

## **Principios para el cálculo y la gestión óptima de la evacuación de los edificios**

**Salvador Casadesús Pursals<sup>1</sup>, Federico Garriga Garzón<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Dep. de Estadística e Inv. Operativa, UPC, c/. Colom 11, 08222 Terrassa, [salvador.casadesus@upc.edu](mailto:salvador.casadesus@upc.edu)

<sup>2</sup>Dep. de Organización de Empresas, UPC, c/. Colom 11, 08222 Terrassa, [federico.garriga@upc.edu](mailto:federico.garriga@upc.edu)

**Palabras clave:** Evacuación de edificios, optimización de la evacuación, gestión de la seguridad de las personas en los edificios

### **1. El problema de la evacuación de edificios**

Cuando accedemos a grandes edificios o bien ocupamos recintos en los que se hallan cientos de personas, si el problema de la evacuación no se halla debidamente resuelto, cualquier incidente puede comprometer seriamente nuestra seguridad. El problema de la evacuación de edificios radica en que la totalidad de sus ocupantes en cualquier instante deben tener la posibilidad de desplazarse hasta un lugar seguro en el tiempo adecuado con las suficientes garantías de seguridad.

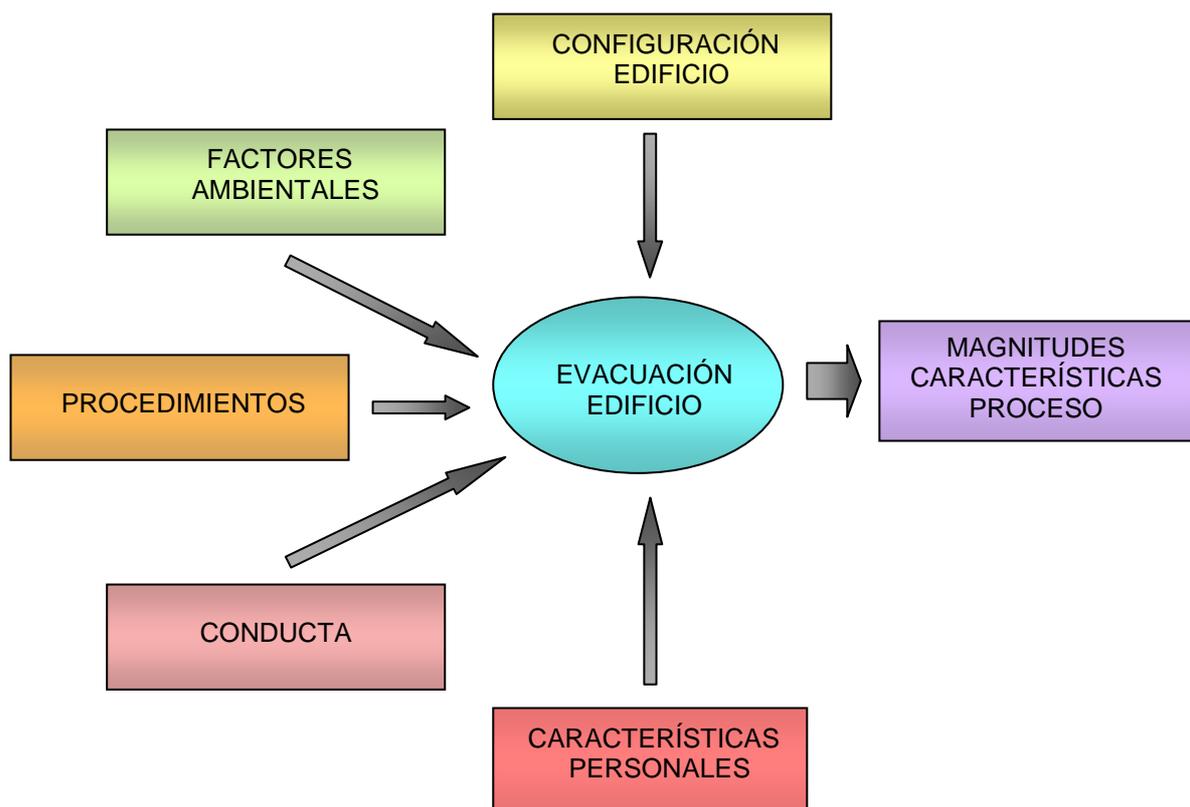
En principio las normas de construcción y de seguridad propias de cada ámbito determinan diseños que resuelven el problema en función de la ocupación y características del edificio, básicamente establecen las dimensiones de las anchuras mínimas de paso y la longitud máxima de los recorridos de las vías de evacuación. Sin embargo, en muchos casos debido al tamaño de los edificios, su distribución y el número de ocupantes entre otras circunstancias, para abordar el problema de la evacuación de los mismos resulta imprescindible la utilización de herramientas cuantitativas que faciliten la estimación de las magnitudes que aportan la información necesaria para conocer el desarrollo de éste proceso. Las soluciones se plantean desde dos perspectivas distintas: La primera consiste en describir el posible desarrollo de la evacuación y el segundo en gestionar la actuación de los ocupantes, asignando las salidas y detallando los recorridos que deben realizar los individuos presentes en cada una de las dependencias para cumplir ciertos objetivos.

