

Estudio de la performance de frenado de material rodante ferroviario

Study of the braking performance of railway rolling stock

Presentación: 04/09/2023

Nahuel Mendez

Centro Nacional de Desarrollo e Innovación Ferroviaria
nmendez@fase.gob.ar

Mariano Fernández Soler

Centro Nacional de Desarrollo e Innovación Ferroviaria
mfernandezsoler@fase.gob.ar

Resumen

Dentro del ámbito ferroviario es de vital importancia, principalmente para la seguridad y también para orientar las tareas de mantenimiento, conocer el desempeño del material rodante ferroviario durante el proceso de frenado. En el presente trabajo se muestra un análisis exploratorio de datos (Exploratory Data Analysis, EDA) recabados en ensayos de freno en tres formaciones tipo utilizadas en los servicios de pasajeros de las líneas ferroviarias del AMBA. Dichos ensayos se llevan a cabo en condiciones controladas para permitir su comparación, y de allí se analizan estadísticamente las distancias de detención y aceleraciones de cada tipo de material rodante.

Palabras clave: frenado, ensayo, estadística, material rodante, ferrocarril.

Abstract

Within the railway field, it is of vital importance, mainly for safety and to guide maintenance tasks, to know the performance of railway rolling stock during the braking process. This paper shows an exploratory data analysis (EDA) of the data collected in braking tests on three type trains used in the passenger services of the AMBA railway lines. These tests are carried out under controlled conditions to allow their comparison, and from there, the stopping distances and accelerations of each type of rolling stock are statistically analyzed.

Keywords: brake, test, statistics, rolling stock, railway

Introducción

Todo vehículo ferroviario debe experimentar procesos de tracción y frenado para brindar servicio y cumplir con los itinerarios. No cabe duda de que los procesos de frenado son sensibles desde el punto de vista de la seguridad, en consecuencia, se debe tener especial atención en las tareas de mantenimiento que se le realizan a los elementos que componen el sistema de freno de un material rodante.

En este sentido, diversas empresas ferroviarias en todo el mundo se encuentran trabajando en modelos basados en datos reales de mediciones que faciliten y orienten las intervenciones en el marco de las estrategias

de mantenimiento predictivo. Con respecto al mantenimiento de la infraestructura, existen enfoques orientados tanto al estudio de aceleraciones anómalas que analizan su comportamiento en el tiempo y en frecuencia como al aprovechamiento de las técnicas de deep learning para la detección temprana de fallas. No obstante, lo que refiere al material rodante en sí mismo, y a su desempeño durante los procesos de frenado, muchas veces se puede extraer conclusiones con procesamientos de datos de menor complejidad. Algunos autores analizan, por ejemplo, el comportamiento en términos del coeficiente de fricción, de las pastillas de freno de un vehículo en función de la velocidad o modelan las curvas de frenado para el ajuste de un sistema automático de protección de trenes o para la cuantificación de la resistencia al avance. También es útil para las operadoras ferroviarias llevar estadísticas del comportamiento de una flota de material rodante, para evaluar si alguna formación tiene un peor desempeño que las demás.

Por otra parte, dentro del campo de la ciencia y análisis de datos se han desarrollado técnicas para estudiarlos y extraer información relevante. Uno de los enfoques clásicos que más se utilizan se llama análisis exploratorio de datos (EDA) que consiste en aplicar las herramientas de la estadística descriptiva para detectar ciertos fenómenos. Esta metodología permite obtener información a partir de los datos y brindar soporte a la toma de decisión, visualizando las medidas de tendencia central, distribuciones a partir de histogramas, outliers, y demás. Actualmente, en el mundo se recolectan datos de todo tipo y el análisis se hace mediante programas de visualización y procesamiento. Si bien existen un gran número de opciones, uno de los lenguajes de programación más utilizados para el análisis de datos es Python debido a que es amigable, versátil y open-source. Además, cuenta con potentes librerías especializadas en el manejo, limpieza, filtrado y visualización de datos. Algunos autores han aplicado estas técnicas al ámbito ferroviario para estudiar la eficiencia y sostenibilidad de un metro ligero o la selección modal de pasajeros.

