

Aplicación de procedimientos gráficos para determinar la evacuación óptima de un recinto de pública concurrencia y verificar los resultados

S. Casadesús Pursals¹, F. Garriga Garzón²

¹Dep. de Estadística e Inv. Operativa, UPC, c/. Colom 11, 08222 Terrassa, salvador.casadesus@upc.edu

²Dep. de Organización de Empresas, UPC, c/. Colom 11, 08222 Terrassa, federico.garriga@upc.edu

Resumen

En el siguiente trabajo se muestra una aplicación en la que se prueba la utilidad de los procedimientos gráficos para conocer la distribución de los ocupantes que consigue la evacuación de un recinto en el mínimo tiempo. Se detallan los últimos avances en la solución del problema y se profundiza en el proceso de verificación de los resultados de forma que los cálculos obtenidos mediante estos procedimientos tengan la adecuada credibilidad para su implantación.

Palabras clave: Evacuación de edificios, optimización de la evacuación.

1. Introducción

En general la seguridad de las personas en los edificios se garantiza si el tiempo de evacuación es inferior al previsto para el desarrollo de cualquier incidente que pueda producirse, por ello el problema de la evacuación de edificios se asocia a menudo a situaciones de emergencia. El tiempo necesario para la evacuación de un edificio depende de las características constructivas del mismo, la capacidad de locomoción de los individuos y la organización de los recorridos de los ocupantes, corresponderá a las técnicas cuantitativas determinar la asignación hacia cada una de las salidas para lograr un tiempo de evacuación mínimo.

La aplicación que se propone consiste en una adaptación del procedimiento propuesto por el profesor R. L. Francis (1981) en la monografía “Un procedimiento gráfico simple para estimar el tiempo mínimo para evacuar un edificio”. Se aplica a un recinto con 2500 ocupantes que dispone de cinco salidas. Un aspecto característico de este problema consiste en el hecho de operar con la seguridad de las personas, entonces la responsabilidad de las afirmaciones hace que cualquier solución deba someterse a un proceso de validación para ofrecer las debidas garantías y ser realmente un instrumento para la toma de decisiones.

2. Obtención de la función de evacuación de las salidas

El primer paso para resolver el problema consiste en obtener la función de evacuación $t_j(x_j)$ de cada una de las salidas con la máxima precisión. Las funciones de evacuación $t_j(x_j)$ se obtienen a partir de los modelos de locomoción de J. J. Fruins (1987), la función $t_j(x_j)$ indica el tiempo que tardarían en abandonar el recinto x_j personas si utilizaran la salida j .

Si en la salida j , se efectúa un recorrido l_j , se registra una densidad de ocupación d_j , se produce una velocidad de circulación v_j y existe un flujo f_j , y estas magnitudes se suponen constantes durante todo el tiempo que dura la evacuación. Resulta la función (1).

$$t_j(x_j) = t_{0,j} + \frac{l_j}{v_j} + \frac{x_j}{f_j} \quad (1)$$

3. Descripción del problema

Si un recinto que dispone de n salidas independientes y k ocupantes uniformemente distribuidos y no existe interferencia en el movimiento de los ocupantes que se dirigen a cada una de ellas. El problema consiste en encontrar el número de personas x_j que deben utilizar cada salida para minimizar el tiempo total de evacuación. El tiempo de evacuación se designa por z , resulta la función objetivo (2), sujeta a las restricciones (3) y (4).

$$\text{Min}(z) = \text{Max}[t_1(x_1), \dots, t_n(x_n)] \quad (2)$$

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = k \quad (3)$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0 \quad (4)$$

4. Proceso iterativo para la obtención de la solución del problema

Para obtener la solución del problema es preciso hallar las funciones de evacuación inversas $p_j(z)$ de cada una de las salidas, indican el número de personas capaces de abandonar el recinto utilizando la salida j en un tiempo z , según la expresión (5)

$$p_j(z) = \begin{cases} 0 & z < (t_{0,j} + \frac{l_j}{v_j}) \\ \left[z - (t_{0,j} + \frac{l_j}{v_j}) \right] \times f_j & z \geq (t_{0,j} + \frac{l_j}{v_j}) \end{cases} \quad (5)$$

Mediante la adecuada composición de $P(z)$, denomina función de evacuación total, es posible obtener la solución óptima del problema mediante procedimientos gráficos y analíticos. Normalmente es más simple la solución gráfica, cuyo proceso de resolución es el siguiente:

Primer paso. Determinar para cada salida j la función de evacuación $t_j(x_j)$.

