



Mejora del confort en trenes de muy alta velocidad mediante la optimización de la suspensión secundaria con algoritmos metaheurísticos

D. Rodríguez León¹, J. Martín de Toro¹, J.A. López Gómez², E. Palomares Novalbos¹, A.L. Morales¹
Robredo¹, P. Pintado Sanjuán¹

¹ Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos, Universidad de Castilla-La Mancha, Daniel.RodriguezLeon@uclm.es, Javier.Martin35@alu.uclm.es, AngelLuis.Morales@uclm.es, Eduardo.Palomares@uclm.es, Publio.Pintado@uclm.es

² Departamento de Tecnologías y Sistemas de Información, Universidad de Castilla-La Mancha, JulioAlberto.Lopez@uclm.es

Este trabajo propone el empleo, en trenes de alta y muy alta velocidad, de una suspensión secundaria neumática adaptativa que mejora el comportamiento de las tradicionales configuraciones pasivas sin emplear complejos sistemas activos o semiactivos. La adaptabilidad se consigue mediante un control tipo lookup table que determina la sección óptima del orificio que restringe el flujo de aire entre el muelle neumático y el depósito auxiliar para cualquier combinación de velocidad de operación (entre 300 y 400 km/h en intervalos de 25 km/h) y calidad de vía (4 calidades definidas según la norma ORE). Los diámetros óptimos se determinan previamente con el algoritmo metaheurístico Particle Swarm Optimization sobre un modelo 1D que incluye los modos flexibles de la caja y que ha sido validado por un modelo mult cuerpo 3D desarrollado en ANSYS y ADAMS VI-Rail. La función de coste empleada considera la media del índice de confort NMV medido en las tres ubicaciones que indica la norma UNE-EN-12299 (en el centro y los extremos del compartimento de pasajeros). La naturaleza estocástica del problema conduce a una distribución de probabilidad de diámetros óptimos para cada par velocidad-calidad de vía, de modo que los mapas de selección del diámetro óptimo se determinan a partir del percentil 50 de dicha distribución. Los resultados muestran que el uso del control adaptativo mejora el índice de confort NMV con respecto a una suspensión pasiva hasta en un 45% para una vía con bajas irregularidades recorrida a velocidades superiores a 375 km/h. De hecho, las mayores mejoras se observan para calidades de vía buenas o intermedias recorridas a altas velocidades, lo que apoya el empleo de este control dada la tendencia actual de aumentar las velocidades de operación y de mejorar las infraestructuras.

1. Introducción

El transporte ferroviario experimenta actualmente un notable crecimiento en Europa y, en particular, en España, ya que las distancias peninsulares se adaptan perfectamente a este tipo de transporte (ver Fig. 1). Sin embargo, los vehículos ferroviarios no son la excepción que escapa al efecto de las vibraciones mecánicas. Las amplias innovaciones llevadas a cabo en este sector, que conducen a una mayor velocidad de circulación de los trenes de pasajeros, hacen que la investigación en el campo de la seguridad y el confort sea esencial. En cuanto a la seguridad, es evidente que se han realizado pruebas en las líneas de alta velocidad existentes que han demostrado la viabilidad de velocidades próximas a los 500 km/h y, en algunos casos, superiores. En cuanto al confort, las vibraciones se producen por el deterioro de la calidad de los carriles debido al desgaste, lo que provoca irregularidades en las vías, que no pueden ser sustituidas debido a la complejidad logística y económica que conlleva. Además, el objetivo de las empresas del sector es fabricar trenes más ligeros, lo que supone una disminución de la rigidez de la estructura del coche y, en consecuencia, de las frecuencias naturales de la caja, que entran dentro del rango que afecta al confort y la salud de las personas.

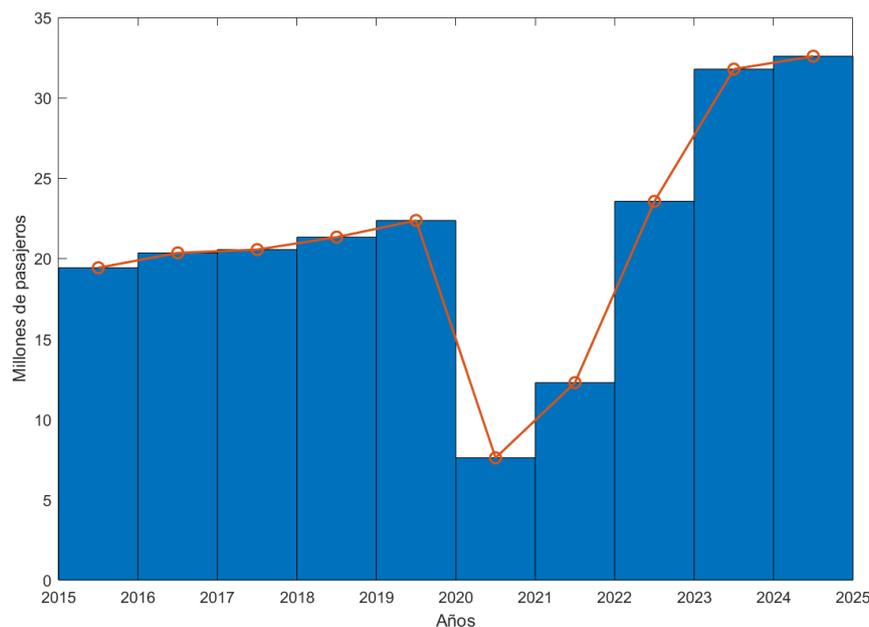


Figura 1: Evolución del número de pasajeros entrenes de alta velocidad en España [1].