Materiales y Métodos

1. Descripción de los datos

Los datos bajo análisis se obtuvieron de ensayos dinámicos de freno realizados a bordo de las formaciones. Para llevarlos a cabo, se requiere colocar instrumentos de medición como un acelerómetro uniaxial 4801-A (Measurement Specialties, China) en el salón de pasajeros y una antena GPS 18x-5Hz (Garmin Ltd, Argentina) en el techo, que envían los datos a un adquisidor 43-A (Dewesoft, Eslovenia) que los registra a una frecuencia de 100 S/s y los muestra en tiempo real en una notebook. Los mismos se realizan en zonas de prueba, en horarios donde el servicio cesa para facilitar la operación y las maniobras que se requieran. La población de datos incluye formaciones eléctricas de 7 y 9 coches, y las formaciones diésel de una locomotora que tracciona 7 coches. Estos datos son posteriormente procesados, en donde se incluye un filtro pasa-bajos para la aceleración medida, corrección de cero y presentación de los resultados en tablas y gráficos. Cada uno de los datasets cuenta con distintas conjugaciones de freno que incluyen freno máximo de servicio denotado con las siglas B7 o FS, según el material rodante, y emergencia denotado como EB, por sus siglas en inglés. A su vez, las formaciones eléctricas pueden utilizar el freno electrodinámico durante el servicio que se menciona como EDB, por sus siglas en inglés y ON u OFF según esté encendido o apagado. El freno de emergencia es la condición más agresiva y es freno puramente neumático, por eso son siempre EDB OFF. Esto se resume en la Tabla 1.

Tipo de material rodante	Condiciones de freno		
Formaciones eléctricas de 7 coches	B7 EDB ON	B7 EDB OFF	EB
Formaciones eléctricas de 9 coches	B7 EDB ON	B7 EDB OFF	EB
Formaciones diésel	FS		EB

Tabla 1: Tipos de freno aplicado

Por otra parte, para cada tipo de material rodante se logró un consenso para establecer velocidades objetivo en cada una de las pruebas para permitir la comparación entre ellas. Las velocidades máximas generalmente están dadas por la condición de la infraestructura de vía.

Tipo de material rodante	Velocidades objetivo		
Formaciones eléctricas de 7 coches	30 km/h	60 km/h	80 km/h
Formaciones eléctricas de 9 coches	30 km/h	60 km/h	90 km/h
Formaciones diésel	40 km/h	60 km/h	80 km/h

Tabla 2: Velocidades de las pruebas

Como resultado de las pruebas se obtienen series temporales de aceleración, velocidad y posición de la formación bajo estudio, medidas con un acelerómetro y una antena GPS. A continuación, se muestra una curva típica de freno con la aceleración y velocidad en función del tiempo.

