

# **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

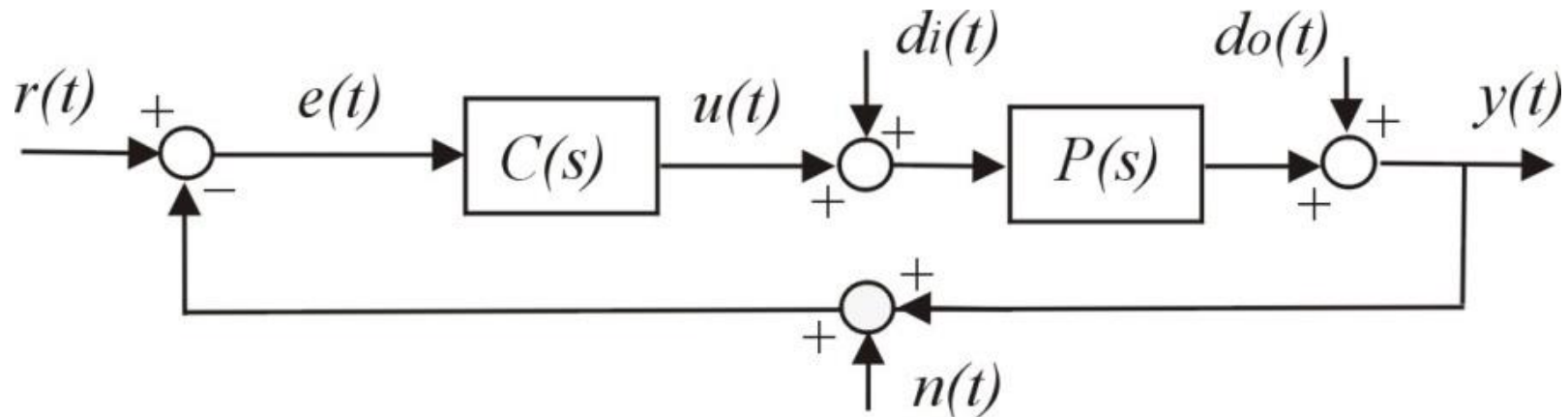
II. Control reseteado preliminar. Superación del control lineal.

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



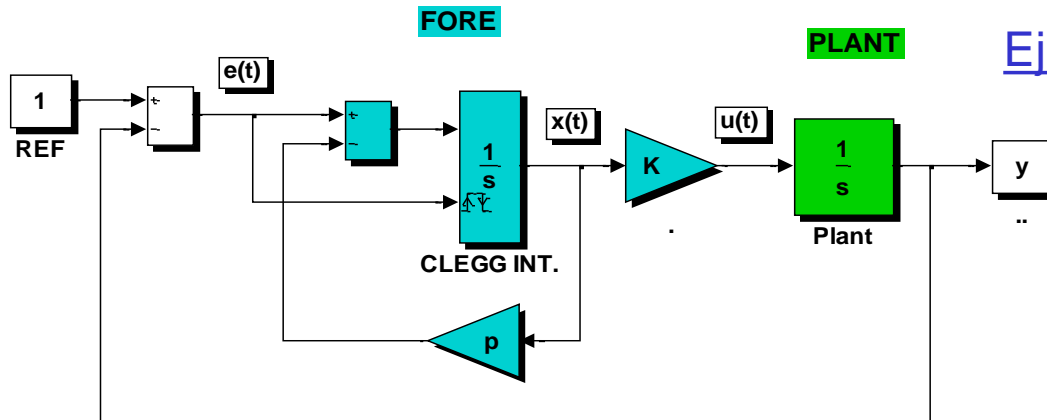
Conclusión válida para cualquier par de señales relacionadas por  $S(s)=1/(1+L(s))$

$E(0)= 1/K_v$ ,  $s=0$  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



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

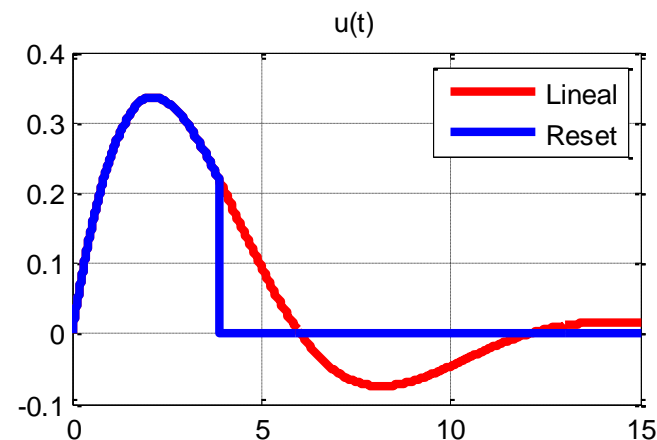
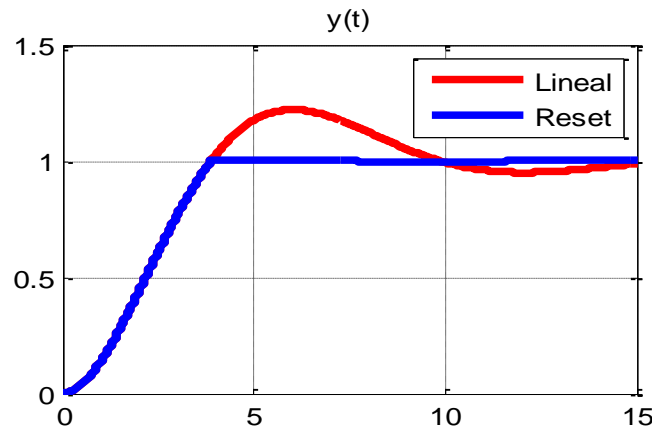
○ = conexión serie

