

¿Pueden los trenes de alta velocidad circular más deprisa y reducir el consumo de energía?

Ignacio González Franco

igonzalez@ffe.es

Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Resumen: Incrementar la velocidad a la que un tren puede circular en los tramos de bajada (pendientes) por acción de la fuerza de la gravedad y de la inercia del tren, puede suponer una reducción del tiempo de viaje y una reducción de la energía consumida (debido a la reducción del uso del freno). Además, este incremento de la velocidad en las pendientes (bajadas) ofrece otras posibilidades como la reducción de la potencia de los trenes y/o la reducción de la velocidad máxima. Ambas alternativas permiten mantener el tiempo de viaje necesario en un trayecto, la pérdida de tiempo en rampas (subidas) y en tramos horizontales, se verá compensada con la ganancia de tiempo en las pendientes (bajadas). Esto supone a su vez una reducción en los costes de los trenes y una reducción adicional en el consumo de energía.

Palabras Clave: Velocidad máxima, eficiencia, pendiente de bajada, energía consumida, potencia.

Introducción

La velocidad que puede conseguirse en una rampa (subida) de un valor determinado depende de forma muy directa de la potencia del tren o, más exactamente, de la relación entre potencia y masa (la velocidad es más elevada con un cociente alto potencia/masa).

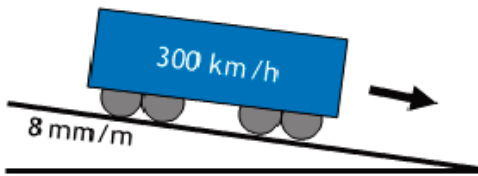
El grado de inclinación tanto en las rampas (subida) como en las pendientes (bajadas) es un parámetro que influye en la velocidad media de los trenes e indirectamente en el consumo de energía de los mismos.

Como recordatorio de la dinámica de un sólido rígido, cuando un vehículo entra en una pendiente (bajada) a una determinada velocidad, pueden darse tres casos diferentes teniendo en cuenta la inclinación de la pendiente, en los que actuará de manera distinta para mantener esta velocidad:

- Si la pendiente real¹ en la que se encuentra es menor que la pendiente de equilibrio², el vehículo tiene que traccionar para mantener su velocidad.

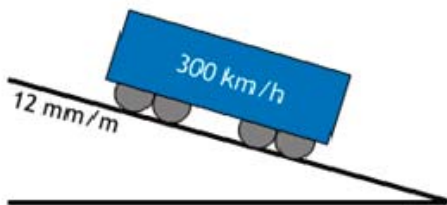
- Si la pendiente real coincide con la pendiente de equilibrio, en este caso para mantener la velocidad no es necesario ni traccionar ni frenar.

- Si la pendiente real es menor que la pendiente de equilibrio, para mantener la velocidad el vehículo debe frenar.



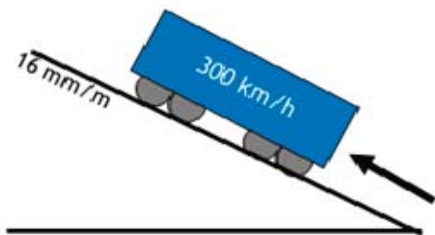
$$1. \text{ Si } p < p_{eV_{\max}} = a + bV_{\max} + cV_{\max}^2$$

Es necesario traccionar para mantener V_{\max}



$$1. \text{ Si } p = p_{eV_{\max}} = a + bV_{\max} + cV_{\max}^2$$

Mantiene V_{\max} sin traccionar ni frenar



$$1. \text{ Si } p > p_{eV_{\max}} = a + bV_{\max} + cV_{\max}^2$$

Es necesario frenar para no rebasar V_{\max}
- **Entonces se pierde energía**

Figura 1. Casos posibles para mantener la velocidad máxima (300 km/h), en una bajada

Por lo tanto, la pérdida o la ganancia de velocidad, depende en gran medida de la inclinación de la pendiente. Por ejemplo, con una pendiente de bajada mayor que la pendiente de equilibrio, como se ha mostrado en la figura anterior, se produce una ganancia de velocidad. De hecho, por cada 10 milésimas se incrementa o disminuye la aceleración del tren en $0,1 \text{ m/s}^2$ (dependiendo de si esas 10 milésimas son rampa o pendiente de bajada).

