

Estudio teórico de los tiempos de evacuación de Autocares de doble piso y análisis comparativo con los autocares de un único piso.

Enrique Alcalá-Fazio¹, Guillermo Dancausa-García², David Rincón-Dávila¹, Angel Luis Martín-López¹, Beatriz Valles-Fernández¹, Ernesto Capdepón-Carvajal¹, Joel Valenzuela-Cuartero¹

¹Grupo de investigación en ingeniería de vehículos y transportes, Instituto Universitario de Investigación del Automóvil Francisco Aparicio Izquierdo, Universidad Politécnica de Madrid, España. Email: enrique.alcala@upm.es

²Grupo de investigación en ingeniería de vehículos y transportes, ETS de Ingenieros Industriales de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, España. Email: guillermo.dancausag@alumnos.upm.es

Resumen

Son varios los incidentes con fuego en autocares que han causado la pérdida de la vida de pasajeros. Siendo el autocar uno de los modos de transporte más seguro, si no el más seguro, el sector está en continua búsqueda de mejoras que incrementen su seguridad. Administraciones, Laboratorios y Fabricantes han participado en los trabajos desarrollados en el Grupo de trabajo de Naciones Unidas BMFE. Su objetivo, mejorar los requerimientos a los autocares destinados a disminuir las posibilidades y consecuencias de los incendios. Sin embargo, pese a la exhaustividad de las discusiones y trabajos, hay un tipo de autocar cuyas características particulares no fueron consideradas, el de doble piso. Este trabajo, basado en modelos por agentes (ANYLOGIC) de la evacuación desarrollados en trabajos previos de los autores, mejora la validación, aplica los modelos a un autocar de dos pisos y establece la diferencia con un vehículo de un único piso.

Palabras clave: Autocar; incendio; evacuación; simulación; Autobús.

Abstract

There are several fire incidents in coaches that have caused the loss of life of passengers. As the coach is one of the safest modes of transport, if not the safest, the sector is in continuous search for improvements to increase its safety. Administrations, Laboratories and Manufacturers have participated in the work carried out in the United Nations BMFE Working Group. Its objective is to improve the requirements for coaches aimed at reducing the possibilities and consequences of fires. However, despite the exhaustiveness of the discussions and works, there is a type of coach whose particular characteristics were not considered, the double-decker. This work, based on evacuation agent-based models (ANYLOGIC) developed in previous works by the authors, improves the validation, applies the models to a double-deck coach and establishes the difference with a single-deck vehicle.

Keywords: Coach; fire; evacuation; simulation; bus.

1. Introducción

Son numerosas las referencias que permiten confirmar el elevado nivel de seguridad proporcionado por el modo de transporte en autocar. La mayoría de ellas, como por ejemplo Ibrahim [1], indican que las tasas de fallecidos y de lesionados severos por cada billón de

pasajeros-km son similares a las del ferrocarril y avión, y muy significativamente mejores que las del coche, peatón, ciclista y motociclista. Aunque existen diferencias, en los resultados de las diferentes referencias, principalmente debidas al ámbito regional al que se aplica el estudio, la conclusión general de todas ellas es la anteriormente expuesta.

El sector del transporte en autocar ha llegado a esta situación, tan positiva, debido al notable esfuerzo realizado por todas las partes involucradas en la actividad (Transportistas, Fabricantes de vehículos, Administraciones, etc). Gracias a ello, sucesivamente se han ido resolviendo los principales problemas causantes de lesiones, y/o decesos, en accidentes con autocares implicados. Un ejemplo muy notable es la reducción de la severidad de las consecuencias de los accidentes con vuelco gracias a la aplicación y evolución del Reglamento 66.

Desde hace algunos años, como consecuencia de numerosos incidentes con daños materiales y alguno con consecuencias para los ocupantes, la comunidad de profesionales e instituciones involucradas en el sector está analizando los incidentes con fuego. Brandt y Försth [2] establecen que en Suecia se reciben informes de sucesos con fuego en el 1% de los autobuses cada año, y que el 10% experimentará algún tipo de incendio durante su vida útil. Estos datos los consideran como una infraestimación, ya que indican que el número de sucesos no declarados, aunque desconocido, puede ser muy importante.

