

Desarrollo y simulación del subsistema de operación automático para trenes

Bilbao, D.^{a,*}, Elorza, I.^a, Irigoyen, E.^b

^a*IKERLAN, Paseo José María Arizmendiarieta, 2, 20500 Arrasate/Mondragón, España.*

^b*Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad del País Vasco, Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1, 48013, Bilbao, España.*

To cite this article: Bilbao, D., Elorza, I., Irigoyen, E. 2023. Development and simulation of the automatic train operation subsystem. XLIV Jornadas de Automática, 132-137. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.132>

Resumen

Con objeto de mejorar la calidad del servicio, aumentar la eficiencia y seguridad de la operación, y reducir los costes operativos y ambientales en los actuales sistemas de transporte ferroviario, este trabajo presenta el desarrollo del subsistema de operación automático para trenes (*ATO, Automatic Train Operation*). En particular, se enfoca en la capa mesoscópica, la cual hace referencia al planificador encargado de generar las señales de control a proporcionar a la capa microscópica, asociada al módulo motor. Mencionar que, aunque este desarrollo no aporta una novedad significativa, es un paso fundamental para futuras contribuciones innovadoras en esta línea de investigación. Por ello, se ha modelado el tren a partir de la dinámica longitudinal que lo caracteriza y se ha implementado un algoritmo inicial, encargado de planificar y regular la velocidad del tren hasta cumplir con las especificaciones impuestas por la capa macroscópica. La solución propuesta ha sido validada mediante simulaciones que incorporan diversas perturbaciones en la vía. El análisis de los resultados obtenidos permiten corroborar que el desarrollo cumple con el objetivo principal de manera satisfactoria, dando paso a la futura mejora del algoritmo mediante la implementación de técnicas de control inteligentes.

Palabras clave: Transporte ferroviario, operación automática de trenes, planificación y control de rutas, control de seguimiento de velocidad, control automático de sistemas de transporte y vehículos.

Development and simulation of the automatic train operation subsystem

Abstract

In order to improve service quality, increase operational efficiency and safety, and reduce operating and environmental costs in current railway transportation systems, this work presents the development of an Automatic Train Operation (ATO) subsystem. Specifically, it focuses on the mesoscopic layer, which refers to the planner responsible for generating control signals to be provided to the microscopic layer associated with the powertrain module. It is worth noting that while this development does not introduce significant novelty, it represents a fundamental step towards future innovative contributions in this research area. Therefore, the train has been modelled based on its longitudinal dynamics and an initial algorithm has been implemented, to plan and regulate the train's speed to meet the specifications imposed by the macroscopic layer. The proposed solution has been validated through simulations incorporating various disturbances on the track. The analysis of the results obtained in this work confirms that the development successfully accomplishes the main objective, facilitating the way for future algorithm improvement through the implementation of intelligent control techniques.

Keywords: Railway transport, automatic train operation, path planning and control, speed tracking control, automatic control of transportation systems and vehicles.

*Autor para correspondencia: dbilbao@ikerlan.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

1. Introducción

En el campo de la ingeniería de control, todos los sistemas presentan dinámicas complejas debido a la naturaleza no lineal de los mismos, a incertidumbres en su comportamiento o al acoplamiento existente entre las variables involucradas, entre otras causas de dicha complejidad. Por ello, las técnicas de control clásicas no son suficientes para garantizar su controlabilidad hasta alcanzar los objetivos de control predefinidos.

Además, la linealización entorno a un punto de operación tampoco es suficiente para lograr un control satisfactorio mediante el uso de este tipo de técnicas ya que, es posible que los efectos no lineales del sistema tengan un amplio rango de operación y, por ende, sea necesario realizar varias linealizaciones sucesivas en dicho rango. Lo que supone un alto consumo de los recursos computacionales del hardware en el que se implementa el control.

Debido a la necesidad de controlar estos sistemas sin importar la complejidad de los mismos, es común implementar técnicas de control avanzadas las cuales permiten mejorar la eficiencia y la eficacia de dichos sistemas mecatrónicos. Estos sistemas, como trenes, robots industriales o aerogeneradores, son críticos para el funcionamiento de muchas industrias, lo que implica la necesidad de un control preciso y confiable.

