

CAPITULO 5: LA EVACUACION DE EDIFICIOS

5.1 ESTUDIO DEL PROBLEMA MEDIANTE REDES DE FLUJO

Históricamente la utilización de redes de flujo supuso un avance notable en el estudio del problema de la evacuación de edificios, las redes utilizadas inicialmente eran redes estáticas, parece ser que G. N. Berlin [4] fue el primer autor que hizo pública su utilización, posteriormente R. L. Francis, L. G. Chalmet y P. B. Saunders [35] utilizaron redes dinámicas y desde entonces, ambos tipos de redes se han seguido utilizando de forma más o menos efectiva.

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, de forma sistemática se efectúa su representación y resolución. Se cree que algo similar podría suceder en el problema de la evacuación de edificios, se piensa que si se sistematizara la representación de los edificios desde la perspectiva de su evacuación supondría una notable mejora. En el problema de la evacuación de un recinto, sobre la representación de la planta se ha efectuado una clara señalización de las salidas, en principio ha resultado suficiente, sin embargo debería avanzarse en un proceso de sistematización. En el estudio de los circuitos eléctricos actualmente existe una automaticidad en la representación y el estudio, en ellos sabemos que pueden existir resistencias, condensadores, diodos, etc.... se conocen los componentes, las magnitudes los caracterizan y está estandarizada una simbología. Mientras que actualmente en la representación de los edificios para el estudio del problema de la evacuación no se halla definida ningún tipo de metodología, para proceder de una forma similar a la operativa desarrollada en los circuitos eléctricos, en primer lugar se deberían identificar los elementos esenciales del problema, las magnitudes que los caracterizan y adoptar un sistema de representación adecuado para sintetizar toda la información.

Actualmente, incluso en edificios utilizados de forma habitual, en muchos casos no existe un conocimiento inmediato de aspectos básicos que comporta su evacuación: Posibles salidas de planta, recorridos, salidas alternativas, etc.... toda esta información sólo se obtiene si el edificio es perfectamente conocido después de pensar un cierto tiempo, mientras que si no existe esta familiaridad con el edificio es preciso un trabajo más o menos laborioso: buscar puertas, investigar pasillos, etc... o bien como alternativa si se dispone de planos o esquemas se debe proceder a su estudio para identificar las características arquitectónicas relevantes y determinar los factores característicos del problema.

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 faci-

litan 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.

5.1.1 Análisis de las redes estáticas de flujo utilizadas en el problema de la evacuación de edificios

Una red puede definirse como un grafo, de tal forma $G(U,V)$ 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. Una formulación matemática del problema de la evacuación en la cual el edificio se representa mediante un grafo se halla publicada en el trabajo [21] de W. Choi, S. Hamacher y S. Tufekcy. En estas redes de flujo, denominadas “clásicas”, el diseño arquitectónico del edificio se representa mediante un grafo en el cual los nodos j son las dependencias y los arcos son la conexión entre las mismas. 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 el tiempo $\tau(v)$.

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 personas presentes en el edificio, en el momento de iniciarse la evacuación se desplazan desde los nodos origen a través de una serie arcos, desde el centro de las dependencias origen O_j por las dependencias de circulación H_j , P_j , y E_j hasta las dependencias destino DS_j . 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.

Una serie de **magnitudes caracterizan las redes estáticas**, la magnitudes propias de los nodos origen son la **ocupación**, definida por el número k_j de personas presentes en el momento de iniciarse la evacuación, mientras que los nodos de circulación los caracterizan la capacidad de ocupación c_j definida como el **número máximo de personas** que son capaces de albergar. La capacidad c_j de un nodo 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 , estos aspectos han sido analizados en el capítulo 3, en el análisis sobre la ocupación y capacidad de las dependencias. Según la expresión 3.3 resulta

$$c_j = a_{e_j} d_j$$

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 $c_{j-j'}$ depende de la anchura efectiva mínima $w_{j-j'}$, definida según Pauls [116], del recorrido que existe entre las dependencias j y j' y del flujo máximo que se registre en dicho recorrido

$$c_{j-j'} = w_{j-j'} f_{\text{MAX}_{j-j'}} \quad (5.1)$$

El tiempo de circulación $t_{j-j'}$ depende de la distancia y de la velocidad media de circulación $v_{j-j'}$ que se desarrolla en el recorrido desde j hasta j'

$$t_{j-j'} = \frac{l_{j-j'}}{v_{j-j'}} \quad (5.2)$$

Para la **representación** de un edificio mediante una red de flujo, realmente se cree que no se ha no se halla implantada ninguna simbología. G. N. Berlin [4] en sus pioneras redes de flujo utilizó rectángulos, R. L. Francis y T. M. Kisko [87] en el manual del programa EVACNET+ desarrollaron su propia simbología, otros autores han utilizado círculos, octógonos, etc... En la figura 5.1 se presentan algunos símbolos básicos utilizados en la representación de las redes.

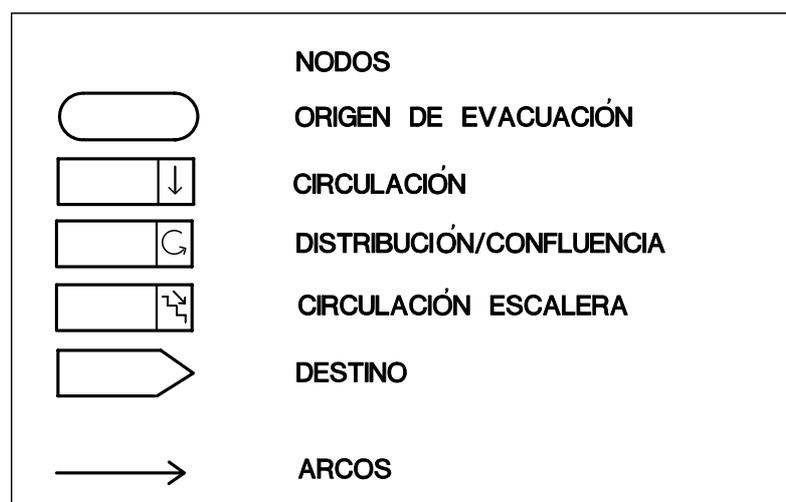


Figura 5.1 Símbolos para la representación de la red

Para representar un edificio mediante una red, se establecen dos fases, en la primera fase se opera directamente sobre el plano de la planta del edificio y en la segunda se procede propiamente a su representación. Sobre un esquema de la planta, 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 se disponen a abandonar el edificio. Seguidamente 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 , se identifican respectivamente como vestíbulos, pasillos o escaleras, genéricamente se utiliza la denominación j y los arcos se designan por el nombre de las dependencias origen y destino $j-j'$. Finalmente se determinan las magnitudes que caracterizan la red: Ocupa-

ción de los nodos origen k_j , anchuras mínimas de paso $w_{j-j'}$ y la longitud de los recorridos de circulación $l_{j-j'}$.

Una aplicación del proceso descrito puede observarse en la figura 5.2. En la primera fase, directamente sobre el plano de la planta del edificio se sitúan los nodos en el centro de las dependencias, los nodos origen designados por O_1, \dots, O_6 , los destinos DS_1, DS_2 y DS_3 y los nodos de circulación H_j, P_j y E_j . Se observa que inicialmente existen seis dependencias ocupadas, otras dependencias sin ocupación: cuatro vestíbulos, dos pasillos y tres escaleras. Posteriormente se trazan los arcos mediante líneas la circulación entre las dependencias. Su designación se efectúa mediante el nombre de los nodos origen y destino separados por un guión. La siguiente operación consistiría en evaluar las magnitudes que caracterizan la red: Superficies disponibles a_j , longitud de recorridos $l_{j-j'}$ y anchuras mínimas de paso $w_{j-j'}$.

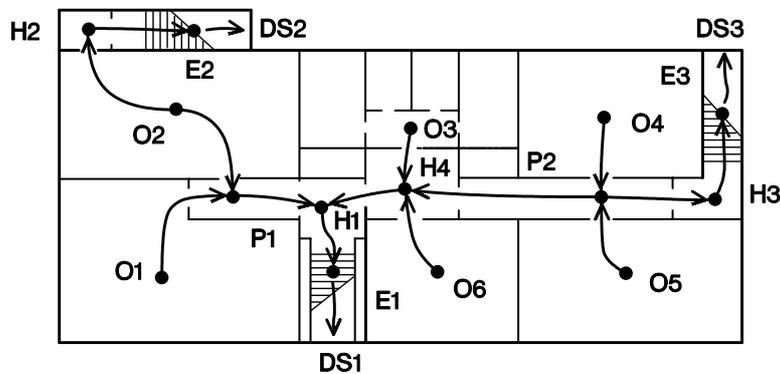


Figura 5.2 Identificación de los elementos de la red sobre planta del edificio

La segunda fase consiste en el trazado del diagrama mediante los símbolos de la figura 5.1, se efectúa el diagrama de flujo de tal forma que la relación entre las dependencias sea lo más simple posible. Se trata de reducir intersecciones y mantener una similitud con la geometría del edificio para facilitar la comprensión del problema y luego proceder a calcular las magnitudes que definen la red: La capacidad de ocupación de los nodos y de circulación de los arcos, los flujos máximos y finalmente proceder a situar en el diagrama las magnitudes que definen la red.

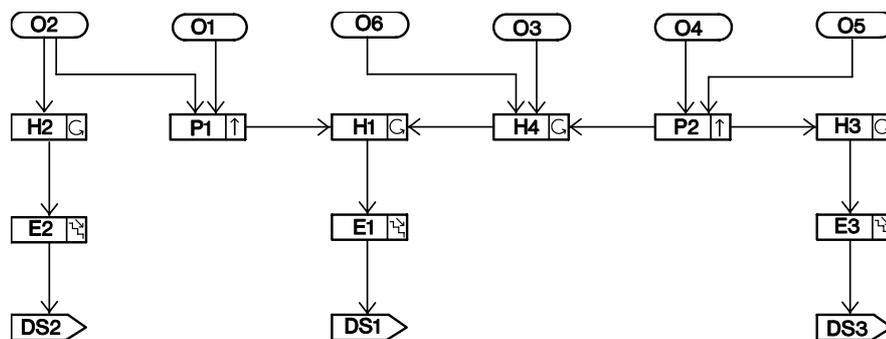


Figura 5.3 Representación del diagrama estático de flujo

En la figura 5.3 puede analizarse la representación mediante una red de flujo de la planta de la figura 5.2. Se observan claramente las dependencias ocupadas, las de circulación y las de destino. En este esquema no se han introducido aspectos cuantitativos de la red, ocupaciones y capacidades de los nodos, tiempos de circulación y capacidades de paso entre nodos. El simple ejercicio de dibujar la red sobre el plano de la planta supone adquirir un conocimiento de las condiciones de evacuación. En edificios de una planta, como en este caso, puede discutirse sobre cual de ellos nos aporta mayor información, la representación inicial sobre la planta inicial o bien la posterior red de flujo.

Cuando se estudian edificios de varias plantas, inevitablemente el diagrama de la red de evacuación puede resultar más complejo, sin embargo tan solo el diagrama de flujo es capaz de ofrecer una visión global del problema. En el siguiente ejemplo, en la figura 5.4 se presenta el diagrama de flujo de un edificio de 5 plantas, pueden identificarse las dependencias que constituyen orígenes de evacuación, las cuatro vías de circulación que conducen a los destinos, las plantas tercera y cuarta disponen de tres escaleras y desde la tercera hasta la planta baja cuatro, finalmente se observa que existen tres destinos de evacuación. En este ejemplo se observa claramente que se trata de un esquema más general, que debe proporcionar una idea clara de la estructura de evacuación de edificio, en estos casos un diagrama estático como el de la figura debe ayudar a establecer y divulgar estrategias de evacuación.

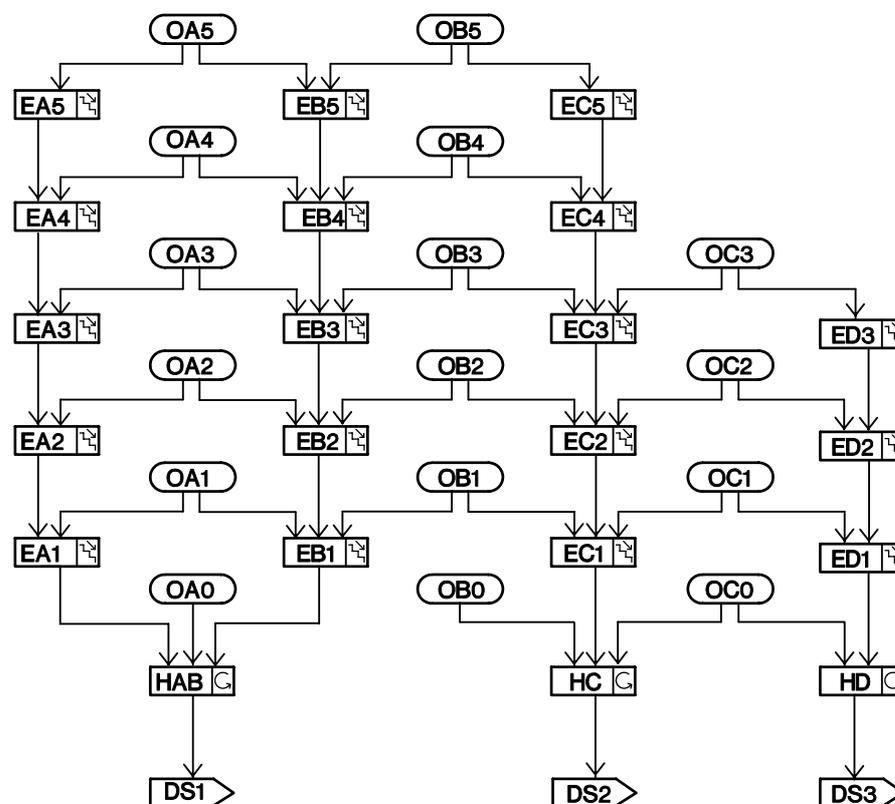


Figura 5.4 Ejemplo del diagrama de flujo edificio de 5 plantas.

5.1.2 Análisis y representación de la evacuación de los edificios mediante redes dinámicas de flujo

El modelo dinámico permite representar el desplazamiento de las personas y la evolución de la ocupación 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, descrito por R. L. Francis y L. Chalmet [35].

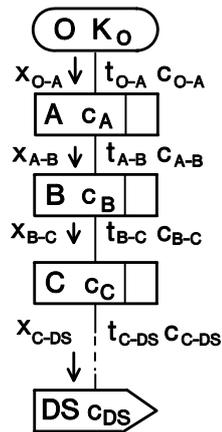


Figura 5.5 Ejemplo de red estática simple

La red dinámica estará formada por h periodos de tiempo, cuyo intervalo es δ . El periodo inicial empieza en el instante 0 y el final termina en el instante T. En general

$$T = \delta * h \tag{5.3}$$

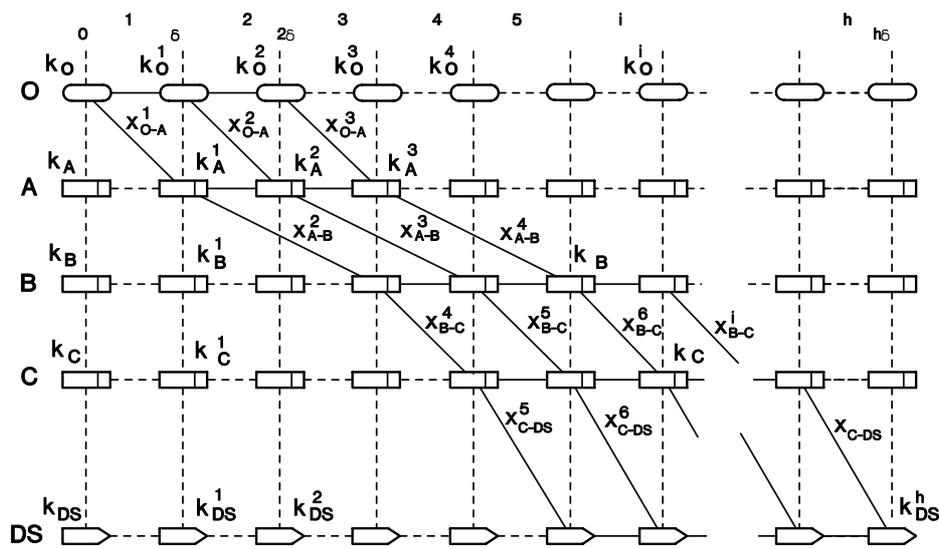


Figura 5.6 Ejemplo de red dinámica

En la figura 5.5 se muestra una red estática de una vía de evacuación para luego proceder a la representación de la red dinámica. La representación física de red dinámica es laboriosa, puede observarse en el ejemplo de la figura 5.6, en este caso la representación se limita a una vía de evacuación formada por varios nodos y considerando pocos

periodos. En edificios reales, con decenas de nodos fácilmente la red puede tener miles de elementos, su representación y estudio manual resultan absolutamente inviables.

Para la representación de un edificio mediante una red dinámica en primer lugar se representa el edificio mediante una red estática, que se transforma en el modelo dinámico en h periodos de tiempo. 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 $0, 1, 2, \dots, h$, 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 representar la salida de la red o bien la ocupación del destino. En dicha red 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 .

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

$$h = \frac{z'}{\delta} \quad (5.4)$$

siendo z' es una estimación del tiempo total de evacuación del edificio y δ es el intervalo de tiempo de un periodo. La dimensión del modelo dinámico será:

$$\frac{z'}{\delta} + 1 \quad (5.5)$$

La dificultad de resolución del problema depende de la dimensión del modelo. En general, esta dificultad será inversamente proporcional a la magnitud del intervalo δ . Sin embargo, mediante un valor de la magnitud δ pequeño se obtiene más precisión en los resultados. Mediante valores de δ grandes, resulta que las capacidades de los arcos y los tiempos de circulación no son valores enteros, resultando imposible la resolución del modelo dinámico, se deben aproximar a los correspondientes valores enteros con los errores inevitables. La solución radica en seleccionar δ de forma adecuada, para obtener un compromiso entre las posibilidades de resolución y el realismo del problema. Una posibilidad teórica muy interesante sería escoger el máximo común divisor del tiempo de los recorridos entre los arcos, ello prácticamente resulta imposible.

