



Variabilidad de la deceleración de un paracaídas de acción progresiva en un ascensor inclinado

Beatriz Valles Fernández¹, Enrique Alcalá Fazio¹, Ángel Martín López¹, David Rincón-Dávila¹, Joel Valenzuela Cuartero¹

¹ Instituto Universitario de Investigación del Automóvil Francisco Aparicio Izquierdo, Universidad Politécnica de Madrid, b.valles@upm.es, enrique.alcala@upm.es, angel.martin@upm.es, david.rincon@upm.es, joel.valenzuela@upm.es

Los ascensores inclinados son un tipo de ascensor que se mueven siguiendo la inclinación del terreno. El uso de este tipo de ascensores es muy diverso, puede ser utilizado en centros comerciales, metros, estaciones y aeropuertos, así como en zonas residenciales o en lugares o zonas turísticas con cierto desnivel. Esta opción se ha convertido en una excelente alternativa a las escaleras mecánicas tradicionales al poder ser utilizado para el transporte de persona con discapacidad o personas con movilidad reducida. También presentan una ventaja competitiva frente a las escaleras mecánicas al poder adaptarse a trayectos largos con mayor facilidad. Este tipo de ascensores cuenta con una cabina, habitualmente acristalada, que permite que los pasajeros estén siempre en posición vertical, aunque la trayectoria del terrero sea inclinada

En el caso de los ascensores con trayectoria inclinada, la norma de referencia UNE EN 81:22-2022 establece dos límites de aceleración en caso de actuación del sistema de parada de emergencia: un límite de aceleración horizontal máximo, establecido para evitar que los pasajeros colisionen con las paredes del carro; y un límite de aceleración vertical mínimo que garantiza que el paracaídas tiene una capacidad de frenado suficiente para decelerar el carro en condiciones seguras para los ocupantes en caso de plena carga.

En este artículo se presenta el análisis realizado para determinar la viabilidad de uso de un paracaídas de acción progresiva, que forma parte del sistema de seguridad pasiva junto con el limitador de velocidad en los ascensores verticales, como sistema de frenado en caso de emergencia para los ascensores con trayectoria inclinada. Este tipo de paracaídas se homologa según los requisitos definidos en la norma UNE-EN 81-50:2020, en la que se establecen únicamente requisitos de aceleración vertical, ya que se impone una deceleración mínima de aproximadamente 0,6g.

Para la caracterización del comportamiento de paracaídas progresivos en ascensores inclinados y poder verificar que se puede atenuar la componente horizontal de la deceleración en caso de parada de emergencia, se ha generado un plan de ensayos considerando las variables más influyentes para diseñar un ascensor inclinado, como son el tipo de paracaídas, la instalación o no de un elemento amortiguador adicional al paracaídas, el ángulo de inclinación de la plataforma y el peso de la cabina más los pasajeros.

El plan de ensayos desarrollado ha permitido, además de la validación de un modelo de simulación dinámica, la realización un análisis estadístico y de tipo Wavelet para determinar la variabilidad y formas de onda de la respuesta del sistema antes diferente grados de inclinación del ascensor y diferentes cargas, así como teniendo en cuenta la utilización de un tope elástico para mejorar los niveles de deceleración horizontal y vertical alcanzados en este tipo de ascensores.

1. Introducción

El ascensor es un servicio de transporte masivo que mueve a cientos de millones de personas cada día. Solo en España los ascensores realizan todos los días unos 48 millones de viajes y transportan a 9,5 millones de personas. Además, es uno de los medios de transporte más seguros que hay en la actualidad debido, primero, a su bajo índice de siniestralidad y, segundo, a la baja probabilidad de lesiones graves en la mayor parte de los sucesos. Sin embargo, es un medio en el que los diferentes organismos siguen trabajando para mejorar sus, ya de por sí elevados, niveles de seguridad.

