

# Speed Control of a Magnetic Accelerator using Adaptive Control Techniques

Javier Blanco Rico, Basil Mohammed Al-Hadithi and Roberto Gonzalez Herranz

**Abstract**—Advanced control algorithms are of great interest in control engineering, they make it possible to guarantee the correct operation of complex systems and improve their performance under adverse operating conditions, thanks to negative output feedback. In this work, two adaptive control algorithms are shown: controllers based on Gain Scheduling and Direct Self-Tuning Regulators, using them to control the velocity of an electromagnetic accelerator and comparing their results with those obtained by a classic PID regulator when the system is operated under adverse operating conditions (setpoint changes, load changes and noise resistance). It shows how this type of regulators can exceed the performance of classical control algorithms, making them a very attractive alternative for digital systems based on microcontrollers, whose high processing capacity allows them to be easily implemented in a wide variety of processes, including nonlinear dynamical systems.

**Index Terms**—Adaptation models, Adaptive algorithms, Automatic control, Control engineering, Digital control, Negative feedback, Nonlinear dynamical systems, Output feedback, Programmable control, Regulators, Velocity control

## I. INTRODUCCIÓN

La automatización es un área en auge gracias al desarrollo tecnológico, ya que los microcontroladores modernos posibilitan su implementación en casi cualquier sistema, proporcionando una capacidad de procesamiento que permite utilizar control para mejorar el rendimiento y la seguridad de los procesos, en la industria [1], [2] y en otras áreas como la medicina [3]. En la actualidad la automática nos proporciona gran cantidad de estrategias de control, entre las que encontramos los reguladores adaptativos; de gran interés por su versatilidad para adaptarse a sistemas complejos y gran variedad de condiciones de funcionamiento: desde aplicaciones tradicionales como el control de motores [4], al de fuentes de alimentación [5], [6] o hasta aplicaciones extremas como el control de vuelos supersónicos [7].

Este trabajo presenta dos estrategias de control adaptativo: *Tabla de Ganancias* y *Regulador Autoajutable*, realizando control de velocidad sobre un acelerador magnético y compara

J. B. Rico, is with the School of Industrial Design and Engineering, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain (e-mail: javier.blancori@gmail.com).

B. M. Al Hadithi, is with the Intelligent Control Group, Universidad Politécnica de Madrid, Centre for Automation and Robotics UPM-CSIC. He is also with the School of Industrial Design and Engineering, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain (e-mail: basil.alhadithi@upm.es).

R. G. Herranz is with the School of Industrial Design and Engineering, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain (e-mail: roberto.gonzalez@upm.es).

sus resultados con un regulador PID. El apartado II presenta el sistema físico sobre el que se realizaron las pruebas. El apartado III explica los algoritmos, el apartado IV analiza la necesidad de controlar el sistema y el V muestra su implementación. El apartado VI muestra las pruebas realizadas y el VII resume las conclusiones obtenidas.

## II. SISTEMA FÍSICO

Este proyecto utiliza un acelerador ferromagnético de bobinas (Fig. 1). La aplicación directa de esta tecnología es el lanzamiento de proyectiles [8], pero existen otras aplicaciones [9] y ve desarrollo en campos como la medicina [10] o el control de nadadores [11]. En este proyecto se emplea como modelo a pequeña escala de un motor de inducción lineal, como los utilizados en trenes de levitación magnética [12].

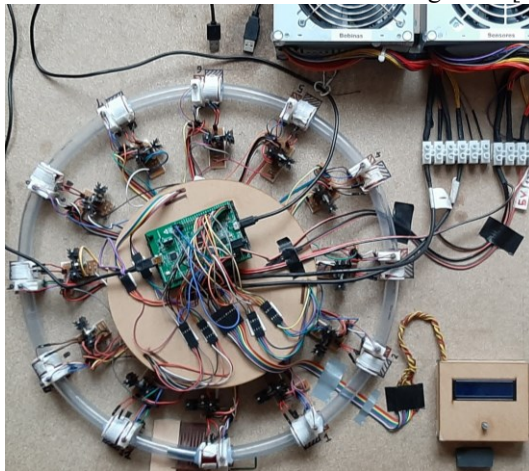


Fig. 1. Vista general del Sistema físico.

El cuerpo principal del sistema es un anillo formado por un tubo de PVC transparente, de 1,6cm de diámetro exterior (1,2cm de diámetro interior) y una longitud total aproximada de 130cm, por cuyo interior se desplaza un cilindro de acero de 8mm de diámetro, 3,3cm de largo y 13g de masa.

### A. Circuitos de Potencia

Las 12 bobinas del sistema tienen una longitud de 2,1cm con 100 vueltas de cable de cobre esmaltado de 0,7mm de diámetro, presentando una impedancia de  $0,3\Omega$  y  $175,31\mu\text{H}$ . Se controlan con transistores en cascada (Fig. 2), permitiendo al microcontrolador regular la corriente de las bobinas mediante modulación de ancho de pulso (PWM) de 3,3v.

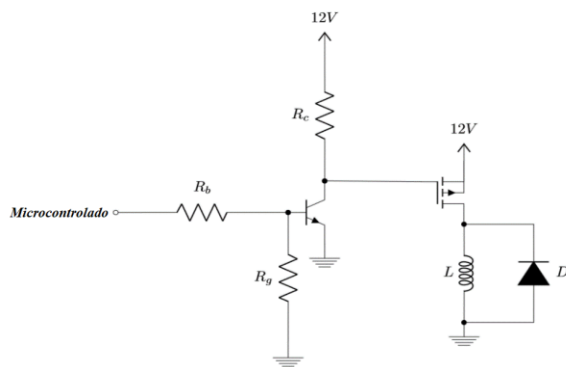


Fig. 2. Circuito de potencia para alimentar las bobinas.