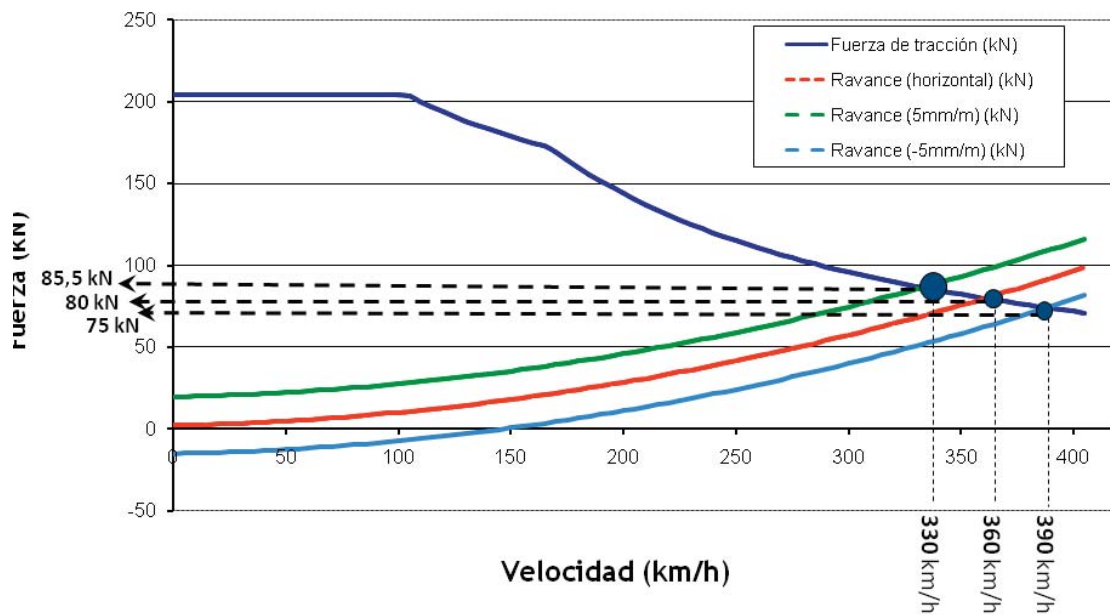
El hecho de que se incremente la aceleración supone que existe una variación de la velocidad en el sistema, es decir supone que se produzca un incremento de la velocidad del tren.

¹ Pendiente real es aquella por la que cirula un vehículo en un tramo determinado, normalmente se expresa en el ferrocarril en milímetro por metro (mm/m).

² Pendiente de equilibrio para una determinada velocidad (por ejemplo, la máxima del tren) es aquella en la que la fuerza de gravedad se iguala a la fuerza resistente (resistencia al avance) y el tren está en equilibrio y mantiene por ello su velocidad de circulación. La pendiente de equilibrio es diferente para cada tren y para cada velocidad.

La velocidad máxima a la que puede circular el tren está gráficamente determinada por la intersección entre la curva del esfuerzo tractor máximo y la resistencia al avance en la rampa que se encuentra.

A continuación se muestra un ejemplo del tren de la serie 102 de Talgo-Bombardier. El punto de intersección entre la curva de esfuerzo de tracción máximo y la curva de resistencia al avance en una pendiente de 5 mm/m, corresponde a 330 km/h, empleando una fuerza de tracción a esa velocidad de 85,5 kN.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Curva característica del tren de la Serie 102 de Talgo-Bombardier

Por lo tanto, a cada valor de rampa corresponde una velocidad máxima posible; y análogamente, por cada velocidad máxima hay una rampa en la que puede mantenerse.

Como se observa en la gráfica, este tren en horizontal puede alcanzar una velocidad de 360 km/h (con una fuerza de 75 kN); o incluso, en una pendiente de -5 mm/m podría llegar a una velocidad de 390 km/h (con un esfuerzo de 80 kN).

