

Estudio de la evacuación de edificios mediante redes de flujo

Salvador Casadesús Pursals¹, Federico Garriga Garzón²

¹ Departament. d'Estadística i Inv. Operativa, ETSEIAT, Universitat Politècnica de Catalunya. c/ Colom 11, 08222 Terrassa, salvador.casadesus@upc.edu

² Departament d'Organització d'Empreses, ETSEIAT, Universitat Politècnica de Catalunya. c/ Colom 11, 08222 Terrassa, federico.garriga@upc.edu

Resumen

Este artículo constituye una introducción al estudio del problema de la evacuación de edificios utilizando redes de flujo determinísticas. En el mismo se analiza el proceso de definición de la red, la representación del edificio mediante una red estática, la posterior formación y el estudio de la red dinámica. Mediante las redes de flujo es posible determinar la distribución óptima de los ocupantes de los edificios hacia cada una de las salidas obteniendo además un conocimiento preciso y fiable de las magnitudes que caracteriza.

Palabras clave: Evacuación de edificios, evacuación óptima de edificios.

1. Oportunidad de la utilización de las redes de flujo en el estudio del problema de la evacuación de edificios

Existen muchas situaciones en las cuales la adecuada representación de un problema supone un avance en la solución del mismo, por ejemplo es evidente que así sucede en el estudio de circuitos eléctricos o electrónicos, existe una sistemática de representación: Se conocen los componentes, las magnitudes que los caracterizan, está estandarizada una simbología y existen unos procedimientos de resolución reconocidos. Para mejorar el estudio de los edificios, desde la perspectiva de sus condiciones de evacuación, sería deseable una base de conocimientos similar: Tener identificados los elementos esenciales del problema, las magnitudes que los caracterizan, disponer de un sistema estándar de representación y de unos procesos de resolución de reconocida solvencia.

Un progreso significativo en la solución del problema de la evacuación de edificios se produjo al emplear redes de flujo, parece ser que el primer autor que hizo pública su utilización fue G. N. Berlin (1980), posteriormente R. L. Francis, L. G. Chalmet y P. B. Saunders (1982) utilizaron redes dinámicas y desde entonces, ambos tipos de redes se han seguido utilizando de forma más o menos efectiva. Una formulación matemática más completa del problema de la evacuación de edificios, en la cual el edificio se representa mediante un grafo, se halla publicada en el trabajo de W. Choi, S. Hamacher y S. Tufekcy (1988). Desde entonces han sido numerosas las publicaciones que han aportado mejoras a la solución de este problema, destacan las realizadas por B. Hoppe y E. Tardos (1994), M. M. Kostreva y T. Getachew (1991) y más recientemente por Q. Lu, Y. Huang y S. Sekhar (2004).

Para representar un edificio mediante una red se establecen tres fases, en la primera a partir del dibujo arquitectónico se definen los elementos que constituyen la red, en la segunda se

establece el diagrama estático y en la tercera se obtiene la red dinámica. Las redes estáticas ofrecen una visión global del problema, mientras que las redes dinámicas destacan por proporcionar el valor instantáneo de las magnitudes: Ocupaciones, densidades de ocupación, velocidades, flujos, tiempos de recorrido y retenciones entre otras.

2. Proceso de definición de la red y de las magnitudes que la caracterizan

El primer paso de este proceso consiste en pasar del diseño arquitectónico del edificio a la red que lo representa, los nodos constituyen las dependencias y los arcos la conexión entre las mismas. En esta representación, las dependencias que inicialmente están ocupadas constituyen los nodos origen, otras dependencias de paso son los nodos intermedios o de circulación y el punto de reunión, al que se dirigen las personas que abandonan el edificio, son los nodos destino. Existen nodos intermedios en los cuales puede existir una ocupación inicial. Las redes de flujo a que dan lugar los problemas de evacuación se caracterizan por tener múltiples orígenes y varios destinos. En un edificio pueden existir dependencias que no están ocupadas y que no son elementos de paso, en cuyo caso pueden considerarse irrelevantes y normalmente no se procede a su representación.