Históricamente el problema de la evacuación de edificios aparece cuando existen grandes edificios, se valora la seguridad de las personas y se tiene conciencia de la dificultad que supone su evacuación. Los primeros documentos se publican a finales de los años cincuenta y se centran en el estudio de casos, a partir de sus conclusiones se confeccionan prescripciones de seguridad que posteriormente incorporan las normativas de seguridad de todos los países, de forma simultánea se desarrollan los primeros elementos de cálculo, destacan los trabajos de K. Togawa [12] que permiten estimar tiempos de evacuación. En los años setenta se avanza en el estudio del movimiento de las personas, son autores destacados J. J. Fruis [7] y J. Pauls [10] [11] y a finales de esta misma década la investigación de operaciones aporta la posibilidad de abordar soluciones óptimas para este problema, en este apartado son fundamentales los trabajos de R. L. Francis [5] [6]. Desde los años sesenta hasta la actualidad se han utilizado técnicas de simulación, siendo en los últimos años cuando se han obtenido los

resultados más significativos, destacan los programas desarrollados P. Thomsom [13] [14] y E. Galea [9], y en nuestro país pueden citarse los trabajos desarrollados por A. Gento [9].

## 2. Principios para la solución del problema

Para estudiar la evacuación de los edificios se recurre a analizarlos como un sistema, definido como un conjunto de dependencias comunicadas entre sí, ocupadas por un determinado número de personas con unas determinadas características individuales, que tratan de desplazarse desde unas dependencias inicialmente ocupadas hasta otras que constituyen el destino de la evacuación. Un sistema de evacuación simple sería el formado por una sola dependencia origen, una dependencia de circulación y un único destino, sin embargo el problema normalmente se presenta en edificios en los cuales hay una serie de dependencias ocupadas por un número variable de personas que se dirigen a uno o a varios destinos. Las características de las dependencias y la forma de conectarse dan lugar a los diferentes elementos de paso y unas determinadas condiciones arquitectónicas. El destino de evacuación generalmente es una zona inmediata del edificio con capacidad suficiente para albergar la totalidad de los ocupantes, en otras ocasiones el destino de evacuación puede ser una dependencia más del edificio que reúna unas condiciones de ubicación segura.



**Figura 1** Factores que determinan el sistema evacuación

El edificio y el punto de reunión constituyen el escenario en el cual se desarrollan los acontecimientos, mientras que la totalidad de personas presentes en el edificio son los actores que ponen en marcha el proceso. Resulta inmediato pensar que diferentes aspectos del edificio, así como las características físicas y de comportamiento de los individuos son quienes configuran el sistema.