Existen diversas maneras de abordar este problema. Las más populares son la implementación de sistemas de control activos o semiactivos [2 - 5] —muy efectivos en la reducción de vibraciones, pero requieren un alto coste de implementación y mantenimiento, además de su elevada complejidad, derivada de su necesidad de actuación instantánea—, o de técnicas pasivas —baratas y sencillas de implementar, pero carecen de adaptabilidad ante un cambio en alguna variable del problema—. En este caso se propone una solución mixta que combine las ventajas de los sistemas de control activos y pasivos, denominada control adaptativo y que consiste en el cálculo del diámetro óptimo del orificio que comunica el muelle neumático con el depósito auxiliar de la balona (Fig. 2). Aunque la adaptación tiene lugar en tiempos muy superiores a los tiempos característicos de la dinámica del sistema, la determinación del diámetro óptimo requiere un tiempo de cálculo que imposibilita su implementación *online* y mucho menos en tiempo real. Por ello, se propone un control adaptativo tipo *lookup table*, donde el diámetro óptimo para cada posible par calidad-velocidad ha sido previamente calculado mediante la optimización de una función objetivo construida según el enfoque tradicional de la evaluación del confort que establece la norma EN-12299 [6], que se basa en definir el confort como una serie de valores deterministas, como el Índice Medio de Confort (NMV). Dichos valores se obtienen mediante mediciones de aceleración realizadas en tres puntos del suelo de la carrocería (los dos extremos y el centro), con el coche en tara —que en este contexto se trata de un modelo unidimensional que incluye los modos flexibles de la caja y que ha sido validado por un modelo multicuerpo 3D desarrollado en ANSYS y ADAMS VI-Rail—. En este caso, la función propuesta es la media de los tres valores de confort y el óptimo, la dupla de valores (diámetro del orificio de la balona delantera y trasera) que minimicen dicha función.

Por tanto, en el presente artículo se presenta el diseño de un control adaptativo basado en el algoritmo metaheurístico *Particle Swarm Optimization* (PSO, por sus siglas en inglés) para el cálculo del diámetro óptimo de los orificios de restricción de las balonas, maximizando el confort, así como la evaluación de los resultados obtenidos ante diferentes velocidades y calidades de vía.

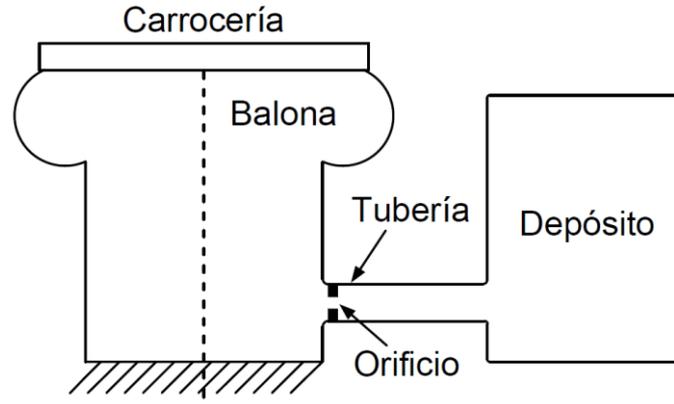


Figura 2: Representación esquemática del orificio que comunica el muelle de aire y el depósito auxiliar de la balona.

2. Modelo de tren

El modelo estudiado en este artículo toma como referencia la configuración y dimensiones de un Siemens Velaro o un Hitachi Shinkansen, es decir, una caja de gran longitud y dos bogies por coche. Este modelo se describe en la Fig. 3, mientras que los valores de los parámetros se recogen en la Tabla 1. Las irregularidades de la vía se representan como $z_{w1}(t)$, $z_{w2}(t)$, $z_{w3}(t)$, $z_{w4}(t)$. La suspensión primaria consiste en un sistema muelle-amortiguador, con un valor de rigidez k_p y un amortiguamiento c_p . Se incluyen el desplazamiento (z_{bf} y z_{br}) y la rotación (θ_{bf} y θ_{br}) de los bogies (masas semisuspendidas, con masa M_t e inercia J_t). La suspensión secundaria es un muelle neumático modelado como el sistema mecánico equivalente desarrollado por Oda y Nishimura [7]. El modelo considera los desplazamientos y rotaciones de la caja (masa suspendida, con masa M_c e inercia J_c) debidos a los modos rígidos de bote y cabeceo, así como a los modos flexibles de vibración. Por último, se incluyen los llamados *anti-yaw dampers*, que consisten en un sistema muelle-amortiguador en serie de rigidez k_{yd} y amortiguación c_{yd} .

La estructura del coche se ha modelado como una viga uniforme de Euler-Bernoulli en condiciones libre-libre, que es un modelo muy extendido en la literatura para este tipo de estructuras ligeras. Esta suposición conlleva la inclusión de infinitos modos de vibración, pero para el estudio sólo se han considerado los dos primeros modos flexibles, además de los rígidos, por ser los que se encuentran dentro del rango de frecuencias de confort (en torno a 4-25 Hz). La ecuación diferencial parcial que describe el comportamiento de la viga se escribe como

$$EI \frac{\partial^4 z(x,t)}{\partial x^4} + \mu I \frac{\partial^5 z(x,t)}{\partial t \partial x^4} + \rho \frac{\partial^2 z(x,t)}{\partial t^2} = -F_f \delta(x - L_1) - F_r \delta(x - L_2) + M_{ydf} \delta'(x - L_{ydf}) + M_{ydr} \delta'(x - L_{ydr}) \quad (1)$$

donde E es el módulo de elasticidad, I el momento de inercia de la sección transversal, μ el coeficiente de amortiguamiento estructural, ρ la masa por unidad de longitud, δ la función delta de Dirac, F_f y F_r las fuerzas ejercidas por las suspensiones secundarias delantera y trasera, respectivamente, y M_{ydf} y M_{ydr} los momentos ejercidos por los *anti-yaw dampers* delantero y trasero.