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 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 $G_T = (U_T, V_T)$, que es la expansión temporal de la red a partir de la red estática $G = (U, V)$ de la siguiente forma:

$$U_T = \{j_i : j \in U, 0 \leq i \leq T\} \quad (5.6)$$

Donde j_i es la i ésima copia del nodo $j \in U$.

De forma similar el arco V_T viene dado por

$$V_T = \{(j^i, j'^i) : v = (j, j') \in V \cap i' = i + \tau_v \leq T, i = 1, 2, \dots, T\} \cup \{(j^i, j^{i+1}) : j \in U, i = 0, 1, 2, \dots\} \quad (5.7)$$

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. Representan el movimiento de personas de un componente a otro del edificio. Este movimiento empieza en el instante i en el componente j , y termina en el componente j' y en el instante i' .

Asociado a cada arco de retención (j^i, j^{i+1}) existe una capacidad constante que representa el límite de capacidad c_j de este nodo j . De igual forma, asociado a cada arco de movimiento (j^i, j'^i) tenemos una **capacidad** $c_{j-j'}$ que representa el número máximo de personas que pueden cruzar este arco en un determinado intervalo de tiempo. La capacidad de los nodos de circulación y destino c_j se supone constante $\forall i$. Las principales características de los arcos son las capacidades de paso $c_{j-j'}$ o flujo máximo entre dos dependencias contiguas y el tiempo de circulación $t_{j-j'}$. Dichas magnitudes se adaptan a los intervalos de tiempo δ o periodos.

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

$$x_{j-j'}^i \leq c_{j-j'}$$

De forma similar a la capacidad de circulación, **el tiempo de tránsito** será:

$$\tau_{j-j'} = \frac{t_{j-j'}}{\delta} \quad (5.8)$$

la magnitud de $\tau_{j-j'}$ corresponde a periodos de tiempo.

5.2 DEFINICIÓN DE UN MODELO DE RED PARA EL ESTUDIO DEL PROBLEMA

En los apartados anteriores se ha podido apreciar el potencial de las redes de flujo en el estudio y solución del problema, sin embargo después de su utilización se han apreciado una serie de problemas y aspectos susceptibles de mejora. En primer lugar se ha observado que situar los **nodos en el centro de las dependencias**, de la forma que plantean los modelos clásicos, según se ha detallado en apartados anteriores, aunque parezca la actuación más natural en muchos casos comporta un conocimiento poco preciso de la situación de las personas en la red. Se ha observado que pequeños cambios conducen a una situación mucho más favorable. Por ejemplo, supone una notable mejora situar los nodos en la ubicación que se estime más idónea para cumplir los objetivos que se hayan establecido en la modelización. Si se sitúan los nodos en el centro de las dependencias, cuando los ocupantes de un recinto inician la evacuación, las personas que ocupaban un nodo origen j se desplazan por un arco hacia un nodo destino j' , la primera duda que se genera está en la asignación de la ubicación de las personas que se están desplazando entre dos nodos, únicamente se sabe que existe un conjunto de personas desplazándose entre las dos dependencias, pero no se sabe de forma precisa si están en el nodo origen j o en el destino j' . La ambigüedad permanece y se incrementa cuanto más basta sea la representación, o mayor sea la magnitud del intervalo δ .

También ligado al mismo problema de conocer la posición de las personas, la ubicación de los nodos en el centro de las dependencias, conduce a una **definición poco precisa de las retenciones**. Físicamente es posible pronosticar que las retenciones se situarán justamente en los puntos de menor anchura en los recorridos de los arcos, esta ubicación no se corresponde necesariamente con el centro de las dependencias.

Las redes de flujo clásicas utilizadas en el estudio de la evacuación de edificios, suponen la **capacidad de los nodos constante**, existen fenómenos externos que físicamente pueden producir cambios en la capacidad de los nodos, así sucede en cualquier modelado de fenómenos físicos como incendios, en los cuales se puede ver notablemente reducida la superficie de los recintos, en esta tesis no se estudia esta posibilidad.

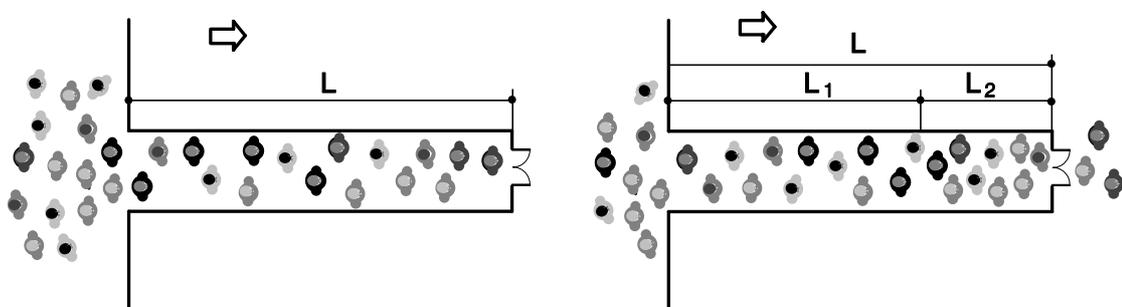


Figura 5.7 Efecto pasillo

De forma similar al caso anterior, a consecuencia de las retenciones pueden considerarse **cambios en las condiciones de los flujos de circulación**, este aspecto puede anali-

zarse en la figura 5.7, en la cual se observa como los ocupantes situados en una dependencia origen se dirigen hacia un pasillo. Si la anchura de la salida del pasillo es menor que la de entrada, al final del mismo se producirán retenciones y puede observarse como en el recorrido existe un tramo de circulación normal y al final del pasillo se produce una retención, produciéndose una mayor densidad de ocupación en el tramo final esto justifica la conveniencia de considerar dos tramos de circulación en el pasillo.

Para abordar estos problemas, se propone efectuar una serie de cambios en la red de flujo convencional. En primer lugar se propone una **ubicación flexible de los nodos**, situar los nodos en el centro de las dependencias en muchos casos no es la condición más favorable para la modelización del problema. Por ejemplo en los pasillos, puede resultar mejor situar los nodos al inicio y al final o en puntos singulares de los mismos. En pequeños recintos puede resultar favorable situar los nodos a la salida de los mismos, mientras que en recintos grandes lo más adecuado puede ser situar un nodo en el centro de la dependencia y en otros casos directamente en cada una de las salidas. Como aspecto desfavorable que supone realizar este cambio, debe indicarse que puede suponer un ligero incremento de dimensión del modelo.

De la misma forma, para poder contemplar en el modelo determinados aspectos de comportamiento se propone **modelar las incorporaciones a la red**, según se ha analizado en la solución estacionaria del problema desarrollada en el capítulo 3. La obtención de la función $q(t)$ indica el número de personas en posición inmediata a una salida para iniciar la evacuación, en el modelo dinámico dicha función adopta la forma q_j^i , indicando el número de personas en disposición de abandonar la dependencia j en el instante i . De igual forma se propone realizar un análisis dinámico **de las confluencias y de las ramificaciones**, ello debe permitir modelar aspectos de comportamiento simples que se producen en una confluencia o bien cuando los ocupantes tienen la opción de escoger entre dos vías de evacuación.

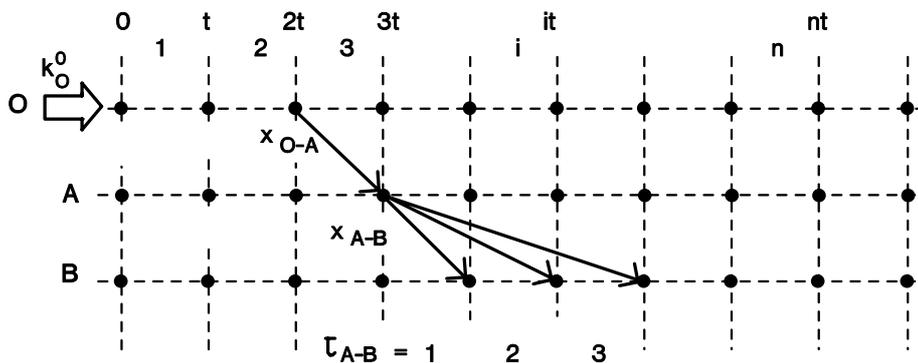


Figura 5.8 Tiempos de circulación variables en la red dinámica

Otra consideración son los **tiempos de circulación variables**. Operar con tiempos de circulación constantes simplifica la resolución del problema, pero diversas causas pueden producir un tiempo de circulación variable: La densidad de ocupación en el recorrido y la retención que puede producirse en el acceso al nodo destino, tal como se ha ob-

servado en la figura 5.7. En general se expresa como $\tau_{j-j'}^i$, el tiempo necesario para desplazarse del nodo j hasta el j' en el instante i . En la figura 5.8 se observa que inicialmente el tiempo de circulación es de un solo periodo, y como consecuencia de la retención puede suponer un tiempo de circulación de dos y finalmente de tres periodos.

Con estos cuatro cambios, se logra una representación más precisa. Un pasillo de un edificio se representa mediante un arco y un nodo, de esta forma no ofrece ambigüedad alguna sobre sus parámetros. En el arco se contemplan las personas que están circulando desde que han abandonado la dependencia origen hasta que llegan al destino y el nodo se ubican las personas que esperan para dirigirse a la siguiente dependencia. Así al crecer la ocupación del nodo, se permite modelar recorridos de flujo variable.

5.2.1 Proceso de representación de un edificio

Para representar un edificio mediante una red de flujo con los cambios propuestos, el proceso es similar al descrito en el apartado 5.1.1 en el cual se efectuaba la representación con una red de flujo clásica, en la cual se han incorporado algunos otros símbolos como los nodos de confluencia, ciertos detalles en los nodos de circulación, ascensores y escaleras mecánicas. Todo ello está resumido en la figura 5.9.

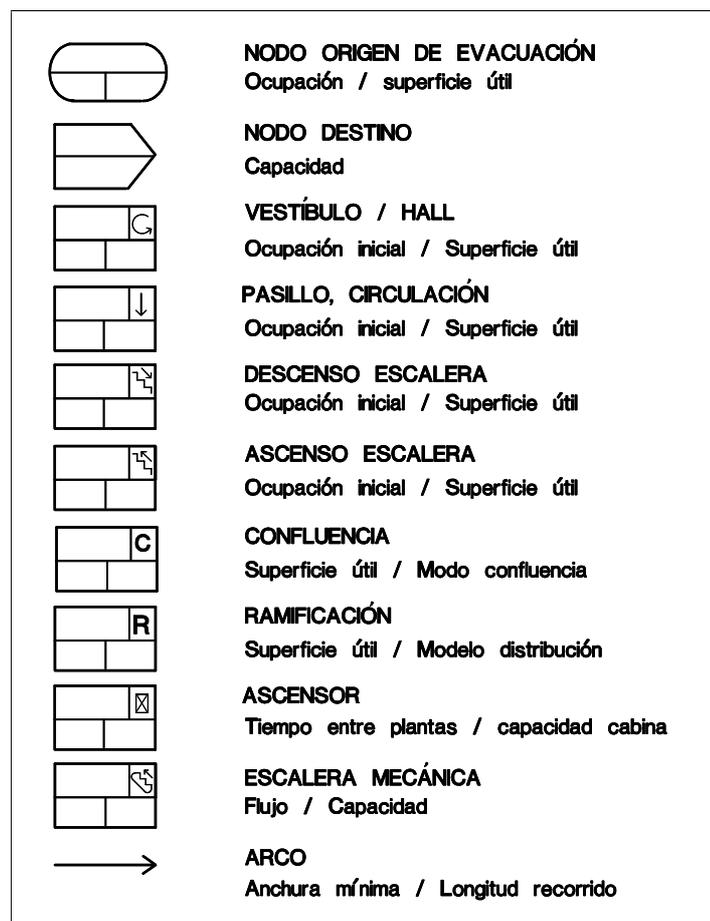


Figura 5.9 Símbolos para la representación de la red

Para representar un edificio mediante esta red en primer lugar resulta oportuno efectuar una serie de operaciones sobre el plano de la planta del edificio y posteriormente proceder al trazado del diagrama estático. Se efectúan las siguientes operaciones:

Primer paso: Se identifican los nodos origen, y en dichas dependencias, inicialmente ocupadas, se sitúan todas las salidas determinando los nodos O_j .

Segundo paso: Según las características del problema, se decide si es preciso modelar las incorporaciones a la red desde cada nodo origen, para posteriormente obtener las funciones $q_{j-j'}(t)$.

Tercer paso: Se identifican los nodos intermedios, ramificaciones y confluencias. Normalmente se designan por H_j , P_j , E_j , letras iniciales de hall, pasillo y escalera. Excepcionalmente en ellos puede existir una ocupación inicial.

Cuarto paso: Se identifican los nodos destino DS_j . Posición a la cual se dirigen las personas que abandonan el recinto.

Quinto paso: Se trazan los arcos que unen los nodos $j-j'$ y se determinan las magnitudes que definen la circulación en la red: Ocupación de los nodos origen k_j , anchuras mínimas de paso $w_{j-j'}$, longitud de los recorridos de circulación $l_{j-j'}$.

Sexto paso: Mediante los símbolos correspondientes a la figura 5.9, se confecciona el diagrama de flujo estático.

Séptimo paso: Se calculan las magnitudes que definen la red: Funciones de evacuación, capacidad de ocupación de los nodos y de circulación de los arcos: Tiempo y flujos máximos y se sitúan en el diagrama.

Octavo paso: Expandiendo la red estática de la misma forma que se ha descrito en el apartado 5.1.2 se obtendría la red dinámica. Normalmente las representaciones son invariables.

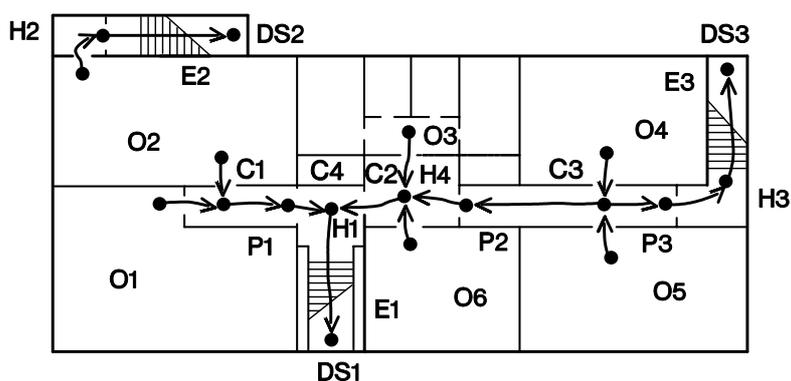


Figura 5.10 Trazado de una red mejorada sobre la planta de un edificio

En la misma planta del edificio de la figura 5.2, utilizada para describir la denominada red de flujo clásica, se efectúa la representación de la red de flujo incorporando los cambios propuestos. El proceso se inicia en la figura 5.10, en ella pueden observarse las operaciones realizadas sobre la planta del edificio. Se representan las dependencias ocupadas: O_1 ,

O_2 , O_3 , O_5 y O_6 . En la dependencia O_2 será conveniente modelar las incorporaciones a la red, para ello será necesario obtener las funciones $q_{O_2-P_1}(t)$ y $q_{O_2-H_2}(t)$. Si la densidad de ocupación del recinto es uniforme se observa que en los periodos iniciales la función $q_{O_2-P_1}(t)$ es el doble que $q_{O_2-H_2}(t)$, sencillamente por el barrido de superficies que corresponde en el entorno de cada una de las salidas. Pueden observarse los círculos representados en la dependencia O_2 .

Mediante esta forma de modelar la red, en cualquier instante se puede conocer la ubicación de los ocupantes, se puede saber el número de personas que se encuentran en cada dependencia origen, en un pasillo desplazándose o bien en espera. Se observa que existen tres confluencias C_1 , C_2 , C_4 , mientras que C_3 efectúa simultáneamente las funciones de confluencia y ramificación. En C_1 resulta la confluencia de los ocupantes de los nodos origen O_1 y de O_2 . En C_2 existe una triple confluencia, los ocupantes procedentes de P_2 , pasillo de circulación, y de las dependencias origen O_3 y O_6 . En C_4 se produce la confluencia de la circulación del pasillo P_1 y del hall H_4 . En C_3 se produce la confluencia las dependencias origen O_4 y O_5 y simultáneamente existe una bifurcación, los ocupantes pueden dirigirse al pasillo P_3 o bien el P_2 .

Analizando el posible desarrollo de la evacuación, es previsible que en P_1 , H_1 , H_4 y P_4 se produzcan retenciones, de la forma que se ha definido la red será posible evaluar de forma precisa las mismas. En la figura 5.11 puede observarse el trazado de la red.

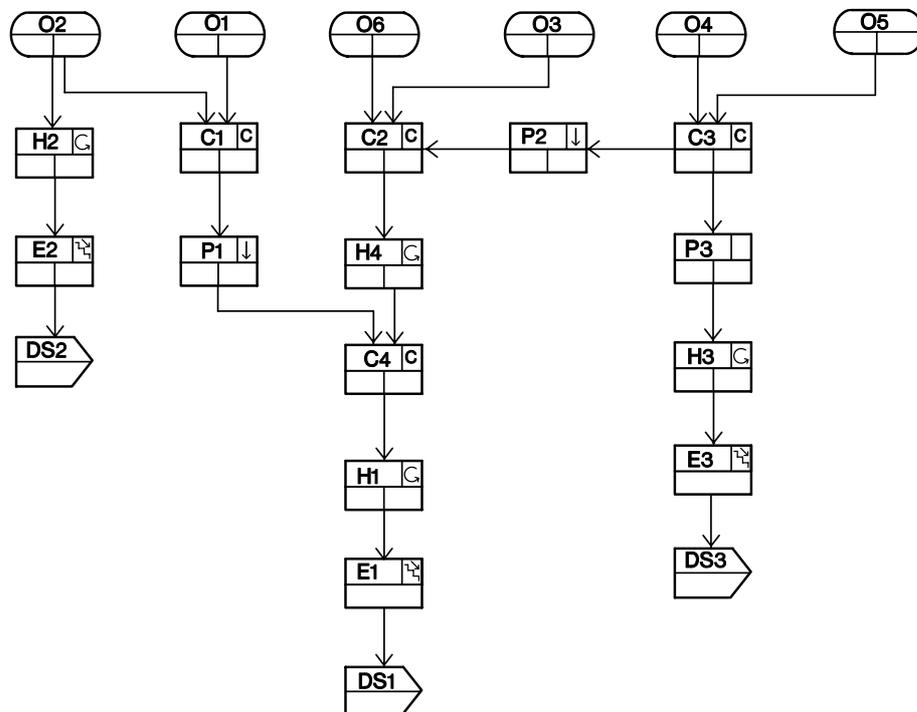


Figura 5.11 Ejemplo de representación de una red estática mejorada

El punto de partida para el trazado de la red dinámica sería la red estática de la figura 5.11, pero incluso en este caso, realmente simple, la representación de la red dinámica sería muy laboriosa y compleja.