Los ascensores inclinados son un tipo de ascensor que se mueven siguiendo la inclinación del terreno. El uso de este tipo de ascensores es muy diverso, puede ser utilizado en centros comerciales, metros, estaciones y aeropuertos, así como en zonas residenciales o en lugares o zonas turísticas con cierto desnivel. Esta opción se ha convertido en una excelente alternativa a las escaleras mecánicas tradicionales al poder ser utilizado para el transporte de personas con discapacidad o personas con movilidad reducida. También presentan una ventaja competitiva frente a las escaleras mecánicas al poder adaptarse a trayectos largos con mayor facilidad. Este tipo de ascensores cuenta con una cabina, habitualmente acristalada, que permite que los pasajeros estén siempre en posición vertical, aunque la trayectoria del terrero sea inclinada.

Los ascensores son un elemento muy sensible en materia de seguridad, dado que un mal funcionamiento puede acarrear graves lesiones en los usuarios e incluso su fallecimiento, por lo que llevan instalados un sistema de seguridad pasiva (limitador de velocidad y paracaídas progresivo o instantáneo) que entra en funcionamiento en el momento en el que se produce sobre velocidad en la cabina o se rompen los cables provocando que la cabina baje en caída libre (ver Figura 1).

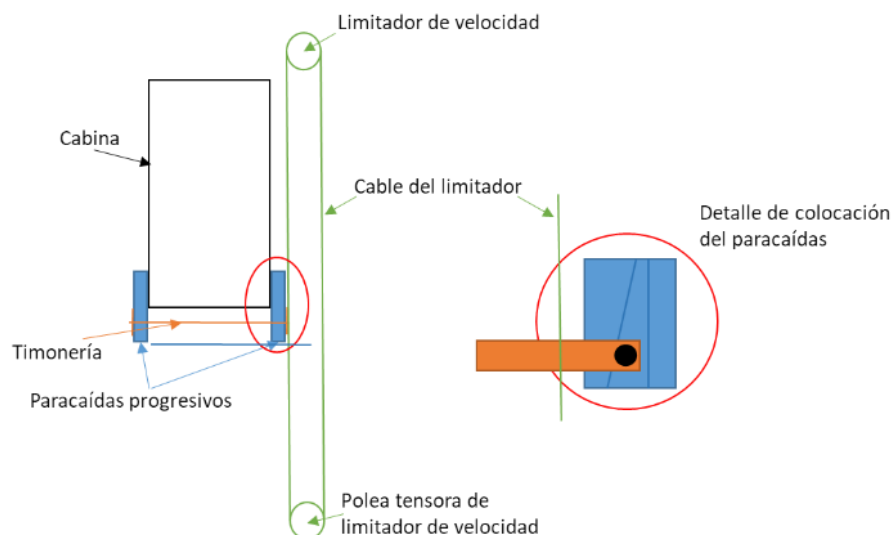


Figura 1: Esquema del sistema de seguridad pasiva de un ascensor. Fuente: elaboración propia.

Los paracaídas están básicamente formados por una carcasa que se fija en el bastidor de la cabina (o del contrapeso según el diseño), un elemento móvil –cuña o rodillo– mecánicamente enlazado a la timonería cuyo movimiento guiado origina la frenada de emergencia por contacto o acuñaamiento contra las guías. En el caso de paracaídas instantáneos la frenada se produce con deceleraciones muy altas, mientras que en los paracaídas progresivos hay un elemento elástico que limita la deceleración en cabina a 0,6g. Las normas UNE EN 81:20:2020 [1] y UNE EN 81-50:2020 [2] definen, respectivamente, las reglas de seguridad para su construcción e instalación, así como las inspecciones y ensayos que tienen que cumplir para poder ser homologados.

