

Aplicación de procedimientos gráficos para la optimización de la evacuación de edificios

S. Casadesús Pursals¹, F. Garriga Garzón²

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

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

RESUMEN

La utilización de procedimientos gráficos para la optimización de la evacuación de recintos ha dado buenos resultados. En el presente trabajo se detallan los últimos avances en la solución del problema y se analizan las posibilidades y limitaciones de los mismos en el estudio de la optimización de la evacuación de edificios. Se muestra en una aplicación, la obtención de las funciones de evacuación a partir de los modelos de Fruins, la implantación del procedimiento para su utilización en microordenadores, la validación de los resultados, y se demuestra la capacidad del método propuesto para analizar diferentes situaciones de ocupación, disposición de las salidas y actitud de los ocupantes.

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

1. Introducción

La seguridad de las personas en los edificios normalmente se supone, sin embargo en pocos edificios se conoce el tiempo necesario para la evacuación de la totalidad de los ocupantes y la organización que optimiza la evacuación de los mismos hasta un lugar seguro.

En el presente trabajo se presenta una versión aplicada del procedimiento propuesto por el profesor R. L. Francis en la monografía “Un procedimiento gráfico simple para estimar el tiempo mínimo para evacuar un edificio”, la aplicación que se propone consiste en una adaptación de dicho algoritmo, para su utilización a través de cualquier miniordenador mediante herramientas estandarizadas de proceso de la información.

2. El problema de la evacuación de un recinto

El término “recinto” se utiliza habitualmente para indicar una dependencia o una parte de un edificio ocupada por un determinado número de personas que dispone de varias salidas.

Sea un recinto como el representado en la figura 1, con k ocupantes uniformemente distribuidos y que dispone de n posibles salidas, situadas de tal forma que no exista interferencia en el movimiento de los ocupantes que se dirigen a cada una de ellas.

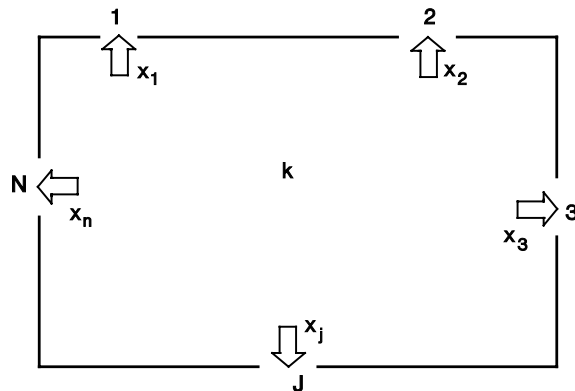


Figura 1: Recinto de n salidas

Para cada una de las salidas es posible determinar la función de evacuación $t_j(x_j)$, que proporciona una estimación del tiempo que tardarían en abandonar el recinto hasta situarse en un destino seguro x_j personas si utilizaran la salida j . Se trata de una función estrictamente creciente, definida para el intervalo $0 \leq x_j \leq k$ y además se cumple que:

$$t_j(x_j) \geq 0 \quad \forall x_j \quad (1)$$

$$t_j(x_j) = 0 \quad \text{si } x_j = 0$$

La solución del problema consiste en averiguar el número de personas x_j que deben dirigirse a cada salida j , de manera que la totalidad de ocupantes puedan estar situados en una posición segura en el tiempo mínimo. El tiempo de evacuación del recinto vendrá dado por la duración del recorrido más largo, que se corresponderá con el instante en el que el último ocupante alcanza el punto exterior destino de la evacuación.

El tiempo de evacuación se designa por z , resulta la función objetivo (2), sujeta a las restricciones (3) y (4).

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

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

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

En este trabajo se presenta una solución del problema mediante procedimientos gráficos.

2.1 Proceso iterativo para la obtención de la solución del problema

2.1.1 Obtención de las funciones de evacuación

En este caso para hallar las funciones de evacuación $t_j(x_j)$ se utilizan los modelos de ocupación y circulación de J. Fruins [6].

Si en la salida j , cuya anchura mínima es w_j , y existe un recorrido hasta el destino de longitud total l_j , se produce una densidad de ocupación d_j , se estima que los ocupantes que se dirigen hacia la salida lo harán con una velocidad v_j y habrá un flujo específico $f_{e,j}$, ambas magnitudes se suponen constantes durante todo el tiempo que dura la evacuación.