5.2.2 Estudio de las magnitudes características de la red

En este apartado se realiza la ardua tarea de establecer la relación matemática entre las magnitudes que definen la red, después de unas definiciones genéricas se analizan los nodos origen, los nodos destino y finalmente los nodos de circulación.

Elementos básicos de la red son los periodos i y los instantes t^i . El periodo i indica el intervalo de tiempo comprendido entre los instantes t^i y t^{i+1} . Entonces t^i y t^{i+1} corresponden respectivamente, a los instantes inicial y final del periodo i , cuya magnitud viene dada por δ , normalmente medido en segundos

$$\delta = t^{i+1} - t^i \quad (5.9)$$

Mediante k_j se indica el valor de la **ocupación de la dependencia** j , para definir esta ocupación en el tiempo se denomina k_j^i a la ocupación de la dependencia j al final del periodo i . Los nodos origen de evacuación tienen una ocupación inicial, definida como k_j^0 .

Para modelar las salidas de cada una de las dependencias y modelar de forma precisa las **incorporaciones a la red**, según el modelo ya definido en el capítulo 3 puede utilizarse la función q_j^i , que indica el número de personas en disposición de abandonar la dependencia j durante el periodo i , si el recinto dispone de varias salidas; se define $q_{j-j'}^i$ como el número de personas preparadas para abandonar el recinto j y dirigirse al j' durante el periodo i .

Mediante c_j se expresa la **capacidad de la dependencia** j . Si se pretendiera contemplar la evolución de fenómenos que afectaran la capacidad de un recinto, entonces c_j^i que representa la evolución de la capacidad de la dependencia, expresa la capacidad de la dependencia j en el instante final del periodo i . De forma similar, **la capacidad de circulación de un arco** vendrá dada por $c_{j-j'}$, indicando el número máximo de personas que pueden desplazarse por el arco $j-j'$ en un periodo. Si en futuros modelos se contemplan situaciones como la expansión de humos u otros efectos cuyas características provoquen una variación de la capacidad de circulación de los arcos, ésta puede expresarse como $c_{j-j'}^i$, indicando la capacidad de desplazamiento desde el nodo j hasta el j' durante el periodo i .

La magnitud $\tau_{j-j'}$ indica **el tiempo de desplazamiento** desde el nodo j hasta el j' expresado en periodos, al considerar tiempos de circulación variables, resulta $\tau_{j-j'}^i$ que indica el número de periodos necesarios para el desplazamiento cuando se parte de j hasta j' en el instante i .

Sea $x_{j-j'}$ el **número de personas** que se desplazan desde j hasta j' , de la misma forma que en casos anteriores, $x_{j-j'}^i$ es el número de personas que se han desplazado entre ambas dependencias durante el periodo i , mediante (5.10) se determina el número total de personas que han realizado dicho desplazamiento

$$x_{j-j'} = \sum_{\forall i} x_{j-j'}^i \tag{5.10}$$

En cualquier caso y en cualquier periodo necesariamente deben respetarse las condiciones de capacidad

$$x_{j-j'}^i \leq c_{j-j'}^i$$

En la figura 5.12 puede observarse una red dinámica en la que se representan las principales magnitudes que la caracterizan y que han sido definidas en párrafos anteriores.

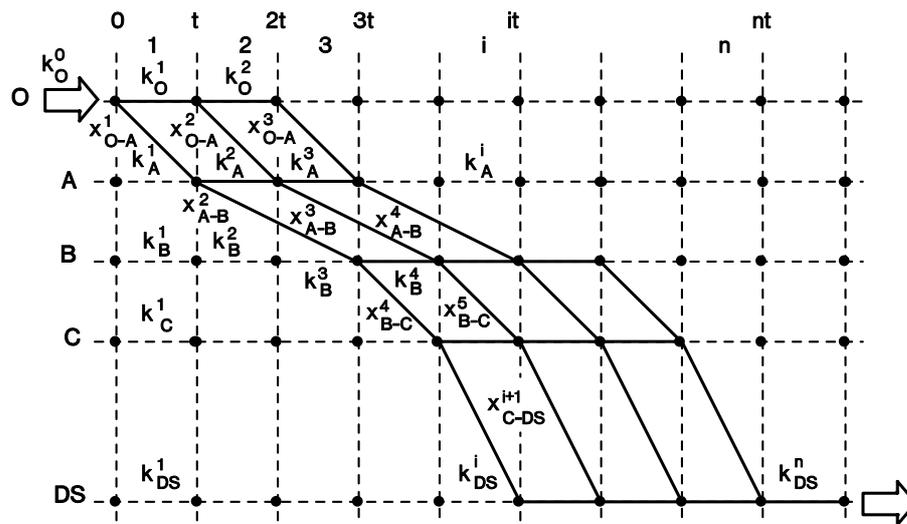


Figura 5.12 Red dinámica de una vía de circulación

Los **nodos origen de evacuación** se caracterizan por tener una ocupación inicial k_j^0 desde la cual las personas presentes se incorporan a la red según diferentes modelos de comportamiento. En principio se pueden producir demoras en el inicio de la evacuación de t_0 segundos o bien de τ_0 periodos, pero además es posible modelar las incorporaciones a la red según las funciones $q(t)$ o $q(i)$ que indican el número de personas en posición inmediata a una determinada salida en función del tiempo t o bien del periodo τ

$$\tau_0 = \frac{t_0}{\delta} \tag{5.11}$$

En general $q_{j-j'}^i$ expresa el número de personas en condiciones de abandonar la dependencia j que se dirigen a j' en el instante i . Si en el periodo inicial, en los nodos origen se considera que no existen demoras en el inicio de la evacuación y no se producen demoras en la incorporación a la red

$$q_{j-j'}^0 = k_{j-j'}^0 \tag{5.12}$$

De la misma forma, si es posible considerar que en cualquier periodo i , los ocupantes de la dependencia j que se dirigen a j' están ubicados en posición inmediata a la salida

$$k_{j-j'}^i = q_{j-j'}^i \quad \forall i \quad (5.13)$$

Las demoras o retrasos en el inicio de la evacuación pueden expresarse como

$$q_{j-j'}^i = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ q_{j-j'}^i & t \geq t_0 \end{cases} \quad (5.14)$$

Cuando una dependencia j tiene una única salida hacia j' , la ocupación de la misma al final del periodo i , es igual a la ocupación que existe al final del periodo inmediatamente anterior $i-1$, menos las personas que han abandonado el recinto en dicho intervalo de tiempo correspondiente del periodo i . Según la expresión (5.15) tenemos

$$k_j^i = k_j^{i-1} - x_{j-j'}^i \quad (5.15)$$

Si en el recinto hubiera varias salidas, deberían contabilizarse las salidas en todas ellas

$$k_j^i = k_j^{i-1} - \sum_{\forall j^*} x_{j-j^*}^i \quad (5.16)$$

La ocupación de todas las dependencias del sistema de evacuación pueden analizarse mediante la matriz de ocupación, que expresa el número de personas que ocupan cada dependencia al final de cada periodo. En dicha matriz O_j corresponde a dependencias origen de evacuación, H_j corresponden a nodos intermedios y DS_j corresponden a nodos destino.

	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

Las magnitudes que caracterizan **los arcos** $j-j'$ son **la capacidad** $c_{j-j'}$ y el **tiempo de circulación** $\tau_{j-j'}$ en cualquier periodo i . Si se concretan para cada periodo i resultan $c_{j-j'}^i$ y $\tau_{j-j'}^i$. Para su evaluación es preciso estimar la densidad de ocupación inicial $d_{j-j'}^0$, que se va a producir en el recorrido de salida desde la dependencia j hacia la j' , dicha densidad permitirá determinar la velocidad de circulación $v_{j-j'}^0$ y el flujo $f_{j-j'}^0$ que se produce en el recorrido $j-j'$ en el periodo inicial. En general $v_{j-j'}^i$ es la velocidad media de circulación de las personas que se desplazan desde la posición j hasta la j' en el periodo i , de igual forma $f_{j-j'}^i$

es la magnitud del flujo específico medio que se produce en desplazamiento desde el nodo j hasta j' en el periodo i .

La **capacidad de circulación** $c_{j-j'}$ depende del flujo máximo que físicamente puede registrarse y de la anchura mínima de paso $w_{j-j'}$ entre las posiciones j y j' . El **número de personas** $x_{j-j'}$ que se desplazan desde j hasta j' en un periodo i , depende del flujo instantáneo que se registra en el recorrido entre las dependencias j y j' y depende de la magnitud del flujo específico que se establezca en dicho periodo $f_{j-j'}^i$ y de la anchura mínima de paso $w_{j-j'}$. A su vez puede decirse que el flujo específico $f_{j-j'}^i$ depende directamente de la densidad de ocupación d_j^i que existe en j en el periodo i . Mediante (5.17) se expresa que el flujo de circulación en un arco depende de la densidad de ocupación que se establezca en el nodo origen

$$f_{j-j'}^i = f(d_j^{i-1}) \quad (5.17)$$

De la misma forma el flujo que se registra entre j y j' en el periodo i será

$$F_{j-j'}^i = f_{j-j'}^i w_{j-j'} \quad (5.18)$$

Una vez se conoce la magnitud de los flujos, el número de personas $x_{j-j'}^i$ que se podrán desplazar desde j hasta j' en el periodo i será función del tiempo δ

$$x_{j-j'}^i = (F_{j-j'}^i) \delta \quad (5.19)$$

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.

	$O_1 - H_1$	$O_2 - P_2$	...	$O_j - X_j$	...	$X_{j-j'}$	...	$X_j - DS_j$	...	$X_j - DS_n$
1	$X_{O_1-H_1}^1$	$X_{O_2-P_2}^1$	...	$X_{O_j-X_j}^1$	...	$X_{j-j'}^1$	...	$X_{j-DS_j}^1$	...	$X_{j-DS_n}^1$
2	$X_{O_1-H_1}^2$	$X_{O_2-P_2}^2$	...	$X_{O_j-X_j}^2$	...	$X_{j-j'}^2$	...	$X_{j-DS_j}^2$	...	$X_{j-DS_n}^2$
3	$X_{O_1-H_1}^3$	$X_{O_2-P_2}^3$	...	$X_{O_j-X_j}^3$	...	$X_{j-j'}^3$	...	$X_{j-DS_j}^3$	...	$X_{j-DS_n}^3$
...
...
i	$X_{O_1-H_1}^i$	$X_{O_2-P_2}^i$	...	$X_{O_j-X_j}^i$	...	$X_{j-j'}^i$	...	$X_{j-DS_j}^i$	...	$X_{j-DS_n}^i$
...
n	$X_{O_1-H_1}^n$	$X_{O_2-P_2}^n$	...	$X_{O_j-X_j}^n$	...	$X_{j-j'}^n$	...	$X_{j-DS_j}^n$	...	$X_{j-DS_n}^n$

El tiempo de circulación entre las posiciones j y j' , en el instante i , será función de la distancia $l_{j-j'}$ que existe entre j y j' y de la velocidad media de circulación $v_{j-j'}^i$ que se registra en dicho periodo i y ésta a su vez es función de la densidad de ocupación con la que se origina la evacuación

$$v_{j-j'}^i = v(d_j^{i-1}) \quad (5.20)$$

A partir de la expresión 3.11 que proporciona el tiempo de recorrido, resulta que el número de periodos necesarios para desplazarse de j a j' en el periodo i será:

$$\tau_{j-j'}^i = \frac{t_{j-j'}^i}{\delta} \quad (5.21)$$

La matriz de tiempos de circulación es una matriz en la cual en cada una de la celdas se hallan los valores correspondientes al tiempo de circulación $\tau_{j-j'}^1$ expresado en periodos para todos los arcos que definen el sistema de evacuación.

	$O_1 - H_1$	$O_2 - P_2$	...	$O_j - X_j$	...	$X_{j-j'}$	...	$X_j - DS_j$	...	$X_j - DS_n$
1	$\tau_{O_1-H_1}^1$	$\tau_{O_2-P_2}^1$	...	$\tau_{O_j-X_j}^1$	...	$\tau_{j-j'}^1$	...	$\tau_{j-DS_j}^1$	...	$\tau_{j-DS_n}^1$
2	$\tau_{O_1-H_1}^2$	$\tau_{O_2-P_2}^2$	...	$\tau_{O_j-X_j}^2$	...	$\tau_{j-j'}^2$	...	$\tau_{j-DS_j}^2$	...	$\tau_{j-DS_n}^2$
3	$\tau_{O_1-H_1}^3$	$\tau_{O_2-P_2}^3$	...	$\tau_{O_j-X_j}^3$	...	$\tau_{j-j'}^3$	...	$\tau_{j-DS_j}^3$	...	$\tau_{j-DS_n}^3$
...
...
i	$\tau_{O_1-H_1}^i$	$\tau_{O_2-P_2}^i$	...	$\tau_{O_j-X_j}^i$	...	$\tau_{j-j'}^i$	...	$\tau_{j-DS_j}^i$	...	$\tau_{j-DS_n}^i$
...
n	$\tau_{O_1-H_1}^n$	$\tau_{O_2-P_2}^n$	...	$\tau_{O_j-X_j}^n$	...	$\tau_{j-j'}^n$	...	$\tau_{j-DS_j}^n$	...	$\tau_{j-DS_n}^n$

Los **nodos destino** solamente están afectados por llegadas, si en el recorrido desde j hasta j' se tardan $\tau_{j-j'}^i$ periodos, y $x_{j-j'}$ personas han abandonado la dependencia j en el periodo i se producirá la llegada al destino j' en el periodo $(i + \tau_{j-j'}^i)$. Para determinar las llegadas hasta el destino cuando solamente se dispone de un solo arco de llegada tenemos la expresión (5.22), en ella se utiliza la variable q para indicar personas estáticas ubicadas en un destino, siendo i^* el intervalo comprendido entre $i - \tau_{j-j'}^i$, e i el valor actual.

$$q_{j-j'}^i = q_{j-j'}^{i-1} + x_{j-j'}^{i^*} \quad (5.22)$$

Para determinar el número total de personas debe considerarse que en el nodo destino habrá un grupo de personas que ya han llegado y están aposentadas y otras que están circulando dirigiéndose hasta esta posición. Resulta

$$k_{j-j'}^i = q_{j-j'}^i + \sum_{\forall i^*} x_{j-j'}^{i^*} \quad (5.23)$$

El término $\sum_{\forall i^*} x_{j-j'}^{i^*}$ indica la totalidad de personas que se están dirigiendo hacia el destino desde cualquier dependencia j y la han abandonado en el intervalo comprendido entre i y

(i- τ). Si en un nodo destino se producen llegadas desde diferentes dependencias, obviamente deben contabilizarse todas ellas

$$q_{j-j'}^i = q_{j-j'}^{i-1} + \sum_{\forall j} x_{j-j'}^{i*} \quad (5.24)$$

En este caso, de forma similar a la expresión anterior resulta

$$k_{j-j'}^i = q_{j-j'}^i + \sum_{\forall i^*, \forall j} x_{j-j'}^{i*} \quad (5.25)$$

expresión según la cual se contabilizan las llegadas que se producen desde diferentes dependencias que emanan en diferentes periodos

En el estudio de los **nodos de circulación**, la ocupación del nodo j al final del periodo i será igual a la ocupación que existe al final del periodo inmediatamente anterior, el periodo $i-1$, más las personas que se han incorporado al recinto, menos las personas que lo han abandonado en el periodo i . Resultando la expresión:

$$q_j^i = q_j^{i-1} + x_{j-j}^{i-\tau} - x_{j-j}^i \quad (5.26)$$

Para conocer la ocupación de la dependencia debería recurrirse a la expresión (5.27), en la cual se contabilizan los ocupantes asentados en la dependencia, las incorporaciones originadas en diferentes periodos y las salidas que se han producido.

$$k_j^i = q_j^i + \sum_{\forall i^*} x_{j-j}^{i*} \quad (5.27)$$

La matriz de retenciones es una matriz en la cual en cada una de las celdas se hallan los valores del número de personas $q_{j-j'}^i$ en una dependencia j , en situación inmediata a una salida dispuestas para dirigirse a un determinado destino j' en el periodo i

0	q_{O1-H1}^1	q_{O2-P2}^1	...	q_{Oj-xj}^1	...	q_{j-j}^1	...	q_{j-DSj}^1	...	q_{j-DSn}^1
1	q_{O1-H1}^1	q_{O2-P2}^1	...	q_{Oj-xj}^1	...	q_{j-j}^1	...	q_{j-DSj}^1	...	q_{j-DSn}^1
2	q_{O1-H1}^2	q_{O2-P2}^2	...	q_{Oj-xj}^2	...	q_{j-j}^2	...	q_{j-DSj}^2	...	q_{j-DSn}^2
3	q_{O1-H1}^3	q_{O2-P2}^3	...	q_{Oj-xj}^3	...	q_{j-j}^3	...	q_{j-DSj}^3	...	q_{j-DSn}^3
...
...
i	q_{O1-H1}^i	q_{O2-P2}^i	...	q_{Oj-xj}^i	...	q_{j-j}^i	...	q_{j-DSj}^i	...	q_{j-DSn}^i
...
n	q_{O1-H1}^n	q_{O2-P2}^n	...	q_{Oj-xj}^n	...	q_{j-j}^n	...	q_{j-DSj}^n	...	q_{j-DSn}^n

En general cuando las llegadas se producen desde diferentes nodos origen y la circulación a diferentes nodos destino resulta

$$q_j^i = q_j^{i-1} + \sum_{\forall j'} x_{j-j'}^{i-\tau} - \sum_{\forall j'} x_{j'-j}^i \quad (5.28)$$

Finalmente para contabilizar la ocupación, además de todos los orígenes, deben considerarse todos los periodos

$$k_j^i = q_j^i + \sum_{\forall j'} \sum_{\forall i^*} x_{j-j'}^{i^*} \quad (5.29)$$

5.3 ANÁLISIS DINÁMICO DE LAS ESTRUCTURAS QUE FORMAN LOS ELEMENTOS DE 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. Estos elementos permiten configurar el sistema en un entorno dinámico y analizar el proceso de evacuación que se desarrolla en el mismo.

