

## **Evacuación de edificios: Un modelo para el estudio y la optimización**

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

<sup>1</sup>Dep. de Estadística e Investigación Operativa, <sup>2</sup>Dep. de Organización de Empresas.  
Escuela Técnica Superior de Ingenierías Industrial y Aeronáutica, Universidad Politécnica de Catalunya,  
c/. Colom 11, 08222 Terrassa. salvador.casadesus@upc.edu, federico.garriga@upc.edu.

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

### **1. Introducción**

El primer autor al que se le atribuye utilizar redes de flujo en el estudio del problema de la evacuación de edificios es G. N. Berlin (1980) y la primera formulación del problema para la optimización se debe R. L. Francis (1981). Poco después, el propio R. L. Francis conjuntamente con L. G. Chalment y P. B. Saunders (1982) publicaron un trabajo sobre la optimización de la evacuación de edificios utilizando redes de flujo, más tarde R. L. Francis y T. M. Kisko (1985) desarrollaron el programa EVACNET, se trata de una aplicación en FORTRAN 77 que determina tiempos de evacuación y la distribución óptima de los ocupantes hacia las salidas. En la misma línea de modelos deterministas y redes de flujo, W. Choi, H. W. Hamacher y S. Tufekcy (1988) consideraron el problema como una situación de redes de flujo con restricciones de capacidad y arcos con capacidad variable, proporcionando varios algoritmos para la solución de ciertas estructuras simples. En los años noventa B. Hope y E. Tardos (1994) aportaron soluciones a partir de algoritmos polinomiales.

Otro planteamiento del problema es el realizado por M. Kostreva (1991), T. Getachew (2000) y T. Wiecek (2000), plantearon la evacuación de los edificios como un problema multiobjetivo, en esta línea de investigación existen publicaciones más recientes de S. M. Lo y H. C. Huang (2006). A principios de la década actual destacan los trabajos desarrollados por S. A. Tjandra y H. W. Hamacher (2003). Otras aportaciones son las formuladas por A. K. Gupta y P. K. Yadav (2004) y la solución heurística para redes de flujo variable de Q. Lu, Y. Huang y S. Shekhar (2003). La evacuación de edificios también ha sido estudiado mediante redes estocásticas, dichos modelos aportan mayor realismo pero su resolución es más laboriosa, los autores más destacados son J. M. Smith (1985) y G. Lovas (1995).

La disciplina que más ha prosperado en los últimos años para la solución del problema de la evacuación de edificios ha sido la simulación, pueden citarse numerosos programas: EXITT, EVACSIM, EXIT-89, TIMTEX, STEPS, CRISP, ASERI, PEDGO, PEDROUTE, WAY OUT. De todos ellos, posiblemente las aplicaciones más difundidas sean EXODUS y SIMULEX, desarrolladas por E. Galea (2001) y P. A. Thomson (1995) en el Reino Unido. En el ámbito nacional deben citarse a A. Guasch (1996) en la Universidad Politécnica de Catalunya que realizó la simulación de la evacuación de diversos edificios mediante ARENA. A. Gento (2003) estudió mediante simulación la evacuación de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Valladolid. También dentro de la simulación existen diversas publicaciones e investigaciones del grupo GIDAI en la Universidad de Cantabria (2008).

## 2. Definición y análisis de las características de las redes de flujo utilizadas en el estudio del problema de la evacuación de edificios

Para representar un edificio mediante una red de flujo es preciso disponer de una determinada simbología. Una vez se ha definido la misma se establecen tres fases: En la primera se relaciona la estructura arquitectónica del edificio con los elementos que constituyen la red, en la segunda se establece el diagrama estático y finalmente se obtiene la red dinámica. Las redes de flujo están formadas por nodos y arcos, los nodos  $j$  representan las dependencias y los arcos la circulación desde un componente  $j$  a otro  $j'$ .