$K/(s+p)$  = 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,  $p=0.5$ ,  $K=1/3$ :

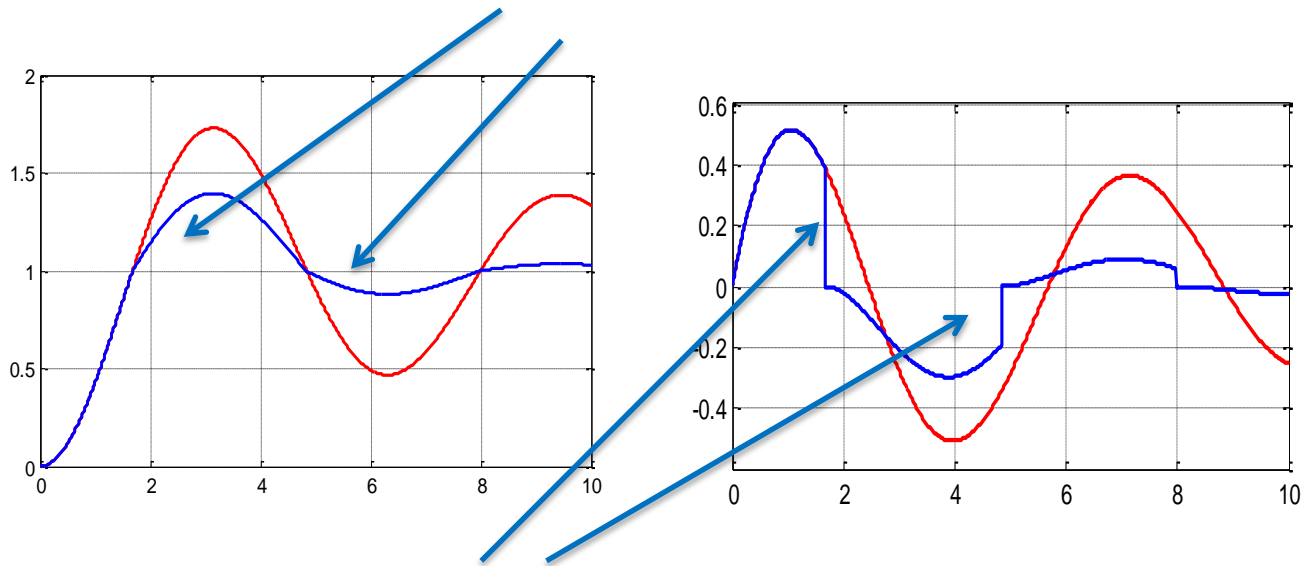


# Control basado en reset o reinicio

## 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

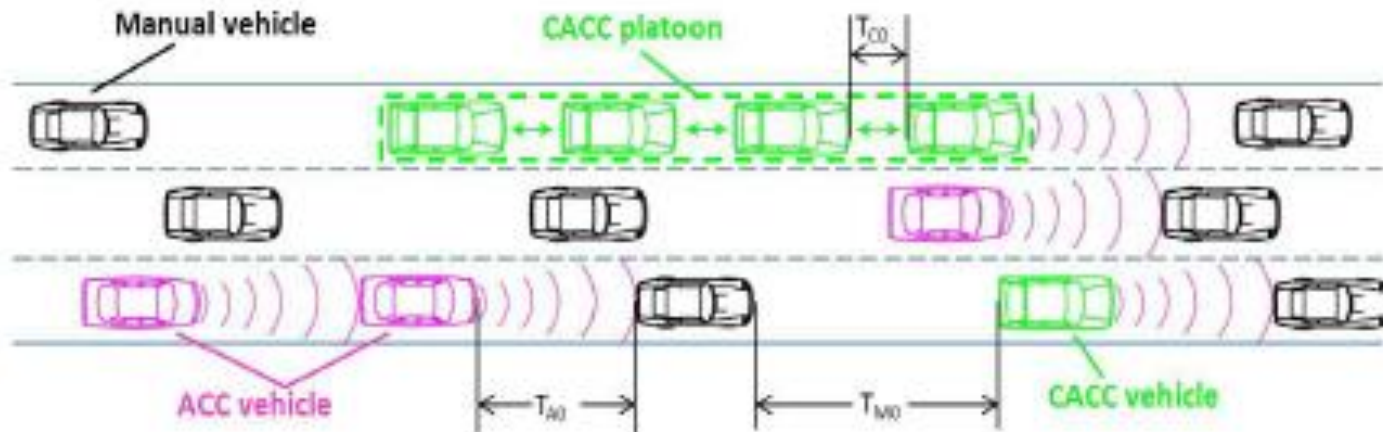
# Problemas de Control/ Conducción Autónoma

CC: Control de Crucero. Se controla la velocidad

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

CACC: ACC Cooperativo. ACC + Comunicación intervehicular.