Tal como se ha analizado en el capítulo 3, una vía de circulación simple es como un conjunto de n dependencias, necesariamente ($n \geq 3$), situadas sucesivamente desde un nodo origen hasta un destino unidas mediante $n-1$ arcos. La estructura mínima será la formada por un nodo origen, un nodo de circulación y un nodo destino unidas mediante dos 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. El análisis dinámico de estos elementos facilita un análisis más preciso del problema que el realizado en el capítulo 3, en el cual la solución adoptada se realizaba desde una red estática, esta solución general resultaba poco precisa e indefinida cuando se contemplan flujos transitorios.

5.3.1 Análisis de una vía de circulación

Se considera una vía de circulación simple, formada por un nodo origen O ocupado por k_O personas en disposición de abandonar el recinto, un nodo de circulación A con una capacidad c_A y un nodo destino DS con capacidad c_{DS} suficiente para albergar la totalidad de los ocupantes, dos arcos que unen el nodo origen con el de circulación y éste con el destino con capacidades de circulación c_{O-A} y c_{A-DS} respectivamente y tiempos de circulación τ_{O-A} y τ_{A-DS} variables. El recinto descrito puede observarse en la figura 5.13 y la correspondiente red estática en la figura 5.14.

El primer objetivo es el trazado de la red dinámica, y dadas las características del recinto se supone que en el nodo origen O , los ocupantes se hallan situados justamente en la puerta de salida, de la misma forma el nodo de circulación se supone al final del pasillo de forma que la capacidad c_A de dicho nodo A vendrá determinada por la superficie útil del pasillo y el nodo destino DS será un espacio exterior seguro con capacidad c_{DS} .

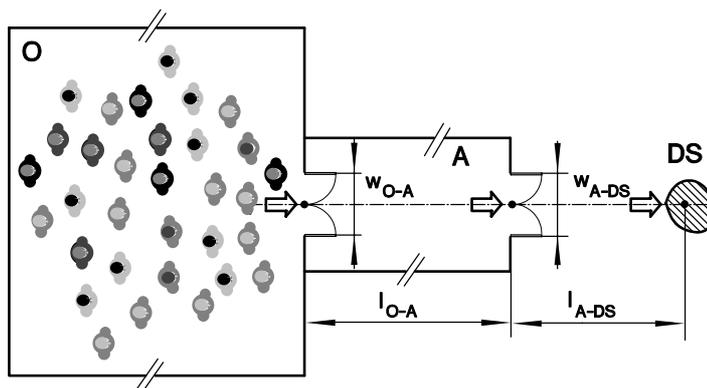


Figura 5.13 Análisis de una vía de circulación

La capacidad de los arcos c_{O-A} y c_{A-DS} vendrá determinada por la anchura de paso de las puertas que comunican O-A y A-DS y los flujos de circulación respectivos y los tiempos de circulación τ_{O-A} y τ_{A-DS} por la longitud de los recorridos y las velocidades v_{O-A} y v_{A-DS} .

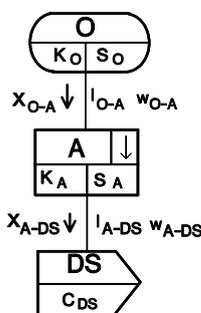


Figura 5.14 Red estática de una vía de circulación

En esta situación puede observarse, como el hecho de haber situado el nodo A al final del pasillo, la ocupación de A queda perfectamente definida en cualquier instante, serían las personas que se halla en espera para abandonar el propio recinto A y las personas que se hallan circulando en el arco O-A. Puede observarse, que si se hubieran situado los nodos en el centro de las dependencias la situación resultaría mucho más ambigua. El siguiente paso de este proceso de análisis corresponde a la representación dinámica de la vía, se trata de un esquema como el presentado en el la figura 5.15 cuyas variables corresponden a la denominación utilizada en apartados anteriores: k^i magnitud de las ocupaciones y x^i flujos en los respectivos periodos i .

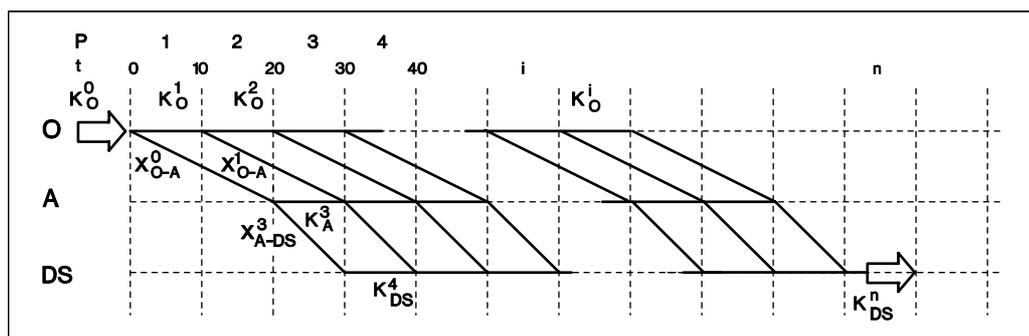


Figura 5.15 Red dinámica de una vía de circulación

Para analizar este proceso se efectúa un **análisis microscópico de la evacuación de un pasillo**, puede observarse en la figura 5.16. En este caso se fijan unas condiciones para la existencia de **retenciones** y además que resulte significativa en el proceso **la capacidad del pasillo**, las capacidades de paso de los arcos O-A y A-DS serán c_{O-A} y c_{A-DS} y para estudiar el efecto de la retención se supone que la capacidad de salida del pasillo hacia DS es inferior a la de entrada desde el origen O hasta A.

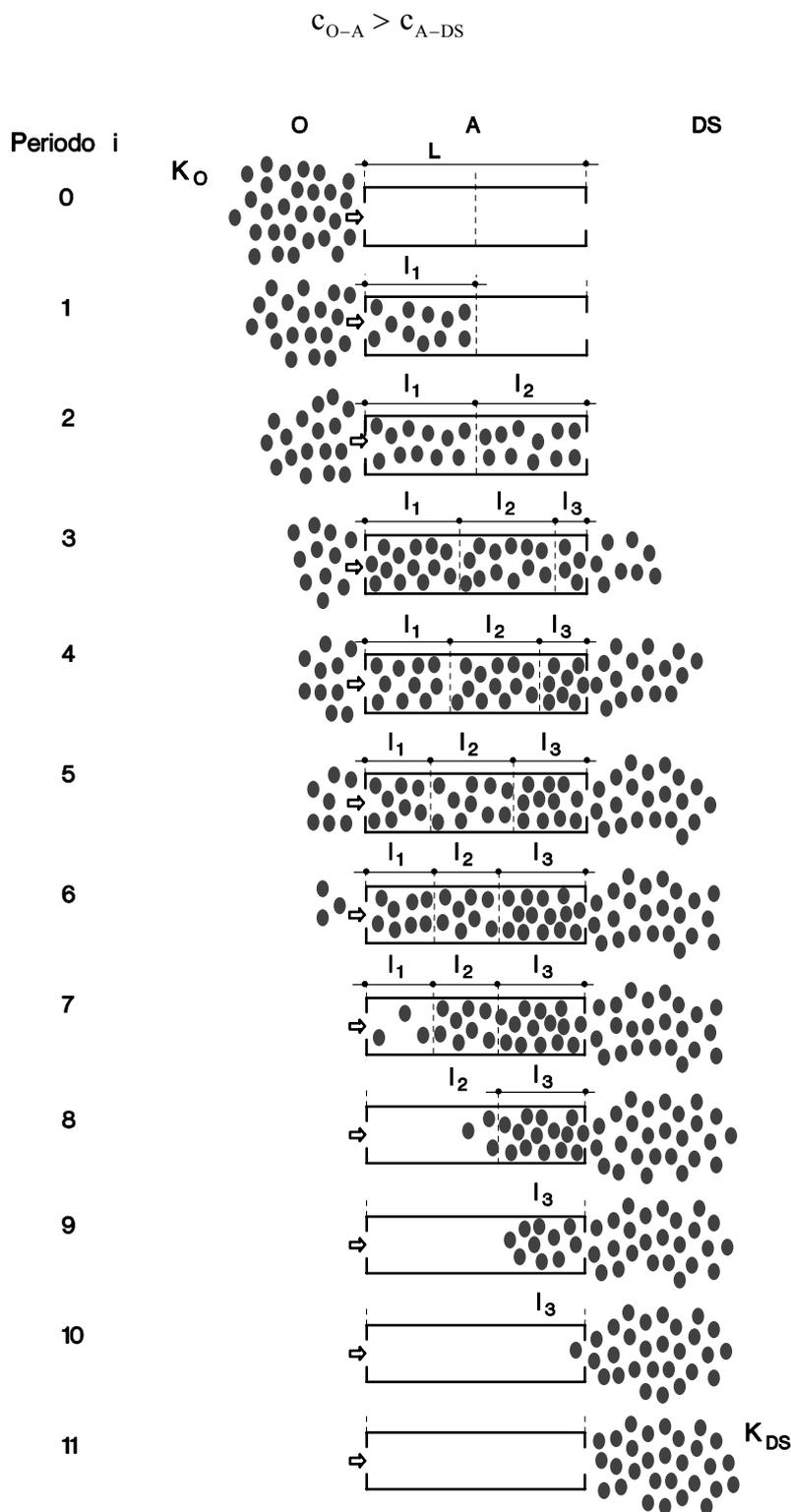


Figura 5.16 Análisis microscópico de una vía de circulación

La capacidad del nodo de circulación será c_A y el tiempo de circulación de los arcos desde el nodo origen O hasta el pasillo A será τ_{O-A} y el de circulación desde A hasta DS será τ_{A-DS} , los tiempos de circulación iniciales, para el lanzamiento del proceso, se consideran $\tau_{O-A}^0=2$ y $\tau_{O-A}^1=1$.

En el **periodo inicial (i=0)** la totalidad de ocupantes de la dependencia origen O se hallan en posición inmediata de la salida para acceder al pasillo A, de forma que no sea preciso modelar las incorporaciones a la red, en cualquier periodo de tiempo se cumple que la totalidad de ocupantes están en disposición de abandonar el recinto:

$$k_O^i = q_O^i \quad \forall i$$

Mediante L se designa la longitud total del pasillo, l_1 corresponde a la longitud del primer tramo del pasillo y l_2 la del segundo tramo. El tiempo de circulación por cada uno de los tramos l_1 y l_2 es de 1 periodo, cuando aparecen retenciones estas distancias cambian, entonces l_3 es la longitud ocupada por la retención.

En el **primer periodo (i=1)** el número de personas que abandonan el nodo origen O y acceden al pasillo A será x_{O-A}^1 .

Se supone que el número de personas que abandonan O será el máximo posible

$$x_{O-A}^1 = c_{O-A}^1$$

La ocupación de las dependencias al final del primer periodo será

$$k_O^1 = k_O^0 - x_{O-A}^1 \quad \text{y} \quad k_A^1 = x_{O-A}^1$$

Puede observarse que resulta ocupada la primera mitad del pasillo. Las x_{O-A}^1 personas que han salido de O durante el periodo 1, exactamente al final del mismo se hallan a la mitad del recorrido dado que el tiempo de circulación es de $\tau_{O-A}^1=2$ periodos.

En el **segundo periodo (i=2)** las x_{O-A}^1 personas que estaban ocupando la primera mitad del pasillo se desplazan a la segunda y otras x_{O-A}^2 acceden en condiciones de máxima capacidad al pasillo

$$x_{O-A}^2 = c_{O-A}^2$$

La ocupación de las dependencias O y A al final del primer periodo será:

$$k_O^2 = k_O^1 - x_{O-A}^2 \quad \text{y} \quad k_A^2 = k_A^1 + x_{O-A}^2$$

Al final del periodo 2 resulta ocupada toda la superficie del pasillo, en principio se supone que no se alcanza la capacidad de ocupación máxima c_A . Entonces debe cumplirse que

$$k_A^2 \leq c_A$$

La capacidad del pasillo al final del periodo será:

$$c_A^2 = c_A^1 - x_{O-A}^2$$

El tiempo de circulación, es de $\tau_{O-A}^2=2$ periodos. Cuando han transcurrido dos periodos, se observa que los ocupantes que habían abandonado el recinto origen en el primer periodo ya han alcanzado la salida de la dependencia A.

En el **tercer periodo (i=3)** x_{A-DS}^3 personas abandonan el pasillo y se dirigen al destino DS, si la salida hacia el pasillo se realiza en condiciones de máxima capacidad resulta

$$x_{A-DS}^3 = c_{A-DS}^3$$

dado que $x_{A-DS}^3 < x_{O-A}^2$ resulta que algunas personas quedarían retenidas en la salida de A, sencillamente serían

$$x_{O-A}^1 - x_{A-DS}^3$$

Estas x_{A-DS}^3 personas que han abandonado A durante el periodo tres, si el tiempo de circulación es de un periodo $\tau_{A-DS}^3 = 1$, empiezan a llegar a DS al inicio del cuarto periodo, habiendo llegado todas ellas al destino DS al final del mismo.

Las personas que estaban ocupando la primera mitad del pasillo x_{O-A}^2 , se desplazan a la segunda y se juntan con las que habían quedado formando colas. Otras x_{O-A}^3 acceden al pasillo en condiciones de máxima capacidad si la ocupación del pasillo A lo permite.

$$x_{O-A}^3 = c_{O-A}^3$$

En caso que el pasillo hubiera alcanzado su capacidad, entrarían al pasillo las personas que dicha capacidad permitiera, de esta forma llega un momento en el cual el proceso se estabiliza: El pasillo se mantiene en su capacidad máxima y entran al mismo en cada periodo, exactamente el mismo número de personas que salen.

En esta situación, el tiempo de circulación $\tau_{O-A}^3 > 1$ puede afirmarse que será mayor de un periodo, existe un grupo de personas esperando para poder abandonar el pasillo A.

Para poder proseguir este análisis sería preciso disponer de valores numéricos, para poder determinar la magnitud de las retenciones y de los tiempos de circulación. Tan solo puede afirmarse que en los **periodos finales** se produce el vaciado del pasillo en condiciones de máxima capacidad de la salida del mismo, o sea que mientras existan ocupantes x_{A-DS} será el máximo posible. Finalmente debe comprobarse que la totalidad de ocupantes del destino coincide con los que inicialmente estaban en el nodo origen

$$k_O^0 = k_{DS}^n$$

Pueden distinguirse tres fases: un periodo transitorio de llenado de la dependencia A, un intervalo estacionario y un periodo final de vaciado del pasillo. Resulta complejo ilustrar este proceso de forma genérica, por ello se analizan tres aplicaciones numéricas. En el primer caso, se presenta una situación muy simple, se analiza la red dinámica correspondiente a **una vía de evacuación sin retención ni demora en el inicio de la evacuación**, que puede observarse en la figura 5.17. Sea una un nodo origen ocupado por tan solo 65

personas; la capacidad de circulación hasta el pasillo A y desde el mismo hasta el destino DS es de 12 personas por periodo y los tiempos de circulación iniciales hasta el pasillo A y al destino DS son de 2 y 1 periodo respectivamente. Se supone que la circulación se inicia en el instante en que se produce la señal de alarma, sin que exista ningún efecto de comportamiento. El proceso puede seguirse en la figura 5.17, en ella se hallan representados 12 periodos de intervalos de 10 segundos y se observa que el número de personas que abandonan el recinto es el máximo, el valor x de las salidas coincide con el de la capacidad del arco c , ello da lugar a la máxima circulación y al mínimo tiempo de evacuación, exactamente 9 periodos o sea 90 segundos.

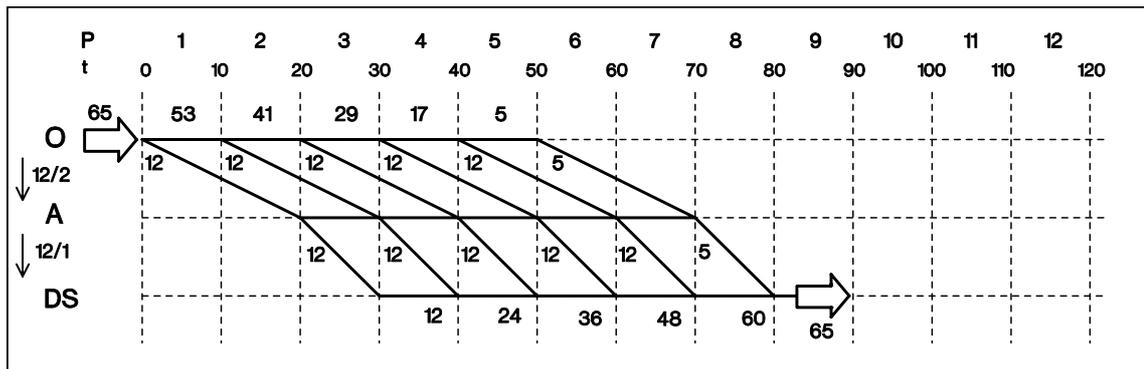


Figura 5.17 Red dinámica de una vía de circulación sin demora ni retención

En las redes dinámicas es posible modelar determinados comportamientos de una forma muy simple, por ejemplo las demoras, en el siguiente caso se muestra la red correspondiente a **una vía de evacuación sin retención con una demora en el inicio de la evacuación**. Se supone que en las mismas condiciones que el caso anterior se produce una demora de dos periodos (20 segundos) en el inicio de la evacuación. Puede observarse en la figura 5.18 como no se produce ningún desplazamiento en los dos primeros periodos y la evacuación finaliza transcurridos 11 periodos.