Por ello surgen varias preguntas: ¿Qué razón hay para que este tren no pueda circular a una velocidad mayor de 330 km/h en horizontal o bajada?, o ¿por qué limitar la velocidad a 330 km/h, si tiene freno suficiente y cumple las condiciones dinámicas establecidas por la ETI en el artículo 4.2.3.4.2 (relativo a valores límite del comportamiento dinámico del material rodante para la seguridad de la circulación)?.

Como ejemplo complementario, el tren híbrido de Talgo de la serie 730 dispone de tres velocidades máximas diferentes, dependiendo del tipo de tracción que utilice y del perfil de la vía en la que se encuentre. En este caso, se observa con mayor claridad las diferentes velocidades máximas que podría alcanzar según el tipo de tracción a la que circule (tracción eléctrica 25 kV, 3 kV o tracción diesel) y el tipo de perfil de la vía.

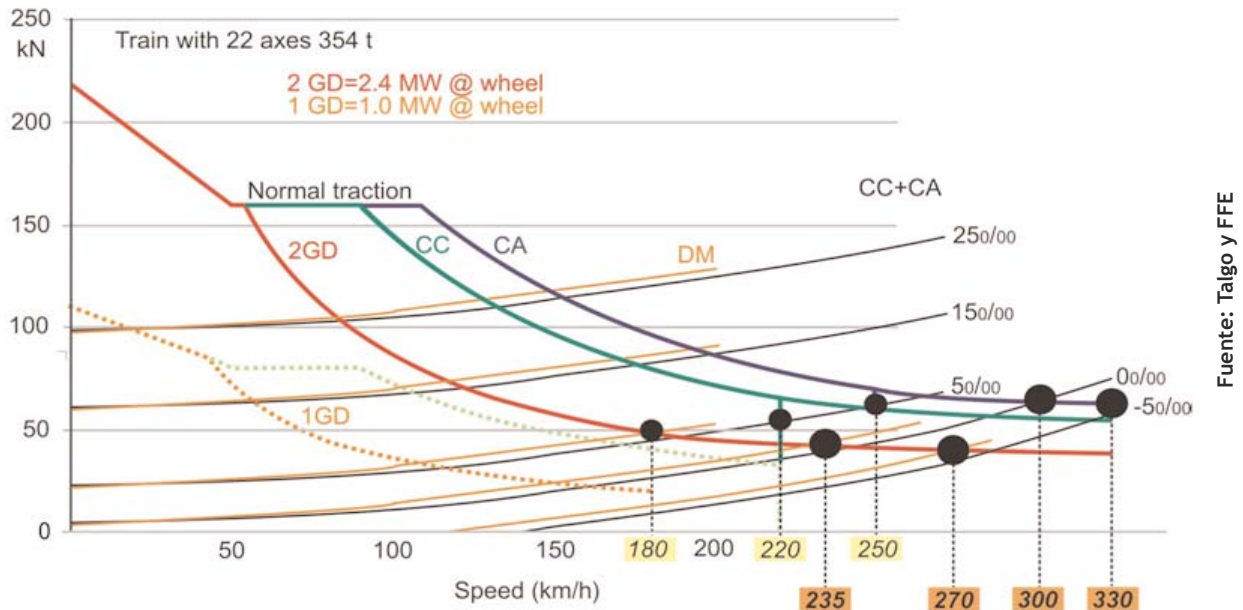


Figura 3. Curva característica del tren híbrido de la serie 730 de Talgo

Este hecho explica que existan diferentes velocidades máximas para un mismo tren, y explica a su vez que el tren en funcionamiento con tracción diesel, aunque por dinámica o por capacidad de freno o por señalización, no pueda tener una velocidad máxima igual que cuando circula con tracción eléctrica.

El mismo tren, que por dinámica y capacidad de freno puede alcanzar 250 km/h, cuando funciona en tracción eléctrica a 25 kV, ¿por qué no puede alcanzar esta velocidad con tracción diesel en tramos de infraestructura que le aporten la aceleración necesaria para alcanzar la misma.