En el caso de los ascensores con trayectoria inclinada, el tipo de paracaídas que se debe utilizar tiene que tener una configuración especial, ya que al asegurar un nivel mínimo de deceleración vertical la cabina va a experimentar un cierto nivel de deceleración horizontal. Por ello, este tipo de ascensores precisa de requisitos diferentes a los verticales y es evaluado según los requisitos definidos en la norma UNE EN 81-22:2022 [3]. Así, la redacción de la norma establece dos límites de aceleración en caso de actuación del sistema de parada de emergencia: un límite de aceleración horizontal máximo, establecido para evitar que los pasajeros colisionen con las paredes del carro; y un límite de aceleración vertical mínimo que garantiza que el paracaídas tiene una capacidad de frenado suficiente para decelerar el carro en condiciones seguras para los ocupantes en caso de plena carga. Es, por tanto, el ángulo de inclinación el que provoca aceleraciones/deceleraciones longitudinales que diferencian la dinámica de ambos tipos de ascensores (vertical e inclinado). En el punto 5.6.8.4 de la norma UNE EN 81-22:2022 [3], se indican los límites de deceleración establecidos en el momento de actuación del paracaídas con carga nominal:

$$a_h \leq 0.5 * g \quad (1)$$

$$0.1 * g \leq a_v \leq 1 * g \quad (2)$$

Siendo a_h la medida de aceleración horizontal y a_v la medida de aceleración vertical.

En el caso de los ascensores verticales la norma UNE EN 81-50:2020 [2] impone una deceleración mínima de aproximadamente 0,6 g, valor de deceleración que se utiliza para determinar el peso máximo cargado que puede un paracaídas determinado frenar. Si comparamos los requisitos en ambas normativas, cabe destacar que, en los ascensores inclinados, aunque la deceleración mínima requerida es inferior, se imponen dos límites superiores tanto para la deceleración vertical (1g) como para la horizontal (0.5g). Los límites impuestos en los ascensores inclinados favorecen la seguridad al reducir la posibilidad de que los pasajeros colisiones con las paredes de la cabina, aunque también supone un reto para el sistema utilizado en la frenada de emergencia, ya que se tienen que garantizar unos niveles de aceleración muy concretos.

Para los fabricantes de componentes de seguridad de ascensores, desarrollar un sistema de frenado de emergencia adaptado a los requisitos de los ascensores inclinados supone un hándicap. De hecho, existe una gran cantidad de bibliografía sobre el comportamiento dinámico de ascensores y sus componentes [4]-[9], pero no se ha encontrado literatura sobre el comportamiento de los elementos utilizados en la frenada de emergencia de ascensores con trayectoria inclinada.

En este artículo se analiza el comportamiento del sistema de frenada de un ascensor inclinado cuando se utiliza como elemento principal un paracaídas progresivo, lo que representaría una ventaja competitiva para los fabricantes actuales, ya que les permitiría la posibilidad de poder desarrollar nuevos usos para un producto existente, lo que supone una ventaja competitiva y poder entrar en nuevos mercados sin aumento de costes de producción.

2. Resultados

Para la realización de un estudio de la viabilidad de un paracaídas progresivo en un ascensor inclinado y determinar la variabilidad de su comportamiento, se ha generado un plan de ensayos de validación considerando las variables más influyentes para diseñar un ascensor inclinado, como son el tipo de paracaídas, la instalación o no de un elemento amortiguador, el ángulo de inclinación de la plataforma y el peso de la cabina más los pasajeros.

Los ensayos de caída del ascensor se realizaron en la plataforma de inclinación lateral del INSIA, sobre la que se instaló el conjunto del ascensor, con sus raíles, guías y sistema de paracaídas y amortiguadores finales de compresión (ver Figura 2). Mediante al accionamiento hidráulico de la plataforma fue posible ajustar el ángulo de inclinación del ascensor a los valores de consigna establecidos. En la imagen del montaje se puede observar como los raíles de rodadura del carro están montados sobre la plataforma inclinada.



Figura 2: Plataforma de ensayo.