### B. Sensores

Los sensores ópticos que detectan la posición de la bala están formados por un diodo láser y un fototransistor, (Fig. 3) proporcionando una medida de 0v o 5v en función de la presencia o no del móvil.

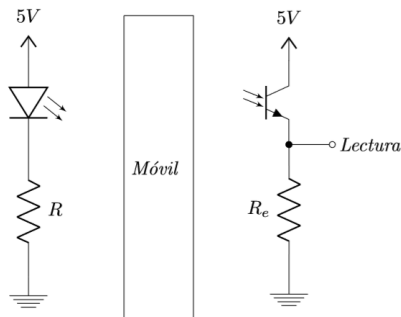


Fig. 3. Circuito sensor para detectar la posición de la bala.

### C. Sistema de Alimentación

Para alimentar el sistema se utilizan 2 fuentes de alimentación ATX de 500W. En sistemas a mayor escala es común utilizar bancos de condensadores [8] que proporcionan mayor potencia instantánea a las bobinas, pero como este sistema trabaja a velocidades relativamente bajas las fuentes ATX son lo bastante rápidas y simplifican la alimentación.

### D. Microcontrolador

El sistema utiliza un microcontrolador STM32; de la familia de microprocesadores Cortex M4 de ARM. Se ha elegido por su fácil programación (con librerías HAL de ARM) y por tener suficientes líneas de interrupción y temporizadores para controlar el sistema. En particular el montaje utiliza la placa de prototipado STM32F407 de ST Microelectronics.

## III. DISEÑO DE LA ARQUITECTURA DE CONTROL

El objetivo es conseguir control de velocidad y comparar los algoritmos adaptativos *Tabla de Ganancias* y *Regulador Autoajustable Directo* con un regulador clásico PID.

### A. PID

El PID se ha elegido como modelo de referencia por ser el regulador clásico más extendido en la industria. Es tal su versatilidad que se utiliza habitualmente como base para algoritmos adaptativos; algunos ejemplos son [13] o [14].

Se ha utilizado una estructura PI-D (Fig. 4) para evitar la

“patada en la consigna” que produce la acción diferencial, discretizada mediante la transformación bilineal, con un filtro paso bajo para evitar amplificar ruido y un sistema anti-windup por software en la acción integral.

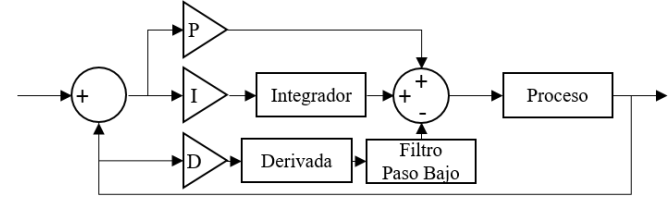


Fig. 4. Esquema del regulador PID implementado.

### B. Tabla de Ganancias

Los controladores basados en tabla de ganancias son los reguladores adaptativos más simples. Se basan en tener múltiples modelos correspondientes a diferentes condiciones de funcionamiento del sistema [15]. En la etapa de diseño se ajusta el algoritmo de control para cada modelo, de forma que durante su uso se midan las condiciones de funcionamiento y se seleccionen los parámetros que mejor se adapten a ellas (Fig. 5); algunos ejemplos pueden verse en [16].

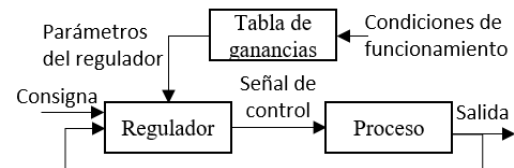


Fig. 5. Diagrama de bloques de un regulador con Tabla de Ganancias.

Existen variantes del algoritmo que incorporan estrategias adicionales, como control robusto [17] o borroso [18], pero hay consideraciones a tener en cuenta a la hora de implementar este tipo de reguladores [19]; la más importante es asegurar que la transición entre modelos no desestabilice el sistema. En la práctica se evitan cambios bruscos de ganancias imponiendo cambios mediante funciones predefinidas.

Este tipo de reguladores son relativamente fáciles de implementar, siendo su principal inconveniente el diseño, al necesitar conocer en detalle el comportamiento del sistema y sus condiciones de funcionamiento para diseñar el regulador para todas ellas. Sin embargo, pueden ser capaces de controlar sistemas fuertemente no lineales [20]; como procesos de control del pH [21], o en condiciones de funcionamiento extremas, como saturación de las entradas [22]. Un sistema en el que destaca el empleo de este tipo de reguladores son los pilotos automáticos de aviones [23], donde el comportamiento de la aeronave está ligado a factores como la altitud o velocidad, con un comportamiento predecible, probando su validez para controlar vehículos autónomos [24], [25] y [26].

Este trabajo utiliza un regulador PI con tabla de ganancias condicionada a la velocidad objetivo del móvil. Esto mostrará cómo un regulador adaptativo, aunque simple (PI frente al PID de referencia), es capaz de mejorar el comportamiento del sistema frente a uno clásico.

### C. Regulador Autoajustable Directo

Los reguladores autoajustables son reguladores adaptativos avanzados que generan un modelo del sistema para ajustar el

algoritmo de control mediante una realimentación adicional en la que rediseñar los parámetros del regulador (Fig. 6).