Tabla 1: Parámetros del coche.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
L_c [m]	25	k_3 (tare) [N/m]	$8.19 \cdot 10^4$
M_c [kg]	$21 \cdot 10^3$	c_f [N·s/m]	A determinar
J_c [kg·m ²]	$1.15 \cdot 10^6$	c_r [N·s/m]	A determinar
L_t [kg·m ²]	9	c_s [N·s/m]	$4 \cdot 10^3$
L_w [kg·m ²]	2.5	L_{ydc} [m]	0.5
M_t [kg]	2615	L_{ydb} [m]	0.01
J_t [kg·m ²]	1476	L_{ydt} [m]	1
k_p [N/m]	$8.8 \cdot 10^6$	f_1 [Hz]	9.6
c_p [N·s/m]	$3 \cdot 10^4$	ζ_1 [%]	2
k_1 (tare) [N/m]	$2.11 \cdot 10^6$	f_2 [Hz]	26.45
k_2 (tare) [N/m]	$8.86 \cdot 10^5$	ζ_2 [%]	3.8

Resolviendo esta ecuación por el método de separación de variables, el desplazamiento $z(x,t)$ puede escribirse como

$$z(x,t) = \sum_{i=1}^n W_i(x)q_i(t) \quad (2)$$

donde $W_i(x)$ y $q_i(t)$ son la función de forma y la función de coordenadas modales del i -ésimo modo. Aplicando las condiciones de contorno adecuadas, la función de forma resulta

$$W_i(x) = \cos(\beta_i x) + \cosh(\beta_i x) - \frac{\cos(\beta_i L_c) - \cosh(\beta_i L_c)}{\sin(\beta_i L_c) - \sinh(\beta_i L_c)} [\sin(\beta_i x) + \sinh(\beta_i x)] \quad (3)$$

donde, para los modos flexibles, $\beta_i = \lambda f \forall i=3..n$, con los valores de λ tabulados en [8]. Las soluciones particulares para los modos rígidos ($i=1,2$) pueden escribirse como $W_1(x)=1$ y $W_2(x)=x-L_c/2$.

Sustituyendo la Ec. 3 en la Ec. 2 y aplicando ortogonalidad se obtiene

$$\ddot{q}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -\frac{W_i(L_1)}{M_c} F_f - \frac{W_i(L_2)}{M_c} F_r - \frac{W_i'(L_{ydf})}{M_c} M_{ydf} - \frac{W_i'(L_{ydr})}{M_c} M_{ydr} - \sum_{j=1}^p \frac{W_i(L_{rj})}{M_c} F_{rj} \quad (4)$$

que es la ecuación dinámica para el i -ésimo modo flexible en términos de la coordenada modal q_i .

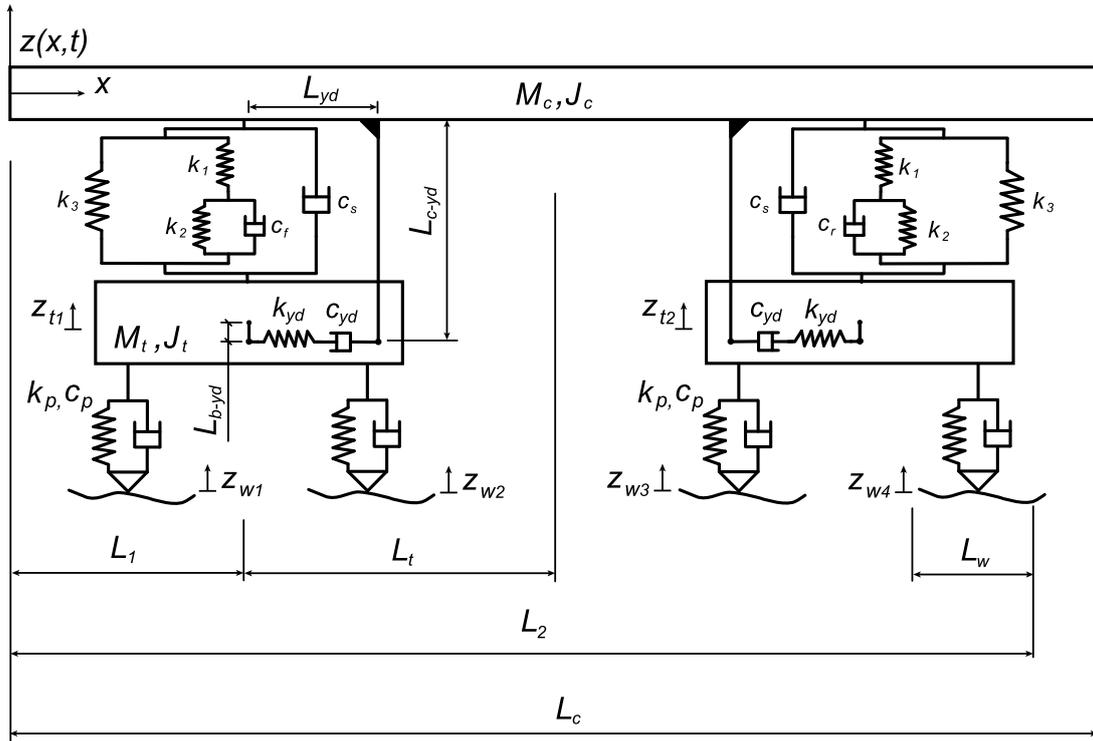


Figura 3: Modelo de tren utilizado en este artículo.

En cuanto a la suspensión secundaria, F_f y F_r se definen según el modelo propuesto por Oda y Nishimura [7], dando las siguientes ecuaciones diferenciales,

$$\dot{F}_f = 1/c_f [-F_f(k_1 + k_2) + k_4(z_f - z_{bf}) + c_f(k_1 + k_3)(\dot{z}_f - \dot{z}_{bf})] \quad (5)$$

$$\dot{F}_r = 1/c_r [-F_r(k_1 + k_2) + k_4(z_f - z_{br}) + c_r(k_1 + k_3)(\dot{z}_r - \dot{z}_{br})] \quad (6)$$

donde

$$k_4 = k_1k_2 + k_1k_3 + k_2k_3 \quad (7)$$

En definitiva, la finalidad de este modelo unidimensional es permitir estudios simplificados de la dinámica vertical de este tipo de trenes para diferentes velocidades de circulación, antes de abordar simulaciones tridimensionales más precisas, pero computacionalmente más costosas. No obstante, está previsto recurrir más adelante a modelos multicuerpo para realizar un estudio más completo.