La implementación de algoritmos de control avanzado permite un mayor grado de autonomía de estos sistemas, lo que a su vez mejora la eficiencia en términos de tiempo y costo y, reduce la posibilidad de errores humanos (Emery, 2017). Además, mediante la monitorización en tiempo real y la capacidad de adaptarse a cambios en el entorno, estos algoritmos también ayudan a mejorar la seguridad de estos sistemas, consiguiendo aumentar su fiabilidad a largo plazo.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, en el presente trabajo se comienza a abordar el problema de control autónomo de los trenes donde, a partir de la dinámica longitudinal que los caracteriza, se utilizan las técnicas de control necesarias para cumplir con los objetivos que permiten la correcta gestión de la red ferroviaria en la que operan.

La elección de este sistema como entorno de desarrollo se fundamenta en que, al ser un sistema altamente complejo debido a las no linealidades, a las incertidumbres a las que está sometido y, al tener que seguir unas trayectorias planificadas y muy estrictas para satisfacer las necesidades de la red ferroviaria, es ideal para comenzar con el desarrollo de algoritmos de control inteligente.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. En la sección II, se detalla el caso de estudio seleccionado y se realiza el modelado matemático del mismo. En la sección III, se describe el funcionamiento del algoritmo desarrollado. En la sección IV, se describen las pruebas de validación realizadas y se analizan los resultados obtenidos y, por último, en la sección V se presentan las conclusiones más relevantes y los trabajos futuros en la presente línea de investigación.

2. Sistemas de transporte ferroviario

Los sistemas de transporte ferroviario actuales permiten una movilidad eficiente, ecológica y de bajo coste, siendo así una alternativa frente al transporte aéreo para trayectos inferiores a 650

kilómetros. Sin embargo, uno de los problemas más destacados en los trenes es el control automático de la velocidad del mismo para que alcance la ubicación deseada en el tiempo de operación requerido. Esto se debe al interés por el desarrollo de vehículos no tripulados que existe en la actualidad (Azzaghdam and Alankus, 2022; García et al., 2022; Anjum and Shahab, 2023).

Además, con la rápida evolución de los trenes de alta velocidad, es cada vez más importante garantizar la seguridad, la puntualidad y un consumo energético adecuado (Fernández-Rodríguez et al., 2015). Por esa razón, es esencial mejorar continuamente el grado de automatización e inteligencia de estos sistemas.

Para ello, el sistema de control automático de trenes (*ATC System*) cuenta con un subsistema denominado *ATO* (*Automatic Train Operation*) que permite al conductor no tener que manipular directamente el mando de control. Es decir, el objetivo principal del subsistema *ATO* es ajustar las fuerzas de tracción y frenado en función de la instrucción acordada y la información capturada en tiempo real, lo que permite que el tren circule de manera segura, eficiente y confiable (Zhao et al., 2020).

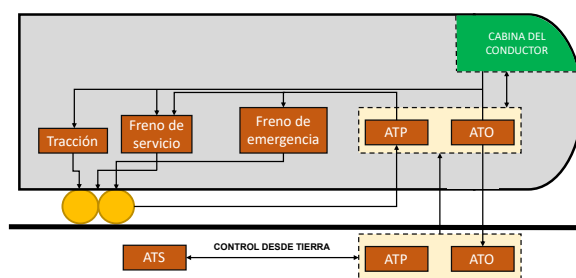


Figura 1: Estructura del sistema de control automático de trenes

Como se observa en la Figura 1, el *ATC System* queda definido por el subsistema de operación automático (*ATO Subsystem*), el subsistema de protección automático (*ATP Subsystem*) y el subsistema de supervisión automático (*ATS Subsystem*). Haciendo hincapié en el subsistema de operación automático (*ATO*), en la Figura 2, se presentan los diferentes módulos que componen el mismo y cómo interactúan entre sí para garantizar un funcionamiento adecuado (Wang et al., 2011).