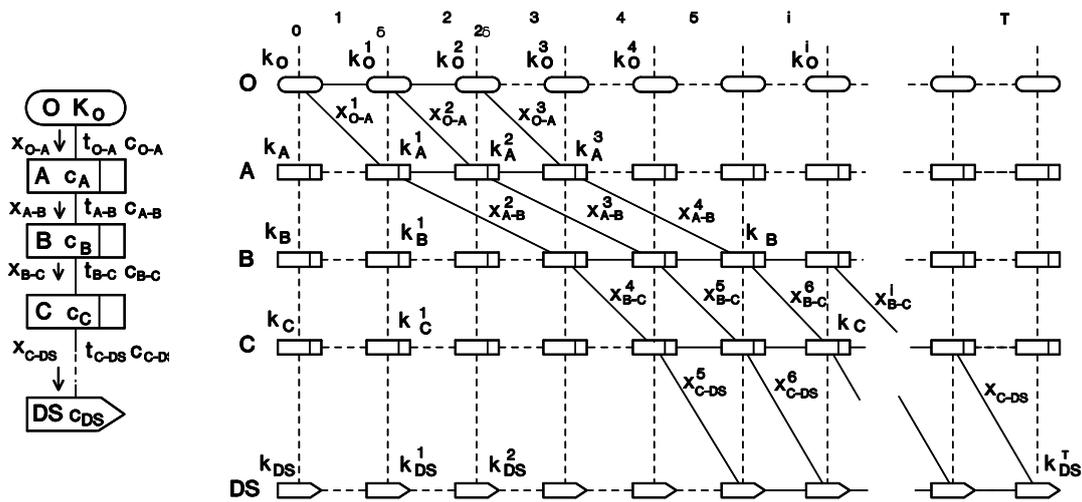


Figura 1. Ejemplo de redes estática y dinámica

En la figura 1 pueden observarse las redes estática y dinámica de una vía de evacuación. En las redes estáticas asociada a las transiciones existen varias magnitudes, las principales son: Flujos  $x_{j-j'}$ , tiempos de circulación  $t_{j-j'}$  y capacidades  $c_j$ , y  $c_{j-j'}$ . El modelo dinámico permite observar la evolución de las magnitudes que caracterizan la red en intervalos regulares de tiempo de forma razonablemente simple. La red estática que representa el edificio se expande en periodos de tiempo, para convertirse en el modelo dinámico según el procedimiento de Ford&Fulkerson. En la red dinámica  $k_j^i$  expresa la evolución de la ocupación del recinto  $j$  y  $x_{j-j'}^i$  el número de personas que se desplazan desde  $j$  hasta  $j'$  en cada periodo  $i$ .

Matemáticamente las redes se definen mediante grafos, de tal forma que  $G(U,V)$  representa un conjunto  $U$  de puntos  $j$  y  $V$  de parejas de puntos  $(j, j')$  que establecen una relación entre los mismos. Los puntos  $j$  constituyen los nodos y las parejas  $(j, j')$  los arcos. De la misma forma que en la representación gráfica de la red dinámica, el punto de partida es el modelo estático, la formulación matemática de la red dinámica  $G_T(U_T, V_T)$  es la expansión temporal de la red estática.

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

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

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

Los arcos  $(j^i, j^{i+1}) \in V_T$  son los arcos de retención, muestran la evolución de la ocupación de la dependencia  $j$ . Mientras que los arcos  $(j^i, j'^i)$  reciben el nombre de arcos de circulación, representan el movimiento de personas desde el componente  $j$  hasta el  $j'$  en el periodo  $i$ .

### 3. Un modelo para el estudio de la evacuación de edificios

Se ha observado que situar los nodos en el centro de las dependencias, de la forma que se establece en la mayoría de modelos, no es necesariamente la modelización más favorable, en muchos casos comporta un tratamiento poco preciso de la ubicación de los ocupantes. Además, existen varias circunstancias que permiten una revisión de la formulación del problema de la evacuación de edificios. Básicamente se trata de los avances en la solución de los problemas de redes de flujo y los modelos disponibles para la descripción del movimiento de las personas. Bajo estas premisas se formula un modelo en el cual se flexibiliza la ubicación de los nodos, se actualizan los modelos de locomoción y se realiza un análisis dinámico de las estructuras que forman la red: Las incorporaciones, las vías de circulación, las confluencias y las ramificaciones.

