuring cooperative behavior planning implementation for Automated Driving
2015 Int. Conf. on Intelligent Transport. Syst.