

# Control basado en Reset para seguimiento de consigna en el sistema de Control de Crucero Adaptativo

Adriana Costas, Miguel Cerdeira-Corujo, Antonio Barreiro, Emma Delgado

{adcostas,mcerdeira, abarreiro, emmad}@uvigo.es

Alfonso Baños

abanos@um.es

## Resumen

*Dentro del funcionamiento del sistema de Control de Crucero Adaptativo (ACC) en modo seguidor, se explora el potencial de los controladores reseteados para obtener una mejor respuesta del sistema ante cambios en la distancia de seguridad deseada con respecto al coche delantero que el conductor puede realizar. Se han considerado dos leyes de espaciado diferentes: espaciado constante y espaciado dependiente de la velocidad.*

**Palabras clave:** Control de Crucero Adaptativo, Control basado en Reset, Limitaciones fundamentales.

## 1 Introducción

El sistema de Control de Crucero Adaptativo (ACC) no es más que una mejora del sistema de Control de Crucero (CC) estándar, el cual actúa sobre el acelerador para mantener la velocidad prefijada por el conductor [9]. En el caso del ACC se añade un sensor (normalmente radar), que mide la distancia al vehículo delantero (si existe) y se dota al sistema con una capacidad limitada de frenado, de tal manera que, si existe un coche delantero a una determinada distancia, el sistema pasará del control de velocidad al control de distancia [10]. Por tanto, el ACC se adapta a las diferentes condiciones de tráfico evitando que el conductor tenga que reactivar el sistema cada vez que se vea obligado a frenar, como sucedía con el CC. Gracias a estas características de funcionamiento, el ACC es ya considerado una herramienta indispensable en las futuras generaciones de coches inteligentes [13].

En la actualidad ya existen numerosos vehículos equipados con este sistema. La primera marca en introducir el sistema ACC fue Mitsubishi, cuyo sistema estaba basado en tecnología láser y, a diferencia de los sistemas de hoy en día, no actuaba sobre el freno, sino que lo hacía únicamente sobre el acelerador y el cambio de marchas [15]. Hoy en día, fabricantes como Audi, BMW, Jaguar o Mercedes-Benz (entre otros) dotan a algunos de

sus modelos con este sistema.

Teniendo en cuenta que para la activación del ACC el conductor debe especificar las consignas de velocidad y distancia de seguridad deseadas, y que estas pueden ser modificadas posteriormente en funcionamiento, este trabajo se centra en explorar el potencial de los controladores reseteados a la hora de adaptarse a cambios en la consigna de distancia especificados por el conductor cuando el sistema ya se encuentra funcionando en modo seguidor.

Estos controladores reseteados no son más que controladores estándar dotados con un mecanismo que resetea a cero o a un determinado porcentaje uno o varios estados del controlador, siempre que se cumpla una determinada condición. La primera aplicación existente en el estado del arte del control reseteado se publica en el trabajo de J. Clegg [7]. En él, se demuestran las ventajas del control basado en reset con respecto al control clásico. No obstante, a pesar de sus ventajas, el estudio del control reseteado fue abandonado hasta los años 70, momento en el que el grupo de investigación de Horowitz lo recuperó [11, 12]. En estos artículos se muestra cómo el control reseteado ayuda a superar limitaciones fundamentales que afectan a los sistemas lineales [1, 16]. Después de la publicación de estos artículos, el estudio del control reseteado fue abandonado de nuevo hasta los años 90, momento a partir del cual el número de grupos de investigación interesados en esta materia incrementó considerablemente. Una de las propuestas recientes más interesantes es el PI+CI [3], que combina las ventajas del controlador PI con las del integrador de Clegg. En los últimos años, el control reseteado se ha utilizado en diferentes aplicaciones tal y como se muestra en [2].

Este artículo está organizado como sigue. En la Sección 2 se presenta el planteamiento del problema. Posteriormente, en la Sección 3, se muestra la capacidad del control reseteado para superar las limitaciones fundamentales. En el apartado 4 se exponen todas las consideraciones utilizadas para el diseño del controlador. Por último, en la sección 5, se muestran los resultados de las simulaciones para finalmente presentar las conclusiones

en la sección 6.

## 2 Planteamiento del problema

Tal y como se ha expuesto anteriormente, el propósito de este trabajo es explorar el potencial del control reseteado en las situaciones en las que el conductor del vehículo decide aumentar la distancia de seguridad. Se considera que este cambio de consigna se realizará cuando el sistema ACC se encuentra trabajando en modo seguidor y en estado estacionario, es decir, el coche objeto de estudio mantiene la distancia de seguridad predefinida con respecto al coche delantero y ambos circulan a velocidad constante. Debido a que nuestro interés se centra en el control, se ha considerado un escenario sencillo con sensores ideales y en el que se considera únicamente movimiento longitudinal de manera que se facilite el entendimiento.