Segundo paso. Obtener la función de evacuación inversa $p_j(z)$, basta con representar la función de evacuación $t_j(x_j)$ situando los tiempos de evacuación z en el eje de abscisas y el número de personas $p_j(z)$ en el eje de ordenadas.

Tercero paso. Obtener y efectuar la representación gráfica de la función $P_T(z)$. Si las salidas son independientes, se suma los valores correspondientes de cada una de ellas representados por las funciones $p_j(z)$. $P_T(z)$ indica el número total de personas que pueden salir en un tiempo z .

Cuarto paso. Se sitúa el valor k en el eje de ordenadas. Desde este punto se traza una línea horizontal hasta la intersección con la línea $P_T(z)$.

Quinto paso. Desde este punto de intersección se traza una línea vertical, en el eje de abscisas se lee el tiempo necesario para la evacuación de los k ocupantes, resulta el tiempo de evacuación mínimo z^* .

Sexto paso. A partir de las intersecciones de la línea vertical con las funciones $p_j(z)$ de cada salida, se trazan líneas horizontales, en el eje de ordenadas se efectúa la lectura de la asignación $p_j(z^*)$ que corresponde a cada salida j .

$$p_j(z^*) = x_j^*$$

Séptimo paso. Finalmente de forma analítica debe verificarse que se ha producido la evacuación de la totalidad de ocupantes:

$$x_1^* + \dots + x_n^* = p_1(z^*) + \dots + p_n(z^*) = k$$

5. Aplicación para el estudio de la evacuación de un edificio de pública concurrencia

En primer lugar se analizan los factores que definen el sistema de evacuación. En cuanto a la configuración del edificio se puede observar que se trata de un recinto de una sola planta desde el que se accede directamente al exterior, corresponde a la representación de la figura 1. Por tratarse el exterior de una amplia zona ajardinada se considera un espacio seguro. Las salidas se hallan distribuidas en toda la planta, por lo que resulta razonable admitir la inexistencia de interferencia en el movimiento de los ocupantes que se dirigen a cada una de ellas. La planta dispone de cinco salidas y hacia las mismas se hallan configuradas amplias zonas de paso, si bien en condiciones excepcionales podrían habilitarse otras dos salidas. En las salidas 1, 2, 3 y 4 la circulación se efectúa por una rampa de pendiente del 5% y de longitud 12 metros, siendo la circulación hacia la salida 5 completamente horizontal.