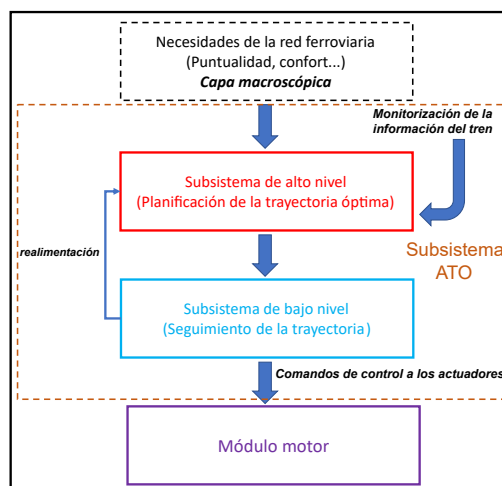


Figura 2: Estructura del subsistema de operación automático de trenes

El subsistema *ATO* consta de dos niveles de control independientes. El controlador de alto nivel es el encargado de calcular la trayectoria de referencia óptima basándose en la información proporcionada por la capa macroscópica. Por otro lado, el controlador de bajo nivel actúa para que el tren siga el perfil velocidad/posición de referencia, generando los comandos de control a transmitir al módulo motor.

Además, cabe destacar que existen diversos subsistemas *ATO*. Por ejemplo, en (Fernández-Rodríguez et al., 2015) se desarrolla el controlador de alto nivel de manera muy sencilla ya que, solo es capaz de seleccionar un perfil de velocidad/posición de un conjunto predefinido en función de las especificaciones proporcionadas por la capa macroscópica. Alternativamente, el controlador de alto nivel puede funcionar de forma dinámica elaborando en tiempo real la curva de velocidad/posición del tren.

En resumen, el sistema de control automático de trenes es un componente fundamental para garantizar las especificaciones definidas sobre la red ferroviaria en la que operan los mismos (Luo and Xu, 2013). Sin embargo, el subsistema de operación automático es particularmente importante ya que se encarga de controlar y optimizar la velocidad y la aceleración del tren, lo que permite una conducción más eficiente y segura (Carriam et al., 2017).

Por ello, en el presente trabajo se ha desarrollado el algoritmo asociado al subsistema de operación automático de trenes, con el objetivo de poder reproducir el funcionamiento del mismo. De esta manera, dando paso a la futura implementación de algoritmos de control inteligente que permitan seguir la trayectoria de referencia incluso ante incertidumbres en el modelado del sistema y perturbaciones no medibles.

2.1. Modelado del sistema

En cuanto a la dinámica longitudinal que caracteriza a los trenes, esta se define cómo el movimiento del tren en la dirección de la vía y las fuerzas aceleradoras o retardadoras que inciden sobre el movimiento del mismo. En ella se fundamentan aspectos tan relevantes como el cálculo de los tiempos de viaje, los consumos de energía del tren, se determinan las cargas máximas, etc. Cabe destacar que, dentro de la dinámica longitudinal de los trenes, la resistencia aerodinámica es uno de los factores más relevantes debido a su comportamiento no lineal (Álvarez and Franco, 2021).

Para la obtención del modelo dinámico del tren, es necesario apoyarse en las leyes de Newton y en el diagrama de sólido libre que hace referencia al mismo (Xue et al., 2022; Chen et al., 2022).

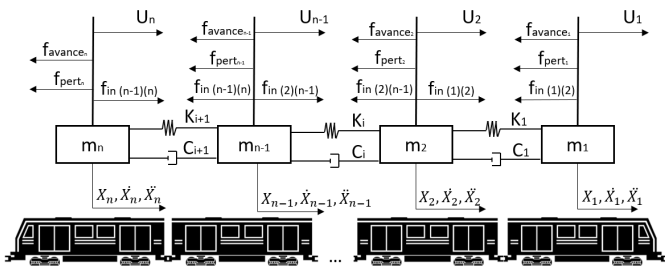


Figura 3: Diagrama de sólido libre genérico para trenes de alta velocidad

Observando la Figura 3, se puede apreciar cómo cada uno de los coches que componen el tren se define como una masa independiente y, los acoplamientos entre estos se modelan mediante un conjunto muelle/amortiguador. Además, con el objetivo de poder analizar la dinámica de cada uno de los coches, se enumera cada uno de los mismos definiendo el coche de cabeza como el número 1 y el último como el coche n -ésimo.