3. Optimización

En las suspensiones neumáticas, el orificio que conecta el muelle neumático con el depósito suele tener un diámetro constante determinado durante la fase de diseño. Este trabajo propone un control adaptativo mediante el ajuste de los diámetros de los orificios delantero y trasero para modificar la rigidez dinámica y la amortiguación del vehículo con el fin de maximizar el confort de los pasajeros.

3.1. Problema de control óptimo

La función de coste a minimizar propuesta considera la influencia de las aceleraciones medidas en los tres puntos que indica la norma, quedando

$$f_c(d_f, d_r) = \frac{N_{MV a} + N_{MV b} + N_{MV c}}{3} \quad (8)$$

y siendo $N_{MV a}$, $N_{MV b}$ y $N_{MV c}$ el índice de confort medido en los extremos (subíndices a y c) y en el centro de la caja (subíndice b), definido como se establece en [6].

En cuanto a las restricciones a las que está sujeto el problema se han de considerar los máximos desplazamientos admisibles de la balona, ya que, si estos se exceden, pueden ocurrir problemas de seguridad y fuertes picos de fuerza transmitidos por el muelle de emergencia. Con objetivo de representar lo más fielmente posible esta restricción, se ha añadido una penalización exponencial a la función de coste en el caso en que se superen los desplazamientos máximos admisibles de las balonas (representados como k), de manera que

$$f_p = 7.975 \cdot 10^{-3} \cdot e^{1977(z_{cMáx} - (k - m))} \quad (9)$$

$$f'_c(d_f, d_r) = \begin{cases} f_c(d_f, d_r), & \text{si } z_{cMáx} \leq k - m \\ f_c(d_f, d_r) \cdot f_p, & \text{si } z_{cMáx} > k - m \end{cases} \quad (10)$$

Definiéndose f_p como la función de penalización, $z_{cMáx}$ como el máximo desplazamiento del muelle neumático (delantero o trasero) ocurrido, m como el margen que se ha dado como coeficiente de seguridad con objetivo de evitar valores límite y f'_c como la función de coste real a optimizar.

Como variables de control, se tienen los diámetros que restringen el paso del flujo entre el muelle neumático y el depósito donde se encuentra la reserva de aire (d_f y d_r) y que definen el amortiguamiento de la según las expresiones del modelo de Oda y Nishimura [7],

$$c_f = 0.126 \frac{gp_0A_0^2}{d_f^3T_0Rg} \quad (11)$$

$$c_r = 0.126 \frac{gp_0A_0^2}{d_r^3T_0Rg} \quad (12)$$

siendo c_f y c_r el amortiguamiento que aporta cada balona, g la aceleración de la gravedad, p_0 es la presión inicial absoluta en la balona, T_0 es la temperatura inicial del aire dentro del aire a presión, A_0 y V_0 , el área efectiva y volumen del muelle neumático, respectivamente, y R_g la constante másica de los gases ideales.

3.2. Algoritmo de optimización

El algoritmo de optimización del que se ha hecho uso para la resolución del problema descrito es el *Particle Swarm Optimization* —Optimización por Enjambre de partículas, en castellano—. Se trata de una técnica de optimización metaheurística cuyo funcionamiento se inspira en el comportamiento colectivo de enjambres, como bandadas de aves o bancos de peces, para encontrar soluciones óptimas a problemas de optimización complejos. Cada partícula hace referencia a una evaluación de la función objetivo, que es candidata a máximo/mínimo. El conjunto de partículas coexiste y coopera simultáneamente, ‘sobrevolando’ el área de búsqueda, esperando aterrizar sobre la mejor ‘solución’, identificándose, en esta comparación, el área de búsqueda como el conjunto de soluciones posibles y el grupo o enjambre de partículas voladoras con las continuas evaluaciones de la función objetivo. Continuando con la analogía, a lo largo de la serie de iteraciones, cada partícula realiza un seguimiento de su mejor solución individual, así como de la mejor solución global. Posteriormente, cada partícula ajusta dos parámetros: la velocidad de vuelo y la posición. Dinámicamente, cada partícula modifica su velocidad de vuelo en función de su propia experiencia y la de las partículas vecinas. De manera similar, intenta cambiar su posición utilizando la información de su posición actual, su velocidad, la distancia entre su posición actual y su óptimo personal, y la distancia entre su posición actual y el óptimo del enjambre (ver Fig. 4). El enjambre de partículas continúa moviéndose hacia una región prometedora hasta alcanzar el óptimo global, resolviendo así el problema de optimización [9]. Esto matemáticamente, se expresa como

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (13)$$

donde x hace referencia a la posición, t al número de iteración e i a la partícula i -ésima. Siendo v_i^{t+1} la velocidad de la partícula, definida a través de la Ec. 13,

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1r_1(p_i^t - x_i^t) + c_2r_2(g^t - x_i^t) \quad (13)$$

donde w se conoce como el factor de inercia, c_1 y c_2 hacen referencia a las constantes de aceleración, r_1 y r_2 son números aleatorios entre 0 y 1, y p y g representan la mejor solución encontrada por una partícula y por el enjambre hasta la iteración t , respectivamente.

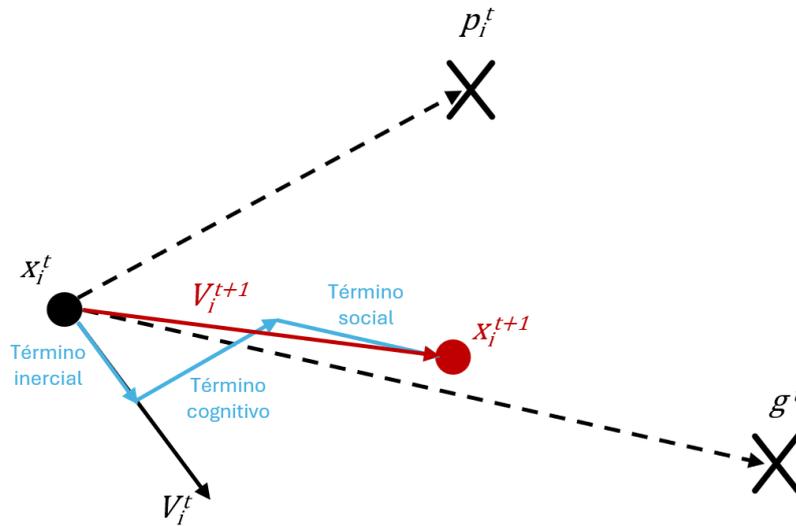


Figura 4: Esquema de funcionamiento del algoritmo de optimización PSO.