Además, en el gráfico se muestra qué velocidades máximas podría alcanzar este tren en tramos horizontales y en pendientes de bajada de 5 milésimas, observándose que podría alcanzar velocidades máximas superiores a las que tiene especificadas.

Metodología. Alternativa propuesta

Supongamos que, como se propone, la velocidad máxima del tren es aquella que éste puede alcanzar sin rebasar las condiciones y valores dinámicos, y que le permite frenar en las longitudes necesarias en las pendientes más pronunciadas. En tal caso:

- En tramos horizontales y en las rampas (subidas) la situación sería idéntica a la situación actual, es decir, circular a la misma velocidad.

- En las pendientes (bajada) el tren podría ir a mayor velocidad que la estipulada (lo que se traduce en una reducción del tiempo de viaje) y además, el tren tendría que frenar menos (con lo cual se reduce el consumo de energía, especialmente en ausencia de freno regenerativo).

Por lo tanto, permitiendo un incremento en la velocidad máxima en tramos de bajada, se puede conseguir:

1. Una disminución en el consumo de energía; el hecho de permitir un aumento de velocidad en pendientes, implica que el tren no tenga que frenar para adecuarse a la velocidad máxima. No frenar supone no disipar energía. Esta energía no disipada es utilizada para mantener o aumentar la velocidad.

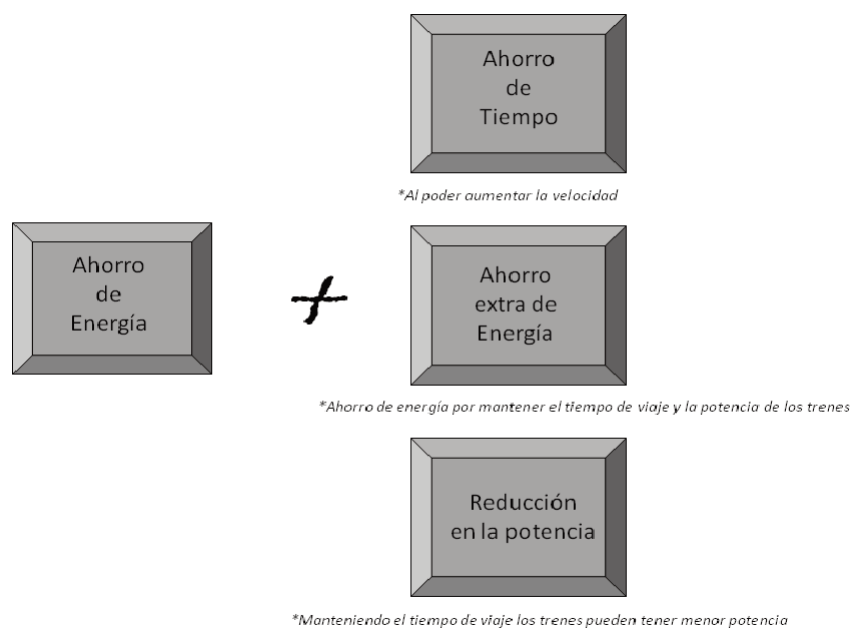
2. Dependiendo de aquello que se pretenda, incrementar la velocidad de las bajadas puede proporcionar tres escenarios diferentes y todos ellos ventajosos:

- Una *reducción en el tiempo de viaje*. La posibilidad de ir a una mayor velocidad en determinados tramos de la línea supone una reducción en el tiempo de viaje.

- Un *ahorro adicional de energía*. Manteniendo el tiempo de viaje es posible que el tiempo que se gana en los tramos de bajada debido a que el tren circula a una mayor velocidad, permita reducir la velocidad en tramos horizontales, produciendo un ahorro (adicional al anterior) en el consumo de energía.