Por otro lado, se considera que la resistencia al avance (f_{avance}) actúa en cada uno de los coches que conforman el tren y que cada uno de los mismos es traccionado. La expresión utilizada para definir la resistencia al avance se fundamenta en la ecuación de Davis.

$$f_{avance} = \underbrace{(C_0 + C_1 V_{coche})}_{\text{resistencia a la rodadura}} + \underbrace{C_2 V_{coche}^2}_{\text{resistencia aerodinámica}} \quad (1)$$

Donde V_{coche} hace referencia a la velocidad del coche en cuestión y, C_0 , C_1 y C_2 son coeficientes de resistencia que se obtienen a partir de pruebas experimentales y son diferentes para cada tren. Además, observando el término cuadrático $C_2 V_{coche}^2$ se puede deducir cómo cuando el tren aumenta la velocidad, la característica no lineal entre la resistencia aerodinámica y la velocidad se acentúa.

En cuanto a la resistencia debido a las perturbaciones de la vía, mencionar que esta encapsula la resistencia debido a curvaturas, la resistencia debida al avance en rampa y la resistencia en túneles (Xue et al., 2022). A continuación se pueden apreciar las expresiones asociadas a cada tipo de perturbación mencionada:

$$f_{pert} = f_c + f_g + f_t \longrightarrow \begin{cases} f_c = mg \frac{600}{R_{curva}} \\ f_g = mg \sin \theta \\ f_t = mg \cdot 0.00013L \end{cases} \quad (2)$$

Donde R_{curva} hace referencia al radio de la curva, θ al grado de inclinación de la rampa y L a la longitud del túnel.

De esta manera, quedando el modelo dinámico del tren, para un tren con 4 coches traccionados, como se aprecia en (3).

$$\begin{cases} \dot{x}_n = v_n, & \ddot{x}_n = a_n, & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ m_1 \ddot{x}_1 = U_1 - k_1(x_1 - x_2) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - f_{aero1} - f_{pert1} \\ m_2 \ddot{x}_2 = U_2 + k_1(x_1 - x_2) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_2(x_2 - x_3) - \\ - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - f_{aero2} - f_{pert2} \\ m_3 \ddot{x}_3 = U_3 + k_2(x_2 - x_3) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) - k_3(x_3 - x_4) - \\ - c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) - f_{aero3} - f_{pert3} \\ m_4 \ddot{x}_4 = U_4 + k_3(x_3 - x_4) + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_4) - f_{aero4} - f_{pert4} \end{cases} \quad (3)$$

3. Desarrollo del algoritmo asociado al *ATO Subsystem*

En relación al desarrollo del algoritmo del *ATO Subsystem*, cabe destacar que se ha utilizado el software de cómputo numérico MATLAB R2022b para su programación. El funcionamiento del algoritmo se basa en el diagrama de flujo presentado en la Figura 4 y el código se puede analizar en el siguiente repositorio de *GitHub* (Bilbao, 2023).

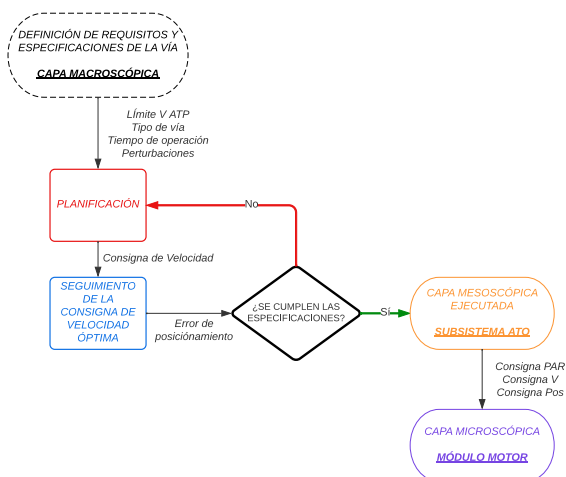


Figura 4: Diagrama de flujo del algoritmo del ATO Subsystem desarrollado

Observando la Figura 4, se puede deducir que el algoritmo se fundamenta en la información proporcionada por la capa macroscópica, la cual incluye el tipo de vía, el límite de velocidad establecido por el subsistema de protección automático a lo largo de la vía, el tiempo de operación y el tipo de perturbaciones aparentes sobre la vía.

A partir de dicha información, el subsistema de alto nivel realiza una primera planificación, generando la consigna de velocidad óptima a seguir por parte del subsistema de bajo nivel para cumplir con las especificaciones impuestas. De esta manera, se realiza el seguimiento de dicha consigna de velocidad a partir de la capacidad de tracción/frenado de los motores que accionan cada uno de los coches que componen el tren. Sin embargo, en caso de que el error de posicionamiento sea mayor que un umbral establecido, en este caso ± 0.1 metros, se vuelve a realizar la planificación, disminuyendo o aumentando la velocidad en consecuencia, y de manera estratégica.