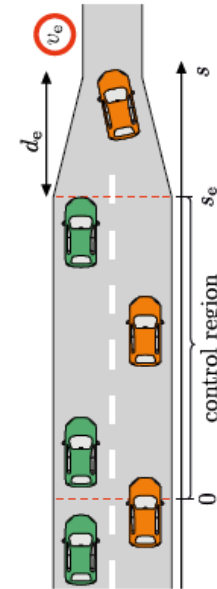
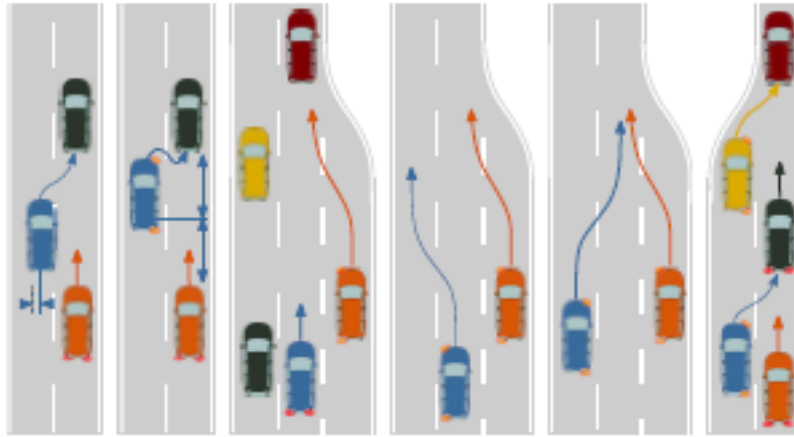
Platoon: Pelotón o Convoy ( ACC #n, CACC #n)



# Problemas de Control/ Conducción Autónoma

Maniobras con pelotones:

Partir, Concatenar, Disolver,...

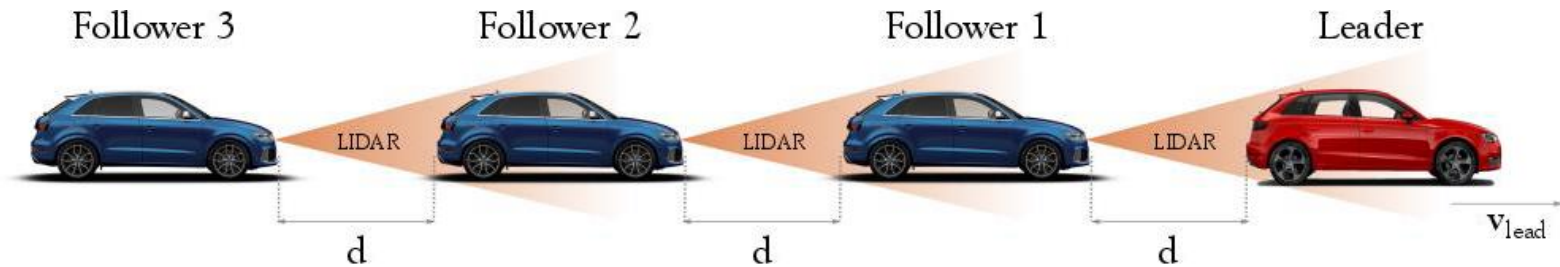


Maniobras cooperativas con control lateral (cambio carril):

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

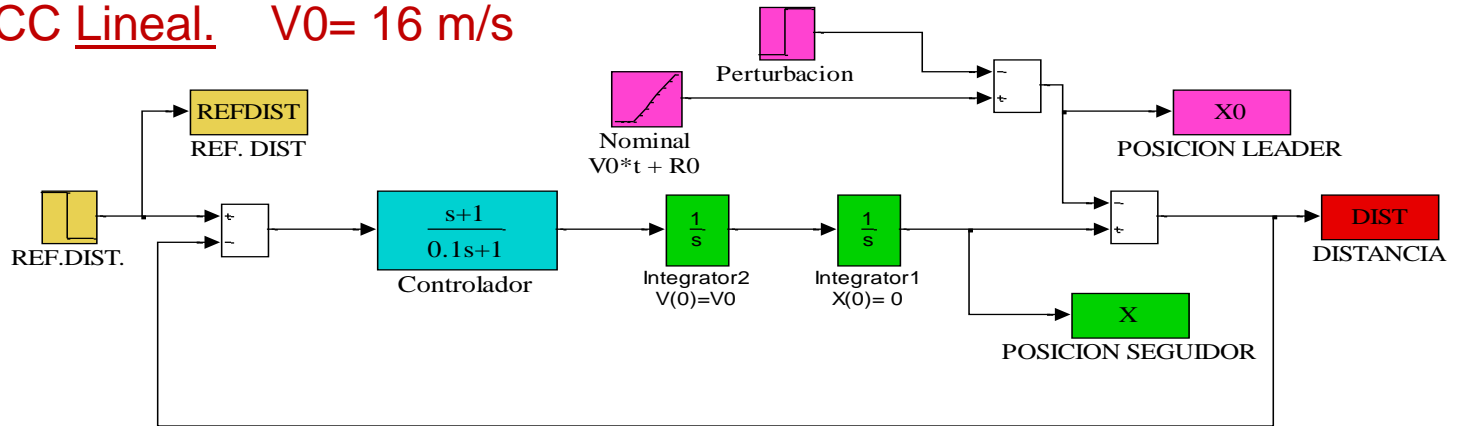
Actuación: aceleración  $u_k(t) = C[e_k(t)]$   $u_k(t) \approx a_k(t)$