Aunque existen metodologías para la determinación de los hiperparámetros óptimos de un problema, el método de prueba y error se emplea comúnmente en la literatura relacionada con buenos resultados.

La elección del número de partículas es crítica, ya que un número elevado incrementará la complejidad del análisis (implicando un aumento de evaluaciones de la función) en beneficio de mejorar la precisión de la solución [10]. Ali Khan et al. [11] recomiendan el uso de 30 partículas, argumentando que entre 20 y 100 partículas no suele haber cambios significativos en los resultados de la optimización. Qimin et al. [12] explican que típicamente el número de partículas suele estar entre 20 y 40, pudiendo variar este rango en función de la complejidad del

problema. Shami et al. [13] sugieren un rango entre 20 y 50 partículas para obtener una buena solución sin incrementar el coste computacional en exceso.

Para este estudio se han tomado como referencia los hiperparámetros básicos empleados en los algoritmos de García-Ródenas et al. [14,15]. En concreto, se emplean 30 partículas (n), 30 iteraciones (t) y 30 ejecuciones (j). Por otro lado, los parámetros w , c_1 y c_2 se eligieron en base a los valores predeterminados de la función de MATLAB ‘particleswarm’. Las pruebas iniciales demostraron que estos parámetros eran suficientes para conseguir la convergencia de la solución con un coste computacional asumible.

Las razones de la elección de este método residen en el hecho de que los problemas de optimización de alta complejidad no pueden resolverse de forma óptima, o con cualquier límite garantizado, mediante un método determinista en un plazo razonable de tiempo [16]. En cambio, para este tipo de aplicaciones, en las cuales se cuenta con variables de carácter estocástico, los algoritmos metaheurísticos son idóneos, ya que están diseñados para resolver de forma aproximada los problemas sin tener que adaptarse profundamente a ellos. Por tanto, permiten llegar a la solución óptima o dar una muy buena aproximación de la misma en un tiempo razonable y con un bajo coste computacional [14,17].

3.3. Proceso de optimización

El proceso de optimización se esquematiza en la Fig. 5. En primer lugar, una vez fijados los hiperparámetros del método de optimización, como entradas al problema se tiene la calidad de la vía a estudiar y la velocidad del tren. De acuerdo con esto, se genera una muestra de vía aleatoria y se resuelve el modelo descrito en el apartado anterior sujeto a las restricciones especificadas. Una vez se logra la convergencia del algoritmo se obtiene una distribución probabilística de diámetros óptimos en función de la velocidad del tren y la calidad de la vía por la que se desplaza. Con esta información, se dibuja un mapa que condensa toda esta información en el que se muestran los diámetros óptimos a escoger en función de las variables mencionadas y que servirá de base (*lookup table*) para el control adaptativo.

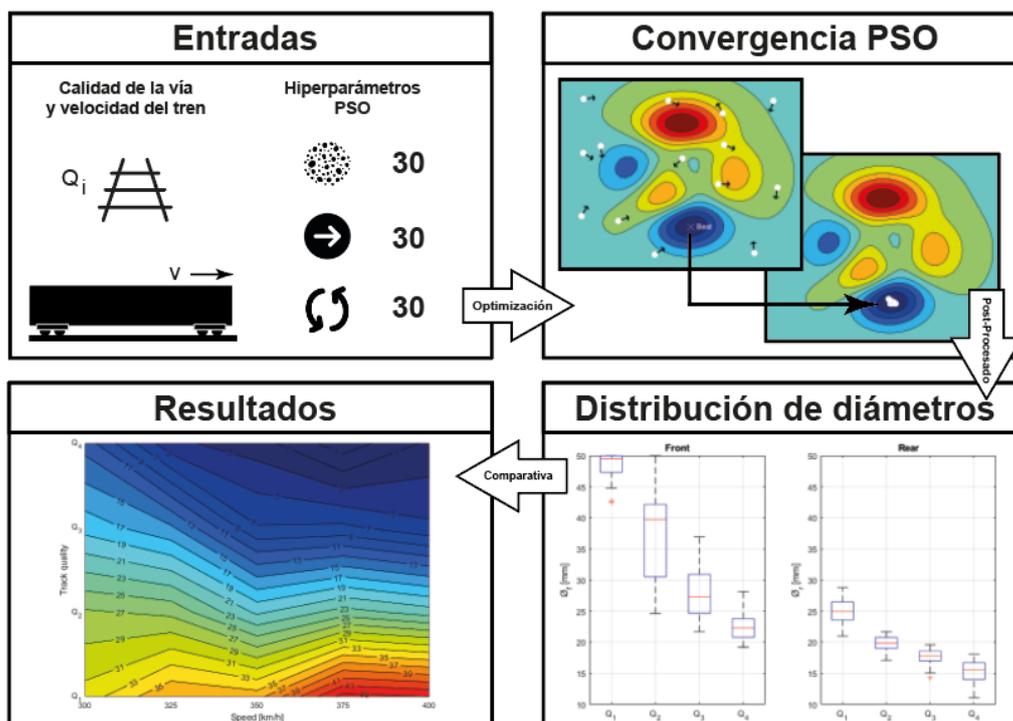


Figura 5: Esquema del procedimiento de optimización de la sección del orificio para el control adaptativo.