El primer factor determinante del proceso de evacuación, lo constituye la configuración del edificio, define el entorno en el cual se produce la emergencia. Se trata del conjunto de características arquitectónicas del edificio que determinan las condiciones de evacuación y las características del punto de reunión. Con el nombre de factores ambientales se indican un conjunto de efectos físicos y químicos que se desencadenan al producirse cualquier evento capaz de poner en marcha la evacuación del edificio. No existen fenómenos de estas características en una amenaza de bomba, sin embargo en caso de un incendio se desarrollan una serie de fenómenos físico-químicos que pueden afectar a las personas provocando la expansión de humos y gases tóxicos, la transmisión del calor o la existencia de efectos radiantes. Como tercer factor significativo se consideran las características personales de los ocupantes, básicamente se distingue su capacidad física e intelectual. De igual forma, resulta esencial conocer la conducta individual y colectiva de los ocupantes al conocer una eventual situación de peligro mediante una señal de alarma, con el fin de pronosticar un desplazamiento inmediato, considerar demoras en el inicio de la evacuación o bien el mecanismo de decisión que conduce a utilizar una determinada salida. Finalmente como procedimientos se contempla la incidencia en el proceso de la evacuación del edificio de aspectos organizativos, como la existencia de procedimientos establecidos y conocidos por los ocupantes que deben dar lugar a actuaciones planificadas tratando de corregir la improvisación que producen estas situaciones.

### 3. Análisis cuantitativo del problema

Actualmente, cualquier solución razonable del problema debe basarse en un análisis cuantitativo del mismo que debe permitir realizar planes de evacuación eficaces y en definitiva, una gestión responsable de la seguridad de los ocupantes de los edificios.

#### 3.1. Elementos básicos: Dimensiones de los individuos, magnitudes de locomoción y principios de actuación

Para estimar el valor medio de las dimensiones de los individuos en nuestro país, se adopta como válida la referencia genérica que asemeja la proyección horizontal de una persona adulta a una elipse en la cual el valor medio de los diámetros mayor y el menor son 0.61 y 0.46 metros respectivamente. Otra representación empleada es la propuesta por P. Thompson y E. Marchant [12] [13] que se utiliza en el programa SIMULEX, consistente en representar las personas mediante tres círculos cuyas dimensiones dependen del sexo y la edad de los individuos, dichas magnitudes se hallan en la tabla 1. Puede observarse en la figura 2 que existe una cierta equivalencia entre ambas representaciones.

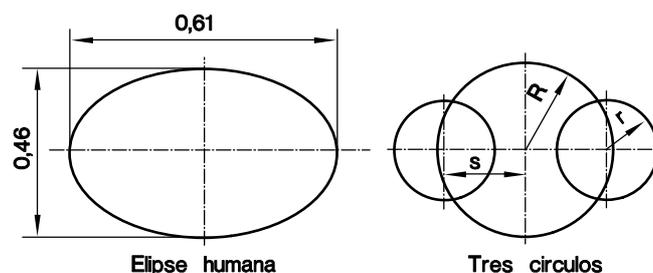


Figura 2 Representación la proyección de figura humana

Para analizar colectivamente la ocupación de los recintos por las personas, se adopta como referencia el modelo proporcionado por J. J. Fruins [7]. Entonces, según la tabla 2 la forma de operar consiste en pronosticar el nivel de servicio y a partir de los mismos será posible estimar las magnitudes que determinan ocupaciones y capacidades.

**Tabla1** Magnitudes que caracterizan las dimensiones de los individuos

Persona tipo	R (metros)	r (metros)	s (metros)
Valor medio	0,25	0,15	0,10
Hombre	0,27	0,17	0,11
Mujer	0,24	0,14	0,09
Niño	0,21	0,12	0,07

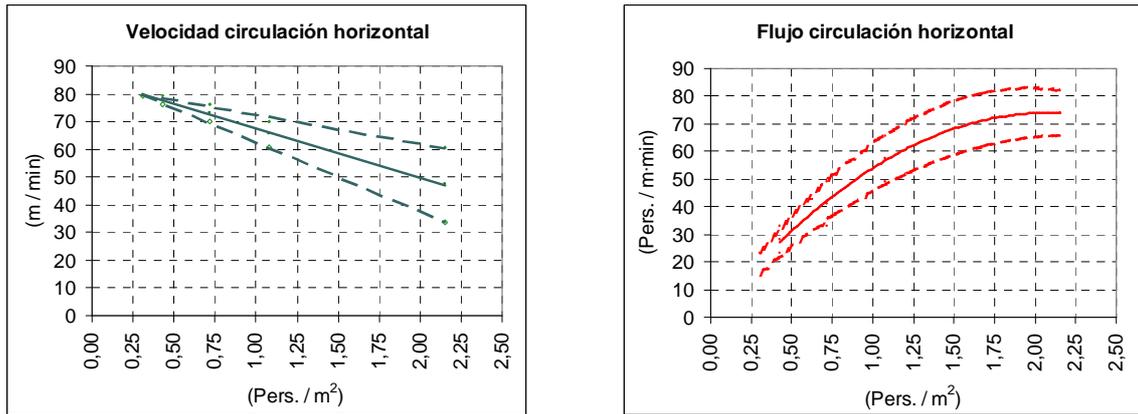
**Tabla 2** Modelo de ocupación de J. J. Fruins