### 2.1 Lazo de control

El lazo de control real para el coche objeto de estudio es el que se muestra en la Fig. 1, donde  $C$  es el controlador,  $\frac{1}{\tau s+1}$  es el bloque que representa el retardo en la actuación,  $P$  es la planta del sistema (modelo dinámico del coche) y  $S$  es el sensor de distancia.

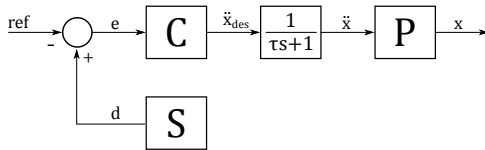


Figura 1: Lazo de control real.

De esta manera, al sistema se le dará una distancia consigna que será comparada con la distancia medida por el sensor. El error entre estos dos valores será procesado por el controlador para calcular la aceleración. No obstante, esta aceleración no será la aceleración real del coche puesto que los actuadores responden con un cierto retardo ( $\tau = 0.5$ ) a las peticiones del sistema. Este retardo se representa mediante el bloque  $\frac{1}{\tau s+1}$  cuya salida será la aceleración real del coche, que se hará efectiva mediante el modelo dinámico ( $P$ ), cuya salida será la posición.

Cabe destacar que, para poder realizar las simulaciones, ha sido necesario simular el sensor. Esto se ha realizado mediante la resta de la posición del coche objeto de estudio con respecto a la posición del coche predecesor, que viene dada por una rampa de pendiente constante (velocidad). El modelo dinámico vehicular escogido para la simulación ha sido el más sencillo posible: un doble integrador  $1/s^2$ , tal y como ya se había hecho para

simplificar el problema en [8]. Por tanto, el lazo de control para la simulación es el mostrado en la Fig. 2.

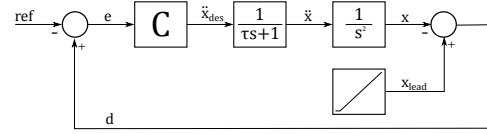


Figura 2: Lazo de control simulación.

### 2.2 Leyes de espaciado

Para llevar a cabo este trabajo se han considerado dos estrategias de espaciado diferentes. En primer lugar, se considera la ley de espaciado constante, en la que la distancia de referencia establecida por el conductor permanece invariable en el tiempo tal y como se muestra en (1), donde  $d_{ref}$  es la consigna de distancia de seguridad y  $S$  es la distancia predefinida por el conductor.

$$d_{ref} = S \quad (1)$$

En segundo lugar, se comprueba el correcto funcionamiento de nuestro sistema con la ley de espaciado dependiente de la velocidad [6], en la que la distancia de seguridad depende de la velocidad del coche objeto de estudio y se calcula mediante la ecuación (2), donde  $d_{ref}$  es la consigna de distancia de seguridad;  $h$ , el ‘headway time’ (predefinido por el conductor);  $v$ , la velocidad del coche y  $S$  un espacio adicional.

$$d_{ref} = hv + S \quad (2)$$

## 3 Control Reseteado: Superación de las limitaciones del control lineal

El objetivo de esta sección es describir brevemente el concepto de control reseteado, sus potenciales ventajas con respecto al control lineal y sus consecuencias en el problema que nos atañe. Un *controlador reseteado* con entrada  $e(t)$  y salida  $u(t)$ , viene dado por la ecuación en variables de estado  $u(t) = Cx(t)$  y (3) donde  $A_r$  es una matriz diagonal que contiene unos en las posiciones correspondientes a los estados no reseteados y ceros en las correspondientes en los (SI) reseteados.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Be(t), & \text{si } e(t) \neq 0, \\ x(t^+) &= A_r x(t), & \text{si } e(t) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

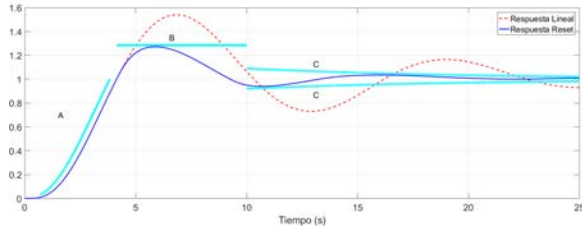


Figura 3: Respuesta ante entrada escalón de sistemas lineales y resetados.

En otras palabras, la mayor parte del tiempo se comporta como un controlador lineal pero, cuando existe un cruce por cero del error, uno o varios estados del sistema  $x(t)$  son reseteados, normalmente, a cero [2]. Por otro lado, los sistemas de control lineales están sujetos a las llamadas *limitaciones fundamentales*. En concreto, cuando el lazo abierto posee un integrador simple, se ha demostrado que para todo controlador lineal se cumple que  $\int_0^\infty e(\tau)d\tau = 1/K_v$  [4]. En nuestro caso, tal y como se ha dicho en la sección 2, el coche está modelado por dos integradores, no uno, y, por tanto, esta limitación se cumple siendo la ganancia de velocidad ahora  $K_v \rightarrow \infty$ . En resumen, por tanto, cualquier controlador lineal cumplirá la restricción siguiente:

$$\int_0^\infty e(\tau)d\tau = 0.$$

Sin embargo, para los controladores *no lineales* podría ser posible superar esta limitación. La Fig. 3 muestra la respuesta a escalón de dos sistemas de control con dos integradores en lazo abierto. La línea continua corresponde al controlador reseteado y la discontinua a su controlador base lineal (aquel que resulta de eliminar la acción de reseteo en el controlador reseteado  $x(t^+) = 0$ ).