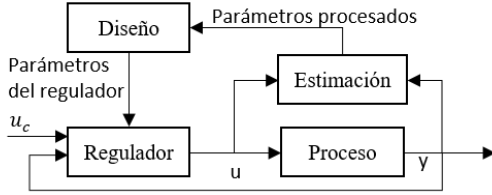


Fig. 6. Diagrama de bloques de un Regulador Autoajustable.

Teóricamente realizan el mismo trabajo que un humano: con un comportamiento objetivo, obtienen un modelo matemático del proceso con el que diseñan los parámetros del regulador. Esto presenta dos ventajas: no es necesario conocer en profundidad el comportamiento del sistema, sólo el algoritmo de diseño que permita obtener el regulador, y como modelan el proceso constantemente no importa que este cambie, siempre se utilizarán los mejores parámetros para intentar obtener el comportamiento deseado. Esto los hace algoritmos muy potentes, con buena estabilidad y capaces de controlar gran variedad de sistemas independientemente de la planta; como controles de posición [27], estabilidad [28] o sistemas de distribución [29], pero también sistemas complejos como con múltiples entradas y salidas [30]. Su principal inconveniente es la capacidad de cálculo necesaria para su implementación, haciendo que en aplicaciones simples otros algoritmos puedan obtener respuestas más rápidas [31].

Se diferencian 2 tipos de reguladores autoajustables: Los indirectos (o explícitos) trabajan como lo haría un humano, primero obtienen el modelo del proceso y después diseñan el regulador. Esto impone dificultades, ya que características como ceros y polos comunes han de tenerse en cuenta antes del diseño, dificultando la convergencia del algoritmo al aumentar los cálculos necesarios. Los algoritmos directos (o implícitos) solucionan este problema unificando las etapas de diseño y estimación, haciendo que el algoritmo estime directamente los parámetros de la ecuación de diseño en función del comportamiento del proceso. Ambos métodos son implementables [32], pero salvo que sea de interés obtener el modelo del sistema para otra aplicación es preferible la implementación directa.

Este trabajo utiliza el *Regulador Autoajustable Directo* propuesto por K. J. Åström y B. Witternmark en su libro “*Adaptive Control*” [33], utilizando un algoritmo basado en mínimos cuadrados recursivos y asignación directa de polos como ley de control. Se trata de un algoritmo probado, con buena estabilidad y convergencia [34].

La asignación directa de polos permite de forma simple; configurando tres funciones de transferencia (Fig. 7); tener un control total sobre la respuesta del sistema.

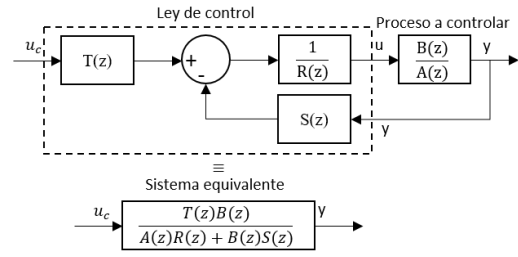


Fig. 7. Diagrama de bloques del algoritmo de Asignación Directa de Polos.

El sistema completo propuesto en [33] puede verse en la Fig. 8, donde  $G_{aa}$  es el filtro antialiasing,  $G_{pf}$  el filtro post-muestreo y  $H_f$  un filtro paso banda para eliminar efectos externos antes del modelado del sistema.

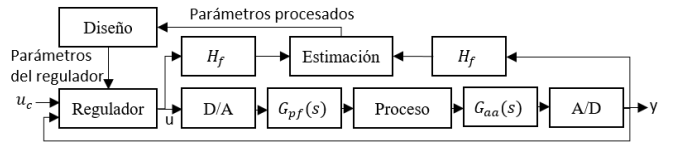


Fig. 8. Diagrama de bloques del Regulador Autoajustable Directo propuesto por Åström.

La ley para estimar los parámetros del regulador es (1) y la ley de control es (2) (ecuaciones expresadas en el dominio discreto con transformada  $z$ ).

$$y(t+d) - \frac{A_0(1)A_m(1)}{A_0^*(z^{-1})A_m^*(z^{-1})}y(t) = \mathcal{R}^*(z^{-1})\frac{1-z^{-1}}{A_0^*(z^{-1})A_m^*(z^{-1})}u(t-1) + \mathcal{S}^*(z^{-1})\frac{1-z^{-1}}{A_0^*(z^{-1})A_m^*(z^{-1})}y(t) \quad (1)$$

$$A_0^*(z^{-1})(v(t) - A_m(1)u_c(t)) = -A_0(1)A_m(1)y(t) - \mathcal{S}^*(z^{-1})(y(t) - y(t-1)) - \mathcal{R}^*(z^{-1})(u(t-2) - u(t-1)) + A_0^*(z^{-1})u(t-1) \quad (2)$$

Dónde:

$u(t)$ : Señal de control introducida en el ciclo  $t$ .

$y(t)$ : Señal de salida del sistema en el ciclo  $t$ .

$\frac{A_m(1)}{A_m^*(z^{-1})}$ : Función de transferencia objetivo del sistema.

$A_m(1)$  codifica los ceros y  $A_m^*(z^{-1})$  los polos.

$\frac{A_0(1)}{A_0^*(z^{-1})}$ : Función de transferencia del observador del sistema. Sus polos, codificados en  $A_0^*(z^{-1})$ , deben ser más rápidos que los del sistema para garantizar la convergencia.