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

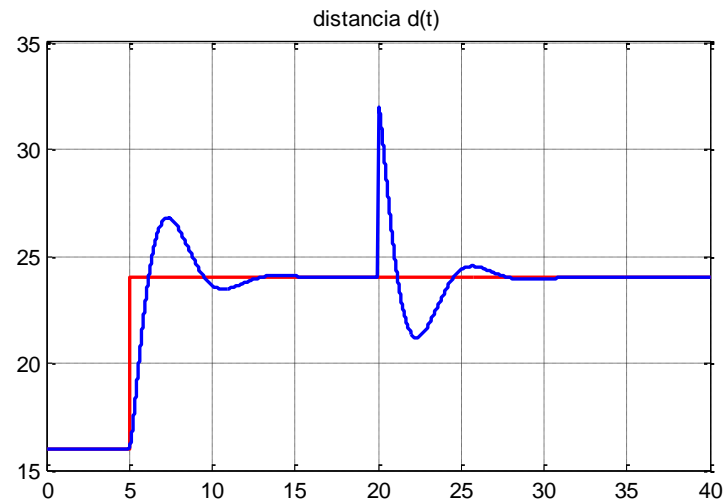
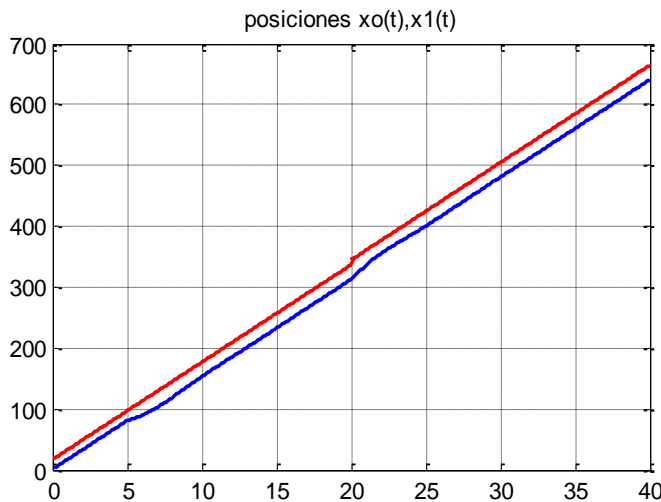


# Modelado sistema ACC

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:

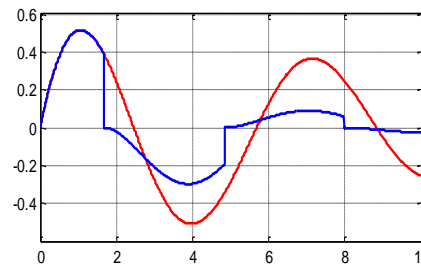
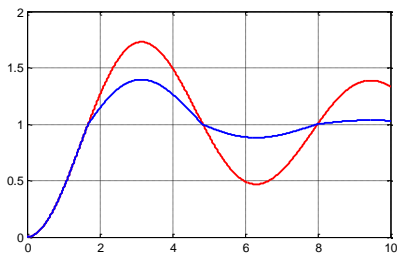
1A. Controlador base sencillo, respuesta subamortiguada

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...

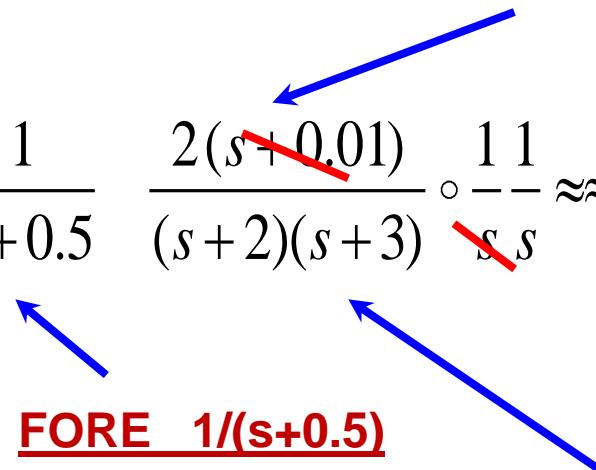


Si 2A,2B OK, diseño aceptable. Si no, volver a 1A, 2B y cambiar ajustes

## 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 ( $s+0.01$ ).

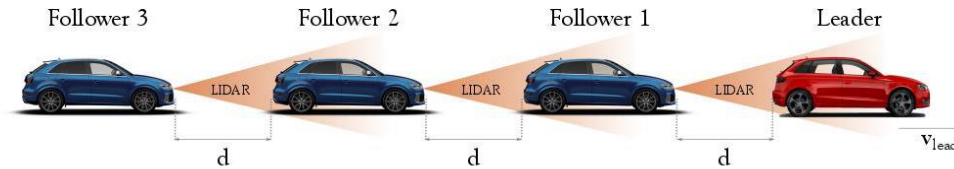
$$L(s) = C(s) \circ P(s) = \frac{1}{s+0.5} \cdot \frac{2(s+0.01)}{(s+2)(s+3)} \circ \frac{1}{s} \approx \frac{1}{s+0.5} \cdot \frac{1}{s}$$


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

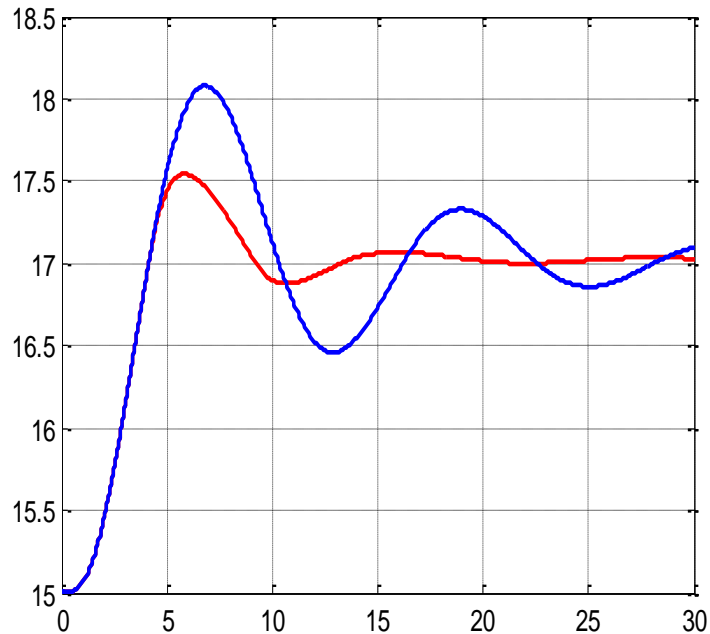
$$C = \left[ \frac{1}{s+0.5} \right]_{FORE} \circ \frac{2(s+0.01)}{(s+2)(s+3)}$$