Desde el punto de vista de la velocidad de respuesta y de sobreoscilación, en la Fig. 3 se aprecia claramente que la respuesta del controlador reseteado es mejor que la del lineal. A primera vista, se podría pensar que quizás existe otro controlador lineal (diferente del controlador base lineal) capaz de conseguir resultados similares o mejores que el controlador reseteado. Sin embargo, esto no es posible en absoluto si la respuesta del sistema debe cumplir una serie de limitaciones como las especificadas en la Fig. 3 con las líneas gruesas  $A, B, C$  tal y como se demostró para la planta de un solo integrador en [4].

La barrera  $A$  está relacionada con la suavidad de la parte inicial de la respuesta  $y(t)$ , para  $0 \leq t \leq t_1$ . En nuestro caso, vendrá dada por las especificaciones de confort y los límites físicos de la aceleración  $|\ddot{y}(t)|$  o jerk  $|\dddot{y}(t)|$ . La  $B$ , corre-

spondiente al intervalo de tiempo  $t_1 \leq t \leq t_2$ , es una limitación relacionada con la robustez del sistema que no permite que la sobreoscilación  $OS = \max_t(y(t) - 1)$  sea mayor que un determinado valor. Dado que  $y(t)$  representa la distancia intervehicular, sobreoscilaciones excesivas pondrían en compromiso la seguridad del sistema. Las barreras finales  $C$  son límites correspondientes al tiempo de establecimiento que imponen un alto ancho de banda ( $t_2$  bajo) y precisión en régimen estacionario (exponenciales rápidas).

Sin entrar en detalles, cualquier solución lineal satisface que  $\int_0^\infty e = \int_0^{t_1} e + \int_{t_1}^{t_2} e + \int_{t_2}^\infty e = 0$ . Estas integrales se corresponden con las áreas del error, es decir, las áreas comprendidas entre la curva  $y(t)$  y la entrada escalón unitario  $y = 1$ . Supongamos ahora que la solución lineal cumple las limitaciones  $A$  y  $C$ , y dejemos la barrera  $B$  sin especificar. El límite  $A$  da lugar a una integral positiva grande  $I_A$ , mientras que el dado por  $C$  puede dar lugar a una integral positiva o negativa, pero menor en valor absoluto la integral de la envolvente  $I_C$ . Dado que  $I_C \ll I_A$ , de  $0 = \int_0^\infty e$  se puede deducir que, necesariamente, en el intervalo  $t_1 \leq t \leq t_2$ , la integral del error debería ser más negativa que  $-I_A + I_C$ . En otras palabras, cualquier controlador lineal que cumpla los límites  $A$  y  $C$ , necesariamente da lugar a una *sobreoscilación media AOS* dada por (4).

$$\begin{aligned} AOS &= \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (-e(\tau)) d\tau \\ &\geq \frac{1}{t_2 - t_1} (I_A - I_C) = AOS_{min} \end{aligned} \quad (4)$$

En el caso del ACC, altos valores de  $AOS$  implicarían que, en el intervalo de tiempo  $[t_1, t_2]$ , hubiera una gran diferencia entre las distancia intervehicular real y la distancia consigna, lo que comprometería gravemente la seguridad.

En resumen, los controladores no lineales no están sujetos a las limitaciones fundamentales de los lineales. En concreto, el sistema de control reseteado mostrado en la Fig. 3 consigue responder ante un cambio cumpliendo las limitaciones  $A, B, C$ , hecho que ningún controlador lineal puede conseguir. Estos son, en pocas palabras, los beneficios de los sistemas de control reseteados y el motivo para la exploración de su potencial en el campo del ACC.

## 4 Diseño del controlador

Tal y como ya se ha dicho en la Sección 3, un controlador reseteado no es más que un controlador lineal cuyos estados, o parte de ellos, se resetean en el cruce por cero del error. Por tanto,

para diseñar un controlador reseteado, es necesario diseñar primero su controlador base lineal y posteriormente estudiar la estrategia de reseteo que se seguirá. Cabe destacar que, según [5], el controlador base lineal elegido debe hacer que la respuesta del sistema sobreoscile al menos un poco para que la acción de reseteo sea efectiva.