$\mathcal{R}^*(z^{-1})$  y  $\mathcal{S}^*(z^{-1})$ : Parámetros del algoritmo de asignación directa de polos (Fig. 7).

$v(t)$ : Señal de control calculada en el ciclo  $t$ .  $u(t)$  será esta señal saturada según los límites del sistema.

#### IV. ANÁLISIS Y MODELADO DEL SISTEMA

##### A. No Linealidades

Analizando el sistema, vemos las siguientes no linealidades: Primero, el propio funcionamiento: El control de corriente

mediante PWM no tiene una relación lineal entre el ciclo de trabajo y la corriente eficaz, por lo que cambios en la señal de control a diferentes velocidades no tendrán el mismo efecto.

Segundo, la naturaleza magnética del sistema: Las bobinas están espaciadas, haciendo que el campo magnético en el móvil varíe y que la aceleración no sea constante.

Por último, las no linealidades propias de los componentes reales, donde destacan las bobinas: Al funcionar como electroimanes se calientan, haciendo que su comportamiento varíe. La Fig. 9 muestra la relación entre el tiempo activo del PWM y la velocidad del móvil en diferentes pruebas con diferentes niveles de calentamiento, mostrando que no existe una relación directa entre el PWM y la velocidad. Esto sirve de ejemplo sobre cómo un sistema puede cambiar su comportamiento con el tiempo y por tanto beneficiarse de control adaptativo. En cualquier caso, las pruebas que se realizan en el sistema se limitan en duración para minimizar los efectos del calentamiento.

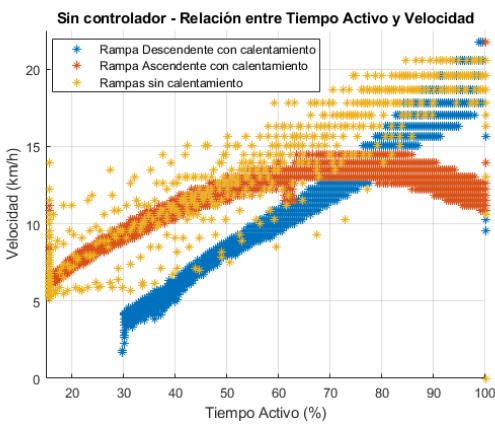


Fig. 9. Relación entre Tiempo Activo y Velocidad.

Hay que destacar que el sistema funciona con un tiempo de muestreo no constante, ya que se llama al regulador cada vez que el móvil pasa una bobina. Por tanto, el tiempo de muestreo será mayor a velocidades bajas que a lentas, variando aproximadamente entre 24 y 56 ms.

### B. Modelado del Sistema

La Fig. 10 muestra un ejemplo de la respuesta del sistema ante una entrada escalón. Pese a las no linealidades presentadas en el apartado anterior, la respuesta escalón se asemeja mucho a la de un sistema lineal de primer orden, así que para diseñar los reguladores se han utilizado sistemas equivalentes obtenidos por aproximación de mínimos cuadrados. Estos modelos no se adecuarán a todo el rango de funcionamiento del sistema, por lo que se elegirán puntos de trabajo estratégicos para hacer un ajuste preliminar del regulador y después se verificarán (y si fuera necesario retocarán) en el sistema real.

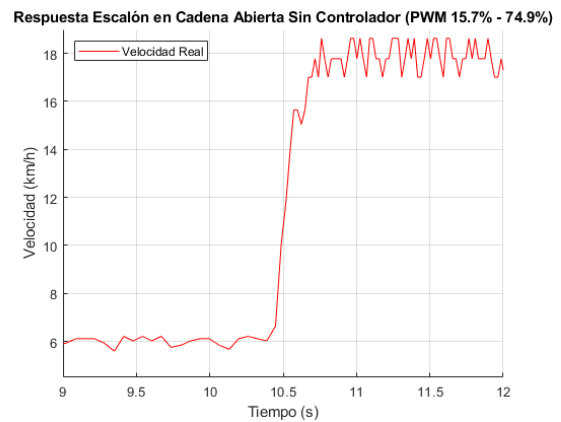


Fig. 10. Respuesta de la maqueta a un escalón sin controlador.

Como el sistema funciona a velocidades entre 6km/h y 20km/h para ajustar la Tabla de Ganancias se ha modelado el sistema en 5 puntos de funcionamiento, con velocidades 6, 10, 13, 16 y 20 km/h, interpolando las ganancias para puntos de funcionamiento intermedios. El PID se modeló a 12km/h.

## V. IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE CONTROL

Los reguladores se han ajustado utilizando las señales básicas de control: escalón y rampa.

Las gráficas que se utilizan a continuación muestran datos reales de funcionamiento del sistema pasados por un filtro Butterworth Paso Bajo de orden 3, para eliminar el ruido.

### A. PID

El PID se ajustó inicialmente utilizando un método de asignación directa de polos, seleccionando las ganancias para que la función de transferencia final del sistema sea una determinada. Se impuso una respuesta sobreamortiguada con tiempo de establecimiento objetivo de 1s, sabiendo que el sistema real será considerablemente más lento.

Tras verificar su funcionamiento, en el sistema físico las ganancias del PID son:

$$K_p = 16 \quad K_i = 30 \quad K_d = 1,25$$

Con estas ganancias, el PID consigue un tiempo de establecimiento de 2,3s (Fig. 11) y 0,3km/h de error en la rampa (Fig. 12).