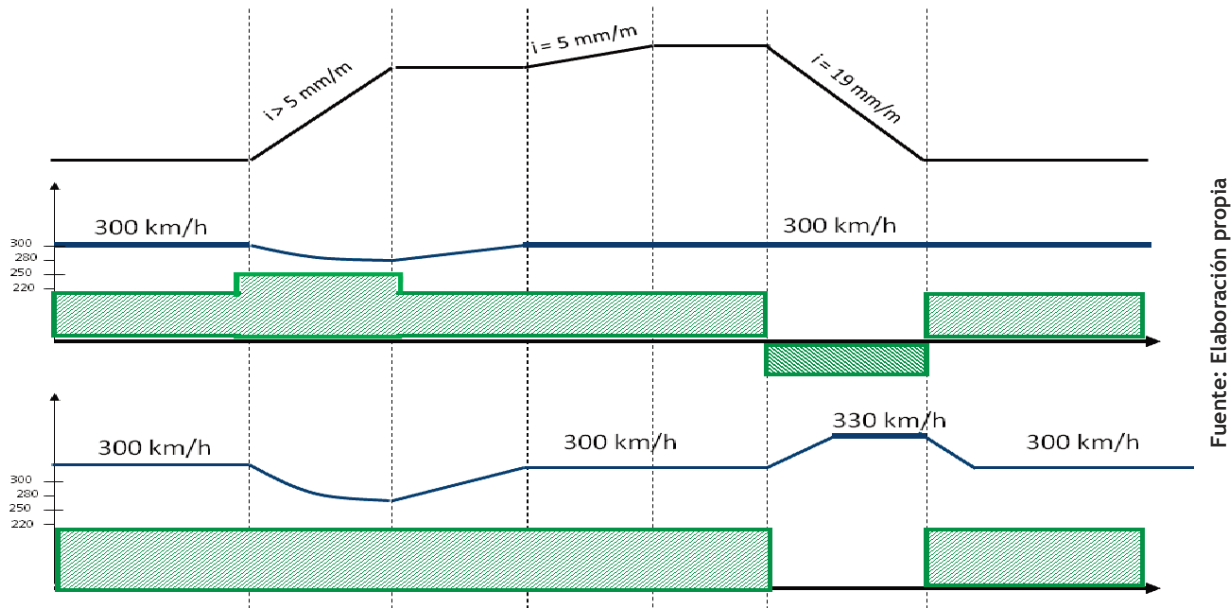
- Una *reducción en la potencia de los trenes*. Disminuir la potencia de los trenes reducirá la velocidad máxima con la que se puede circular en las rampas, pero al igual que en el caso anterior, esta pérdida de tiempo se verá compensada con el incremento de velocidad en las pendientes (bajadas), lo que permitirá mantener el tiempo de viaje con una reducción en los costes (al tener menor potencia los trenes costarán menos).

A continuación se muestra gráficamente las velocidades máximas y la energía necesaria para mantener estas velocidades en un perfil de línea determinado, para dos escenarios distintos (uno siguiendo el criterio determinado por la ETI y otro siguiendo el cambio de criterio propuesto).



Fuente. Elaboración propia

Figura 4. Ahorros debidos al aumento de la velocidad máxima



Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Gráfico de velocidades y energía según criterio de la aceleración residual de 5 cm/s^2 y criterio propuesto en un perfil determinado

Efecto energético del aumento de velocidad

Se ha afirmado que un aumento de la velocidad en la pendiente (bajada) puede reducir el consumo de la energía. Ello es consecuencia directa del menor uso del freno y, ya que la energía que se disipa en el freno se pierde, un menor uso del mismo supone menor pérdida de energía, y por tanto menor necesidad de importarla.

García Álvarez, Alberto (2011) ha calculado la diferencia del consumo de energía disipada por el freno en las pendientes, en la línea Madrid-Barcelona, para un tren de la serie 102 de Talgo en función de la velocidad máxima. Puede observarse como, a una velocidad máxima de 200 kilómetros por hora, la pérdida de energía disipada en pendientes es de 1.995,3 kilovatios hora, mientras que a 350 kilómetros por hora la pérdida es solo de 492 kilovatios hora.