# Diseño 1: Resultados

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

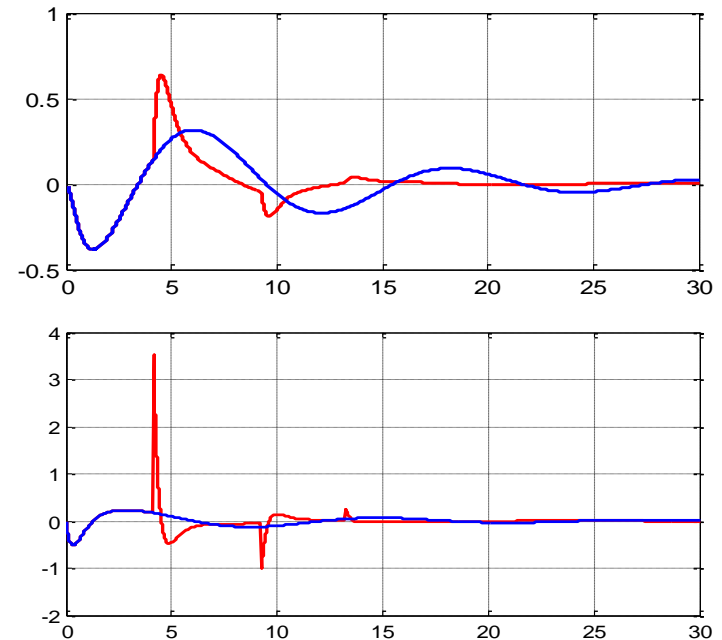


Distancia leader- primer seguidor



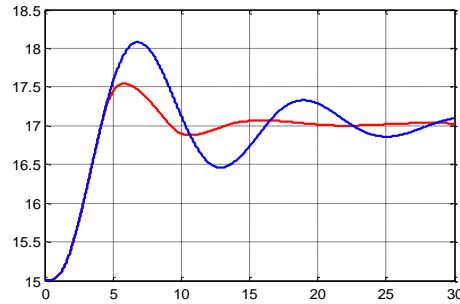
Efecto apreciable del reset  
(reducción de sobreosc.)

Aceleración y jerk



Cumple restricciones confort  
(hasta el tercer seguidor)

# Diseño 1: Cuantificación mejora

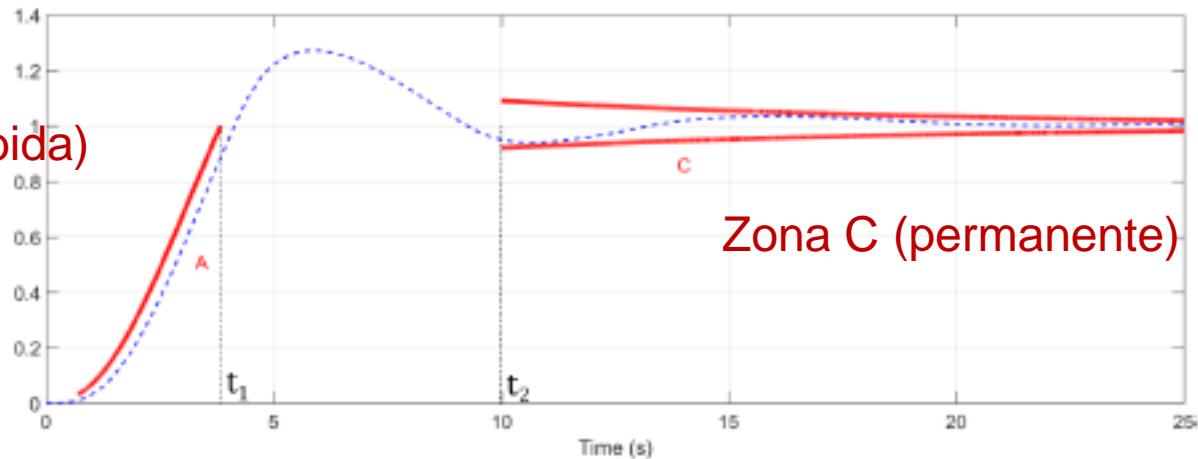


¿En qué sentido la solución reset es mejor que cualquier solución lineal?

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

Zona B (sobreosc.)