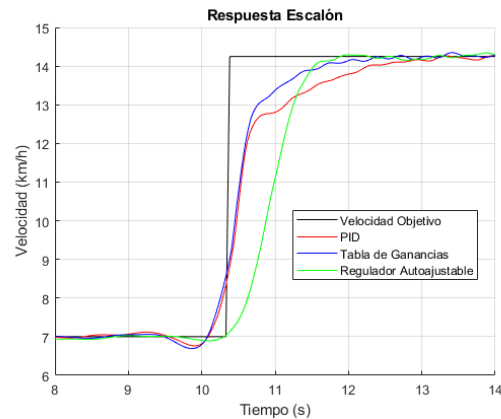


Fig. 11. Respuesta de los reguladores a la entrada escalón.

### B. Tabla de Ganancias

La Tabla de Ganancias se ha diseñado siguiendo los mismos criterios que con el PID, las ganancias de los reguladores PI obtenidas pueden verse en la Tabla I:

TABLA I  
PARÁMETROS TABLA DE GANANCIAS

Velocidad (km/h)	6	10	13	16	20
$K_p$	30	35	30	10	10
$K_i$	70	75	70	50	55

La Tabla de Ganancias mejora considerablemente la respuesta del sistema, con una respuesta más estable, un tiempo de establecimiento más rápido, de 1,6s (Fig. 11), y menos error en la rampa (Fig. 12).

### C. Regulador Autoajustable Directo

Al Regulador Autoajustable Directo se le ha impuesto un objetivo inalcanzable para forzar al algoritmo a buscar el mejor comportamiento posible, imponiendo como polos objetivo:  $(z - 0,05 + 0,05i)$   $(z - 0,05 - 0,05i)$ .

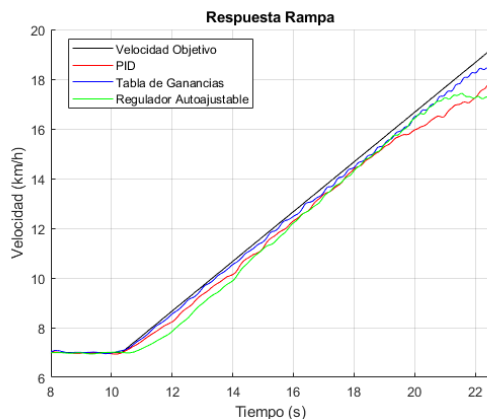


Fig. 12. Respuesta de los reguladores a la entrada rampa.

El Regulador Autoajustable Directo consigue un tiempo de establecimiento similar a la Tabla de ganancias, 1,3s (Fig. 11). Pero los resultados más interesantes son la rampa (Fig. 12): mientras que en el PID y la Tabla de Ganancias el error aumenta con el tiempo en este regulador se reduce, demostrando su mejor adaptabilidad.

## VI. ANÁLISIS DINÁMICO

Para comprobar la robustez de los reguladores se someten a condiciones de funcionamiento adversas que verifiquen su resistencia ante diferentes perturbaciones.

### A. Cambios de Consigna

Se han sometido los reguladores a una entrada con escalones sucesivos de diferente amplitud para verificar que sigan correctamente la consigna (Fig. 13).

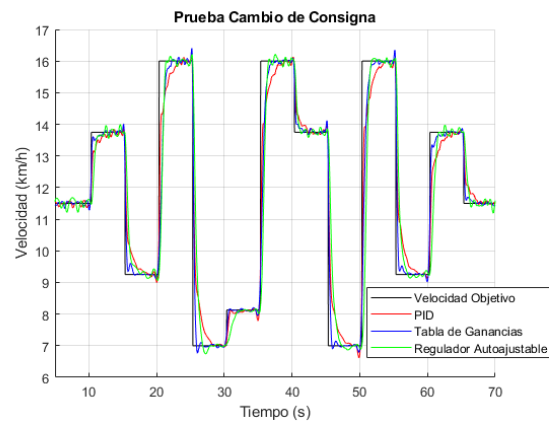


Fig. 13. Respuesta de los reguladores a la prueba de cambios de consigna.

Los tres reguladores siguen correctamente a la consigna. El PID es el más lento de todos, con un tiempo de establecimiento medio de 2s, la Tabla de Ganancias consigue las respuestas más rápidas, 0,9s, y el Regulador Autoajustable queda en un punto intermedio con 1,3s.

### B. Cambios de Carga

Esta prueba simula un aumento en la masa del móvil, reduciendo la potencia disponible para el sistema aplicando una ganancia entre 0 y 1 a la alimentación (de forma que una ganancia de 0,5 limite la potencia al 50%), y comprueba si los reguladores son capaces de compensarla y alcanzar la velocidad objetivo ( $\frac{3}{4}$  de la máxima).

Como puede verse en la Fig. 14 tanto el PID como el Regulador Autoajustable son capaces de compensar una limitación de potencia del 54% y fallan al limitarla al 53%.

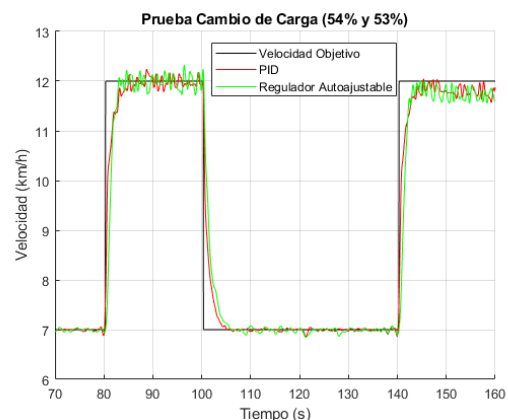


Fig. 14. Respuesta del PID y el Regulador Autoajustable a la prueba de cambios de carga.