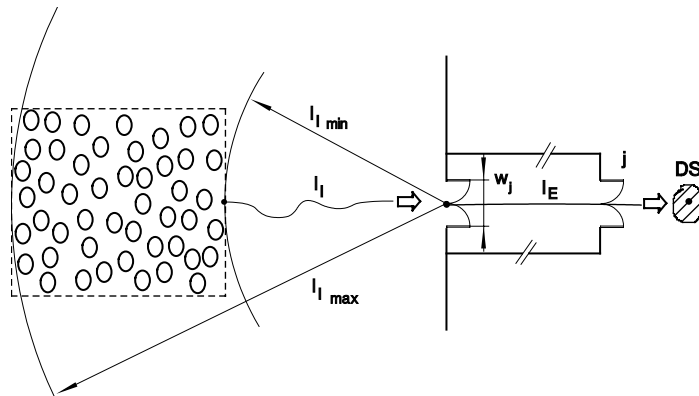


Figura 2. Obtención de la función de evacuación

El tiempo $t_{1,j}$ que se tardará en llegar al destino vendrá dado por la expresión (5), hasta este instante el flujo de llegada en el destino es nulo, y a partir del mismo la magnitud del flujo f_j resultante de la salida j lo proporciona la expresión (6).

$$t_{1,j} = \frac{l_j}{v_j} \quad (5)$$

$$f_j = f_{e,j} \times w_j \quad (6)$$

Si los ocupantes que se dirigen a la salida j demoran el inicio de la evacuación un tiempo $t_{0,j}$, la función de evacuación $t_j(x_j)$ de la salida j se obtiene mediante la expresión (7).

$$t_j(x_j) = t_{0,j} + \frac{l_j}{v_j} + \left(\frac{1}{f_j} \right) \times x_j \quad (7)$$

En la función de evacuación se contabiliza la demora en el inicio de la evacuación, el tiempo de recorrido y el flujo por el punto de anchura mínima. En este caso, un modelo de flujo constante, la función de evacuación adopta la forma representada en la figura 3. La ordenada en el origen corresponde a la suma de tiempos de demora en el inicio de la evacuación y de recorrido, mientras que la pendiente de la función corresponde al inverso del flujo.

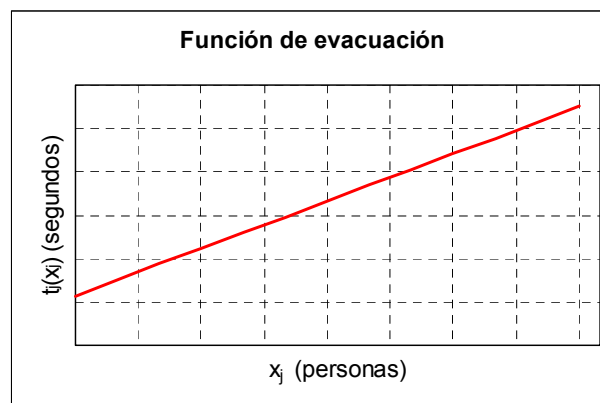


Figura 3: Función de evacuación

2.1.2 Obtención de las funciones de evacuación inversa

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 que podrían salir del recinto utilizando la salida j en un tiempo z . Estas funciones pueden hallarse de forma analítica, sin embargo en este caso se recurre a su aproximación gráfica.

Una vez se conoce $t_j(x_j)$, la aproximación gráfica de $p_j(z)$ consiste en 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.

Si el flujo es constante, se producen demoras al inicio de la evacuación, y se contabilizan los tiempos de recorrido hasta las salidas, la forma analítica de la función de evacuación inversa viene dada por la siguiente expresión:

$$p_j(z) = \begin{cases} 0 & z < (t_{0,j} + t_{1,j}) \\ [z - (t_{0,j} + t_{1,j})] \times f_j & z \geq (t_{0,j} + t_{1,j}) \end{cases} \quad (8)$$

La forma que adopta esta función es la representada en la figura 4, se aprecia como hasta que ha transcurrido el tiempo de demora y recorrido, ningún ocupante es capaz de abandonar el recinto y a partir de este instante, el número de personas por unidad de tiempo que abandonan el recinto por la salida j en cada instante se refleja en la pendiente de la función, corresponde a la magnitud del flujo de la salida.