El proceso a seguir para poder representar un edificio mediante una red de flujo se inicia operando directamente sobre los planos de las plantas del edificio. Según puede observarse en la figura 1, en primer lugar se identifican los nodos origen O_j y los destinos DS_j , se trata de las dependencias que inicialmente están ocupadas y las posiciones definidas como seguras a las cuales deben dirigirse la totalidad de ocupantes que pretenden abandonar el edificio. En segundo lugar se identifican los nodos intermedios y se trazan los arcos que unen dichas dependencias $j-j'$. Normalmente las dependencias de paso se designan por H_j , P_j , E_j , identifican respectivamente vestíbulos, pasillos o escaleras.

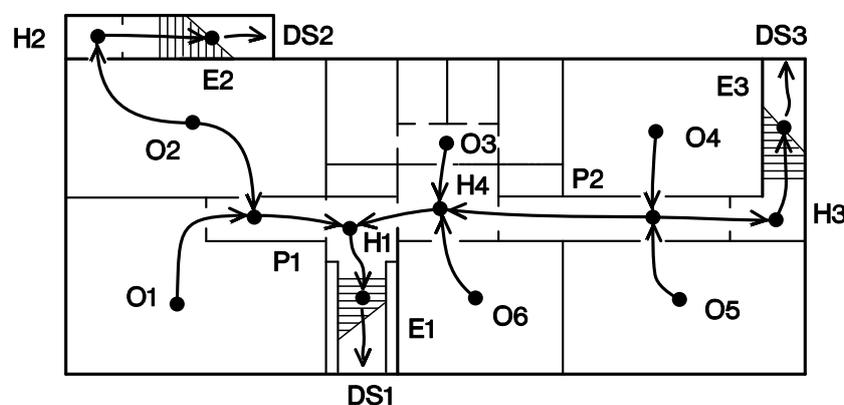


Figura 1. Identificación los elementos de la red sobre planta del edificio

Una red puede definirse como un grafo, 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. En estas redes de flujo, denominadas “clásicas”, los nodos se sitúan en el centro de las dependencias y cada arco $v \in V$ en la red representa el paso desde un componente j a otro j' , asociado a esta transición existe un flujo $F(v)$, una capacidad de paso $c(v)$ y un tiempo de circulación $\tau(v)$.

El paso siguiente sería analizar los elementos de la red y establecer los elementos cuantitativos, básicamente consiste en conocer: Las características personales de los

ocupantes, la ocupación de los nodos origen k_j , las superficies útiles a_j de los recintos, las anchuras efectivas mínimas de paso $w_{j-j'}$, la longitud de los recorridos de circulación $l_{j-j'}$, luego a partir de las dimensiones de los individuos y de la previsión de las separaciones que se establezcan entre ellos será posible estimar las densidades de ocupación, velocidades y flujos de circulación, para ello pueden utilizarse las tablas de J. J. Fruins (1987) y de J. Pauls (1984).

Tabla 1. Elementos para el cálculo de la red

Magnitudes de ocupación y locomoción (J. J. Fruins)

Ocupación recintos

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 entre personas (m)	> 1,22	1,22 1,07	1,07 0,91	0,91 0,61	< 0,61	contacto

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	70,10 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

Circulación en descenso escaleras

Nivel de servicio	AS	BS	CS	DS	ES	FS
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

Ancho efectivo de las vías de evacuación (J. L Pauls)

Elemento de evacuación	Separación al elemento de paso (metros)
Pared escaleras	0,15
Pasamanos escaleras	0,09
Sillas / butacas teatros	0,00
Pared en rampas y pasillos	0,20
Vestíbulos de pasillos amplios	0,46
Obstáculos en general	0,10
Dintel puerta	0,15

3. – Representación del sistema de evacuación mediante redes estáticas

Para representar un edificio mediante una red de flujo es preciso disponer de una determinada simbología, G. N. Berlin (1980) en sus pioneras redes de flujo utilizó rectángulos, R. L. Francis y T. M. Kisko (1985) en el manual del programa EVACNET+ desarrollaron su propia

simbología, otros autores han utilizado círculos, octógonos, etc... En la figura 2 se proponen unos símbolos básicos para utilizar en la representación de las redes de flujo.