La combinación de los ensayos propuestos para la validación se resume en la Tabla 1. En los ensayos se han considerado dos inclinaciones diferentes 15 y 25° con dos masas, la correspondiente a cabina vacía y la de máxima carga en función de la inclinación y paracaídas. Para cada inclinación se utilizó un paracaídas diferente.

Actualmente, los fabricantes utilizan amortiguadores hidráulicos para poder cumplir los requisitos normativos definidos en la norma UNE-EN 81-22:2022, que regula la instalación de ascensores inclinados. Por ello, se decidió incluir en el plan de ensayos configuraciones que contemplasen tanto la unión rígida entre el bastidor de paracaídas y el de cabina como el uso de elementos elásticos entre dichos bastidores.

Por tanto, se han realizado 6 ensayos, a dos inclinaciones diferentes 15 y 25°, con 2 masas, la correspondiente a cabina vacía y la de máxima carga en función de la inclinación y paracaídas. Para cada inclinación se utilizó un paracaídas diferente.

Tabla 1: Plan de ensayos.

Ensayo	E01	E02	E03	E04	E05	E06
Tope elástico	Con tope	Con tope	Rígida	Rígida	Con tope	Con tope
Paracaídas	SG1	SG1	SG2	SG2	SG2	SG2
Angulo [°]	15	15	25	25	25	25
Masa [kg]	3635	5410	3635	5060	3635	5060

Para la adquisición de datos durante el proceso de ensayo se utilizaron acelerómetros y sensores de cable para medir desplazamientos y aceleraciones en todas las direcciones, como se ilustra en la siguiente imagen.

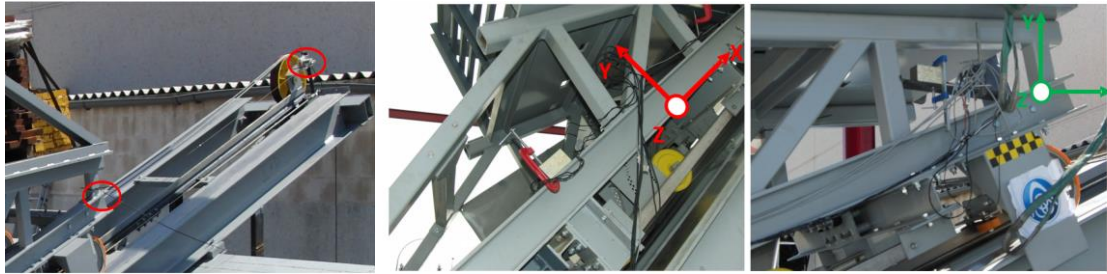


Figura 3: Posición de los sensores utilizados durante los ensayos.

Para evaluar la viabilidad y el comportamiento del uso de paracaídas progresivos como elementos de frenado de emergencia de un ascensor inclinado, se ha procedido a la realización del análisis wavelet de los resultados obtenidos en los y así, poder caracterizar el comportamiento de estos paracaídas cuando se someten a deceleraciones propias en un ascensor inclinado.

El análisis mediante la transformada de Wavelet es una herramienta que permite el análisis de señales en el dominio del tiempo y de la frecuencia, por lo tanto, presenta algunas ventajas sobre la transformada de Fourier [14] [14] y su modificación basada en el análisis de ventanas. Este método se ha aplicado en diversas áreas de la ingeniería [4][14], pues es un análisis multirresolución que permite identificar patrones, puntos de ruptura y discontinuidades de una señal.