Nivel de servicio	A	B	C	D	E	F
Módulo (m <sup>2</sup> /persona)	> 1.21	1.21 0.93	0.93 0.65	0.65 0.28	0.28 0.19	< 0.19
Densidad (pers. /m <sup>2</sup> )	< 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

Valores fiables de las magnitudes de locomoción de las personas los proporcionan los modelos que relacionan velocidades y flujos con densidades de ocupación, se trata de modelos basados en la formulación de K. Togawa [12]. Es un hecho absolutamente aceptado y contrastado que la velocidad de circulación es máxima cuando no existe interferencia en el movimiento de las personas, disminuye linealmente con la densidad de ocupación y llega a anularse cuando se alcanzan valores de 3,5 personas por metro cuadrado, de la misma forma el valor de los flujos y la densidad de circulación se relacionan según una función cuadrática, aumentan cuando lo hace la densidad de ocupación hasta alcanzar un valor máximo en las proximidades de la densidad de ocupación de 2 personas por metro cuadrado y decrece llegando a anularse al alcanzar valores de 3,5 personas por metro cuadrado. De forma analítica se trata de expresar que las velocidades de circulación son función de la densidad de ocupación  $v(d)$  estableciendo la relación instantánea según la cual el flujo es el producto de la velocidad por la densidad de ocupación, necesariamente según la expresión (1) éste también es función de la densidad

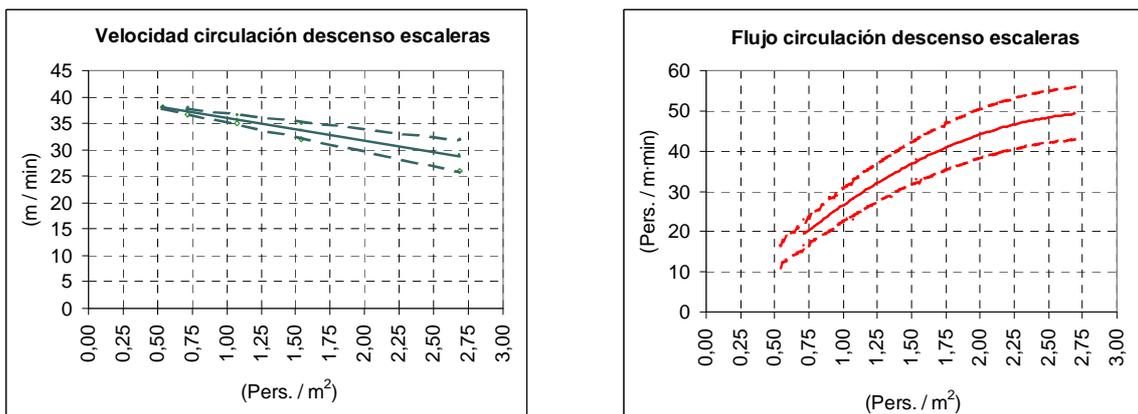
$$f(d) = d [ v(d) ] \quad (1)$$

Para determinar de una forma simple las magnitudes de locomoción a partir de la densidad, en circulación horizontal, puede utilizarse la figura 3, en la cual puede observarse que para cada valor de la densidad se presentan tres valores: un valor mínimo, un valor máximo y un valor medio, existiendo una mayor dispersión al aumentar la densidad, será preciso considerar de forma adecuada los valores en cada situación.