Por último, una vez realizada la planificación que permite al controlador de bajo nivel realizar el seguimiento de la consigna de velocidad óptima y obtener un error de posicionamiento dentro del umbral establecido, se da por finalizada la ejecución del algoritmo asociado al subsistema ATO.

En resumen, de los resultados obtenidos tras la ejecución de la capa mesoscópica se extraen las consignas de tracción, velocidad y posición a introducir al módulo motor para que los actuadores del tren realicen su cometido principal: accionar cada uno de los coches del mismo hasta alcanzar la posición requerida en el tiempo de operación definido por la capa macroscópica.

En cuanto a la evaluación del desempeño del algoritmo, en el apartado *Pruebas de validación* se muestran los resultados obtenidos tras realizar las pruebas de validación pertinentes. Estas se han realizado bajo diferentes condiciones de operación, es decir, considerando y sin considerar perturbaciones en la vía.

4. Pruebas de validación

Con el objetivo de verificar el correcto funcionamiento del algoritmo que encapsula tanto el control de alto nivel como el control de bajo nivel, se han utilizado los parámetros asociados al tren CRH3 (Yang et al., 2018) definidos en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del tren de alta velocidad

Parámetro	Valor	Unidades
m_1, m_2, m_3, m_4	67.2, 74.6, 74.6, 73	t, t, t, t
C_0	7.75	N/t
C_1	0.228	$N \cdot s/m \cdot t$
C_2	0.0166	$N \cdot s^2/m^2 \cdot t$
k_1, k_2, k_3	1×10^7	N/m
c_1, c_2, c_3	5×10^6	$N \cdot s/m$

Por otro lado, mencionar que el tren debe recorrer una distancia total de 11342.4 metros en 500 segundos de operación (Jia et al., 2022). Además, el subsistema de protección automático (ATP) define la velocidad máxima en dicho recorrido como se aprecia en la Figura 5.

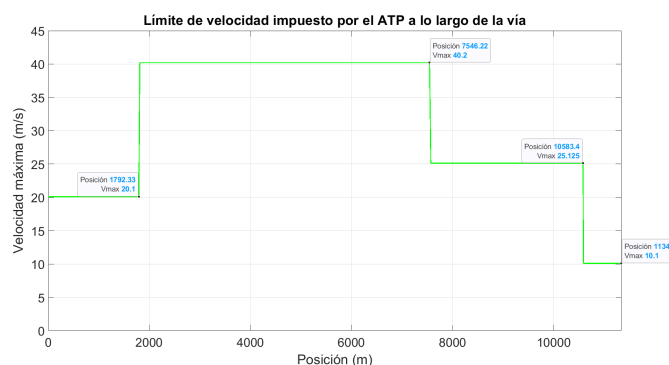


Figura 5: Límite de velocidad impuesto por el subsistema de protección automático

En cuanto a la capacidad de tracción y de frenado eléctrico de cada uno de los coches que componen el tren, en la Figura 6 se pueden observar las curvas de tracción/velocidad y frenado/velocidad asociadas a los motores (ABB, 2021) que accionan cada uno de los coches del mismo.

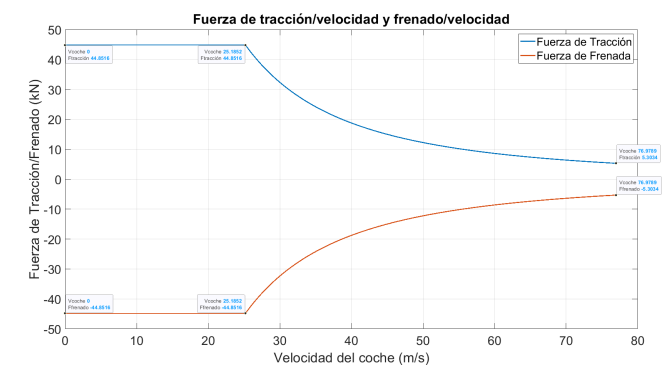


Figura 6: Curvas de tracción/velocidad y frenado/velocidad de cada uno de los coches que componen el tren

Una vez definidos los datos de la vía y los datos del sistema, como bien se ha mencionado anteriormente, se ha ejecutado el algoritmo asociado al sistema de operación automático considerando perturbaciones en la vía y sin considerar las mismas.