Zona A (subida)



Zona C (permanente)

Barrera A de SEGURIDAD

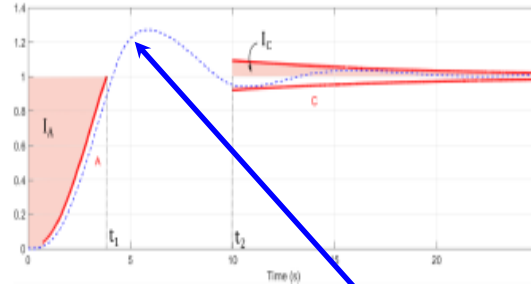
$$y(t) \leq f_a(t), \quad t \in [0, t_1]$$

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:

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

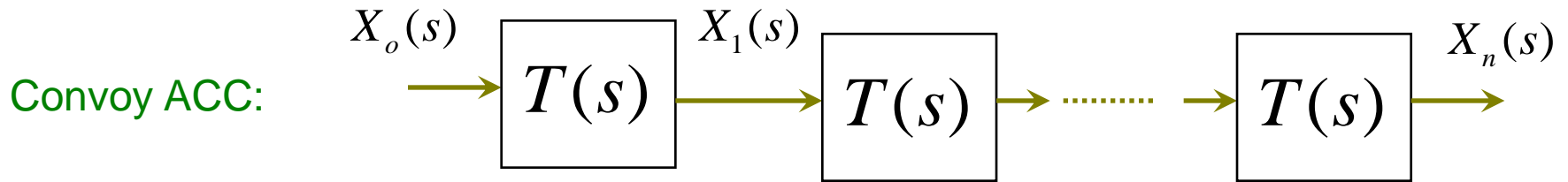
Objetivos: Seguridad (A), Precisión (C),  $AOS < AOS_{min}$   
Inalcanzables con cualquier controlador lineal

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

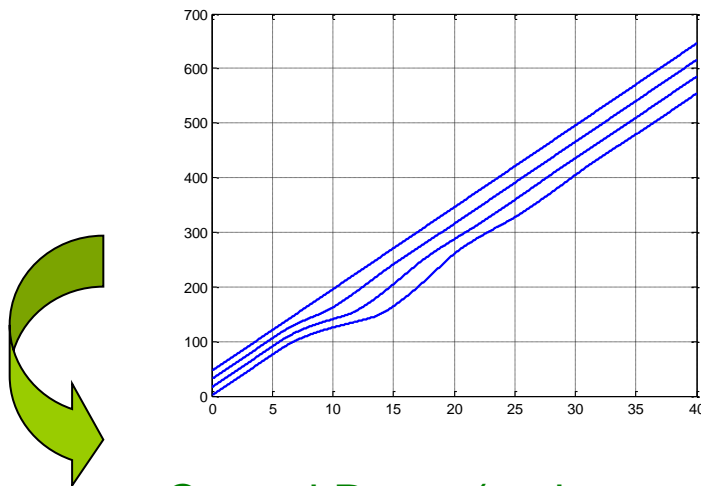
Reducción de un 50%

# PARTE III. String (in)Stability

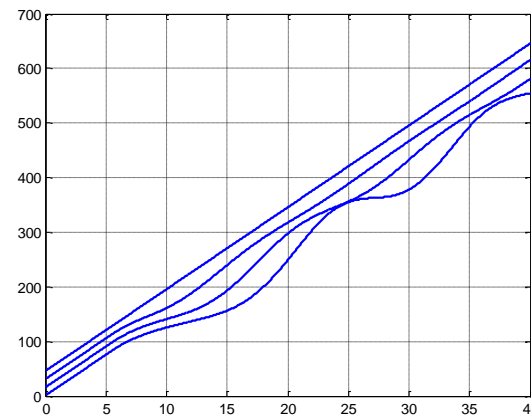


Tipo{  $L(s)$  }=2  $\Rightarrow T(s) = \frac{L(s)}{1 + L(s)}$  tiene resonancia:  $|T(j\omega_m)| = |1 + L^{-1}(j\omega_m)|^{-1} > 1$

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



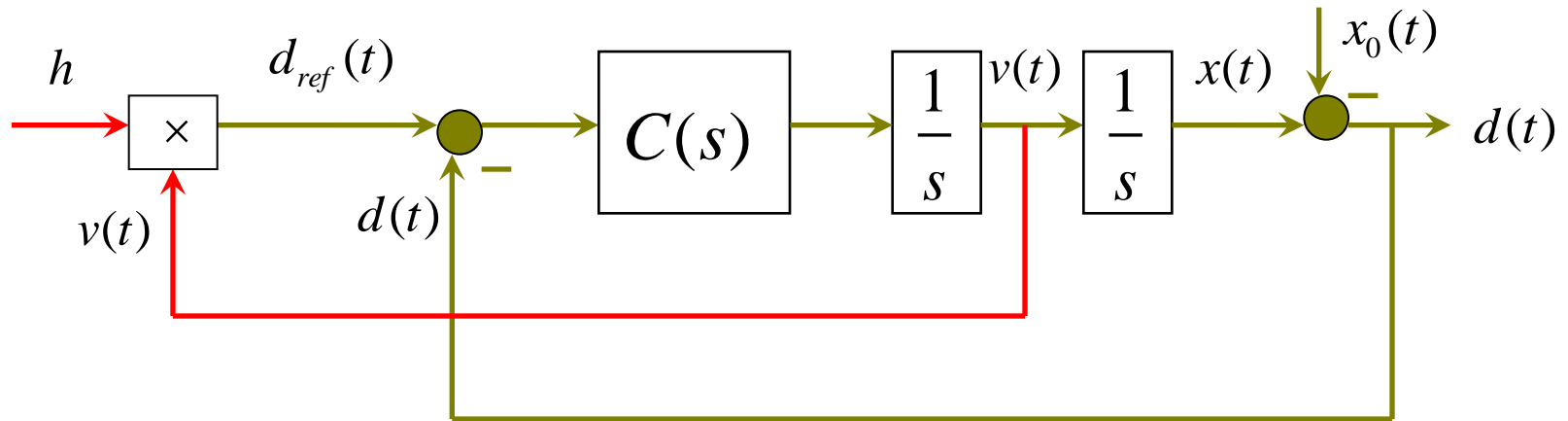
Control Reset (aminora el efecto)