#### 3.1. Actualización de los modelos de locomoción

En los modelos utilizados inicialmente para el estudio de la evacuación de edificios las magnitudes de circulación normalmente se obtenían a partir del modelo de circulación de J. J. Fruins (1971-1987), la utilización de dichos modelos exige predecir en primera instancia las densidades de ocupación que se van a producir en cada salida y en función de la misma efectuar la lectura de los valores de las velocidades y de los flujos en la tabla correspondiente. Pronosticar a priori los flujos y las velocidades, además de resultar complejo en la mayoría de ocasiones, supone condicionar de entrada el resultado del problema. Mientras que, si se utilizan las ecuaciones propuestas por H. Nelson y H. McLennan (1996) para el modelado del movimiento de las personas, los valores de la velocidad y de los flujos de circulación que se van a producir en cada salida, sencillamente son función del número de personas que las utilizan y de las características geométricas de la vía de circulación.

La principal característica de este modelo de circulación es la relación lineal existente entre la velocidad de circulación y la densidad. Así cuando la densidad de ocupación está comprendida entre 0,5382 y 3,5 personas por metro cuadrado, la velocidad de circulación y el flujo son función de la densidad de ocupación. En cambio, cuando la densidad de ocupación es inferior a 0,5382 personas por metro cuadrado el movimiento de los individuos depende de sus características personales. En éste caso las magnitudes que lo definen tienen una gran variabilidad, es por ello que se toma una velocidad media constante e independiente de la densidad, 1,1996 metros por segundo para el caso de circulación horizontal.

$$v(d_j) = \begin{cases} 0,8568 \cdot \lambda_j & 0 < d_j \leq 0,5382 \\ (1 - \alpha \cdot d_j) \cdot \lambda_j & 0,5382 < d_j \leq 3,5 \end{cases} \quad (1)$$

donde  $v$  es la velocidad de circulación,  $d_j$  la densidad,  $\alpha$  y  $\lambda_j$  son valores constantes.  $\lambda$  define las características de vía de evacuación  $j$ , cuyo valor se halla tabulado para distintas geometrías (Tabla 1). Así por ejemplo, el parámetro  $\lambda$  toma el valor 1,40 metros por segundo en el caso de circulación horizontal. Mientras que  $\alpha$  es una constante que depende del sistema de unidades,  $\alpha = 2,86$  cuando la velocidad se expresa en pie por minuto (ft/min) y la densidad en personas por pie cuadrado (sq ft), siendo  $\alpha = 0,266$  si la velocidad es en metros por segundo (m/s) y la densidad en personas por metro cuadrado ( $m^2$ ).

**Tabla 1:** Valor de la constante  $\lambda$  según la geometría de la vía de circulación

TIPO DE CIRCULACIÓN				$\lambda$
Circulación horizontal				1,40
Descenso escaleras				
Tabica		Huella		
(pulgadas)	(cm)	(pulgadas)	(cm)	
7,5	19,05	10	25,50	1,00
7,0	17,78	11	27,94	1,08
6,5	16,51	12	30,48	1,16
6,5	16,51	13	33,02	1,23

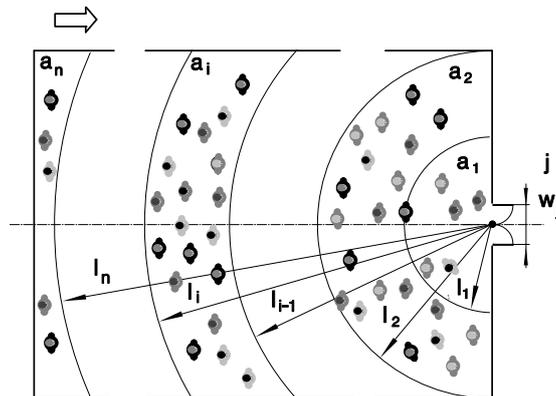
Luego si el flujo específico (flujo por unidad de anchura) viene determinado por el producto de la velocidad de circulación y la densidad, el flujo será el producto del flujo específico por  $w_j$ , donde  $w_j$  es la anchura efectiva mínima de la salida.