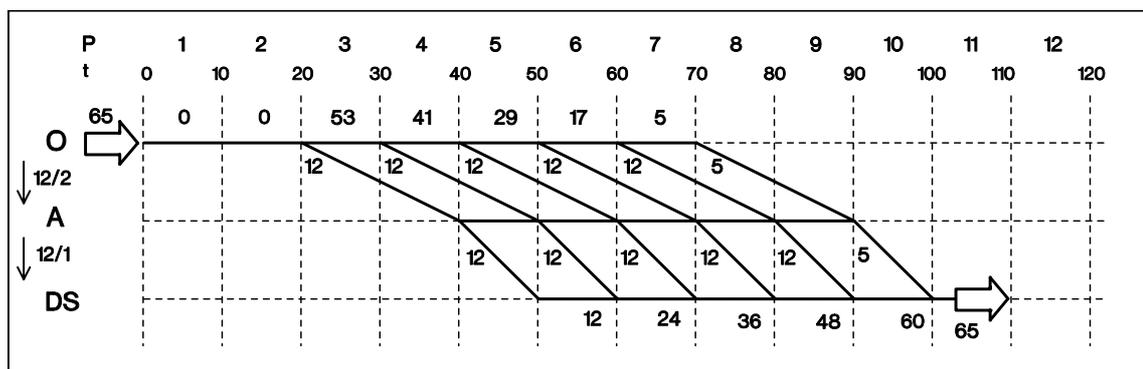


Figura 5.18 Red dinámica de una vía de circulación con demora sin retención

Finalmente en el tercer caso se plantea una situación genérica. La dependencia origen se halla ocupada por 65 personas, mientras que las capacidades de circulación de los arcos

son $c_{O-A} = 12$, $c_{A-DS} = 8$, los tiempos de circulación iniciales $\tau_{O-A} = 2$, $\tau_{A-DS} = 1$ y la capacidad del nodo A es de 30 personas.

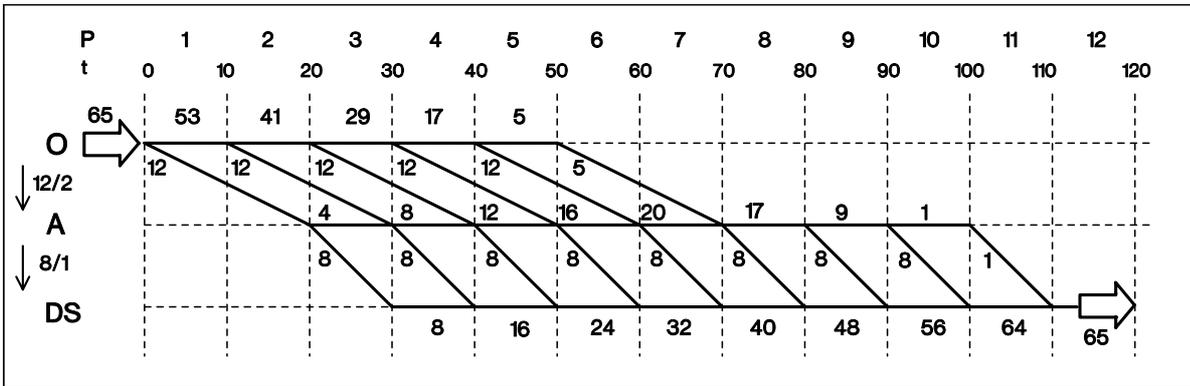


Figura 5.19 Red dinámica del análisis microscópico de la evacuación de un pasillo

El proceso de la evacuación puede observarse en la figura 5.19 y se describe de forma minuciosa en los siguientes apartados:

Periodo inicial (i=0). En la dependencia origen de evacuación $k_0 = 65$ personas se hallan en disposición de abandonar la misma.

Primer periodo (i=1). Si la capacidad de circulación de O a A es de $c_{O-A} = 12$, resultará $x_{O-A}^1 = 12$, y en consecuencia 12 personas han pasado a ocupar el pasillo A y al final del primer periodo, resultando las ocupaciones

$$k_O^1 = 53, \quad k_A^1 = 12$$

Además conocemos que el tiempo de circulación, es de $\tau_{O-A}^1 = 2$ periodos.

Segundo periodo (i=2). Las 12 personas que estaban ocupando la primera mitad del pasillo se desplazan a la segunda y otras $x_{O-A}^2 = 12$, siendo la ocupación de las dependencias afectadas

$$k_O^2 = 41, \quad k_A^2 = 24$$

Se observa que los ocupantes alcanzan el final del pasillo A.

Tercer periodo (i=3). En este intervalo de tiempo las personas que ocupaban la segunda mitad del pasillo, en posición inmediata a la puerta de salida del pasillo tratarán de alcanzar el destino, si la capacidad de paso de la puerta es de $c_{A-DS} = 8$, resultará $x_{A-DS}^3 = 8$, quedando en cola cuatro personas $q_{A-DS}^3 = 4$, también resulta que $x_{O-A}^3 = 12$, siendo la ocupación de las dependencias al final del periodo

$$k_O^3 = 29, \quad k_A^3 = 28, \quad k_{DS}^3 = 8$$

El tiempo de circulación hasta el destino es de $\tau_{A-DS}^3=1$ periodo. Las personas que quedan en espera reducen la longitud de circulación del pasillo, el tiempo de circulación, se sigue considerando $\tau_{O1-H1}^3 = 2$ periodos.

Cuarto periodo (i=4). Si la capacidad de la salida del pasillo es menor que la de la entrada $c_{A-DS} < c_{O-A}$ resulta que un determinado número de personas que deben permanecer en cola en el pasillo a la espera de poder salir, incrementando la ocupación de la dependencia hasta quedar completamente ocupada e impedir la entrada de otras personas y reduciendo la longitud del pasillo. En este periodo abandonan el recinto $x_{A-DS}^4 = 8$, si la capacidad del pasillo A es $c_A = 30$ en este periodo sólo pueden acceder al mismo $x_{O-A}^4 = 10$, siendo la ocupación de las dependencias afectadas al final del cuarto periodo

$$k_O^4 = 19, \quad k_A^4 = 30, \quad k_{DS}^4 = 16$$

Han quedado en cola $q_{A-DS}^4 = 8$, el tiempo de circulación sigue siendo de $\tau_{O-A}^4 = 3$ periodos.

Quinto periodo (i=5). Se sigue produciendo mayor número de entradas que de salidas con lo cual la longitud del pasillo sigue reduciéndose. Se producen $x_{A-DS}^5 = 8$ salidas, siendo el número de personas en cola $q_{A-DS}^5 = 12$ y en número de personas que pueden acceder tan solo es $x_{O-A}^5 = 8$, las ocupaciones que resultan al final del periodo

$$k_O^5 = 11, \quad k_A^5 = 30, \quad k_{DS}^5 = 24$$

En este periodo el sistema se ha estabilizado, se produce el mismo número de entradas que de salidas. El tiempo de circulación es $\tau_{O-A}^5 = 3$ periodos.

Sexto periodo (i=6). Se produce el mismo efecto que en el paso anterior, se producen $x_{O-A}^6 = 8$, y $x_{A-DS}^6 = 8$ y el número de personas en cola se incrementa $y_{A-DS}^6 = 14$, siendo la ocupación

$$k_O^6 = 3, \quad k_A^6 = 30, \quad k_{DS}^6 = 32$$

El tiempo de circulación es de $\tau_{O-A}^6 = 4$ periodos.

Séptimo periodo (i=7). Se producen $x_{O-A}^7 = 5$, y $x_{A-DS}^7 = 8$ y el número de personas en cola se mantiene $q_{A-DS}^7 = 14$, siendo la ocupación al final del periodo

$$k_O^7 = 0, \quad k_A^7 = 25, \quad k_{DS}^7 = 40$$

El tiempo de circulación sigue siendo de $\tau_{O-A}^7 = 4$ periodos.

Octavo periodo (i=8). En este momento tan solo se producen salidas $x_{A-DS}^8 = 8$ siendo las ocupaciones

$$k_O^8 = 0, k_A^8 = 17, k_{DS}^8 = 48$$

Noveno periodo (i=9). Las salidas serán $x_{A-DS}^9 = 8$ siendo las ocupaciones

$$k_O^9 = 0, k_A^9 = 9, k_{DS}^9 = 56$$

Décimo periodo (i=10). De la misma forma que en el periodo anterior $x_{A-DS}^{10} = 8$, siendo la ocupación al final del periodo

$$k_O^{10} = 0, k_A^{10} = 1, k_{DS}^{10} = 64$$

Onceavo periodo (i=11). Finalmente se produce la evacuación del último ocupante que todavía se halla en el pasillo $x_{A-DS}^{11} = 1$, siendo la ocupación al final del periodo

$$k_O^{11} = 0, k_A^{11} = 0, k_{DS}^{11} = 65$$

Los resultados de este caso podrían presentarse en forma matricial, dando lugar a las matrices de ocupación, flujos, retenciones y tiempos de circulación. La matriz de ocupaciones sería

$$k_j = \begin{vmatrix} 65 & 53 & 41 & 27 & 15 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 12 & 24 & 36 & 30 & 30 & 30 & 24 & 16 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 & 9 & 18 & 27 & 35 & 42 & 47 & 65 \end{vmatrix}$$

De la misma forma la matriz de flujos

$$x_{j-j'} = \begin{vmatrix} 12 & 12 & 12 & 12 & 12 & 12 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

La matriz de retenciones en este caso tan solo contiene la retención de salida del pasillo A hasta el destino DS

$$y_{A-DS} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 4 & 8 & 14 & 14 & 14 & 8 & 2 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

Finalmente la matriz de tiempos de circulación sería

$$\tau_{j-j'} = \begin{vmatrix} 2 & 2 & 2 & 3 & 3 & 4 & 4 & 4 & 3 & 2 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$$

5.3.2 Modelado de confluencias

En el capítulo 3 se ha estudiado el modelado de confluencias simples, oportunamente se han establecido las condiciones de continuidad de flujos, sin embargo la situación resulta más precisa si se resuelve en un entorno dinámico, las condiciones estacionarias se aplican

en los intervalos definidos en la red dinámica y se analiza la posibilidad de incorporar aspectos de comportamiento, obteniéndose unos resultados realmente interesantes.

En la figura 5.20 se presenta la situación de una confluencia simple, resulta que existen dos dependencias ocupadas O_1 y O_2 , que tienen acceso a una dependencia A, comunicada con otra dependencia B que da acceso al destino de evacuación DS. Las salidas de O_1 y O_2 hasta A constituyen dos vías de circulación de recorridos l_{O_1-A} y l_{O_2-A} . El recorrido común posterior a la confluencia está formado por los tramos l_{A-B} y l_{B-DS} , cualquiera de dichos tramos $j-j'$ está caracterizado por una anchura mínima de paso $w_{j-j'}$.

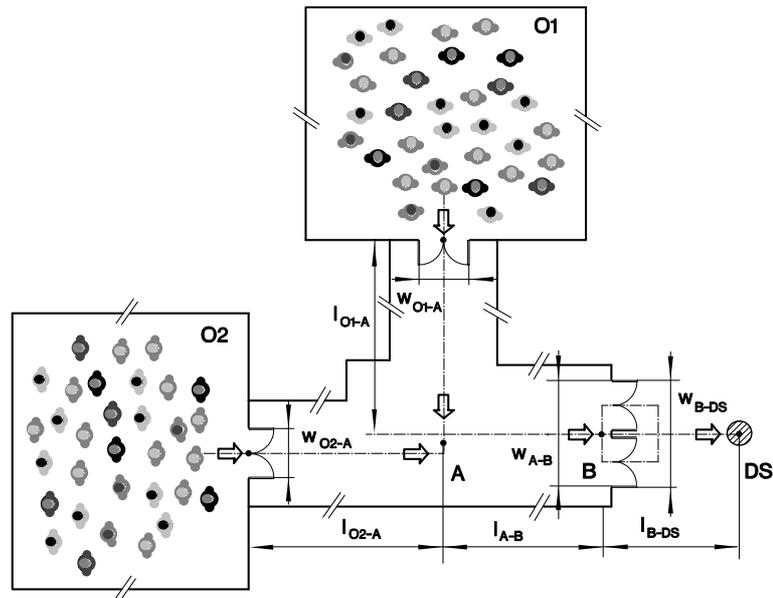


Figura 5.20 Análisis de una confluencia simple

Los ocupantes procedentes de O_1 y O_2 , acceden a la confluencia A en un determinado periodo i y se hallarán situados en una posición B en periodo i' , los flujos son función de las anchuras de paso $w_{j-j'}$ y los tiempos de circulación de los recorridos $l_{j-j'}$ y de las retenciones. En la figura 5.21 puede analizarse la representación de la red estática realizada según los criterios establecidos para el modelado de la misma.

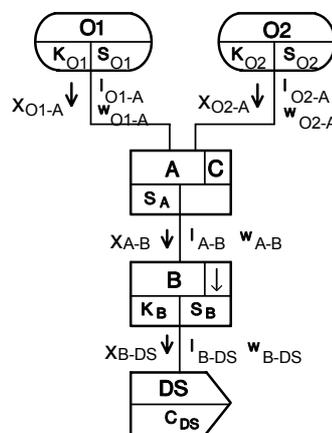


Figura 5.21 Red estática de una confluencia simple

La relación de flujos es la que resulta en la expresión 5.30. Puede observarse en la figura 5.22 como se materializan las condiciones de continuidad de flujos en la red dinámica. Resulta que $x_{O_1-A}^i$ personas han partido de O_1 al inicio del periodo i , $x_{O_2-A}^{i'}$ personas han partido de O_2 al inicio del periodo i' y en total $x_{A-B}^{i''}$ se dirigen a B y estarán situadas en B al final del periodo i'' .

$$x_{O_1-A}^i + x_{O_2-A}^{i'} = x_{A-B}^{i''} \tag{5.30}$$

Un aspecto de comportamiento que se genera en la confluencia es que los ocupantes procedentes de un recinto tengan una circulación más fácil que los de otra dependencia, en el caso presentado en la figura 5.20 resulta razonable suponer que los ocupantes de O_2 son los que se dirigen más fácilmente a B, siendo los ocupantes procedentes de O_1 los que tienen mayor dificultad para incorporarse al pasillo de salida, en cierto modo resulta que los ocupantes de O_2 tienen como propio el pasillo. Estas situaciones pueden modelarse incorporando coeficientes de proporcionalidad.

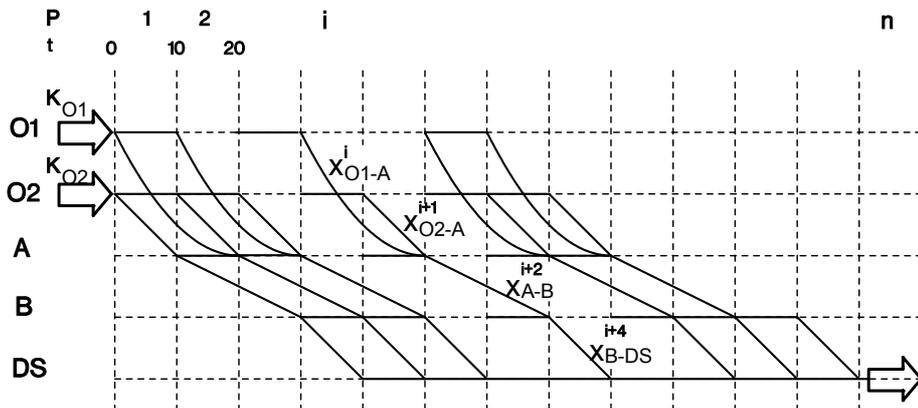


Figura 5.22 Red dinámica de una confluencia simple

En condiciones de densidad de ocupación baja, la incorporación resulta inmediata y en caso de densidades altas se producirían retenciones, al contemplarlas resulta la expresión (5.31) absolutamente genérica.

$$x_{A-B}^i = f \left(x_{O_1-A}^{i'} + q_{O_1-A}^{i-1} + x_{O_2-A}^{i''} + q_{O_2-A}^{i-1} \right) \tag{5.31}$$

donde debe respetarse la condición de la capacidad $c_{j-j'}$ del arco $j-j'$

$$\sum_{\forall i} x_{j-j'}^i < c_A$$

Finalmente se resuelve una aplicación numérica consistente en el estudio de la evacuación de dos dependencias ocupadas por 50 y 65 personas, que se dirigen a un pasillo A y a una dependencia B con capacidades de $c_{O_1-A} = 10$, $c_{O_2-A} = 12$, $c_{A-B} = 24$ y $c_{B-DS} = 20$ y tiempos de circulación $\tau_{O_1-A} = 1$, $\tau_{O_2-A} = 2$, $\tau_{A-B} = 2$ y $\tau_{B-DS} = 1$ el resultado puede analizarse en la figura 5.23, en la cual se muestra el análisis dinámico de dicha situación.

Puede observarse como en el periodo inicial parten 10 personas de O1 y 12 de O2, los ocupantes que parten de O2 en el primer periodo llegan a A durante el segundo periodo y durante el tercer y cuarto periodo se desplazan hasta B y en el quinto periodo llegan al destino. Los ocupantes que han partido de O1 tardan dos periodos en alcanzar A, cuando llegan a la confluencia A, durante el tercer periodo se juntan con los procedentes de B, y conjuntamente se desplazan durante dos periodos hasta B, y en el periodo quinto hasta el destino DS, donde llegan durante el periodo 6. El proceso prosigue hasta finalizar la evacuación cuando no quedan ocupantes en los nodos origen.

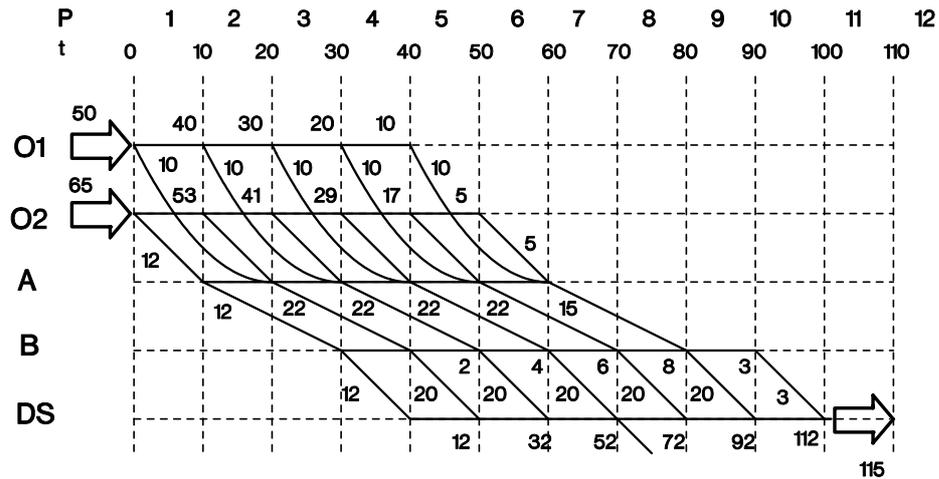


Figura 5.23 Ejemplo de red dinámica de una confluencia simple

5.3.3 Modelado de ramificaciones

De la misma forma que se han analizado las confluencias, en el estudio de las ramificaciones han de establecerse las condiciones de continuidad de flujos. El entorno dinámico facilita un análisis preciso de la situación y permite contemplar aspectos de comportamiento, y establecer las condiciones óptimas del proceso.