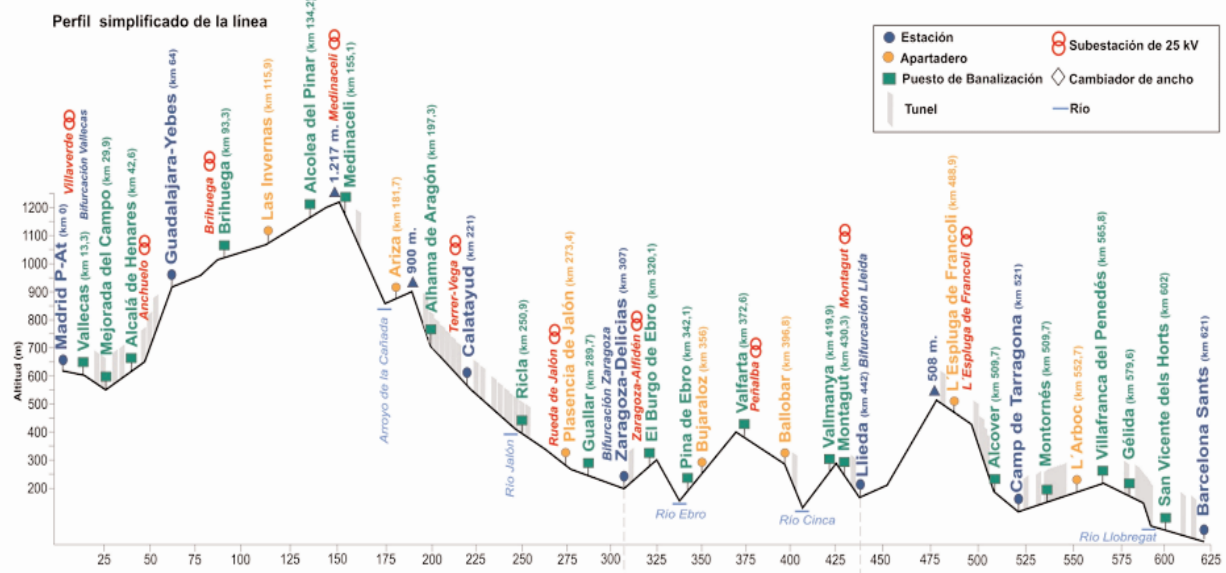
Tabla 1. Energía disipada del freno en pendientes en el recorrido Madrid - Barcelona

Incidencia de la velocidad máxima en la pendiente de equilibrio, el exceso de altura y el consumo de energía						
Velocidad	Pendiente de equilibrio (mm/km)	Madrid-Barcelona		Barcelona-Madrid		Ambos sentidos
		Exceso de altura (mm/km)	Energía (kWh)	Exceso de altura (mm/km)	Energía (kWh)	
200	-6,85	3.479	1.995,3	2.537	1.454,9	3.450,2
210	-7,41	3.299	1.892,2	2.383	1.366,7	3.258,9
220	-7,99	3.118	1.788,3	2.227	1.277,4	3.065,7
230	-8,59	2.940	1.686,3	2.074	1.189,7	2.876,0
240	-9,22	2.760	1.583,2	1.922	1.102,5	2.685,7
250	-9,88	2.579	1.479,5	1.776	1.018,9	2.498,4
260	-10,55	2.403	1.378,6	1.638	939,5	2.318,0
270	-11,25	2.225	1.276,2	1.505	863,4	2.139,6
280	-11,98	2.042	1.171,5	1.371	786,6	1.958,1
290	-12,73	1.861	1.067,7	1.237	709,6	1.777,3
300	-13,50	1.680	963,7	1.107	635,1	1.598,8
310	-14,30	1.500	860,5	981	562,8	1.423,3
320	-15,12	1.326	760,7	855	490,3	1.251,1
330	-15,96	1.164	667,8	740	424,5	1.092,3
340	-16,83	1.007	577,3	630	361,4	938,7
350	-17,73	859	492,9	535	306,7	799,6

Fuente: García Álvarez, A. (2011)

Cabe destacar que, al aumentar la velocidad máxima en las bajadas, como se ha citado anteriormente, los trenes frenarán menos por lo que la devolución de energía que se produce con el freno regenerativo es menor. Es decir, la energía devuelta en el cómputo global del recorrido es menor que en el caso de que no tuvieran freno regenerativo.