$$F(d_j) = \begin{cases} v(d_j) \cdot d_j \cdot w_j = 0,8568 \cdot \lambda_j \cdot d_j \cdot w_j & 0 < d_j \leq 0,5382 \\ v(d_j) \cdot d_j \cdot w_j = (1 - \alpha \cdot d_j) \cdot \lambda_j \cdot d_j \cdot w_j & 0,5382 < d_j \leq 3,5 \end{cases} \quad (2)$$

El concepto de “anchura efectiva de paso” fue introducido por J. Pauls [27] [30], simplemente consiste efectuar una corrección en las anchuras físicas, entonces no se tienen en cuenta las anchuras mínimas de paso que físicamente existen en las vías de evacuación, si no que según sea el elemento de paso se considera que se establecen unas determinadas separaciones a los límites físicos cuyos valores se hallan debidamente tabulados.

### 3.2. Modelado de las incorporaciones a la red

Para contemplar determinados aspectos de comportamiento se propone modelar las incorporaciones a la red, para ello se utiliza la función  $q(t)$  que indica el número de personas en posición inmediata a una salida para iniciar la evacuación en el instante  $t$ .



**Figura 2.** Modelado de las incorporaciones a la red

En el modelo dinámico la función  $q_j^i$ , indica el número de personas en disposición de abandonar la dependencia utilizando la salida  $j$  al final del periodo  $i$ . De una forma muy simple se dice que depende de las condiciones geométricas del recinto y de las posibles interferencias en el movimiento de los ocupantes.

Este proceso de análisis puede observarse en la figura 2, si en el recinto existen  $k$  ocupantes y  $A$  es la superficie útil del mismo (metros cuadrados) mediante la expresión (3) se determina el valor de la densidad de ocupación inicial  $d$  (personas por metro cuadrado) y mediante (1) y (2) se determinan las velocidades  $v_j$  (metros por segundo) y los flujos de circulación  $F_j$  (personas por segundo) hacia las salidas.

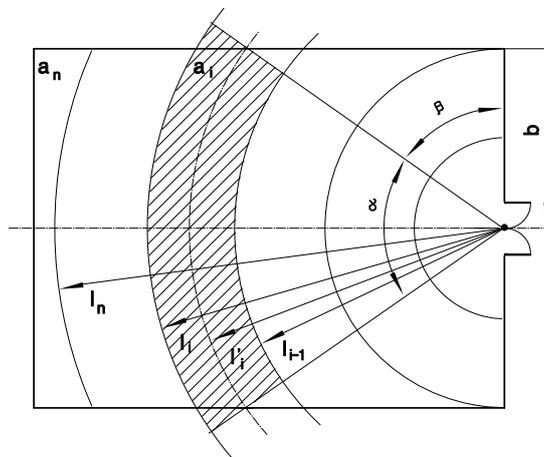
$$d = \frac{k}{A} \quad (3)$$

Si se considera el problema en intervalos regulares de tiempo de  $\delta$  segundos, la misma magnitud que la considerada en la red dinámica, entonces se obtendrán los tiempo  $t(i)$  correspondientes al final de cada intervalo. Así durante el primer intervalo, comprendido entre los instantes 0 y  $t(1)$  solamente podrán llegar a la salida las personas que se hallan situadas a una distancia menor que  $l_{j,1}$  (metros), su magnitud será el producto de la velocidad de desplazamiento  $v_j$  (metros por segundo) por el tiempo  $\delta$  correspondiente (segundos).

$$l_{j,1} = v \delta \quad (4)$$

De forma general, las personas que puede abandonar el recinto en el periodo  $i$ , serán las situadas a una distancia comprendida entre  $l_{j,i-1}$  y  $l_{j,i}$ . Mediante (5) se determinan Las distancias  $l_{j,1}, l_{j,2}, \dots, l_{j,i}, \dots, l_{j,n}$ , a su vez definen las superficies  $a_{j,1}, a_{j,2}, \dots, a_{j,n}$  (metros cuadrados), que estarán ocupadas por las  $q_j^i$  personas que potencialmente pueden abandonar el recinto en el intervalo  $i$  utilizando la salida  $j$ .

$$l_{j,i} = v(i\delta) \quad (5)$$



**Figura 3.** Cálculo de las superficies  $a_{j,i}$

En la figura 3 puede observarse el proceso a seguir para la obtención de las superficies de evacuación de cada intervalo, se trata de un problema estrictamente geométrico. En este caso  $a_{j,1}$  corresponde a la superficie de un semicírculo,  $a_{j,2}$  la de una semicorona circular, mientras que desde  $a_{j,3}$  hasta  $a_{j,n-1}$  pueden aproximarse mediante trapecios circulares y la última superficie  $a_{j,n}$  puede obtenerse por diferencia.