La Tabla de Ganancias obtiene el peor resultado, sólo pudiendo compensar una limitación del 58% (Fig. 15).

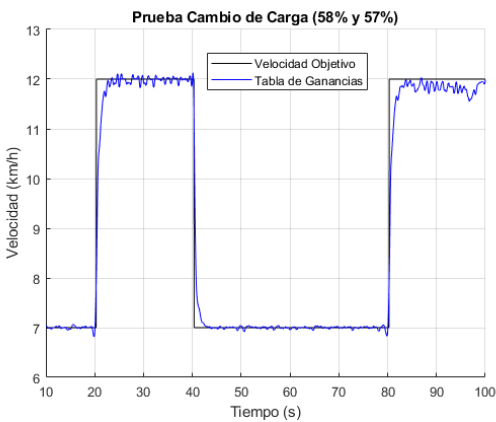


Fig. 15. Respuesta de la Tabla de Ganancias a la prueba de cambios de carga.

### C. Resistencia al Ruido

Los tres reguladores son capaces de seguir la consigna pese a introducirles ruido blanco. Como medida de su resistencia se han sometido a un tren de pulsos, cambiando la consigna entre la velocidad mínima (7km/h) y  $\frac{3}{4}$  de la máxima (12km/h), aumentando el ruido blanco progresivamente en cada escalón.

El PID y la Tabla de ganancias han obtenido resultados similares, fallando de forma consistente al llegar a una desviación típica de 3,5km/h y 2,5km/h respectivamente.

El Regulador Autoajustable supera al resto, fallando cuando la desviación típica alcanza el rango de 7,5 – 8,5 km/h. Este algoritmo incorpora filtrado de las señales, por lo que no es una sorpresa que obtenga un resultado tan diferenciado.

### D. Prueba Combinada

Por último, se han sometido los reguladores a una combinación de las pruebas anteriores: cambios de consigna con ruido blanco (desviación típica 2km/h) y potencia limitada al 60%.

En estas condiciones (Fig. 16) el PID sigue siendo capaz de responder correctamente al sistema, solo que con ruido y con un tiempo de respuesta mucho más lento, mientras que la Tabla de Ganancias se ve superada y no es capaz de seguir los escalones de subida y presenta demasiado ruido. El Regulador Autoajustable demuestra su potencial, siguiendo la consigna con una oscilación por ruido moderada, aunque con tiempo de establecimiento más lento.

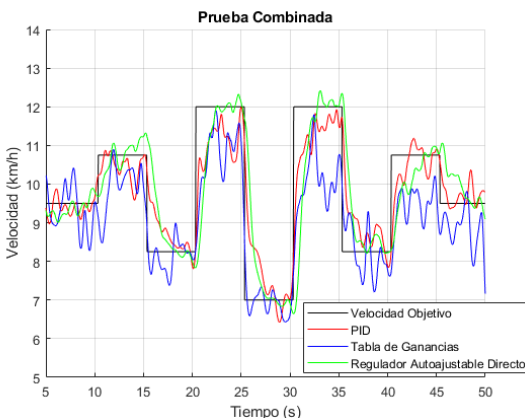


Fig. 16. Respuesta de los reguladores a la prueba combinada.

### E. Análisis Final

Atendiendo a los resultados obtenidos podemos afirmar que los tres reguladores son apropiados para controlar el sistema, con las diferencias que presentan haciendo que se adapten mejor a diferentes circunstancias.

El PID demuestra su potencial, funcionando correctamente incluso ante perturbaciones. Por su fácil diseño e implementación queda patente que es adecuado para aplicaciones simples y con un rango de funcionamiento amplio, aunque en presencia de ruido se beneficiaría de sistemas de filtrado de la señal.

La Tabla de Ganancias, pese a haberla implementado con un algoritmo más simple, demuestra superar al PID en circunstancias de funcionamiento normales. Si se desarrollara más, utilizando un algoritmo de control más completo y aumentando las condiciones de funcionamiento para las que está definida, tiene el potencial de ser el regulador con la respuesta más homogénea para cualquier punto de trabajo. Pero sus inconvenientes no son despreciables: diseñarla para más condiciones de funcionamiento requiere de más recursos para almacenar los datos y procesar las señales, así como más trabajo en la etapa de diseño. Al igual que con el PID, puede ser necesario implementar sistemas para filtrar las señales si va a funcionar en entornos con mucho ruido.

Por último, el Regulador Autoajustable Directo demuestra el potencial de los reguladores adaptativos avanzados. Obtiene los mejores resultados ante circunstancias adversas y los únicos inconvenientes que presenta son su complejidad de implementación y la capacidad de cálculo requerida. Una vez implementado, se le puede imponer el objetivo que se desee y él solo se adaptará para conseguirlo lo mejor posible. Esto hace que de cara a controlar sistemas complejos presente el mayor potencial, pues no necesita conocer de antemano cómo se comporta el sistema. Es difícil defender su uso en sistemas simples, debiéndose reservar para aplicaciones complejas donde la capacidad de procesamiento ya esté justificada.