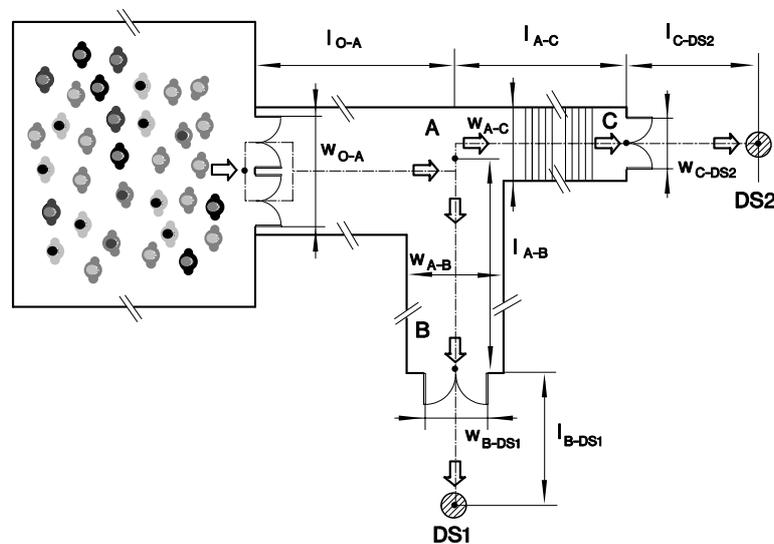


Figura 5.24 Análisis de una ramificación simple

En la figura 5.24 se presenta esta situación de ramificación simple, existe una dependencias ocupada O_1 desde la cual se accede a un pasillo y en el punto A del mismo se produce la ramificación, siendo posible dirigirse a los destinos DS1 y DS2 utilizando los pasillos B y C. Los recorridos A-DS1 y A-DS2 puede considerarse que son vías de circulación completamente independientes. La situación presentada puede analizarse mediante la red estática de la figura 5.25, en ella pueden observarse los cinco elementos de la misma: El nodo origen O con una ocupación K_O , la confluencia A y las dos vías de evacuación independientes A-DS1 y A-DS2, en la cual los nodos A, B, C, DS1 y DS2 tienen sus respectivas capacidades, de la misma forma que los arcos tienen sus capacidades de paso y tiempos de circulación.

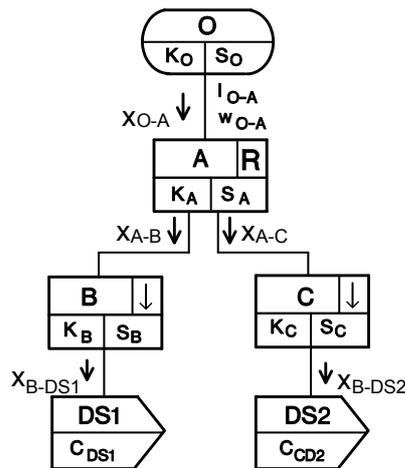


Figura 5.25 Red estática de una ramificación simple

De una forma genérica se considera que el número de personas que acceden a los destinos en cada periodo x_{j-DS}^i , depende de varios factores siendo el primero de ellos el propio modelado de las incorporaciones en la red, las densidades de circulación, etc.. y finalmente la distribución puede realizarse en función de diferentes criterios, el más simple es la proporcionalidad a las anchuras de la salida, pueden establecerse proporciones en función de una utilización habitual que previamente ha sido estimada o bien establecer la distribución que proceda para lograr una evacuación óptima.

La relación más simple que puede presentarse la proporcionala (5.32), según ella no existe retención alguna en A, y los ocupantes que alcanzan la confluencia en el periodo i llegan a la dependencia destino en los periodos i' y i'' . Según se ha representado en la red estática de la figura 5.25, resulta

$$x_{O-A}^{i'} = x_{A-B}^i + x_{A-C}^i \quad (5.32)$$

si se establece que el flujo es proporcional a las anchuras resulta

$$x_{A-B}^{i'} = \left(\frac{w_{A-B}}{w_{A-B} + w_{A-C}} \right) x_{O-A}^i \quad x_{A-C}^{i'} = \left(\frac{w_{A-C}}{w_{A-C} + w_{A-B}} \right) x_{O-A}^i \quad (5.33)$$

La situación puede generalizarse al considerar que en la dependencia A existe una retención, y en consecuencia un conjunto de personas esperando para abandonar el recinto A.

$$x_{O-A}^i + q_A^i = x_{A-DS1}^i + x_{A-DS2}^i \tag{5.34}$$

En el caso de contemplar aspectos de comportamiento resultan expresiones genéricas como (5.35) según las cuales las salidas son función de la totalidad de personas presentes.

$$x_{j-DS}^{i+1} = \Phi(x_{O-j}^i + q_j^i) \tag{5.35}$$

Finalmente se realiza la aplicación numérica consistente en la evacuación de una dependencias ocupada por 84 personas que se dirigen a A con capacidades de $c_{O-A} = 16$, y desde A se dirigen a B o bien a C siendo respectivamente las capacidades $c_{A-B} = 12$, $c_{A-C} = 8$, $c_{B-DS} = 12$ y $c_{A-DS} = 8$, siendo los tiempos de circulación $\tau_{O-A} = 2$, $\tau_{A-B} = 2$, $\tau_{A-C} = 1$ y $\tau_{B-DS} = 1$ y $\tau_{C-DS} = 1$. El resultado puede analizarse en la figura 5.26 y la representación corresponde al análisis dinámico de dicha situación

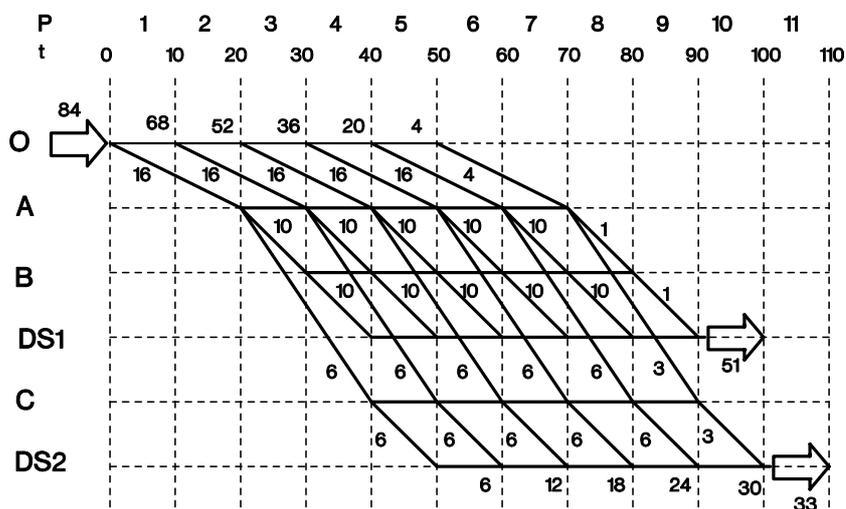


Figura 5.26 Red dinámica de una ramificación simple

En este ejemplo numérico puede observarse que la distribución en la ramificación se realiza por proporcionalidad de anchuras, de forma que los 16 ocupantes que llegan a A, 10 se dirigen a B para proseguir hasta el destino DS1 y 6 lo hacen hacia C, para continuar hasta el destino DS2, en total resulta que 61 personas se han dirigido a DS1 y 33 DS2.

Para realizar distribuciones óptimas en una ramificación, simplemente debe considerarse el punto de ramificación A como un recinto y determinar la solución óptima de la forma que se ha planteado en el capítulo 4.

5.4 OPTIMIZACIÓN DE LA EVACUACIÓN

En un edificio con n dependencias ocupadas se trata de determinar el tiempo mínimo necesario para la evacuación de un número total de k ocupantes que se hallan ocupando n dependencias según una distribución $(k_1, k_2, \dots, k_j, \dots, k_n)$. Se consideran las capacidades de los nodos y de los arcos, las velocidades de circulación y flujos son funciones de la

densidad de ocupación, tiempos de circulación variables, posibles demoras en el proceso de evacuación y condiciones de continuidad de flujos definidas según el modelo estacionario. En el momento de realizar el presente trabajo, no se tiene conocimiento de la existencia de procedimientos exactos que se puedan aplicar para resolver satisfactoriamente la modelización utilizada en este problema. Los últimos trabajos desarrollados en el entorno del profesor R. L. Francis, que se conocen, publicados por W. J. Choi [21] resultan valiosos pero su aplicación tan solo sería posible al relajar ciertas condiciones del problema. También se ha estudiado intensamente la posible utilización de los procedimientos desarrollados por B. Hope y E. Tardos [67] y [68] cuya implantación resulta compleja. La solución adoptada ha consistido en desarrollar una heurística y verificar paso a paso el proceso de resolución.

5.4.1 Heurística para la optimización de la evacuación de un recinto que dispone varias dependencias ocupadas

Según se ha descrito en apartados anteriores la solución que se propone es una solución estructurada, es importante la evacuación óptima de todo el edificio, sin embargo es un hecho absolutamente probado que de la misma forma que se vértebra la evacuación del edificio en situaciones de emergencia puede resultar primordial la evacuación de determinados recintos o plantas, siendo un primer objetivo la evacuación óptima del recinto o las dependencias afectadas por el siniestro y luego el edificio también en condiciones óptimas. La heurística que se propone básicamente consiste en hallar el camino más corto hasta los destinos y luego determinar el flujo máximo en los mismos.

Primer paso. Determinar en la red estática el tiempo mínimo de evacuación de cada uno de los nodos origen de evacuación.

Segundo paso. Seleccionar el nodo origen de mayor tiempo de evacuación.

Tercer paso. Proceder a programar la evacuación de dicho nodo en la red dinámica hasta situar los ocupantes en los respectivos destinos en el tiempo mínimo.

Cuarto paso. Repetir el proceso hasta completar la evacuación de todos los nodos ocupados.

Se han realizado pruebas en las cuales la selección del orden en la programación de la evacuación no era a partir del nodo de mayor tiempo de evacuación y parece ser que si las capacidades de los nodos son independientes de los flujos y se suponen tiempos de evacuación constantes los resultados son idénticos, sin embargo en las otras consideraciones de modelización resulta necesario el primer paso consistente en ordenar los nodos según sus tiempos de evacuación.

5.4.2 Aplicación para la optimización de la evacuación de un recinto

El funcionamiento de la heurística propuesta se muestra estudiando la evacuación de un edificio de una sola planta formado por varios recintos ocupados, tres vías de evacuación y que dispone de cinco salidas que conducen directamente al exterior, según puede obser-

varse en la figura 5.27. Las dependencias ocupadas son O_1 , O_2 , O_3 y O_4 y las salidas S_1 , S_2 , S_3 , S_4 y S_5 que conducen a los destinos $DS1$, $DS2$, $DS3$, $DS4$ y $DS5$.

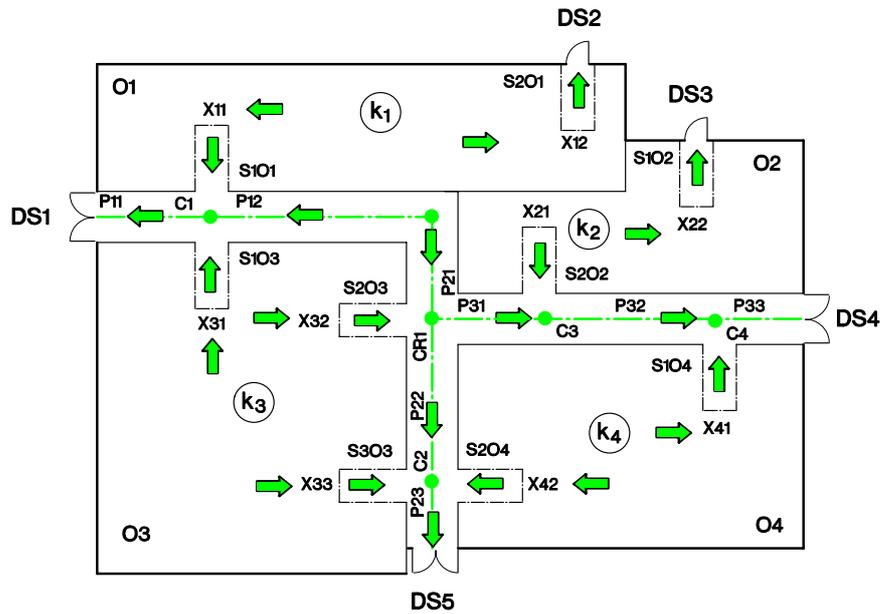


Figura 5.27 Ejemplo: Edificio de una sola planta y cinco salidas

Este mismo edificio puede representarse mediante una red estática (figura 5.28), en este caso al ser un edificio de una sola planta dicha red resulta realmente trivial. Una red estática estructurada de forma adecuada facilita la visualización y la comprensión del problema en edificios de varias plantas de geometría y de configuración compleja.

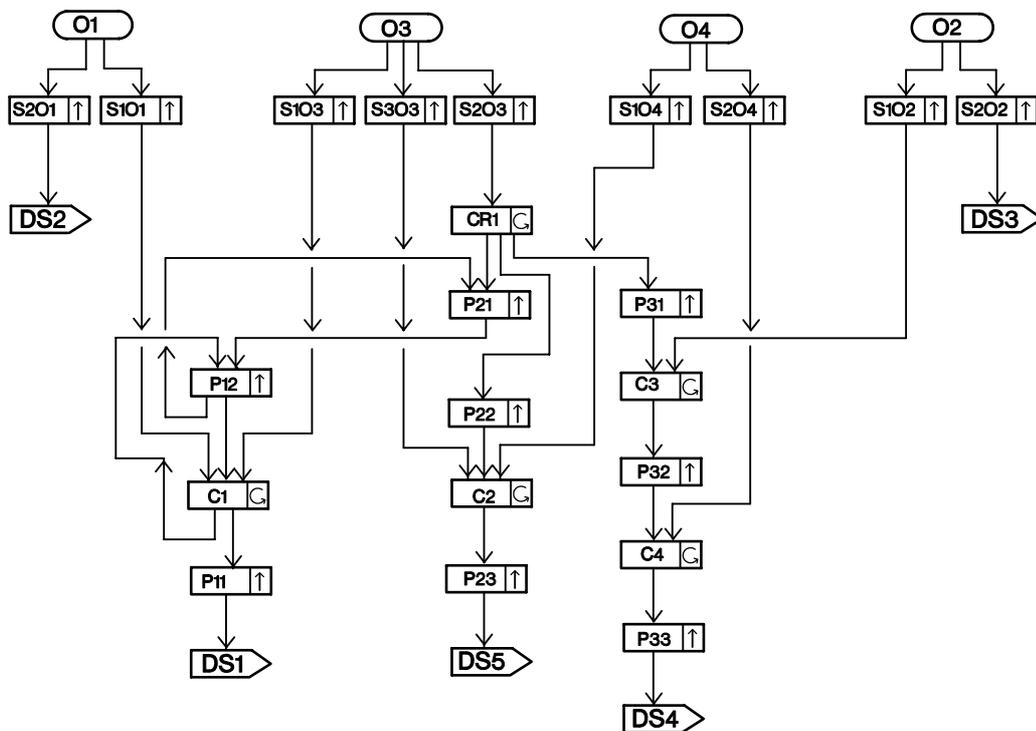


Figura 5.28 Red estática del ejemplo planteado

Para la solución del problema se dispone de la aplicación EXITE3, en ella directamente se introducen las magnitudes que caracterizan los nodos: Ocupación, superficie útil, máxima densidad de ocupación permitida y demora prevista en el inicio de la evacuación, con estas magnitudes se calcula la capacidad de cada dependencia o sub-dependencia, por ejemplo en este caso los pasillos se consideran divididos en tramos, entonces las características del pasillo corresponden a la integración de los elementos que lo forman. La secuencia de entrada de datos se halla estructurada según recintos origen de evacuación, vías de evacuación y destinos, figura 5.29.

EXITE3 VALOR NODOS					CASO 7				
Periodo		10 seg.							
RECINTOS	O1	O2	O3	O4					
Ocup. inicial (Pers.)	122	45	230	151					
Superficie u. (m ²)	95	40	150	80					
Max.dens.oc. (Pers./m ²)	2	2	2	2					
Capacidad (Pers.)	190	80	300	160					
Demora (Periodos)	0	0	0	0					
SALIDAS RECINTO	S101	S201	S102	S202	S103	S203	S303	S104	S204
Ocup. inicial (Pers.)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Superficie u. (m ²)	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Max.dens.oc. (Pers./m ²)	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
Capacidad (Pers.)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
VIA 1	P13	P12	C1	P11	TOTAL				
Ocup. inicial (Pers.)	0	0	0	0	0				
Superficie u. (m ²)	12	12	4	12	40				
Max.dens.oc. (Pers./m ²)	4,35	4,35	2	4,35					
Capacidad (Pers.)	52	52	8	52	164				
Demora (Periodos)	0								
VIA 2	P21	CR1	P22	C2	P23	TOTAL			
Ocup. inicial (Pers.)	0	0	0	0	0	0			
Superficie u. (m ²)	10	4	10	4	10	38			
Max.dens.oc. (Pers./m ²)	4,35	2	4,35	2	4,35				
Capacidad (Pers.)	44	8	44	8	44	147			
VIA 3	P31	C3	P32	C4	P33	TOTAL			
Ocup. inicial (Pers.)	0	0	0	0	0	0			
Superficie u. (m ²)	10	4	10	4	10	38			
Max.dens.oc. (Pers./m ²)	4,35	2	4,35	2	4,35				
Capacidad (Pers.)	44	8	44	8	44	147			
DESTINOS	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	TOTAL			
Ocup. inicial (Pers.)	0	0	0	0	0	0			
Superficie u. (m ²)	120	120	120	120	120	600			
Max.dens.oc. (Pers./m ²)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5				
Capacidad (Pers.)	300	300	300	300	300	1500			

Figura 5.29 Entrada de datos de los nodos del ejemplo propuesto

De forma similar, deben introducirse las magnitudes que caracterizan los arcos, directamente se introduce el valor de la anchura mínima de paso del elemento de circulación y la longitud del recorrido (figura 5.30). El proceso se inicia con unos valores iniciales de las magnitudes de circulación, para lanzar el proceso es necesario indicar la velocidad de circulación y el flujo inicialmente previsto, puede utilizarse el modelo de J. J. Fruins, con estas magnitudes se determinan capacidades de paso y tiempos de circulación. Los datos se organizan de tal forma que en principio se analizan las salidas de los recintos y luego se

prosigue con las vías de evacuación, estos valores iniciales se actualizan periodo a periodo en función de la densidad de ocupación.