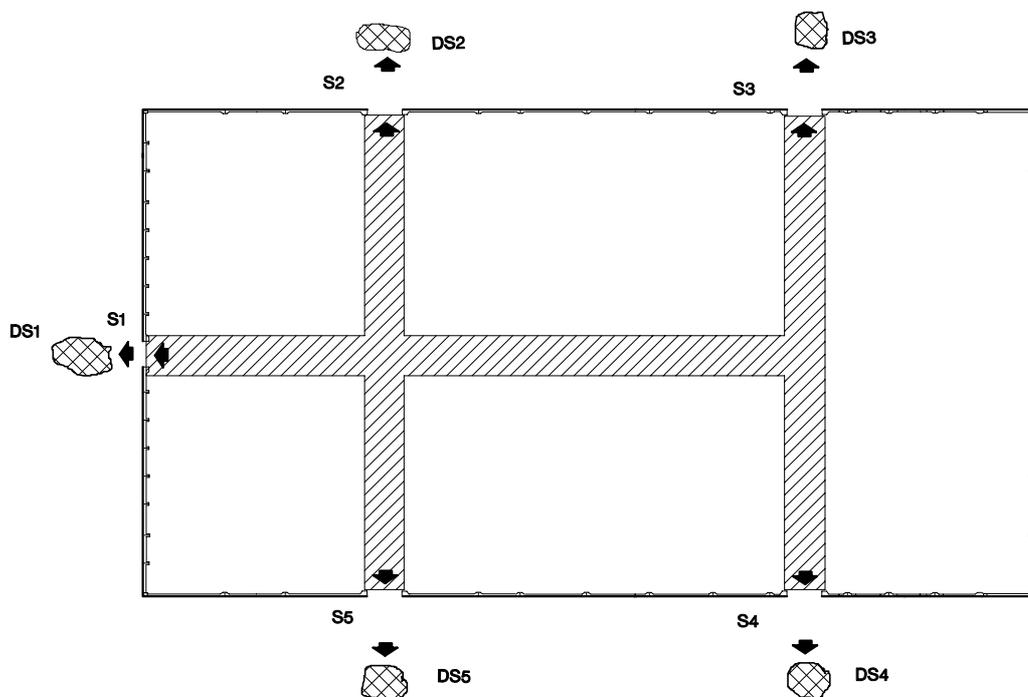


Figura 1. Planta de un pabellón

Los ocupantes del edificio pueden ser cualquier tipo de personas por lo que sus dimensiones y características de locomoción deben considerarse las estándar, por ello directamente pueden utilizarse las tablas de J. J. Fruins reproducidas en el anexo. La velocidad de circulación hacia las salidas 1, 2, 3, y 4 se supone de 42 metros por minuto, mientras que hacia la salida 5 la velocidad que se supone es de 55 metros por minuto por tratarse de un tramo completamente horizontal. En el recinto se efectúa un estricto control de accesos, permitiendo conocer en cualquier momento su ocupación. Al ser un recinto de pública concurrencia no puede suponerse que los ocupantes tengan ninguna familiaridad con el recinto. Así mismo, cabe pronosticar que las personas presentes rehúsen el contacto físico en las retenciones, en cuyo caso las densidades de ocupación de las salidas no serán excesivamente elevadas, pudiéndose suponer valores máximos de 3 personas por metro cuadrado.