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):

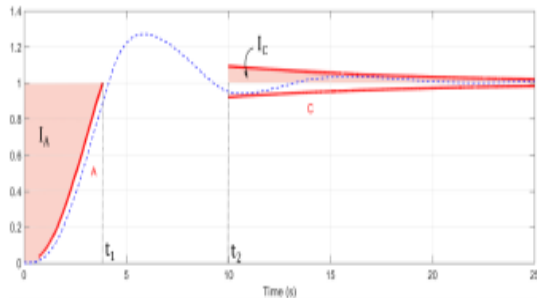
$$C(s)P(s) = \frac{1}{s+0.5} \frac{2(s+0.01)}{(s+2)(s+3)} \frac{1}{s} \frac{1}{s} \approx \frac{1}{s+0.5} \frac{1/3}{s}$$

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,  $\mu < p$

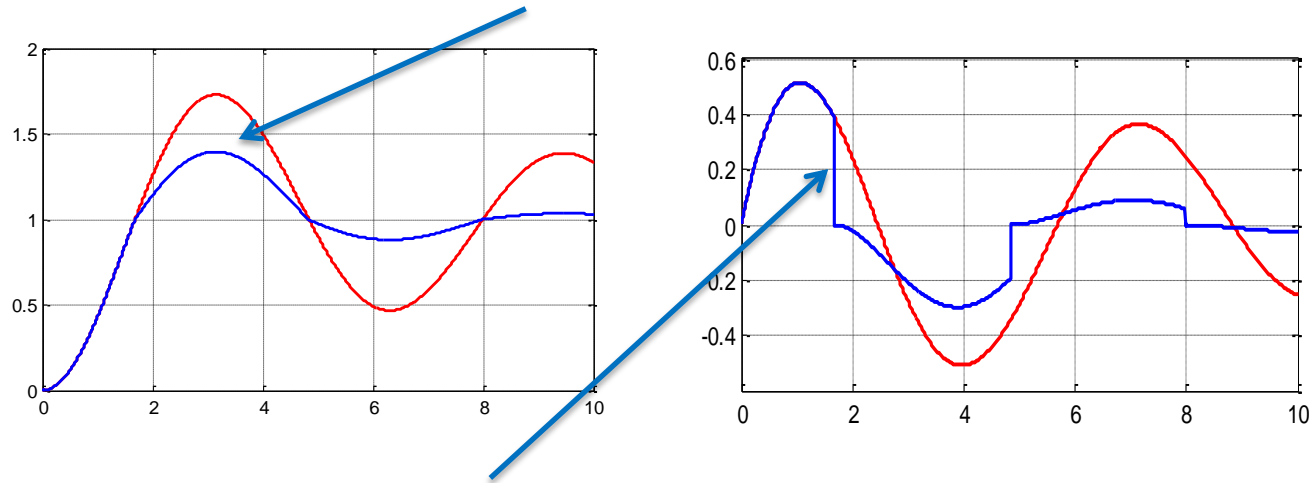


$$I_C \rightarrow \varepsilon \frac{e^{-\mu t_2}}{\mu} \rightarrow \infty \quad I_A - I_C \rightarrow 0$$

..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  $e(t)=0$

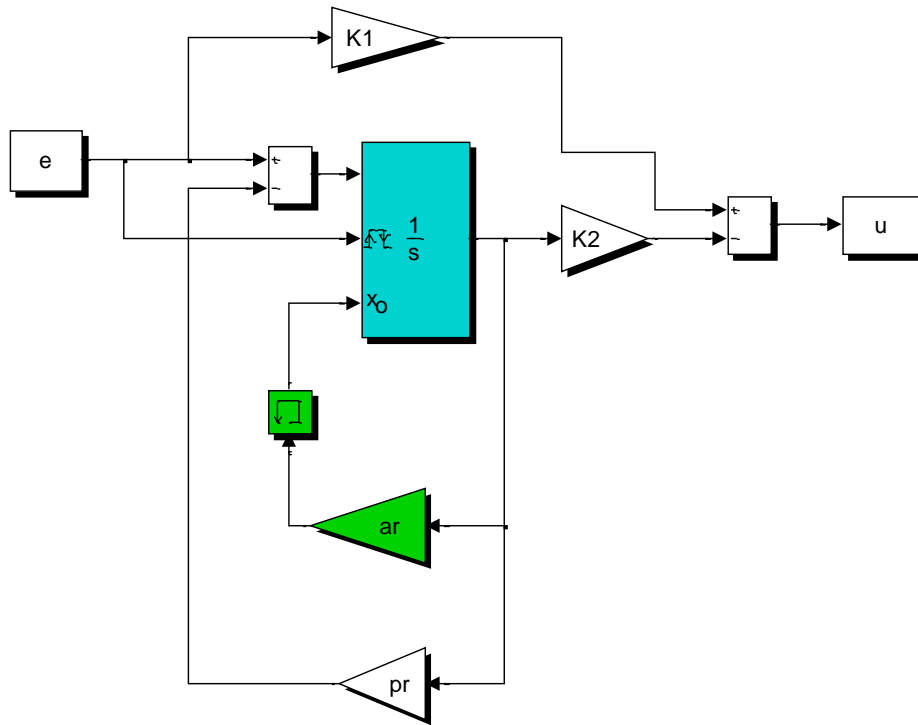
Para el caso de la planta doble integrador (sin cero lento):