EXITE3 VALOR ARCOS						CASO 7	
RECINTO 1	origen destino	O1 S1O1	S1O1 C1	O1 S2O1	S2O1 DS2		
Ancho efectivo mínimo (m)		4,00	1,00	4,00	1,00		
Recorrido (m)		9,00	1,00	9,00	7,00		
Velocidad (m / min)		73,15	73,15	73,15	73,15		
Flujo espec. (Pers./ m min)		41,01	41,01	41,01	41,01		
Flujo (Pers./ periodo)		27,00	7,00	27,00	7,00		
Circulación (Periodos)		1,00	0,00	1,00	1,00		
RECINTO 2	origen destino	O2 S2O2	S2O2 C3	O2 S1O2	S1O2 DS3		
Ancho efectivo mínimo (m)		3,00	1,00	3,00	1,00		
Recorrido (m)		7,00	7,00	7,00	7,00		
Velocidad (m / min)		73,15	73,15	73,15	73,15		
Flujo espec. (Pers./ m min)		41,01	41,01	41,01	41,01		
Flujo (Pers./ periodo)		21,00	7,00	21,00	7,00		
Circulación (Periodos)		1,00	1,00	1,00	1,00		
RECINTO 3	origen destino	O3 S1O3	S1O3 C1	O3 S2O3	S2O3 CR1	O3 S3O3	S3O3 C2
Ancho efectivo mínimo (m)		5,00	1,00	5,00	1,00	5,00	1,00
Recorrido (m)		8,00	5,00	8,00	1,00	8,00	1,00
Velocidad (m / min)		73,15	73,15	73,15	73,15	73,15	73,15
Flujo espec. (Pers./ m min)		41,01	41,01	41,01	41,01	41,01	41,01
Flujo (Pers./ periodo)		34,00	7,00	34,00	7,00	34,00	7,00
Circulación (Periodos)		1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
RECINTO 4	origen destino	O4 S2O4	S2O4 C2	O4 S1O4	S1O4 C4		
Ancho efectivo mínimo (m)		5,00	1,00	5,00	1,00		
Recorrido (m)		7,00	1,00	7,00	1,00		
Velocidad (m / min)		73,15	73,15	73,15	73,15		
Flujo espec. (Pers./ m min)		41,01	41,01	41,01	41,01		
Flujo (Pers./ periodo)		34,00	7,00	34,00	7,00		
Circulación (Periodos)		1,00	0,00	1,00	0,00		
VIA 1	origen destino	P13 P12	P12 C1	C1 P11	P11 DS1		
Ancho efectivo mínimo (m)		1,80	1,80	1,80	1,80		
Recorrido (m)		8,00	1,00	6,00	6,00		
Velocidad (m / min)		65,53	65,53	65,53	65,53		
Flujo espec. (Pers./ m min)		57,42	57,42	57,42	57,42		
Flujo (Pers./ periodo)		17,00	17,00	17,00	17,00		
Circulación (Periodos)		1,00	0,00	1,00	1,00		
VIA 2	origen destino	P13 P21	P21 CR1	CR1 P22	P22 C2	C2 P23	P23 DS5
Ancho efectivo mínimo (m)		5,00	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
Recorrido (m)		5,00	1,00	5,00	1,00	3,00	5,00
Velocidad (m / min)		65,53	65,53	65,53	65,53	47,25	47,25
Flujo espec. (Pers./ m min)		57,42	57,42	57,42	57,42	73,82	73,82
Flujo (Pers./ periodo)		48,00	17,00	17,00	17,00	22,00	22,00
Circulación (Periodos)		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
VIA 3	origen destino	CR1 P31	P31 C3	C3 P32	P32 C4	C4 P33	P33 DS4
Ancho efectivo mínimo (m)		1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80
Recorrido (m)		5,00	1,00	5,00	1,00	5,00	5,00
Velocidad (m / min)		65,53	65,53	65,53	65,53	47,25	47,25
Flujo espec. (Pers./ m min)		57,42	57,42	57,42	57,42	73,82	73,82
Flujo (Pers./ periodo)		17,00	17,00	17,00	17,00	22,00	22,00
Circulación (Periodos)		0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00

Figura 5.30 Ejemplo: Entrada de datos de los arcos del ejemplo propuesto

Según la heurística descrita, el primer paso del proceso de aplicación de la misma consiste en determinar de forma independiente para cada una de las dependencias ocupadas el tiempo que supone su evacuación y la distribución óptima hacia las salidas. El resultado es el que se muestra en 5.31.

EXITE3 EVACUACIÓN DEPENDENCIAS ORIGEN CASO 7				
DESTINOS	DEPENDENCIAS ORIGEN			
	O1	O2	O3	O4
Ocupación	122	45	230	151
DS1	56		77	
DS2	66			
DS3		35		
DS4		10		77
DS5			153	74
Tiempo ev. (periodos)	12	7	14	13

Figura 5.31 Primera fase de la heurística aplicada al ejemplo propuesto

Se puede observar como el tiempo de evacuación de la dependencia O1 son 12 periodos y la distribución óptima hacia las salidas son de 56 personas hacia el destino DS1 y 66 al destino DS2. De la misma forma pueden analizarse los tiempos de evacuación de las otras tres dependencias, la circunstancia realmente significativa es el orden según los tiempos de evacuación, el tiempo de evacuación mayor corresponde a la dependencia O3, le siguen O4, O1 y finalmente O2.

La simplicidad del ejemplo permite verificar los resultados obtenidos. Así en el recinto O₁ resulta que x_{11} es el número de personas que se dirigen a la salida 1 de dicho recinto, que utilizando el pasillo 1 conduce al destino DS1, mientras que x_{12} son las personas que se dirigen a la salida 2, que directamente conduce al destino DS2, utilizando como magnitud de tiempo periodos de 10 segundos resultan las funciones de evacuación:

$$t_{11}(x_{11}) = 2 + \frac{x_{11}}{7} \quad t_{12}(x_{12}) = 4 + \frac{x_{12}}{7}$$

Entonces el problema que se plantea es:

$$\text{Min}(z) = \text{Max} \{ t_{11}(x_{11}), t_{12}(x_{12}) \}$$

$$x_{11} + x_{12} = 122$$

$$x_{11} \geq 0, x_{12} \geq 0$$

El problema es realmente simple y es posible su resolución manual, las funciones de evacuación inversa serán

$$p_1(z) = \begin{cases} 0 & z < 2 \\ 7(z-2) & z \geq 2 \end{cases} \quad p_2(z) = \begin{cases} 0 & z < 4 \\ 7(z-4) & z \geq 2 \end{cases}$$

Resultando la función de evacuación total P(z)

$$P(z) = \begin{cases} 0 & z < 2 \\ 7(z-2) & 2 \leq z < 4 \\ 14(z-3) & 4 \leq z \end{cases}$$

Igualando en el tramo estacionario $P(z) = 122$, se obtiene $z = 12$ periodos y la asignación a las salidas S1 y S2 resultan de 56 y 66 personas.

En el recinto O_2 resulta que x_{22} es el número de personas que se dirigen a la salida 2, que directamente conduce al destino DS3, entonces x_{21} son las personas que se dirigen a la salida 1 que da acceso a la confluencia C3, y desde la misma al pasillo P3 para dirigirse al destino DS4, resultan las funciones de evacuación:

$$t_{21}(x_{21}) = 5 + \frac{x_{21}}{7} \quad t_{22}(x_{22}) = 2 + \frac{x_{22}}{7}$$

Entonces el problema para dicha dependencia es:

$$\begin{aligned} \text{Min}(z) &= \text{Max} \{ t_{21}(x_{21}), t_{22}(x_{22}) \} \\ x_{21} + x_{22} &= 45 \\ x_{21} \geq 0, x_{22} &\geq 0 \end{aligned}$$

siendo el resultado es $z = 7$ periodos, $x_{21} = 10$ y $x_{22} = 35$ personas.

En el recinto O_3 existen tres salidas, x_{31} es el número de personas que se utilizan la salida 1 a la confluencia C1, al pasillo 1 que conduce al destino DS1, x_{32} son las personas que se dirigen a la salida 2, que utilizando el pasillo 2 se dirigen al destino 5 y finalmente x_{33} son las personas que se dirigen a la salida 3 que utilizando el último tramo del pasillo 2 también se dirigen al destino 5, resultan las funciones de evacuación:

$$t_{31}(x_{31}) = 2 + \frac{x_{31}}{7} \quad t_{32}(x_{32}) = 3 + \frac{x_{32}}{7} \quad t_{33}(x_{33}) = 2 + \frac{x_{33}}{7}$$

Entonces el problema que se plantea es:

$$\begin{aligned} \text{Min}(z) &= \text{Max} \{ t_{31}(x_{31}), t_{32}(x_{32}), t_{33}(x_{33}) \} \\ x_{31} + x_{32} + x_{33} &= 230 \\ x_{31} \geq 0, x_{32} \geq 0, x_{33} &\geq 0 \end{aligned}$$

resultando $z = 14$ periodos, siendo $x_{31} = 77$, $x_{32} = 69$ y $x_{33} = 84$ personas.

En el recinto O_4 resulta que x_{41} es el número de personas que se dirigen a la salida 1 del recinto, que utilizando el pasillo 3 conduce al destino DS4, y x_{42} las personas que se dirigen a la salida 2 que directamente conduce al destino DS5, resultan las funciones de evacuación:

$$t_{41}(x_{41}) = 3 + \frac{x_{41}}{7} \quad t_{42}(x_{42}) = 3 + \frac{x_{42}}{7}$$

Entonces el problema que se plantea es:

$$\text{Min}(z) = \text{Max} \{ t_{41}(x_{41}), t_{42}(x_{42}) \}$$

$$x_{41} + x_{42} = 151$$

$$x_{41} \geq 0, x_{42} \geq 0$$

La solución es $z = 13$ periodos, siendo $x_{41} = 77$ y $x_{42} = 74$ personas.

Seguidamente se decide la estrategia de evacuación, por un lado puede escogerse entre una evacuación óptima para la totalidad del edificio, o bien en una evacuación estructurada en prioridades, tal como se ha analizado en apartados anteriores es conveniente la posibilidad de plantear la evacuación de un edificio dando prioridad a las personas afectadas por algún hipotético siniestro. En la figura 5.32 puede observarse como la aplicación permite seleccionar dichas alternativas: Estrategia de evacuación óptima o bien definida por el usuario.

EXITE3 DEFINICIÓN DE ESTRATEGIAS		CASO 7			
ESTRATEGIAS	DEPENDENCIAS ORIGEN				
	O1	O2	O3	O4	
OPTIMA	3	4	1	2	
DEFINIDA					

Figura 5.32 Definición de estrategias de evacuación

En primer lugar se opta por la evacuación óptima. Puede observarse en la figura 5.32 como de forma automática se establecen las prioridades de evacuación, el orden de evacuación es O3, O4, O1 y O2, corresponde a las dependencias ordenadas de mayor a menor tiempo de evacuación. Efectuando la resolución se obtienen los resultados que se muestran en la figura 5.33. Analizando los tiempos de evacuación, se observa que el tiempo de evacuación de cada una de las dependencias z_j y el total del edificio z , la magnitud z_j indica el tiempo necesario para abandonar una dependencia hasta situarse en las dependencias anexas a la misma, no corresponde a la evaluación del tiempo necesario para situarse en los destinos de evacuación.

Continuando con los tiempos de evacuación, los valores de z_j se comparan con los valores z_j^{\wedge} de cada dependencia ocupada y del total del edificio z con z^{\wedge} según la expresión 3.37, valor correspondiente a la hipotética evacuación que se realizaría si no hubiera ningún tipo de retención, el cociente de ambos valores da como resultado el factor de congestión. La lectura de esta magnitud informa de forma inmediata la dificultad que supone la evacuación de las dependencias analizadas, en este caso resulta extraordinariamente bajo el valor del recinto 2, en el cual el factor de congestión tiene valor 2 y los demás valores están comprendidos entre cuatro y cinco veces el tiempo que correspondería al valor de una evacuación ideal. Otras magnitudes que se evalúan sobre el tiempo de evacuación son el valor medio y la desviación tipo del tiempo empleado por cada uno de los ocupantes en abandonar el recinto, simplemente se trata de conocer el valor que supondría la evacua-

ción si todos los ocupantes tardaran lo mismo, necesariamente debe acompañarse de su desviación tipo para que el lector conozca la variabilidad de dicha medición. De forma similar al caso anterior, resulta interesante conocer cual es el número medio de personas que abandonan el edificio en cada periodo, aparece en la tabla como “Número de salidas periodo”, necesariamente también se evalúa su variabilidad.

EXITE3		RESULTADOS		CASO 7				
TIEMPOS EVACUACIÓN								
DEPENDENCIA	Calculado (segundos)	Ideal (segundos)	Factor congestión					
Recinto 1	90	20	4,50					
Recinto 2	40	20	2,00					
Recinto 3	110	20	5,50					
Recinto 4	100	20	5,00					
EDIFICIO	140	30	4,67					
			Tiempo evacuación		Número salidas periodo			
Valor medio (segundos)			76,1		Valor medio (Pers.)	39,1		
Desviación tipo (segundos)			18,4		Desv. tipo (Pers.)	9,3		
ANÁLISIS RETENCIONES								
	Ubicación		Periodo		Intervalo		Ocup. Max. (Pers.)	Magnitud retención (Periodos)
	Origen	Destino	inicio (s)	fin (s)	(s)	%		
1	S1O1	C1	20	90	70	50,00	43	36
2	S2O1	DS2	20	100	80	57,14	52	45
3	S1O2	DS3	20	50	30	21,43	21	10
4	S2O2	C3	20	30	10	7,14	3	1
5	S1O3	C1	20	120	100	71,43	63	66
6	S2O3	CR1	20	100	80	57,14	55	45
7	S3O3	C2	20	120	100	71,43	68	66
8	S1O4	C4	20	110	90	64,29	60	55
9	S2O4	C2	20	110	90	64,29	57	55
ANÁLISIS SALIDAS								
DESTINO	Capacidad	Utilización	%					
	(Pers.)	(Pers.)	utiliz.	capac.				
DS1	300	133	24,27	44,33				
DS2	300	66	12,04	22,00				
DS3	300	35	6,39	11,67				
DS4	300	87	15,88	29,00				
DS5	300	227	41,42	75,67				
TOTAL	1500	548						

Figura 5.33 Resultados ejemplo

Otro aspecto esencial de este análisis, radica en conocer los puntos en los cuales se producen retenciones y evaluar sus parámetros característicos, conocer los instantes en que éstas se inician y terminan, el número máximo de personas que pueden hallarse en la misma y la magnitud de la retención, evaluada mediante el número total de periodos en espera. Pueden observarse en la parte central de la tabla de la figura 5.33. Finalmente en este análisis global de resultados se determina el número de personas que utilizan cada una de las salidas y en consecuencia llegan a cada uno de los destinos de evacuación, en dicho análisis se realizan dos operaciones, se determina el porcentaje de utilización de cada destino, en nuestro caso resulta que el destino más utilizado es el DS5, lo utilizan el 41% de los

ocupantes y el menos utilizado es el DS3 que tan solo lo utilizan el 6% de los ocupantes. Para observar mejor estos resultados se realiza un gráfico de Pareto como el de la figura 5.34, se observa el orden de importancia de cada una de las salidas en el proceso de la evacuación valorando de forma exclusiva su utilización, el número de personas que las utilizan y el correspondiente valor porcentual. También en la utilización de los destinos se evalúa el porcentaje de utilización respecto su capacidad, así resulta que el destino DS5 se halla al 76 % de su capacidad, el destino 3 tan solo el 11%, el 2 el 22% y el 1 el 44%, ello ofrece una idea sobre como podrían afectar cambios de ocupación en la utilización de los destinos.

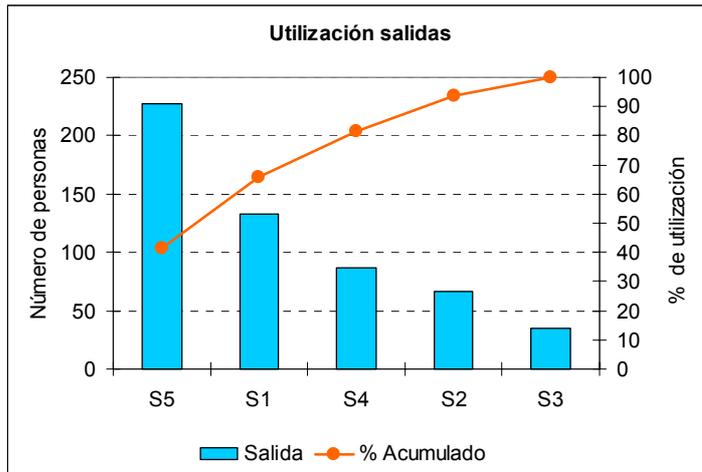


Figura 5.34 Análisis de la utilización de las salidas

Un aspecto destacado de la solución del problema, consiste en la distribución óptima hacia las salidas, que puede presentarse en un formato gráfico como el de la figura 5.35 o bien en forma de tabla en el formato de la tabla de la figura 5.36. Se expresan las ocupaciones, los flujos y los recorridos.