En el caso objeto de estudio, el diseño del controlador se ha realizado mediante métodos heurísticos. Para ello se han tenido en cuenta los límites físicos y de confort en cuanto a aceleración y jerk se refiere. Estos límites han sido tomados de la norma ISO 22179 [14] y están relacionados con la barrera A presentada en la Sección 3. Es también necesario que el tiempo de establecimiento no sea excesivo (barrera C), es decir, la sobreoscilación no se debe prolongar demasiado tiempo.

El controlador elegido es una red de adelanto cuya función de transferencia se muestra en (5). Esto es así debido a que la fase entre la salida y la actuación será aproximadamente  $0^\circ$ , haciendo que sea necesario un controlador que la aumente. Esto se puede ver fácilmente si transformamos el lazo de control de la Fig. 2 en un lazo de desviaciones teniendo en cuenta que un aumento en la distancia intervehicular puede ser pensado como una desviación del coche objeto de control con respecto a su propia trayectoria nominal (ver también Fig. 5) [8]. Así, mediante el cambio de variable mostrado en (6) se obtiene un lazo típico de control (Fig. 6). Tal y como se puede ver, la planta es  $-\frac{1}{\tau s+1} \frac{1}{s^2}$  y, por tanto, la fase será muy cercana a  $0^\circ$  y esa desviación con respecto a  $0^\circ$  será debida al bloque de retardo. También se ha tenido en cuenta que el bloque de retardo en la actuación,  $\frac{1}{\tau s+1}$ , suavizaría los valores de aceleración y jerk reales aplicados a la planta. De no existir este, sería necesario añadir otro polo en el controlador para evitar valores de jerk infinitos.

$$C(s) = \frac{0.68(s + 0.5)}{(s + 5)} = \frac{-3.06}{(s + 5)} + 0.68 \quad (5)$$

$$\begin{cases} z = x_i^{nom} - x_i \\ \dot{z} = u - \dot{x}_i \\ \ddot{z} = -\ddot{x}_i \end{cases} \quad (6)$$

En cuanto a la acción de reseteo, se puede razonar que llevar los estados a cero no funcionaría bien, en el caso de una planta tipo doble integrador, si se aplica el procedimiento usual de diseño [5]. En [5] se sugiere en una primera fase hacer una sintonía base lineal  $C(s)$  para el controlador que genere una respuesta rápida pero poco

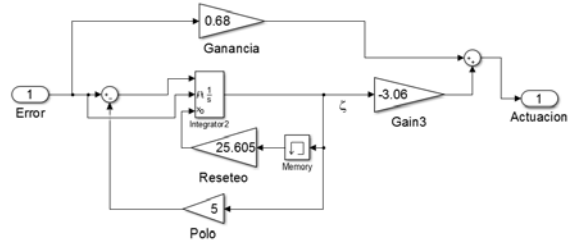


Figura 4: Esquema controlador.

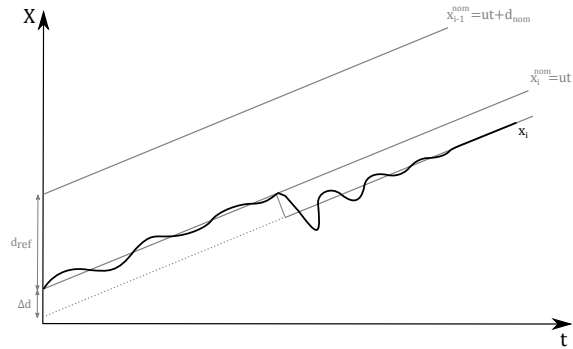


Figura 5: Trayectorias nominales.

amortiguada. Un ejemplo de dicha sintonía se encuentra en la Fig. 7a. El lazo cerrado es aproximable por un segundo orden con frecuencia  $\omega_n$  y amortiguamiento bajo ( $\xi = 0.1$  en la Fig. 7). En la segunda fase de [5] se activa, en los cruces por cero del error, un reseteo a cero del estado del controlador. Se puede razonar que en dichos instantes la acción de reseteo no produce casi ningún efecto. Para verlo, la salida del controlador se puede escribir de dos formas:

$$u(t) = K_p e(t) + C x_c(t) = -\tau \ddot{z}(t) - \dot{z}(t) \quad (7)$$

La segunda expresión es debida a la planta  $-\frac{1}{\tau s+1} \frac{1}{s^2}$ . Aplicando esta expresión, con  $\tau = 0.5$ , para la salida típica ( $z(t)$ ) en Fig. 7a, se obtiene en la Fig. 7b la salida requerida del controlador,  $u(t)$ . Se puede ver que  $u(t)$  oscila prácticamente en fase con  $z(t)$ . Como consecuencia, en los cruces por cero de  $e(t)$  (cruces por 1 de  $z(t)$ ) la señal  $u(t)$  es aproximadamente nula. Por otro lado,  $u(t) = K_p e(t) + C x_c(t)$ , por tanto en dichos cruces,