## VII. CONCLUSIONES

En este trabajo se han implementado tres reguladores para realizar control de velocidad sobre un acelerador magnético: un regulador clásico PID y dos reguladores adaptativos: Tabla de Ganancias y Regulador Autoajustable. Se ha mostrado cómo un regulador adaptativo simple (Tabla de Ganancias) puede conseguir mejores resultados que uno clásico en condiciones normales de funcionamiento, manteniendo margen para seguir desarrollándolo y adaptarlo a condiciones más adversas. Con el Regulador Autoajustable se ha mostrado cómo un regulador adaptativo avanzado mantiene el control de un sistema incluso en condiciones adversas.

## REFERENCIAS

- [1] I. O. Benitez, R. Rivas, V. Feliu, L. P. Sanchez and L. A. Sanchez, "Fuzzy Gain Scheduled Smith Predictor for Temperature Control in an Industrial Steel Slab Reheating Furnace," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 11, pp. 4439-4447, Nov. 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7795812.
- [2] S. Diaz, J. R. Perez-Correa and M. A. Fernandez-Fernandez, "Automatic Control on Batch and Continuous Distillation Columns," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 9, pp. 2418-2426, September 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8789563.

- [3] A. Ebrahimi, M. Urias, N. Patel, R. H. Taylor, P. L. Gehlbach and I. Iordachita, "Adaptive Control Improves Sclera Force Safety in Robot-Assisted Eye Surgery: A Clinical Study," in *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, doi: 10.1109/TBME.2021.3071135.
- [4] Y. Kang, M. Chu, C. Chang, Y. Chen and M. Chen, "The Self-Tuning Neural Speed Regulator Applied to DC Servo Motor," *Third International Conference on Natural Computation (ICNC 2007)*, 2007, pp. 44-52, doi: 10.1109/ICNC.2007.743.
- [5] R. S. Ankushe, A. G. Thosar, A. Y. Bansode and V. V. Hande, "Multiple SVS system for voltage regulation by using direct self tuning regulator," *2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB)*, 2016, pp. 331-335, doi: 10.1109/AEEICB.2016.7538303.
- [6] M. Nascimento Moutinho, C. T. da Costa, W. Barra and J. Augusto Lima Barreiros, "Self-tuning Control Methodologies Applied to the Automatic Voltage Control of a Synchronous Generator," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 6, no. 5, pp. 408-418, Sept. 2008, doi: 10.1109/TLA.2008.4839110.
- [7] Y. Li, S. Liang, B. Xu and M. Hou, "Predefined-time asymptotic tracking control for hypersonic flight vehicles with input quantization and faults," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, doi: 10.1109/TAES.2021.3068442.
- [8] B. D. Skurdal and R. L. Gaigler, "Multimission Electromagnetic Launcher," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 1, pp. 458-461, Jan. 2009, doi: 10.1109/TMAG.2008.2008551.
- [9] R. J. Kaye, B. N. Turman and S. L. Shope, "Applications of coilgun electromagnetic propulsion technology," *Conference Record of the Twenty-Fifth International Power Modulator Symposium*, 2002 and 2002 High-Voltage Workshop., 2002, pp. 703-707, doi: 10.1109/MODSYM.2002.1189573.
- [10] J. -. Mathieu, G. Beaudoin and S. Martel, "Method of propulsion of a ferromagnetic core in the cardiovascular system through magnetic gradients generated by an MRI system," in *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 292-299, Feb. 2006, doi: 10.1109/TBME.2005.862570.
- [11] O. Y. Kanner, D. Shilo, J. Sheng, R. D. James, and Y. Ganor, "Ferromagnetic shape memory flapper for remotely actuated propulsion systems," in *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 8, p. 085030, aug. 2013, doi: 10.1088/0964-1726/22/8/085030.
- [12] A. Cassat and M. Jufer, "MAGLEV projects technology aspects and choices," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 12, no. 1, pp. 915-925, March 2002, doi: 10.1109/TASC.2002.1018549.
- [13] J. Suardiaz Muro, B. M. Al-Hadithi and A. Iborra Garcia, "Self-Tuning Controller for Flow Rate Liquid System," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 4, no. 5, pp. 332-338, Sept. 2006, doi: 10.1109/TLA.2006.4472132.
- [14] K. Kim, P. Rao and J. A. Burnworth, "Self-Tuning of the PID Controller for a Digital Excitation Control System," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 4, pp. 1518-1524, July-Aug. 2010, doi: 10.1109/TIA.2010.2049631.
- [15] K. S. Narendra and J. Balakrishnan, "Adaptive control using multiple models," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 42, no. 2, pp. 171-187, Feb. 1997, doi: 10.1109/9.554398.
- [16] W. J. Rugh and J. S. Shamma, "Research on gain scheduling," in *Automatica*, vol. 36, no. 10, pp. 1401-1425, oct, 2000, doi: 10.1016/S0005-1098(00)00058-3.
- [17] I. Masubuchi and Y. Fujimoto, "On robust synthesis of gain-scheduled controllers under stochastic measurement noise on the scheduling parameter," *Proceedings of SICE Annual Conference 2010*, 2010, pp. 3043-3045.
- [18] Z. -. Zhao, M. Tomizuka and S. Isaka, "Fuzzy gain scheduling of PID controllers," [Proceedings 1992] *The First IEEE Conference on Control Applications*, 1992, pp. 698-703 vol.2, doi: 10.1109/CCA.1992.269762.
- [19] J. S. Shamma and M. Athans, "Gain scheduling: potential hazards and possible remedies," in *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 12, no. 3, pp. 101-107, June 1992, doi: 10.1109/37.165527.
- [20] K. Joulili and H. Jerbi, "A Computationally Lyapunov Nonlinear Gain Scheduling Control of Nonlinear Systems with Stability Guarantees," *2009 11th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, 2009, pp. 374-379, doi: 10.1109/UKSIM.2009.68.
- [21] T. Ylöstalo and H. Hyötyniemi, "Model library based adaptive control — Implementation aspects," *1999 European Control Conference (ECC)*, 1999, pp. 3065-3069, doi: 10.23919/ECC.1999.7099796.
- [22] Q. Wang and G. Chen, "Robust Gain Scheduling Control for Linear Systems with Input Saturation," *2016 8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, 2016, pp. 142-146, doi: 10.1109/IHMSC.2016.44.
- [23] Kong Xiangxing, He Ai and Wang Xi, "An aeroengine state variable model based on gain scheduling technique," *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)*, 2010, pp. V9-589-V9-592, doi: 10.1109/ICCASM.2010.5622964.
- [24] H. Zhou, H. Pei and B. Chen, "Observer-Based Gain Scheduling Control of Robotic Helicopter," *2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence*, 2009, pp. 297-302, doi: 10.1109/AICI.2009.78.
- [25] P. Hang, X. Xia and X. Chen, "Handling Stability Advancement With 4WS and DYC Coordinated Control: A Gain-Scheduled Robust Control Approach," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 4, pp. 3164-3174, April 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3065106.
- [26] D. Garcia Garcia, J. Peña Martín, Y. Valeriano Medina and L. Hernández Santana, "Navigation System With Adaptive Disturbances Compensation for an Autonomous Underwater Vehicle," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, no. 10, pp. 1741-1751, October 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.8986453.
- [27] S. W. Zhao, N. C. Cheung, W. Gan, J. M. Yang and J. F. Pan, "A Self-Tuning Regulator for the High-Precision Position Control of a Linear Switched Reluctance Motor," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 5, pp. 2425-2434, Oct. 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.900348.
- [28] A. Naderolasli and M. Ataei, "Stabilization of A Two-DOF Gimbal System Using Direct Self-Tuning Regulator," *ijeei*, vol. 12, no. 1, pp. 33-44, mar. 2020, doi: 10.15676/ijeei.2020.12.1.3.
- [29] M. J. Gomes Silva, C. Silva Araujo, S. T. Marques Bezerra, C. Rocha Souto, S. Arnaud Silva and H. Pimentel Gomes, "Generalized Minimum Variance Control for Water Distribution System," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 3, pp. 651-658, March 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7069088.
- [30] S. Z. Rad, S. K. H. Sani and A. Akbarzadeh, "Designing a self-tuning regulator controller for a non-linear and MIMO Exoskeleton system assist test setup with adaptive decoupling," *2019 7th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)*, 2019, pp. 445-450, doi: 10.1109/ICRoM48714.2019.9071900.
- [31] I. Grigorov, N. Atanasov and Z. Zhekov, "Comparison in application of recursive estimation and control of the real DC motor parameters in adaptive pole placement control system and adaptive system with self-tuning regulator with minimum variance," *2020 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)*, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICA150593.2020.9311296.
- [32] Cs. Bányász and L. Keviczky, "Direct Methods for Self-Tuning PID Regulators," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 15, no. 4, pp. 1395-1400, jun. 1982, doi: 10.1016/S1474-6670(17)63193-8.
- [33] K. J. Astrom and B. Wittenmark, "Adaptive Control," Ed. *Addison-Wesley* Publishing Company, 1995.
- [34] Lei Guo and Han-Fu Chen, "The AAstrom-Wittenmark self-tuning regulator revisited and ELS-based adaptive trackers," in *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 36, no. 7, pp. 802-812, July 1991, doi: 10.1109/9.85060.