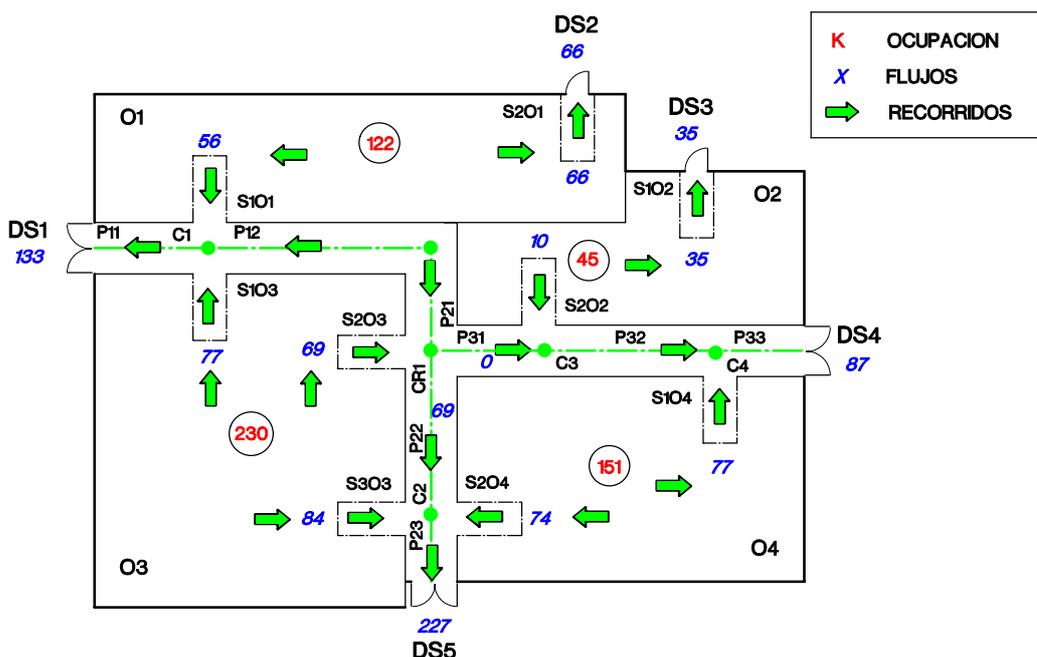


Figura 5.35 Distribución para una evacuación óptima

La representación gráfica ofrece una visión muy clara de la distribución de los ocupantes hacia las salidas que consigue tiempos mínimos de evacuación. En edificios de varias plantas y grandes dimensiones dicha distribución se debe ofrecer mediante un esquema para cada una de las plantas, mientras que en edificios de dimensiones reducidas o medianas se puede optar por su representación sobre una perspectiva del edificio de la forma que se ha analizado en el capítulo 3.

EXITE3		ANÁLISIS FLUJOS				CASO 7	
ESTRATEGIA		OPTIMA					
RECINTO 1	origen destino	O1	S1O1	O1	S2O1		
122		S1O1	C1	S2O1	DS2		
Flujo total	(Personas)	56	56	66	66		
% utilización recinto		45,90	45,90	54,10	54,10		
% utilización total		10,22	10,22	12,04	12,04		
RECINTO 2	origen destino	O2	S2O2	O2	S1O2		
45		S2O2	C3	S1O2	DS3		
Flujo total	(Personas)	10	10	35	35		
% utilización recinto		22,22	22,22	77,78	77,78		
% utilización total		1,82	1,82	6,39	6,39		
RECINTO 3	origen destino	O3	S1O3	O3	S2O3	O3	S3O3
230		S1O3	C1	S2O3	CR1	S3O3	C2
Flujo total	(Personas)	77	77	69	69	84	84
% utilización recinto		33,48	33,48	30,00	30,00	36,52	36,52
% utilización total		14,05	14,05	12,59	12,59	15,33	15,33
RECINTO 4	origen destino	O4	S2O4	O4	S1O4		
151		S2O4	C2	S1O4	C4		
Flujo total	(Personas)	77	77	74	74		
% utilización recinto		50,99	50,99	49,01	49,01		
% utilización total		14,05	14,05	13,50	13,50		
VIA 1	origen destino	P13	P12	C1	P11		
		P12	C1	P11	DS1		
Flujo total	(Personas)	0	0	133	133		
% utilización		0,00	0,00	24,27	24,27		
VIA 2	origen destino	P13	P21	CR1	P22	C2	P23
		P21	CR1	P22	C2	P23	DS5
Flujo total	(Personas)	0	0	69	69	227	227
% utilización		0,00	0,00	12,59	12,59	41,42	41,42
VIA 3	origen destino	CR1	P31	C3	P32	C4	P33
		P31	C3	P32	C4	P33	DS4
Flujo total	(Personas)	0	0	10	10	87	87
% utilización		0,00	0,00	1,82	1,82	15,88	15,88

Figura 5.36 Distribución de flujos para una evacuación óptima

En la tabla 5.36 correspondiente al análisis de flujos, además de conocer el número de personas que deben dirigirse a cada una de las salidas se determina el porcentaje de utilización respecto la ocupación del recinto, se trata de la relación entre las x_j personas que utilizan la salida y el número total de ocupantes k_j del recinto, puede resultar un valor útil para establecer conjeturas sobre la proporción de ocupantes que deben utilizar cada salida. También se evalúa el porcentaje total de utilización, en este caso la relación se establece entre las x_j personas que utilizan la salida y el número total de ocupantes k del edificio.

Otro aspecto que se analiza son las retenciones, una vez identificadas las posiciones en que se producen es importante conocer periodo a periodo su magnitud, en la figura 5.37, puede observarse la tabla proporcionada por EXITE.

EXITE3 ANÁLISIS RETENCIONES CASO 7										
ESTRATEGIA		OPTIMA								
RETENCIÓN	Origen DESTINO	S101 C1	S201 DS2	S102 DS3	S202 C3	S103 C1	S203 CR1	S303 C2	S104 C4	S204 C2
Periodo	Magnitud									
1		0	0	0	0	0	0	0	0	0
2		8	9	4	1	11	9	10	10	11
3		7	8	3	0	10	8	9	9	10
4		6	7	2	0	9	7	8	8	9
5		5	6	1	0	8	6	7	7	8
6		4	5	0	0	7	5	6	6	7
7		3	4	0	0	6	4	5	5	6
8		2	3	0	0	5	3	4	4	5
9		1	2	0	0	4	2	3	3	4
10		0	1	0	0	3	1	2	2	3
11		0	0	0	0	2	0	1	1	2
12		0	0	0	0	1	0	0	0	1
13		0	0	0	0	0	0	0	0	0
14		0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL		36	45	10	1	66	45	55	55	66

Figura 5.36 Distribución de flujos para una evacuación óptima

Finalmente pueden utilizarse diferentes herramientas gráficas para analizar ocupaciones o flujos, en la figura 5.38 se presenta la gráfica correspondiente al análisis de la ocupación del recinto 1, la ocupación se divide en los ocupantes que se dirigen a la salida 1 y los que se dirigen a la salida 2; puede verse la ocupación de la dependencia O1 al final de cada periodo y observarse como la ocupación descende periodo a periodo y se observa que la evacuación finaliza en el onceavo periodo a los 110 segundos.

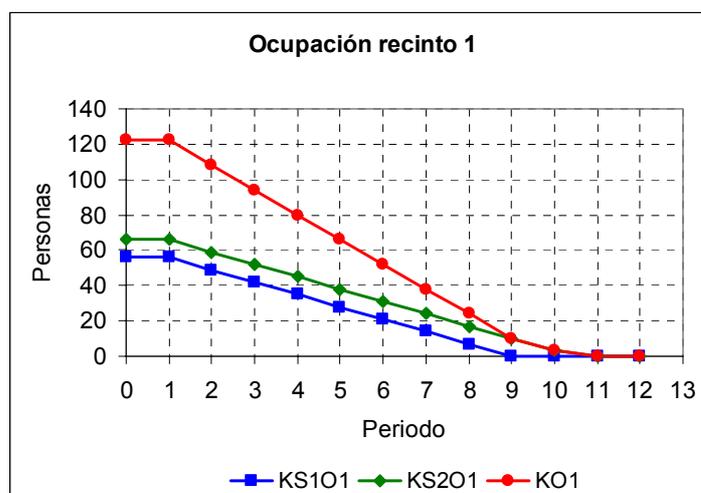


Figura 5.38 Análisis de la ocupación de una dependencia origen de evacuación

La dependencia cuya ocupación resulta más compleja con varias incorporaciones y una salida al destino DS5, cuyo análisis a priori resulta más interesante es el pasillo 2. Se

muestra su diagrama de ocupación en la figura 5.39, la ocupación crece hasta estabilizarse y luego desciende hasta el instante en que finaliza la evacuación. Este proceso de análisis se ha realizado en todas las dependencias que configuran el edificio, y no se han apreciado circunstancias especialmente relevantes y se prescinde de su representación. En dependencias intermedias esta representación además de la ocupación en sí permite analizar su capacidad disponible.

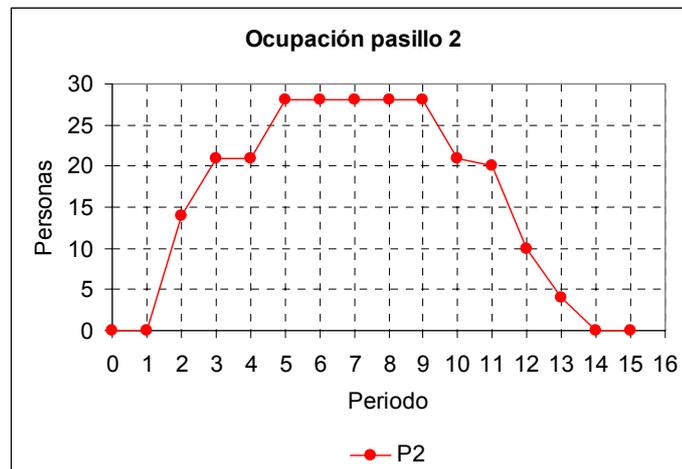


Figura 5.39 Análisis de la ocupación de una dependencia de circulación

Otro elemento de estudio son los flujos que se registran en una dependencia o bien en una vía de evacuación, en la figura 5.40 se representan los flujos correspondientes a la salida 1 de la dependencia O1, son los flujos que se producen desde O1 hasta la salida 1 y desde O1 hasta la salida 2 que conduce a la confluencia C1.

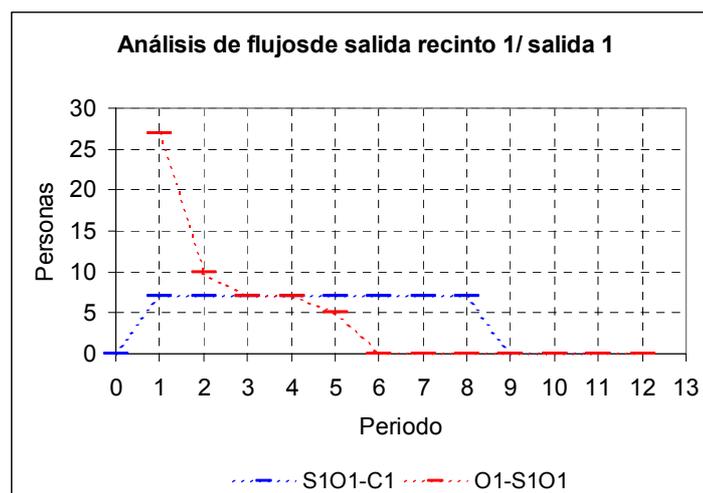


Figura 5.40 Análisis de los flujos registrados hacia una vía de evacuación

Finalmente en la solución de este caso, se analiza el perfil de evacuación de cada una de las salidas y el perfil de evacuación total, se observa que las salidas 2 y 5 tienen un alto rendimiento, durante muchos periodos se están utilizando al máximo de su capacidad, mientras que la salida 1 y la salida 4 realmente son poco utilizadas. Mediante este análisis

se observa que las condiciones arquitectónicas del recinto producen que en las salidas 1 y la 4 no se aprovechan de forma adecuada sus capacidades, entonces para equilibrar la carga de las salidas resultaría operativo incrementar la capacidad de los accesos a los pasillos 1 y 3, obteniéndose así un comportamiento similar al de las salidas 2 y 5.

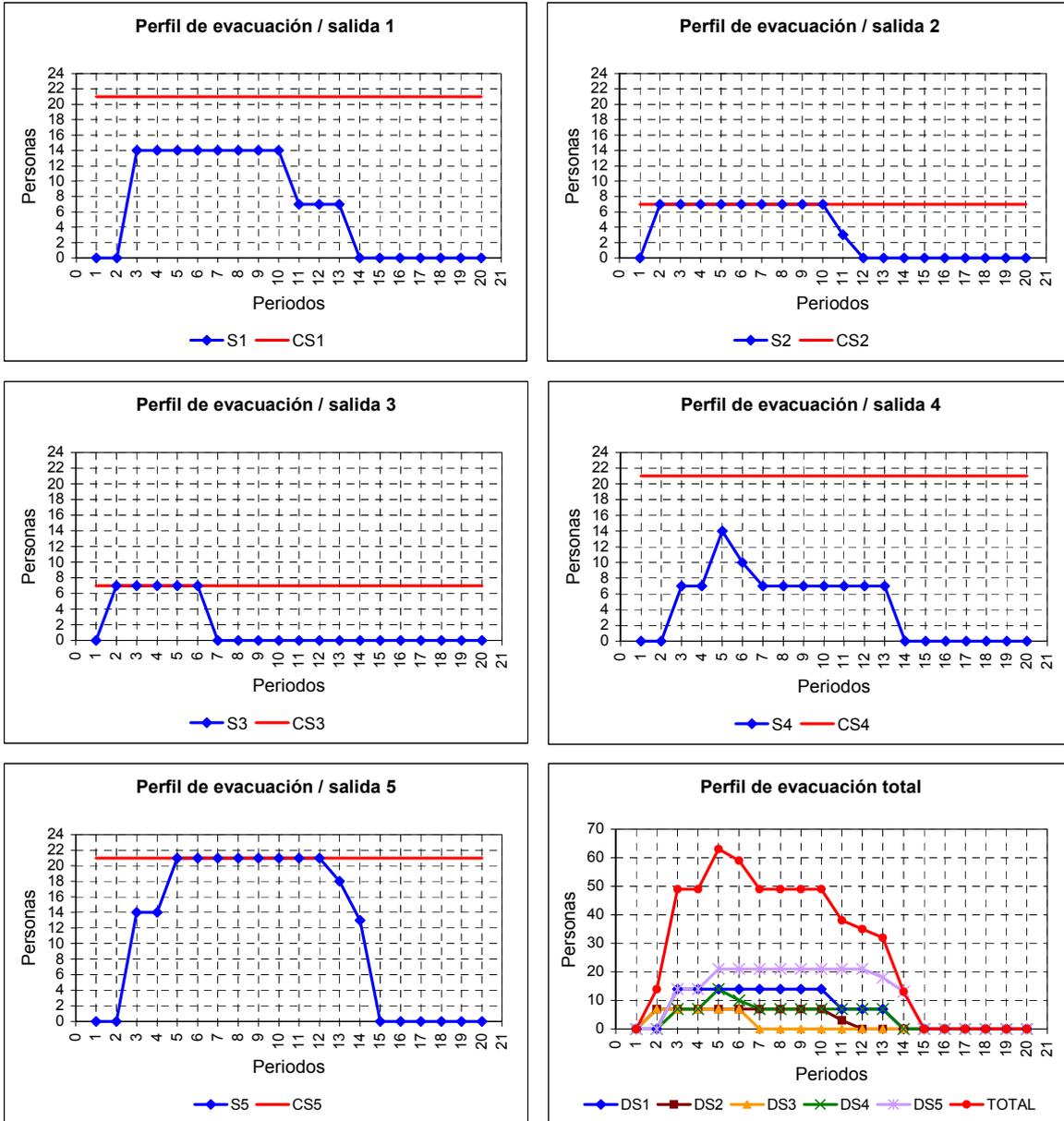


Figura 5.41 Análisis del perfil de evacuación

Otro elemento de análisis disponible son las tablas en las que puede observarse ocupación, flujos, retenciones o tiempos de circulación, en ellas puede efectuarse la lectura para cualquier periodo de cada una de estas magnitudes. De forma ilustrativa se muestra la tabla de ocupación de este problema en la figura 5.42.

OCUPACIÓN												
I	O1	O2	O3	O4	P1	P2	P3	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5
0	122	45	230	151	0	0	0	0	0	0	0	0
1	122	45	230	151	0	0	0	0	0	0	0	0
2	108	31	209	137	14	14	21	0	7	7	0	0
3	94	21	188	123	14	21	17	14	14	14	14	14
4	80	14	167	109	14	21	14	28	21	21	24	35
5	66	7	146	95	14	28	7	42	28	28	31	56
6	52	0	125	81	14	28	7	56	35	35	38	77
7	38	0	104	67	14	28	7	70	42	35	45	98
8	24	0	83	53	14	28	7	84	49	35	52	119
9	10	0	62	39	14	28	7	98	56	35	59	140
10	3	0	41	25	14	21	7	112	63	35	66	161
11	0	0	21	11	14	20	7	119	66	35	73	182
12	0	0	7	0	14	10	7	126	66	35	80	203
13	0	0	0	0	3	4	0	133	66	35	87	220
14	0	0	0	0	0	0	0	133	66	35	87	227
15	0	0	0	0	0	0	0	133	66	35	87	227

Figura 5.42 Análisis de la ocupación

El análisis del problema debería seguir planteando otras estrategias de evacuación, en principio se ha resuelto la estrategia óptima, sin embargo debe planearse la posibilidad de una evacuación en la cual se establezcan prioridades, así en la figura 5.43 se muestra la situación en la cual se da prioridad a la evacuación de la dependencia O1

EXITE3 DEFINICIÓN DE ESTRATEGIAS CASO 7				
ESTRATEGIAS	DEPENDENCIAS ORIGEN			
	O1	O2	O3	O4
OPTIMA				
DEFINIDA				
Prioridad O1	1	2	2	2
Prioridad O2	2	1	2	2
Prioridad O3	2	2	1	2
Prioridad O4	2	2	2	1

Figura 5.43 Definición de estrategias de evacuación

Los resultados que resultan de operar con dicha estrategia son idénticos a los obtenidos en el caso anterior, lo mismo sucede al establecer prioridad de evacuación en las dependencias 2 y 4, tan solo al establecer prioridad en la evacuación de la dependencia 3 resultan pequeñas diferencias, con ello podría concluirse que la estructura de las salidas de este recinto es realmente adecuada, con la única objeción analizada en apartados anteriores de dotar a los recintos origen de mayor capacidad de acceso a los pasillo para mejorar el rendimiento de las salidas 1 y 4.