Por otra parte, los mismos autores indican que las lesiones a los ocupantes, como consecuencia del fuego, son poco frecuentes. Sin embargo, las consecuencias de un suceso pueden llegar a ser dramáticas:

- **Fiori, Perú, 2019, (17 fallecidos)**
- Puisseguin, Francia, 2015 (43 fallecidos) [3]
- Veracruz, Mexico 2014 (36 fallecidos)
- Nagari Tanjung Lolo, Indonesia 2014 (7 fallecidos)
- Karnataka, India 2014 (6 fallecidos) [4]
- Fundacion, Colombia 2014 (32 fallecidos)
- Northern California, USA 2014 (10 fallecidos) [4]
- Qum, Iran 2013 (44 fallecidos) [4]
- Kothokota, India 2013 (44 fallecidos) [4]
- Lwengo, Uganda 2012 (30 fallecidos) [4]
- Yobe, Nigeria 2011 (18 fallecidos) [4]
- Wuxi, China 2010 (24 fallecidos) [2]
- Uttar Pradesh, India, 2008 (63 fallecidos) [2]
- Hannover, Alemania, 2008 (20 fallecidos) [2]
- Wilmer, Texas, 2005 (23 fallecidos) [2]
- Bailen, España, 1996 (29 fallecidos) [5]

Por este motivo, en enero de 2018 y bajo la presidencia de la delegación francesa, se iniciaron los trabajos del grupo informal de trabajo “Behaviour of M2 & M3 general construction in case of Fire Event” (BMFE). El objetivo del grupo fue establecer en los reglamentos de Naciones Unidas N°107 y N°118, nuevos requerimientos, y mejoras de los existentes, aplicables a los sistemas de detección y extinción de incendios,

avisos, evacuación, así como al comportamiento de los materiales (velocidad de propagación y toxicidad de humo). Algunos de los trabajos del grupo, por su relevancia en algún aspecto específico de esta investigación, se citarán expresamente. Sin embargo, dada la importancia de los trabajos y conclusiones del grupo se ha considerado relevante indicar el acceso a la web donde se pueden consultar [6].

Los trabajos del grupo contaron con la participación de representantes de gran parte de las delegaciones nacionales, fabricantes de autobuses y autocares, laboratorios y servicios técnicos de homologación. La actividad se inició en enero de 2018 y terminó en septiembre de 2021, organizándose 16 sesiones de trabajo. Los resultados se plasmaron en propuestas de modificación de los reglamentos presentadas al “Working Party on General Safety Provisions (GRSG)”, que es un órgano subsidiario del “Foro Mundial para la Armonización de los Reglamentos sobre Vehículos (WP.29)” de Naciones Unidas.

Pese a la gran dedicación y exhaustividad de los trabajos, no se alcanzaron conclusiones relevantes sobre las diferencias que podía plantear un tipo vehículo cuya arquitectura plantea diferencias notables en la evacuación, el autobús, o autocar, de doble piso. El único estudio relativo al tema [7] encuentra diferencias muy pequeñas en los tiempos medios entre pasajeros consecutivos en simulacros realizados en autocares de uno y dos pisos. Sin embargo, el protocolo de ensayo se realizó de tal forma que los simulacros en el autocar de dos pisos fueron realizados después de hacer ensayos en un autobús urbano y en un autocar de un único piso. Esta secuencia tiene relevancia en las leves diferencias de tiempos encontradas, ya que el efecto aprendizaje de los individuos que participan se ha demostrado muy relevante [5]. Por ello se decidió estudiar, mediante modelos de simulación, cuál sería la posible diferencia en los tiempos de evacuación de un autobús de este tipo frente al de un único piso. Este es un planteamiento que algunos autores han aplicado en el análisis de la evacuación de edificios [8] y que los autores desarrollamos para el análisis de los vehículos de un único piso [9].

También es necesario considerar que, de todos los incidentes con víctimas enumerados anteriormente, únicamente el acontecido en Fiori correspondía a un vehículo de dos pisos. Dado que el número de vehículos de doble piso es reducido, por comparación a la cantidad de los de un piso, no sorprende la baja tasa de incidentes con fallecidos. Este es uno de los motivos por los que en el BMFE no se consideró necesario exigir medidas especiales para los autocares de doble piso. Sin embargo, este planteamiento, no parece tan coherente si se considera que la causa fundamental de fallecimientos en incendios de autocares es una inadecuada evacuación, es decir, un tiempo de

evacuación excesivamente elevado. La ausencia de consideraciones en el BMFE y un camino de evacuación realmente diferente, han sido las motivaciones para efectuar esta investigación.