4. Resultados

El problema de control óptimo definido en la Sección 3 se ha resuelto para la combinación de cuatro calidades de vía y cinco velocidades del tren (de 300 a 400 km/h en incrementos de 25 km/h). No obstante, dado que para cada combinación específica de velocidad y calidad de vía se pueden obtener infinitos perfiles de esta, se ha decidido que seleccionar una muestra de treinta señales temporales aleatorias es razonable atendiendo a un compromiso entre la precisión de los resultados y tiempo de computación necesario para la resolución del problema.

Los resultados de la optimización recogen 20 propuestas de diámetros óptimos delanteros y otros tantos traseros (para cada uno de los 20 pares calidad-velocidad considerados). Con la intención de entender mejor estos

resultados, los diámetros se han graficado en forma de *boxplot* y se ha escogido la mediana (PC50) como valor de referencia para el control adaptativo.

La Fig. 6 representa la distribución de los diámetros óptimos. En los cuatro tipos de calidad de vía, el diámetro del orificio de la balona trasera ha sido inferior al de la delantera. Esto se traduce en que el eje trasero es más restrictivo a la hora de mejorar el confort en el vehículo, además de que rigidizar la balona delantera tiene influencia en la trasera mediante el cabeceo.

También es destacable la aparición de valores atípicos en los *boxplot*. Estos se pueden producir debido a que, en momentos puntuales, durante los 300 segundos de simulación dinámica, el perfil de la vía sea excesivamente irregular. Este hecho se manifiesta principalmente en los diámetros correspondientes a la calidad Q_1 (Fig. 5.3) ya que es el perfil de vía con menores irregularidades y la aparición de irregularidades anormales afecta en mayor medida al diámetro óptimo.

La Fig. 7 muestra los mapas de control con los valores del PC50 de los diámetros del orificio de la balona delantera y trasera. Se distingue fácilmente que el rango de valores en el que se trabaja en el eje delantero es mayor al que se trabaja en el eje trasero. También se observa claramente que el valor de los diámetros óptimos tiene una tendencia descendente a medida que la velocidad del tren aumenta y la calidad de vía disminuye. Esto se debe a que la suspensión neumática filtra más vibraciones con bajas restricciones al flujo de aire y, por tanto, cuando es más flexible dinámicamente; pero con mayores velocidades y peores calidades de vía, la suspensión debe rigidizarse para cumplir las restricciones de máximo recorrido de la balona.

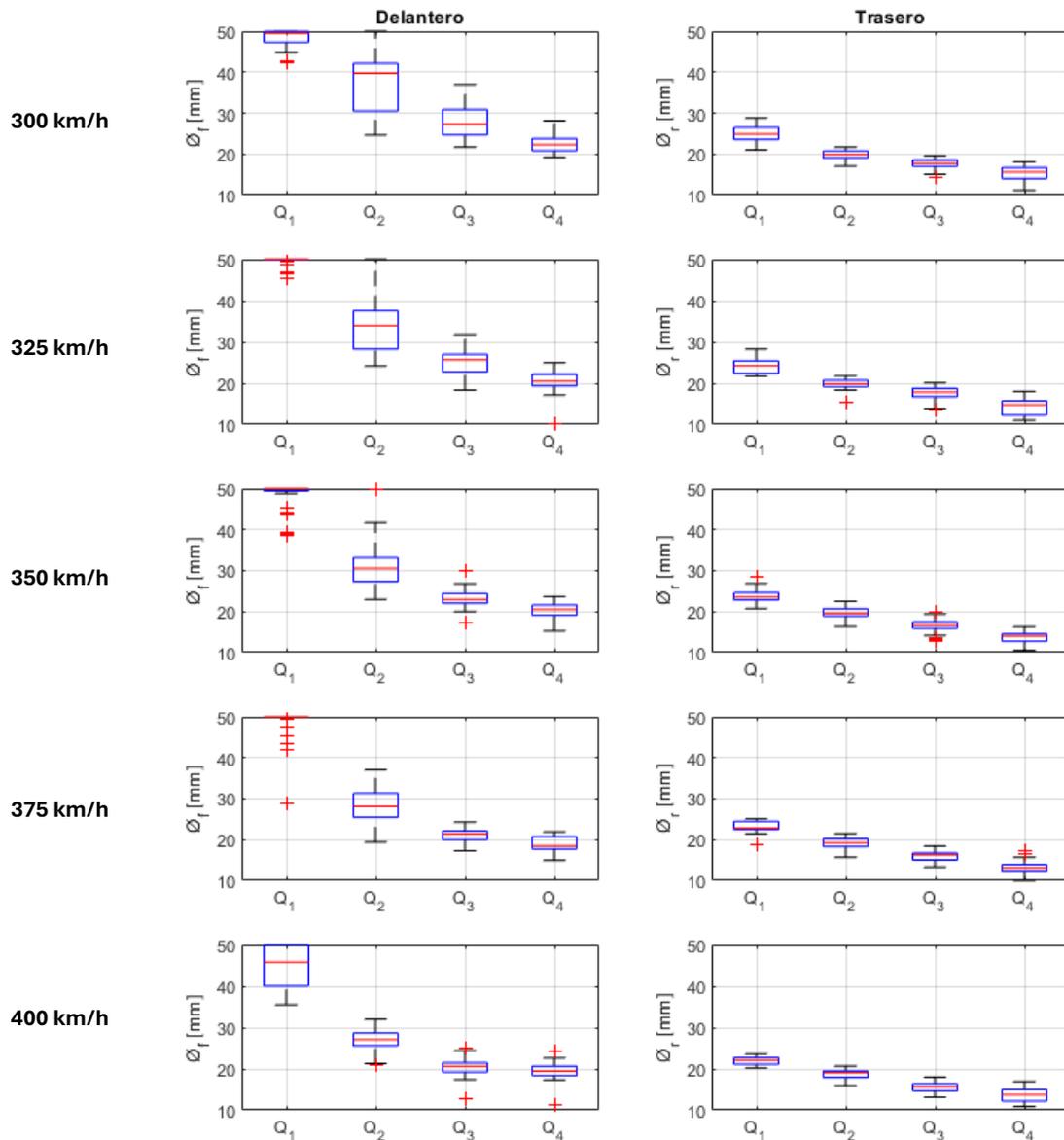


Figura 6: Boxplot de los diámetros delanteros (columna izquierda) y traseros (columna derecha) para cada velocidad estudiada.