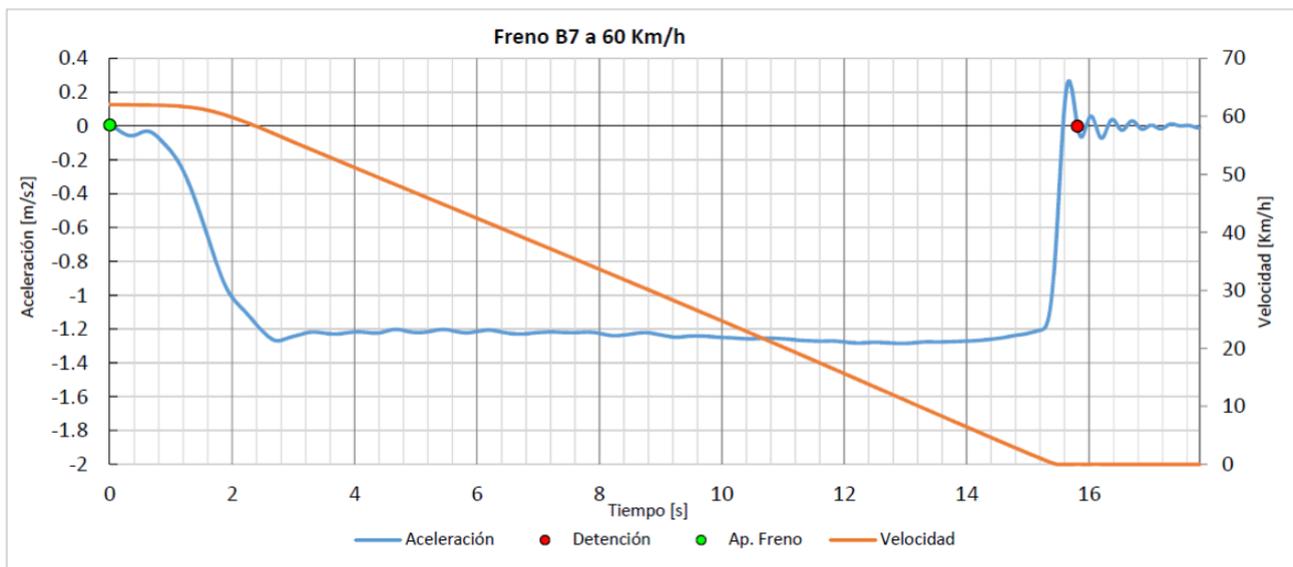


Figura 1: Curvas típicas de $v(t)$ y $a(t)$

2. Indicadores del conjunto de datos

Para cada prueba de freno, se seleccionarán indicadores que sean representativos de las performances de frenado. Un indicador a utilizar será directamente la *distancia de detención*, sin necesidad de hacer ningún procesamiento previo. Otra magnitud física de interés es la aceleración, sin embargo, como vemos en la Figura 1, la misma varía en el tiempo por ende debemos elegir un valor representativo. En primera medida se podría pensar en la aceleración media, no obstante, este indicador sería desleal para los ensayos a bajas velocidades ya que son de menor duración y por lo tanto el promedio es menor en valor absoluto dando lugar a resultados sesgados. Por tales motivos, en este trabajo se propone utilizar la *aceleración estabilizada* definida como el valor de aceleración que posee mayor frecuencia en un gráfico de histograma como se muestra en la Figura 2. Los tiempos de frenado no se tienen en cuenta en este estudio.

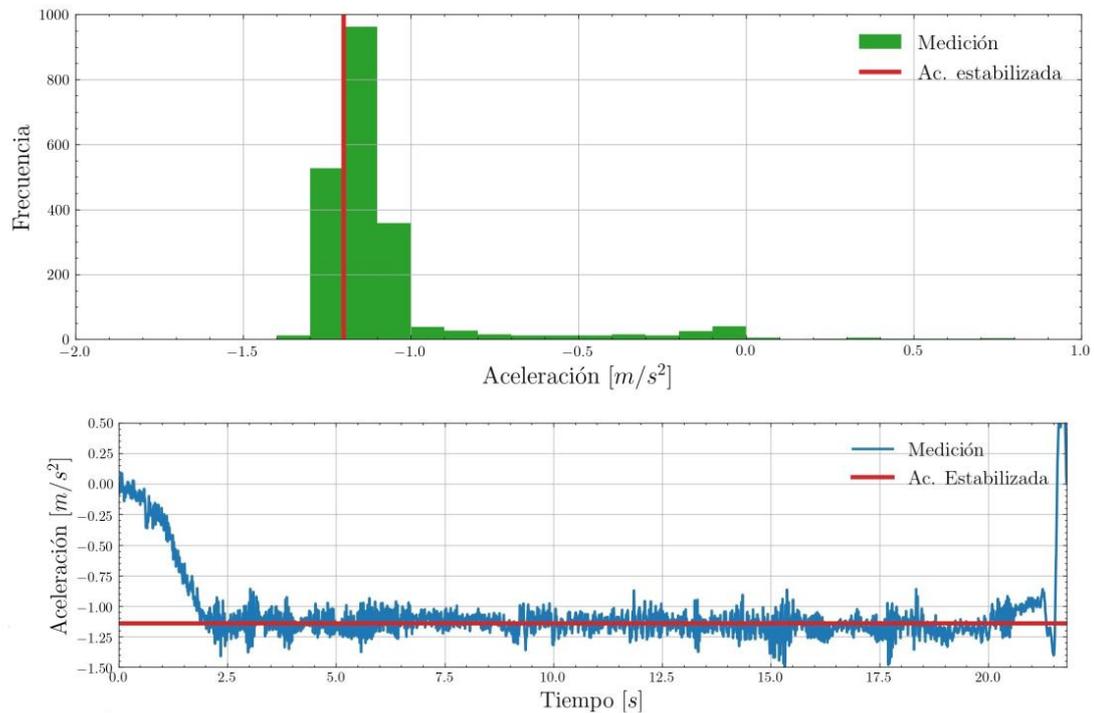


Figura 2: Indicador de aceleración estabilizada

Este indicador permite analizar las pruebas independientemente de la velocidad inicial. De ahora en adelante, en este trabajo cuando se hable de aceleración se hará referencia a la aceleración estabilizada.

3. Análisis exploratorio de datos

Dentro del análisis exploratorio de datos en este trabajo se incluye lo siguiente, para los dos indicadores: *distancia de detención* y *aceleración estabilizada*.