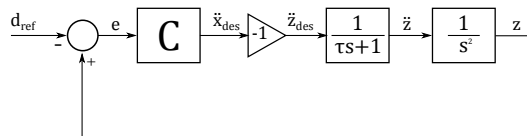
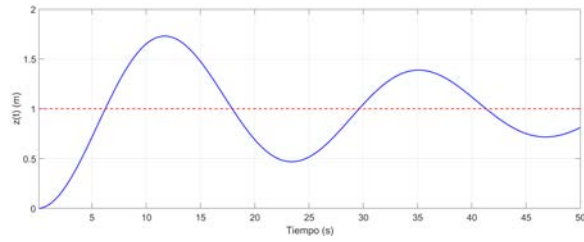
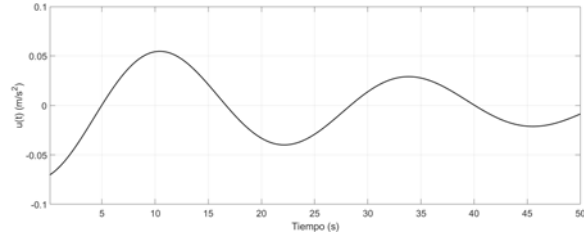


Figura 6: Lazo de control desviaciones.



(a) Distancia.



(b) Aceleración deseada.

Figura 7: Distancia y aceleración deseada sistema equivalente lineal.

de  $u = 0$ ,  $e = 0$ , se deduce que también el estado del controlador es nulo  $x_c = 0$ . Por tanto, resetear a cero un estado prácticamente nulo no cambia la respuesta reseteada con respecto a la lineal, con lo que el procedimiento usual de diseño [5] no es efectivo.

Es por ello que se ha decidido hacer un reseteo a un valor distinto de cero de tal manera que se cumpla la ecuación (8) donde  $\zeta$  es la salida del FORE (First Order Reset Element) (ver Fig. 4). Este FORE se obtiene descomponiendo la función de transferencia del controlador en fracciones simples, tal y como se muestra en (5). De igual manera que para la sintonización del controlador base lineal, el valor de reseteo se escoge heurísticamente.

$$\begin{cases} \dot{\zeta}(t) = -5\zeta(t) + e(t) & \text{si } e \neq 0 \\ \zeta(t^+) = \zeta(t^-) * 25.605 & \text{si } e = 0 \end{cases} \quad (8)$$

## 5 Simulaciones y resultados

Con el propósito de verificar la eficacia del control reseteado, se han realizado dos experimentos en Simulink en los que se comparan la respuesta del coche ante el cambio de consigna cuando este está equipado con un controlador reseteado y cuando este posee únicamente el controlador base lineal (sin reseteo). En el primero de ellos se ha considerado que el ACC trabaja con una ley de espaciado constante; mientras que en el segundo, la política utilizada es la de la distancia dependiente de la velocidad.

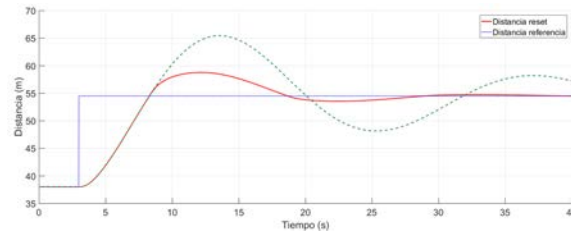


Figura 8: Seguimiento de distancia de referencia.

### 5.1 Experimento ley espaciado constante

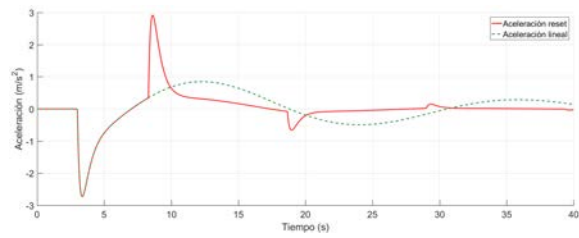
En este primer experimento se ha considerado que, inicialmente, el vehículo objeto de estudio circula a una velocidad de  $33m/s$  (máxima velocidad en autopista), al igual que su predecesor, y a una distancia de  $38m$  con respecto a este último. En un determinado instante ( $t=3s$ ), se simula que el conductor desea aumentar la distancia de seguridad en  $16.5m$ , es decir, pasar de la distancia inicial de  $38m$  a una final de  $54.5m$ .

En la Fig. 8 se muestra la evolución de las respuestas y de las distancias de referencia para sendos sistemas. Se puede apreciar claramente como el sistema reseteado responde mejor y más rápidamente ante el cambio de consigna, pues tanto la sobreoscilación como el tiempo de establecimiento se reducen considerablemente con respecto al lineal. Esto es debido a que, según lo explicado en la Sección 3, la integral del error en el caso lineal debe ser cero, hecho que se traduce en una sobreoscilación mayor.