2. Método

2.1. Validación modelo previo

No es frecuente comenzar un trabajo de simulación por una validación, más bien es algo casi incongruente. No obstante, son dos los motivos que han conducido a este orden en la ejecución de los trabajos, así como en su presentación. En primer lugar, se parte de modelos ya realizados por los mismos autores, cuya validación se ha realizado mediante comparación de los tiempos de evacuación teóricos con los obtenidos en diferentes ejercicios de simulacro. Segundo, los simulacros no permiten tener en cuenta efectos psicológicos de los pasajeros, ni el pánico, ni la percepción de la necesidad de evacuar inmediatamente.

Una de las primeras conclusiones que se puede extraer del análisis las investigaciones previas, en las que se presentan resultados de evacuación, es que la tasa de salida de pasajeros es muy diferente entre estudios 0,44 s/p-1,15 s/p.

Por ello, se ha decidido utilizar el video de un incidente ocurrido en Harbin (China), cuya evacuación es grabada en directo y está disponible en internet (Figura 1).



Figura 2. Imagen del incidente en Harbin, China.

<https://www.youtube.com/watch?v=-5aNdqZWphY>

De forma cualitativa, en el vídeo se aprecia que fue una evacuación muy rápida, fluida y afortunada, a pesar

incluso del retraso de apertura de la puerta delantera. De forma cuantitativa observa que el ritmo de salida de personas fue de 0,42 s/pasajero, para un tiempo total de evacuación de 26,6 s desde la apertura de las puertas. Los resultados del análisis del video se presentan en la Figura 2.

De este resultado destaca que la tasa de evacuación es muy cercana al valor mínimo obtenido en simulacros (0,42 s/p frente a 044 s/p). Observando el comportamiento de los pasajeros y la manera en la que salían apresuradamente, empujándose y cayendo al

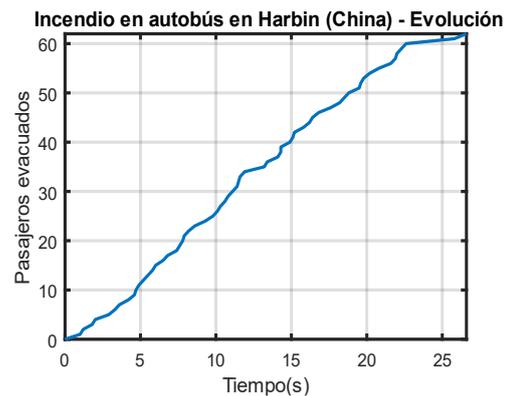


Figura 1. Evolución de la evacuación en el incendio de Harbin.

suelo, se puede inferir que si se llega a producir una caída en el interior podría haber provocado un bloqueo que ralentizase la evacuación.

Una vez determinado de un análisis de un incidente real, se adaptó el modelo de autocar de un piso [9] para que represente de manera lo más fiel posible las condiciones del vehículo del incidente en Harbin.

En primer lugar, se ha modificado la distribución en planta del vehículo, ya que se había concebido como un modelo de un autocar de 54 plazas, y para replicar este accidente es necesario contar con un autobús urbano con 62 personas (ver Figura 3).

Se ha aumentado la anchura de las puertas, acorde igualmente a la del autobús urbano Clase I y se ha desactivado el reductor de velocidad correspondiente a las escaleras de entrada y salida del autocar (las áreas

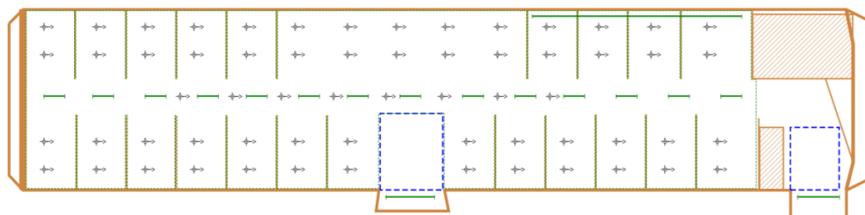


Figura 3. Vista en planta del modelo del accidente de Harbin, China

de color azul), ya que el vehículo del accidente era de piso bajo y no cuenta con tales escaleras. También se ha reconfigurado la planta del vehículo para hacerla representativa de un vehículo urbano Clase I.