**Javier Blanco Rico**, Madrid, Spain. B. Sc. in Industrial Electronics and Automation Engineering from the Universidad Politécnica de Madrid (UPM) (Spain) in 2021. He is now carrying out master's studies in the field of power electronics and embedded systems at the Universidad Politécnica de Madrid.



**Basil Mohammed Al-Hadithi** got the title of B. Sc. in control and system engineering in 1983 and the M. Sc. in control and instrumentation engineering in 1988. He received a PhD in process control and artificial intelligence in 2002 from Universidad Politécnica de Madrid (UPM) (Spain) with a thesis on analysis, design and stability of fuzzy slide-mode control systems. He is an associate professor at UPM. His teaching activity covers control engineering and analogue electronics, being an author and co-author of seven textbooks and having supervised and co-supervised several B. Sc. final year projects and M. Sc. theses and 4 theses. He is a researcher at the Centre for Automation and Robotics UPM-CSIC. His interest is mainly focused on fuzzy control and slide mode control. He has several publications (JCR), book chapters and conference papers. Moreover, he has participated in several research projects and industrial contracts with companies. He is a board member and reviewer of several international scientific societies and International journals in modelling and designing control systems.



**Roberto Gonzalez Herranz** finished his B. Sc. in Electrical Engineering in 1992, and M. Sc. in Industrial Engineer in 1996. He is an associate professor at UPM at the Universidad Politécnica de Madrid (UPM) since 2001. He obtained his PhD title in Robotics and Computer Vision in 2016 from the Center of Automation and Robotics (CAR), formed by UPM y CSIC (Spain). He is a researcher at the Centre for Automation and Robotics UPM-CSIC. His academic and research activity is focused on Automation and Control. He supervised and co-supervised various B. Sc. final year projects and M. Sc theses. He has several publications in scientific journals and conferences.