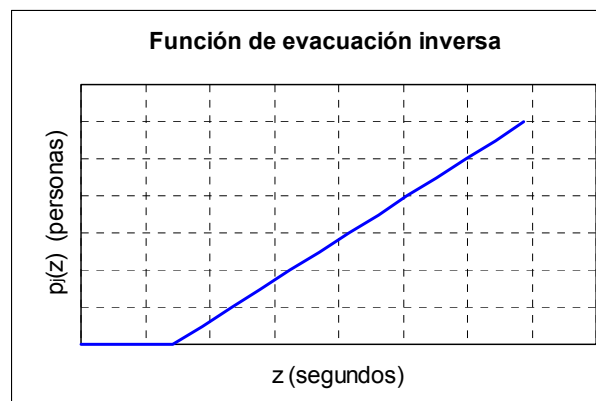


Figura 4: Función de evacuación inversa

Una vez se han determinado las funciones de evacuación inversas $p_j(z)$ de cada una de las salidas, se obtiene la función $P_T(z)$, se denomina función de evacuación total, indica el número total de personas que pueden salir del recinto en un tiempo z .

En este caso, $P_T(z)$ corresponde a la suma de las funciones $p_j(z_j)$ de cada una de las salidas considerando de forma adecuada las discontinuidades, puede observarse en la figura 5.

2.1.3 Solución inicial

El proceso de resolución puede seguirse en la figura 5. Se efectúan las siguientes operaciones:

1. Se procede a la representación gráfica de las funciones $p_j(z)$ y $P_T(z)$.
2. Se sitúa en el eje de ordenadas, el valor k correspondiente al número total de ocupantes. Desde dicho punto se traza una línea paralela al eje de abscisas hasta el punto de intersección con la función de evacuación total $P_T(z)$.
3. Desde este punto de intersección se traza una línea vertical, lo que permite leer en el eje de abscisas el tiempo mínimo necesario z^* para la evacuación de los todos los ocupantes del recinto.
4. A partir de las intersecciones de la línea vertical con las funciones $p_j(z_j)$ de cada salida, se trazan líneas horizontales hasta cortar el eje de ordenadas. En los puntos de corte se efectúa la lectura del número de personas que deben ser asignadas a cada salida j .

$$p_j(z^*) = x_j \quad (9)$$

5. Seguidamente se verifica que se cumple la restricción de la expresión (3), definida en la formulación del problema, se trata de verificar que se ha producido la evacuación de todos los ocupantes:

$$x_1 + \dots + x_n = p_1(z^*) + \dots + p_n(z^*) = k \quad (10)$$

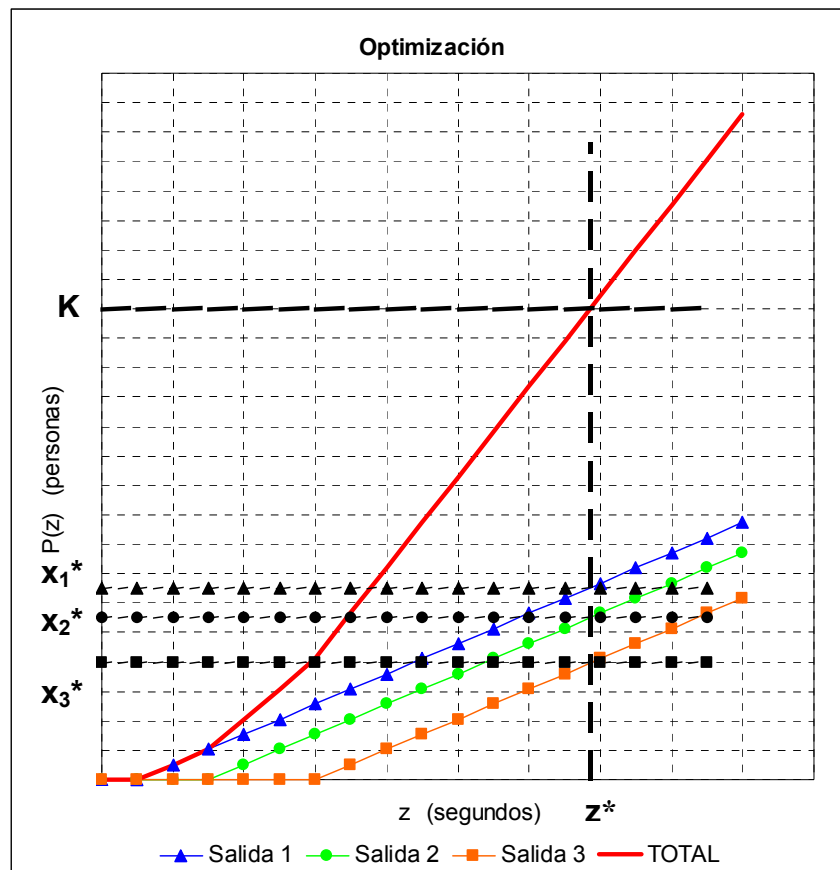


Figura 5: Solución gráfica

2.1.4 Verificación e iteración

Se comprueba la coherencia de los resultados, verificando la factibilidad de los valores de las velocidades y de los flujos supuestos inicialmente con los valores óptimos del tiempo de evacuación y las asignaciones x_j de cada una de las salidas. Estos aspectos se pueden observar en la figura 6.