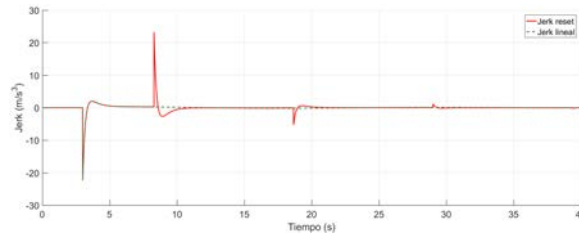
En cuanto a los valores de aceleración y jerk se han tomado como límites físicos (máximos que el coche puede dar debido a la saturación de los actuadores)  $a_{max} = 3.5m/s^2$ ,  $a_{min} = -9.8m/s^2$ ,  $J_{min} = -72m/s^3$  y  $J_{max} = 72m/s^3$ . Tal y como se puede ver en los gráficos de las Fig. 9, en el caso estudiado no se sobrepasa ninguno de estos valores y, por tanto, trabajamos dentro de las limitaciones del coche.

No obstante, según la norma ISO 22179 [14], que acota los valores de aceleración y jerk de confort, el jerk promedio calculado en intervalos de  $1s$  no debe sobrepasar el valor de  $2.5m/s^3$  cuando la velocidad del coche es mayor que  $20m/s$ ; mientras que la aceleración promedio calculada en intervalos de  $2s$  no debe superar los  $-3.5m/s^2$ . Teniendo en cuenta esto, en los gráficos de la Fig. 10 se puede observar como tanto el jerk como la aceleración promedios respetan estas limitaciones de confort.

A pesar de estos resultados, podría pensarse que a lo mejor existe un controlador lineal que alcance estos mismos resultados. Para demostrar que esto

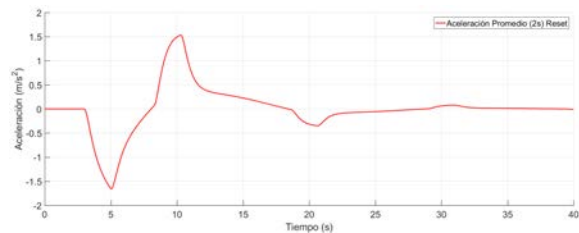


(a) Aceleración.

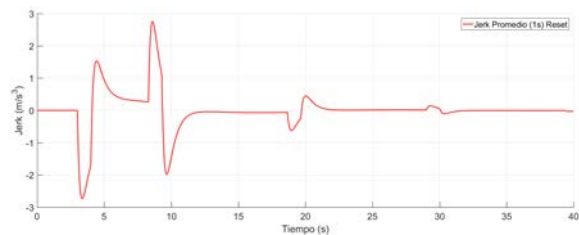


(b) Jerk.

Figura 9: Aceleración y jerk instantáneos.



(a) Aceleración promedio en 2s.



(b) Jerk promedio en 1s.

Figura 10: Promedios del sistema reseteado.

no es posible se han calculado los valores de  $AOS$  y las integrales del error para este experimento teniendo en cuenta lo explicado en la Sección 3.

Con respecto a la  $AOS$ , se han establecido limitaciones relacionadas con el tiempo de subida y el tiempo de establecimiento que la respuesta del sistema debe cumplir para no sobrepasar los límites de jerk y aceleración (ver Fig. 11). La barrera A viene dada principalmente por la limitación del jerk y la barrera C por un exponencial cuya velocidad de decrecimiento viene dada por el polo más lento del sistema.

Para comparar nuestro controlador reseteado con cualquier controlador lineal que cumple las limitaciones A y C, se han calculado los valores de  $AOS_{min}$  para los controladores lineales y la  $AOS$

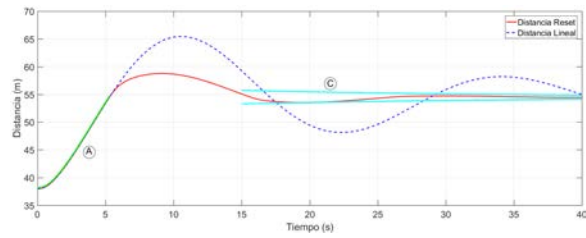


Figura 11: Barreras escogidas para el diseño del controlador.