El autocar tiene una longitud de 13,9 m y un ancho de 2,55 m. Se trata de un vehículo de gran capacidad. Cuenta con 85 plazas, sin incluir al conductor, estando 65 de ellas situadas en la planta superior (ver Figura 4).

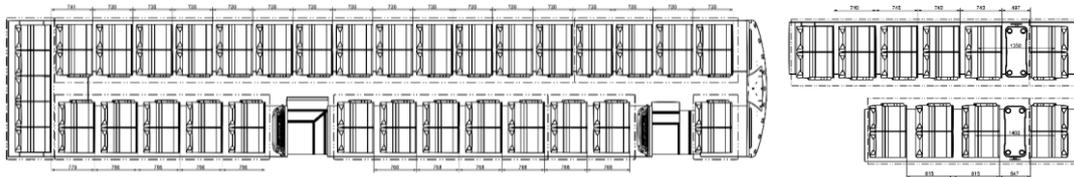


Figura 4. Vista en planta del autocar de doble piso modelado

Por último, se han incluido ocho atractores adicionales que representan las posiciones donde se colocarán los pasajeros. Se ha escogido la zona central del pasillo, ya que es el área donde frecuentemente se concentran los viajeros en autobuses urbanos.

Las principales diferencias, a parte de una distribución en planta diferente, entre el modelo del presente trabajo y el de la referencia [9] son dos, la existencia de dos pisos y la necesidad de conexión de ambos para el embarque y la evacuación.

Además del vehículo, se ha programado la apertura de las puertas para que sea exactamente igual a la de la situación real. En el vídeo se puede apreciar que la puerta delantera se abre 14 s después de a trasera, por lo que este comportamiento se replica, con el objetivo de tener una representación lo más fiel posible de las condiciones de la evacuación.

Para considerar estas diferencias primero se crean dos niveles sobre los que se dibujarán las dos plantas del autocar. El primero se nombra como *PlantaBaja* y se ubica en una cota nula. La segunda se llama *PrimeraPlanta* y se coloca a una cota de 185cm. Posteriormente se modelan tanto las escaleras de entrada y salida del autocar, como las que comunican la planta inferior con la superior. Para ello se ha hecho uso de los nodos rectangulares, en los cuales se ha

Una vez ajustado el modelo se procedió a realizar un

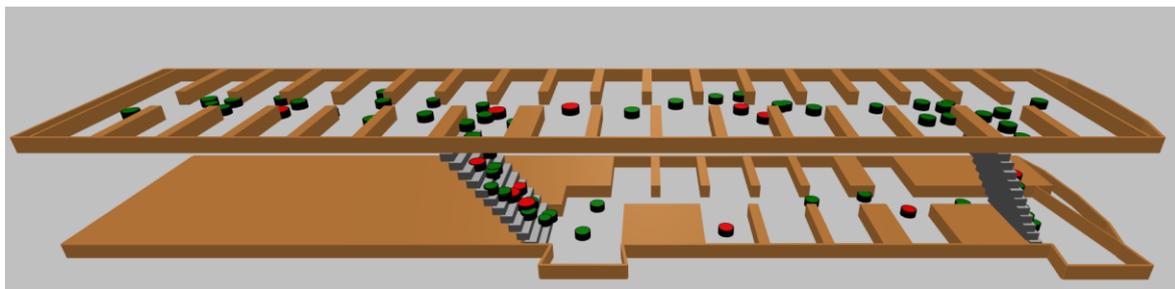


Figura 5. Vista en planta del autocar de doble piso modelado

análisis estadístico, mediante 1000 simulaciones en las que se considera variable la velocidad de los agentes conforme se describe en [9]. Los resultados de esta comparación se presentan en el apartado correspondiente.

2.2. Desarrollo modelo de 2 pisos

Para modelizar el autocar de doble piso se ha optado por replicar un autocar real, cuya marca y modelo no se revelarán para mantener la confidencialidad. Para ello se ha partido del plano en planta acotado del fabricante, lo cual permite representar de manera realista sus dimensiones.

modificado la velocidad de tránsito de los pasajeros.