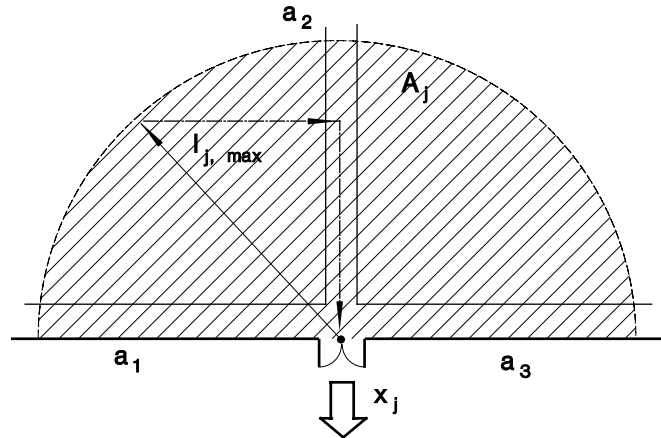


Figura 6: Proceso de verificación

- La velocidad de circulación y los flujos, se producen como consecuencia de la densidad de ocupación que resulta de la asignación óptima x_j^* . Si a_j es la superficie de vía de evacuación, y x_j el número de personas que utilizan la salida j

$$d_j = \frac{x_j}{a_j} \quad (11)$$

a partir de d_j se procede a revisar el valor de las magnitudes de circulación v_j y f_{ej} .

- De la misma forma, el tiempo de evacuación z^* no puede ser menor que el tiempo t_j necesario para llegar a la salida j los x_j ocupantes asignados a la misma:

$$t_j = \frac{l_{j, \max}}{v_j} \quad (12)$$

Efectuadas dichas operaciones se repite el proceso de cálculo hasta la obtención de la solución definitiva, en la cual las magnitudes de circulación razonablemente coinciden con las inicialmente supuestas.

3. Aplicación

Se utiliza este procedimiento para el estudio de la evacuación de un recinto situado en un edificio de uso industrial. Existen otras zonas de la fábrica con una ocupación reducida, por ello el problema se limita al estudio de la evacuación de esta zona.