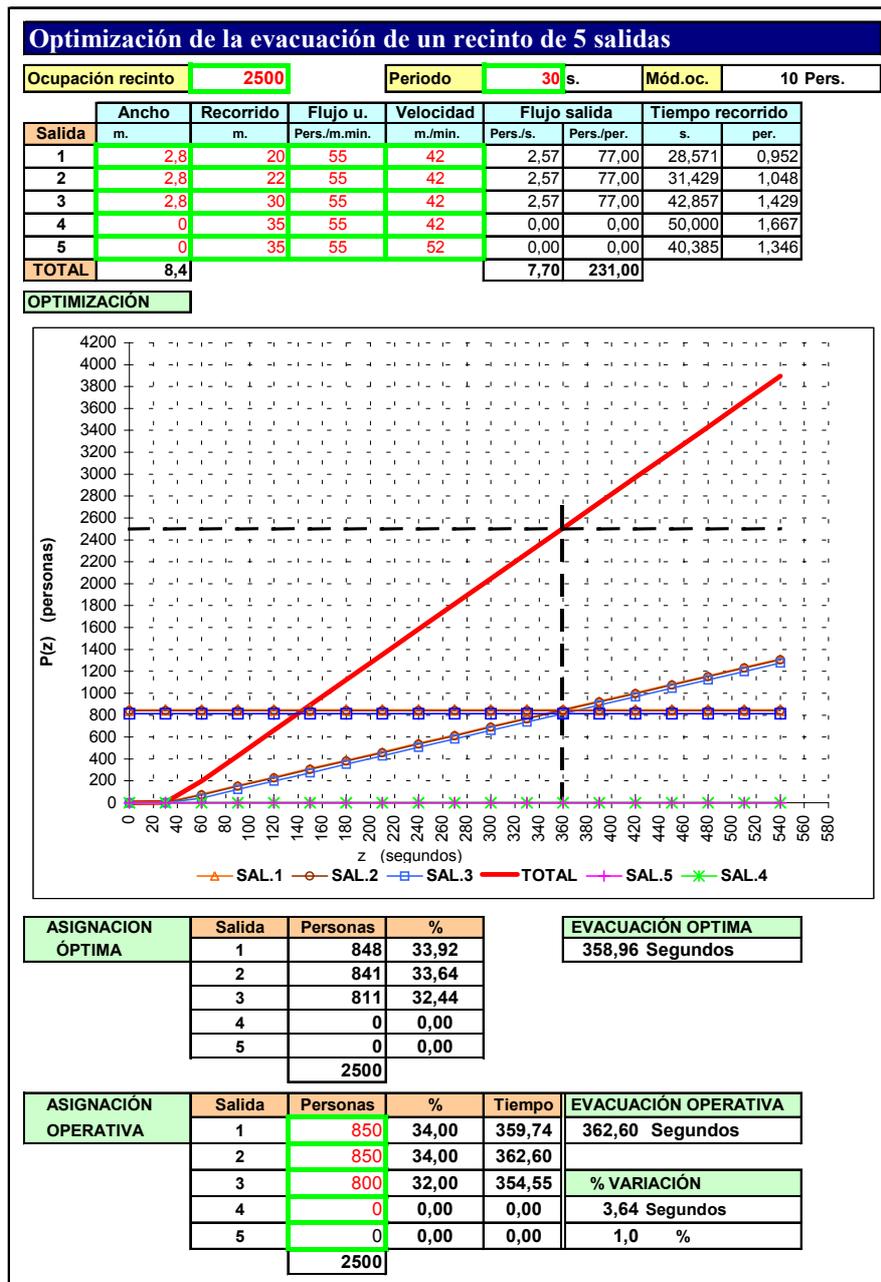


Figura 2. Optimización de la evacuación de un recinto de tres salidas

La previsible actitud o conducta de los ocupantes al recibir una señal de alarma será la de esperar ciertas indicaciones que debe proporcionar el personal del recinto. En principio la tendencia de los ocupantes sería de abandonar el edificio por la puerta que han entrado, ello daría lugar a grandes retenciones que deberían corregirse mediante una adecuada distribución hacia otras salidas utilizables y salidas de emergencia. La señalización acústica y óptica de que dispone el edificio debe tener una total credibilidad, por lo que no se prevén demoras en el inicio de la evacuación. Existen procedimientos formales perfectamente desarrollados en el manual de autoprotección del edificio, en dicho plan se planifican las actuaciones del personal responsable de la gestión y de los servicios del establecimiento en situaciones de emergencia. La dificultad radica en la transmisión de las instrucciones a todos los ocupantes en tiempo real, especialmente para abandonar el recinto utilizando la totalidad de salidas disponibles.