En los autocares de doble piso, como en el representado, la planta inferior es de piso bajo, como en los autobuses urbanos, por lo que esta área es pequeña y limitada solamente a la zona de la puerta. Por medio de un *Ped Area Descriptor* se reduce la velocidad a la que los peatones pasan por ellas, multiplicándola por un factor de 0,6.

Los nodos rectangulares que regulan el comportamiento de los peatones en las escaleras entre las dos plantas se han nombrado *EscalerasDelanteras* y *EscalerasTraseras*. En ellos se ha modelado

mediante el bloque Slope la dirección de su gradiente máximo, ya que se configuran con pendiente para salvar el desnivel entre plantas. Se modelan rectángulos de color gris para los primeros peldaños de cada escalera y se repetirán en posiciones diferentes para representar la escalera en la vista tridimensional, que se mostrará más adelante. También se han representado dos líneas rojas de cada uno de estos nodos rectangulares, utilizados como referencia para los pasajeros a la hora de programar su paso por las escaleras (Figura 5).

Adicionalmente se ha dotado al modelo de la posibilidad de bloquear ambas puertas de servicio y el paso por las escaleras, de esta forma se analiza la influencia de que, en un caso particular de evento, puedan tener impedido el paso por cualquier razón.

2.3. Simulaciones y análisis estadístico

Utilizando el módulo Parameters Variation de AnyLogic se han ejecutado simulaciones en diferentes configuraciones de bloqueo de las salidas. Estas simulaciones se han realizado tanto en el modelo de dos pisos como en el de un piso.

El modelo ha sido programado para que exporte los siguientes datos a una hoja de cálculo: tiempos de subida, tiempos de evacuación para distintos % de pasajeros evacuados, permitiendo estudiar la evolución del número de pasajeros que emplean cada uno de los itinerarios de evacuación. Es decir, itinerarios entre escaleras, entre puertas, escaleras y salidas por las ventanas.

Mediante este análisis se va a analizar la influencia de los parámetros y se van a comparar los resultados del modelo con los de los diferentes simulacros para su validación. Como para poder conocer la posible dispersión de los resultados, y tener en cuenta su variabilidad, es necesaria una muestra lo suficientemente grande, se ha seleccionado 1000 simulaciones como espacio muestral en cada una de las situaciones.

Gracias a que los factores más importantes que influyen en el modelo (disponibilidad de puertas y escaleras y número de pasajeros) se han creado como parámetros, es muy sencillo en AnyLogic configurar en el modo Parameters Variation que cada una de las situaciones se repitan un millar de veces.

Realizando el mismo planteamiento en ambas tipologías de vehículo, un piso frente a doble piso, se obtienen las diferencias en los tiempos necesarios en cada caso.

3. Resultados

3.1. Validación

Para este ejemplo concreto se hace una excepción, y se considera el tiempo total de evacuación el correspondiente al 97 %, ya que se tienen unos datos reales con los que se puede hacer una comparación directa. Esto aumentará ligeramente el valor del tiempo final de evacuación, pero como en este caso se toma solamente el tiempo desde la apertura de las puertas, se reduce la variabilidad producida por los segundos anteriores a este momento y se obtiene una imagen fiel del proceso.

En la Figura 6 se representa el tiempo transcurrido en función del porcentaje de pasajeros evacuados. La

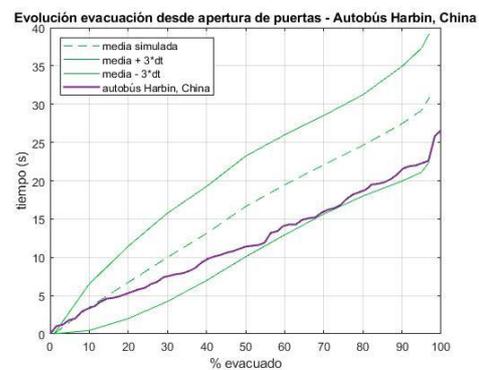


Figura 6. Vista en planta del autocar de doble piso modelado

curva violeta, referida a la curva del caso real, es equivalente a la de la Figura 1, mostrada en la introducción, pero en esta ocasión se representa el tiempo en el eje vertical y los pasajeros como porcentaje en lugar de valor absoluto.