Esquema simplificado de la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona



Fuente: Luis E. Mesa

Figura 5. Perfiles en alzado de la línea Madrid-Barcelona de alta velocidad.

Como muestra de la reducción producida en el consumo de energía por el aumento de velocidad en los tramos de bajada, se utiliza de nuevo la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona. De toda la línea, se ha recogido un tramo de 66,2 kilómetros (Medinaceli-Calatayud) por ser un tramo mayoritariamente de bajada y de una longitud considerable.

Se ha determinado el tiempo de viaje y el consumo de energía para dos casos:

1. Limitando la velocidad en las bajadas (como se actúa hoy en día) a 300 km/h, impidiendo al tren circular a mayor velocidad en las mismas. A continuación se muestran los resultados.

Tabla 2. Consumo de energía y tiempo de viaje en el tramo Medinaceli-Calatayud limitando la velocidad máxima a 300 km/h en todos sus tramos

km	P.Control	Llegada	Salida	Vreal (km/h)	Consumo (kWh)	Consumo auxiliares (kWh)	E.disipada f. reg (kWh)
155,11	PB Medinaceli		0:00:00	0,0	0,0	0,0	0,0
165,78	PBL Arcos de Jalón	0:03:10	0:03:10	299,0	451,3	10,6	11,3
173,15	PBL Santa M. de la Huerta	0:04:39	0:04:39	299,0	577,3	15,5	25,8
181,67	Apt. Ariza	0:06:21	0:06:21	299,0	685,8	21,2	31,1
189,73	PBL Cetina	0:07:59	0:07:59	299,0	795,6	26,6	57,4
197,33	PB Alhama de Aragón	0:09:30	0:09:30	299,0	839,6	31,7	75,9
205,18	PBL Ateca	0:11:06	0:11:06	291,8	965,4	37,0	89,8
221,40	Calatayud	0:15:37		5,7	1.052,4	52,0	296,5
				Total	1.104,5		296,5

2. Permitiendo al tren circular a una velocidad superior en tramos de bajada. Esta velocidad debe ser alcanzada por la ausencia de aplicación de tracción ni de freno.

Tabla 3. Consumo de energía y tiempo de viaje en el tramo Medinaceli-Calatayud incrementado la velocidad en las pendientes

km	P.Control	Llegada	Salida	Vreal (km/h)	Consumo (kWh)	Consumo auxiliares (kWh)	E.disipada f. reg (kWh)
155,11	PB Medinaceli		0:00:00	0,0	0,0	0,0	0,0
165,78	PBL Arcos de Jalón	0:03:10	0:03:10	308,3	453,1	10,5	0,0
173,15	PBL Santa M. de la Huerta	0:04:37	0:04:37	308,6	539,5	15,4	0,0
181,67	Apt. Ariza	0:06:17	0:06:17	300,3	603,0	21,0	0,0
189,73	PBL Cetina	0:07:53	0:07:53	320,6	710,3	26,3	0,0
197,33	PB Alhama de Aragón	0:09:18	0:09:18	318,4	710,3	31,0	0,0
205,18	PBL Ateca	0:10:52	0:10:52	291,8	832,1	36,2	38,4
221,40	Calatayud	0:15:22		5,4	898,5	51,2	
				Total	949,7		237,6

Trás los resultados, se observa que el consumo de energía se reduce en un 14 % (aproximadamente 160 kWh) en este tramo de la línea y para este caso, que a su vez supone una reducción del 1,33 % del consumo total realizado por este tren en este trayecto (11.319,62 kWh) reduciéndose también, pero en menor medida, el tiempo de viaje (aproximadamente 15 segundos). Además se muestra cómo incrementando la velocidad en las bajadas, la energía devuelta (energía disipada en el freno regenerativo) disminuye.