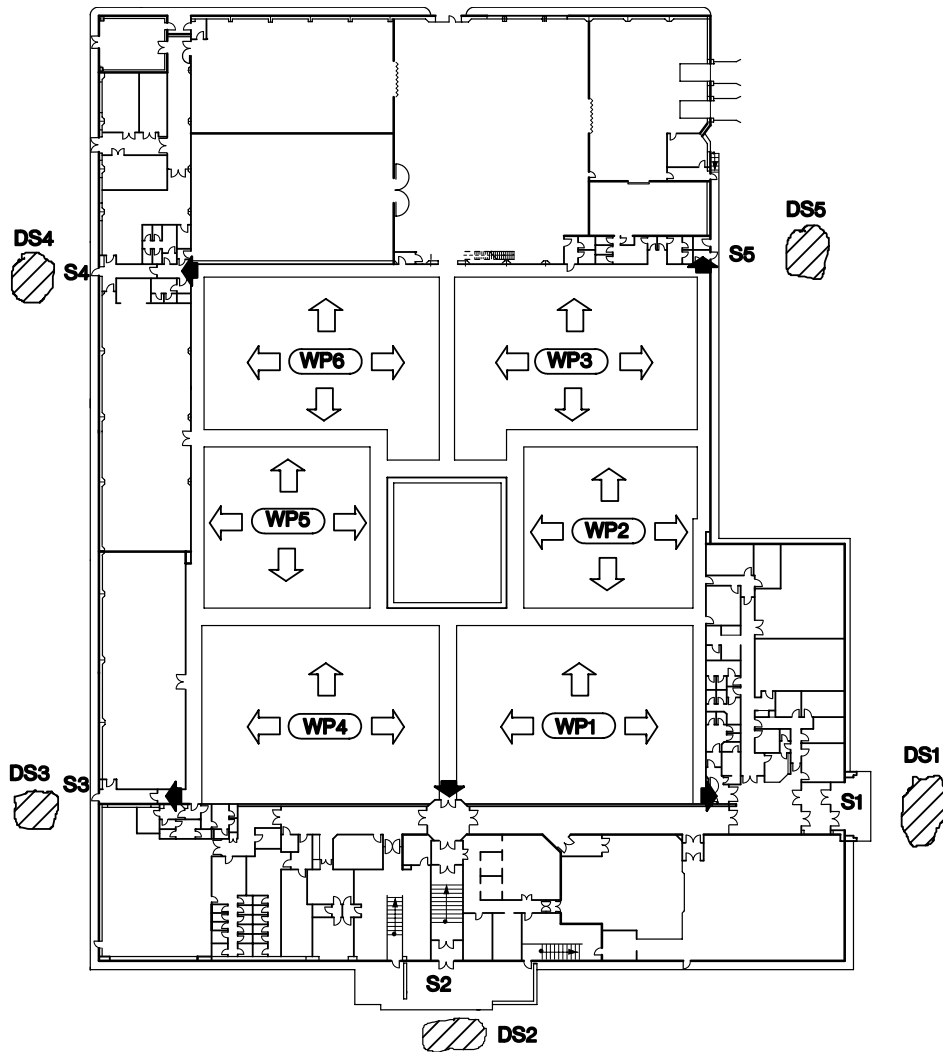


Figura 7: Ejemplo de recinto

El recinto objeto del estudio tiene una ocupación de 540 personas repartidas en 6 áreas de trabajo, la distribución puede observarse en la tabla 1 y tiene aproximadamente una superficie de 3800 m².

WP1	WP2	WP3	WP4	WP5	WP6	TOTAL
108	76	82	104	78	92	540

Tabla 1 Ocupación recinto

La distribución de los ocupantes en el recinto se supone uniforme. Existen unas zonas de paso perfectamente definidas, cada una de ellas tiene una superficie a_j . El recinto dispone de 5 salidas con una anchura mínima w_j (m.) y desde el origen de la evacuación hasta una posición exterior segura DS, debe efectuarse un recorrido l_j . Las condiciones geométricas del recinto pueden observarse en la figura 7 y el valor de las magnitudes que definen el problema en la tabla 2.

Se supone que no se producen demoras al inicio de la evacuación, cuando se produce la señal de alarma, la totalidad de ocupantes se dirige hacia los pasillos de circulación que conducen las salidas, razonablemente los pasillos centrales serán menos utilizados, la superficie que posiblemente sea utilizada es de unos 402 m², entonces la densidad de ocupación que determina las magnitudes de circulación:

$$d = \frac{k}{\sum_{j=1}^r a_j} = \frac{540}{402} = 1,34 \text{ (Pers./m}^2\text{)} \quad (9)$$

Mediante las tablas de Fruins del anexo 1, a partir de la densidad obtenida se estiman las velocidades de circulación v_j y los flujos $f_{e,j}$ obteniéndose los valores de la tabla 2, estas magnitudes se suponen constantes durante todo el tiempo que dura la evacuación.

SALIDA	w _i (metros)	l _i (metros)	a _i (m ²)	v _i (m / min)	f _{e,i} (Pers. / m. min.)
1	1,2	25,0	79,0	48	65
2	1,2	30,0	36,5	34	46
3	0,8	15,0	79,0	48	65
4	0,8	15,0	63,8	48	65
5	0,8	5,0	63,8	48	65

Tabla 2: Condiciones geométricas recinto y magnitudes de circulación

La solución del problema se obtiene directamente según puede observarse en la hoja de cálculo de la figura 8. El proceso seguido es el descrito en el apartado 2:

1. Se ha determinado para cada salida j la función de evacuación $t_j(x_j)$.

- El tiempo de recorrido (s.), se ha obtenido utilizando la expresión (5):

$$t_{1,1} = \left(\frac{25}{48}\right) \times 60 = 31,25 \quad t_{1,2} = \left(\frac{30}{34}\right) \times 60 = 52,94 \quad t_{1,3} = \left(\frac{15}{48}\right) \times 60 = 18,75$$

$$t_{1,4} = \left(\frac{15}{48}\right) \times 60 = 18,75 \quad t_{1,5} = \left(\frac{5}{48}\right) \times 60 = 6,25$$