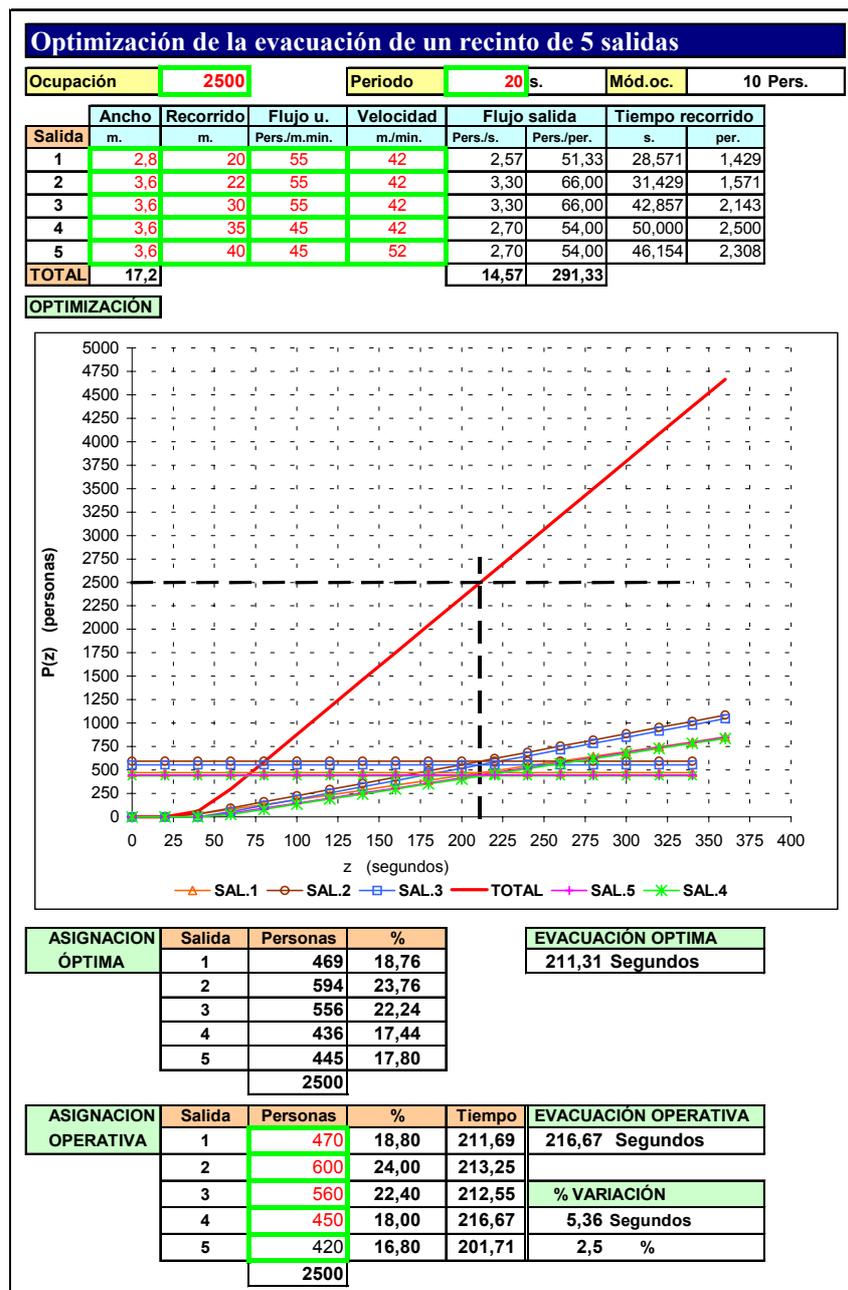


Figura 3. Optimización de la evacuación de un recinto de cinco salidas

En el desarrollo analítico de la aplicación se observó que a menudo resultaba conveniente efectuar ajustes en el número de personas asignadas a una salida, por ejemplo, si la asignación óptima de una salida eran 234 personas, resultaba interesante evaluar las consecuencias de asignar 250 personas a dicha salida, dando lugar el resultado de estos ajustes a la denominada asignación operativa, a partir de la cual se obtienen las desviaciones absolutas y porcentuales respecto el tiempo de evacuación total y el de cada una de las salidas. Realmente, en un edificio de pública concurrencia carece de sentido hablar de asignaciones exactas y se considera muy razonable redondear si se evalúan correctamente las diferencias que suponen dichas aproximaciones.

En el primer caso analizado, se supone que el recinto tiene una ocupación de 2500 personas y tan sólo se utilizan tres salidas de una anchura mínima de paso de 3,0 metros, lo que da lugar a un ancho efectivo de 2,8 metros. Los recorridos de evacuación hasta las salidas 1, 2 y 3 son respectivamente de 20, 22 y 30 metros. Con estos valores se procede al cálculo de la evacuación resultando los valores de la figura 2.