Una vez se han obtenido las superficies de los recintos resulta inmediato determinar la ocupación  $q_j(i)$  de cada uno de ellos mediante la expresión (6)

$$q_j^i = \Phi d a_{j,i} \quad (6)$$

$\Phi$  es una función de modela el comportamiento, indicando la proporción de ocupantes que se dirigen a la salida  $j$ , cuando existe una única salida su valor es igual a la unidad.

### 3.3. Análisis dinámico de las estructuras que forman la red

Las estructuras más habituales que se presentan en las redes utilizadas en los problemas de evacuación de edificios son las vías de circulación, las confluencias y las ramificaciones. Una vía de circulación simple es un conjunto de  $n$  dependencias situadas sucesivamente desde un nodo origen hasta un destino unidas mediante arcos. La unión de varias vías de circulación o de salidas de dependencias que convergen en una sola da lugar a una confluencia y, de forma análoga a la definida en el apartado anterior, cuando una sola dependencia o vía de circulación diverge en varias vías de circulación independientes da lugar a una ramificación.

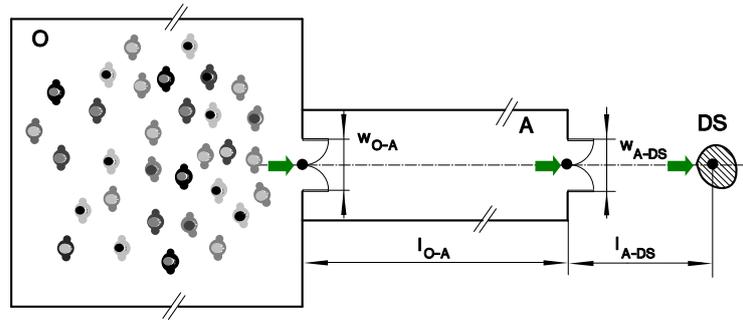


Figura 4. Ejemplo de una vía de circulación

Se considera la vía de circulación más simple posible, puede observarse en la figura 4, estará formada por un nodo origen  $O$  ocupado por  $k_O$  personas, un único nodo de circulación  $A$  y un nodo destino  $DS$ , un arco  $O-A$  que une el nodo origen  $O$  con el de circulación  $A$  y otro  $A-DS$  que une el mismo con el destino  $DS$ .

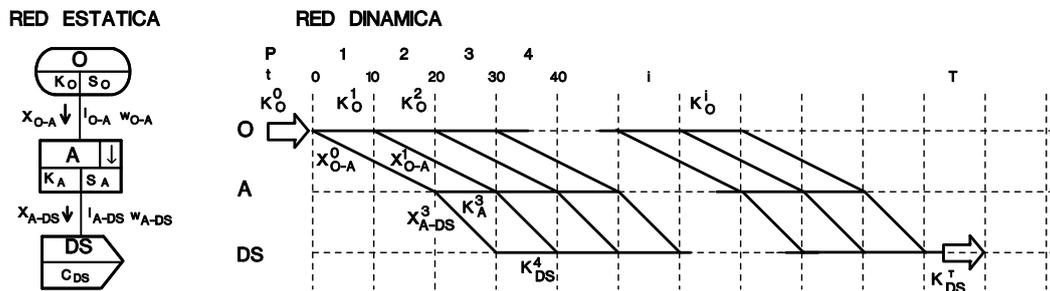


Figura 5. Redes estática y dinámica de la vía de circulación

El análisis de la estructura arquitectónica permite el trazado de las redes de flujo estática y dinámica. Se trata de los esquemas representados en el la figura 5, en este caso se consideran periodos de 10 segundos, los nodos no se sitúan en el centro de las dependencias, los nodos se sitúan estratégicamente para cumplir los objetivos de la modelización. El nodo  $O$  se sitúa a la salida del recinto para modelar las incorporaciones a la red, el pasillo se representa por el nodo  $A$  y el arco  $O-A$ , su ocupación está perfectamente definida en cualquier momento, por los ocupantes a asignados a  $A$  (personas en espera) y los asignados al arco  $OA$  (en circulación). De igual forma en el destino  $DS$ , se conocen en todo momento las personas que están llegando y las que ya se encuentran en la posición segura  $DS$ .