- El flujo (Pers./s.) registrado en cada salida, se ha obtenido mediante (7):

$$f_1 = \frac{65 \times 1,2}{60} = 1,30 \quad f_2 = \frac{46 \times 1,2}{60} = 0,92 \quad f_3 = f_4 = f_5 = \frac{65 \times 0,8}{60} = 0,87$$

Finalmente resulta la función de evacuación de cada salida:

$$t_1(x_1) = 31,25 + \frac{x_1}{1,30} \quad t_2(x_2) = 52,94 + \frac{x_2}{0,92} \quad t_3(x_3) = 18,75 + \frac{x_3}{0,87}$$

$$t_4(x_4) = 18,75 + \frac{x_4}{0,87} \quad t_5(x_5) = 6,25 + \frac{x_5}{0,87}$$

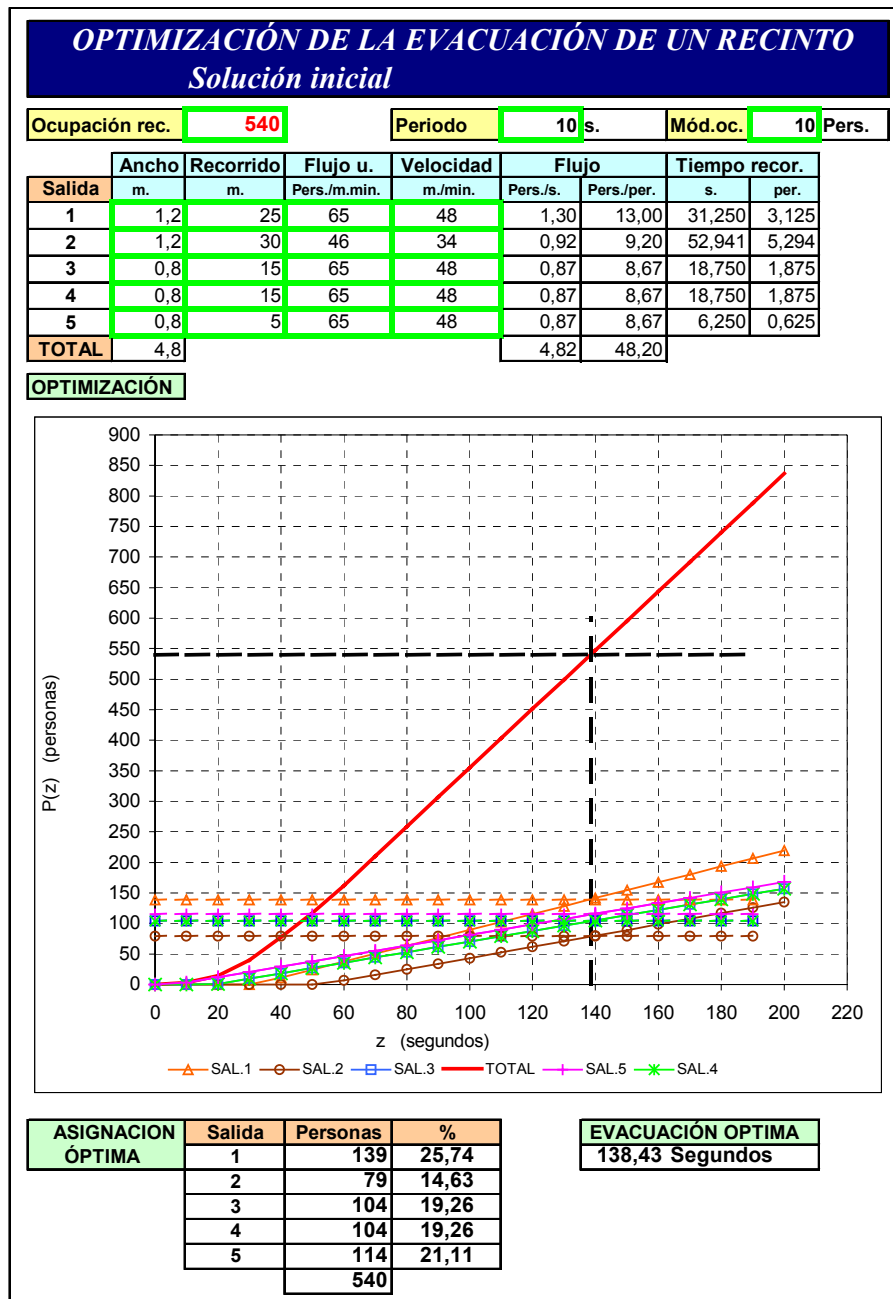


Figura 8: Optimización de la evacuación, solución inicial

2. Directamente se ha procedido a la representación de las funciones de evacuación inversa $p_j(z_j)$ de cada salida. Ha consistido en representar las funciones de evacuación situando el tiempo en el eje de abscisas y el número de personas en el eje de ordenadas.
3. La función de evacuación total del recinto $P_T(z)$ es la suma de las funciones de evacuación inversa considerando las discontinuidades.
4. Se ha situado en el eje de ordenadas el valor del número total de ocupantes del recinto que en éste caso han sido 540 personas. Desde éste punto se ha trazado una línea paralela al eje de abscisas hasta el punto de intersección con la función $P_T(z)$.

5. Desde el nuevo punto intersección, se ha trazado una línea vertical que corta al eje de abscisas en el valor de 138 segundos. Este es pues el tiempo mínimo requerido para evacuar los 540 ocupantes del recinto.

$$z^* = 138 \text{ s.}$$

6. A partir de las intersecciones de la línea vertical con las respectivas funciones $p_i(z_j)$ se han trazado líneas horizontales hasta cortar al eje de ordenadas. En los puntos de intersección con dicho eje se ha efectuado la lectura de la asignación correspondiente a cada una de las salidas:

$$x_1 = p_1(z^*) = 139 \quad x_2 = p_2(z^*) = 79 \quad x_3 = p_3(z^*) = 104 \quad x_4 = p_4(z^*) = 104 \quad x_5 = p_5(z^*) = 114$$

7. Se verifica que se ha producido la evacuación de la totalidad de los ocupantes del recinto:

$$p_1(z^*) + p_2(z^*) + p_3(z^*) + p_4(z^*) + p_5(z^*) = 139 + 79 + 104 + 104 + 114 = 540 \text{ Pers.}$$

8. A partir de la asignación óptima se han analizado las densidades de ocupación (Pers./m²) que resultan en cada salida:

$$d_1 = \frac{139}{79} = 1,76 \quad d_2 = \frac{79}{36,5} = 2,16 \quad d_3 = \frac{104}{79} = 1,32 \quad d_4 = \frac{104}{63,8} = 1,63 \quad d_5 = \frac{114}{63,8} = 1,79$$

Estos resultados muestran que la densidad de ocupación que se produciría en las salidas, manteniendo la condición que todos los ocupantes se incorporan de forma inmediata a las vías de evacuación, es ligeramente mayor al supuesto inicialmente. Por ello resulta necesario efectuar el correspondiente ajuste, y la posterior repetición del proceso de cálculo. Los nuevos valores de la velocidad de circulación y el flujo específico son los siguientes:

SALIDA	d_i (Pers. / m ²)	v_i (m. / min.)	f_{ei} (Pers. / m. min.)
1	1,76	42	74
2	2,16	30	65
3	1,32	54	71
4	1,63	47	77
5	1,79	41	74

Tabla 2: Flujos corregidos

Resolviendo con estos nuevos valores del flujo, ha resultado un tiempo de evacuación de 124 seg. y una distribución muy similar a la obtenida en la primera iteración, puede analizarse en la figura 9.

$$x_1 = p_1(z) = 130 \quad x_2 = p_2(z) = 83 \quad x_3 = p_3(z) = 101 \quad x_4 = p_4(z) = 107 \quad x_5 = p_5(z) = 119$$

En este ejemplo se ha presentado una resolución manual, para no extender el proceso de cálculo se considera como solución definitiva, no se efectúan más iteraciones y el resultado es una solución aproximada. Incluso en el caso de soluciones perfectamente ajustadas debe admitirse esta aproximación, no puede olvidarse la incertidumbre que existe en las magnitudes que definen el movimiento de las personas, y son punto de partida del problema.

La solución se ha obtenido para cualquier número de ocupantes, dentro del rango de la representación, entre 0 y 1000 personas aproximadamente.