La distribución óptima hacia las salidas 1, 2 y 3 es respectivamente de 848, 841 y 811 personas, suponiendo un tiempo de evacuación de 359 segundos. Aproximadamente unos 6 minutos, un tiempo de evacuación excesivamente alto si se considera que a partir de los 2,5 minutos pueden tener lugar fenómenos de nerviosismo en los ocupantes. Si se redondea el valor de las asignaciones, en caso de una evacuación de emergencia se asignarían aproximadamente 850 personas a las salidas 1 y 2 y 800 personas a la salida 3, resultando razonable esta asignación ya que el recorrido de evacuación de esta tercera salida resulta mayor, ello supone una variación de 3,6 segundos lo que da lugar a un incremento del 1% en el tiempo de evacuación. La magnitud del tiempo de evacuación exige replantear la situación del recinto, resulta obvia la utilización de cinco salidas, así como el incremento de las anchuras de paso de las salidas 2 y 3. La salida 1 mantiene la anchura efectiva de paso de 2,8 metros y las salidas 2, 3, 4, y 5 una anchura efectiva mínima de 3,6 metros, estos valores dan lugar a los resultados proporcionados por la solución gráfica de la figura 3.

En este segundo análisis el resultado del tiempo de evacuación obtenido resulta más razonable, sin embargo todavía supera los 4 minutos. En estas circunstancias si la asignación operativa fuera de 470 personas hacia la salida 1, 600 hacia la salida 2, 560 hacia la 3, 450 hacia la 4 y las 420 restantes hacia la salida 5, tan solo produciría un incremento de unos 6 segundos en el tiempo de evacuación, es decir, un incremento porcentual del 2,5 %. Seguramente esta asignación operativa todavía no reúne la adecuada simplicidad, por lo que serían precisos nuevos tanteos.

Cuando la ocupación fuera de 2500 personas la alternativa más razonable consiste en habilitar la totalidad de las posibles salidas, concretamente utilizar las siete salidas de que dispone el recinto, en cuyo caso los resultados analíticos son los que se presentan en la figura 4. Se logra un tiempo de evacuación de unos tres minutos, siendo posible una distribución operativa que produce incrementos en el tiempo de evacuación de tan solo el 7,6 %. Si bien es la mejor solución obtenida, todavía deberían buscarse aspectos que aportaran alguna mejora.

En este caso no se considera el diseño del punto de reunión, en este tipo de edificios resulta compleja la agrupación de las personas que han abandonado el recinto y no son posibles operaciones de recuento.

Optimización de la evacuación de un recinto de 7 salidas								
Ocupación recinto		2500		Periodo		15 s.		
Salida	Ancho	Recorrido	Flujo u.	Velocidad	Flujo salida		Tiempo recorrido	
	m.	m.	Pers./m.min.	m./min.	Pers./s.	Pers./per.	s.	per.
1	2,8	20	55	42	2,57	38,50	28,571	1,905
2	3,6	22	55	42	3,30	49,50	31,429	2,095
3	3,6	30	55	42	3,30	49,50	42,857	2,857
4	3,6	35	55	42	3,30	49,50	50,000	3,333
5	3,6	35	55	52	3,30	49,50	40,385	2,692
6	2,8	35	55	52	2,57	38,50	40,385	2,692
7	2,8	35	55	52	2,57	38,50	40,385	2,692
TOTAL	22,8				20,90	313,50		
OPTIMIZACIÓN								
ASIGNACIÓN ÓPTIMA		Salida	Personas	%	EVACUACIÓN ÓPTIMA			
		1	335	13,40	159,05 Segundos			
		2	421	16,84				
		3	383	15,32				
		4	360	14,40				
		5	392	15,68				
		6	305	12,20				
		7	304	12,16				
			2500					
ASIGNACIÓN OPERATIVA		Salida	Personas	%	Tiempo	EVACUACIÓN OPERATIVA		
		1	350	14,00	164,94	171,21 Segundos		
		2	400	16,00	152,64			
		3	400	16,00	164,07	VARIACIÓN		
		4	400	16,00	171,21	12,17 Segundos		
		5	400	16,00	161,60	7,65 %		
		6	300	12,00	157,27			
		7	250	10,00	137,79			
			2500					