Tabla 1: Valores de AOS y áreas

$ I_A $	$ I_C $	$AOS_{min}$	$AOS_{reset}$
51.4770	12.6471	4.0014	2.9900

Tabla 2: Valores de la integral del error

$IE_{reset}$	$IE_{lineal}$
-27.64	$0.0404 \approx 0$

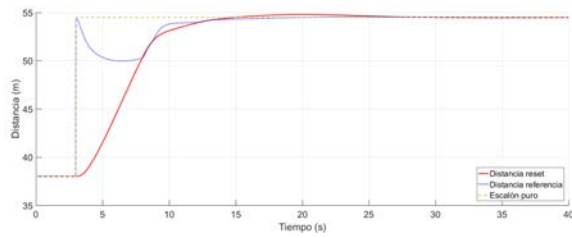
real de nuestro sistema reseteado. La  $AOS_{min}$  se calcula a través de las áreas comprendidas por las barreras especificadas (lado derecho ecuación (4)) mientras que la  $AOS$  real viene determinada por el lado izquierdo de la ecuación (4) mostrada en la Sección 3. La barrera C empieza en el instante de tiempo dado por el criterio del tiempo de establecimiento del 5%. En la Tabla 1 se pueden ver los valores de las integrales  $I_A$  e  $I_C$  y las  $AOS_{min}$  para cualquier controlador lineal que cumpla estas limitaciones, así como la  $AOS$  real para el controlador reseteado entre  $t_1$  (final de la barrera A) y  $t_2$  (inicio de la barrera C). Efectivamente se demuestra que la  $AOS_{min}$  de cualquier controlador lineal es mayor que la  $AOS$  real de nuestro sistema reseteado.

Por otro lado, para verificar que la integral del error es 0 solo en el caso del controlador lineal, se han calculado las integrales del error ejecutando la simulación durante un tiempo suficiente como para estabilizar las integral del error (140s). Así, en la Tabla 2 se puede comprobar que, efectivamente, la integral en el caso lineal tiende a cero, mientras que la integral del error con el controlador reseteado posee valores negativos.

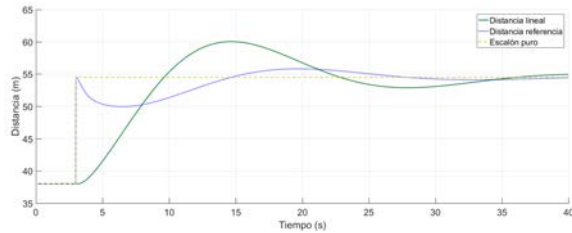
## 5.2 Experimento distancia dependiente de la velocidad

En este segundo caso se ha realizado el mismo experimento que en el apartado anterior pero aplicando la ley de distancia dependiente de la velocidad. Para ello se contempla que el conductor podrá realizar el cambio de consigna mediante la modificación del parámetro  $h$  de la ecuación (2). Al igual que en el experimento anterior, ambos





(a) Sistema reseteado.



(b) Sistema lineal.

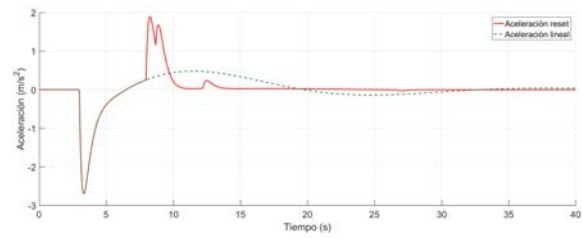
Figura 12: Seguimiento de distancia de referencia.

vehículos circulan a una velocidad de  $33\text{m/s}$  y con una distancia intervehicular de  $38\text{m}$  ( $h = 1$ ,  $S = 5$ ). En un determinado instante ( $t=3\text{s}$ ), se simula que el conductor desea aumentar la distancia de seguridad cambiando el valor de  $h$  de  $1\text{s}$  a  $1.5\text{s}$  y, por tanto, se produce un salto en la consigna de  $38\text{m}$  ( $1 \cdot 33 + 5$ ) a  $54.5\text{m}$  ( $1.5 \cdot 33 + 5$ ). Cabe destacar que lo que es un escalón puro para la  $h$  se traduce en un escalón deformado para la referencia total, debido a la ley de espaciado utilizada ( $d_{ref} = hv + S$ ). Así, cuando se produzca el cambio, el coche frenará para aumentar la distancia intervehicular, reduciendo así su velocidad y, por tanto, también la consigna de distancia. No obstante, esto solo tiene lugar en un pequeño transitorio ya que en régimen permanente la referencia se mantiene constante en su valor final (como en el escalón puro).

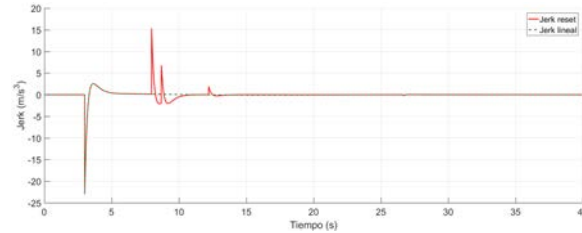
En la Fig. 12 se muestra la evolución de las respuestas y de la distancia de referencia para sendos sistemas. Se puede apreciar claramente cómo el sistema reseteado responde mejor y más rápidamente ante el cambio de consigna, llegando casi a seguir de manera perfecta la referencia. No es así en el caso lineal, en el que se observa una sobreoscilación y un tiempo de establecimiento bastante mayor. Esto es debido a que, según lo explicado en la Sección 3, la integral del error en el caso lineal debe ser cero (también se cumple para el escalón deformado).