- Cálculo de las medidas de tendencia central y dispersión.
- Confección de un histograma.
- Estimación de la distribución de densidad de probabilidad a partir de la utilización de una herramienta denominada KDE, Kernel Density Estimation. La misma consiste en ajustar una distribución de probabilidad de una variable aleatoria en función de un histograma normalizado, tomando una distribución como modelo. En este caso se adoptó el modelo de distribución normal o gaussiana.

El objetivo de este análisis es observar qué diferencias hay entre las distintas condiciones de freno mencionadas en las secciones anteriores, y entre distintos tipos de material rodante. Además, se busca cuantificar la dispersión de los indicadores y obtener valores de referencia para cada caso.

Resultados y discusión

A continuación, en la Tabla 3, se muestran en las siguientes tablas las medidas de tendencia central y dispersión de las aceleraciones para los distintos tipos de material rodante ferroviario.

Formaciones eléctricas de 7 coches					
Condición de freno	Cantidad de ensayos	Promedio [m/s ²]	Desvío Std [m/s ²]	Mínimo [m/s ²]	Máximo [m/s ²]
B7 EDB ON	643	-1,206	0,049	-1,356	-0,831
B7 EDB OFF	623	-1,233	0,086	-1,518	-1,048
EB	637	-1,423	0,096	-2	-0,601
Formaciones eléctricas de 9 coches					
Condición de freno	Cantidad de ensayos	Promedio [m/s ²]	Desvío Std [m/s ²]	Mínimo [m/s ²]	Máximo [m/s ²]
B7 EDB ON	237	-1,219	0,04	-1,332	-1,131
B7 EDB OFF	254	-1,393	0,1	-1,605	-1,147
EB	272	-1,589	0,108	-1,832	-1,29
Formaciones diésel					
Condición de freno	Cantidad de ensayos	Promedio [m/s ²]	Desvío Std [m/s ²]	Mínimo [m/s ²]	Máximo [m/s ²]
FS Combinado	51	-0,657	0,06	-0,781	-0,514
EB Combinado	57	-0,825	0,076	-1	-0,51

Tabla 3: Aceleraciones de frenado por tipo de material rodante.

Se puede observar que para las formaciones de 7 coches se cuenta con un mayor número de ensayos, más de 600 para cada condición de freno, mientras que para las formaciones eléctricas de 9 coches se tienen más de 230 y para las formaciones diésel se cuenta con apenas 50 ensayos registrados. La desaceleración promedio para el primer grupo ronda en $1,2 \frac{m}{s^2}$ para servicio máximo, independientemente de si utiliza o no el freno electrodinámico, y aproximadamente $1,4 \frac{m}{s^2}$ para freno de emergencia. En cuanto al segundo grupo sí se observan diferencias entre el freno de servicio con electrodinámico encendido y apagado, resultando aproximadamente en un promedio de $1,2 \frac{m}{s^2}$ y $1,4 \frac{m}{s^2}$ respectivamente. El freno de emergencia resultó en un promedio de casi $1,6 \frac{m}{s^2}$. Por último, el tercer grupo presentó una desaceleración media de $0,657 \frac{m}{s^2}$ y $0,825 \frac{m}{s^2}$ para el freno de servicio máximo y emergencia respectivamente.

Formaciones eléctricas de 7 coches					
Condición de freno	Cantidad de ensayos	Promedio [m]	Desvío Std [m]	Mínimo [m]	Máximo [m]
B7 EDB ON a 30 km/h	201	47,72	5,67	31,00	63,87
B7 EDB ON a 60 km/h	201	151,68	9,17	116,00	180,28
B7 EDB ON a 90 km/h	241	305,67	10,33	273,77	350,69
B7 EDB OFF a 30 km/h	192	44,15	5,35	29,46	62,07
B7 EDB OFF a 60 km/h	187	147,69	8,95	120,65	173,64
B7 EDB OFF a 90 km/h	244	319,20	14,48	273,01	372,59
EB a 30 km/h	198	38,23	5,27	26,75	57,03
EB a 60 km/h	191	125,63	8,36	105,28	157,06

EB a 90 km/h	248	268,41	14,00	221,98	323,60
--------------	-----	--------	-------	--------	--------