A partir de la curva temporal de aceleración $Acc(t)$ obtenida en cada uno de los ensayos realizados en las instalaciones del Insia, se genera la transformada Wavelet Continua (CWT) [16][17]:

$$W_{s,n}(Acc) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{s} \Psi\left(\frac{i-n}{s}\right) \frac{(Acc(t_i) - \langle Acc \rangle)}{\sigma_{Acc}} \quad (3)$$

Donde $\Psi(t)$ representa la función llamada wavelet madre o función básica. Los parámetros $\langle Acc \rangle$ y σ_{Acc} son los promedios y desviaciones estándar de la aceleración y los subíndices s y n representan la escala y los índices de tiempo respectivamente. La transformada wavelet definida por (3) se denomina transformada wavelet continua (CWT) porque los parámetros de escala y tiempo asumen valores continuos.

$$\Psi(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\theta_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad (4)$$

Donde θ_0 es la frecuencia central u orden de la wavelet y η es la variable de tiempo renormalizada. Para equilibrar el tiempo/ resolución de frecuencia se adopta un valor $\theta_0 = 6$, que define seis oscilaciones en la señal wavelet madre tipo Morlet complejo [4].

En la siguiente figura se muestran las señales de aceleración medidas durante el ensayo transformadas por CWT y presentadas con espectro de potencia wavelet, PW, correspondiente (11).

$$P_W = |W_{s,n}|^2 \quad (5)$$

Como se puede comprobar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, los espectrogramas correspondientes al análisis wavelet, permiten descomponer en bandas de frecuencia la señal original. Además, el color de cada punto indica la magnitud de la señal en cada instante y frecuencia. En amarillo aparece la zona correspondiente a los valores de coeficientes altos, mientras que la región azul está formada por coeficientes bajos. En los espectros de potencia de las señales de aceleración se puede visualizar la región de frenado activa, correspondientes con el color amarillo. Resulta significativo comprobar el cambio de intensidad en los ensayos correspondientes a la eliminación del tope (E03 y E04), ya que en estos casos en tiempo la zona de frenado activa del paracaídas es mayor que en el resto de ensayos, donde se utiliza un tope elástico. Examinando en detalle los resultados obtenidos se puede comprobar que hay un cambio en la frecuencia natural para diferentes ángulos y para diferentes masas, pero es más evidente en el caso de la eliminación del tope elástico.