En cuanto a los resultados asociados a la ejecución del algoritmo sin considerar perturbaciones en la vía, estos se muestran en las Figuras 7, 8, 9.

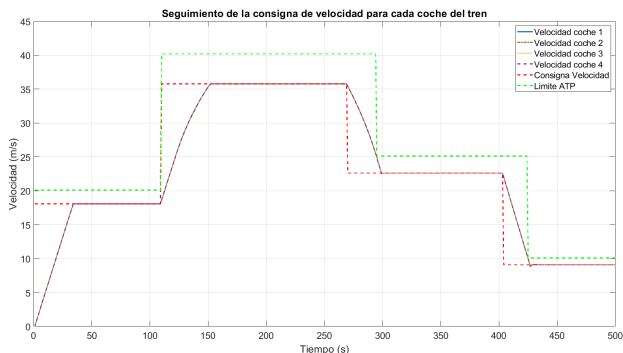


Figura 7: Resultado del planificador tras la ejecución del algoritmo asociado al ATO Subsystem

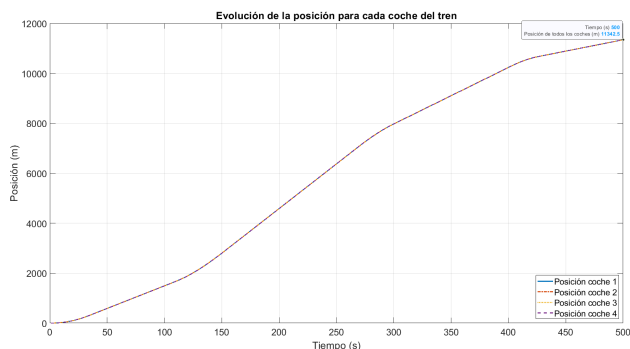


Figura 8: Posición de cada coche tras la ejecución del algoritmo asociado al ATO Subsystem

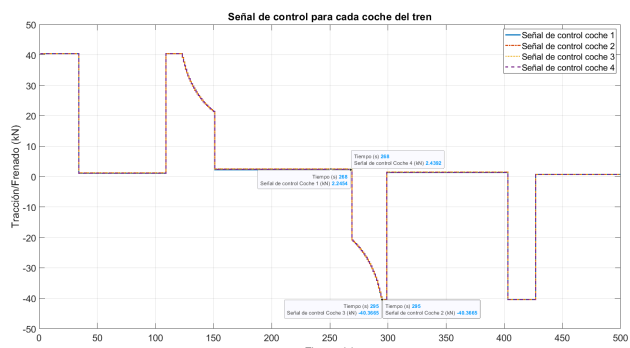


Figura 9: Señal de control para cada coche tras la ejecución del algoritmo asociado al ATO Subsystem

Observando los resultados obtenidos tras la ejecución del algoritmo para una vía sin perturbaciones, se puede apreciar en la Figura 7 cómo el planificador consigue generar la consigna de velocidad que permite al subsistema de bajo nivel cumplir con las especificaciones impuestas por la capa macroscópica. Además, en la Figura 8, se puede corroborar cómo cada uno de los coches que conforman el tren alcanza la posición deseada en 500 segundos de operación con un error mínimo.

Por otro lado, en la Figura 9 se puede observar cómo las señales de control varían para cada uno de los coches que conforman el tren. Esto se debe a la diferencia de masa de cada uno de los coches. Además, estas señales de control no superan los límites definidos por la capacidad de tracción/frenado impuesta por las especificaciones de los motores elegidos para accionar el tren en cuestión.

En cuanto a las perturbaciones que se han introducido a lo largo de la vía con la intención de evaluar el funcionamiento del algoritmo desarrollado, en la Tabla 2 se pueden apreciar los parámetros característicos de las mismas.

Tabla 2: Perturbaciones introducidas en la vía

Perturbación	Parámetro característico	Inicio (m)	Fin (m)
Curva	$R_{curva}=10000$ m	1200	1500
Rampa	$\theta = 2^\circ$	3000	6000
Túnel	$L=200$ m	10200	10400

Los resultados asociados a la ejecución del algoritmo considerando perturbaciones en la vía se muestran en las Figuras 10, 11, 12.