Formaciones eléctricas de 9 coches					
Condición de freno	Cantidad de ensayos	Promedio [m]	Desvío Std [m]	Mínimo [m]	Máximo [m]
B7 EDB ON a 30 km/h	89	45,52	6,37	22,79	58,35
B7 EDB ON a 60 km/h	83	141,96	6,12	125,42	149,97
B7 EDB ON a 80 km/h	84	243,08	9,76	222	270,27
B7 EDB OFF a 30 km/h	84	43,33	7,67	19,97	68,60
B7 EDB OFF a 60 km/h	80	147,00	8,88	125,42	169,09
B7 EDB OFF a 80 km/h	99	236,85	12,43	213,58	286,29
EB a 30 km/h	102	34,22	7,88	13,10	61,60
EB a 60 km/h	83	114,04	8,58	98,62	138,33
EB a 80 km/h	92	199,69	13,45	170,45	251,41
Formaciones diésel					
Condición de freno	Cantidad de ensayos	Promedio [m]	Desvío Std [m]	Mínimo [m]	Máximo [m]
FS a 40 km/h	15	153,83	18,87	131,22	188,66
FS a 60 km/h	16	313,01	34,00	272,16	392,39
FS a 80 km/h	18	500,36	42,16	402,75	578,02
EB a 40 km/h	16	117,00	10,23	97,68	133,74
EB a 60 km/h	18	231,84	27,67	187,78	294,30
EB a 80 km/h	22	391,29	44,14	341,51	504,63

Tabla 4: Distancias de detención por tipo de material rodante.

Las distancias de detención para las formaciones eléctricas rondan entre los 40 m y 50 m para las pruebas a 30 km/h y entre 140 m y 150 m para las de 60 km/h para las condiciones de servicio máximo. Para las de emergencia a 30 km/h y a 60 km/h rondan entre 35 m y 40 m, y entre 115 y 125 m para formaciones de 7 y 9 coches respectivamente. Para las pruebas a 80 km/h y 90 km/h las distancias están comprendidas entre 200 m y 320 m. Las formaciones diésel, para las velocidades máximas de 80 km/h, frenan en promedio en 391 m y 500 m para emergencia y servicio máximo. Se aprecia también de los resultados de este grupo presenta mayor dispersión en las distancias de frenado.

Por último, se muestran a continuación los histogramas realizados y las densidades de probabilidad estimadas para las aceleraciones de cada material rodante.

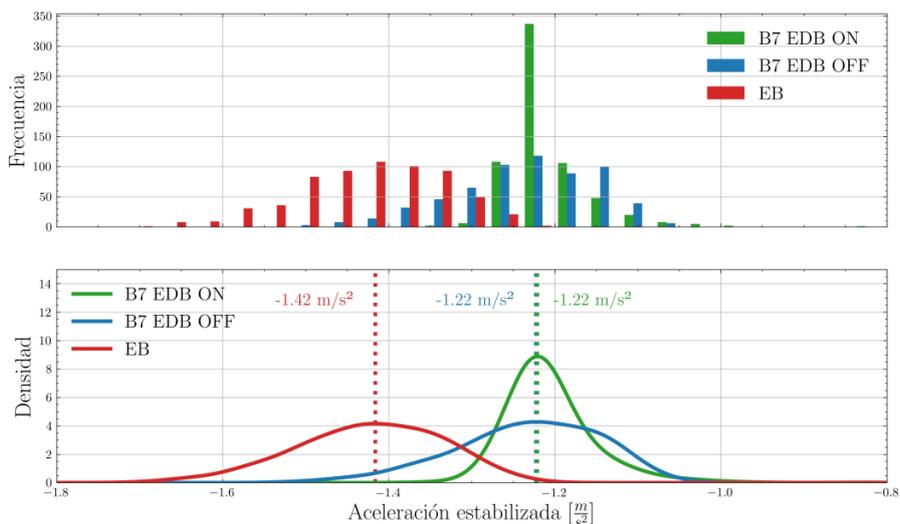


Figura 3: Aceleraciones para las formaciones eléctricas de 7 coches.

Para construir los histogramas se utilizaron bins de $0,04 \frac{m}{s^2}$ de ancho. Esto resulta de dividir el rango entre $0 \frac{m}{s^2}$ y $2 \frac{m}{s^2}$ en 50 partes.