Figura 4. Optimización evacuación de un recinto de siete salidas

Para validar las magnitudes de locomoción de los ocupantes podrían realizarse ensayos, sin embargo resulta complejo hallar fórmulas que proporcionen la adecuada credibilidad a los mismos. Resulta complejo poder afirmar que las características de locomoción de las personas que participan en el ensayo son similares a las de las personas que asisten al recinto si no se opera de forma extremadamente rigurosa.

6. Verificación de los resultados

Para verificar los resultados se trata de realizar ensayos en los cuales se debe comparar la función de evacuación inversa $p_j(z)$ con los valores proporcionados por la función $s_j(z_i)$, siendo ésta la expresión del número de personas que han abandonado el recinto en determinados instantes $z(i)$. La adecuada correspondencia entre ambas funciones permite garantizar que las magnitudes de locomoción supuestas coinciden razonablemente con las de los individuos aportando los resultados las debidas garantías.

Para implantar este proceso de contraste se supone que es posible efectuar mediciones del número de personas que han abandonado el recinto por la salida j en determinados periodos de tiempo, por ejemplo intervalos regulares de 5, 10, 15 ó 30 segundos, lo que dará lugar a disponer de un conjunto amplio de mediciones. Desde un punto de vista práctico, la realidad es que aunque técnicamente son posibles estos dispositivos de conteo, no son habituales y normalmente no será posible disponer de tantos valores, sin embargo el procedimiento sigue siendo perfectamente válido con pocas observaciones. Una forma práctica de realizar las mediciones puede ser tan simple como situar dos personas en una salida, una mediante un cro-

nómetro mide el tiempo y la otra contabiliza las personas que cruzan delante de las mismas y anota ambas magnitudes.

Para la aplicación al caso estudiado se ha formado un grupo de características personales diversas de 154 personas para realizar ensayos de evacuación, este grupo de personas se ha situado en la proximidad de las salidas, concretamente en las condiciones establecidas en el modelo inicial, se ha dado la señal de alarma y luego han abandonado el recinto por la salida correspondiente, este ensayo se ha realizado en las cinco salidas de que dispone el recinto obteniéndose resultados de características muy similares.

Tabla 1. Resultados del proceso de verificación

Tiempo (segundos)	Salida 4 (Pers.)
45	1
60	28
90	123
118	154

En el ensayo realizado en la salida 4 se han situado los ocupantes a unos 35 metros de la salida ocupando una zona rectangular de 10 metros de ancho por 40 de longitud y desde la misma a partir de una señal de alarma han iniciado el ensayo. El tiempo que ha tardado el primer ocupante en abandonar el recinto ha sido de 45 segundos, el resto de mediciones se han efectuado a los 60 y 90 segundos y la evacuación finaliza a los 118 segundos, dichos valores pueden observarse en la (Tabla 1).