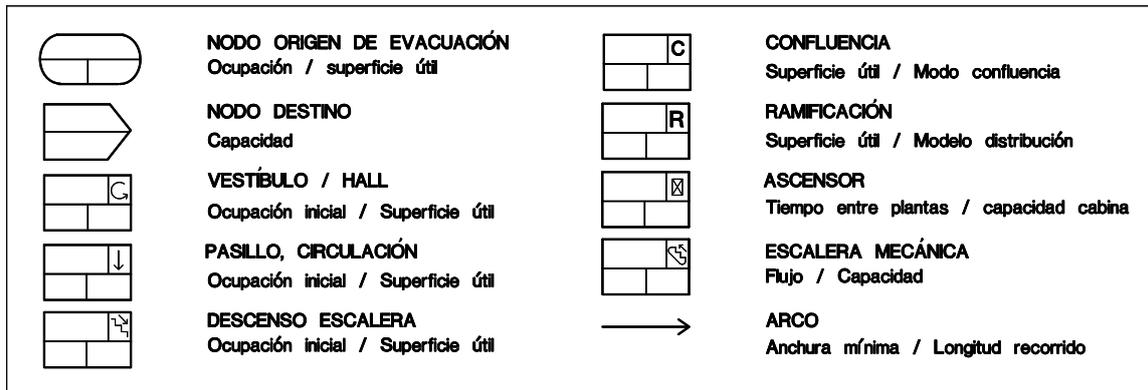


Figura 2. Símbolos para la representación de la red

Una vez se ha definido una simbología ya es posible pasar del dibujo arquitectónico a la red que representa el edificio. Se trata de una representación esquemática para visualizar los elementos esenciales del problema de la evacuación. En algunos casos resulta útil mantener una estructura que guarde una cierta similitud con la geometría del edificio, realmente puede facilitar la comprensión del mismo. En la figura 3 puede observarse la representación mediante una red estática simplificada (sin considerar los elementos cuantitativos) del ejemplo presentado en la figura 1.

En una fase posterior a la representación, se procede a calcular las magnitudes que definen la red estática a partir de las mediciones realizadas en el dibujo arquitectónico: Capacidades de los nodos c_j , capacidades de circulación $c_{j-j'}$ y tiempos de circulación de los arcos $t_{j-j'}$, finalmente dichas magnitudes pueden situarse en el diagrama correspondiente de la red.

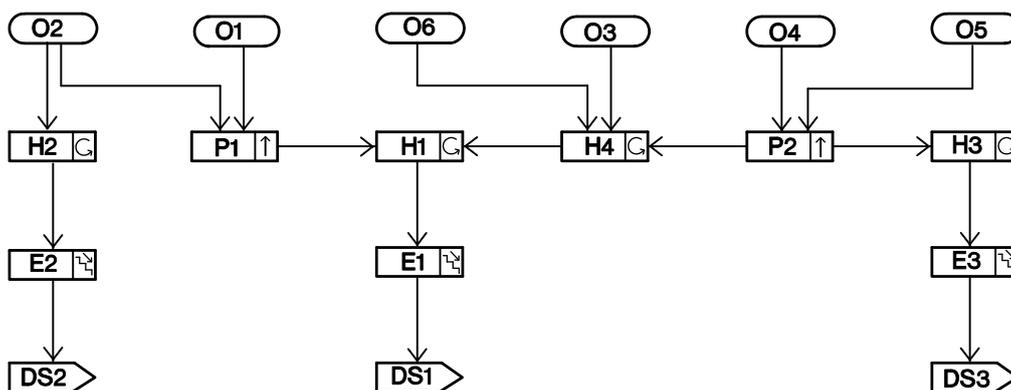


Figura 3. Representación de un diagrama estático de flujo simplificado

La ocupación de una dependencia está definida por el número k_j de personas presentes en el momento de iniciarse la evacuación, mientras que las capacidades de ocupación c_j están definidas por el número máximo de personas que pueden albergar. La expresión (1) proporciona la capacidad de las dependencias, se observa que depende de la superficie efectiva del recinto $a_{e,j}$, las dimensiones de los ocupantes y de la relación de separación que se establezca entre los mismos, reflejada mediante la magnitud densidad de ocupación d_j .