Figura 10: Resultado del planificador tras la ejecución del algoritmo asociado al ATO Subsystem y tras añadir perturbaciones a la vía

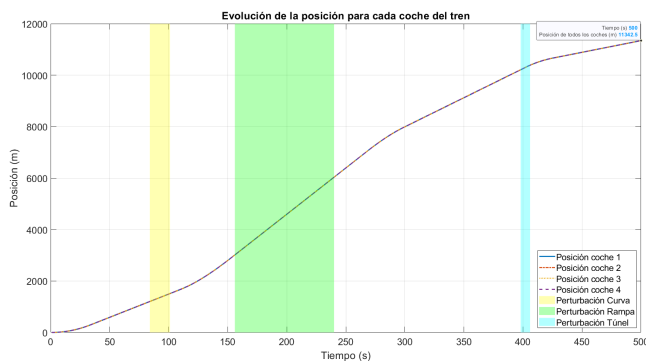


Figura 11: Posición de cada coche tras la ejecución del algoritmo asociado al ATO Subsystem y tras añadir perturbaciones a la vía



Figura 12: Señal de control para cada coche tras la ejecución del algoritmo asociado al ATO Subsystem y tras añadir perturbaciones a la vía

Observando los resultados obtenidos tras la adición de perturbaciones en la vía, se puede corroborar que el algoritmo desarrollado es capaz de reproducir el funcionamiento del *ATO Subsystem*, incluso ante diferentes tipos de perturbaciones.

En la Figura 10 se puede apreciar cómo se realiza el seguimiento de la consigna de velocidad generada por el planificador de manera satisfactoria y, a partir de la Figura 11, se puede corroborar que el tren alcanza la posición deseada en los 500 segundos de operación con un error de posicionamiento mínimo. Además, comparando la señal de control generada ante la vía sin perturbaciones (Figura 9) y con perturbaciones (Figura 12), se puede concluir que el subsistema de bajo nivel es capaz de reducir el efecto de las mismas sin llegar a superar los límites impuestos por la capacidad de tracción/frenado de los motores que accionan cada uno de los coches.

En resumen, analizando los resultados obtenidos se puede corroborar que el subsistema de operación automático de trenes realiza una planificación correcta y, de esta manera, el tren consigue alcanzar la posición deseada en el tiempo requerido de manera satisfactoria.

5. Conclusiones y trabajos futuros

En este trabajo se ha llevado a cabo el desarrollo y la simulación de un algoritmo para el subsistema de operación automático (*ATO Subsystem*) asociado a trenes, lo que representa un primer paso hacia la implementación del control autónomo de los mismos.

El algoritmo diseñado es capaz de generar el perfil de velocidad/posición a seguir por parte del tren para alcanzar la posición deseada en el tiempo de operación requerido. Además, también se generan las señales de control asociadas al perfil velocidad/posición que deben seguir cada uno de los coches tractores de los que se compone el tren. Cabe destacar que para utilizar las consignas generadas por el planificador en el módulo motor, es necesario conocer los parámetros del sistema de transmisión. De esta manera, transformando las consignas obtenidas a partir de la capa mesoscópica a consignas válidas para la capa microscópica.

Como líneas futuras, se pretende optimizar el algoritmo desarrollado en este trabajo con el fin de mejorar su eficiencia y reducir el tiempo necesario para planificar y generar los comandos de control que se transmiten al módulo motor. De este modo, se busca asegurar que el sistema de control pueda adaptarse rápidamente a cualquier cambio en las condiciones de la red ferroviaria, lo que es crucial para garantizar la seguridad y la eficiencia del transporte. Además, aunque en este trabajo no se han aplicado técnicas inteligentes, se espera que en futuras investigaciones se puedan implementar para mejorar el rendimiento del módulo motor, el cual es responsable de accionar los actuadores que componen el tren. Es decir, con el algoritmo desarrollado en este trabajo, se han sentado las bases para la implementación de estas técnicas, las cuales son necesarias para una correcta gestión de la red ferroviaria en la que operan los sistemas de transporte ferroviario actuales.