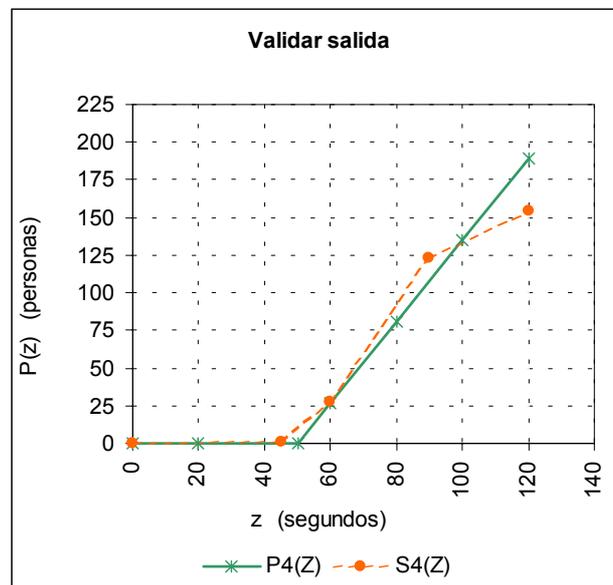


Figura 5. Análisis de la función de evacuación de la salida 4

En la figura 5 puede observarse la representación conjunta de función de evacuación de la salida y de los valores experimentales, donde se concluye que los valores experimentales guardan una cierta similitud con los teóricos. El tiempo necesario para llegar hasta la salida es ligeramente inferior al teórico, los flujos guardan una cierta similitud, a los 90 segundos se observa un flujo ligeramente superior al previsto y a los 120 segundos significativamente

inferior. Las discrepancias que se aprecian pueden considerarse absolutamente normales, el retraso a los 120 segundos puede justificarse por la existencia de algunas personas mayores en el grupo con una velocidad de desplazamiento inferior a la establecida como normal.

7. Conclusiones

A modo de conclusión puede observarse como de forma razonablemente simple es posible obtener estimaciones de los tiempos de evacuación de un recinto de las características del presentado, analizar las distribuciones óptimas hacia las salidas y estudiar otras decisiones que deben ayudar a gestionar evacuaciones de emergencia, mejorando substancialmente la seguridad de los ocupantes.

8. Reproducción de las tablas de J. J. Fruins

Reproducción de la tablas de ocupación y de circulación de J. Fruins

A) Ocupación

Nivel de servicio	A	B	C	D	E	F
Módulo (m ² /persona)	> 1.21	1.21 0.93	0.93 0.65	0.65 0.28	0.28 0.19	< 0.19
Densidad (pers. /m ²)	< 0.83	0.83 1.08	1.08 1.54	1.54 3.58	3.58 5.38	> 5.38
Separación en m. entre personas	> 1.22	1.22 1.07	1.07 0.91	0.91 0.61	< 0.61	contacto

B) Circulación pasillos

Nivel de servicio	A	B	C	D	E	F
Densidad (personas / m ²)	< 0.30	0.30 0.43	0.43 0.71	0.71 1.07	1.07 2.15	> 2.15
Velocidad (m. /min.)	< 79.25	79.25 76.20	76.20 70.10	70.17 60.96	60.96 33.53	< 33.53
Flujo específico (pers. /m. min.)	< 22.97	22.97 32.81	32.81 49.21	49.21 65.62	65.62 82.02	> 82.02

C) Circulación en descenso escaleras

Nivel de servicio	A	B	C	D	E	F
Densidad (personas / m ²)	< 0.53	0.53 0.71	0.71 1.07	1.07 1.53	1.53 2.69	> 2.69
Velocidad (m. /min.)	> 38.01	38.01 36.58	36.58 35.05	35.05 32.00	32.00 25.91	< 25.91
Flujo específico (pers. /m.min.)	< 16.40	16.40 22.97	22.97 32.81	32.81 42.65	42.65 55.77	> 55.77

9. Referencias

- [1] Casadesús, S./ Garriga, F., “Procedimiento grafico para la optimización de la evacuación de un recinto”, IV Congreso de ingeniería de organización, Sevilla, Septiembre 2001.
- [2] Casadesús, S/ Garriga, F., “Aplicación de procedimientos gráficos para la optimización de la evacuación de edificios”, VII Congreso de ingeniería de organización, Valladolid, Septiembre 2003.
- [3] Francis, R. L., "A simple graphical procedure to estimate the minimum time to evacuate a building", Society of Fire Protection Engineers, Technology Report 1979-5, 1979, 14 p.
- [4] Francis, R. L., "A 'Uniformity principle' for evacuation route allocation", Journal of Research of National Bureau of Standards Vol.86 September-October, 1981, pp. 509-513.
- [5] Fruins, J. J., "Pedestrian planning and design. Elevator World", Library of Congress Catalog Number 70-159312, 1971-1987, 206 p.