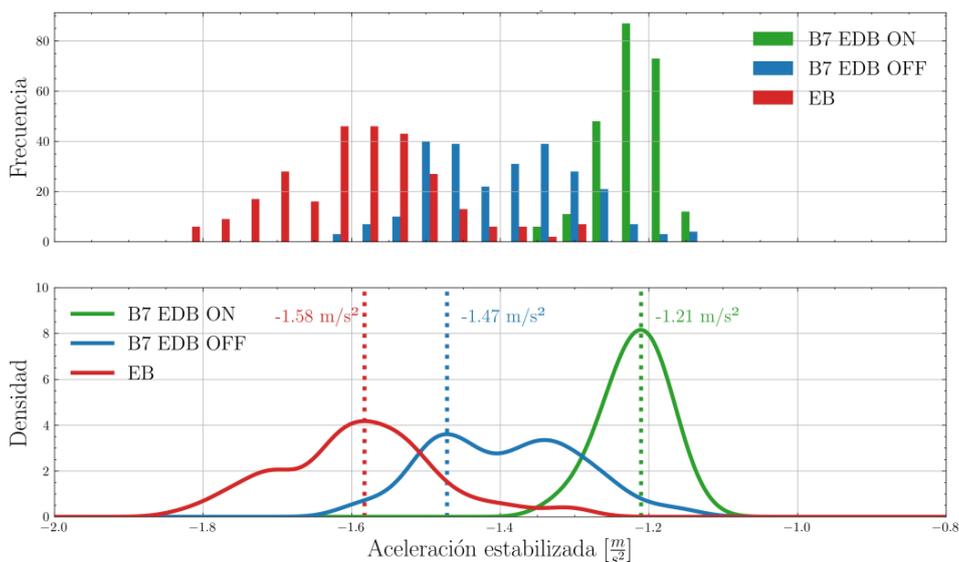


Figura 4: Aceleraciones para las formaciones eléctricas de 9 coches.

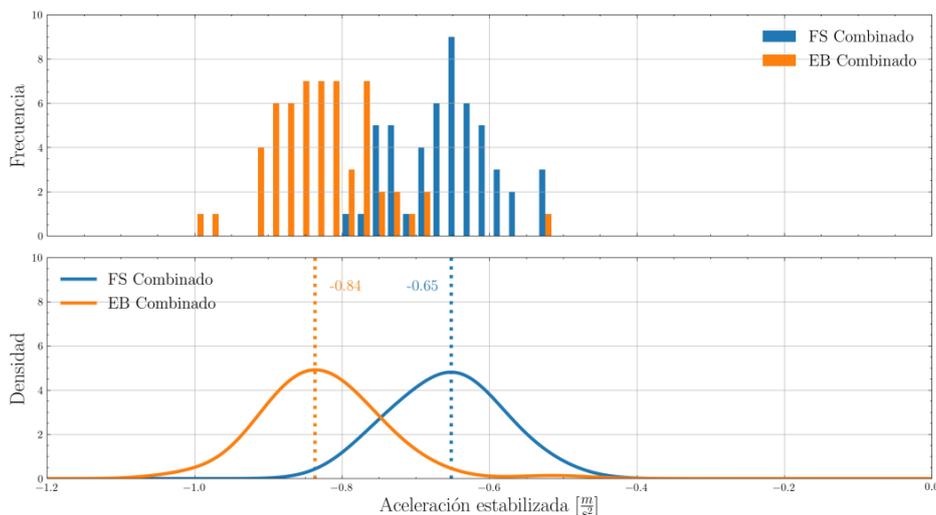


Figura 5: Aceleraciones para las formaciones diésel.

En las Figuras 3, 4 y 5 se observa nuevamente lo discutido en las medidas de tendencia central y dispersión. Las formaciones diésel presentan frenadas más suaves que las formaciones eléctricas, por su naturaleza constructiva y por las tecnologías de frenado. En las unidades eléctricas de 7 coches los promedios de aceleración son iguales para las pruebas de servicio máximo independientemente del freno electrodinámico, aunque cuando este está encendido se evidencia con una menor dispersión. Los frenos de emergencia son más agresivos que los de servicio en todos los casos. En las formaciones eléctricas de 9 coches se observa una cierta bimodalidad en los frenos puramente neumáticos, es decir B7 EDB OFF y EB que no ocurre en el resto de los datos, incluso el valor medio no parece ser concluyente. Este comportamiento puede atribuirse a dos modelos distintos de pastillas de freno de diferentes fabricantes o a una diferencia de performance de éstas a distintas velocidades.

Análogamente a lo mostrado para las aceleraciones, a continuación, se presentan los histogramas y densidades de probabilidad para las distancias de frenado por tipo de material rodante.