En este caso, se está considerando que toda la energía regenerada se pierde (aunque en

el ejemplo también se ha calculado “este tipo de energía”), pero en un escenario como el de la alta velocidad española, en el que se regenera la mayor parte de la energía del frenado (quitando las pérdidas que se producen en la catenaria, transformación...) y se devuelve a la red eléctrica, estos resultados y conclusiones deben ser matizados dependiendo del grado y del rendimiento del proceso de regeneración.

Efecto del aumento de la velocidad en el tiempo de viaje

Es comprensible que si un vehículo puede ir a más velocidad entre dos puntos, tardará menos en recorrer esa distancia. El efecto que provoca aumentar la velocidad en las bajadas supone un ahorro de tiempo en el cómputo global del recorrido, ya que se mantendrá el tiempo en secciones horizontales y de subida pero lo reducirá en tramos de bajada.

Esta reducción, no es tan acentuada como en el caso de la reducción del consumo de energía, debido a que las velocidades máximas que se pueden alcanzar no son mucho mayores que las velocidades máximas fijadas y además, no son muchos y de mucha longitud los tramos de vía en los que será posible circular a mayor velocidad

Cabe destacar que es una medida que no supone un coste añadido (ni de inversión ni de explotación) incrementando así el “valor de la infraestructura”.

Efecto del aumento de la velocidad para mantener el tiempo de viaje

Otra de las alternativas que permite el incremento de la velocidad en las bajadas, es el hecho de poder mantener el tiempo de viaje en un trayecto, pero reduciendo la velocidad máxima a la que se puede circular en tramos horizontales y de subida. Esto hará que el tiempo que se pierda en estos tramos, sea compensado por la ganancia que se produce en tramos de bajada.

Además esta alternativa supondrá un ahorro adicional de energía, ya que circular a una menor velocidad máxima provoca que el consumo sea menor.

Otra alternativa para mantener el tiempo de viaje es la reducción de la potencia de los trenes. Esto supondrá que los trenes tengan menos fuerza en tramos horizontales y rampas (provocando una disminución de la velocidad) que se verá compensada por la mayor velocidad máxima en pendientes de bajada. Tiene la gran ventaja de que no sólo disminuirá el consumo de energía, sino que el coste de los trenes se reducirá, ya que no se necesitarán trenes tan potentes para lograr los mismos tiempos de viaje.

Pero reducir la potencia es una alternativa que también tiene una serie de inconvenientes, como por ejemplo; trenes con menor potencia disponen de menor potencia de freno eléctrico, por lo que el tren necesitará una mayor distancia de frenado, lo que supone una pérdida en la capacidad de la línea. Por lo que la alternativa de reducir la potencia, nos lleva a pensar que sólo podrá ser aplicada en líneas donde exista una capacidad suficiente o no existan problemas de capacidad.

Conclusiones

Como conclusión, si se fijase la velocidad máxima de un tren como aquella que le permite su dinámica y freno, podría producirse la reducción del consumo de energía y de los tiempos de viaje.

Este incremento nos daría otras alternativas ventajosas, como es el caso de reducir la potencia de los trenes en el momento del diseño del mismo o de reducir la velocidad máxima en tramos de línea horizontal y de subida. Permitiéndonos así mantener el mismo tiempo de viaje y reducir tanto el coste del tren como la energía consumida.

Todas estas ventajas supondrán un incremento del “valor de la infraestructura” pero no se debe olvidar que incrementar la velocidad en las bajadas supone en ocasiones pérdidas de capacidad de circulación (número de trenes por hora) debido a que aumenta la distancia de frenado y por ello la separación entre los trenes, que debe ser analizada en cada caso.

Bibliografía

López Pita, A (2008), Explotación de líneas de ferrocarril, ed: UPC colección TTT. ISBN: 978-84-8301-956-6. EAN: 9788483019566

García Álvarez, A. (2011a). *Dinámica de los trenes de alta velocidad* (Fundación de los Ferrocarriles Españoles ed.). Madrid.

García Álvarez, A. (2011b). *Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril* (Fundación de los Ferrocarriles Españoles ed.). Madrid.

García Álvarez, A., & Martín Cañizares, M. P. (2009). *Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril* (Fundación de los Ferrocarriles Españoles ed.). Madrid.