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

..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)

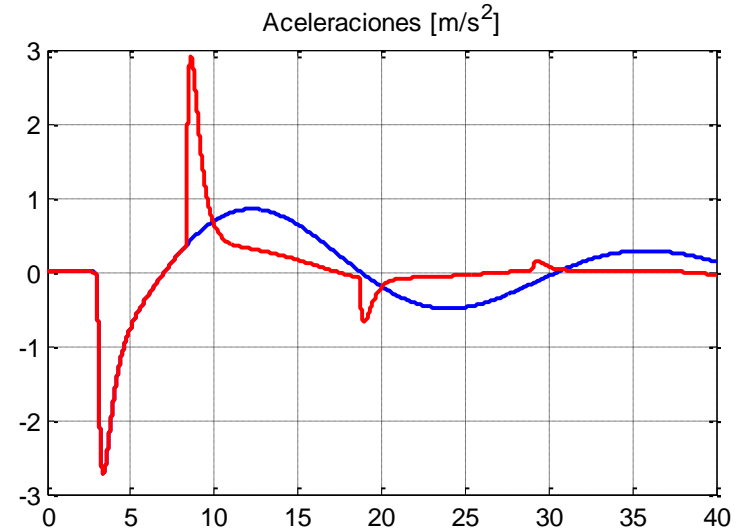
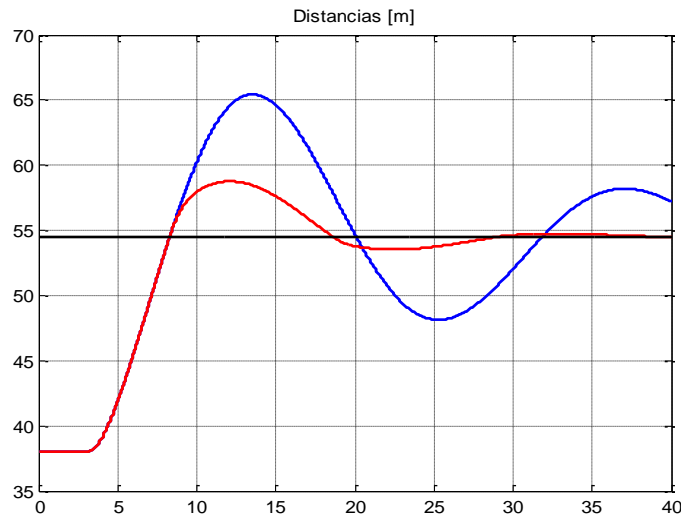
$$|a_{av}| \leq 3.5 m/s^2, \quad |j_{av}| \leq 2.5 m/s^2,$$

a\_av: promedio ventana 1s, j\_av: promedio ventana 2s

# Diseño 2: Reseteo impulsivo

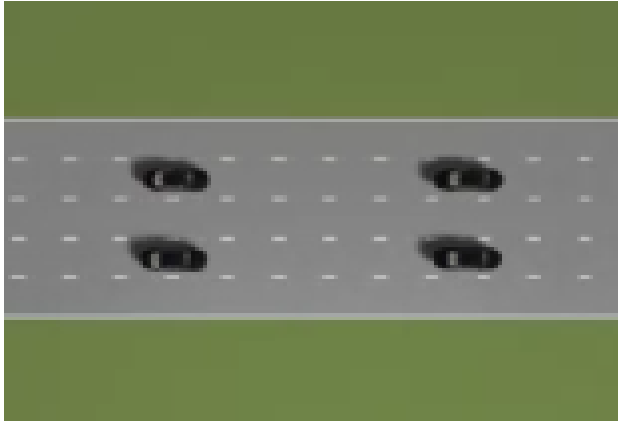
Velocidad crucero:  $v_0=33\text{m/s}$  (120km/h)

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

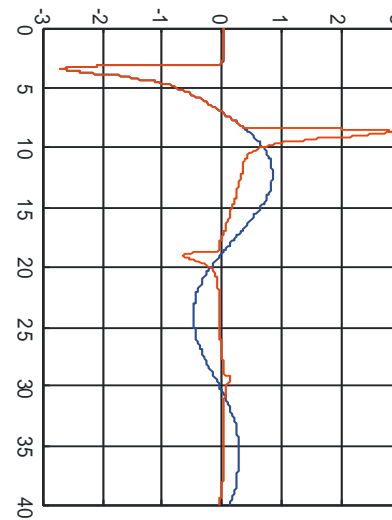
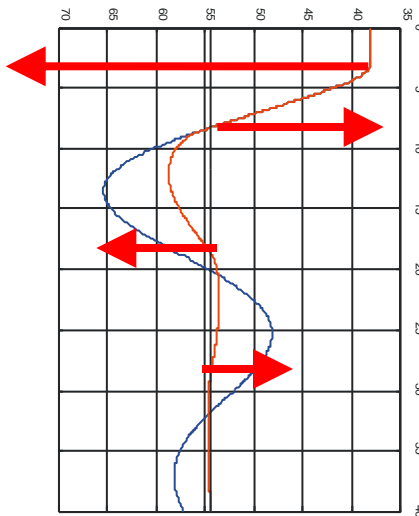


Efecto de “control por impulsos”, en lazo cerrado, con reinicio no nulo  
Mejor que cualquier control lineal, si se imponen barreras inicial y final

# 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.