$$c_j = a_{ej} d_j \quad (1)$$

La capacidad de paso $c_{j-j'}$ de un arco o flujo máximo indica el número máximo de personas que pueden desplazarse desde un nodo j hasta otro j' en una unidad de tiempo y el tiempo de circulación $t_{j-j'}$ indica el tiempo necesario para desplazarse desde el centro del nodo j hasta el centro de j' . La capacidad de paso de un arco $c_{j-j'}$ según la expresión (2), depende de la anchura efectiva mínima $w_{j-j'}$ definida según J. Pauls (1984), del recorrido que existe entre las dependencias j y j' y del flujo máximo $f_{MAX j-j'}$ que se registre en dicho recorrido

$$c_{j-j'} = w_{j-j'} f_{MAX j-j'} \quad (2)$$

El tiempo de circulación $t_{j-j'}$, según la expresión (3), depende de la distancia $l_{j-j'}$ y de la velocidad media de circulación $v_{j-j'}$ que se desarrolla en el recorrido desde j hasta j'

$$t_{j-j'} = \frac{l_{j-j'}}{v_{j-j'}} \quad (3)$$

4. – Representación de la evacuación de edificios mediante redes dinámicas

El modelo dinámico permite representar la ocupación de las dependencias, el desplazamiento de las personas y el resto de magnitudes que definen el problema en intervalos regulares de tiempo de una 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, descrito por R. Francis, L. Chalmet y P. Saunders (1982). La red dinámica estará formada por h periodos de tiempo, cuyo intervalo tiene una magnitud δ . El periodo inicial empieza en el instante 0 y el final termina en el instante T , la expresión (4) proporciona su valor.

$$T = h \times \delta \quad (4)$$

En la representación de un edificio mediante una red dinámica, de cada nodo j del modelo estático se efectúan $h+1$ copias, se sitúan correlativamente y se numeran según el índice i , correspondiente del periodo, de izquierda a derecha mediante números naturales correlativos 0, 1, 2, . . . h , luego se procede de forma similar con los arcos, de cada arco $j-j'$ que representa el desplazamiento de los ocupantes desde el nodo j hasta el j' , iniciado en el periodo i , se efectúan h copias, las necesarias para modelar el desplazamiento de la totalidad de ocupantes del nodo origen j . En esta red, además de los arcos de circulación $j-j'$, existen los arcos $j-j$ se llaman arcos de retención y representan la evolución de la ocupación del nodo j en cada periodo i . La copia 0 hace referencia a la situación inicial, ocupación de los nodos origen. La copia T representará la situación final, deberá corresponder a la salida de la red o bien la ocupación del destino. En la red dinámica k_j^i representa la ocupación de la dependencia j al final del periodo i , y $x_{j-j'}^i$ el número de personas que se desplazan desde j hasta j' en el periodo i .

En la figura 4 se muestra la red estática de una vía de evacuación a partir de la cual se obtiene la red dinámica. La representación física de red la dinámica es laboriosa, puede observarse en esta misma figura, en este caso la representación se limita a una sola vía de evacuación formada por varios nodos y se han considerando muy pocos periodos.