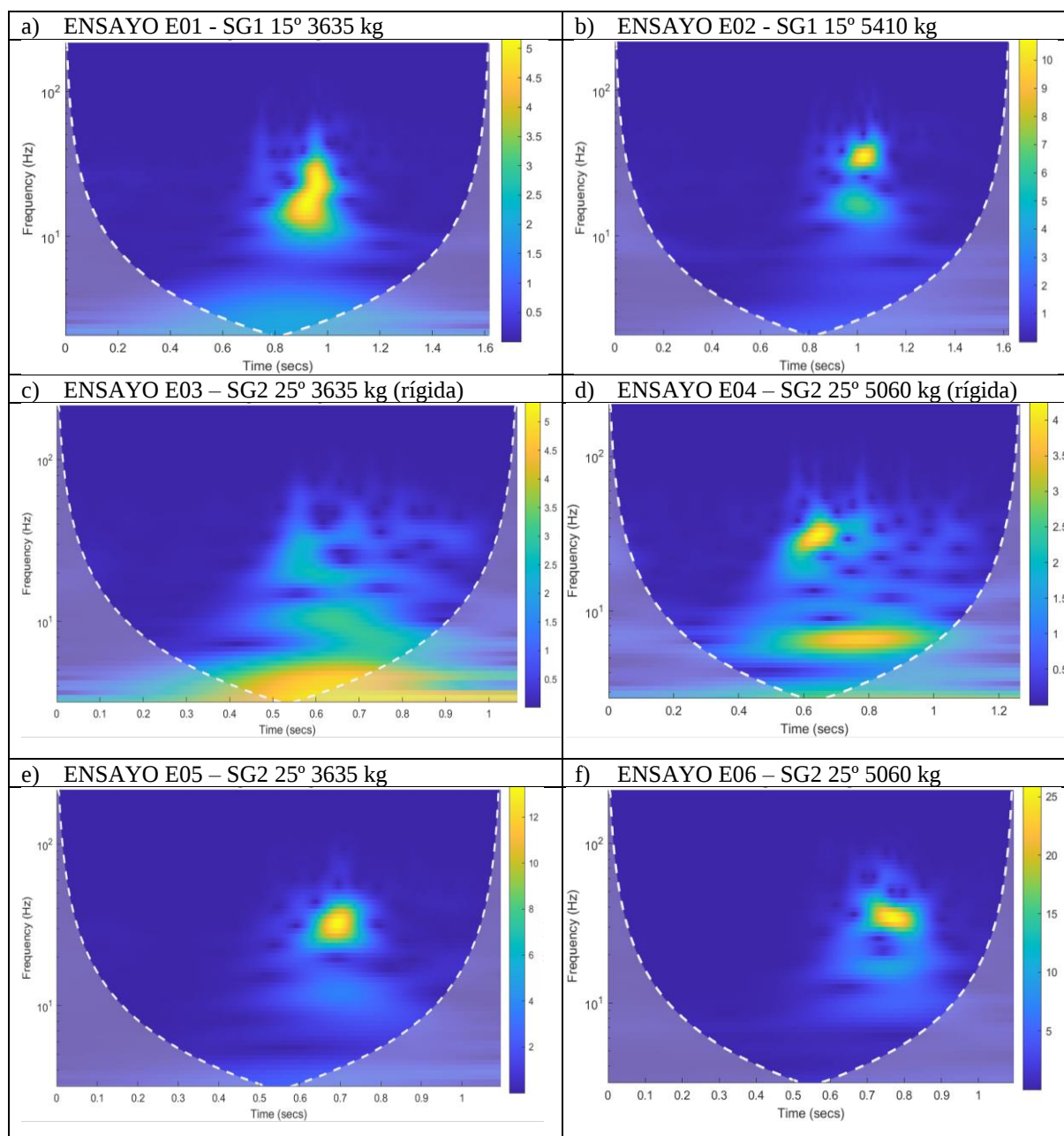


Figura 4: Análisis wavelets en los ensayos realizados.

Para realizar un análisis más exhaustivo, en la Figura 4 se muestran los histogramas correspondientes a las señales utilizadas para los ensayos de validación realizados, en este caso se han considerado a estudio únicamente las aceleraciones obtenidas durante el frenado del sistema de emergencia del ascensor inclinado, se ha eliminado la parte de aceleración para llegar a la velocidad de actuación del limitador.