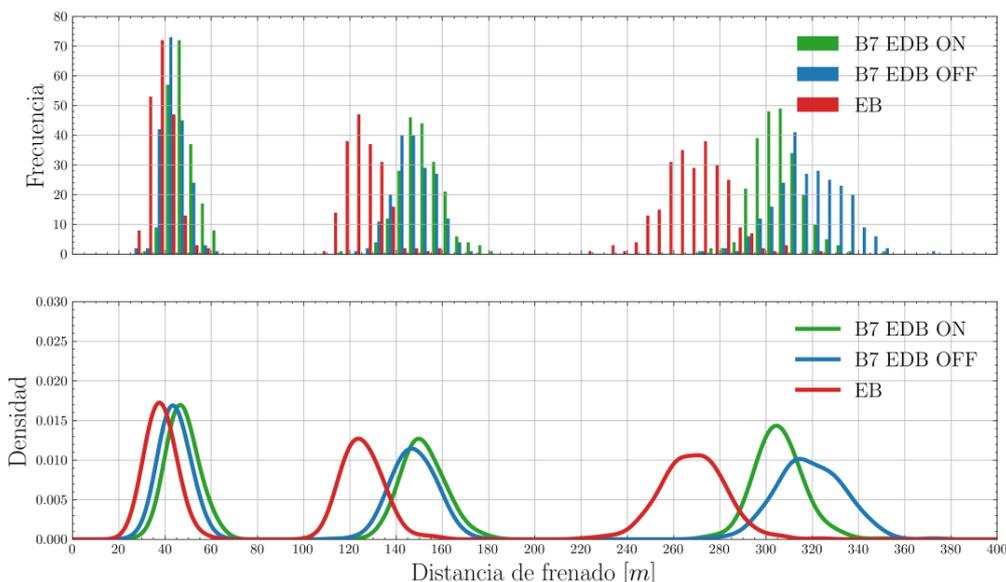


Figura 6: Distancias de frenado para las formaciones de 7 coches.

Para construir los histogramas se utilizaron bins de 5 metros. Ídem para la construcción de los KDE.

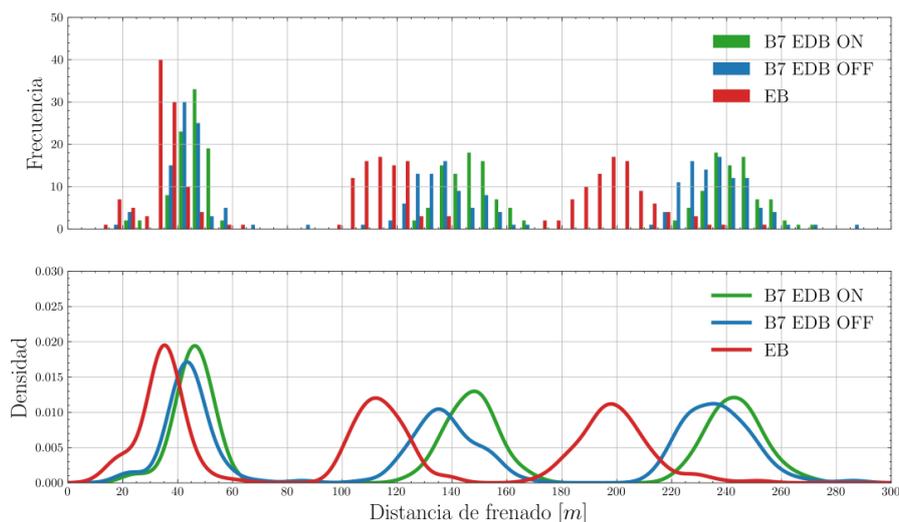


Figura 7: Distancias de frenado para las formaciones de 9 coches.

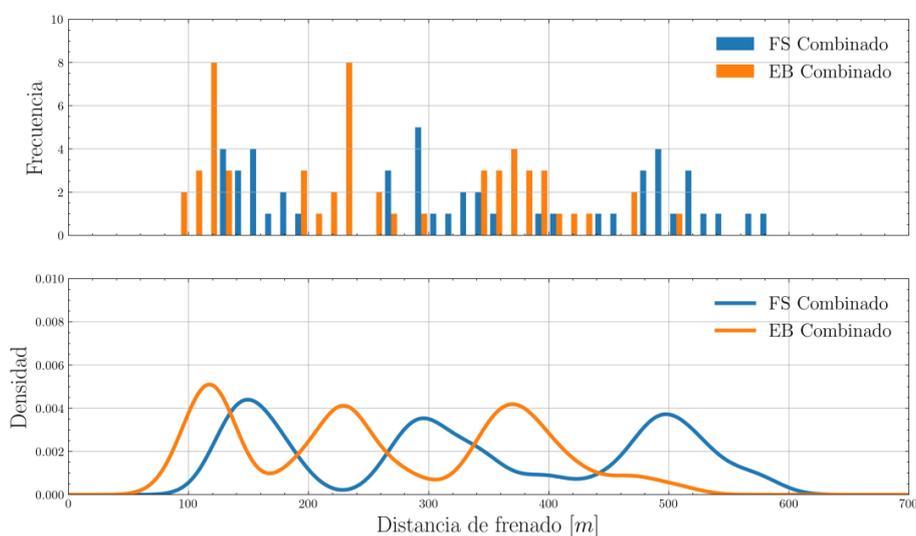


Figura 8: Distancias de frenado para las formaciones diésel.