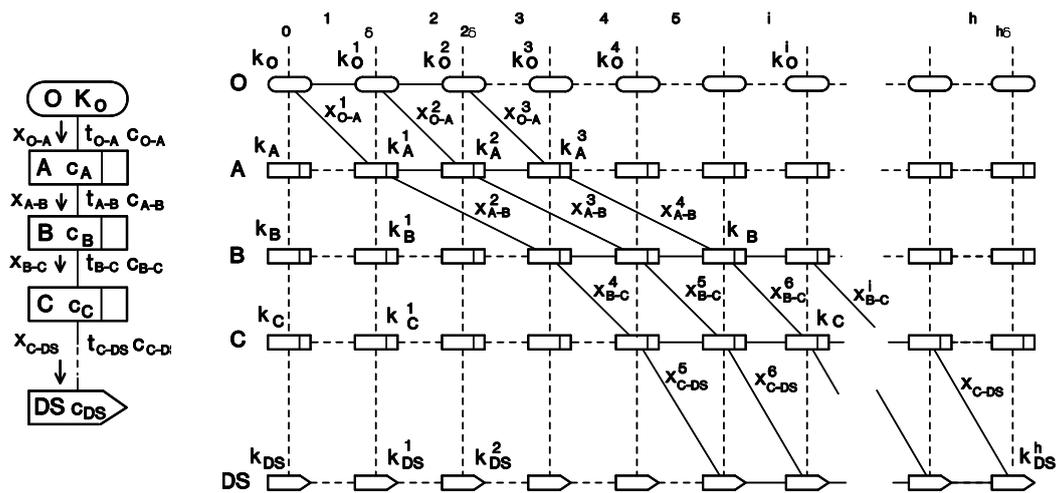


Figura 4. Ejemplo de redes estática y dinámica simple

Para analizar la dimensión del problema es posible verificar que si la red estática tiene n nodos y m arcos, y la red dinámica tiene h periodos, entonces $(n+m)*h$ es una cota superior del número de arcos en la red dinámica, mientras que $n*(h-1)$ es una cota inferior en el número de nodos de la red. Esta cota puede reducirse enormemente cuando se eliminan los arcos que no son esenciales. El número de periodos h necesarios para modelar de forma adecuada el problema, se determina a partir de la expresión (5), siendo z' es una estimación del tiempo total de evacuación del edificio y δ es el intervalo de tiempo de un periodo, cuya magnitud se ha establecido para el estudio del problema.

$$h = \frac{z'}{\delta} \quad (5)$$

La dificultad de resolución del problema depende de la dimensión del modelo dinámico. En general, esta dificultad será inversamente proporcional a la magnitud del intervalo δ . Mediante un valor de la magnitud δ , intervalo de tiempo correspondiente a un periodo, pequeño se obtiene mayor precisión en los resultados, mientras que mediante valores de δ grandes resulta que las capacidades de los arcos y los tiempos de circulación no son valores enteros. La solución radica en seleccionar δ de forma adecuada, para obtener un compromiso entre las posibilidades de resolución y el realismo del problema.

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 también se basa en el modelo estático. Si la red estática nos viene dada por el grafo $G = (U, V)$, siendo U la serie de nodos según y V según 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 $G_T = (U_T, V_T)$, que es la expansión temporal de la red a partir de la red estática $G = (U, V)$ de la siguiente forma:

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

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

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

entonces G_T recibe el nombre de red dinámica. Los arcos $(j^i, j^{i+1}) \in V_T$ son los arcos de retención. 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 componente j' en el periodo i .

El número de personas $x_{j-j'}^i$ que se desplazan de j a j' en el periodo i vendrá dado por la expresión (6). Necesariamente en cualquier periodo se cumplirá que el flujo es inferior que la capacidad de circulación o de paso

$$x_{j-j'}^i = \delta \times F_{j-j'}^i \mid x_{j-j'}^i \leq c_{j-j'}^i \quad (6)$$

De forma similar a la capacidad de circulación, según la expresión (7), puede calcularse el tiempo de tránsito o circulación entre j y j' de tal forma que la magnitud de $\tau_{j-j'}$ corresponde a periodos de tiempo.

$$\tau_{j-j'} = \frac{t_{j-j'}}{\delta} \quad (7)$$

La ocupación en cada periodo de todas las dependencias del sistema de evacuación pueden analizarse mediante la matriz de ocupaciones (figura 5), expresa el número de personas que ocupan cada una de las dependencias al final de cada periodo. En dicha matriz, O_j corresponden a dependencias origen de evacuación, H_j corresponden a nodos intermedios y DS_j corresponden a nodos destino. Resulta inmediato observar que el análisis por filas nos indica la ocupación de todas las dependencias del sistema en un determinado instante, mientras que el análisis por columnas nos proporciona la evolución de la ocupación de una dependencia j en los n periodos estudiados.