Con el objetivo de cuantificar la mejora obtenida en el confort por medio de la optimización de los diámetros delantero y trasero de las balonas del vehículo se ha realizado una comparación tomando como base una configuración predeterminada en la que se ha establecido un diámetro de orificio de 15 mm, tanto para la balona trasera como para la delantera. En la Fig. 8 muestran los mapas de confort resultantes de la implementación de esta configuración base y de la configuración óptima calculada en función de la velocidad del tren y de la calidad de la vía. Como se puede observar, los valores de NMV de la configuración base son notablemente superiores a sus homólogos optimizados, logrando una mejora significativa en el confort del vehículo ferroviario cuantificada en la Fig. 9, donde se observa que estas mejoras, para calidades de vía buenas y velocidades altas se consigue reducir este índice en valores cercanos al 50%.

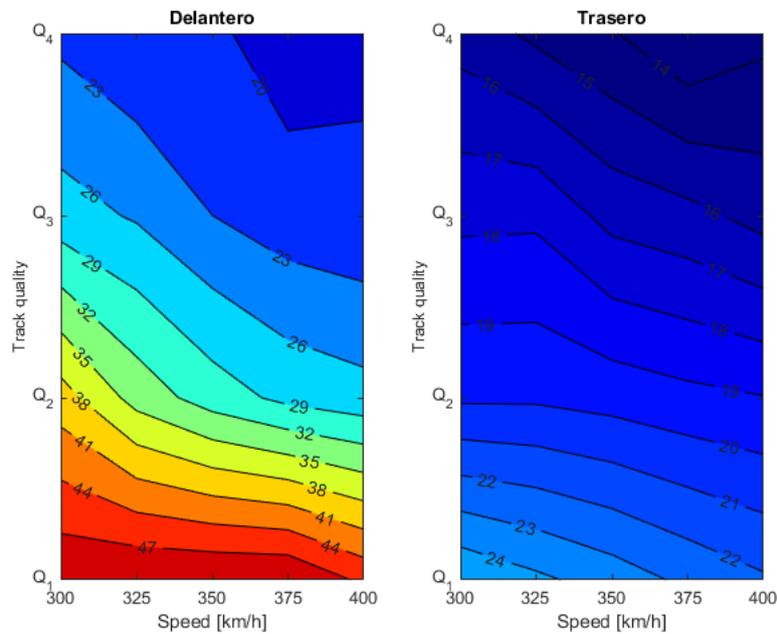


Figura 7: Mapas de selección del diámetro óptimo delantero y trasero en función de la calidad de vía y la velocidad de operación del tren.

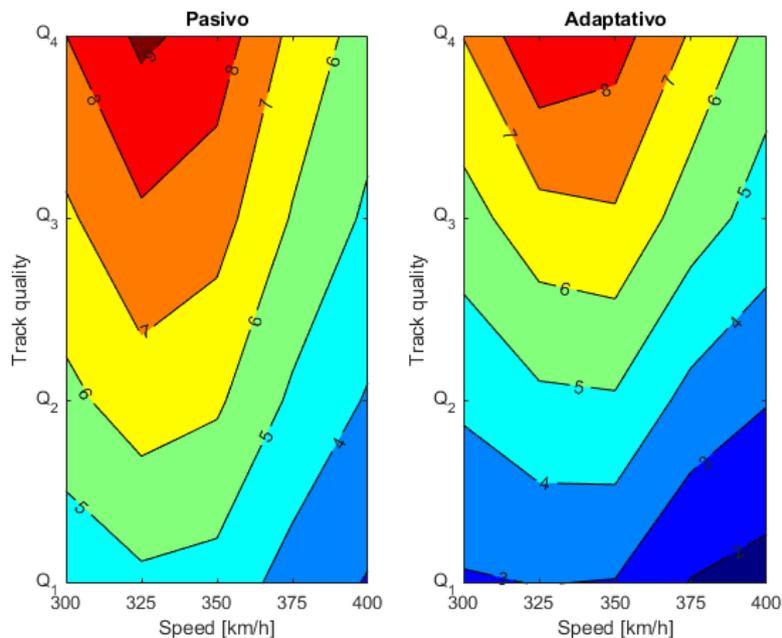


Figura 8: Mediana del índice de confort N_{MV} en función de la calidad de vía y de la velocidad de operación para una suspensión pasiva base de 15 mm de diámetro y una suspensión que implementa un control óptimo adaptativo.

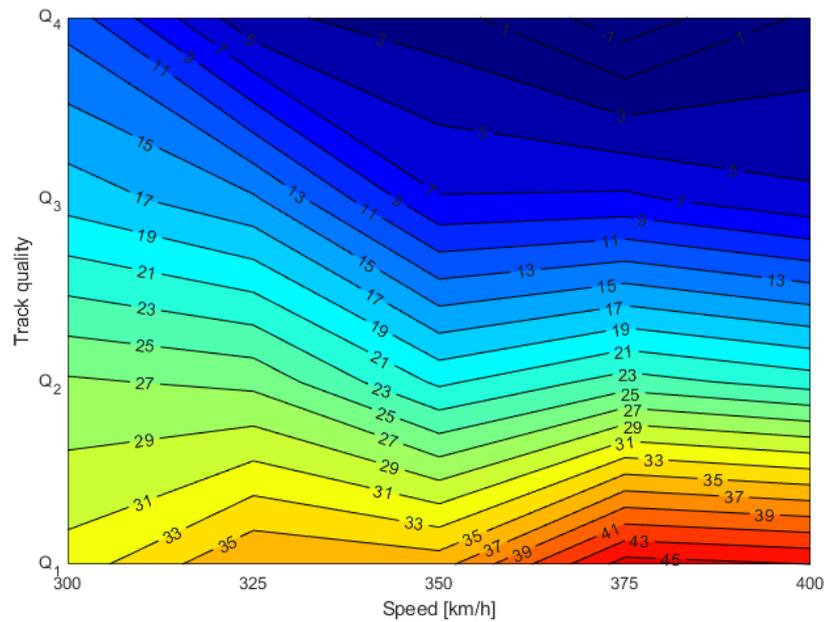


Figura 9: Porcentaje de mejora del índice N_{MV} de la suspensión con control adaptativo frente a la suspensión pasiva con diámetro base de 15 mm.