Al igual que en el caso anterior tanto los valores instantáneos como promedio de la aceleración y el jerk respetan las limitaciones (Fig. 13 y Fig. 14)

En resumen, al igual que en el caso de la ley de espaciado constante, se observa una gran mejoría de la respuesta del sistema, haciendo que esta sea

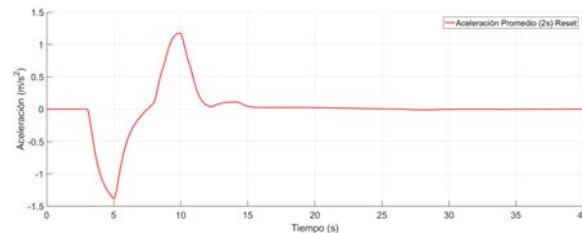


(a) Aceleración.

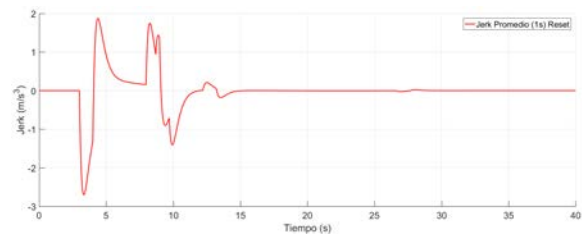


(b) Jerk.

Figura 13: Aceleración y jerk instantáneos.



(a) Aceleración promedio en 2s.



(b) Jerk promedio en 1s.

Figura 14: Promedios del sistema reseteado.

más rápida y tenga menor sobreoscilación.

## 6 Conclusiones

El objetivo de este trabajo ha sido explorar el potencial del control reseteado en el caso en el que un coche, con el control de crucero adaptativo activo y en modo seguidor, debe adaptarse a una nueva consigna de distancia de seguridad establecida por el conductor del vehículo. Para llevar a cabo esta tarea, se ha considerado un escenario idealizado y un modelo dinámico sencillo para centrar el estudio en el control reseteado. En estas condiciones, el control reseteado le permite al vehículo adaptarse de manera más rápida al cambio solicitado por el conductor, tanto para el caso de la ley de espaciado constante como para el dependiente de

la velocidad, respetando siempre las limitaciones tanto físicas como de confort (establecidas en la norma 22179). Los resultados obtenidos prueban la eficacia del control reseteado, con el que se obtiene una menor sobreoscilación (prácticamente nula en el caso de la distancia dependiente de la velocidad) que en el caso lineal para el mismo tiempo de subida.

### Agradecimientos

Este trabajo está financiado por MCINN, España, proyecto DPI2013-47100-C2-P.

### Referencias

- [1] Karl Johan Åström. Limitations on control system performance. *European Journal of Control*, 6(1):2–20, 2000.
- [2] Alfonso Baños and Antonio Barreiro. *Reset control systems*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [3] Alfonso Baños and Angel Vidal. Design of reset control systems: the PI+CI compensator. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 134(5):051003, 2012.
- [4] O Beker, CV Hollot, Y Chait, et al. Plant with integrator: An example of reset control overcoming limitations of linear feedback. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(11):1797–1799, 2001.
- [5] Yossi Chait and CV Hollot. On horowitz's contributions to reset control. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 12(4):335–355, 2002.
- [6] CC Chien and P Ioannou. Automatic vehicle-following. In *American Control Conference, 1992*, pages 1748–1752. IEEE, 1992.
- [7] JC Clegg. A nonlinear integrator for servomechanisms. *American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry, Transactions of the*, 77(1):41–42, 1958.
- [8] A Costas, Miguel Cerdeira-Corujo, A Barreiro, E Delgado, and A Baños. Car platooning reconfiguration applying reset control techniques. In *21st IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 2016.
- [9] Anouck R Girard, Stephen Spry, and J Karl Hedrick. Intelligent cruise control applications: Real-time embedded hybrid control software. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 12(1):22–28, 2005.
- [10] PR Haney and MJ Richardson. Adaptive cruise control, system optimisation and development for motor vehicles. *Journal of Navigation*, 53(01):42–47, 2000.
- [11] Isaac Horowitz. Quantitative feedback theory. In *Control Theory and Applications, IEE Proceedings D*, volume 129, pages 215–226. IET, 1982.
- [12] Isaac Horowitz and Patrick Rosenbaum. Non-linear design for cost of feedback reduction in systems with large parameter uncertainty. *International Journal of Control*, 21(6):977–1001, 1975.
- [13] Petros Ioannou. Guest editorial adaptive cruise control systems special issue. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 4(3):113–114, 2003.
- [14] ISO. Intelligent transport systems - Full speed range adaptive cruise control (FSRA) systems - Performance requirements and test procedures. ISO 22179:2009, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2009.
- [15] José E Naranjo, Carlos González, Jesús Reviejo, Ricardo García, and Teresa De Pedro. Adaptive fuzzy control for inter-vehicle gap keeping. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 4(3):132–142, 2003.
- [16] Maria M Seron, Julio H Braslavsky, and Graham C Goodwin. *Fundamental limitations in filtering and control*. Springer Science & Business Media, 2012.