	O_1	O_2	...	O_j	...	H_j	...	DS_j	...	DS_n
0	k_{O1}^0	k_{O2}^0	...	k_{Oj}^0	...	k_{Hj}^0	...	k_{DSj}^0	...	k_{DSn}^0
1	k_{O1}^1	k_{O2}^1	...	k_{Oj}^1	...	k_{Hj}^1	...	k_{DSj}^1	...	k_{DSn}^1
2	k_{O1}^2	k_{O2}^2	...	k_{Oj}^2	...	k_{Hj}^2	...	k_{DSj}^2	...	k_{DSn}^2
3	k_{O1}^3	k_{O2}^3	...	k_{Oj}^3	...	k_{Hj}^3	...	k_{DSj}^3	...	k_{DSn}^3
...
i	k_{O1}^i	k_{O2}^i	...	k_{Oj}^i	...	k_{Hj}^i	...	k_{DSj}^i	...	k_{DSn}^i
...
n	k_{O1}^n	k_{O2}^n	...	k_{Oj}^n	...	k_{Hj}^n	...	k_{DSj}^n	...	k_{DSn}^n

Figura 5. Matriz de ocupaciones

Otras magnitudes fundamentales en el estudio del problema de la evacuación de un edificio se analizan de la misma forma que las ocupaciones y se conocen exactamente con el mismo detalle, en esta situación se encuentran densidades de ocupación d_j^i y $d_{j-j'}^i$, las velocidades de circulación $v_{j-j'}^i$, los flujos $x_{j-j'}^i$, los tiempos de circulación $\tau_{j-j'}^i$ o las capacidades de los arcos $c_{j-j'}^i$. Así, por ejemplo, mediante la matriz de flujos se indica el número de personas que abandonan cualquier nodo j para dirigirse a un nodo destino j' en cada periodo, para todas las dependencias del edificio.

5. – Análisis de los resultados

La solución del problema de la evacuación de un edificio consiste en la distribución de los ocupantes hacia cada una de las salidas para cumplir determinados objetivos, normalmente tiempos de evacuación mínimos. Otra magnitud fundamental en la solución del problema son la estimación de tiempos de evacuación de todo el edificio, de cada uno de los recintos, ratios de la eficacia del desarrollo de la evacuación, situación y valoración de retenciones entre otros parámetros. El modelo dinámico proporciona información de otras muchas magnitudes periodo a periodo, hasta tal punto que puede decirse que un problema de este modelo es la gran cantidad de información que se maneja, de tal forma que toda esta información es valiosa si se tiene capacidad para interpretar y analizar correctamente, para ello además de los resultados numéricos concretos, se recurre a ciertas herramientas gráficas como las que se muestran en las figuras 6 y 7, correspondientes a los diagramas denominados “perfil de la ocupación” y “análisis de la ocupación”.