En primera medida se observan claramente tres picos distinguibles, que hacen referencia a las tres velocidades objetivas iniciales para cada material rodante. Por otra parte, se evidencia un ligero aumento de la dispersión con el aumento de la velocidad inicial. En el caso de las formaciones de 7 coches se observa que a la velocidad máxima la conjugación B7 EDB ON frena en una ligeramente menor distancia que con el EDB OFF. En todos los casos se confirma la hipótesis planteada en la que el freno de emergencia detiene la formación en menor distancia que el freno máximo de servicio. En particular para las formaciones diésel no es tan claro el ajuste de la función de distribución, es decir que las colas de cada campana se mezclan entre sí volviendo dificultosa la diferenciación. Esto puede deberse a que es el conjunto de datos más pequeño en volumen o a la propia dispersión en los procesos de frenado de ese material rodante.

Conclusiones

En el presente trabajo se han analizado los datos correspondientes a ensayos dinámicos de freno de tres tipos de formaciones, como las que prestan servicios de pasajeros en el AMBA. Dentro de este análisis se incluyó la determinación de indicadores representativos de las pruebas, eligiendo la distancia de detención y la aceleración estabilizada cuyo cálculo ha sido presentado. En base a los datos, se confirman los resultados

esperados en donde los frenos de emergencia son los más agresivos en todos los casos provocando la detención en menores distancias y con mayores desaceleraciones.

Por otra parte, se observaron menores dispersiones en los frenos mixtos, es decir neumático junto con el electrodinámico, y ciertos comportamientos bimodales en la conjugación de servicio máximo puramente con EDB OFF. Para las formaciones eléctricas se han registrado también menores dispersiones en las distancias de frenado que para las formaciones diésel, atribuible a las características de diseño de las mismas, aunque esto debe seguir investigándose puesto que se tienen menos ensayos realizados. Por último, cabe destacar que, en las formaciones eléctricas de 9 coches, a diferencia de las formaciones de 7 a pesar de tener modelos de material rodante similares, presentan una bimodalidad en las curvas de aceleración para el freno neumático, lo cual puede deberse a dos modelos de pastillas de freno con diferente performance.

Referencias

Buckwalter, D. W. (2016). Modal Choice in the Pittsburgh Metropolitan Statistical Area: An Exploratory Data Analysis. *The Professional Geographer*, 69(1), 94–106. <https://doi.org/10.1080/00330124.2016.1193031>

Cunillera, A., Bešinović, N., van Oort, N., & Goverde, R. M. P. (2022). Real-time train motion parameter estimation using an Unscented Kalman Filter. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 143, 103794. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103794>

Davari, N., Veloso, B., Costa, G. d. A., Pereira, P. M., Ribeiro, R. P., & Gama, J. (2021). A Survey on Data-Driven Predictive Maintenance for the Railway Industry. *Sensors*, 21, 5739. <https://doi.org/10.3390/s21175739>

Ghofrani, F., Chava, N. K., & He, Q. (2020). Forecasting Risk of Service Failures Between Successive Rail Inspections: A Data-Driven Approach. *Journal of Big Data Analytics in Transportation*. <https://doi.org/10.1007/s42421-020-00015-y>

Jebb, A. T., et al. (2016). Exploratory data analysis as a foundation of inductive research. *Human Resource Management Review*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hrmr.2016.08.003>

Malvezzi, M., Presciani, P., Allotta, B., & Toni, P. (2003). Probabilistic analysis of braking performance in Railways. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 217, 149. <https://doi.org/10.1243/095440903769012867>

Sahoo, K., Samal, A. K., Pramanik, J., & Pani, S. K. (2019). Exploratory Data Analysis using Python. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8(12). <https://doi.org/10.35940/ijitee.L3591.1081219>

Taboada, G. L., & Han, L. (2020). Exploratory Data Analysis and Data Envelopment Analysis of Urban Rail Transit. *Electronics*, 9(8), 1270. <https://doi.org/10.3390/electronics9081270>

Vakkalagadda, M. R. K., Srivastava, D. K., Mishra, A., & Racherla, V. (2015). Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways. *Wear*, 328-329, 64-76. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.044>