5. Conclusiones

En el presente artículo se ha demostrado la viabilidad y ventajosas prestaciones en cuanto a confort del pasajero de una suspensión secundaria neumática adaptativa para trenes de muy alta velocidad, alcanzando mejoras de hasta un 45% frente a una suspensión pasiva tradicional. La adaptabilidad se consigue mediante la variación de la sección que restringe el flujo entre el muelle neumático y el depósito auxiliar de paredes rígidas. El diámetro óptimo se selecciona mediante un control adaptativo tipo *lookup table*, en el que los diámetros óptimos han sido previamente determinados mediante el algoritmo metaheurístico *Particle Swarm Optimization* para cualquier combinación de velocidad de operación y calidad de vía. Concretamente:

- El modelo 1D desarrollado para determinar la dinámica vertical del tren es suficientemente preciso para emplearse en el diseño del control adaptativo, con la consecuente reducción de coste computacional que ello supone. Este modelo 1D ha sido validado con un modelo multicuerpo 3D realista desarrollado en ADAMS VI-Rail.
- Los hiperparámetros empleados en el algoritmo metaheurístico PSO permiten la convergencia de la optimización con un coste computacional razonable.
- El control adaptativo aplicado en la suspensión secundaria mejora el índice NMV con respecto a una suspensión pasiva hasta en un 45% para la mejor calidad de vía y velocidades superiores a 375 km/h. Las mayores mejoras se observan para calidades de vía buenas o intermedias recorridas a altas velocidades, lo que apoya el empleo de este control dada la tendencia actual de aumentar las velocidades de operación y mejorar las infraestructuras.

6. Agradecimientos

Este trabajo ha contado con el apoyo del proyecto PID2023-148169OB-I00, financiado por la UE a través del FEDER y por MICIU/AEI/10.13039/501100011033, y del proyecto SBPLY/23/180225/000172, financiado por la UE a través del FEDER y por la JCCM a través de INNOCAM.

7. Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadística (INE). (2024). *Estadística de transporte de viajeros*. <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=20239>
- [2] Zhang, C., Kordestani, H., & Shadabfar, M. (2023). A combined review of vibration control strategies for high-speed trains and railway infrastructures: *Challenges and solutions*. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 42 (1), 272-291.

- [3] Fu, B., Giossi, R. L., Persson, R., Stichel, S., Bruni, S., & Goodall, R. (2020). Active suspension in railway vehicles: a literature survey. *Railway Engineering Science*, 28, 3-35.
- [4] Zong, L. H., Gong, X. L., Xuan, S. H., & Guo, C. Y. (2013). Semi-active H1 control of high-speed railway vehicle suspension with magnetorheological dampers. *Vehicle System Dynamics*, 51 (5), 600-626.
- [5] Allotta, B., Pugi, L., Colla, V., Bartolini, F., & Cangioli, F. (2011). Design and optimization of a semi-active suspension system for railway applications. *Journal of Modern Transportation*, 19, 223-232.
- [6] CEN, EN 12299:2009. *Railway applications—ride comfort for passengers—measurements and evaluation. Standard*, 2009.
- [7] Oda, N & Nishimura, S. Vibration of air suspension bogies and their design. *Bull JSME*. 1970; 13(55):43-51.
- [8] S. S. Rao, *Vibration of Continuous Systems*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [9] Marini, F. & Walczak, B. (2015). Particle swarm optimization (PSO). A tutorial. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 149, 153-165.
- [10] He, Y., Ma, W. J., & Zhang, J. P. (2016). The parameters selection of PSO algorithm influencing on performance of fault diagnosis. In *MATEC Web of conferences* (Vol. 63, p. 02019). EDP Sciences.
- [11] Khan, T. A., Taj, T. A., Asif, M. K., & Ijaz, I. (2012, September). Modeling of a standard Particle Swarm Optimization algorithm in MATLAB by different benchmarks. In *Second International Conference on the Innovative Computing Technology (INTECH 2012)* (pp. 271-274). IEEE.
- [12] Qimin, X., Liwei, L., & Qili, X. (2009). The optimal design and simulation of helical spring based on particle swarm algorithm and MATLAB. *Wseas transactions on circuits and systems*, 8(1), 84-93.
- [13] Shami, T. M., El-Saleh, A. A., Alswaitti, M., Al-Tashi, Q., Summakieh, M. A., & Mirjalili, S. (2022). Particle swarm optimization: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 10, 10031-10061.
- [14] García-Ródenas, R., Linares, L. J., & López-Gómez, J. A. (2019). A memetic chaotic gravitational search algorithm for unconstrained global optimization problems. *Applied Soft Computing*, 79, 14-29.
- [15] García-Ródenas, R., Linares, L. J., & López-Gómez, J. A. (2021). Memetic algorithms for training feedforward neural networks: an approach based on gravitational search algorithm. *Neural Computing and Applications*, 33 (7), 2561-2588.
- [16] Boussaïd, I., Lepagnot, J., & Siarry, P. (2013). A survey on optimization metaheuristics. *Information Sciences*, 237, 82-117. *Information sciences*, 237, 82-117.
- [17] Alancay, N., Villagra, S., & Villagra, N. A. (2016). Algoritmos metaheurísticos trayectoriales para optimizar problemas combinatorios. *Informe Científico Técnico UNPA*, 8(3), 56-75.