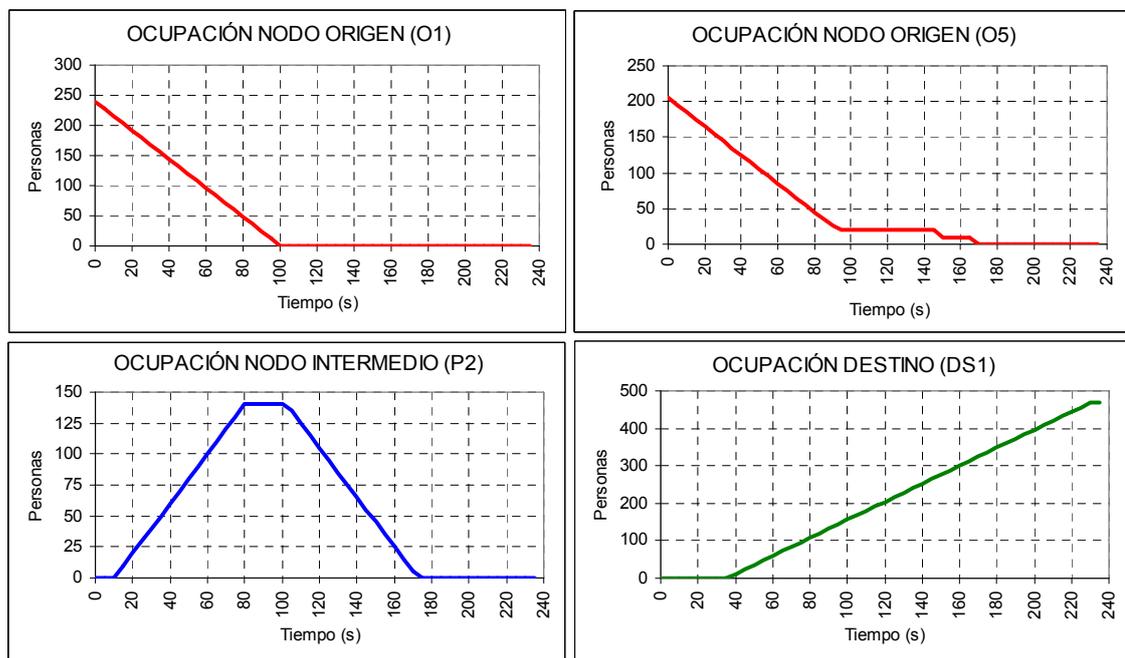


Figura 6. Ejemplos de diagramas tipo de perfil de la ocupación

En la gráfica “perfil de la evacuación” puede analizarse la evolución de la ocupación de cada una de las dependencias del edificio. En la figura 6 se muestran los diagramas de ocupación de cuatro dependencias tipo: Dos dependencias origen de evacuación, una dependencia de circulación y un destino. Se observa que la evacuación de la dependencia O1 es totalmente fluida, mientras que la evacuación de la dependencia O5 no corresponde a una situación satisfactoria, resulta un flujo de salida constantes hasta el momento en que la ocupación del nodo destino restringe las salidas. En el caso del nodo intermedio P2, se aprecia como se incrementa su ocupación hasta alcanzar su capacidad y a partir de un determinado instante la evacuación resulta fluida sin restricciones. Finalmente, en el caso del destino de evacuación DS1 no se aprecia ninguna incidencia: Resulta una ocupación progresiva con un flujo constante.

Otros diagramas utilizados a menudo son los denominados “Análisis de la ocupación”, muestran la ocupación de un conjunto de dependencias en un determinado instante, en edificios pequeños puede ser todo el edificio, en otros casos debe estructurarse de la forma

que se considere más efectiva. En la figura 7 se muestra como ejemplo la ocupación en cuatro instantes de la totalidad de las dependencias de un edificio de dimensiones reducidas.