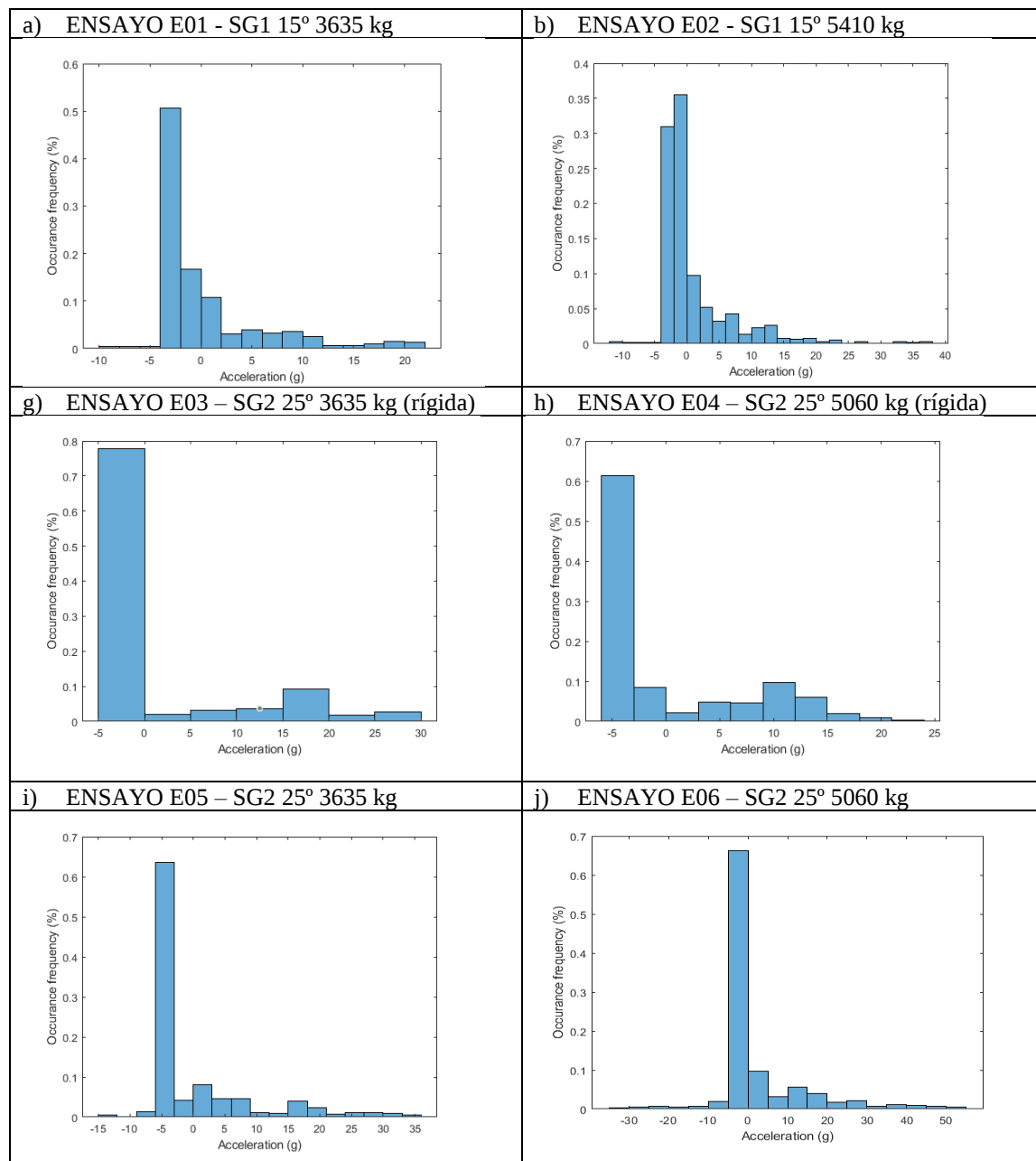


Figura 5: Histogramas de los ensayos de validación realizados.

Como se puede comprobar en los histogramas correspondientes a la aceleración de la cabina en la dirección de desplazamiento, en el caso de los ensayos a un ángulo de 25° se producen picos de hasta 5g o más, independientemente de si lleva tope elástico o no, mientras que las deceleraciones máximas medidas para un ángulo de 15° no superan los 4g. También se puede observar asimetría en las gráficas debido a la peculiaridad propia del ensayo en caída libre inclinado, que establece criterios tanto en dirección vertical como longitudinal, siendo analizado en este caso la resultante de ambas aceleraciones, es decir, la aceleración en la dirección del desplazamiento.

3. Conclusiones

Con el presente estudio se ha demostrado la viabilidad de instalar un paracaídas progresivo, elemento que forma parte del sistema de seguridad pasiva de un ascensor convencional, como parte del sistema de frenado de ascensores inclinados.

Los resultados obtenidos permiten convertir un hándicap en una nueva oportunidad de mercado para el fabricante, puesto que se puede dar un nuevo uso a un producto ya existente, y no tiene que invertir tiempo y dinero en el

desarrollo de nuevas soluciones que se ajusten a los niveles de deceleraciones establecidos según la normativa de ascensores inclinados.

El plan de ensayos confeccionado ha permitido verificar que para poder caracterizar el comportamiento del paracaídas progresivo en ascensores inclinados es necesario evaluar su comportamiento de variables tan importantes como el ángulo de inclinación y el peso de la cabina, ya que en el análisis wavelet realizado, la zona de frenado activa del paracaídas puede ser muy diferente.