Las magnitudes que definen la vía de evacuación son las capacidades de ocupación de los nodos de circulación y destino  $c_A$  y  $c_{DS}$ , las magnitudes propias de los arcos: las capacidades de circulación  $c_{O-A}$  y  $c_{A-DS}$  (personas por periodo) y los tiempos de circulación  $\tau_{O-A}$  y  $\tau_{A-DS}$  (periodos). De una forma general, la capacidad de las dependencias (7), depende de la superficie efectiva del recinto  $a_{e_j}$ , las dimensiones de los ocupantes y de las separaciones que se establezcan entre los mismos, reflejada mediante la densidad de ocupación  $d_j$ .

$$c_j = a_{e_j} d_j \quad (7)$$

La capacidad de paso  $c_{j-j'}$  de un arco o flujo máximo (8) depende de la anchura efectiva mínima  $w_{j-j'}$  definida según J. L. Pauls (1984), entre las dependencias  $j$  y  $j'$  y del flujo máximo que pudiera registrarse en dicho recorrido.

$$c_{j-j'} = (w_{j-j'} f_{MAX_{j-j'}}) \delta \quad (8)$$

El tiempo de circulación  $\tau_{j-j'}$  (9) entre los nodos  $j-j'$ , depende de la distancia  $l_{j-j'}$  y de la velocidad media de circulación  $v_{j-j'}$  que se desarrolla en dicho recorrido (periodos).

$$\tau_{j-j'} = \frac{t_{j-j'}}{\delta} = \frac{l_{j-j'}}{v_{j-j'}} \left( \frac{1}{\delta} \right) \quad (9)$$

Una vez se han definido las magnitudes que definen la red se establecen las condiciones de la continuidad de flujos. Se diferencia entre los nodos origen de evacuación, los nodos intermedios y los nodos destino. Si  $U_n$  es el número total de nodos,  $U_1$  el número de nodos origen,  $U_2$  el número de nodos intermedios y  $U_3$  el número de nodos destino.

En los nodos origen de evacuación según el modelado de incorporaciones a la red, abandonan el recinto la totalidad de ocupantes que se hallan en posición inmediata a la salida (10) cumpliendo las condiciones de capacidad del arco (11).

$$x_{j-j'}^i = q_{j-j'}^{i-1} \quad \forall j \in U_1 \quad (10)$$

$$x_{j-j'}^i \leq c_{j-j'}^i \quad \forall i \quad (11)$$

En una vía de evacuación simple al final del periodo resultará la ocupación  $k_j^i$  (12), magnitud a partir de la cual se actualiza el modelado de incorporaciones a la red.

$$k_j^i = k_j^{i-1} - x_{j-j'}^i \quad \forall i \geq 1 \quad (12)$$

En los nodos intermedios se producen llegadas y salidas, mediante  $y_j^i$  se expresan las llegadas que se han registrado en el nodo  $j$  durante el periodo  $i$ , en una vía simple resulta:

$$y_j^i = x_{j-j'}^{i-\tau} \quad \forall i > (i + \tau_{j-j'}) \quad (13)$$

Las personas que en un periodo  $i$  cualquiera, abandonan el nodo  $j$  para dirigirse al  $j'$ , será el máximo posible, según (14) corresponderá a las personas que pudieran estar en espera formando cola y las que llegan a la salida durante el periodo desde un nodo precedente.

$$x_{j-j'}^i = q_j^{i-1} + y_j^i \quad \forall j \in U_2 \quad (14)$$

En todo momento se respetará la capacidad de ocupación del nodo, en el mismo existirán personas circulando y retenidas, en la expresión (15) se contabilizan ambos términos.

$$\sum_{i=i'}^{i=i'+\tau} x_{j-j'}^i + q_j^{i-1} \leq c_j \quad \forall i \quad \forall j \in U_2 \quad (15)$$