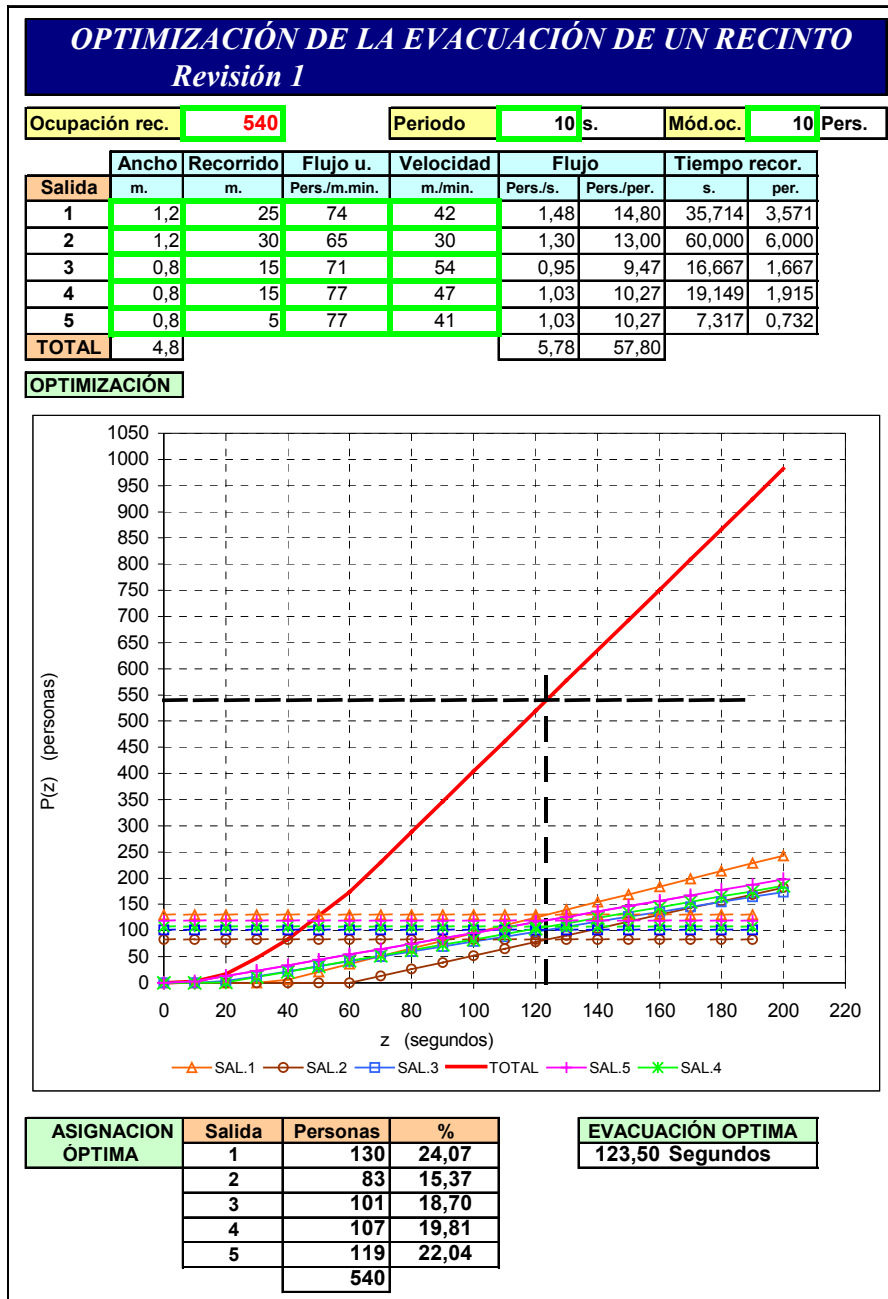


Figura 9: Cálculos definitivos

4. Conclusiones

En el presente trabajo, se ha mostrado un procedimiento gráfico que permite de una forma notablemente sencilla, analizar cuantitativamente la evacuación de un edificio: obteniendo estimaciones del tiempo de evacuación y la distribución de los ocupantes para un tiempo mínimo de evacuación. Deben destacarse las posibilidades del procedimiento utilizado para estudiar el efecto de cambios en la ocupación o la geometría del edificio.

5. Anexo. Reproducción de las tablas de 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	0.07 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

Referencias

- [1] Berlin, G. N., "A network analysis of building egress system", ORSA/TIMS meeting Washington, 1980, 8 p.
- [2] Casadesús, S., Modelos matemáticos utilizados en el estudio de la evacuación de edificios. Cuadernos de Seguridad, Enero 1998, 41-46.
- [3] Casadesús, S./ Garriga, F., "Procedimiento grafico para la optimización de la evacuación de un recinto", IV Congreso de ingeniería de organización, Sevilla, Septiembre 2001.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Fruins, J. J., "Pedestrian planning and design. Elevator World", Library of Congress Catalog Number 70-159312, 1971-1987, p.206.