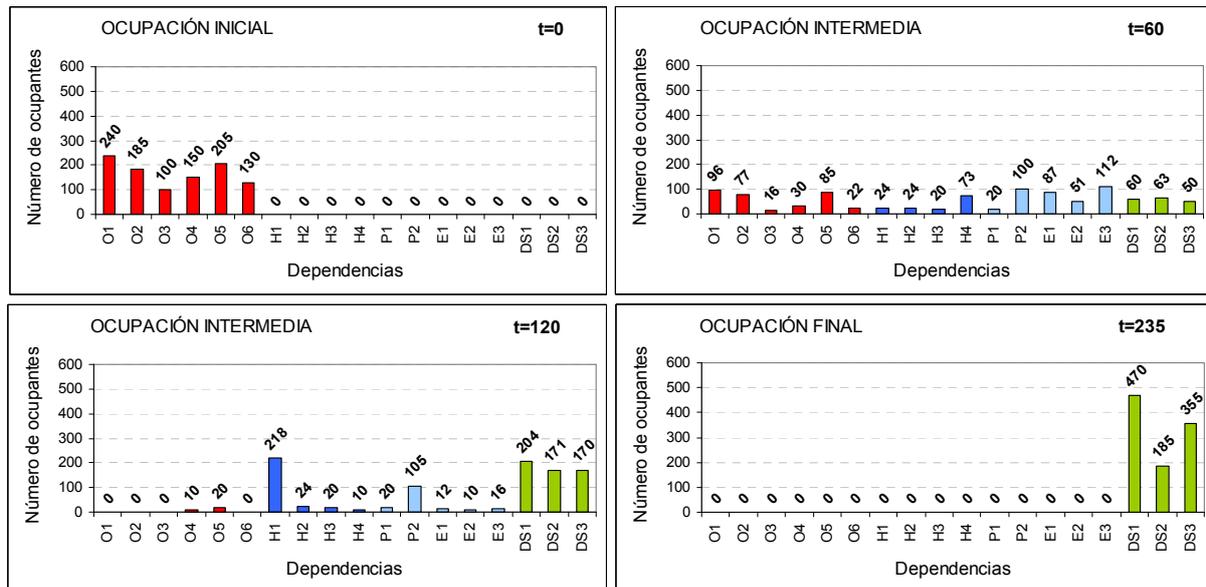


Figura 7. Ejemplo de análisis de la ocupación

6.- Conclusiones

En este trabajo se muestra la capacidad de las redes de flujo para el estudio del problema de la evacuación de edificios y la utilidad de las herramientas gráficas para analizar e interpretar los resultados del problema. Ciertamente se trata de una solución sobria, no tiene la vistosidad de las herramientas gráficas, pero fácilmente puede apreciarse que la solución que se propone tiene una gran versatilidad y permite la solución del problema de la evacuación para cualquier tipo de edificio con una gran precisión.

Referencias

Berlin, G. N. (1980). "A network analysis of building egress system", ORSA/TIMS meeting Washington, 8p.

Casadesús, S. / Garriga, F. (2001). "Procedimiento gráfico para la optimización de la evacuación de un recinto", Actas del IV Congreso de Ingeniería de Organización, ISBN 84-88783-52-3, Universidad de Sevilla, 13-14 Septiembre 2001, p.121-123.

Casadesús, S. / Garriga, F. (2003). "Objetivos equivalentes en el problema de la evacuación de recintos", Actas del V Congreso de Ingeniería de Organización, ISBN 84-688-2827-0, Universidad de Valladolid-Universidad de Burgos, 4-5 Sep. 2003, p.57-59.

Casadesús, S. / Garriga, F. (2004). "Modeling the Evacuation and Entrance Function in the Problem of Building Evacuation", Actas del IV Congreso "International Conference on Modelling & Simulation (ICMS'04)", ISBN 84-688-7867-7, Universidad de Valladolid, 22-24 Septiembre 2004, p.37-39.

Casadesús Pursals, S. (2006). "Consideraciones en torno a los modelos para el estudio de la evacuación de edificios", Tesis doctoral presentada en Universitat Politècnica de Catalunya dirigida por F. Garriga Garzón, disponible en <http://tesisenxarxa.net>, ISBNN:

B.52664-2006/84-690-2489-2, Enero 2006.

Choi, W. / Hamacher, S. / Tufekci, S. (1982). "Modelling of building evacuation problems by network flows with side constraints", *European Journal of Operational Research*, 35, pp. 98-110.

Francis, R. L./ Chalmet, L. G. / Saunders, P. B. (1982). "Network models for building evacuation", *Management Science* Vol.28, January 1982, 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 Catalog Number 70-159312, 1971-1987, p.206.*

Hope, B. / Tardos, E.(1984). "Polynomial time algorithms for some evacuations problems", *Proceedings of the Fifth Annual SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, Janvier 1994, pp. 433-441.

Kostreva, M. M. / Getachew, T. (1991). "Optimisation models in fire egress analysis for residential buildings", *Fire Safety Science: Proceedings of the Third, International Symposium 1991*, Elsevier Applied Science, pp. 805-814.

Lu, Q. / Huang, Y. / Shekhar, S.(2005). "Evacuation Planning: A Capacity Constrained Routing Approach", Department, University of Minnesota, 11 p.

Pauls, J. L. (1984). "The movement of people in buildings and design solutions for means of egress", *Fire Technology*, Vol.20, No.1, February 1984, 27 p.