En la misma figura se ha representado en verde el resultado de procesar las 1000 simulaciones con el comportamiento aleatorio de los pasajeros. En trazos la curva promedio para cada porcentaje del pasaje evacuado y en trazo continuo los valores $\bar{t} \pm 3 \cdot \sigma$. Se observa que:

- en los primeros 5 segundos la velocidad de evacuación del modelo se aproxima muy fielmente a la realidad,
- en el periodo 5-11 s la velocidad de evacuación predicha es menor que la real del incidente.
- Finalmente, a partir de dicho instante, $t = 11$ s en adelante, la pendiente del modelo se ajusta, con gran aproximación, a la del incidente.

Teniendo en cuenta que la puerta delantera no se abre hasta el instante $t = 14$ s, y que a partir de ese instante el modelo reproduce adecuadamente la velocidad de evacuación, el comportamiento anterior puede deberse

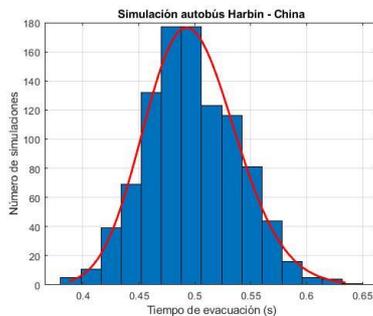


Figura 7. Función de probabilidad de los tiempos medios entre pasajeros consecutivos.

a la aleatoriedad del comportamiento de los pasajeros y a la influencia del efecto psicológico producido por el fuego.

Por lo anteriormente expuesto, y dado que la evolución real de la evacuación se encuentra en su totalidad dentro del intervalo predicho por el modelo se considera que este predice con fiabilidad los resultados.

Pese a que los resultados de los simulacros no pueden contemplar la motivación extraordinaria que puede producir en los pasajeros el fuego, ni tampoco su potencial efecto paralizador, se ha considerado relevante comparar los resultados del modelo con los de los diferentes ensayos de evacuación de los que se tiene constancia. En la Tabla 1 se presentan los tiempos medios de los simulacros que se han considerado más relevantes para este estudio.

Tabla 1: Resultados de ejercicios de

Fuente de datos	Tiempo medio por pasajero (s)
Harbin	0,42
RISE Urbano [7]	0,58
RISE Interurbano [7]	0,67
RISE Doble Piso [7]	0,63
Hungría urbano [10]	0,44
INSIA interurbano [5]	0,71

Si se tiene en cuenta que el intervalo predicho por el modelo para el 99,7% de las ocasiones es $[0,36 \text{ s} < t < 0,64]$, se observa como todos los modelos urbanos se ajustan adecuadamente a la simulación y están centrados, siendo Harbin el suceso más rápido.

Se considera, por tanto, que basado en los datos más representativos de las evacuaciones de autobuses y autocares el modelo es una buena herramienta para predecir con precisión los tiempos necesarios.

3.2. Comparación de resultados del modelo entre autocares de uno y dos pisos

Se han realizado simulaciones 1000 simulaciones de cada configuración considerada pertinente en función de la disponibilidad de las diferentes salidas de cada vehículo. Así los números de configuraciones seleccionadas, y simuladas, han sido: tres casos con el autocar de un único piso y nueve casos para el doble piso. Para clasificar las configuraciones se ha utilizado la siguiente notación:

- Se denomina “estándar” la evacuación con todas las vías disponibles.
- Si está bloqueada la puerta delantera o la trasera, el código son las siglas “PD” o “PT”, según proceda.
- Con las escaleras se hace lo mismo, con las siglas “ED” y “ET”.

Los resultados de las simulaciones se presentan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en la que se indica la disponibilidad de puertas y escaleras, la media y desviación típica del tiempo total de la evacuación, el tiempo medio por pasajero y el aumento de tiempo de cada situación de bloqueo frente a la estándar.

Así mismo, se incluyen en la Tabla los coeficientes μ y σ que caracterizan la distribución log-normal que se ha empleado para el ajuste de cada configuración.

El modelo tiene implementada la posibilidad [9] de que haya pasajeros que “decidan” salir utilizando las salidas de emergencia de las ventanas.

Los tiempos de evacuación por pasajero en ambos tipos son comparables. A pesar de que, obviamente, los tiempos totales son mayores por el mayor número de pasajeros totales, los valores de tiempo promedio entre pasajeros consecutivos son similares. Sin ir más lejos, los tiempos por pasajero de la evacuación del caso estándar, para ambas tipologías, son 0,87 y 0,86 s.

Sin embargo, los tiempos por pasajero aumentan cuando se bloquean dos vías en el doble piso, lo cual es razonable. La semejanza se puede explicar por el hecho de que la salida de pasajeros, en los casos con ningún o solamente un bloqueo, se hace de manera continua. Inicialmente salen los de la planta baja, y para cuando la planta ha sido evacuada, los pasajeros del piso superior alcanzan la puerta de salida, sin llegar a producirse una aglomeración.

Si se produce un bloqueo, el más crítico es en la escalera trasera. Esto se debe a la gran cantidad de pasajeros que viajan en el piso superior y a la ubicación centrada. La escalera, al situarse en la zona central, es la primera opción de salida de buena parte de los viajeros, por lo que la no disponibilidad de la misma

implica un camino de evacuación más largo, además de reducir la capacidad de evacuación total. El caso menos crítico es el producido por el bloqueo de la escalera delantera, por el mismo razonamiento.

Un bloqueo en cualquiera de las dos puertas tiene efectos similares sobre el tiempo de evacuación, con únicamente un 7% de diferencia entre ambas, siendo la delantera ligeramente más influyente.

Si se producen dos bloqueos, la situación más crítica es cuando son opuestos. Es decir, si se bloquea una puerta delante y la escalera detrás y viceversa. Las situaciones PTED y, en especial, PDET son las que más tiempo tardan en evacuar. En el caso de esta última se llega incluso a superar el doble de tiempo de evacuación que si no se produjera un bloqueo. Esto es debido a que

Adicionalmente, la posibilidad de que los caminos de evacuación queden bloqueados, son mayores ya que las escaleras producen un efecto cuello de botella.

4. Conclusiones

Se ha modelado un autocar de doble piso en AnyLogic a partir de la lógica del modelo de un piso. La simulación funciona sin errores y cualitativamente el proceso de evacuación se desarrolla de una manera correcta.

En cuanto a la validación de los modelos, la comparación con el único accidente del que se pueden extraer tiempos de salida de cada pasajero (Harbin) es muy positiva, obteniéndose resultados absolutamente comparables con los del incidente.

Tabla 2: Tabla resumen de resultados de simulaciones de autocares de una planta vs. 2 plantas.

1 piso 54 p	Salidas disponibles				Media (s)	Desviación típica (s)	Tiempo medio por pasajero (s)	% Aumento respecto a estándar	μ	σ
	PD	PT	ED	ET						
Estándar	Si	Si	N/A	N/A	47	6,5	0,87	-	3,84	0,14
PD	No	Si	N/A	N/A	79,6	6,5	1,47	69,35	4,37	0,08
PT	Si	No	N/A	N/A	56,9	5,4	1,05	21	4,03	0,10
2 pisos 85 p	PD	PT	ED	ET	Media (s)	Desviación típica (s)	Tiempo medio por pasajero (s)	% Aumento respecto a estándar	μ	σ
Estándar	Si	Si	Si	Si	73,5	2,9	0,86	-	4,30	0,040
PD	No	Si	Si	Si	112	4,9	1,32	52,37	4,71	0,044
PT	Si	No	Si	Si	107,1	4,1	1,26	45,73	4,67	0,038
ED	Si	Si	No	Si	99,8	3,8	1,17	35,73	4,6	0,038
ET	Si	Si	Si	No	123,3	6,4	1,45	67,82	4,81	0,052
PDED	No	Si	No	Si	103,1	3,4	1,21	40,24	4,63	0,033
PTET	Si	No	Si	No	124,6	5	1,47	69,55	4,82	0,039
PDET	No	Si	Si	No	173,3	5,9	2,04	135,79	5,15	0,034
PTED	Si	No	No	Si	142,6	6,5	1,68	94,01	4,96	0,045

todos los pasajeros de la planta superior se ven forzados a recorrer un camino considerablemente más largo para poder salir. Un pasajero sentado en la parte trasera de esta planta tendría que recorrer todo el pasillo hasta las escaleras delanteras, para después tener que recorrer hacia la puerta trasera todo el pasillo de la planta inferior. Todo ello viéndose forzado a esperar a que todos los demás pasajeros salgan por delante de él, impidiéndole avanzar.

Resumiendo, la comparación entre ambos tipos de vehículos se considera que, si bien los resultados no son demasiado diferentes, los vehículos de dos plantas están destinados a llevar un mayor número de pasajeros, precisando mayor tiempo de evacuación.

En la comparativa con simulacros de evacuación se obtienen resultados algo más variados, debido a la diferente naturaleza de las fuentes consultadas y, sobre todo, a las diferentes condiciones de ensayo y tipos de vehículos. No obstante, en aquellos procesos cuya naturaleza es comparable a la simulada con AnyLogic, los resultados de la validación son equivalentes a los de los simulacros. Es resaltable que la diferencia en los tiempos de salida entre los simulacros y el incidente de Harbin.

Se considera, por todo lo anteriormente expuesto, que el modelo es utilizable para el estudio de evacuaciones de autobuses y autocares de uno o dos pisos.

En relación al estudio comparativo entre vehículos de una planta y aquellos con dos, cabe destacar que los tiempos de evacuación en autocares de doble piso son superiores a los de un piso, Debido fundamentalmente a su mayor capacidad. Sin embargo, la velocidad de evacuación es similar entre ambos, para condiciones de disponibilidad de salidas comparables.

Los bloqueos de escaleras, en los autocares de doble piso, tienen un gran efecto en los autocares de doble piso, en especial la trasera, ya que es la ruta de evacuación prioritaria de la mayoría de pasajeros de la planta superior.

En definitiva, las condiciones de los vehículos de doble piso son suficientemente diferentes como para que tengan unas consideraciones independientes a la hora de definir sus sistemas de evacuación.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha podido ser realizado gracias al apoyo de la Dirección General de Investigación e Innovación Tecnológica de la Consejería de Ciencia, Universidades e Innovación de la Comunidad Autónoma de Madrid, que ha financiado el [Programa SEGVAUTO 4.0-CM. S2018-EMT-4362. 2009-2021](#).

6. Referencias

- [1] Ibrahim, M.N.; Logan, D.B.; Koppel, S.; Fildes, B. “Fatal and Serious Injury Rates for Different Travel Modes in Victoria, Australia.” *Sustainability* 2022, 14, 1924. <https://doi.org/10.3390/su14031924>
- [2] Brandt, J; Försth, M. Testing active fire protection systems for engine compartments in buses and coaches - a pilot study. SP Technical Research Institute of Sweden. SP Report 2011:22 [ISBN 978-91-86622-53-4](#)
- [3] Sundström, B; Rosen, F; “Bus Fire Safety Research for Reducing the Risk of Fires.” RISE Research Institutes of Sweden, Division Transport and Safety. Newsletter n°13 – Novembre 2017. Polyflame. Société Chimique de France (SCF)
- [4] Försth, M. “Bus fire safety – state of the art and new challenges”. Proceedings from 3rd International Conference on Fires in Vehicles – [FIVE 2014](#). Pages 39-50. October 1st-2nd, 2014 Berlin, Germany.
- [5] Páez, J.; Furones, A.; Alcalá, E. (March, 2018). “Road accident occurred on 02/28/1996. Coach bursts into flames in Bailén. Coach evacuation drills.” [BMFE-02-04e](#). BMFE Informal Group. GRSG. WP29. United Nations.
- [6] Behaviour of M2 & M3 General Construction in Case of Fire Rvent ([BMFE](#)). Repositorio de trabajos, actas y propuestas.
- [7] Albertsson, P; Björnstig, U.; Petzäll, J.; Falkmer, T.; Näsman, Y.; “Evacuation tests of passenger from buses and coaches in case of fire”. [BMFE-03-05](#). Sweden.
- [8] Kasereka, S.; Kasoro, N. Kyamakya, K.; Doungmo, E. F.; Chokki, A.; Yengo, M. “Agent-Based Modelling and Simulation for evacuation of people from a building in case of fire.” *Procedia Computer Science*. Volume 130, 2018, Pages 10-17. ISSN 1877-0509. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.04.006>.
- [9] Alcalá, E.; Bartolomé, C. “Agent-based simulation model of bus evacuation events.” *Transportation Research Procedia*, Volume 58, 2021. Pages 471-478. ISSN 2352-1465. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.063>.
- [10] Matolcsy, M. “Bus fire and evacuation tests” Informal document No. [GRSG-91-10](#). (91st GRSG, 17-20 October 2006. agenda item 1.2.6.).