**Figura 3** Modelo de Fruins para la circulación horizontal

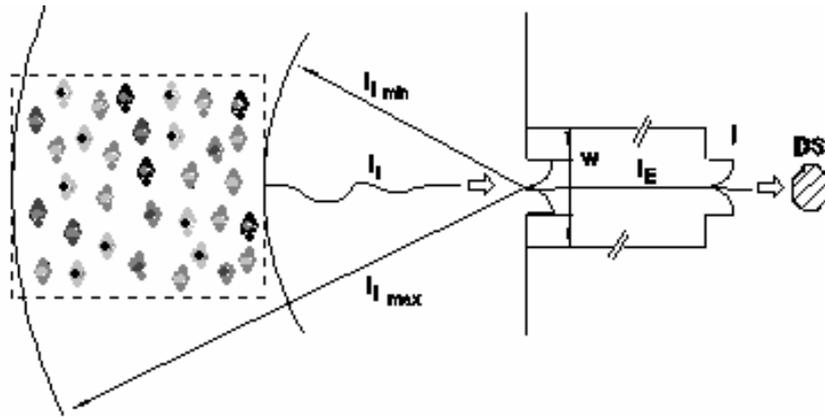
Para la circulación en escaleras existen más variables implicadas que en el desplazamiento horizontal. Además de las dimensiones físicas de las escaleras tienen un efecto determinante en la velocidad de circulación la dirección del movimiento, movimiento ascendente o descendente, la existencia y la disposición de resguardos. De la misma forma que en el apartado anterior en la figura 4 se presentan las gráficas correspondientes de velocidades y flujos obtenidas a partir de las tablas proporcionadas por J. J. Fruins.



**Figura 4** Modelo de Fruins para el desplazamiento en escaleras

### 3.2. Cálculo del tiempo de evacuación

Una forma simple de comprender el tiempo que les supone a un determinado número de ocupantes la evacuación de un recinto que dispone de una única salida, según puede observarse en la figura 5, consiste en contabilizar el tiempo que le supone al último ocupante identificar y reaccionar a la señal de alarma, efectuar el recorrido hasta la salida y cruzar la misma, de tal forma que si se hubiera puesto en marcha un cronómetro en el momento de la señal de alarma, se pararía en el momento en que el último ocupante cruzara la puerta de salida del recinto. Se trata de identificar los tiempos que ha contabilizado. Para que un determinado número de personas abandone un recinto utilizando la salida  $j$  se identifican tres fases o etapas, el tiempo de demora en el inicio de la evacuación  $t_{0j}$ , el tiempo de circulación  $t_{1j}$  y tiempo de flujo  $t_{2j}$ . Se trata del tiempo necesario para que  $k$  personas reaccionen a una señal de alarma, se desplacen hasta la salida y les sea posible de cruzar los estrechamientos que se produzcan en la vía de evacuación, resulta la expresión (2).



**Figura 5** Evacuación de un recinto por una salida

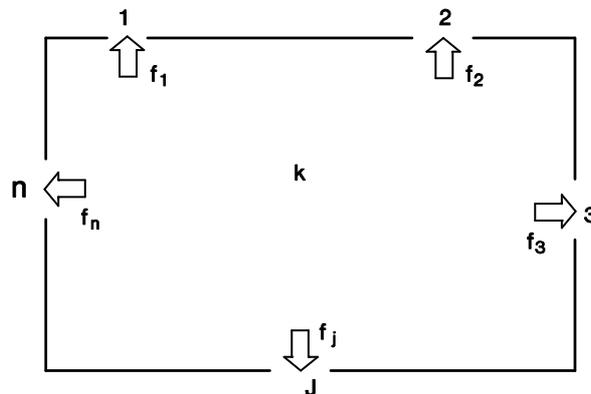
La función de evacuación  $t_j(x_j)$  indica el tiempo que tardan en abandonar el recinto  $x$  personas que utilizan la salida  $j$ , si deben realizar un recorrido de longitud  $l$

$$t_j(x_j) = t_{o,j} + \frac{l_j}{v_1} + \frac{x_j}{f_j} \quad (2)$$

De la misma forma que se ha determinado el tiempo de evacuación por una única salida, como elemento simple del problema deben estudiarse las confluencias, las ramificaciones, las retenciones y la capacidad del destino de evacuación. El análisis de estos elementos permite la solución de estructuras más complejas que se encuentran en cualquier edificio.

### 3.3. Evacuación óptima de un recinto y de un edificio

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, de la misma forma también puede observarse que edificios de determinadas características para realizar un estudio básico de las condiciones de evacuación pueden asimilarse a dicha definición de recinto.



**Figura 6** Recinto de n salidas

Sea un recinto con  $k$  ocupantes uniformemente distribuidos (figura 6), 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. Existe además una vía de evacuación hacia cada una de las salidas. La evacuación del recinto habrá finalizado cuando hayan salido del mismo todos sus ocupantes. Si existen  $n$  salidas, habrá  $n$  recorridos o rutas de evacuación diferentes. El tiempo de evacuación del recinto será la duración del recorrido más largo, determinado por el instante en el cual el último ocupante alcanza el exterior.

Para cada una de las salidas es posible estimar el flujo  $f_1(z), f_2(z), \dots, f_j(z), \dots, f_n(z)$  que se registra en cada una de ellas y el objeto del problema consiste en determinar el número de personas  $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n$  que deben dirigirse a cada una de ellas para alcanzar un determinado objetivo.

La optimización de la evacuación consiste en averiguar el número de personas  $x_j$  que deben dirigirse a cada salida para cumplir ciertos objetivos, el más común consiste en minimizar el tiempo de evacuación  $z$ , la expresión (3) proporciona la formulación básica del problema.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Min } (z) = \text{Max } [t_1(x_1), \dots, t_n(x_n)] \\ x_1 + x_2 + \dots + x_n = k \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0 \end{array} \right\} \quad (3)$$

Para la solución del problema de la evacuación de un recinto se ha desarrollado la solución analítica, un procedimiento de solución gráfica y una solución heurística. Mientras que para la solución del problema de la evacuación de los edificios se emplean redes de flujo, históricamente su utilización supuso un avance notable en el estudio del problema, las redes utilizadas inicialmente eran redes estáticas, posteriormente se utilizaron redes dinámicas y desde entonces, ambos tipos de redes se han seguido utilizando de forma más o menos efectiva.

Las redes estáticas ofrecen una visión global de las características arquitectónicas del edificio, necesaria en primera instancia e importante para planificar actuaciones rápidas en tiempo real, mientras que las redes dinámicas proporcionan más información y facilitan el estudio de aspectos más concretos del problema como variaciones de capacidad, tiempos de recorrido, flujos o retenciones, sin embargo la dimensión que adquiere el problema, hace que prácticamente en todos los casos no sea viable esta representación gráfica como herramienta visual de análisis.

Una red puede definirse como un grafo  $G(U,V)$ . Siendo  $U$  la serie de nodos y  $V$  la serie de arcos entonces cada arco  $v \in V$  en la red representa el paso desde un componente a otro, asociada a esta transición existe el tiempo  $\tau(v)$ . Consideramos la red dinámica  $G_T = (U_T, V_T)$ , definida en (4) y (5), que es la expansión temporal de la red a partir de la red estática  $G = (U, V)$  de la siguiente forma:

$$U_T = \{j_i : j \in U, 0 \leq i \leq T\} \quad (4)$$

Donde  $j_i$  es la  $i$ ésima copia del nodo  $j \in U$ . De forma similar el arco  $V_T$  viene dado por

$$V_T = \{(j^i, j^{i'}) : v = (j, j') \in V \cap i' = i + \tau_v \leq T, i = 1, 2, \dots, T\} \cup \{(j^i, j^{i+1}) : j \in U, i = 0, 1, 2, \dots\} \quad (5)$$

entonces  $G_T$  recibe el nombre de red dinámica. Los arcos  $(j^i, j^{i+1}) \in V_T$  se llaman arcos de retención. El contenido de cada arco viene representado por el número de personas que

permanecen quietas en el componente del edificio representado por el nodo  $j$ . Mientras que los arcos  $(j^i, j^{-i})$  reciben el nombre de arcos de circulación.

A partir de la formulación del problema se establecen los objetivos y se procede a la optimización de la evacuación del edificio, obteniendo como resultados fundamentales el tiempo mínimo de evacuación y la distribución óptima de los ocupantes hacia las salidas, cuya representación puede adoptar un formato gráfico como el que puede observarse en la figura 7. Habitualmente se utilizan otras magnitudes y representaciones gráficas que aportan un notable conocimiento del problema.

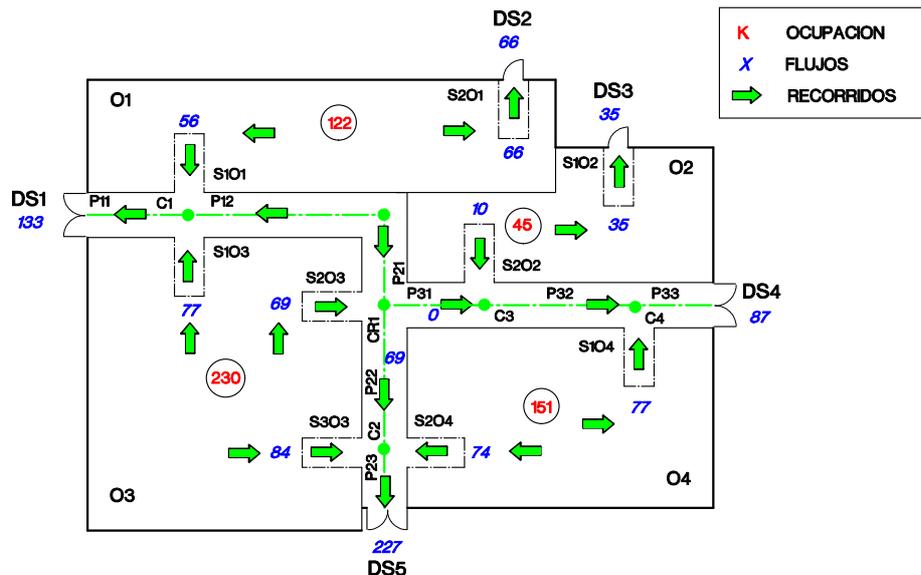


Figura 7 Distribución para una evacuación óptima

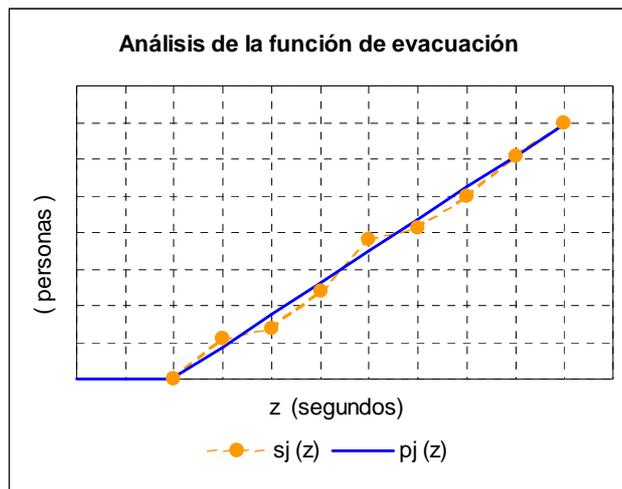
#### 4. Validación de los resultados

El sistema de la evacuación de un edificio presenta una cierta complejidad resultando difícil obtener una reproducción exacta de la realidad, se debe determinar si la información que proporciona el modelo es suficiente para tomar en consideración los resultados y evaluar si las diferencias son aceptables para el propósito del problema. Así, desde esta perspectiva puramente formal, resulta necesario comparar los resultados obtenidos mediante este modelo y los resultantes de ensayos y simulacros de evacuación. Otro aspecto de este problema es que se opera con la seguridad de las personas, por ello la exigencia en el proceso de “validación del modelo” va más allá de aspectos formales y de la estricta responsabilidad científica, sería deseable ofrecer en cualquier afirmación las debidas garantías.

Una solución más sólida que limitarse a comparar la similitud de los tiempos de evacuación calculados con los obtenidos en ensayos y simulacros consiste en contabilizar el número de personas que han abandonado el recinto por cada una de las salidas en determinados instantes y estudiar las diferencias que existen con los valores que proporciona la función de evacuación inversa de cada una de ellas. Una vez se hayan validado las funciones de evacuación de todas las salidas del recinto y contrastado el comportamiento de los ocupantes podrá pensarse en la existencia de un modelo validado.