Del análisis wavelet realizado también se puede extraer que los paracaídas progresivos, cuando se instalan en ascensores inclinados, presentan distinto comportamiento en función de si la unión con el bastidor de la cabina se realiza de forma rígida o se incluye un elemento elástico. En el caso de no colocar un tope elástico, la zona de frenado activa del paracaídas es mayor, aunque los valores máximos de deceleración se mantienen similares.

4. Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del proyecto Segvauto.5G-CM TEC-2024/ECO-277, subvencionado por la Consejería de Educación, Ciencia y Universidades de la CAM, convocatoria correspondiente al año 2024 de ayudas a proyectos de I+D realizados en colaboración entre grupos de investigación pertenecientes a las universidades y organismos de investigación de la Comunidad de Madrid.

5. Referencias

- [1] UNE EN 81-20:2022 Safety rules for the construction and installation of lifts - Lifts for transport of persons and goods - Part 20: Passenger and goods passenger lifts.
- [2] UNE EN 81-50:2022 Safety rules for the construction and installation of lifts - Lifts for transport of persons and goods - Part 50: Design rules, calculations, examinations and tests of lift components.
- [3] UNE EN 81-22:2022 Safety rules for the construction and installation of lifts - Lifts for transport of persons and goods - Part 22: Electric lifts with inclined path.
- [4] Pawel Lonkwic et al. Braking deceleration variability of progressive safety gears using statistical and wavelet analyses. *Measurement* 110 (2017) 90-97.
- [5] T. Pulecchi et al. Digital filtering of acceleration data acquired during the intervention of a lift safety gears. *Measurement* 23 (2010) 455-468
- [6] Dapeng Niu et al. Operation performance evaluation of elevators based on condition monitoring and combination weighting method. *Measurement* 194 (2022) 111091
- [7] Tomé M, et al. Automatic velocity measurement system applied to elevator overspeed governors. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2022; 43(5):559-569.
- [8] Xu B et al. Safety brake performance evaluation and optimization of hydraulic lifting systems in case of overspeed dropping. *Mechatronics Vol. 23*, (2013) 1180–1190.
- [9] Wang Qibing et al. MCU System-based Intelligent High-speed Elevator Door Operator Fault Analysis and Research. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 428 (2018) 012028.
- [10] Enrique Alcalá et al. “Diseño de ascensores inclinados. Desarrollo y validación de modelos matemáticos para el diseño de ascensores inclinados según el borrador de norma ISO prEN 81-22:2010”. *Revista COIIM* número 56, 2012
- [11] Schewer, Leonard E. *Validation metrics for response histories: perspectives and case studies*. Windsor; Springer-Velag London Limited, 2007.
- [12] M. A. Sprague, and T. L. Geers. “A spectral-element method for modelling cavitation in transient fluid–structure interaction”. *Mechanical Engineering, University of Colorado, Boulder, CO 80309-0427, U.S.A. Int. J. Numer. Meth. Engng* 2004; 60:2467–2499
- [13] Md. Shahidul Islam et al. A wavelet approach for precursor pattern detection in time series. *Journal of Electrical Systems and Information Technology* 5 (2018) 337–348.
- [14] Sifuzzaman, M., Islam, M.R., Ali, M.Z.: Application of wavelet transform, and its advantages compared to Fourier transform. *J. Phys. Sci.* 13, 121–134 (2009)

- [15] Kiymik, M.K., Guler, I., Dizibuyuk, A., Akin, M.: Comparison of STFT and wavelet transform methods in determining epileptic seizure activity in EEG signals for real-time application. *Comput. Biol. Med.* 35, 603–616 (2004)
- [16] P. Kumar, E. Foufoula-Georgiou. Wavelet analysis for geophysical applications *Rev. Geophys.*, 35 (1997), pp. 385-412
- [17] C. Torrence, G.P. Compo. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 79 (1998), pp. 61-78