Por otro lado, una vez optimizado el algoritmo desarrollado en el presente trabajo, se abordará el desarrollo del sistema de control asociado al módulo motor el cual recibirá como consignas las salidas generadas a partir del algoritmo asociado al *ATO Subsystem*.

Agradecimientos

Este trabajo es parte de una tesis doctoral planteada por el departamento de Monitorización y Control Inteligente del centro tecnológico de investigación IKERLAN. De esta manera, los autores agradecen el continuo apoyo y colaboración tanto a IKERLAN como al grupo de Inteligencia Computacional de la UPV/EHU acreditado por el Gobierno Vasco (IT1689-22).

Referencias

- ABB, 2021. High voltage engineered induction motors - Technical catalog. URL: <https://library.abb.com/d/9AKK103508>
- Anjum, M., Shahab, S., Apr 2023. Improving autonomous vehicle controls and quality using natural language processing-based input recognition model. *Sustainability* 15 (7). DOI: 10.3390/su15075749
- Azzaghdam, E. T., Alankus, O. B., Mar 2022. Longitudinal control of autonomous vehicles consisting power-train with non-linear characteristics. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles* 7 (1), 133–142. DOI: 10.1109/TIV.2021.3115265
- Bilbao, D., 2023. Repositorio con el código asociado al subsistema de operación automático de trenes. URL: <https://gitfront.io/r/user-4074401/sFjvSRTi59t/TrainControlSystem/>
- Caramia, P., Lauro, G., Pagano, M., Natale, P., 2017. Automatic train operation systems: A survey on algorithm and performance index. In: 2017 AEIT International Annual Conference. pp. 1–6. DOI: 10.23919/AEIT.2017.8240522
- Chen, Y., Huang, D., Xu, C., Dong, H., 11 2022. Iterative learning tracking control of high-speed trains with nonlinearly parameterized uncertainties and multiple time-varying delays. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. DOI: 10.1109/TITS.2022.3183608
- Emery, D., 2017. Towards automatic train operation for long distance services: State-of-the art and challenges. URL: <http://infoscience.epfl.ch/record/230293>
- Fernández-Rodríguez, A., Fernández-Cardador, A., Cucala, A. P., Domínguez, M., Gonsalves, T., 2015. Design of robust and energy-efficient ato speed profiles of metropolitan lines considering train load variations and delays. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16 (4), 2061–2071. DOI: 10.1109/TITS.2015.2391831
- García, J. M., Yáñez, P., Martínez, J. E., dic. 2022. Evaluación de la navegabilidad en robots móviles skid-steer con remolques pasivos moviéndose sobre terrenos inclinados. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 20, 13–24. DOI: 10.4995/riai.2022.17161
- Jia, C., Xu, H., Wang, L., 1 2022. Robust nonlinear model predictive control for automatic train operation based on constraint tightening strategy. *Asian Journal of Control* 24, 83–97. DOI: 10.1002/asjc.2419
- Luo, H., Xu, H., 2013. Direct robust adaptive control of high-speed train based on nonlinear and time-varying models.
- Wang, Y., Ning, B., Cao, F., De Schutter, B., van den Boom, T. J., 2011. A survey on optimal trajectory planning for train operations. In: *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Service Operations, Logistics and Informatics*. pp. 589–594. DOI: 10.1109/SOLI.2011.5986629
- Xue, J., Zhuang, K., Zhao, T., Zhang, M., Qiao, Z., Cui, S., Gao, Y., 10 2022. Speed tracking control of high-speed train based on particle swarm optimization and adaptive linear active disturbance rejection control. *Applied Sciences (Switzerland)* 12. DOI: 10.3390/app122010558
- Yang, Y., Xu, Z., Liu, W., Li, H., Zhang, R., Huang, Z., 05 2018. Optimal operation of high-speed trains using hybrid model predictive control. *Journal of Advanced Transportation* 2018, 1–16. DOI: 10.1155/2018/7308058
- Zhao, F., You, K., Fan, Y., Yan, G., 2020. Velocity regulation for automatic train operation via meta-reinforcement learning. In: 2020 39th Chinese Control Conference (CCC). pp. 1969–1974. DOI: 10.23919/CCC50068.2020.9188581
- Álvarez, A. G., Franco, I. G., 2021. Dinámica de los trenes de alta velocidad. *Cinématica ferroviaria*, 15th Edition.