La ocupación de los nodos destino (16) será función de las llegadas que se producen en los mismos, en una vía simple resulta:

$$k_{DS}^i = k_{DS}^{i-1} + y_{DS}^i \quad \forall i \quad (16)$$

Al nodo destino deben llegar la totalidad de ocupantes del nodo origen.

$$\sum_{i=1}^{i=T} k_{DS}^i = k_O \quad (17)$$

De una forma similar a lo que se establecido para una vía de circulación, es posible disponer de las condiciones de continuidad de flujo en un entorno dinámico para las confluencias y las ramificaciones. Una vez se hayan definido estas tres estructuras simples será posible estudiar situaciones reales de edificios con estructuras más complejas.

#### 4. Optimización de la evacuación de edificios

Las redes de flujo que resultan de los problemas de evacuación de edificios se caracterizan por disponer de un conjunto de dependencias ocupadas ( $O_1, O_2, \dots, O_j, \dots, O_n$ ), varios destinos ( $DS_1, DS_2, \dots, DS_n$ ) y otras que los comunican. La totalidad de los ocupantes de los nodos origen deben desplazarse hasta los destinos de la forma que les resulte más favorable. Básicamente puede hablarse de dos tipos de situaciones, la primera corresponde a edificios en los cuales no se conoce la ocupación, entonces se trata de maximizar los flujos de salida en un horizonte T. La función objetivo la proporciona la expresión (18), en cualquier instante se persigue que hayan abandonado el edificio el mayor número de ocupantes posible.

$$\text{Max} \left\{ \sum_{i=1}^{i=T} \sum_{j \in U3} x_{j-DSj}^i \right\} \quad (18)$$

El segundo caso, posiblemente corresponde a una situación más habitual, la ocupación es conocida, el objetivo a plantear consiste en minimizar el tiempo de evacuación total T, definido por el instante en el cual la totalidad de los ocupantes k se hallan en una posición segura.

$$\text{Min} \{ T \mid P(z) \geq k \} \quad (19)$$

Finalmente, el problema resultante vendrá dado por la correspondiente función objetivo, proporcionada por la expresión (18) o bien la (19), sujeta a las condiciones de continuidad de flujo establecidas por las expresiones dadas en el apartado anterior. Afortunadamente, en estos momentos disponemos de algoritmos eficientes para la solución del problema.

#### 5. Conclusiones

En el presente trabajo se ha presentado, de una forma general, un modelo para el estudio del problema de la evacuación de edificios basado en las redes de flujo. Puede observarse que las redes de flujo son una herramienta excelente para el estudio del mismo, el modelo que se describe en este trabajo, además de actualizar los modelos de locomoción de las personas, mediante el modelado de incorporaciones red, el análisis dinámico de las estructuras y su correspondiente definición, aporta considerables mejoras a la solución del problema. Debe destacarse que en todo momento se conoce la ubicación de los ocupantes y se obtienen de forma precisa todas las magnitudes características del mismo.