Registrando el número de personas que abandonan el edificio por una salida  $j$  en determinados instantes  $z$  se obtiene la función estrictamente creciente  $s_j(z)$ . 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 20 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 cronómetro mide el tiempo y la otra contabiliza las personas que cruzan delante de las mismas y anota ambas magnitudes.

Por otra parte, en el proceso de cálculo de la evacuación se dispone de la función  $p_j(z)$ , que se corresponde con el pronóstico de las personas capaces de abandonar el recinto en cada instante  $z$  por la salida  $j$ . El procedimiento de contraste que se propone consiste en comparar esta función con los valores experimentales proporcionados por  $s_j(z)$ .



**Figura 8** Proceso de comparación de  $p_j(z)$  y  $s_j(z)$

Para validar los resultados se trata de comparar la evolución de las salidas observadas en simulacros o ensayos  $s_j(z)$  con la función de evacuación inversa  $p_j(z)$  utilizada en la solución del problema, resultando un procedimiento de contraste técnicamente robusto y fiable. En la figura 8 puede observarse una situación de razonable coincidencia

## 5. Gestión de la evacuación

Cuando se ha obtenido una estimación precisa de los tiempos de evacuación y se ha efectuado un pronóstico fiable del desarrollo de una evacuación de emergencia de un edificio, si es necesario es posible adoptar las medidas correctoras oportunas y de la misma forma será razonable organizar y planificar el desplazamiento de los ocupantes en los edificios de forma responsable para obtener las máximas condiciones de seguridad y confort, globalmente puede hablarse de gestionar el movimiento de los ocupantes.

## Referencias

- [1] Casadesús, S./ Garriga, F., “Procedimiento gráfico 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”, Actas del V Congreso de Ingeniería de Organización, ISBN 84-688-2827-0, Universidad de Valladolid-Universidad de Burgos, 4-5 Septiembre 2003, p.55-56.
- [3] Casadesús, S./ Garriga, F., “Procedimiento gráfico para la optimización de la evacuación de un recinto”, Revista Montajes e Instalaciones nº 385 Julio/Agosto 2004, ISSN 0210-184X, p.79-86.
- [4] Choi, W. / Hamacher, S. / Tufekci, S., "Modelling of building evacuation problems by network flows with side constraints", EJOR, 35, 1988, pp. 98-110.
- [5] Francis, R. L., "A 'Uniformity principle' for evacuation route allocation", Journal of Research of N. Bureau of Standards Vol.86 September-October, 1981, pp.509-513.
- [6] Francis, R. L. / Chalmet, L. G. / Saunders, P. B., "Network models for building evacuation", Management Science Vol.28, January 1982, pp. 86-105.
- [7] Fruins, J. J., "Pedestrian planning and design. Elevator World", Library of Congress Catalog Number 70-159312, 1971-1987, p.206.
- [8] Gento Muncio, M. A. / López Rubio, B. / Posada Calvo, M.,”Simulación del desalojo de edificios. Situación en España: E.T.S. Ingenieros Industriales (Universidad de Valladolid)” V Congreso de Ingeniería de Organización, Valladolid Burgos 4-5 Septiembre 2003, 10 p.
- [9] Gento Muncio, M. A. / López Rubio, B. / Posada Calvo, M.,”Simulación del desalojo de edificios. E.T.S. Ingenieros Industriales (Universidad de Valladolid)” V Congreso de Ingeniería de Organización, Valladolid Burgos 4-5 Septiembre 2003, 10 p.
- [10] Pauls, J. L. / Jones B. K., "Building Evacuation: Research Methods and case Studies", Fires and Human Behaviour, Ed. D. Canter, 1980, pp. 227-251.
- [11] Pauls, J. L., "The movement of people in buildings and design solutions for means of egress", Fire Technology, Vol.20, No.1, February 1984, 27 p.
- [12] Togawa, K., "Study of fire escape based on the observation multitude currents", Japan Building Research Institute, Report 55-14 1955.
- [13] Thompson, P. A. / Marchant, E. W., "A computer model for the evacuation of large building populations", Fire Safety Journal 24, 1995, pp. 131-148.
- [14] Thompson, P. A. / Marchant, E. W., "Testing and application of the computer model SIMULEX", Fire safety Journal 24, 1995, pp. 149-166.