## Referencias

- Berlin, G. N. (1980). "A network analysis of building egress system". ORSA/TIMS meeting Washington, 8 páginas.
- Capote, J.A.; Alvear, D.; Abreu, O. V.; Cuesta, A.(2008). "Análisis de los parámetros de entrada en el Modelado de Simulación Computacional de Evacuación (MSCE)", Revista Montajes e Instalaciones nº 424, ISSN 0210-184X, pp. 96-103.
- Casadesús, S.; Garriga, F. (2001). "Procedimiento gráfico para la optimización de la evacuación de un recinto", Actas del IV Congreso de Ingeniería de Organización, Universidad de Sevilla, 13-14, pp. 121-123.
- Casadesús Pursals, S. (2006). Tesis doctoral: "Consideraciones en torno a los modelos para el estudio de la evacuación de edificios", dirigida por F. Garriga Garzón, disponible en <http://tesisenxarxa.net>, 380 páginas.
- Casadesús, S.; Garriga, F (2008). "Estudio de la evacuación de edificios mediante redes de flujo", XII Congreso de Ingeniería de Organización, 2<sup>nd</sup> International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. Universidad de Burgos, CD 10 páginas.
- Casadesús, S.; Garriga, F. (2009). "Optimal time of building evacuation considering evacuation routes", EJOR, Vol.192, Issue 2, Enero 2009, pp. 692-699.
- Choi, W.; Hamacher, S.; Tufekci, S. (1988). "Modelling of building evacuation problems by network flows with side constraints", EJOR, 35, pp.98-110.
- Francis, R. L. (1981). "A 'Uniformity principle' for evacuation route allocation", Journal of Research of National Bureau of Standards Vol.86, pp. 509-513.
- Francis, R. L.; Chalmet, L. G.; Saunders, P. B. (1982). "Network models for building evacuation", Management Science Vol. 28, pp. 86-105.
- Francis, R. L.; Kisko, T. M. (1985). "EVACNET+: A Computer program to determine Optimal building evacuation plans", Fire Safety Journal 9, pp. 211-220.
- Fruins, J. J. (1987). "Pedestrian planning and design. Elevator World", Library of Congress Catalogue Number 70-159312, 1971-1987, 206 páginas.
- Galea, E. R.; Gwinne, S.; Lawrence, P.; Filipidis, L. (2001). "Modeling occupant interaction with fire conditions using the building EXODUS evacuation model", Fire Safety Journal Vol. 36-4, pp. 327-357.
- Gento Municio, M. A.; López Rubio, B.; Posada Calvo, M. (2003). "Simulación del desalojo de edificios. Situación en España: E.T.S. Ingenieros Industriales (Universidad de Valladolid)" V Congreso de Ingeniería de Organización, Valladolid Burgos, 10 páginas.
- Getachew, T.; Kostreva M.; Lancaster L.(2000). "A Generalization of Dynamic Programming for Pareto Optimization in Dynamic Networks", RAIRO Operation Research 34, pp. 27-47.
- Guasch, A.; Abad, J. (1996); "Desarrollo de modelos gráficos y numéricos de la evacuación de edificios de altura mediante técnicas de simulación"; Fundación MAPFRE, 34 páginas.
- Gupta, A. K.; Yadav, P. K. (2004). "SAFE-R: a new model to study the evacuation profile of a building", Central Building Res. Institute, Roorkee, India, Fire Safety Journal 39, 539-556.
- Hope, B.; Tardos, E. (1994). "Polynomial time algorithms for some evacuations problems", Fifth Annual SIAM Symposium on Discrete Algorithms, pp. 433-441.

- Hope, B.; Tardos, E. (1995). "The Quickest Transshipment Problem", Proceedings of the 6th Annual SIAM Symposium on Discrete Algorithms, pp. 512-521.
- Kostreva, M. M.; Getachew, T.(1991). "Optimization models in fire egress analysis for residential buildings", Fire Safety Science: Proceedings of the Third International Symposium, Elsevier Applied Science, pp. 805-814.
- Lo, S. M.; Huang, H. C.; Wang, P.; Yuen, K. K.(2006). "A game theory based exit selection model for evacuation", Fire Safety and Disaster Prevention Group, Dep Building & Construction, City University of Hong Kong, Hong Kong, Fire Safety Journal 41, pp. 364-369.
- Lovas, G. G. (1995). "On performance measures for evacuation systems", EJOR, pp. 352-367.
- Lu, Q.; Huang, Y. ; Shekhar, S., "Evacuation Planning: A Capacity Constrained Routing Approach", Department of Computer Science and Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, USA, Springer-Verlag 2003, pp.111-125.
- Nelson, H. E.; McLennan, H. A.(1996). "Emergency Movement", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 3/Chapter 14, pp. 3.286-3.295.
- Pauls, J. L. "(1996). "Movement of people. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 3/Chapter 12, Ed. 1996, pp. 3-263/3-285.
- Smith, J. M.; Talebi, K.(1985). "Stochastic network evacuation models", Computers & Operations Research Vol. 12. No.6, pp. 559-577.
- Thompson, P. A.; Marchant, E. W. (1995). "Testing and application of the computer model SIMULEX", Fire Safety Journal 24, pp. 149-166.
- Tjandra, A. S. (2003). "Dynamic Network Optimization with Application to the Evacuation Problems", PhD thesis, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany.