

## **CAPITULO 2: MODELOS PARA EL ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DE LAS PERSONAS Y LA EVACUACIÓN DE EDIFICIOS**

### **2.1 INTRODUCCIÓN: ANÁLISIS DE LOS ANTECEDENTES Y CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS**

El problema de la evacuación de edificios de la forma que se contempla en la actualidad y se estudia en esta tesis se debe a las últimas décadas. Sin embargo, hace miles de años que el hombre ocupa edificios cuyos diseños le permiten acceder y abandonar los mismos de forma aparentemente razonable, J. J. Fruins [45] cita que una de las primeras referencias escritas sobre las dimensiones de las salidas en los edificios se halla recogida en el Talmud, el libro de las leyes del hebraísmo, en las construcciones egipcias se observa la repetición y evolución de elementos de diseño que ponen de manifiesto la transcripción de determinados conceptos. Si bien, existe una evidencia más palpable en el mundo greco romano en las construcciones que tenían importantes aforos como circos, teatros o coliseos, en los cuales se lograban tiempos de evacuación razonablemente cortos. Desde entonces hasta nuestros días se han construido grandes edificios y se ha organizado la circulación en ciudades aplicando conceptos arquitectónicos y urbanísticos como los de Leonardo da Vinci, quien recomendaba en las ciudades vías de circulación separadas para personas y carruajes. Todo esto no puede vincularse con la concepción actual del problema.

El problema de la evacuación de edificios aparece cuando se efectúan grandes construcciones, se valora la vida y la seguridad de las personas y se tiene conciencia de la problemática que supone su evacuación, ello sucede entre los años cincuenta y sesenta. Posteriormente se observa la utilidad de aplicar los conceptos desarrollados en grandes edificios a aquellos que tienen características menos extraordinarias, los estudios de las condiciones de evacuación se realizan en edificios deportivos, centros educativos, centros de enseñanza, etc., es entonces cuando realmente se produce una extensión del problema.

Resulta difícil efectuar una referencia histórica sobre cual es el primer documento que estudia propiamente el problema de la evacuación de edificios desde la perspectiva actual. Según cita S. Gwyne [61], uno de los trabajos precursores podría ser un estudio sobre el incendio del Teatro de Edimburgo ocurrido el año 1911. En los Estados Unidos se produjeron una serie de accidentes en los cuales perdieron la vida gran número de personas y tuvieron un gran impacto mediático, concretamente en los incendios del Iroquois Theatre, el Conococt Grove y el Beverly Hills Super Club, donde se demostró que la causa de estos trágicos accidentes podía atribuirse directamente a unas causas concretas y simples que podían evitarse. Propició un notable esfuerzo investigador, especialmente orientado a identificar los factores que podían haber reducido sensiblemente e incluso evitado la existencia de vícti-

mas en accidentes de características similares, en realidad era un decidido esfuerzo para mejorar la seguridad de las personas en los edificios.

Desde los años sesenta hasta la actualidad se ha desarrollado toda una escuela de expertos en seguridad e ingeniería contra incendios dedicada al estudio de casos en los cuales se realiza un análisis detallado y riguroso de accidentes de significativa magnitud. Pionero en esta actividad se encuentra J. L. Bryan [9], otras destacadas aportaciones más recientes se deben a G. Proulx y R. Fahy [142]. En una línea similar se hallan trabajos de T. Shields [174] y H. Frantzich [42] centrados en el estudio riguroso de simulacros y ensayos. Los primeros estudios relevantes en los que se formaliza el comportamiento de las personas implicadas en siniestros se realiza en la década de los 70 y se deben a J. L. Bryan [8] en Estados Unidos, y D. Canter [14], J. Sime [179], Breaux [5] y Wood [213] en Reino Unido. Las primeras estimaciones de las magnitudes que definen el movimiento de las personas se hallan recogidas en un informe de la London Transport Board [92] del año 1953. Sin embargo, estudios actualmente máspreciados se publican entre los años 1970 y 1985, se deben a trabajos independientes realizados en diferentes países por diversos autores: Predtechenskii y Milinskii [129], J. Fruins [45] y J. Pauls [119], en ellos se basan la mayoría de los modelos utilizados en los estudios de evacuación actuales.

De forma inmediata y paralela a la aparición de los modelos de locomoción, se presentan propuestas de formulaciones que cuantifican diversas magnitudes de la evacuación de edificios: Tiempos de circulación, tiempos de espera, etc.... Sin embargo una solución realmente próspera se produce entorno a los años 80 al tratar el problema como una red de flujo, la primera aportación en esta línea se debe a G. N. Berlin [4]. La formulación matemática del problema para hallar la solución óptima se atribuye a R. L. Francis y L. P. Chalmet [35], se sitúa en el ámbito determinístico y desencadena a inicios de los ochenta un importante esfuerzo investigador que tiene el soporte del National Bureau of Standards, se aportan soluciones notables y desde esta perspectiva el problema a finales de los ochenta se considera prácticamente resuelto, si bien, mejoras en su formulación y solución extienden el problema hasta la actualidad.

Las magnitudes que definen el movimiento de las personas tienen un carácter marcadamente aleatorio, las modelizaciones estocásticas resultan mucho más reales y se plantea el problema mediante redes de colas. Esta tendencia se enfrenta con la dificultad que entraña la resolución de las mismas y en algunos casos se aproximan mediante simulación, esta línea de investigación nace en la mitad de los ochenta, destacando en ella los trabajos de J. M. Smith [180] y G. G. Lovas [95]. Otra tendencia desarrollada de forma simultánea con las dos anteriores consiste en utilizar directamente la simulación, una de las primeras publicaciones corresponde a R. Fahy [29] y se realiza también a principios de los ochenta, sucediéndole los trabajos de D. Alvord [1], B. M. Levin [90] y otros autores. La simulación es la línea que más ha prosperado en los últimos años, evolucionando de forma paralela a las herramientas informáticas que le dan soporte, en esta línea destacan autores como P. Thompson [198] y especialmente E. Galea [48] con una notable y extensa labor investigadora. Finalmente otra disciplina desde la cual también se ha abordado el problema es la psi-

ciología, estudiando el comportamiento individual y del grupo en situaciones críticas, en este marco son fundamentales los trabajos de D. Canter [14] y J. Sime [179]. En la figura 2.1 puede observarse una primera clasificación.

<b>DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</b>	
<b>Estudio de casos:</b>	J. L. Bryan, R. Fahy, G. Proulx T. Shields, H. Frantzich
<b>Documentos básicos:</b>	Manual de Protección Contra-incendios (NFPA) Handbook of Fire Protection Engineering (NFPA SFPE) Instrucciones Técnicas ITSEMAP NTP Instituto Nacional de Seguridad e Higiene Trabajo Publicaciones varias ( J. L. Posada ) Evacuation From Fires (P. DiCicco)
<b>MODELOS MOVIMIENTO PERSONAS Y ESTIMACIONES BÁSICAS</b>	
<b>Doc. preliminares:</b>	Reino Unido (Informe LBT) Primeros trabajos URSS (IAAA, VNIPO, MISI) Japón (K. Togawa) Canadá (M. Galbreath)
<b>Modelos empíricos:</b>	URSS ( Predtechenski& Milinski)
<b>Mod. experimentales:</b>	Canadá (J. Pauls) Estados Unidos (J. Fruins)
<b>Síntesis:</b>	Reino Unido (Melineek & Booth) Estados Unidos NFPA-SFPE (Nelson & McLennan)
<b>MODELOS DE OPTIMIZACIÓN</b>	
<b>Determinísticos:</b>	Procedimiento gráfico (R. L. Francis) Utilización redes de flujo (G. N. Berlin) Formulación analítica (ChalmetR, Francis y Saunders) Programa EVACNET (T. Kisko, R. L. Francis) Desarrollo modelos (W. Choi) Algoritmos polinomiales (B. Hope, E. Tardos) Algoritmos multicriterio (M. Kostreva)
<b>Estocásticos:</b>	Formulación y desarrollo (J. M. Smith) Generalización y desarrollo (K. Talebi, J. M. Smith) Modelos multiobjetivo: (G. Lovas)
<b>MODELOS DE SIMULACIÓN</b>	
<b>Modelos preliminares:</b>	Arizona State University (T. O'Leary, J. M. Gratz) B-FIRES II (Natinall Bureu of Standards)
<b>Simulación discreta:</b>	Evacsim ( G. M. Lovas) MOBILIZE (J. Weinrotth) Trabajos diversos: UPC (A. Guasch) U. Valladolid (A. Gento)
<b>Evacuación y efectos:</b>	EXITT (B. M. Levin) EXIT 89 EXODUS (E. Galea) SIMULEX (P. Thompson, E. Marchant)
<b>Otros programas:</b>	CRISP-II, EVACS, WAYOUT, FIERA,....
<b>OTRAS DISCIPLINAS</b>	
<b>Comportamiento</b>	D. Canter D. Sime
<b>Multidisciplinares</b>	National Research Council (G. Proulx) Lund Institute of Technology (H. Frantzich) Elementos de evacuación (J. L. Posada)

**Figura 2.1** Evolución de los estudios sobre la evacuación de edificios

## 2.2 ANÁLISIS DE LOS DOCUMENTOS BÁSICOS

En el apartado anterior se ha efectuado un análisis cronológico de las principales investigaciones, agrupadas en las diferentes áreas desde las que se ha estudiado el problema de la evacuación de edificios de una forma general. En el presente apartado se pretende iniciar un conocimiento más profundo del problema a partir del estudio de casos y de los documentos generalistas que aportan una visión global del problema.

### 2.2.1 Estudio de casos

Las personas que se enfrentan a una situación de emergencia se dice que se hallan sometidas a una situación compleja que en gran medida desconocen y que cambia rápidamente. La pregunta que los analistas se formulan, es cuál es la actitud que puede esperarse de las personas sometidas a estas circunstancias. Son posibles muchas hipótesis, y si bien es factible cualquier opinión, se consideran más verosímiles las conclusiones que presentan el estudio de casos. En esencia, el estudio de casos se centra en el análisis de accidentes que han sucedido, sin embargo también se han analizado actuaciones en situaciones menos severas.

En el Manual de Protección Contra Incendios [108] se publica, que en un estudio realizado en la Gran Bretaña sobre 952 incendios, en los cuales se entrevistaron 2.193 individuos en el mismo lugar de los hechos, se concluía que las actitudes más adoptadas eran la evacuación del edificio incendiado, la lucha contra el incendio, el aviso a otros individuos y el aviso a los servicios de extinción de incendios y salvamento. En un estudio de características similares, realizado en Estados Unidos, en el que se estudiaban 335 incendios en el cual fueron entrevistadas 584 personas, reflejaba que las conductas eran similares.

Uno de estos trabajos dedicado al estudio de casos que ofrece una idea clara de la forma, el rigor y la validez de dichos documentos es el realizado por J. L. Bryan [9], fue publicado en el año 1983, analiza el comportamiento de los ocupantes del hotel MGM Grand Hotel de la ciudad de Clark County en el estado de Nevada en el incendio ocurrido el 21 de Noviembre del año 1980. El incendio ocurrió cuando el hotel estaba ocupado por unas 2.000 personas de las cuales 85 perecieron y resultaron heridos 778 clientes y 7 empleados. El estudio detalla que el incendio se declaró a las 7 horas y 10 minutos de la mañana, siguiendo instrucciones la telefonista del hotel a las 7 horas y 18 minutos avisó a los servicios de extinción del condado de Clark, inmediatamente a las 7 horas y 20 minutos las telefonistas se vieron obligadas a abandonar la centralita a consecuencia del humo existente en la zona. El fuego se propagó rápidamente en toda la planta baja, el calor y el humo se expandieron desde la zona del casino por las juntas sísmicas, los huecos de los ascensores y escaleras hasta los 21 pisos de las habitaciones del hotel. El calor llegó a ser tan intenso en el último piso que se activaron automáticamente los rociadores del hall delante de los ascensores. Debido a la rápida evacuación del personal encargado del servicio de telefonía, los clientes no fueron advertidos ni por el sistema de altavoces interno ni por el sistema de alarma, de forma inmediata tan solo pudieron abandonar el edificio las personas que se hallaban levantadas y vestidas y habían advertido la situación de peligro, unos 300 ocupantes fueron res-

catados mediante helicópteros y 900 por los servicios de extinción de incendios.

El estudio de J. L. Bryan se realizó sobre los resultados de la encuesta enviada a los 1960 ocupantes registrados en el hotel la noche en que ocurrió el incendio, excluyendo los familiares de ocupantes fallecidos así como los extranjeros. Respondieron el cuestionario 554 personas, lo que supone el 28,3% de los ocupantes. En dicha encuesta se estudiaron las características y el comportamiento de los ocupantes en función de sus características sociales y culturales, la forma como conocieron la existencia del fuego en el hotel y el tiempo que tardaron en tener dicha información, las cinco primeras acciones que emprendieron al tener conocimiento de la existencia del incendio, la forma en que se expandió el humo, la situación de cada ocupante en el hotel, la posible utilización de las escaleras, las obstrucciones encontradas en los medios de evacuación, el tipo de asistencia recibida para poder abandonar el hotel, el tiempo de demora que se produjo en el inicio de las actuaciones, si estuvieron esperando en la habitación, etc... Estos estudios se prodigaron en el análisis de diferentes siniestros en los años setenta, sus resultados ofrecieron una perspectiva de las actitudes que previsiblemente adoptan las personas en una situación de emergencia de características similares y da lugar a un **conjunto de prescripciones** que se detallan explícitamente e incorporan las normativas de seguridad contra incendios.

Con posterioridad, esta fórmula de investigación de siniestros se ha seguido utilizando, destaca el estudio de la evacuación del World Trade Center de Nueva York a consecuencia del atentado del año 1993, trabajo [28] realizado por R. Fahy y G. Proulx. En la línea de investigación de situaciones menos severas resultan los trabajos T. Shields del SERT del Ulster y H. Frantzich de Lund en Suecia, ambos autores han realizado importantes investigaciones filmando el desarrollo de evacuaciones y procediendo a su análisis. Puede afirmarse que en la actualidad existen importantes investigaciones en marcha dedicadas a conocer las demoras en el inicio de la evacuación, la incidencia de la formación, el impacto de diferentes aspectos de la señalización, las características de la señal de alarma, etc. Una destacada línea de investigación es el foro multidisciplinar denominado WTC Evacuation Study Initiative, que a consecuencia de los atentados del 11 de septiembre de 2001 del World Trade Center de Nueva York trata de conocer directamente las actuaciones en una evacuación de edificios en condiciones extremas y poder determinar las medidas más apropiadas que se deben adoptar en dichas situaciones.

### 2.2.2 Análisis descriptivo del problema

Las normativas sobre la seguridad de las personas en los edificios desarrolladas en la mayoría de los países, se basan en la **aplicación de conceptos investigados y contrastados**. Las normativas son redactadas por comités de expertos con un conocimiento profundo del problema, mientras que los técnicos en muchos casos pueden aplicarlas de una forma relativamente rutinaria. Determinados autores, a menudo los propios expertos que han participado en la confección de las normas, han sintetizado investigaciones y el conocimiento sobre la evacuación de edificios ofreciendo documentos que aportan un conocimiento global de la materia, en este contexto se hace referencia a documentos confeccionados o supervisados

por expertos como J. L. Bryan, J. Pauls, J. L. Posada y P. DiCicco. En la actualidad existen documentos que realizan un análisis global del problema de la evacuación de edificios, podría afirmarse que son los documentos que normalmente se encuentran en primera instancia al buscar información, pueden ser documentos específicos o bien capítulos de libros de propósito más general como la seguridad contra incendios. En general aportan el conocimiento de determinados aspectos como son las actuaciones que cabe esperar de las personas en situaciones de emergencia, los principales factores que se consideran en este problema, las magnitudes fundamentales de los individuos y su capacidad de locomoción.

El primer documento que se cita como trabajo que ofrece una visión general y a su vez detallada del problema es el **Manual de Protección Contra Incendios** de NFPA [108] en España publicado por Ediciones Mapfre, en la sección 7 del citado manual, a lo largo de cuatro capítulos se efectúa un análisis completo del problema. En el primer capítulo se estudia la previsible actuación de los ocupantes: El proceso de decisión al tener conocimiento de una situación de emergencia y las decisiones que se adoptan. En el capítulo 2 se realiza un análisis concreto para el diseño de los edificios basado en la norma NFPA 101 denominada Life Safety Code, se especifican los elementos fundamentales del proyecto así como las dimensiones y las características de la locomoción de las personas para definir posteriormente los elementos arquitectónicos de un edificio implicados en la evacuación del mismo, estableciendo finalmente sus condiciones de diseño. En el capítulo 3 se indican las directrices a seguir para dirigir el desplazamiento de las personas así como la planificación de los simulacros de emergencia. Por último, en el capítulo 4 se efectúa un análisis de los medios de transporte utilizados en los edificios, ascensores, escaleras mecánicas y pasillos móviles.

Otro documento con un planteamiento general como el citado en el apartado anterior pero con un contenido de nivel técnico más elevado, se encuentra en **The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering** [109] editado por NFPA y SFPE, en tres capítulos de la sección tercera confeccionados por cualificados expertos, se analiza el problema. En el capítulo 12 [13] realizado por J. L. Bryan se efectúa un estudio del comportamiento de las personas en una situación de humo e incendio, en primer lugar se presentan los datos experimentales obtenidos en el análisis de diversos incendios y luego se analizan posibles actitudes como el pánico, la reentrada en el edificio, el desplazamiento a través del humo, la colaboración en operaciones de rescate y la extinción. En el capítulo 13 [120] confeccionado por J. Pauls se estudia el movimiento de las personas, se efectúa una recopilación de diferentes propuestas para modelizar el movimiento de las personas y se desarrollan conceptos para planificar evacuaciones. En el capítulo 14 [107] H. Nelson y H. McLennan concretan elementos cuantitativos para estimar los tiempos de evacuación y dimensionar las salidas, detallando al final del capítulo aspectos de las actitudes de los ocupantes.

Una visión general del problema con ciertos aspectos más concretos sobre elementos de diseño que los documentos anteriores, y desde la perspectiva de la legislación vigente en España se halla en el trabajo de J. L. Posada [127], en el cual a partir del concepto “**Los medios de evacuación de los edificios**” se recopilan diversos modelos del movimiento de

las personas, procedimientos de cálculo de la evacuación y finalmente se detallan aspectos constructivos y de diseño, como el dimensionado de los pasillos, escaleras, puertas, etc. básicamente según la norma NBE-CPI-82, en vigor en el momento de confección del documento. También el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo a través de la publicación **Notas Técnicas de Prevención** aporta un planteamiento general de los aspectos esenciales del problema mediante la NTP-46 [206] titulada “Evacuación de edificios”, además se resume y concreta la aplicación de la NBE-CPI-82, en las NTP-390 [30] y NTP-395 [31] que tienen por título “La conducta humana ante situaciones de emergencia: análisis de proceso en la conducta individual” y “La conducta humana ante situaciones de emergencia: la conducta colectiva”, en los que desde el punto de vista de la psicología se realiza un análisis de los factores que intervienen en la conducta tanto individual como colectiva y se realizan una serie de recomendaciones para la organización de autoprotección, selección de equipos de emergencia y sistemas de información y en la NTP-436 [122] denominada “Cálculo estimativo de vías y tiempos de evacuación”, basándose en la NBE-CPI-96 se establecen los principales conceptos derivados de la norma y un procedimiento básico para estimar tiempos de evacuación. Las **Instrucciones Técnicas de ITSEMAP FUEGO**, entidad perteneciente al Instituto de Seguridad Integral de la Fundación Mapfre Estudios, ofrece las publicaciones [72] y [73] de carácter eminentemente técnico para el cálculo de la evacuación de edificios, además de establecer requisitos constructivos y de diseño de los mismos. Es sin ningún tipo de dudas una publicación utilizada por muchos de los profesionales con responsabilidad en el diseño de edificios.

Finalmente en el libro “**Evacuation from Fires**” [22] publicado por la editorial Baywood en el año 2003, en nueve capítulos se efectúa un análisis global del problema que va más allá de los simples planteamientos normativos, Crandall presenta seis principios para planificar la seguridad contra incendios desde un punto de vista arquitectónico, analizada según la perspectiva de la norma “National Building Code”. Jennigs determina la organización de una evacuación de emergencia en edificios de oficinas y los medios técnicos necesarios. Gwine, Galea, Owen y Lawrence estudian los factores que se consideran en un modelo de evacuación, puede decirse que en el momento de su confección se efectúa un “estado del arte” del problema y se detalla la implementación de estos conceptos en el programa de simulación EXODUS. Gupta analiza la forma de abandonar un edificio cuando existe una limitación de tiempo para evacuar el mismo, determinada por la expansión de humos, gases tóxicos u otros fenómenos físicos. Tanaka, Hagiwara y Mimura analizan en función de la ocupación, la necesidad de la existencia de dos o más salidas así como el efecto de ellas en el nivel de seguridad. Donegan, Taylor, Christie y Livesey desarrollan un algoritmo para evaluar lo que denominan “resistencia de una salida”, que globalmente aplicado a un edificio permite evaluar la dificultad de su evacuación. Shields, Boyce, Silcock y Dunne analizan el efecto que supone en la evacuación de un edificio la existencia de personas discapacitadas desplazándose en sillas de ruedas. Lo y Deng analizan la forma de abandonar edificios de pública concurrencia en caso de incendio y la necesidad de establecer medidas de seguridad complementarias. Finalmente Hodgens analiza los criterios a seguir para establecer el número de ascensores de que debe disponer un edificio a partir de la legislación de la

ciudad de Nueva York, contemplando además con gran rigor, la problemática que supone la evacuación de personas discapacitadas.

## **2.3 MODELIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DE LAS PERSONAS Y ESTIMACIONES BÁSICAS**

En este apartado se sitúan los trabajos que aportan modelos sobre la locomoción de las personas y la evacuación de edificios. Los primeros estudios científicamente rigurosos sobre el movimiento de las personas y la evacuación de edificios se realizaron después de la segunda guerra mundial, en estos primeros modelos se aportan expresiones analíticas para estimar el tiempo de evacuación de determinados recintos o bien se modela el movimiento de las personas. En general el tiempo de evacuación se calcula a partir del número de personas que se hallan en el edificio y de la anchura de los elementos de paso, resultando una formulación analítica más o menos compleja.

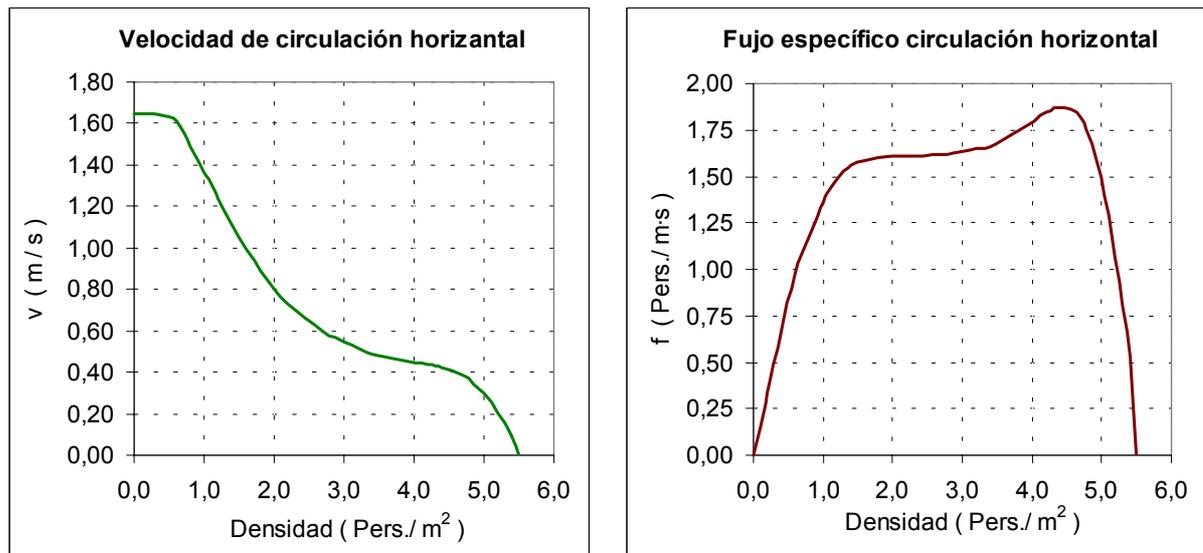
### **2.3.1 Documentos preliminares**

Como documentos preliminares se clasifican las primeras publicaciones que establecen las dimensiones de las personas, las formulaciones que determinan su capacidad de locomoción y las fórmulas matemáticas que estiman magnitudes características de este problema.

#### **2.3.1.1 Primeras publicaciones realizadas en el Reino Unido**

Existe una serie de documentos de los cuales se tiene referencia a través de otras publicaciones posteriores, aparte de su posible relevancia en la historia del estudio del problema de la evacuación de edificios, el principal interés de los mismos radica en las aportaciones que realizan de forma más o menos fundamentada. Uno de estos documentos es la publicación titulada “Post-War Building Studies” del año 1952 en la que haciendo referencia al estudio del incendio del “Empire Palace Theatre” de Edimburgo ocurrido en el año 1911, se establece que el tiempo máximo para poder abandonar una determinada dependencia debe ser inferior a 2,5 minutos, dicha magnitud se justifica en el supuesto que las personas sin adiestramientos específicos no soportan tiempos de espera superiores para abandonar dependencias afectadas por una situación de emergencia. A partir de dicha acotación del tiempo de evacuación se recomienda una anchura mínima de las salidas de un recinto de 21 pulgadas (0,53 metros) por cada 40 ocupantes.

Durante bastantes años el tiempo máximo de 2,5 minutos ha sido una referencia para el diseño de las salidas, años después en el mismo Reino Unido la General Service Administration estableció que las personas expuestas en el entorno de un incendio debían poder alcanzar un área protegida en 90 segundos, contabilizados desde el instante en que se produce la señal de alarma, así mismo, debían situarse en una posición segura en 5 minutos en recorrido descendente o bien en 1 minuto en recorrido ascendente, magnitudes justificadas por la fatiga que les suponen a la mayoría de ocupantes dichos desplazamientos.



**Figura 2.2** Modelos de locomoción según el informe de la London Transport Board

Otro documento ampliamente referenciado en publicaciones posteriores es el “Second Report of the Operational Research Team on the Capacity of Footways” [92] desarrollado por la London Transport Board y publicado en el año 1958, en él se determina que las velocidades de circulación y los flujos son función de las densidades de ocupación, tal y como puede comprobarse en la figura 2.2 en la que se reproducen las gráficas presentadas en dicho trabajo. Según dicho informe resulta que cuando los ocupantes de un edificio se hallan suficientemente separados unos de otros y circulan hacia un objetivo se desplazan a una velocidad de 3,5 millas por hora, (94 metros por minuto). Así mismo cuando los ocupantes se agrupan el módulo de ocupación se reduce, la densidad de ocupación aumenta, con lo que la velocidad decrece rápidamente. Concretamente para una densidad de 2 personas por metro cuadrado, resulta una velocidad de unos 50 metros por segundo. Se considera valor crítico la densidad de 3,6 personas por metro cuadrado, en cuyas proximidades la velocidad resulta inferior a 30 metros por segundo hasta anularse completamente si la densidad sigue aumentando. De la misma forma, se afirma que el pánico en las vías de evacuación se produce cuando se alcanzan densidades de 4,3 personas por metro cuadrado.

En estos modelos la capacidad de las vías de evacuación se determina considerando las dimensiones de los individuos, la proyección horizontal de una persona se representa mediante una elipse cuyos semiejes menor y mayor miden 18 y 24 pulgadas respectivamente (0,4572 y 0,6096 metros). Otro aspecto característico de estos primeros estudios es la creencia que las personas para desplazarse en situaciones críticas forman hileras perfectas y que las anchuras de las salidas de los recintos deben definirse en funciones proporcionales a las dimensiones de las personas, así en pasillos de 4 pies ( 1,22 metros) se consideraba que se formaban dos hileras situándose unas personas exactamente detrás de las otras, mientras que cuando las anchuras superaban los 6 pies ( 1,83 metros) se ajustaban los espacios según puede observarse en la figura 2.3.

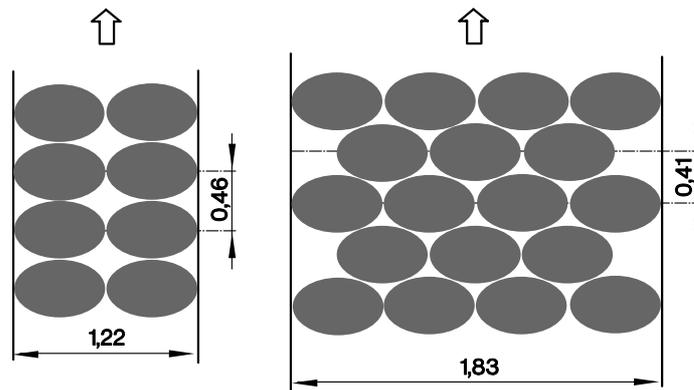


Figura 2.3 Alineación en el desplazamiento horizontal en pasillos

### 2.3.1.2 Primeros trabajos realizados en la URSS

Predtechenskii y Milinskii [129] citan que el Instituto de Arquitectura de la Academia de las Artes de la Unión Soviética (IAAA) fue la primera organización que de manera formal en aquel país se dedicó sobre una base científica al estudio del tráfico de las personas. Dicha organización en una publicación del año 1937 hace referencia al estudio de más de 200 casos en edificios de pública concurrencia sobre los que basa sus conclusiones.

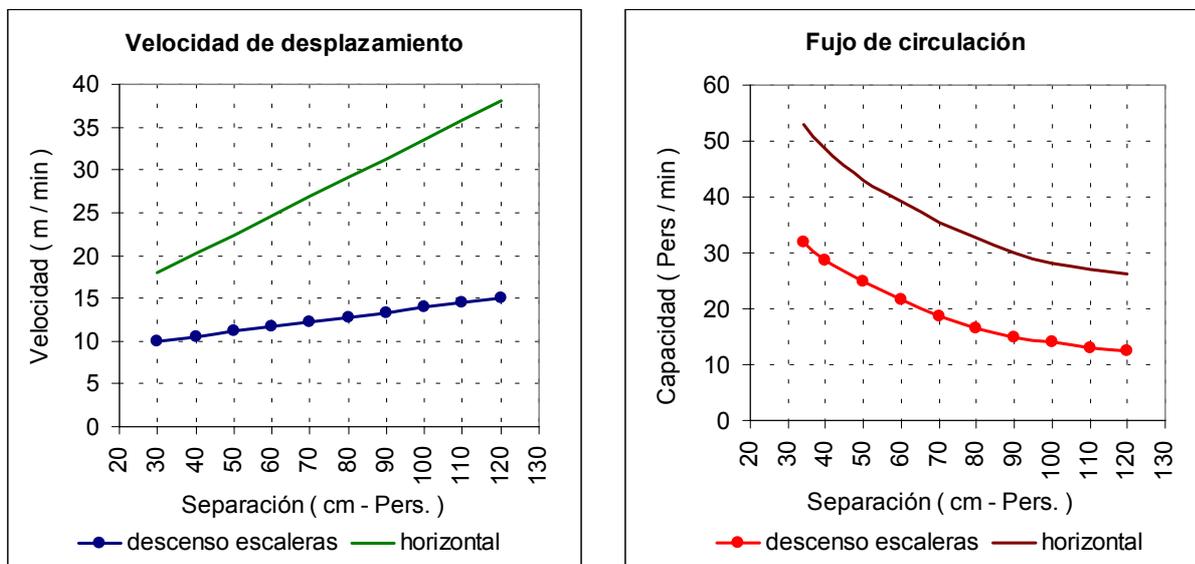


Figura 2.4 Modelos de circulación Instituto de Arquitectura Academia artes URSS

En el IAAA se determinó que la capacidad de circulación en una unidad elemental de flujo, representada por las personas dispuestas perfectamente en fila, el flujo está comprendido entre las 25 y las 50 personas por minuto, además se observó que existe un límite físico o capacidad máxima de ocupación de 4 ó 5 personas por metro lineal. Sobre esta base de consideraciones se estableció que el flujo no es menor de 25 personas por minuto y la velocidad de circulación horizontal no es inferior de 17 metros por minuto. Para el descenso de escaleras dicha magnitud varía entre 11 y 16 metros por minuto y subiendo, el valor medio de la velocidad se reduce un 20 %. Finalmente, como conclusión, en el diseño de edificios

se recomienda considerar para la circulación horizontal velocidades de 16 metros por minuto, para el descenso de escaleras 10 metros por minuto y para el ascenso de escaleras 8 metros por minuto. En la figura 2.4 se reproducen las gráficas presentadas en dicho trabajo.

En la misma URSS entre 1946 y 1948 el Instituto de Investigaciones del Servicio de Protección Contra Incendios de la Unión (VNIPO) pretendió establecer los principios que definen el movimiento de las personas. Se realizaron más de 6000 observaciones en todo tipo de edificios, públicos, industriales, educativos, recreativos, etc. Observaron la importancia de las dimensiones de la proyección horizontal de las personas, dicha magnitud básicamente es función de la edad y de la indumentaria de los individuos, se recomendaba definir la velocidad y el flujo a partir de la superficie ocupada definida como la suma de las áreas de las proyecciones horizontales de todos los individuos presentes en el recinto en el cual se produce la circulación. Dicha tasa de ocupación no es necesariamente constante y se expresa además que varía en diferentes puntos de un recorrido de evacuación. En el estudio se establecen los valores de los flujos más probables en diferentes tipos de edificios y se obtienen expresiones de las velocidades de circulación en función de la tasa de ocupación. Se considera de especial interés la expresión que proporciona la capacidad de paso de las puertas de diferentes anchuras mediante la expresión (2.1), en la cual  $\gamma_e$  es la tasa de circulación específica o flujo superficial específico que cruza un elemento de paso (metros por minuto), cuando la tasa de ocupación del recinto es  $\rho$ , la velocidad de desplazamiento es  $v$  (metros por minuto) y se utiliza un factor de corrección  $\kappa$  cuyo valor debe obtenerse de la tabla 2.1 reproducida del documento original.

$$\gamma_e = \rho v + \kappa \quad (2.1)$$

La tasa de circulación de un elemento de paso (metros cuadrados por minuto) es igual al producto de la tasa de circulación específica (metros por minuto) por la anchura mínima  $w$  (metros):

$$\gamma = w \gamma_e \quad (2.2)$$

En función de las magnitudes iniciales se obtiene mediante la expresión (2.3) el valor de la tasa de circulación en metros cuadrados por minuto:

$$\gamma = w (\rho v + \kappa) \quad (2.3)$$

Finalmente, entre los años 1965 y 1966 cabe destacar los estudios desarrollados por el Instituto de Investigaciones en la Construcción, el V.V. Kuybishev MISI. Básicamente se trata de investigaciones orientadas a definir las bases teóricas de los principios que gobiernan la mecánica de la locomoción de las personas para el ulterior desarrollo de métodos de cálculo, la técnica utilizada consistió en la filmación de diferentes flujos de evacuación. Esta forma de proceder, de la que existe referencia de la realización de 800 experiencias, permitió realizar además de un análisis cuantitativo una serie de consideraciones cualitativas. Las investigaciones del MISI ratificaron plenamente y validaron estadísticamente las formulaciones del VNIPO para la circulación horizontal y en escaleras. Todos estos trabajos condujeron a una formulación de la locomoción de las personas que de forma definitiva desa-

rollaron Predtechenskii y Milinskii [129], formulación analizada en próximos apartados.

$\rho$ ( m <sup>2</sup> / m <sup>2</sup> )	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,92
$\kappa$ ( m / minuto)	0,00	0,80	1,55	1,87	1,80	1,47	1,12	0,80	0,50	0,40

**Tabla 2.1** Factor de corrección de la densidad de ocupación en el modelo VNIPO

### 2.3.1.3 Primeros modelos desarrollados en el Japón

En el trabajo [197] Kikuji Togawa publicado por el Building Research Intitute de Tokio en el año 1955, además de proporcionar modelos para estimar las magnitudes que definen el movimiento de las personas se ofrecen fórmulas para calcular tiempos de evacuación y el número de personas que abandonan el edificio en un tiempo determinado. Concretamente mediante la expresión (2.4) se determina la velocidad de circulación horizontal  $v$  expresada en metros por segundo, en función de la densidad de ocupación  $d$  (personas por metro cuadrado), en la cual  $v_0$  es una constante cuyo valor para la circulación horizontal es de 1,3 metros por segundo.

$$v = v_0 d^{-0,8} \quad (2.4)$$

Mediante la expresión (2.5) se establece la relación entre el flujo específico  $f$  (personas por metro y segundo), la velocidad y la densidad de ocupación.

$$f = v d \quad (2.5)$$

De la misma forma el flujo específico puede expresarse en función de la constante  $v_0$  y la densidad de ocupación, resultando (2.6).

$$f = v_0 d^{0,2} \quad (2.6)$$

La expresión (2.7) determina la magnitud del flujo  $F$  (personas por segundo) que se registra en una salida de un recinto cuya anchura mínima de paso es  $w$  (metros)

$$F = f w \quad (2.7)$$

Este mismo trabajo propone fórmulas para estimar el tiempo total necesario para la evacuación de los ocupantes de un edificio según un modelo general, mediante la expresión (2.8) y un modelo simplificado a partir de (2.9), se trata de dos expresiones notables.

$$z = \frac{1}{w'f'} \left( k - \sum_1^n \int_0^{z_0} f_j(t) w_j \phi_j(t) dt \right) + z_0 \quad (2.8)$$

Mediante  $z$  se designa el tiempo (segundos) necesario para la evacuación del edificio,  $f'$  es el valor del flujo específico (personas por metro y segundo) que se registra en la puerta de salida del edificio,  $f_j(t)$  el valor del flujo específico (personas por metro y segundo) en la salida  $j$  origen de evacuación en el instante  $t$ ,  $k$  el número total de ocupantes del edificio,

$w'$  la anchura mínima de paso de la puerta de salida del edificio,  $w_j$  la anchura de la salida  $j$ ,  $\phi_j(t)$  la proporción de personas que utilizan la salida  $j$  respecto del número total de ocupantes del recinto en el instante  $t$ ,  $n$  el número de salidas de que dispone el recinto,  $v$  la velocidad de circulación y  $z_0$  el tiempo de recorrido necesario para desplazarse desde el origen de evacuación hasta la salida.

La expresión (2.8) indica que el tiempo de evacuación del edificio es igual a la suma del tiempo que tardan en poder abandonar el mismo los  $k$  ocupantes más el tiempo que se tarda en llegar hasta la salida, sin embargo puede observarse que mientras unos ocupantes ya están saliendo otros todavía se dirigen a la salida, en cuyo caso, para contabilizar dicho solapamiento se procede a restar del total de ocupantes del edificio las personas  $p(z_0)$  que ya han abandonado el mismo durante el tiempo que han necesitado el resto para llegar hasta la salida.

Una formulación más simple que permite aproximar el tiempo de evacuación, la proporciona la expresión (2.9), en ella  $l_j$  representa el recorrido o distancia existente entre el punto origen de evacuación hasta la puerta de salida del edificio. En esta formulación simplificada se puede observar que el tiempo de evacuación se estima contabilizando solamente el tiempo preciso para salir del edificio y el tiempo de recorrido, evitando considerar el posible solapamiento entre ambos tal como se ha contemplado en (2.8).

$$z = \frac{k}{w_j f'} + \frac{l_j}{v_j} \quad (2.9)$$

El número de personas que habrían podido abandonar el edificio en un tiempo  $z_0$  se obtiene según la expresión (2.10), y se le denomina “función de agrupación”.

$$p(z_0) = \sum_1^n \int_0^{z_0} f_j(t) w_j \phi_j(t) dt \quad (2.10)$$

#### 2.3.1.4 Primeros modelos desarrollados en el Canadá

En el año 1969 en el “National Research Council of Canada” se publicó el trabajo [47] titulado “Time of Evacuation by Stairs in High Buildings” cuyo autor era Murdoch Galbreath, trabajo que aparece referenciado en documentos posteriores en numerosas ocasiones, aporta una formulación simple para estimar el tiempo necesario para la evacuación de grandes edificios. M. Galbreath con una clara influencia en el documento “Post-War Building Studies” del año 1952 considera que el tiempo de evacuación  $z$  de un gran edificio puede estimarse mediante la suma de dos intervalos, el tiempo necesario para que los ocupantes del edificio se sitúen en el espacio disponible en la escalera de evacuación más el tiempo necesario para la descarga desde la base de la misma hasta una posición exterior segura, da lugar a la expresión (2.11), en ella  $k_0$  es el número de personas situadas en la primera planta,  $k_E$  el número de personas que pueden situarse en la escalera considerando que cada individuo ocupa 0,28 metros cuadrados,  $f_u$  es el flujo unitario que se registra en la salida (personas por

unidades de anchura en escalera y segundo) y  $w_u$  el número de unidades de anchura de la escalera (unidades de anchura de escalera).

$$z = \frac{k_0 + k_E}{f_u w_u} \quad (2.11)$$

En esta formulación puede observarse que no se considera el tiempo invertido en los desplazamientos hasta las salidas, ni el concepto de flujos unitarios. Realmente ésta es una propuesta más simple que la formulación de K. Togawa, que no puede utilizarse indiscriminadamente para determinar el tiempo de evacuación de cualquier edificio, si bien aplicada a ciertas configuraciones puede garantizar buenos resultados, de hecho durante bastantes años ha sido utilizada existiendo constancia de aplicaciones adecuadamente contrastadas.

### 2.3.1.5 Resolución de ramificaciones y confluencias

Hasta el momento existen fórmulas para estimar tiempos de evacuación, sin embargo no se ha tratado la manera de abordar ramificaciones y confluencias. En un trabajo [16] publicado en el año 1978, B. Cathney plantea mediante un ejemplo una posible forma de estimar tiempos de evacuación de una situación en la cual varias dependencias conducen a una vía de circulación común en la cual se prodigan otras incorporaciones. Este trabajo dio lugar a una publicación [205] del Centro Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo del año 1984 cuyo autor es J. L. Villanueva.

### 2.3.2 Los Modelos desarrollados en la Unión Soviética

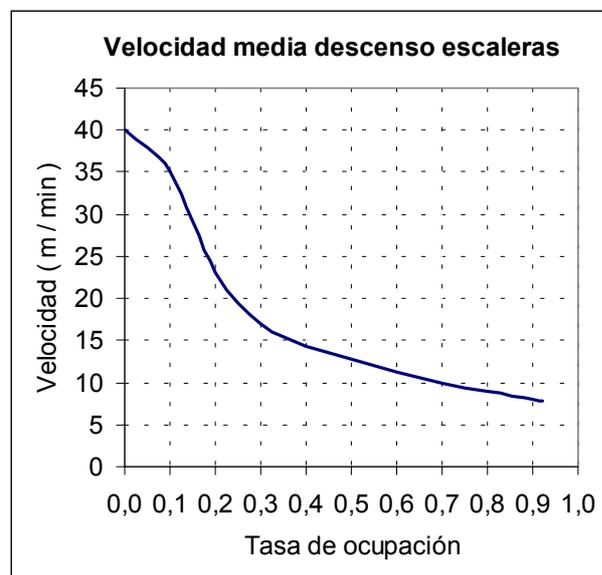
Paralelamente al desarrollo de los trabajos de K. Togawa, en la Unión Soviética se desarrollaron diversas investigaciones, algunas de ellas citadas como trabajos preliminares. Posiblemente por la dificultad del idioma y el contexto político de aquella época fueron poco difundidos y en consecuencia poco referenciados en el mundo occidental. El trabajo de Predtechenskii y Milinskii [129] que parece recopilar y sintetizar todos aquellos trabajos, fue publicado en Moscú en el año 1969 y traducido al inglés y publicado en EEUU en 1978 con el título "Planning For Foot Traffic Flow in Buildings". Se trata de un trabajo riguroso de enorme detalle, es un tratado estructurado en once capítulos y tres apéndices en los que se establecen unos principios para planificar la circulación de las personas en los edificios, se proponen modelos matemáticos que definen el movimiento de las personas, se describe la mecánica del desplazamiento y por último, se presentan fórmulas para estimar tiempos de evacuación en multitud de situaciones, así como un conjunto de casos. A pesar de que la aplicación de los modelos matemáticos que plantean no es simple, actualmente se siguen utilizando en programas de cálculo y de simulación de la evacuación de edificios.

Una característica común de los modelos desarrollados en la URSS, de la misma forma que se ha descrito en los documentos preliminares del IAAA, el MISI y el VIINPO, es la definición de la ocupación de los recintos a partir de la tasa de ocupación  $\rho$ , y los flujos mediante la tasa de circulación  $\gamma$ .

Edad y vestuario	Dimensiones elipse humana		Área de la proyección horizontal
	Eje mayor (m)	Eje menor (m)	
ADULTO			
Vestuario de verano	0,46	0,28	0,101
Vestuario primavera / otoño	0,48	0,30	0,113
Vestuario de invierno	0,50	0,32	0,126
JOVEN	0,38 - 0,43	0,22 - 0,27	0,066 - 0,091
NIÑO	0,30 - 0,34	0,17 - 0,21	0,040 - 0,056
OTROS			
Adulto con un niño en brazos	0,75	0,48	0,283
Adulto con equipaje en la mano	0,90 - 1,10	0,75	0,530 - 0,648
Adulto con mochila	0,50	0,80	0,314
Adulto con paquetes	0,75	0,40	0,236

**Tabla 2.2** Dimensiones de las personas para el cálculo de la superficie ocupada

La tasa de ocupación  $\rho$  obtenida según (2.12) consiste en la relación que existe entre la superficie total determinada por la proyección de los ocupantes presentes en el recinto y la superficie física del mismo, siendo  $s_i$  la superficie en metros cuadrados ocupada por cada uno de  $k$  los individuos presentes, cuyas dimensiones pueden obtenerse en la tabla 2.2, y  $a$  representa la superficie del recinto también en metros cuadrados. Puede observarse que se trata de un número adimensional que indica la proporción de superficie ocupada.



**Figura 2.5** Velocidad media bajando escaleras según Predtechenskii y Milinskii

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{i=k} s_i}{a} \quad (2.12)$$

Predtechenskii y Milinskii realizaron alrededor de 3.500 mediciones de la densidad de ocu-

pación y las velocidades de circulación. En el documento original se observa una notable dispersión de las observaciones, que los autores justifican por la notable diferencia en las características individuales entre los ocupantes de los respectivos edificios que fueron objeto de las mediciones. Para la velocidad media de circulación bajando escaleras se obtiene una gráfica como la de la figura 2.5. Para determinar la velocidad en vías de circulación horizontales en función de la tasa de ocupación, proponen la expresión empírica (2.13), siendo  $v(\rho)$  el valor de la velocidad media cuando la tasa de ocupación está comprendida entre 0 y 0,92.

$$v(\rho) = 112\rho^4 - 380\rho^3 + 434\rho^2 - 217\rho + 57 \quad 0 \leq \rho \leq 0,92 \quad (2.13)$$

Para la circulación a través de puertas se dispone de la ecuación (2.14) que proporciona la velocidad en metros por minuto, en la cual existe el factor de corrección  $m_0$ , cuyo valor lo proporciona (2.15), donde  $\rho_0$  es el valor de la tasa de circulación que se produce al cruzar una puerta.

$$v_0(\rho) = [v(\rho)] m_0 \quad (2.14)$$

$$m_0 = 1,17 + 0,13 \text{ sen}(6,03\rho_0 - 0,12) \quad (2.15)$$

La velocidad media en el descenso de escaleras en metros por minuto, se obtiene mediante la expresión (2.16). En la misma el valor del coeficiente de corrección  $m_1$  lo proporciona (2.17) siendo  $\rho_1$  el valor de la tasa de circulación.

$$v_1(\rho) = [v(\rho)] m_1 \quad (2.16)$$

$$m_1 = 0,775 + 0,44 e^{-0,39\rho_1} \text{ sen}(5,61\rho_1 - 0,224) \quad (2.17)$$

De igual forma para la velocidad media de ascenso de escaleras se proponen las expresiones (2.18) y (2.19) respectivamente, siendo  $\rho_2$  el valor de la tasa de circulación.

$$v_2(\rho) = [v(\rho)] m_2 \quad (2.18)$$

$$m_2 = \begin{cases} 0,785 + 0,09 e^{-0,345\rho_2} \text{ sen} 15,7 \rho_2 & 0 \leq \rho \leq 0,60 \\ 0,785 + 0,10 \text{ sen}(7,85\rho_2 + 1,57) & 0,60 \leq \rho \leq 0,92 \end{cases} \quad (2.19)$$

Finalmente en el estudio de las magnitudes de locomoción analizan la gran diferencia que puede existir en la velocidad de desplazamiento de las personas según el tipo de desplazamiento, en condiciones normales, bajo la presión que supone una situación de emergencia, de paseo o confort. Para incluir dicha consideración de comportamiento, proponen unos factores de corrección denominados coeficientes  $\mu$  del tipo de movimiento, definido según la expresión (2.20), en la cual  $v$  corresponde al valor de la velocidad denominada normal y  $v'$  el valor en circunstancias especiales como confort o emergencia.

$$\mu = \frac{v'}{v} \quad (2.20)$$

En condiciones de circulación normales el valor del coeficiente  $\mu$  es la unidad, por el contrario, en situaciones de emergencia  $\mu_e$  será superior a la unidad y en desplazamiento de confort  $\mu_c$  será inferior a la unidad. Resulta de gran interés disponer de estimaciones debi-

damente ajustadas del valor del coeficiente  $\mu$  para cada una de las posibles situaciones, los autores proponen los valores de la tabla 2.3.

Tipo de circulación	$\mu_e$	$\mu_c$
Circulación horizontal y paso de puertas	$1,49 - 0,36 \rho$	$0,63 - 0,25 \rho$
Descenso de escaleras	1,21	0,76
Ascenso de escaleras	1,26	0,82

**Tabla 2.3** Factor de corrección  $\mu$  según modelo de Predtechenskii y Milinskii

En este trabajo, para el estudio de los flujos de circulación utilizan las magnitudes de la tasa de circulación específica  $\gamma_e$  en metros cuadrados por minuto y la tasa de circulación  $\gamma$  en metros por minuto, ambas definidas por las expresiones (2.1) y (2.2). El documento prosigue estableciendo las bases para el cálculo del tráfico de las personas en diferentes elementos, se modela la circulación en pasillos, estrechamientos y ensanchamientos, las variaciones de la configuración de la circulación, el estudio de confluencias y ramificaciones, así como el análisis de la formación de colas, entre otros. Seguidamente se analizan algunos de ellos. Así por ejemplo, se establece a partir de un modelo gráfico la evaluación del tiempo necesario para la evacuación en un pasillo al cual pretenden acceder  $k$  personas, con una anchura mínima de paso  $w$  y una longitud de  $l$ ,  $t_1$  corresponde al valor del tiempo de desplazamiento en el pasillo en minutos y  $t_2$  el necesario para el acceso al mismo, también en minutos. En la expresión (2.21) se observa como el tiempo  $z$ , suma de ambos tiempos, contabiliza el tiempo necesario para que el último ocupante acceda al pasillo y a partir del mismo el tiempo necesario para efectuar el recorrido hasta la salida del mismo.

$$z = t_1 + t_2 \quad (2.21)$$

Mediante un análisis gráfico es posible estimar en cada instante la ocupación de la vía de evacuación así como el número de personas que pretenden acceder a la misma. Para la circulación en los pasillos se establecen las condiciones de continuidad en estrechamientos y ensanchamientos, bajo el principio de continuidad en el número de personas que entran y las que salen en un elemento de paso se formulan las relaciones que existen entre las tasas de circulación  $\gamma_e$  (metros / minuto) y anchuras  $w$ . Sea  $k_i$  el número de personas que acceden a un elemento de paso y  $k_{i+1}$  las que abandonan el mismo, siendo  $k_i = k_{i+1}$ . A partir de la condición de continuidad resultan las expresiones (2.23) y (2.24). Si la ocupación de la dependencia  $i$  se expresa en función de tasa de circulación  $\gamma_i$  (metros cuadrados por minuto) y de la densidad de ocupación  $d$  (personas por metro cuadrado) resulta:

$$k = \gamma_i t d$$

Dado que la operación se realiza de forma simultánea, considerando idénticos los tiempos y las densidades:

$$\gamma_i t d = \gamma_{i+1} t d$$

necesariamente resulta la igualdad en las tasas de circulación de entrada  $\gamma_i$  y de salida  $\gamma_{i+1}$

expresadas como:

$$\gamma_i = \gamma_{i+1} \quad (2.22)$$

En función de las tasas de circulación específicas  $\gamma_e$  (metros cuadrados por minuto) y de las anchuras de paso  $w$  en metros:

$$\gamma_{e,i} w_i = \gamma_{e,i+1} w_{i+1} \quad (2.23)$$

puediendo expresarse la magnitud de la tasa de circulación específica resultante  $\gamma_{e,i+1}$  de la siguiente forma:

$$\gamma_{e,i+1} = \gamma_{e,i} \left( \frac{w_i}{w_{i+1}} \right) \quad (2.24)$$

En las confluencias y en las ramificaciones se establecen las relaciones matemáticas de las tasas de circulación resultantes a partir de unas determinadas condiciones iniciales, así en una confluencia las tasas de circulación de entrada dan lugar a una determinada tasa de circulación de salida en metros por minuto. Sean  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$  los valores de las tasas de entrada y  $\gamma_{n+1}$  la de salida:

$$\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n = \gamma_{n+1} \quad (2.25)$$

en general podría expresarse:

$$\sum_{i=1}^n \gamma_i = \gamma_{n+1} \quad (2.26)$$

Si la tasa de salida  $\gamma_{n+1}$  se expresa en función de la tasa específica  $\gamma_e$  y de la anchura  $w$ :

$$\gamma_{n+1} = \gamma_{e,n+1} w_{n+1}$$

resulta finalmente la expresión (2.27).

$$\gamma_{e,n+1} = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma_i}{w_{n+1}} \quad (2.27)$$

De forma similar es posible establecer las relaciones entre las tasas de circulación cuando existen ramificaciones.

Otros aspectos analizados de forma exhaustiva son los cambios en las tasas de circulación en una vía de evacuación y la formación de retenciones. De forma simple, cuando la tasa de circulación específica resultante es mayor que la tasa máxima que puede producirse:

$$\gamma_{e,i+1} > \gamma_{e,MAX}$$

necesariamente se van a producir retenciones. Es posible evaluar la rapidez con que éstas se producen, si se evalúa el número de personas que acceden al punto  $i$ , expresado en función

de la tasa de circulación en metros cuadrados por minuto, en un intervalo  $dt$  en minutos:

$$\gamma_i dt = \gamma_{e,i} w_i dt \quad (2.28)$$

De igual forma, el número de personas que abandonan el punto  $i+1$  en el mismo intervalo  $dt$  viene dado por:

$$\gamma_{i+1} dt = \gamma_{e,i+1} w_{i+1} dt \quad (2.29)$$

La magnitud de la cola expresada como tasa de ocupación en metros cuadrados vendrá dada por la expresión (2.30).

$$\psi = \rho w \Delta l \quad (2.30)$$

En consecuencia, si  $\rho$  es la densidad de un elemento de área elemental:

$$w_{i+1} \Delta l d\rho = (\gamma_{e,i} w_i - \gamma_{e,i+1} w_{i+1}) dt \quad (2.31)$$

Integrando se obtiene la magnitud de la retención en un determinado intervalo de tiempo entre 0 y  $t$ , en el cual se produce la tasa de ocupación inicial  $\rho_0$  y el valor correspondiente a una determinada magnitud  $\rho$ :

$$\int_{\rho_0}^{\rho} w_{i+1} \Delta l d\rho = \int_0^t (\gamma_{e,i} w_i - \gamma_{e,i+1} w_{i+1}) dt \quad (2.32)$$

De esta forma, si:

$$\int_{\rho_0}^{\rho} d\rho = \rho - \rho_0$$

resulta posible evaluar el tiempo que tarda en producirse el colapso de la salida, sencillamente se produce cuando se alcanza el valor máximo de la tasa de ocupación  $\rho_{MAX}$ , resolviendo (2.32):

$$w_{i+1} \Delta l (\rho_{MAX} - \rho_0) = (\gamma_{e,i} w_i - \gamma_{e,i+1} w_{i+1}) t$$

El tiempo en minutos será el proporcionado por la expresión (2.33).

$$t = \Delta l \left( \frac{w_{i+1} (\rho_{MAX} - \rho_0)}{\gamma_{e,i} w_i - \gamma_{e,i+1} w_{i+1}} \right) \quad (2.33)$$

En otras secciones del trabajo se analizan las mezclas de flujos, aspectos más prácticos para el cálculo de la evacuación de recintos, edificios de estructuras definidas, para finalmente en una última sección establecer formulaciones que faciliten el diseño de edificios.

### **2.3.3 Modelos experimentales**

Estos modelos se basan en someter gran cantidad de datos relativos a la velocidad y al flujo de circulación a un análisis estadístico. Mediante un análisis de regresión se establece una relación funcional que liga la velocidad de circulación y el flujo con la densidad de ocupación. La densidad es la variable independiente y la velocidad de circulación y el flujo son las variables características o respuesta. Para la aplicación ortodoxa de estos modelos es preciso verificar que las observaciones siguen una ley normal, así como la condición de homogeneidad de la variancia.

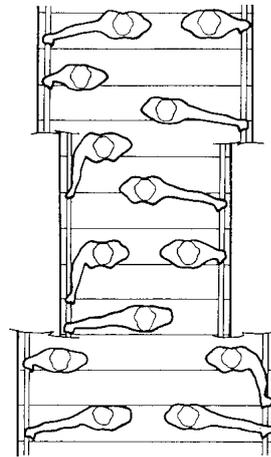
#### **2.3.3.1 Modelización empírico-experimental de J. Pauls**

Las investigaciones y publicaciones de J. Pauls posiblemente sean de las más referenciadas y que gozan de mayor reconocimiento. El propio J. Pauls en el año 1987 en la introducción de un artículo [119] publicado en la revista “Fire Safety Journal” titulado “Calculating Evacuation Times for Tall Buildings” establece una clasificación de sus investigaciones, las cuales divide en tres etapas: De la primera etapa que va de los años 1969 al 1974 existen tan solo algunas publicaciones, entre los años 1976 y 1979 es cuando sus publicaciones, participaciones en congresos y conferencias son más notorias y numerosas, produciéndose a partir de los años 80 el máximo reconocimiento mundial, y desarrollando a partir de este momento una destacada labor de consultoría. La labor de investigación la inició observando muchas evacuaciones en edificios de oficinas, siendo cuidadoso en registrar cada ejercicio con gran detalle, posteriormente trataba de relacionar los modelos teóricos establecidos con todo aquello que había registrado, observando numerosos errores en los conceptos sobre el comportamiento en escaleras, configuración y diferencias en las magnitudes máximas y medias de los flujos. Esta rigurosa labor de observación la realizaba situando numerosos observadores en los edificios durante los simulacros, dichos observadores previamente habían sido formados y registraban de forma minuciosa el instante y la incidencia observada. El análisis de esta información permitió contrastar diferentes hipótesis de otros autores y para establecer una serie de principios sobre la base de la experimentación.

En sus experimentos J. Pauls distingue dos tipos de evacuaciones, la denominada evacuación tradicional de un edificio, en la cual la totalidad de los ocupantes tratan de desplazarse desde sus posiciones originales hasta un lugar seguro de forma simultánea, siendo probables las aglomeraciones, retenciones e interferencias y la llamada evacuación selectiva, en la que se decide en cada instante quien debe iniciar la salida de cada recinto o de cada planta. Normalmente en esta última situación la evacuación empieza por los ocupantes afectados por una determinada contingencia, sigue con la evacuación de las plantas adyacentes y continúa con el resto de plantas posiblemente afectadas por el siniestro, la decisión de quienes y cuando deben salir, se decide en un puesto de control central que dispone de los medios adecuados para transmitir sus decisiones.

Uno de los aspectos que quedaron revocados con estas investigaciones fue el concepto de la alineación de los individuos. En documentos preliminares se había afirmado que en una

evacuación de emergencia las personas se desplazaban formando carriles, Pauls demuestra que la locomoción humana tiene mayor capacidad de adaptación, el desplazamiento de los individuos se ajusta de forma racional al espacio disponible. Para el descenso de las escaleras establece cuatro modelos que pueden observarse en la figura 2.6, siendo la distribución función de la anchura disponible. Los modelos de la figura corresponden a escaleras de 1,55, 1,20 y 1,90 metros, en ellas los ocupantes pueden ayudarse de los pasamanos.



**Figura 2.6** Desplazamiento escaleras

Otro de los aspectos destacados aportados por J. Pauls, es el concepto de ancho efectivo de un elemento de evacuación, que indica lo que debe considerarse anchura física de las vías de evacuación. Existe un efecto de comportamiento absolutamente determinante, de forma que las personas no utilizan la totalidad de la anchura de paso, normalmente dejan un espacio de margen o separación que no se utiliza, este ancho varía de unos elementos a otros. Existen tablas, como la tabla 2.4, con valores estimados del espacio que se acostumbra a dejar al lado de cada objeto.

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

**Tabla 2.4** Ancho efectivo de las vías de evacuación

Un aspecto curioso, más que objetivamente relevante, en sus investigaciones, es la circunstancia que para el estudio de los grandes movimientos de masas sirvieron de banco de pruebas los Juegos Olímpicos de Montreal del año 1976 y los de Juegos de Commonwealth de Edmonton del año 1978. J. Pauls proporciona, a partir del análisis de regresión de un conjunto de observaciones, la expresión (2.34) para estimar el flujo específico  $f$ . Conviene señalar que esta expresión está referida a la anchura en metros de ancho efectivo, siendo  $k_e$

el número de personas por metro de ancho efectivo.

$$f = 0,206 (k_e)^{0,27} \quad (2.34)$$

Basándose en la expresión anterior (2.34), para determinar el flujo en una escalera aplicando el concepto de ancho efectivo y considerando que la escalera dispone de pasamanos y que tiene una anchura  $w$ , resulta la expresión (2.35) expresada en personas por segundo.

$$F = 0,206 (w - 0,3) \left[ \left( \frac{k}{w - 0,3} \right)^{0,27} \right] \quad (2.35)$$

Las expresiones (2.34) y (2.35) son válidas cuando la ocupación es menor de 800 personas por metro de ancho efectivo. Si la ocupación es mayor y no se dispone de mejores estimaciones, puede considerarse el valor del flujo de 1,25 personas por metro, referidos al ancho efectivo de la escalera. Otra forma de contemplar las magnitudes de locomoción es a partir de la densidad de ocupación  $d$ , la expresión (2.36) es la propuesta realizada por Pauls para la velocidad de circulación en descenso en una escalera expresada en metros por segundo.

$$v = 1,08 - 0,29d \quad (2.36)$$

De la misma forma, a partir de la relación entre velocidades y flujos expresada en (2.5) se propone la formulación (2.37) para determinar el flujo en una escalera de 1,30 metros de ancho. Se observa que la densidad óptima para obtener el máximo flujo es la que corresponde a una densidad de 2 personas por metro cuadrado.

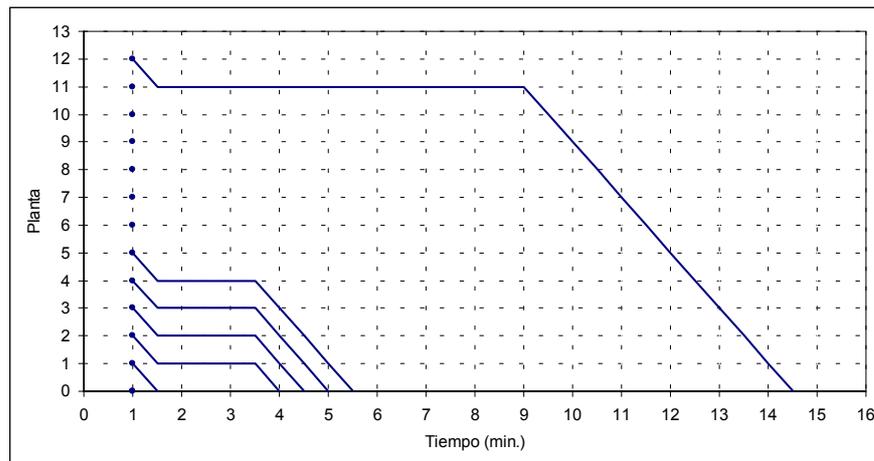
$$F = 1,26d - 0,33d^2 \quad (2.37)$$

Otra de las propuestas, es una expresión que permite estimar directamente el tiempo necesario para la evacuación de grandes edificios. Se trata de una forma contrastada de la cual se asegura que ha dado excelentes resultados, consiste en las expresiones (2.38), donde  $k$  es el número de personas que alberga el edificio y  $w_e$  la anchura efectiva de paso de la escalera en el punto de descarga. Ambas expresiones son válidas cuando el número de personas del edificio por metro de anchura de la escalera es mayor o menor de 800 personas, respectivamente.

$$\begin{aligned} z &= 2,00 + 0,0117 \left( \frac{k}{w_e} \right) & \left( \frac{k}{w_e} \right) &\leq 800 \\ z &= 0,70 + 0,0133 \left( \frac{k}{w_e} \right) & \left( \frac{k}{w_e} \right) &> 800 \end{aligned} \quad (2.38)$$

Para estimar el tiempo necesario para la evacuación de un edificio, propone contabilizar los tiempos de flujo y recorrido. Pauls utiliza una representación gráfica de la evacuación de un edificio ciertamente interesante (figura 2.7). Otra situación derivada de la gráfica anterior sería la situación de una evacuación en la que se procede a la representación de la evacuación de la planta supuestamente afectada por el siniestro y luego las posiblemente afecta-

das, normalmente se trata de las plantas superiores y luego las inferiores.



**Figura 2.7** Gráfico de la evacuación incontrolada de un edificio de 12 plantas

Existen multitud de detalles aportados por este autor tratados de forma rigurosa, por ejemplo, prueba que cuando los ocupantes utilizan ropa de abrigo los flujos se reducen entre un 6 y un 10 %, cuando las paredes de las escaleras presentan una ostensible rugosidad el flujo se reduce un 7% respecto de escaleras de distinta geometría y finalmente, si la descarga de la escalera se realiza en vestíbulos el tiempo de evacuación se incrementa ligeramente.

### 2.3.3.2 El Modelo experimental de J. J. Fruins

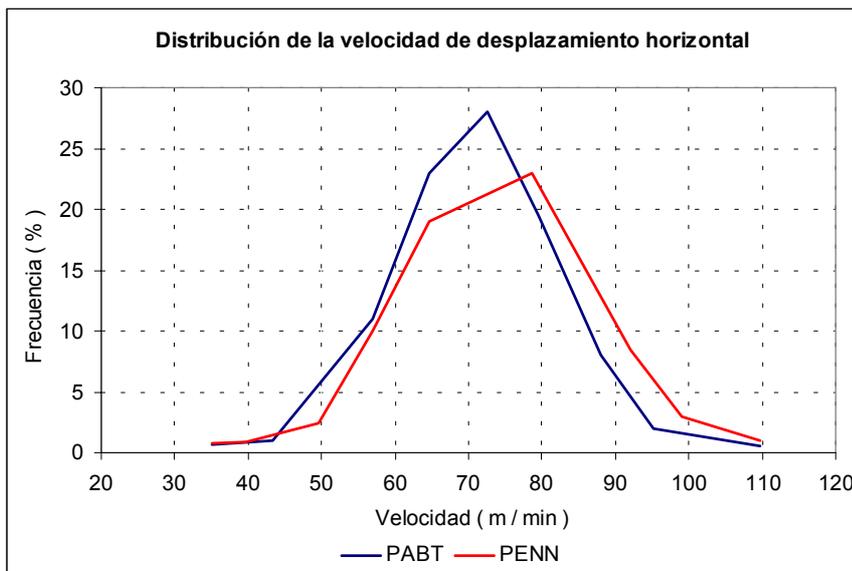
John J. Fruins desarrolló sus investigaciones en los Estados Unidos, aproximadamente en la misma época que J. Pauls realizaba las suyas en el Canadá. Globalmente en ciertos aspectos sus trabajos guardan una cierta similitud y las conclusiones son similares. La publicación más significativa es el documento "Pedestrian Planning and Design", publicado por la Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners en el año 1971 y reeditado en 1987, se trata de un libro estructurado en ocho capítulos en los que inicialmente se contemplan aspectos históricos sobre el diseño de las salidas de los edificios, se estudian los principios de la locomoción humana y se realizan propuestas para el diseño de entornos urbanos.

En un principio en el trabajo de Fruins se razona que para un análisis cualitativo de entornos peatonales, es preciso conocer las características y capacidades de desplazamiento de las personas. En su análisis considera evidente que las dimensiones de los individuos determinan la anchura de puertas, pasillos o escaleras y la conducta en aceptar o rechazar la proximidad de otras personas determina la capacidad de los recintos. Las dimensiones de las personas se consideran a partir del concepto de elipse humana y se realiza un análisis ergonómico para el estudio de la locomoción, entre otros muchos aspectos se considera en el desplazamiento de los individuos dos zonas, la estrictamente necesaria para desplazarse llamada "pacing zone" y la zona de influencia para percibir, evaluar y reaccionar denominada "sensory zone", dicha zona depende de la edad, el sexo, las condiciones físicas y tiene una relación directa con la velocidad de desplazamiento. El consumo calórico al andar a

paso normal es menor de 100 calorías por milla.

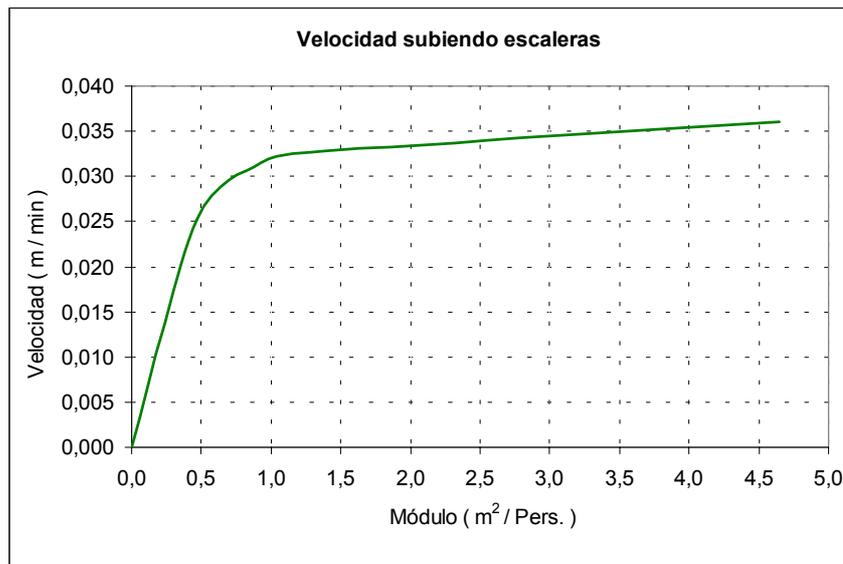
Un aspecto relevante de este autor, es su preferencia en trabajar con el módulo de ocupación, magnitud inversa de la densidad. El módulo de ocupación indica el número de metros cuadrados de superficie que le corresponden a cada persona. Dado que operar con la densidad supone en la mayoría de casos trabajar con valores menores que la unidad, resulta más amigable operar mediante módulos de ocupación.

Se realizaron mediciones de la velocidad de desplazamiento mediante procedimientos fotográficos de gran número de personas, estas mediciones se realizaron en el Port Authority Bus Terminal y en la Pennsylvania Station en Nueva York, las técnicas de medición utilizadas merecen la adecuada credibilidad. Basándose en las mediciones obtenidas se estableció la representación de la velocidad de desplazamiento de las personas cuando no encuentran obstáculos, esta representación se realizó para la circulación horizontal, así como para el ascenso y descenso de escaleras. En la figura 2.8 puede observarse la forma que adopta dicha figura en el caso de desplazamiento horizontal, el aspecto sugiere una cierta tendencia hacia una distribución normal.



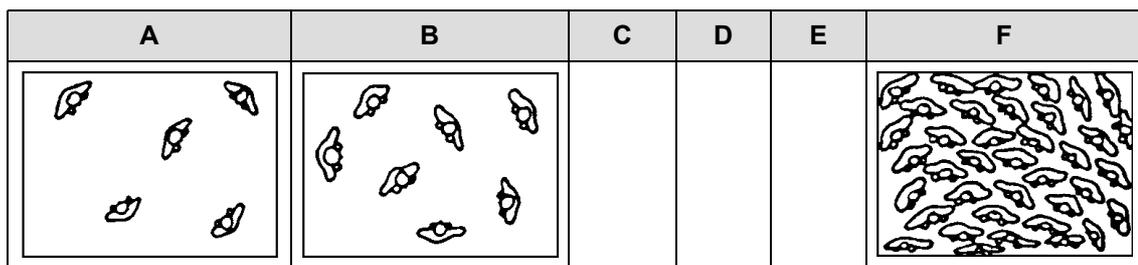
**Figura 2.8** Análisis de la velocidad de desplazamiento de las personas

Las mismas fuentes sirvieron para ajustar curvas a las velocidades y a los flujos de circulación en desplazamiento horizontal, subiendo y bajando escaleras. En la figura 2.9 se presenta la gráfica correspondiente a la velocidad de desplazamiento horizontal en función del módulo de ocupación.



**Figura 2.9** Velocidad de desplazamiento subiendo escaleras

La misma gráfica se obtiene para el ascenso y descenso de escaleras, puede observarse en el anexo 1. Si bien existen otras gráficas y conclusiones ciertamente interesantes, el aspecto más destacado es la incorporación del concepto de nivel de servicio y la tabulación de flujos y velocidades de desplazamiento en función de las mismas. Algunos autores consideran este modelo como un procedimiento gráfico, a partir de unas tablas se identifica la situación que corresponde y se determina el valor que corresponde. Se definen 6 niveles de servicio, identificados por las letras (A, B, C, D, E y F), a cada nivel de ocupación le corresponden unas magnitudes de locomoción. Puede observarse en la figura 2.10 y la tabla 2.5 que para cada uno de los seis niveles de ocupación se establecen las magnitudes correspondientes al módulo en metros cuadrados por persona y la separación entre personas en metros.



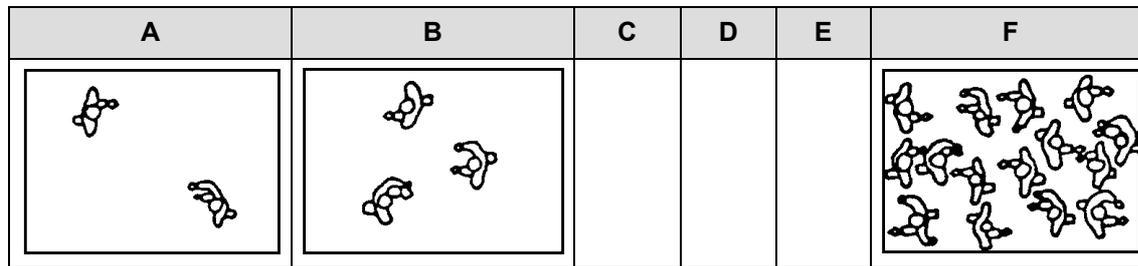
**Figura 2.10** Nivel de servicio de ocupación

Nivel de servicio	A	B	C	D	E	F
<b>Módulo (m<sup>2</sup>/persona)</b>	> 1.21	1.21 0.93	0.93 0.65	0.65 0.28	0.28 0.19	< 0.19
<b>Densidad (personas /m<sup>2</sup>)</b>	< 0.83	0.83 1.08	1.08 1.54	1.54 3.58	3.58 5.38	> 5.38
<b>Separación entre personas (m)</b>	> 1.22	1.22 1.07	1.07 0.91	0.91 0.61	< 0.61	contacto

**Tabla 2.5** Ocupación recintos

De la misma forma se analizan los parámetros correspondientes a la circulación horizontal

en pasillos. Puede observarse en la figura 2.11 y en la tabla 2.6, como se hallan tabuladas las velocidades de circulación en metros por minuto y los flujos en personas por metro y minuto, en función de la densidad de ocupación.

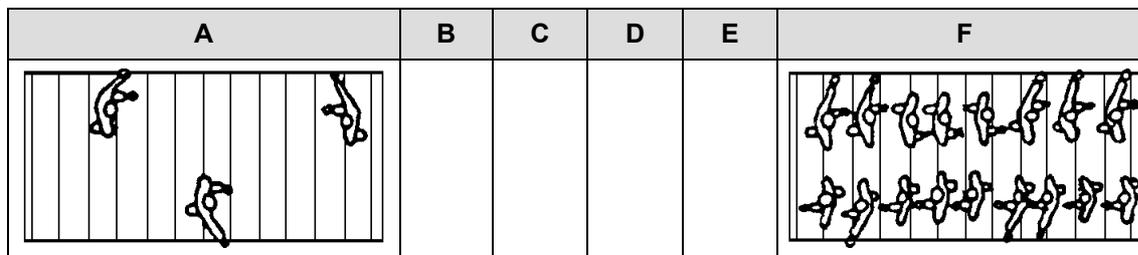


**Figura 2.11** Nivel de servicio para la circulación horizontal

Nivel de servicio	A	B	C	D	E	F
<b>Densidad</b> (personas / m <sup>2</sup> )	< 0.30	0.30 0.43	0.43 0.71	0.71 1.07	1.07 2.15	> 2.15
<b>Velocidad</b> (metros / minuto)	> 79.25	79.25 76.20	76.20 70.10	70.17 60.96	60.96 33.53	< 33.53
<b>Flujo específico</b> (personas / m min)	< 22.97	22.97 32.81	32.81 49.21	49.21 65.62	65.62 82.02	> 82.02

**Tabla 2.6** Circulación pasillos

De la misma forma que en la circulación horizontal, se halla documentada la circulación en escaleras. Puede observarse en la figura 2.12 y la tabla 2.7, como las magnitudes analizadas son exactamente las mismas que en el caso anterior.



**Figura 2.12** Nivel de servicio para la circulación en el descenso de escaleras

Nivel de servicio	A	B	C	D	E	F
<b>Densidad</b> (personas / m <sup>2</sup> )	< 0.53	0.53 0.71	0.71 1.07	1.07 1.53	1.53 2.69	> 2.69
<b>Velocidad</b> (metros / minuto)	> 38.01	38.01 36.58	36.58 35.05	35.05 32.00	32.00 25.91	< 25.91
<b>Flujo específico</b> (personas / m min)	< 16.40	16.40 22.97	22.97 32.81	32.81 42.65	42.65 55.77	> 55.77

**Tabla 2.7** Descenso escaleras

El trabajo de Fruins sigue analizando la capacidad de medios mecánicos de transporte de personas como las escaleras mecánicas, cintas de transporte, ascensores y en los capítulos finales de su publicación establece los elementos básicos para planificar entornos peatona-

les con un claro perfil hacia el diseño urbanístico.

### 2.3.4 Documentos de síntesis

Los documentos de síntesis constituyen una sistematización de criterios y métodos establecidos en documentos anteriores, llegando a establecer propuestas concretas para el cálculo del tiempo necesario para la evacuación de un edificio. Dentro de los documentos de síntesis son de destacar los modelos desarrollados en la Gran Bretaña, el modelo hidráulico, así como las aplicaciones de los modelos de Predtecheskii y Milinskii.

#### 2.3.4.1 Modelos desarrollados en la Gran Bretaña

En el año 1975 en el Reino Unido el Fire Research Station del Building Research Establishment publicó el documento "Analysis of evacuation times and the movement of crowds in buildings" cuyos autores son S. J. Melinek y S. Booth [104]. Se trata de una publicación de reconocido valor documental, citada en multitud de trabajos y destacado interés práctico. Dicha publicación está dividida en tres partes, en la primera se sintetizan los modelos para el estudio del movimiento de las personas desarrollados hasta este momento, en la segunda se propone una solución del problema de la evacuación de los edificios basada en diseñar áreas de refugio de capacidad suficiente para albergar la totalidad de ocupantes del edificio y finalmente en una tercera parte se proponen una serie de ecuaciones para estimar los tiempos de evacuación. En la primera parte se realiza una referencia detallada del valor de las magnitudes de locomoción utilizadas en otros países. A su vez, el estudio del movimiento de las personas se divide en tres partes, circulación horizontal, circulación en escaleras en movimiento ascendente y descendente y paso a través de salidas. En la tabla 2.8 se resumen algunos valores de las magnitudes de los flujos de circulación utilizados en diferentes países, se considera el desplazamiento en una vía de circulación en un solo sentido y los valores corresponden a un grupo de individuos en el cual no se diferencian aspectos individuales como la edad, el sexo, etc.

FUENTE	Flujo específico ( Pers. / m s)		
	Circulación horizontal	Ascendente escaleras	Descendente escaleras
Reino Unido	0,8 – 1,4	1,0	0,9
Francia	1,1 – 2,7	1,4	0,9-1,6
Estados Unidos	1,4	0,9 – 1,7	1,0 – 1,5
Expertos en locomoción Norteamericanos	1,5	0,9	1,1
Metro de Paris	1,7	1,0	1,3
Informe London Tansport Board	1,5	1,0	1,1

**Tabla 2.8** Magnitudes de locomoción documentadas por Melinek & Booth

En este documento se concluye que para la circulación en pasillos horizontales cuya anchura está comprendida entre 1,1 y 3 metros, el valor del flujo será de 1,5 personas por metro y

segundo, siendo una magnitud que fácilmente pueden superar muchas personas, es función de la densidad de ocupación y en el caso de que en los pasillos se produzca una circulación en ambos sentidos, los flujos se reducen ligeramente. De la misma forma en la tabla 2.9, para el desplazamiento en escaleras se realiza un planteamiento muy similar al efectuado para los pasillos, el valor de los flujos que se proponen son de 1,10 personas por metro y segundo en movimiento ascendente y 1,15 personas por metro y segundo en desplazamiento descendente, resultando muy significativas las reducciones en el flujo a consecuencia de la fatiga cuando los desplazamientos son largos, de igual forma es notable la disminución de la velocidad cuando existe circulación en ambos sentidos.

FUENTE	Dirección	Densidad (Pers./m <sup>2</sup> )	Velocidad media (m / s)	Flujo específico
Galbreath	Subiendo	0,7	0,8	0,55
		1,1	0,8	0,90
		1,8	0,7	1,25
		2,2	0,6	1,30
		2,6	0,5	1,30
		3,4	0,4	1,35
		4,1	0,3	1,25
		4,4	0,25	1,10
		5,4	0	0
Togawa	Subiendo	2,6	0,5	1,3
London Transport Board	Subiendo	2,05	0,51	1,05
	Bajando	1,94	0,59	1,15

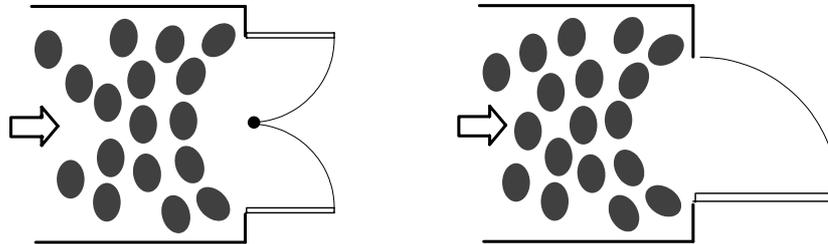
**Tabla 2.9** Magnitudes de circulación por escaleras documentado por Melinek & Booth

Cuando existe un grupo de personas situadas en posición inmediata a una salida tratando de abandonar la dependencia, para el paso de  $q$  personas a través de una salida cuya anchura mínima es de  $w$ , en la cual se estima que se produce un flujo específico  $f$ , resulta que se precisa un tiempo  $z$  que se obtiene según la expresión (2.39). Esta expresión es válida cuando la salida se halla congestionada, lo que se produce cuando los valores del flujo son aproximadamente de 1,7 personas por metro y segundo. Si este valor fuera próximo a las 2 personas por metro y segundo, se produciría el bloqueo de la salida.

$$z = \frac{q}{w f} \quad (2.39)$$

Se estudiaron las salidas de los recintos y los accesos a las escaleras, resultando que en principio las personas se adaptan automáticamente a la circulación por estrechamientos organizando sus posiciones e incrementando su velocidad de desplazamiento sin que supongan reducciones de flujo apreciables, sin embargo si un flujo de personas tiene que adaptarse a un punto de anchura sustancialmente inferior se producen una serie de arcos que producen una notable reducción de la capacidad de paso, el estudio de este fenómeno se halla referenciado en una publicación de I.A.S.Z. Peschl del año 1971 "Doorstromings-capaciteit van deuropeningen panieksituaties". Probablemente este fenómeno dependa de varios factores, los más inmediatos son la anchura de la salida y la variación de anchura que se produce

en el flujo de dicha salida, en la figura 2.13 trata de mostrarse como la retención debida a este efecto resulta mayor cuanto mayor es la reducción de paso, produciendo un efecto multiplicador sobre la capacidad de paso y el posible bloqueo de la salida., éste fenómeno se conoce con el nombre de círculos de Peschl.



**Figura 2.13** Modelo de retención en los estrechamientos

La segunda sección de dicho documento recibe el nombre de “Evacuación a un área protegida”, en ella se contemplan los aspectos normativos básicos que se argumentan con algunas formulaciones matemáticas simples, de todo ello se resumen algunos aspectos. Los conceptos que establecen las normativas son las distancias máximas hasta las salidas y las anchuras mínimas de pasillos, escaleras y pasos de salida. Nuevamente se consideran 2,5 minutos como el tiempo aceptable para abandonar una dependencia y situarse en un lugar seguro.

Si el recinto considerado como seguro es una escalera de evacuación de edificio de  $n$  plantas, que dispone de una escalera de ancho  $w$  en la cual se registra un flujo específico  $f$ , la solución que se propone consiste en calcular el número máximo de personas  $k$  que pueden entrar en ella en un tiempo  $t$ . Se trata de calcular el número de personas que pueden abandonar la primera planta más las personas que pueden entrar en cada planta según la expresión (2.40),  $k_j$  corresponde al número de ocupantes de la planta  $j$ .

$$k = f w t + (n - 1) k_j \quad (2.40)$$

De forma general mediante la expresión (2.41) se determina  $k_{j, (j-1)}$ , siendo el número de personas que pueden situarse entre las plantas  $j$  y  $(j-1)$ , plantas consecutivas de un edificio que dispone de una escalera de anchura  $w$ .

$$k_{j, (j-1)} = 18 w + 14 w^2 \quad (2.41)$$

Si se supone un valor del flujo específico de 80 personas por metro y minuto y un tiempo máximo de evacuación de 2,5 minutos, mediante (2.42) resulta el número máximo de ocupantes que puede albergar la escalera.

$$k = 200 w + (18 w + 14 w^2) (n - 1) \quad (2.42)$$

Finalmente en la tercera sección se aborda una formulación para evaluar el tiempo mínimo necesario para la evacuación de un edificio de  $n$  plantas. Siendo  $k_i$  el número personas dispuestas a iniciar la evacuación de la planta  $j$  y  $k_r$  el número de personas preparadas para iniciar la evacuación de la planta  $r$  y superiores:

$$k_r = \sum_{j=r}^n k_j \quad (2.43)$$

El tiempo mínimo necesario  $t_{2,r}$  para que los ocupantes situados en las plantas  $r$  y superiores circulen desde la planta  $r$  hacia la  $r-1$ , si se estima que se produce un flujo específico  $f$  y la anchura mínima de paso es  $w_{r,(r-1)}$ , resulta:

$$t_{2,r} = \frac{k_r}{f w_{r,(r-1)}} \quad (2.44)$$

De la misma forma (2.45) determina el tiempo necesario para desplazarse desde la planta  $r$  hasta la planta de salida del edificio,  $t_{1,r}$  corresponde al valor de dicha magnitud y  $t_{r,(r-1)}$  el tiempo necesario para desplazarse entre dos plantas consecutivas. Un valor general del tiempo necesario para desplazarse entre plantas consecutivas es de 16 s, que corresponde a unas determinadas condiciones geométricas, solamente debe considerarse esta magnitud en ausencia de mejores estimaciones.

$$t_{1,r} = r t_{r,(r-1)} \quad (2.45)$$

El tiempo mínimo  $t_r$  necesario para la evacuación de los ocupantes de la planta  $r$  y superiores lo proporciona (2.46), viene expresado por la suma de los tiempos necesarios para acceder al correspondiente tramo de la escalera  $t_{2,r}$  y el desplazamiento desde el mismo hasta la salida  $t_{1,r}$ .

$$t_r = t_{1,r} + t_{2,r} = r t_{r,(r-1)} + \frac{k_r}{f w_{r,(r-1)}} \quad (2.46)$$

Dando sucesivos valores a  $r$ , desde  $r = 1$  hasta  $r = n$ , se obtienen los tiempos correspondientes a las sucesivas hipótesis de evacuación. El tiempo mínimo de evacuación  $z$ , será igual al mayor de los valores de  $t_r$ . En esta formulación general existe un conjunto de particularidades, si el número de ocupantes de cada planta y la anchura de la escalera es constante resulta la expresión (2.47).

$$t_r = r t_{j,j-1} + \frac{(n-r+1)q_j}{f w_{r-1}} \quad (2.47)$$

Efectuando un análisis de dicha expresión se determina el valor máximo de  $t_r$ . Si  $r = 1$ , cuando existen retenciones esto es, que los ocupantes de una planta precisan más tiempo para incorporarse a la escalera del que necesita el flujo descendente en bajar entre plantas consecutivas, sería:

$$\frac{q_j}{f w_{r-1}} > t_{j,j-1} \quad (2.48)$$

lo que da lugar a la expresión

$$z^* = t_{j,j-1} + \frac{n q_j}{f w_{r-1}} \quad (2.49)$$

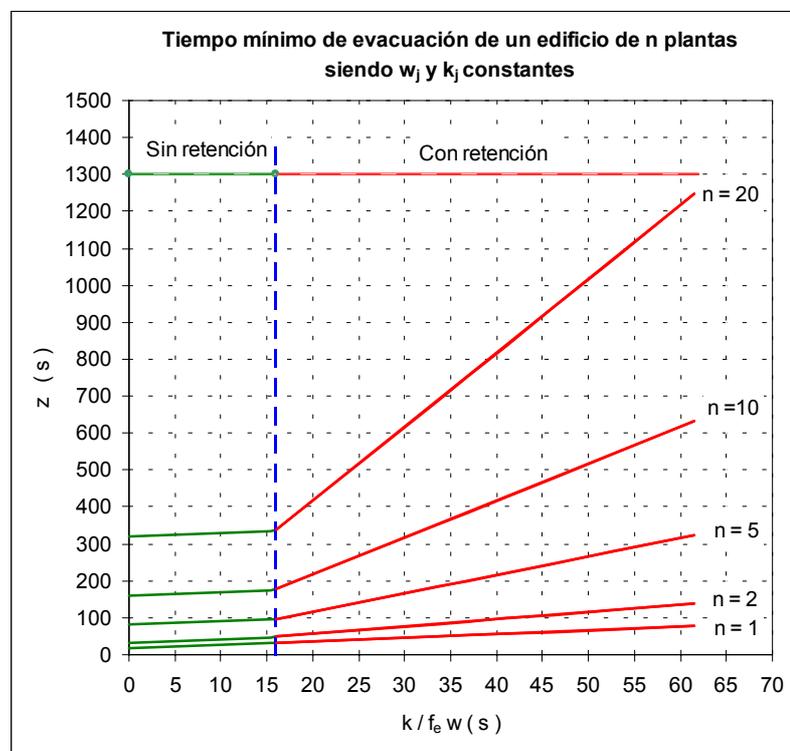
De la misma forma, cuando existe retención el tiempo de evacuación viene determinado por el tiempo de recorrido, produciéndose el máximo si  $r = n$  cuando:

$$\frac{q_j}{f w_{r-1}} \leq t_{j,j-1} \quad (2.50)$$

resultando la expresión

$$z^* = n t_{j,j-1} + \frac{q_j}{f w_{r-1}} \quad (2.51)$$

La aplicación de dicho procedimiento de cálculo dio lugar a una representación gráfica característica como la de la figura 2.14 y a numerosas publicaciones en los años ochenta.



**Figura 2.14** Tiempos de evacuación a partir de las ecuaciones de Melinek and Booth

### 2.3.4.2 Modelo hidráulico

Una síntesis sobre los principales aspectos que caracterizan el movimiento de las personas y la evacuación de edificios se halla recopilada en "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering" edición de 1988 y en la posterior de 1995 [109] en la Sección 3 el Capítulo 13 "Movement of people" realizado por J. Pauls y el Capítulo 14 "Emergency movement" firmado por H. Nelson y H. McLennan. Se trata de un trabajo más evolucionado que modelos anteriores, en él se han contrastado principios establecidos por otros autores y a partir de la experiencia en su aplicación se proponen los respectivos modelos. Las premisas básicas del

modelo para estimar las magnitudes de la evacuación son que todos los ocupantes inician la evacuación al mismo tiempo, el flujo de los ocupantes no sufre ninguna interrupción a causa de las propias decisiones de los ocupantes y todas o casi todas las personas tienen una completa movilidad, sin padecer ninguna discapacidad que les impida seguir el movimiento del grupo. En primer lugar se define el concepto de eficacia aparente de la evacuación de un edificio, para ello se utiliza la ecuación (2.52), en ella se puede observar que el tiempo  $z'$  que realmente dura la evacuación de un edificio es igual a  $z$  multiplicado por dicho coeficiente  $\varepsilon$  más el tiempo de demora calculado en el inicio de la evacuación  $t_0$ .

$$z' = z\varepsilon + t_0 \quad (2.52)$$

Resultando que la expresión (2.53) que proporciona el valor del coeficiente de eficacia aparente de la evacuación de un edificio, define la eficacia con la que se desarrolla este proceso en un determinado edificio. Se establece que depende de varios factores como la eficacia de los responsables en la gestión de una evacuación de emergencia, retrasos como consecuencia de la mezcla de flujos de personas que circulan por pasillos, actitudes personales que ralentizan este proceso o bien una distribución inadecuada hacia las salidas.

$$\varepsilon = \frac{z - t_0}{z'} \quad (2.53)$$

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

**Tabla 2.10** Valor de la constante  $\lambda$  de geometría modelo hidráulico

Los autores de este modelo aplican el concepto de anchura efectiva de las vías de evacuación tal como lo define originalmente J. Pauls según las magnitudes de la tabla 2.10. Para estimar la velocidad de circulación de las personas, cuando la densidad de ocupación está comprendida entre los valores de 0,54 y 3,80 personas por metro cuadrado se propone utilizar la expresión (2.54), que define una relación lineal entre la velocidad de circulación y la densidad de ocupación en la cual  $\alpha$  y  $\lambda$  son constantes resultando el valor de la velocidad en metros por segundo.

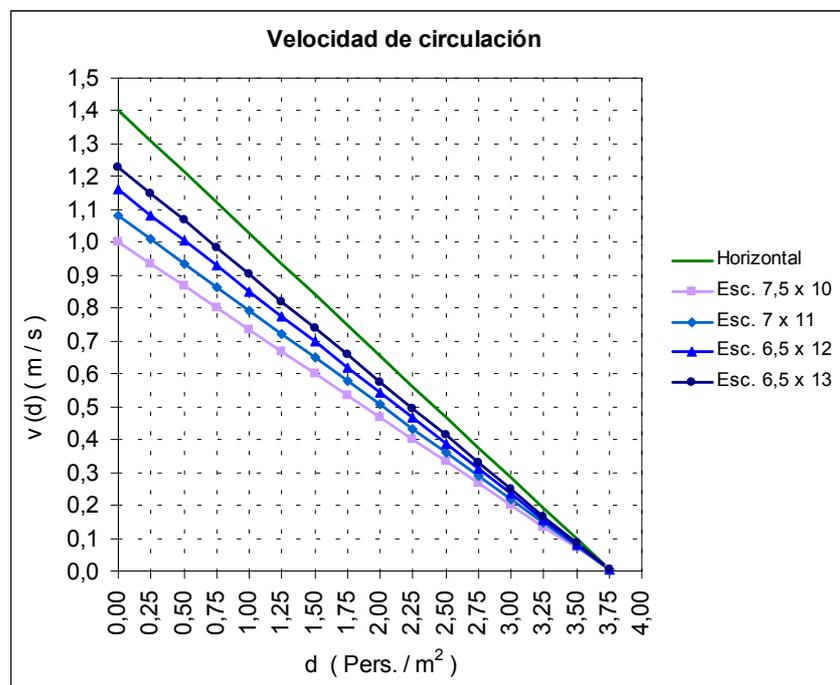
$$v(d) = \lambda(1 - \alpha d) \quad (2.54)$$

El parámetro  $\alpha$  corresponde al coeficiente del modelo hidráulico de locomoción, en las unidades del sistema internacional  $\alpha = 0,266$  metros cuadrados por persona, siendo  $\lambda$  el coeficiente de las condiciones geométricas del recinto, que se define en la tabla 2.10.

Aplicando los valores anteriores para la circulación horizontal resulta la expresión 2.55

$$\begin{cases} v(d) = 1,20 & d < 0,54 \\ v(d) = 1,40 - 0,3724d & 0,54 \leq d \leq 3,80 \end{cases} \quad (2.55)$$

donde puede apreciarse que la velocidad de circulación horizontal que se produce cuando la densidad de ocupación es de 0,5 personas por metro cuadrado es aproximadamente de 1,2 metros por segundo. La evolución de estos valores puede observarse en la figura 2.15, en ella se puede apreciar la relación lineal entre la velocidad de circulación y la densidad.



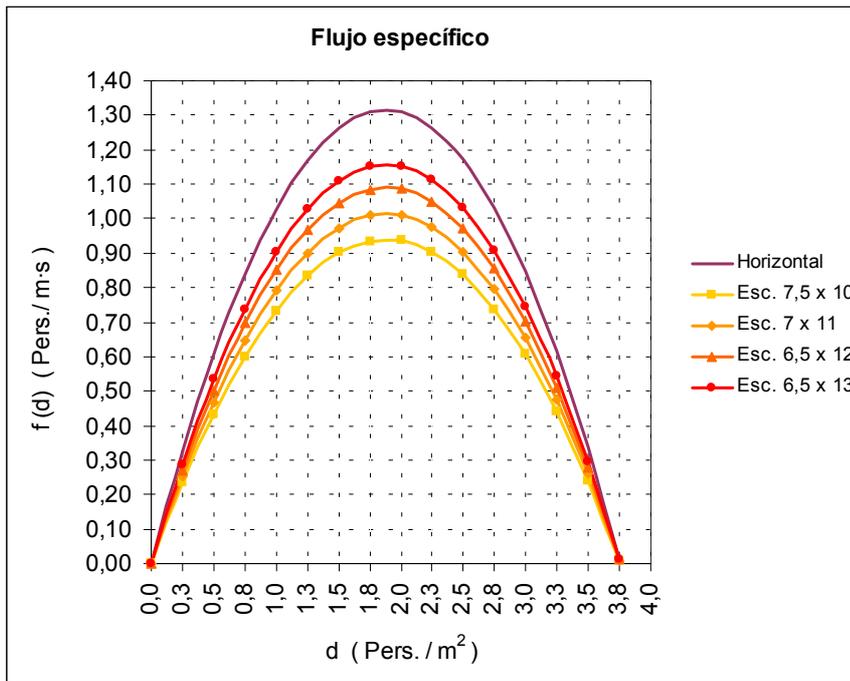
**Figura 2.15** Velocidad de circulación en función de la densidad y condiciones geométricas

El flujo específico  $f$  vendrá determinado por el producto de la densidad por la velocidad de circulación, según la expresión (2.56), en la cual las unidades resultantes son personas por metro y segundo y puede observarse en la figura 2.16.

$$f(d) = d ( v(d) ) = d ( \lambda(1-\alpha d) ) = (1-\alpha d)\lambda d \quad (2.56)$$

De esta forma el flujo que se registra en un determinado recorrido, si la anchura efectiva mínima de paso es  $w_e$ , resulta de la expresión (2.57) en la cual las unidades son personas por segundo.

$$F(d) = f(d) w_e = d ( v(d) ) w_e = (1-\alpha d)\lambda d w_e \quad (2.57)$$



**Figura 2.16** Flujo de circulación en función de la densidad y condiciones geométricas

Tomando los valores de las constantes para la circulación en pasillos resulta la expresión (2.58) en la cual la anchura  $w$  se refiere a la anchura efectiva de paso cuando la densidad  $d$  está comprendida entre 0,54 y 3,80 personas por metro cuadrado.

$$F(d) = (1,40d - 0,3742d^2) w_e \quad (2.58)$$

A partir de estas expresiones, se obtiene mediante la expresión (2.59) el tiempo de paso en segundos para salir de un determinado recinto.

$$t_2 = \frac{k}{F(d)} = \frac{k}{(1-\alpha d)\lambda d w_e} \quad (2.59)$$

Finalmente en este modelo se establecen ciertos criterios para determinar las densidades y la magnitud de los flujos en los puntos de transición así como las respectivas relaciones matemáticas. De estos aspectos debe considerarse que el flujo específico después de un punto de transición es función, dentro de unos límites, del flujo entrante y su magnitud no puede exceder el flujo específico máximo. Mediante la expresión (2.60) se establece la relación entre los flujos específicos de salida  $f_2$  y de entrada  $f_1$ , en un recinto en el cual las anchuras son  $w_{e,1}$  y  $w_{e,2}$  respectivamente.

$$f_2 = \frac{w_1 f_1}{w_2} \quad (2.60)$$

En caso de existir varios flujos de entrada  $F_1$  y  $F_2$  y un solo flujo de salida  $F_3$ , la expresión (2.61) establece la relación entre los flujos específicos.

$$f_3 = \frac{(w_1 f_1) + (w_2 f_2)}{w_3} \quad (2.61)$$

En una situación más general de  $n$  flujos de entrada y  $m$  flujos de salida, debe establecerse la relación de incompresibilidad de flujos proporcionada por la expresión (2.62) en la cual la suma de los flujos de entrada es igual a la suma de los flujos de salida.

$$(w_1 f_1) + \dots + (w_n f_n) = (w_{m-n} f_{m-n}) + \dots + (w_m f_m) \quad (2.62)$$

El documento prosigue con una serie de consideraciones o aspectos relacionados con la conducta de los ocupantes y la organización de evacuaciones en situaciones de emergencia.

### 2.3.4.3 Aplicación del Modelo de Predtechenskii y Milinskii

Una minuciosa y destacada aplicación de los modelos propuestos por Predtecheskii y Milinskii se debe a E. Kendik, en diversas publicaciones [80], [81], [82], [83] y [84], muestra las posibilidades de los procedimientos propuestos por los autores rusos. Concretamente el trabajo [82] publicado por la Society of Fire Protection Engineers en 1985 después de la detallada descripción del modelo de cálculo, se aplica al estudio de la evacuación de un edificio dejando constancia de las posibilidades de estas propuestas.

		Edad							
		5 años	10-15 años			15-30 años			> 30 años
			hombre	mujer	global	hombre	mujer	global	Global
<b>A</b>	<b>m</b>	0,7050	1,3000	1,2900	1,2910	1,6830	1,8940	1,8250	1,8720
	$\sigma$	0,1710	0,1750	0,2030	0,2080	0,1150	0,3790	0,3340	0,2520
<b>B</b>	<b>m</b>	0,0696	0,1092	0,1126	0,1113	0,1383	0,1484	0,1458	0,1740
	$\sigma$	0,0078	0,0202	0,0174	0,0187	0,0172	0,0171	0,0172	0,0315
<b>C</b>	<b>m</b>		0,1453	0,1326	0,1386	0,1809	0,1892	0,1862	
	$\sigma$		0,0178	0,0191	0,0186	0,0213	0,0296	0,0272	
<b>D</b>	<b>m</b>		0,1262	0,1221	0,1238	0,1508	0,1645	0,1600	0,1918
	$\sigma$		0,0198	0,0170	0,0180	0,0163	0,0191	0,0193	0,0356

**Tabla 2.11** Dimensiones de las personas para el cálculo de la superficie ocupada Kendik

Otro aspecto destacado de estas investigaciones son las mediciones realizadas para su aplicación a la población austriaca. Concretamente en la Tabla 2.11 se reproducen los valores de medidas antropométricas de los austriacos en función de la edad, el sexo y ropa que utilizan. En dicha tabla  $m$  es el valor medio en metros cuadrados y  $\sigma$  la desviación tipo en metros cuadrados, siendo A el valor del área Dubois, B la proyección horizontal de la superficie de una persona de pie con vestuario de verano, C la misma proyección que en el caso anterior con ropa de abrigo y D la proyección de una persona caminando.

A este autor también se debe el programa EESCAPE, escrito en GWBASIC el cual de forma mecánica permite estimar tiempos de evacuación del edificio, así como de la planta, evaluar las retenciones y variar de forma simple la ocupación y las dimensiones de los elementos de evacuación. Así pues sobre un formato interactivo que permitía la programación en BASIC era posible efectuar interesantes análisis de las condiciones de evacuación.

### 2.3.5 Estudio de las condiciones de locomoción de personas discapacitadas

Existen estimaciones realizadas en diferentes países y sobre diferentes colectivos del porcentaje de personas discapacitadas, Proulx [147] cita que en el Canadá en el censo del año 1991 existía un 15,5 % de personas que presentaban algún tipo de discapacidad y afirma que la tendencia de esta proporción está en incrementarse debido al envejecimiento de la población, Shields, Dunlop y Silcock [173] en un estudio sobre la población de Irlanda del Norte concluyen que el 12% de la población tiene dificultades de locomoción, así mismo Pauls en [119] cita que en edificios de oficinas del Canadá el porcentaje de personas con dificultades de locomoción se sitúa entorno el 3%. Más allá de estos porcentajes debe insistirse en que el problema de la evacuación de edificios con personas discapacitadas requiere un tratamiento específico, diferente de los planteamientos de esta tesis. En los estudios que se presentan se contempla la posibilidad de la existencia de personas con dificultades de locomoción, por este motivo en este apartado se trata de sintetizar algunos de los trabajos sobre este aspecto. Un documento notable es el capítulo 12 [64] del texto “Fires and Human Behavior”, en el mismo J. Hall realiza un análisis de posibles procedimientos de evacuación de pacientes de centros hospitalarios. Otros trabajos sobre la capacidad de evacuación de los edificios en función de las limitaciones de sus ocupantes se realizaron en Suecia y se deben a G. Halberg [65].

<b>Circulación horizontal</b>	<b>Velocidad media (metros / segundo)</b>	<b>Coefficiente de movilidad</b>
Sin discapacidad	1,24	1,00
Silla de ruedas eléctrica	0,89	0,72
Silla de ruedas manual	0,69	0,56
Muletas	0,94	0,76
Bastón	0,81	0,65
Caminador	0,51	0,42
Caminador con ruedas	0,61	0,49
Sin ayuda	0,93	0,75

<b>Ascenso de escaleras</b>	<b>Velocidad (metros / segundo)</b>			<b>Coefficiente de movilidad</b>
	<b>Intervalo</b>	<b>valor medio</b>		
Sin discapacidad	0,55	0,82	0,70	1,00
Muletas	0,13	0,31	0,22	0,31
Bastón	0,18	0,49	0,34	0,49
Sin ayuda	0,14	0,60	0,41	0,59

Descenso de escaleras	Velocidad (metros / segundo)			Coeficiente de movilidad
	Intervalo		valor medio	
Sin discapacidad	0,53	0,90	0,70	1,00
Muletas			0,22	0,31
Bastón	0,11	0,49	0,32	0,49
Sin ayuda	0,13	0,70	0,33	0,59

**Tabla 2.12** Locomoción de personas discapacitadas según Shields, Dunlop y Silcock

Publicaciones más recientes de Shields y Proulx, coinciden en clasificar las discapacidades de las personas en cuatro niveles, discapacidades de movilidad, visuales, auditivas e intelectuales. El movimiento de personas discapacitadas no puede ser considerado simplemente como un alentamiento de lo que podría llamarse la velocidad de circulación normal, así las personas con discapacidad visual normalmente tendrán serias dificultades en encontrar la salida si el edificio no está adecuadamente adaptado para personas con esta discapacidad. En sus trabajos Shields, Dunlop y Silcock, afirman que dada la gran variedad de discapacidades que afectan la movilidad de las personas, éstas requieren diferentes formas de ayuda para permitirles su locomoción. En función de la discapacidad y del medio de locomoción utilizado efectuaron las mediciones de la velocidad de circulación que podía esperarse en circulación horizontal, ascenso y descenso de escaleras, que se reproducen en la tabla 2.12, concretamente el experimento se basó en efectuar mediciones de diferentes individuos en un recorrido de 50 metros.

En publicaciones recientes G. Proulx [152] analiza el problema de la evacuación de personas discapacitadas, en primer lugar desde un planteamiento arquitectónico urbanístico plantea la necesidad de eliminar las barreras arquitectónicas, la organización del edificio en áreas de refugio entre las que realmente sea factible el desplazamiento, y la instalación de sistemas de ascensores de seguridad, entre otros. Aspectos que globalmente indican que las características del edificio deben ser las adecuadas para sus ocupantes y luego se propone la adecuada organización para afrontar situaciones de emergencia que consisten en listados actualizados de personas discapacitadas, así como de personal preparado para colaborar activamente en la evacuación con los medios técnicos necesarios.

Otras investigaciones se han realizado en Preston y han dado lugar a las publicaciones de L Rubandiri, D. Ndumu y J. Roberts [164], [166] y [169], estos autores proponen la utilización de un coeficiente I para evaluar de forma objetiva la capacidad de evacuación de edificios con ocupantes con movilidad reducida, el coeficiente obedece al concepto que denominan “Evacuation Performance Index” que contempla las características individuales de las personas, la ayuda que precisan y las características del edificio. Un aspecto destacado radica en que la estimación de dicho índice permite determinar el tiempo necesario para la evacuación de personas discapacitadas en el mismo dando lugar a la expresión (2.63), en ella  $t$  es el tiempo necesario para la evacuación, siendo  $l_i$  el recorrido en metros del componente  $i$ ,  $n$  el número de componentes,  $I_i$  el índice EPI, y  $v_i$  la velocidad correspondiente al componente  $i$  de la ruta de evacuación.

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{I_i v_i} \quad (2.63)$$

Una alternativa al procedimiento lo proporciona la expresión (2.64) que consiste en utilizar un coeficiente  $I_C$  en cuyo caso la velocidad considerada  $v_0$  corresponde al valor de la velocidad media.

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{I_C v_0} \quad (2.64)$$

## 2.4 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

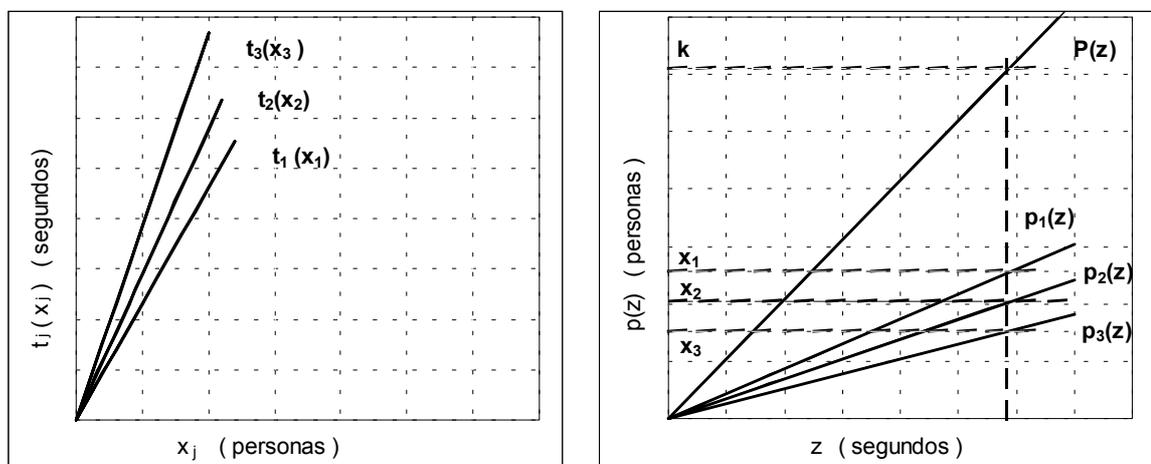
Hasta finales de los años setenta el problema de la evacuación de edificios desde una perspectiva puramente matemática se limitaba a estimar tiempos de evacuación, evaluar retenciones y otras las magnitudes que reflejaban el desarrollo del proceso. De forma laboriosa, repitiendo para cada situación el proceso de cálculo, era posible conocer los resultados a que daban lugar diferentes dimensiones de los elementos de diseño y obtener las condiciones más o menos favorables de los mismos. Entorno al año 1980 la investigación operativa ofrece nuevas perspectivas, como la posibilidad de hallar directamente soluciones óptimas en función del número de ocupantes y de las dimensiones de los principales elementos de diseño del edificio. En las primeras formulaciones el objetivo fundamental consistía en evaluar el número de personas que deben dirigirse a cada salida para lograr tiempos mínimos de evacuación. Una herramienta que pronto demostró su efectividad fueron las redes de flujo, al aplicar en el problema de la evacuación de edificios técnicas desarrolladas para las mismas, en un principio se utilizaron los algoritmos de Minieka [105] y de Raiser & Lavenberg [160], estos procedimientos generales con posterioridad dieron lugar al desarrollo de soluciones propias, normalmente procedimientos heurísticos. Para su estudio, los modelos de optimización se han desglosado en modelos deterministas y modelos estocásticos.

### 2.4.1 Modelos deterministas

En general es posible afirmar que los modelos deterministas ofrecen buenas aproximaciones a la solución del problema. Desde las primeras publicaciones de G. N. Berlin [4] en el año 1982 hasta las últimas publicaciones de Q. Lu [100] del año 2003 existen multitud de trabajos que a partir de las ocupaciones de recintos, características de locomoción de los ocupantes, anchuras mínimas de paso, distancias entre elementos de evacuación, se modela el edificio mediante una red de flujo. En principio se trata de una red estática que se transforma en una red dinámica que permite obtener las magnitudes necesarias para caracterizar el problema: tiempos de evacuación, recorridos mínimos, distribuciones óptimas y evaluación de retenciones. En esta concepción y modelación del problema se han desarrollado diversas herramientas informáticas en la mayoría de casos debidamente contrastadas. Dentro de los modelos deterministas se distingue entre los procedimientos gráficos, la formulación analítica y análisis a partir de las redes de flujo.

### 2.4.1.1 Procedimiento gráfico para la optimización de la evacuación

Una de las primeras soluciones para al problema de la optimización de la evacuación de un edificio fue la solución gráfica presentada por R. L. Francis en el año 1979 [32], se trata de un trabajo prodigioso, consistente en un procedimiento simple para distribuir los ocupantes del recinto hacia las salidas y estimar los tiempos de evacuación mínimos. Para aplicar dicho procedimiento, en primer lugar se construye una plantilla que luego se utiliza para diferentes números de ocupantes. Para construir la plantilla, en un edificio que dispone de varias salidas con rutas de evacuación independientes, para cada una de las salidas se calcula la función  $t_j(x_j)$ , que indica el tiempo que tardarían  $x_j$  personas en abandonar el edificio utilizando la ruta  $j$ . Se representa cada una de dichas funciones sobre un papel transparente, de forma que en el eje de abscisas se sitúa el número de ocupantes y en el de ordenadas tiempos de evacuación. Posteriormente, se gira el papel de forma que se inviertan los ejes de ordenadas y abscisas, de esta forma se hallan las funciones inversas de las funciones  $t_j(x_j)$  de cada una de las salidas, así en el eje de abscisas ahora se encuentra el tiempo de evacuación y en el eje de ordenadas número de personas. Las funciones inversas representadas se las llama  $p_j(z)$  e indican las personas que podrán salir del edificio utilizando la salida  $j$  en un tiempo  $z$ , la suma de dichas funciones da lugar a la función  $P(z)$  que indica el número total de personas que podrían salir en un tiempo  $z$ , con ello finaliza el proceso de construcción de la plantilla.



**Figura 2.17** Solución gráfica Francis

La aplicación es muy simple, cuando se conoce el número de ocupantes  $k$  del edificio se sitúa dicho valor en el eje de ordenadas y se traza una línea paralela al eje de abscisas hasta la intersección con  $P(z)$ , trazando posteriormente una línea perpendicular al eje de abscisas se lee en el mismo el tiempo de evacuación. La línea anterior corta a la de las funciones de evacuación de cada una de las salidas, con lo que trazando líneas horizontales en el eje de ordenadas es posible leer la asignación correspondiente de cada salida. El proceso puede observarse en la figura 2.17, en las dos figuras que aparecen, se ha tratado de representar las dos etapas en que puede dividirse la solución del problema, construcción de la plantilla y su ulterior aplicación.

La propuesta del profesor R. L. Francis dio lugar a diferentes artilugios en forma de herramientas de dibujo que permitían a los responsables de gestionar la evacuación de los recintos obtener razonables aproximaciones de los tiempos de evacuación y de la distribución de los ocupantes hacia las salidas.

#### 2.4.1.2 Formulación analítica para la optimización de la evacuación

La primera formulación analítica del problema de la evacuación se debe también a R. L. Francis, se desarrolla en el trabajo [34] publicado en el año 1981 en el cual se establecen los principios para la optimización de la evacuación de edificios. En primer lugar se procede a la formulación matemática del problema de forma que si un edificio con  $k$  ocupantes dispone de  $n$  posibles rutas de evacuación independientes entre sí, la función  $t_j(x_j)$  indica el tiempo que tardarán en evacuar  $x_j$  personas por la ruta  $j$ , siendo una función estrictamente creciente con  $t_j(0) = 0$ . Si se considera que el edificio no habrá sido evacuado mientras haya alguna persona en su interior, equivale a establecer que habrá finalizado la evacuación cuando se hayan completado todos los recorridos que conducen al exterior, entonces el tiempo de evacuación designado por  $z$ , vendrá determinado por el tiempo de la mayor de las rutas o recorridos de evacuación, dando lugar a la expresión (2.65).

$$\text{Min}(z) = \text{Max} [t_1(x_1), \dots, t_n(x_n)] \quad (2.65)$$

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = k \quad (2.66)$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0 \quad (2.67)$$

De la misma forma la expresión (2.66) se refiere a la restricción que impone la evacuación de la totalidad de los ocupantes, y finalmente (2.67) establece que el número de personas que utilizan una determinada ruta sea un número positivo. Además  $x_j$  debe ser un valor entero, condición que en un principio no se ha establecido aún cuando necesariamente debe serlo. En definitiva se trata de encontrar el número de personas que deben utilizar cada ruta para minimizar el tiempo total de evacuación, suponiendo que la totalidad de ocupantes inician la evacuación en el mismo instante, no existe interacción entre las rutas y no se consideran restricciones en la capacidad de ocupación de los destinos ni de las rutas de evacuación.

La solución del problema se basa en el algoritmo de J. R. Brown [6], de forma analítica se sigue un proceso similar al desarrollado en la solución del procedimiento gráfico, estimando tiempos de evacuación y distribución óptima hacia las salidas. La solución es simple en las condiciones estrictas del problema si se suponen flujos y velocidades de circulación constantes que dan lugar a funciones lineales de  $t_j(x_j)$ .

### **Formulación del problema mediante redes de flujo**

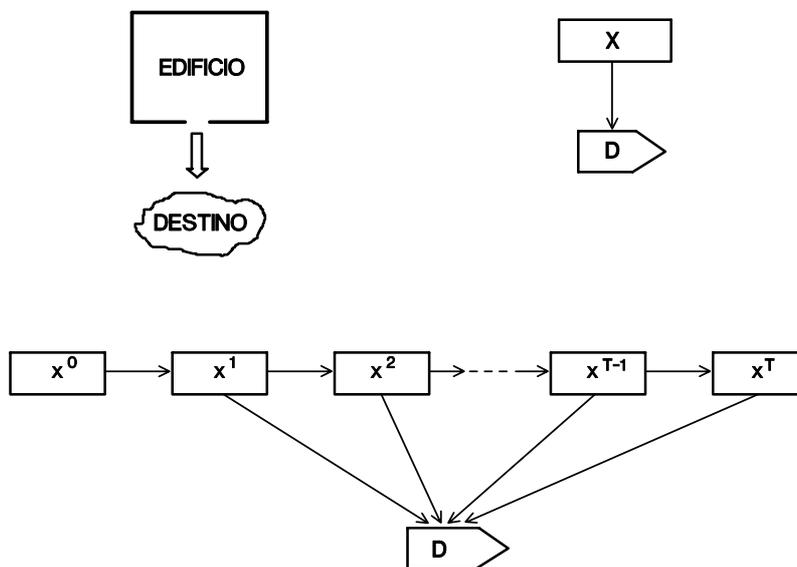
En el año 1980 se publicó el trabajo [4] de G. N. Berlin, A. Dutt y S. M. Gupta en el cual divulgaban sus investigaciones en el Center for Fire Research del National Bureau of Standards planteando la utilización de redes de flujo para el estudio del problema de la evacuación de edificios. El objetivo del trabajo consistía en desarrollar una metodología para estimar el tiempo necesario para la evacuación de un edificio bajo diferentes supuestos de ubicación y estado de los ocupantes y posibles siniestros que tenían una incidencia directa en las vías de evacuación. El edificio se representaba mediante un conjunto de puntos que constituían los nodos, y las líneas que establecían las conexiones entre los mismos definían los arcos. Lo realmente novedoso fue la utilización de redes de flujo, mientras que el proceso de solución del problema se sitúa en el entorno de la simulación.

Dos años después, en el año 1982 L. G. Chalmet, R. L. Francis y P. B. Saunders en el trabajo [35] publicado simultáneamente en las revistas *Management Science* y *Fire Technology*, los edificios se representa mediante redes formadas por nodos y arcos según la formulación establecida por G. N. Berlin. Los nodos se sitúan en el centro de las dependencias, mientras que los arcos que conectan los nodos representan el desplazamiento de un nodo a otro y cada recorrido tiene un coste que se mide en unidades de tiempo, el tiempo necesario para desplazarse desde un nodo origen hasta un nodo destino. Las rutas de evacuación constituyen los caminos en la red. Para resolver el problema confeccionan el denominado diagrama estático, que no es más que la representación del edificio mediante una simbología establecida, si se expande según el procedimiento de Ford-Fulkerson da lugar al diagrama dinámico. En el modelo dinámico se consideran  $T$  períodos de tiempo, y para cada nodo del modelo estático se construyen  $T+1$  copias del nodo, conectadas mediante flechas y numeradas,  $0, 1, 2 \dots, t$ , de forma consecutiva de izquierda a derecha. También se sitúan los arcos correspondientes a los recorridos, de los cuales se efectúan las correspondientes réplicas. Una característica de esta representación es que permite representar la evolución de determinadas magnitudes periodo a periodo.

Para la resolución del problema los autores formulan una triple optimización. Simultáneamente se minimiza el número de períodos necesarios para la evacuación del edificio, se maximiza el número de personas que pueden evacuar en cada período y se minimiza el tiempo total invertido en la evacuación, considerado como la suma del tiempo invertido por cada uno de los ocupantes en la evacuación del edificio. Referido a la triple optimización, existe el documento [75] en el cual J. Jarvis y D. Ratliff prueban que los tres objetivos citados son equivalentes, cuando las redes de flujo cumplen determinadas condiciones. Finalmente, L. G. Chalmet, R. L. Francis y P. B. Saunders proponen diferentes alternativas para la solución del problema, un primer planteamiento consiste en minimizar la función de coste total de la evacuación, siendo dicho coste, el tiempo que tarda un ocupante cruzar la salida. Se trata pues, de contabilizar el coste total para los  $k$  ocupantes del edificio y hallar su valor mínimo, la solución se basa en el algoritmo de Minieka [105]. Una segunda alternativa de solución consiste en una búsqueda dicotómica, que presenta el inconveniente de una laboriosa programación y la carencia de la valiosa información que proporcionan las

variables duales. La tercera fórmula de solución para este problema se basa en una adaptación del algoritmo del flujo máximo de Ford&Fulkerson.

Durante aproximadamente una década en el entorno de profesor R. L. Francis se siguieron investigando diferentes aspectos de la evacuación de edificios, lo que dio lugar a numerosas publicaciones que podrían citarse como **avances en la solución del problema**. Finalmente toda esta labor se recogió en la publicación [21] del año 1989 cuyos autores son W. Choi, H. W Hamacher y S. Tufekci. En la figura 2.18 puede observarse la secuencia que supone la representación de un edificio: Un esquema del mismo, una red estática y finalmente la red dinámica. A partir de la representación se formaliza la definición de la red, sea el grafo  $G(U, V)$  en el cual  $U$  y  $V$  son una serie de nodos y arcos que representan la red estática del edificio, entonces  $G_T = (U_T, V_T)$  es la expansión temporal de dicha red estática, definida como red dinámica. Existen dos tipos de arcos, los de retención y los de circulación. Mediante los de retención se representa la evolución temporal de propia dependencia. Los arcos de circulación, se caracterizan por un tiempo de circulación  $\tau()$  y una capacidad de paso  $c(q)$ . Esta formulación da lugar a un nuevo planteamiento del problema, en la cual la función objetivo indica el número máximo de personas que puede albergar el edificio para salir del mismo en un determinado tiempo  $T$ . Así mismo las restricciones establecen las condiciones de conservación del flujo, la dependencia del flujo respecto de la capacidad y que los flujos sean positivos, lo que equivale a establecer un solo sentido de circulación.

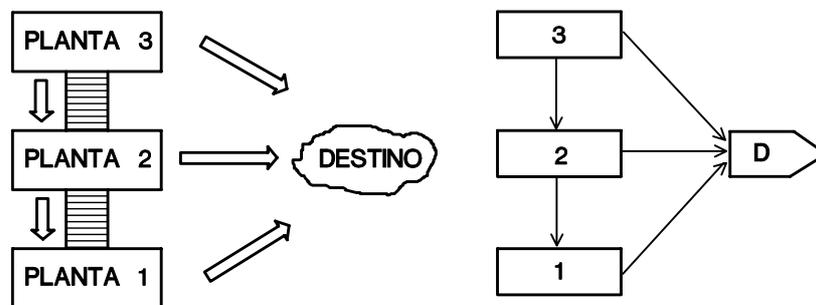


**Figura 2.18** Representación de un edificio mediante una red

W. Choi, H. W Hamacher y S. Tufekci demostraron que este problema tiene solución única cuando la función de la capacidad  $c_i(q)$  es una función continua entre  $[0, \infty)$ , además se cumple la condición de ser  $c_t(q) \leq 0$  para cualquier valor  $q \geq 0$ , siendo  $c_t(0) > 0$ . Se define mediante la expresión (2.68) la denominada función complementaria  $\bar{c}_t(q)$ , corresponde a una función estrictamente creciente y acotada. En estas condiciones se obtiene una expresión analítica que proporciona directamente la solución óptima del problema. Se aplica a situaciones simples como la representada en la figura 2.18.

$$\bar{c}_i(q) = q - c_i(q) \quad (2.68)$$

En este documento también se plantea el problema sobre edificios de varias plantas en las cuales el flujo es función de la capacidad de los arcos, en este contexto se supone que cada planta dispone de una salida directa hasta el exterior, además existe comunicación desde la tercera planta hasta la segunda y desde la segunda hasta la primera, tal y como puede observarse en la figura 2.19. Se consideran los tres problemas asociados a cada edificio, problema de flujo máximo, el problema del mínimo tiempo de evacuación y el problema de minimización del coste total de la evacuación. En el estudio de la evacuación de edificios mediante el problema de flujo máximo se considera la red estática, y a partir de la misma se establecen tiempos de circulación constantes de un solo periodo  $\tau(j, j') = 1$ , a partir de esta simplificación se define la red dinámica  $G(V_T, U_T)$ , luego se define el flujo en función de la capacidad como una función de tramos lineales. Para esta formulación del problema de flujo máximo W. Choi, H.W Hamacher y S. Tufekci presentan una solución del problema.



**Figura 2.19** Representación de un edificio de tres plantas

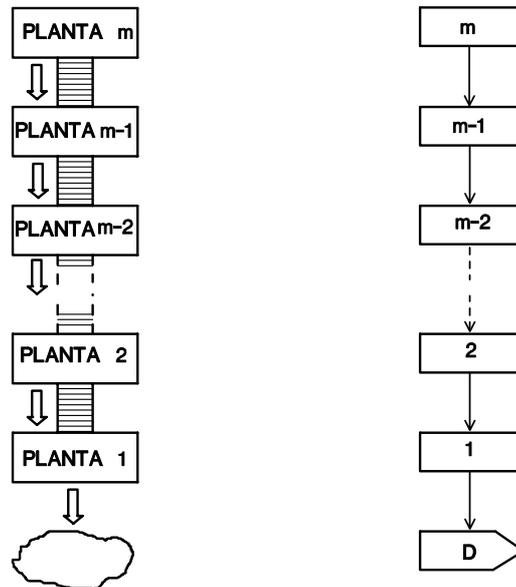
Para el estudio de la evacuación de edificios mediante el problema del coste de circulación a partir de la red estática y de la correspondiente red dinámica, según la expresión (2.69) se define la función objetivo de este problema. Puede observarse que efectivamente se trata de contabilizar el tiempo total invertido en la evacuación.

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T (f(x^t, D)) t \quad (2.69)$$

Las restricciones corresponden a las condiciones de conservación de flujos y los flujos son función de la ocupación, respetando la condición de la capacidad máxima de los arcos. En esta formulación, se supone que los arcos de ocupación tienen capacidad suficiente en cada periodo para albergar los ocupantes que se le destinan, la función de la capacidad es una función continua y la función complementaria es monótona decreciente. Se define  $f^*$  como el flujo de llegada más temprana que cumple la condición de óptimo. En este planteamiento del problema W. Choi, H. W Hamacher y S. Tufekci proporcionan un algoritmo “greedy” para obtener la solución óptima.

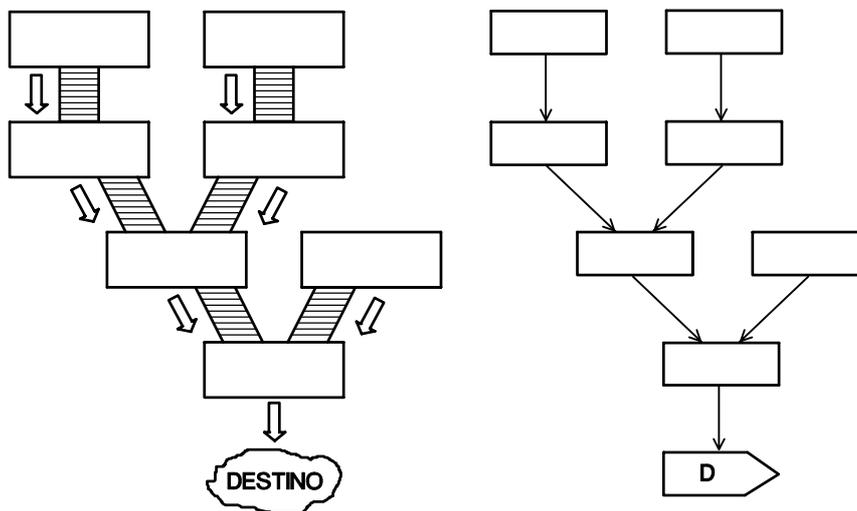
De igual forma, para una estructura de red correspondiente a una serie de nodos sucesivos como los que corresponden a una vía de evacuación como en el representado en la figura

2.20, proporcionan un algoritmo para determinar el tiempo de evacuación y a partir del mismo establecer las condiciones de mínima ocupación en cualquier instante.



**Figura 2.20** Representación vía de evacuación

Las estructuras de redes arborescentes son muy comunes en los edificios, se trata de una organización de las dependencias como la representada en la figura 2.21. De forma similar al caso anterior, la solución que plantea consiste en un algoritmo que establece las condiciones de “llegada más temprana“ para cada uno de los nodos inicialmente ocupados y desde el nodo final se establecen las condiciones de máximo flujo.



**Figura 2.21** Red en estructura arborescente

Finalmente para el estudio de la evacuación de edificios planteado el problema con el objetivo de minimizar directamente el tiempo de evacuación, dada una red estática y un contenido inicial de cada nodo y un flujo factible que parte del mismo según un modelo de red dinámica  $G(U_T, V_T)$ , sea  $T_x(f)$  el último intervalo de tiempo en el cual el nodo  $x$  es ocupado respecto a un determinado flujo factible, mediante la expresión (2.70) se define la función

objetivo de este problema. Puede observarse que representa el mínimo tiempo en que puede materializarse la evacuación del edificio.

$$\text{Min} \left\{ \text{Max}_{x \in V} (T_x(f)) \right\} \quad (2.70)$$

En este caso, las restricciones son las mismas que para las otras dos situaciones anteriores, conservación de flujos y capacidades factibles. La solución del problema parte de los planteamientos realizados en el problema de costes, se obtiene una solución óptima para cada una de las plantas, el máximo de estos valores constituye una acotación en el valor óptimo para el problema planteado como problema del tiempo mínimo de evacuación. Mediante sucesivos ajustes se alcanza la solución óptima, en estos ajustes de flujos puede resultar útil operar mediante un análisis de sensibilidad en cada iteración.

A partir de una serie de relajaciones de determinadas condiciones, se han obtenido soluciones del problema, esta circunstancia queda manifestada al observar que los documentos finales desarrollados por los discípulos de R. L. Francis plantean modelos que en principio determinan soluciones pseudo-óptimas del problema y posteriormente mediante herramientas de simulación efectúan pruebas estocásticas de dichas soluciones.

Finalmente, como aspecto curioso debe citarse que el esfuerzo investigador de este equipo en el modelado de redes de flujo para la evacuación de edificios, deriva en modelos de tráfico para la evacuación de poblaciones en situaciones de emergencia, este proyecto recibe el nombre de REMS (Regional Evacuation System) y debe hacerse referencia a los trabajos presentados en el foro Emergency Management and Engineering en los años 1991, 1992 y 1993 en los cuales se estudia la evacuación de diferentes poblaciones del estado de Florida. Los documentos [84], [85], [86], [87] y [203] desarrollan diferentes facetas de este proyecto, el último de ellos relata los beneficios que aportó dicha aplicación en gestión de la evacuación de diferentes poblaciones de Florida ante la amenaza del huracán Andrew el año 1990.

En los años 90 se planteó la solución del problema utilizando **algoritmos polinomiales**, esta labor fue desarrollada por B. Hope y E. Tardos, de estos autores destacan los trabajos [67] y [68] publicados los años 1993 y 1994 respectivamente. En el momento de su publicación no se conocían algoritmos polinomiales para la resolución de redes dinámicas de flujo con varios orígenes, el problema de la evacuación de edificios corresponde a una situación en la cual existen varios orígenes y varios destinos. En el primer artículo aportan un algoritmo polinomial para la solución del problema para un determinado número de orígenes y destinos, se busca un flujo que maximice el número de personas que en un orden especificado abandonan los nodos origen. También se considera el problema desde el punto de vista de minimizar el instante en que se producen las llegadas al destino. En el segundo trabajo incorporan la existencia de restricciones de capacidad.

Sea la red estática definida mediante el grafo  $G(U, V)$  y la red dinámica  $G(U_T, V_T)$  en la cual las capacidades  $c()$  de los arcos son positivas y los tiempos de circulación  $\tau()$  son enteros positivos para todos los arcos de la red. Ford & Fulkerson probaron que el problema

de flujo máximo puede resolverse minimizando los costes o bien resolviendo el problema de minimizar el tiempo de evacuación. En estas condiciones el problema puede reducirse a un problema de flujo máximo por búsqueda binaria, en esta situación Burkard, Dlaska y Klinz [12] proporcionan para este problema algoritmos eficientes para hallar la solución en un entorno polinomial. Más formalmente, el hecho que minimizar el instante en que se producen las llegadas suponga maximizar simultáneamente la cantidad de flujo que sale del origen en cada intervalo de tiempo fue demostrada por Minieka [105], sin embargo hasta la primera publicación de B. Hope y E. Tardos no se tiene constancia de la existencia de algoritmos polinomiales eficientes. Básicamente el algoritmo propuesto por B. Hope y E. Tardos realiza un escalado de la capacidad en el algoritmo incremental de la ruta más corta, operando de una forma singular ya que en primer lugar se realiza un incremento en todos los arcos, periódicamente se redondea la capacidad sobrante y se restringen posteriores incrementos a los redondeos realizados.

En el problema lexicográfico de flujo máximo si existen  $n$  orígenes,  $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$  define la secuencia de flujos dinámicos en un horizonte  $T$ . En el problema de la evacuación de edificios existe un determinado número de ocupantes  $k_j \geq 0 \quad \forall j$  y el objetivo consiste en hallar el valor mínimo de  $T$  mediante una secuencia de flujos factibles, de tal forma que en un horizonte de tiempo  $T$  la cantidad de flujo que abandone cada origen sea máxima. En esta formulación necesariamente se cumplen las condiciones de conservación de flujos y las funciones complementarias de la capacidad definidas de la misma forma que en la formulación de W. Choi. Calcular el máximo flujo temporalmente repetido es equivalente a resolver el problema del mínimo coste de circulación. En esencia el algoritmo calcula el flujo de mínimo coste en una red estática adecuadamente redondeada mediante la repetición de los caminos más cortos.

Los primeros documentos en los cuales se analiza el problema de la evacuación mediante un planteamiento de **algoritmos multicriterio** se halla en el trabajo [89] cuyos autores son M. Kostreva, M. Wiezek y T. Getachew, publicado en los "proceedings" del congreso "Fire Safety Science" del año 1991, en otros trabajos [57], [58] y [59] estos autores avanzan en este planteamiento del problema y las últimas publicaciones de los mismos que se sitúan en el año 2000.

En los modelos de simulación avanzados se permite analizar diferentes situaciones y en función de las mismas existe la posibilidad de adoptar diferentes alternativas, de esta forma se busca una solución que minimice unas determinadas consecuencias, en este contexto de minimización global M. Kostreva, M. Wiezek y T. Getachew plantean que las decisiones óptimas en una evacuación de emergencia se ajusten a decisiones multicriterio en un entorno dinámico, se utilizan técnicas de optimización multiobjetivo y de programación dinámica. Realizan aplicaciones en las que hallan rutas de evacuación óptimas conjugando diferentes objetivos.

El edificio se representa mediante un grafo, se define un camino como una serie de arcos que tienen un determinado coste medido en unidades de tiempo, se define un camino en la

red como  $\{(j_0 - j_1), (j_1 - j_2), \dots, (j_r - j_n)\}$  que conecta el conecta una serie de nodos, desde uno origen como el nodo 0 hasta un nodo destino n. Mediante programación dinámica se determina el camino óptimo en la red. De la misma forma, sea m el número de nodos destino y se desea encontrar el camino de mínimo coste desde un nodo i hasta uno de los m nodos destino. El coste de circular desde un nodo i hasta un nodo j, mediante el arco  $(j, j')$  se representa por  $\tau_{jj'}$ , y una vez se ha definido la función objetivo de costes totales, el camino óptimo se determina mediante aproximaciones sucesivas.

Seguidamente se considera el caso en el cual se incorporan otras funciones de costes, por ejemplo el incremento de tiempo que puede suponer en la circulación debido a la existencia de una concentración de humo en un determinado arco. En principio la solución se plantea mediante un solo efecto, luego se consideran conjuntamente varios factores, como la densidad de ocupación, la concentración de componentes tóxicos o la temperatura media del elemento de circulación, hallando la solución estudiando conjuntamente todos estos factores. Para estas situaciones los autores presentan ejemplos en diversos edificios de dimensiones muy reducidas en los cuales se ilustra el proceso de resolución. Trabajos posteriores de M. Kostreva, M. Wiezek y T. Getachew tienen el soporte del National Bureau of Standards, de ellos puede destacarse la publicación [59] en la cual se presentan refinamientos en los algoritmos para hallar los caminos más cortos en la función de costes en estos problemas.

Las **últimas propuestas para la solución del problema** se sitúan en el año 2003, se deben a Q. Lu, Y. Huang y S. Shekhar del Departament of Computer Science de la Universidad de Minesota, se trata del documento [100] en el cual se proponen heurísticas que permiten resolver problemas en los que se precisan redes de dimensiones considerables con un razonable esfuerzo de programación considerando las restricciones de capacidad de los arcos.

Concretamente en este trabajo los autores proponen dos heurísticas llamadas “Single-Route Capacity Constrained Planner” (SRCCP) y “Múltiple-Route Capacity Constrained Planner” (MRCCP), ambas se utilizan para planificar la evacuación de edificios, para ello se precisa establecer los elementos de la red, las capacidades de nodos y arcos además del horizonte para el que se plantea la solución del problema. En el primero de ellos se determina la evacuación de todos los ocupantes por una única vía, se hallan las rutas más cortas considerando la capacidad y en consecuencia las prioridades en función de los recorridos de evacuación que se recalculan en cada iteración. En el segundo algoritmo se considera que existen varios orígenes, desde los que se pueden asignar múltiples rutas desde cada uno de los puntos origen, de tal forma que estableciendo prioridades de forma similar a la utilizada en el caso anterior, se producen soluciones pseudo-óptimas, la particularidad radica en que se reduce espectacularmente el tiempo de cálculo respecto a las soluciones exactas. Los autores Q. Lu, Y. Huang y S. Shekhar, afirman que se han realizado experimentos reales en los cuales se ha observado que las desviaciones respecto la solución óptima están alrededor del 10%, siendo el tiempo empleado en hallar la misma más de la mitad y resultando un algoritmo escalable respecto del número de personas a evacuar.

#### 2.4.1.4 El programa EVACNET

A principios de los años 80 bajo el soporte del National Bureau of Standards R. L. Francis y T. M. Kisko desarrollaron el programa EVACNET+, se trata de una aplicación informática para la solución del problema de la evacuación de edificios. Este programa a partir de una modelización determinista y discreta permite realizar un estudio de las condiciones de evacuación de un edificio, así como obtener la distribución óptima de los ocupantes hacia las salidas. Se trata de un programa interactivo que resuelve la evacuación de un edificio, la primera versión del mismo apareció en el año 1984, una posterior en 1986 y finalmente en el año 2001 aparece EVACNET 4, no se trata de una actualización del programa, simplemente se trata de una adaptación del programa original para ampliar su capacidad.

Una descripción del programa puede seguirse en el artículo [39] publicado en la revista Fire Safety Journal en el año 1985. La primera versión se realizó en BASIC, las versiones posteriores de EVACNET+ se desarrollaron en FORTRAN ANSI 1966 y la versión para PC en FORTRAN 77, la versión inicial requería 100 Kb de memoria, las versiones posteriores 320 y 640 Kb. Fácilmente puede comprenderse que la versión para PC tan solo posibilita la resolución de problemas de redes de dimensiones reducidas, este problema parece superado con la versión denominada EVACNET4.

EVACNET + BUILDING EVACUATION ANALYSIS PROGRAM MASTER OPTION LIST	
CODE	REQUESTED ACTION
----	-----
EN	- ENTER NODE DEFINITIONS
EA	- ENTER ARC DEFINITIONS
LN	- LIST NODES
LA	- LIST ARCS
DN	- DELETE NODES
DA	- DELETE ARCS
SYS	- DEFINE OR REDEFINE SYSTEM ATTRIBUTES
SAVE	- SAVE CURRENT MODEL
RM	- RETRIEVE DEFINED MODEL
RUN	- RUN MODEL
EXAM	- EXAMINE RESULTS
QUIT	- TERMINATE EXECUTION OF EVACNET
HELP	- WHENEVER YOU HAVE QUESTIONS
ENTER CODE OF REQUESTED ACTION	

**Figura 2.22** Menú principal del programa EVACNET+

El proceso de resolución empieza modelando el edificio mediante una red formada por nodos y arcos, la primera decisión consiste en asignar un nodo a cada zona del edificio y los arcos establecen la circulación entre el centro de las zonas respectivas, luego debe decidirse la magnitud de los períodos de tiempo con los que se va a operar, las magnitudes habituales son 5, 10 ó 30 segundos. Fácilmente puede comprenderse que estas decisiones determinan el tamaño de la red dinámica utilizada en la solución del problema, a menudo es necesario agrupar dependencias en un solo nodo o bien ampliar los intervalos de tiempo de los períodos para no superar la capacidad del programa. Una tarea laboriosa consiste en determinar las magnitudes de la red más adecuadas. Los nodos se caracterizan por una ocupación ini-

cial y una capacidad y los arcos por un tiempo de circulación y una capacidad de flujo, ambas magnitudes constantes. El aspecto que ofrece el menú principal del programa puede observarse en la figura 2.22, en dicho menú se realizan las operaciones básicas de definición de parámetros, entrada de magnitudes características de nodos y arcos, así como la ejecución de la resolución y análisis de resultados.

Los resultados que proporciona el programa para el análisis de la evacuación de un edificio pueden observarse en la figura 2.23. En la opción denominada “estadísticas básicas de la evacuación” se conoce una estimación del tiempo de evacuación, el tiempo de evacuación sin retenciones, el número de personas que se dirigen a cada destino, el número de personas que utilizan cada recorrido de la red, los puntos en los cuales existen retenciones, el tiempo necesario para desalojar cada planta, el tiempo necesario para salir de cada dependencia si no hubiera retenciones. Otras opciones son el denominado perfil de la evacuación, el número de personas que llegan a cada destino en cada periodo, la ocupación de cada nodo al final de cada periodo, el movimiento registrado en cada arco en cada periodo, magnitud de las retenciones en cada periodo, ubicación de las personas que no han podido salir del edificio en un determinado periodo de tiempo.

PRIMARY EXAM OPTION LIST FOR MODEL ID - 'EJEMPLO1	
1	SUMMARY OF RESULTS: BASIC STATISTICS OF EVACUATION
2	DESTINATION ALLOCATION: NUMBER OF EVACUEES BY DESTINATION
3	TOTAL ARC MOVEMENT: TOTAL MOVEMENT THROUGH AN ARC BY ARC
4	BOTTLENECKS: IDENTIFICATION OF BOTTLENECK ARCS
5	FLOOR CLEARING TIME: TIME TO CLEAR A FLOOR BY FLOOR NUMBER
6	NODE CLEARING TIME: TIME TO CLEAR A NODE BY NODE
7	UNCONGESTED TIMES: UNCONGESTED EVACUATION TIME BY NODE
8	BUILDING EVACUATION PROFILE: NUMBER OF EVACUEES BY TIME PERIOD
9	DESTINATION EVACUATION PROFILE: NUMBER OF EVACUEES BY TIME PERIOD FOR EACH DESTINATION
10	NODE CONTENTS PROFILE: PEOPLE WAITING AT END OF TIME PERIOD BY TIME PERIOD
11	ARC MOVEMENT PROFILE: MOVEMENT THROUGH AN ARC BY TIME PERIOD
12	BOTTLENECK PROFILE: BOTTLENECK ARC INFORMATION BY TIME PERIOD
13	NODE CONTENTS SNAPSHOT: PEOPLE WAITING AT END OF TIME PERIOD BY NODE
14	NON-EVACUEE ALLOCATION: NUMBER OF NON-EVACUEES BY NODE

**Figura 2.23** Análisis de los resultados de la evacuación edificio con EVACNET+

Una de las figuras más representativas es la que corresponde al perfil de la evacuación, en ella puede analizarse el número de personas que abandonan el edificio en cada periodo, esta gráfica puede observarse en la figura 2.24. El programa presenta otras gráficas de características similares.

BUILDING EVACUATION PROFILE: NUMBER OF EVACUEES BY TIME PERIOD FOR MODEL ID 'EJEMPLO1			
TIME PERIOD	# OF EVACUEES	EACH * REPRESENTS	1 PERSON(S)
----	----	----	----
1	5	*****	
2	9	*****	
3	13	*****	
4	31	*****	
5	39	*****	
6	43	*****	
7	43	*****	
8	43	*****	
9	45	*****	
10	45	*****	
11	45	*****	
12	43	*****	
13	29	*****	
14	25	*****	
15	25	*****	
16	25	*****	

**Figura 2.24** Representación del perfil de la evacuación EVACNET+

El programa EVACNET+ es sin ningún tipo de dudas una aportación indudablemente valiosa, destaca la posibilidad de conocer las condiciones de las evacuaciones óptimas y realizar un análisis detallado de numerosos aspectos del proceso que caracteriza la evacuación de un edificio. Ciertamente las características de las representaciones gráficas y el formato de los resultados corresponden a las posibilidades de los años ochenta.

## 2.4.2 Modelos estocásticos

Estos modelos surgen al observar que muchas de las magnitudes que caracterizan el problema de la evacuación tienen carácter estocástico: Dimensiones de los individuos, capacidad de locomoción, selección de salidas, tiempo de demora en el inicio de la evacuación, tiempo que se tarda en tomar decisiones, retenciones en las salidas, etc.. Los partidarios de esta solución razonan que reproduce mejor la realidad del problema un modelo estocástico que uno determinista. Con este planteamiento los primeros modelos y soluciones del problema se deben a J. M. Smith y se sitúan en una primera publicación [180] del año 1981, desde entonces hasta el año 2000 se han desarrollado numerosas publicaciones directamente de este mismo autor y otros que han seguido sus principios. Se observa que cronológicamente el desarrollo de los modelos estocásticos es paralelo al de los modelos deterministas, sin embargo los modelos estocásticos han tenido menor profusión, aunque en la actualidad existan soluciones con estos planteamientos, su aplicación no resulta simple.

En el año 1981 J. M. Smith presenta en el trabajo [180] un proceso para la solución del problema de la evacuación de edificios mediante redes de colas que guarda una cierta similitud con las redes determinísticas. La formación de líneas de espera resulta común cuando la demanda de un servicio supera su capacidad, de esta forma la evacuación de un edificio se ajusta a la estructura de una red de colas, un determinado número de personas ocupa un conjunto de dependencias a través de las salidas de las mismas se incorporan a otros ele-

mentos de paso, se solicita un “servicio” para acciones elementales como el paso de puertas, acceso a escaleras, incorporación a pasillos, etc... cuando esta capacidad es insuficiente, el hecho más común en las condiciones de diseño habituales de los edificios, da lugar a que se produzcan retenciones. Los efectos de las colas son más claros cuando existe un gran número de ocupantes, la teoría de colas proporciona magnitudes que permiten observar y cuantificar las situaciones más conflictivas del proceso de evacuación de los edificios.

En este análisis se consideran tres tipos de redes de colas, basándose en el origen de los ocupantes, las características y de la propia configuración de la red, reciben el nombre de redes abiertas, cerradas y mixtas. En una red abierta los ocupantes parten desde un origen supuestamente inagotable, se incorporan a la red por uno o más nodos, circulan por la misma y eventualmente abandonan el sistema por unos nodos prefijados. Este tipo de red es el más apropiado para modelar problemas de acceso óptimo cuando hay numerosos usuarios que pretenden salir de un edificio comercial, una biblioteca, centros educativos, recintos deportivos, etc... una característica común en todos ellos es que la ocupación no está perfectamente determinada. Mientras que en una red cerrada existe una población finita que circula por la misma pero nunca la abandona. Mientras que en una red mixta existe la circulación de una población finita que nunca abandona la red y una población infinita que entra en el sistema y lo abandona en unos determinados nodos.

Para representar el edificio se consideran las dependencias ocupadas por un determinado número de personas y los puntos destino de evacuación, ambos se hallan conectados por las vías de evacuación, siendo éstas el elemento esencial de este proceso de solución del problema. Entonces la solución pasa por modelar el proceso estocástico que supone la incorporación a las vías de evacuación, la circulación y la descarga hasta los destinos. Los tipos de colas utilizados en el modelado de este problema son las denominadas  $(M/M/1)$ ,  $(M/M/C)$  y  $(M/G/\infty)$ . En una cola definida como  $(M/M/1)$  los ocupantes uno a uno se incorporan a la red según un modelo exponencial, existe disciplina en las llegadas de forma que el primero que llega es el primero que recibe servicio, el cuál también se realiza según un modelo exponencial, un ejemplo inmediato de esta situación es la de los ocupantes de un recinto que lo abandonan por una puerta cuya capacidad de paso se limita a una única persona. Mediante una cola  $(M/M/C)$  se representa la situación en la cual, en las mismas condiciones que el caso anterior, el puesto de servicio tiene capacidad para  $C$  individuos, por ejemplo una meseta de una escalera que dispone de dos accesos se modelaría mediante una cola  $(M/M/2)$ . Finalmente con una cola  $(M/G/\infty)$  se representa la situación en la cual las incorporaciones siguen un proceso exponencial y el tiempo de servicio tiene una duración  $G$ , un ejemplo de esta situación es la circulación por un pasillo.

De forma similar el desplazamiento de los ocupantes de las dependencias hasta las salidas de las mismas se modela mediante una cola  $(M/G/\infty)$ , si se considera que para cruzar las salidas se invierte un determinado tiempo también resulta procedente utilizar una cola  $(M/G/\infty)$ , si las salidas son puertas simples resulta favorable utilizar colas  $(M/M/1)$ , para la circulación en escaleras normalmente se utilizan colas  $(M/G/\infty)$ , mientras que las confluencias en las mesetas se utilizan las  $(M/M/C)$  y para las descargas hasta las salidas se utilizan

nuevamente colas (M/G/∞).

En estos modelos la red que constituye el edificio se define mediante una matriz, denominada “matriz de transiciones probables”, en la cual en las columnas se sitúan los orígenes y en las filas los destinos y los elementos de la matriz son las probabilidades de tránsito. Para la resolución del problema se utiliza algoritmo denominado MVA (Mean value analysis) en el cual se ha realizado una adaptación del algoritmo original [160], cuyos autores son Reiser y Lavenberg. Finalmente el trabajo se ilustra con un ejemplo de aplicación en un edificio de reducidas dimensiones en el cual se halla limitado el número posible de colas y el número de personas.

Una evolución de los modelos de redes de colas descritos en los párrafos anteriores se presenta en el trabajo [184] de K. Talebi y el propio J. M. Smith del año 1985, los aspectos estocásticos se generalizan y no se limitan tan solo al modelado de la red, para ello se establecen en cinco fases en la secuencia de evacuación: La reacción de los individuos a la señal de alarma, la demora hasta tener conciencia de la necesidad de evacuación, la incorporación a la red, la selección aleatoria de recorridos en la ruta de evacuación, las demoras y las potenciales retenciones y finalmente la evaluación del proceso.

La red de colas se define mediante un grafo, en el cual el conjunto de nodos  $N$  que componen la totalidad del edificio pueden dividirse en tres subconjuntos  $N_1$ ,  $N_2$  y  $N_3$ , siendo respectivamente los nodos que tienen una ocupación inicial, los de circulación y los nodos destino. El objetivo del problema consiste en determinar los valores de los flujos que optimicen las magnitudes que caracterizan este proceso. Los tipos de colas utilizados son los descritos en el apartado anterior y a partir de los trabajos de Raiser & Lavenberg [160] se ofrecen formulaciones que estiman en función de las características de cada una de ellas longitudes medias o tiempos medios de espera. Para cada tipo de cola las expresiones (2.71), (2.72) y (2.73) que proporcionan el valor del tiempo medio total de espera y de servicio son

$$M/M/1 \quad w_{r,l} = \tau_{r,l} [1 + n_l(k - e_r)] \quad (2.71)$$

$$M/G/\infty \quad w_{r,l} = \tau_{r,l} \quad (2.72)$$

$$M/M/C \quad w_{r,l} = \frac{\tau_l}{S_l} \left[ 1 + n_l(k - e_r) + \sum_{i=0}^{S_l-2} (S_l - 1 - i) p_l(i, k - e_r) \right] \quad (2.73)$$

en dichas expresiones  $k$  es el número total de ocupantes y  $k_r$  el número de personas en la cadena  $r$ ,  $\tau_{r,l}$  es el tiempo medio de servicio de un ocupante de la cadena  $r$  en la cola  $l$ ,  $n_l$  es el valor medio que equilibra la cola  $l$ ,  $p_l(k)$  es la probabilidad de  $k$  personas en la cola  $l$ ,  $S(r)$  es la secuencia de colas visitadas por la cadena  $r$ ,  $e_r$  es un vector  $r$  dimensional con un “1” en la posición  $r$  y “0” en el resto, de esta forma  $(k - e_r)$  es el vector de ocupación de un sistema con un ocupante menos en la cadena  $r$ . De la misma forma en las expresiones (2.74) y (2.75) se obtiene en una cola M/M/C los valores que dimensionan la cadena  $r$  y los valores

$n_{r,l}$ , que producen el equilibrio, en esta expresión  $\theta_{r,l}$  representa el número de visitas que realiza un ocupante de la cadena  $r$  en la cola  $l$ .

$$\lambda_r = \frac{k_r}{\sum_{l \in S(r)} \theta_{r,l} w_{r,l}} \quad (2.74)$$

$$n_{r,l} = \lambda_{r,l} w_{r,l} \quad (2.75)$$

Finalmente, el tiempo de evacuación de un edificio viene dado por la expresión (2.76), en la cual las dependencias factibles de ocupación se definen por  $\zeta$ . La expresión proporcionada guarda una cierta equivalencia con la formulación de los modelos deterministas, expresa el tiempo de evacuación de cada una de las dependencias origen de evacuación.

$$T_\zeta = (T_{1,\zeta}, T_{2,\zeta}, \dots, T_{j,\zeta}) \quad \zeta = 1, 2, \dots, Z \quad (2.76)$$

En estos mismos trabajos, se hace referencia a una aplicación para un edificio de grandes dimensiones, para cuya solución se utiliza un programa denominado Q-GERT, en el cual se realizan diversas simulaciones para la resolución del problema.

El proceso de solución del problema mediante redes de colas a lo largo de estas dos décadas ha sufrido mejoras que pueden observarse en diversas publicaciones como [187], [188], y [189]. En los documentos finales se propone una solución estructurada, la representación, el análisis y la síntesis. En la representación se trata de construir un modelo que capture el problema de la forma apropiada incorporando diversas topologías y transformaciones, en la fase de análisis se trata de conocer los datos más relevantes y finalmente en la síntesis se determinan las rutas a las cuales se acomodarán mejor los ocupantes.

A principios de los años 90 aparecen las primeras publicaciones [92] y [93] de G. Lovas. A este autor se debe la **solución del problema mediante redes de colas estocásticas multi-objetivo**. Resulta una modelización ciertamente compleja, que contempla más aspectos que el simple tiempo de evacuación y la magnitud de las retenciones, incorpora ciertos modelos de fiabilidad en los elementos que constituyen el sistema de evacuación y además de estimar tiempos de evacuación trata de evaluar el nivel de seguridad que existe en cada posición del edificio durante una evacuación de emergencia.

En el modelo de G. Lovas se opera en intervalos de tiempo discreto y en cada edificio se definen una serie de posibles accidentes  $m$  para los cuales se define una función  $H_{im}(t)$  que trata de expresar las consecuencias de cada uno de estos incidentes en el instante  $t$  y en cada una de las dependencias del edificio, se trata pues de una secuencia que presenta unos valores máximos  $H_{im}(t) = M_H$  cuando el incidente supone la muerte de alguna persona, y nulos  $H_{im}(t) = 0$  cuando los efectos del incidente son irrelevantes y a cada elemento de esta secuencia se le asigna una determinada probabilidad de ocurrencia. Se trata de determinar las estrategias que minimicen la función  $H_{im}(t)$ . Por otra parte, se define el número de personas presentes en el nodo  $i$  en el instante  $t$ ,  $Y_i(t)$  es el tiempo de espera que le supone a cada

usuario en el nodo  $i$  en el instante  $t$ . Mediante  $X_i(t)$  se definen los efectos del accidente, y mediante la función  $K_i(t)$  se define el número de personas que han sobrevivido al siniestro en el nodo  $i$  en el instante  $t$ . El tiempo de evacuación se define mediante una función, estableciendo que  $M(t)$  es el número de personas que han salido en el instante  $t$ . A partir de la enumeración de los recorridos en la red de salida y los posibles incidentes se trata de identificar las posiciones más seguras, en las que registrarían unos valores de supervivencia más altos. Se define como un modelo multiobjetivo dado que se contemplan diferentes posibles siniestros. En las últimas publicaciones [98] y [99] G. Lovas muestra algunas aplicaciones resueltas mediante técnicas de simulación.

## 2.5 MODELOS DE SIMULACIÓN

Para conocer los modelos de simulación utilizados en el estudio del problema de la evacuación de edificios dos documentos [207] y [61] han resultado muy valiosos, se trata del artículo de J. M. Watts publicado el año 1987 y el de S. Gwynne, E. R. Galea, M. Owen y P. J. Lawrence publicado el año 1998, en ambos trabajos se ofrece una amplia referencia de los modelos de simulación desarrollados hasta el momento de su redacción.

Los modelos de simulación utilizados en el estudio del problema de la evacuación de edificios son realmente muy variados, por esta multiplicidad de aspectos que los diferencian resulta difícil establecer una clasificación de los mismos. Algunas de estas características son la naturaleza de las variables, el sistema utilizado para representar el edificio, la forma de modelar el movimiento de las personas, la incorporación en el modelado de fenómenos físicos y químicos como la transmisión del calor o la expansión del humo o gases tóxicos, y finalmente que los ocupantes tengan o no capacidad para tomar decisiones.

Una primera clasificación se realiza a partir de la naturaleza de las variables. Cuando las variables utilizadas en el modelado de la evacuación presentan valores fijos o son función de otra variable como la densidad de ocupación, sin que intervenga el azar, se trata de modelos determinísticos. Mientras que si las variables utilizadas en la modelización presentan incertidumbre o están relacionadas mediante una determinada distribución de probabilidad se trata de un proceso estocástico. Tanto las dimensiones de las personas como la velocidad de locomoción presentan valores que por su propia naturaleza pueden considerarse variables aleatorias, por ello utilizar modelos estocásticos aporta más realismo al modelo.

En cuanto a la forma de representar el edificio se distinguen según la precisión y características con que se define la red. El edificio se divide en espacios y en subespacios y luego se establece la forma en que cada elemento se conecta con sus vecinos, los modelos más precisos utilizan elementos de dimensiones reducidas, con capacidad para ser ocupados por una única o bien por un número reducido de personas, las formas geométricas son diversas: rectángulos, cuadrados o exágonos. Los modelos menos precisos utilizan los propios recintos: Pasillos, escaleras, vestíbulos, etc..., el inconveniente de utilizar una red vasta consiste en que no es posible estudiar movimientos en la propia dependencia, es más difícil modelar la existencia de obstáculos y la interacción o los conflictos en el desplazamiento de los

ocupantes y la principal ventaja está en que se reduce la dimensión del problema.

Las personas pueden ser tratadas como objetos que no responden a estímulos externos de forma absolutamente automática sin ninguna capacidad de decisión, la dirección de circulación, la velocidad y los flujos de desplazamiento son determinados por las condiciones físicas del entorno, estos modelos normalmente se denominan “ball-bearing”, generalmente se sitúan en un entorno de simulación determinista aunque no tiene que ser necesariamente así. Otros modelos más refinados consideran la capacidad de reacción a situaciones peligrosas, otorgan capacidad para la selección de salidas, suponen tiempos de reacción variables e incluso generan determinadas actuaciones basadas en modelos de inteligencia artificial.

Los ocupantes pueden contemplarse de forma individual o bien como grupo, cuando la simulación se efectúa contemplando uno a uno los individuos del edificio reciben el nombre de modelos de simulación microscópicos, en ellos es posible establecer atributos personales o bien características de actuación para cada elemento del sistema. Los modelos que contemplan los ocupantes como grupos se denominan macroscópicos y simulan globalmente grupos de personas de tamaño diverso, resulta más difícil modelar el efecto de fenómenos físicos o químicos, en este caso se recurre a estimar proporciones de afectados resultando una solución razonablemente válida si se opera con poblaciones homogéneas.

**Los primeros trabajos sobre la simulación de la evacuación de edificios** se publicaron a principios de los años ochenta, uno de estos primeros documentos es el trabajo [111] realizado por Timothy O' Leary and Jerre M. Gratz en el College of Business Administration at Arizona State University. En dicho artículo se justifica la utilización de la simulación como una herramienta útil para ensayar diferentes alternativas de evacuación en edificios en los cuales resulta muy complejo realizar simulacros, se cita que en esta situación se encuentran hoteles, centros de asistencia sanitaria, establecimientos comerciales y recintos destinados a congresos, acontecimientos recreativos y deportivos entre otros. El edificio sobre el que se realiza el estudio de la evacuación tiene una superficie de 2000 m<sup>2</sup> y está ocupado por unas 2200 personas. Las personas representan transacciones y los elementos de paso del edificio son modelados como servidores. No se detalla específicamente, sin embargo todo parece indicar que la simulación se realiza mediante un lenguaje tipo GPSS. La modelización se efectúa considerando que las salidas permanecen perfectamente libres de paso durante la evacuación, los ocupantes siguen rutas de evacuación pre-establecidas e inician la evacuación inmediatamente después de oír la señal de alarma y se desplazan de forma uniforme por pasillos y escaleras a menos que haya congestiones, en el momento que éstas se producen, esperan hasta obtener la adecuada disponibilidad del servidor.

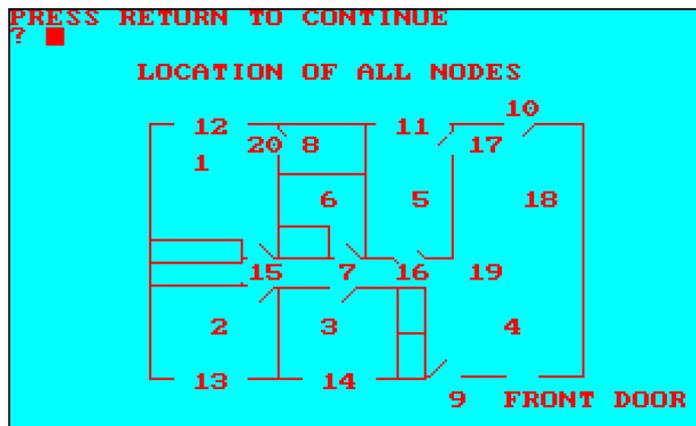
Otro de los primeros programas de destacada relevancia es el **B-FIRES II** [191], desarrollado por F. Sthal al amparo del National Bureau of Standards, el programa está escrito en FORTRAN y existe referencia del mismo en diversas publicaciones del año 1982, en él se simula la evacuación de un edificio contemplando el comportamiento de las personas desde el punto de vista individual que reaccionan a estímulos externos derivados del fuego, el humo y el sistema de alarma, el proceso de decisión se realiza en intervalos fijos de tiempo definidos por el usuario de la aplicación.

### 2.5.1 El programa EXITT

El programa "EXITT - A simulation model of occupant decisions and actions in residential fires" [90], es un programa desarrollado en el Center for Fire Research de Gaithersburg por B. M. Levin, la referencia del mismo se sitúa en el año 1987, el programa está escrito en BASICA y consta de 11 ficheros encadenados. Se simula el movimiento individual de las personas en caso de siniestro en edificios de reducidas dimensiones que utiliza una red vasta de dependencia a dependencia.

Las variables y parámetros que utiliza este programa son las características arquitectónicas del edificio, la expansión del humo, el nivel sonoro de la alarma y las características físicas y personales de los ocupantes. Un aspecto destacado del mismo es que además de ubicar y definir el estado de las personas, si duermen o están despiertas, su velocidad de desplazamiento, si precisan o no ayuda se modelan ciertos aspectos de comportamiento, decidiendo rutas en función de la dispersión del humo o la activación de los sistemas de detección.

Una idea de las características de este programa puede verse en el análisis de las siguientes figuras. En la figura 2.25 se muestra la planta de un edificio formado por ocho dependencias, se indican las puertas que serían las salidas habituales y las ventanas que se contemplan como salidas extraordinarias que permiten operaciones de rescate.



**Figura 2.25** Representación de las dependencias de un edificio con EXITT.

La ubicación de los ocupantes puede observarse en la figura 2.26, se trata de cuatro personas correspondientes a una familia formada por dos personas adultas y dos niños, uno de 7 años y otro de tan solo 1 año que necesariamente precisa asistencia.



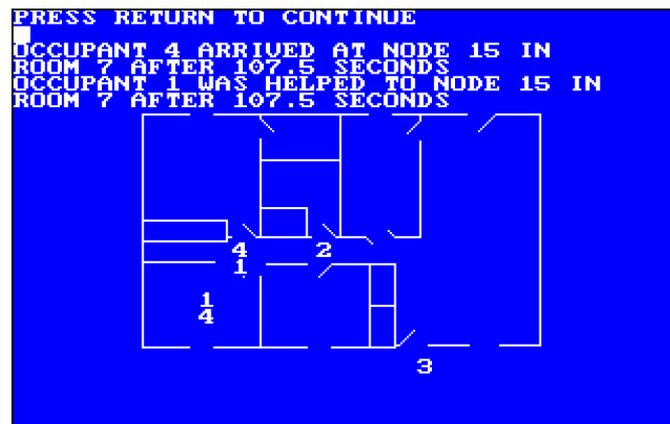
**Figura 2.26** Ubicación de los ocupantes en el edificio mediante EXITT

Mediante la simulación se supone que se produce un incendio en una dependencia, de la cual se han descrito las condiciones arquitectónicas y sus elementos mobiliarios dando lugar a un determinado tipo de fuego con desprendimiento de humo y calor que se expande por toda la planta, en el momento que se alcance la concentración de aperecibimiento las personas más próximas advierten su presencia y luego desencadena la evacuación y las operaciones de rescate. De la misma forma, se supone que se halla instalado un sistema automático capaz de producir la activación del sistema de detección, la consiguiente señal de alarma en el cual se simula la atenuación de la señal por distancia y el proceso de aperecibimiento a los ocupantes. Los ocupantes reaccionan y desarrollan la evacuación, se simulan sus posiciones y la expansión del humo llegando un momento en que puede ser tan denso que impida la circulación bloqueando desplazamientos y exija adoptar rutas alternativas. Un punto intermedio de este proceso puede observarse en la figura 2.27. En pantallas anteriores se había advertido de la presencia de humo, en el instante que se muestra el padre decide rescatar al niño de un 1 año.



**Figura 2.27** Simulación del desarrollo de un incendio y evacuación mediante EXITT

En la figura 2.28 se muestra cuando el padre llega a la habitación del niño y ha logrado su rescate. El proceso de simulación sigue hasta situarse todos los ocupantes en una posición segura o verse afectados e imposibilitados por el incendio en el interior del edificio.



**Figura 2.28** Visualización de las operaciones de rescate mediante EXITT

Puede observarse que se trata de un instrumento para pronosticar el desarrollo de un incendio y evaluar la evacuación en edificios de dimensiones reducidas, todo ello realizado con las posibilidades de los medios gráficos de los años ochenta.

### 2.5.2 Modelado discreto mediante redes de colas: EVACSIM y EVADE

Se trata de un modelo denominado EVACSIM desarrollado en Noruega por G. M. Lovas. El primero trabajo publicado [94] sobre este modelo se sitúa en el año 1993, puede decirse que es el sucesor de otro programa denominado EVADE. Es un programa de simulación discreta, se analiza la viabilidad de las decisiones en intervalos regulares de tiempo. Este proyecto tuvo un decidido soporte de la administración Noruega, posiblemente como consecuencia del accidente de "Scandinavian Star" ocurrido en el año 1990. Fundamentalmente ha sido probado en el estudio de la evacuación de buques y plantas petrolíferas.

Mediante EVACSIM más que modelar la evolución física de los acontecimientos, se estudia evacuación de un edificio desde el punto de vista de la fiabilidad de la estructura global del mismo, se simula el movimiento de las personas y la situación de los factores que condicionan el nivel de riesgo. Para la solución de las redes de colas, se utiliza un programa denominado (Queueing Network Analyzing Package 2). La utilidad de esta primera versión está limitada a un número reducido de personas.

### 2.5.3 El programa EXIT-89

EXIT-89 es un programa diseñado para estudiar la evacuación de un gran número de personas en edificios de grandes dimensiones en los que se considera que existe un riesgo de incendio elevado. La versión 1.01 de Enero de 2001 tiene capacidad para estudiar la evacuación de 700 ocupantes, en edificios de 300 nodos con 100 intervalos de tiempo, cada planta puede tener 89 nodos y el edificio 10 escaleras.

En este modelo es posible modificar los elementos de evacuación tales como ocupaciones y cambiar elementos de diseño como anchuras mínimas de paso y la distancia hasta las salidas, desde la perspectiva de las normativas de seguridad contra incendios. Puede funcionar conjuntamente con CFAST, un programa que modela la generación y la expansión de

humos y productos de la combustión, entonces el módulo TENAB determina el efecto sobre las personas de los productos de la combustión.

La geometría del edificio se define mediante un conjunto de rectángulos comunicados entre sí, pueden comunicarse por puertas y otros elementos de paso, en cada rectángulo se encuentran un determinado número de ocupantes que tiene una determinada velocidad de circulación que puede variar según el grado de congestión y la existencia de humo o productos derivados de la combustión en el recinto, la evacuación puede comenzar instantáneamente o puede sufrir alguna demora, también los datos del movimiento de humos se utilizan para determinar cuando se activa el sistema de detección de incendios y cuando se produce la señal de alarma. El planteamiento de EXIT-89 es macroscópico y no modela actuaciones de comportamiento individual de la forma que lo realiza el programa EXITT.

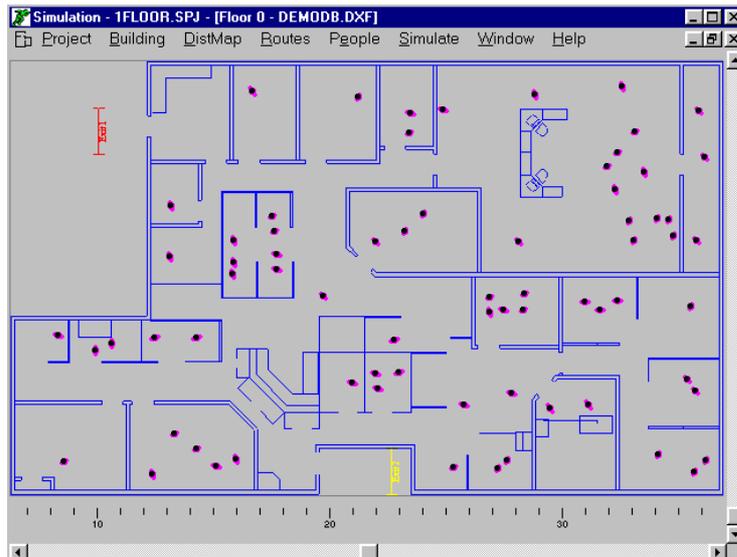
#### 2.5.4 El programa SIMULEX

Se trata de un programa para la simulación de la evacuación de grandes edificios, el cual simula el movimiento individual de las personas través de unos espacios geoméricamente definidos. El programa está escrito en Microsoft C7 / C<sup>++</sup>. Dicho trabajo fue desarrollado por P. A. Thompson y E. W. Marchant y existe referencia de una primera versión presentada en Abril de 1993 y una última referencia en el año 2002. La descripción del programa SIMULEX y su proceso de verificación puede analizarse en las publicaciones [200] y [201] del año 1995.

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

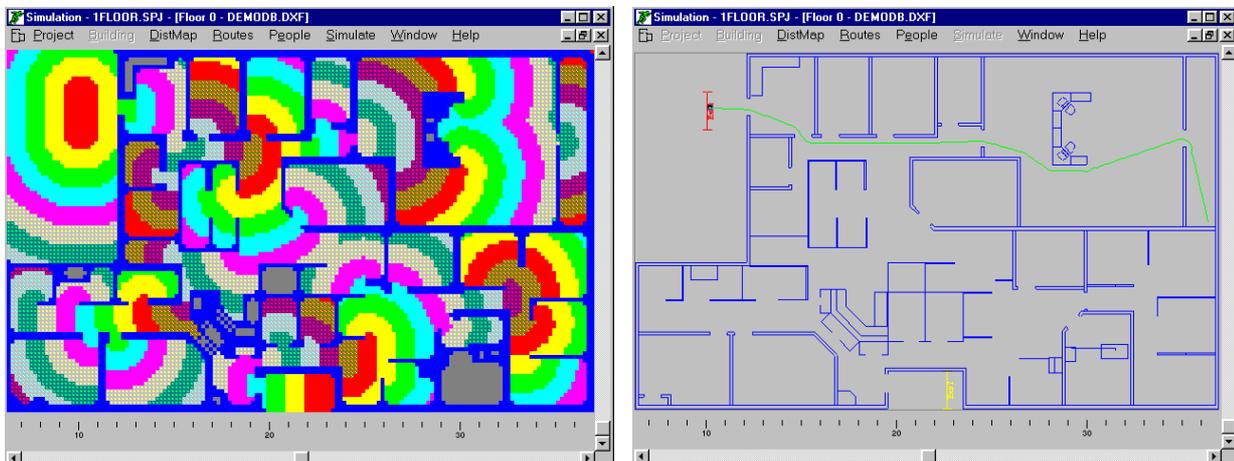
**Tabla 2.13** Dimensiones círculos representación SIMULEX

Una primera parte del programa permite definir minuciosamente la geometría del edificio, a partir de datos numéricos del mismo, o bien mediante diferentes rutinas es posible incorporar la geometría directamente desde programas de CAD, una vez se han definido todos los datos se efectúa el cálculo de las distancias mínimas, las anchuras y las capacidades de paso. A los ocupantes es posible asignarles una velocidad de circulación aleatoria según una distribución uniforme o bien una distribución normal. Esta velocidad se ve afectada por la proximidad de otras personas y por la densidad de ocupación. En la figura 2.29 puede analizarse la representación de la geometría de un determinado recinto y los ocupantes ubicados en el mismo. Las representaciones que ofrece dicho programa son planas, correspondiendo a plantas de edificios o de recintos.



**Figura 2.29** Representación de la planta de un edificio mediante SIMULEX

Una novedad importante que incorpora este autor es la representación de las personas mediante tres círculos, sencillamente se justifica que resulta más simple esta representación que la clásica mediante la elipse humana. En ella  $R$  corresponde a la magnitud del radio del círculo mayor,  $r$  el radio de los menores y  $s$  la separación entre el centro de la circunferencia mayor y el centro de las dos menores, dichos valores pueden observarse en la tabla 2.13 en la cual todas las magnitudes se hallan expresadas en metros.



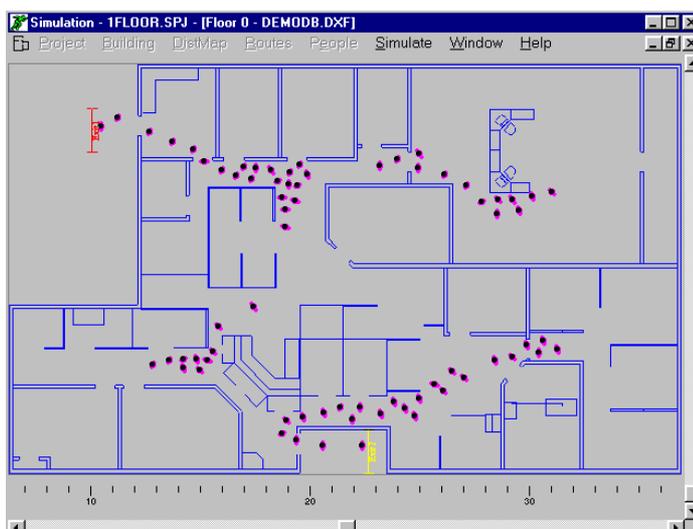
Mapa de distancia mediante SIMULEX

Determinación de la ruta más corta

**Figura 2.30** Representaciones ofrecidas por el programa SIMULEX

El programa además de la simulación de la evacuación dispone de diversas herramientas, por ejemplo ofrece la posibilidad de realizar el denominado “mapa distancias” en el cual se representan con un mismo color los puntos situados a una cierta distancia de cada salida, puede verse en la figura 2.30. Otra posibilidad consiste en determinar la ruta más corta desde cualquier punto de la planta, puede observarse en la figura 2.30, mediante una línea se representa el recorrido que debería efectuar un ocupante situado en dicha dependencia.

Mediante este programa se simula el movimiento de las personas y la visualización se realiza en intervalos de 0,1 segundos, puede observarse toda la planta en la cual se opera o bien mediante un “zoom” pueden observarse las zonas de interés. También es posible estudiar alternativas de evacuación de forma detallada y contemplar el efecto de las colas como consecuencia de diferentes velocidades de circulación y de la congestión de las salidas. En la figura 2.31 puede observarse una imagen intermedia del desarrollo de la una evacuación en la cual los ocupantes se han distribuido hacia las dos salidas disponibles.



**Figura 2.31** Visualización de la evacuación mediante SIMULEX

### 2.5.5 El programa EXODUS

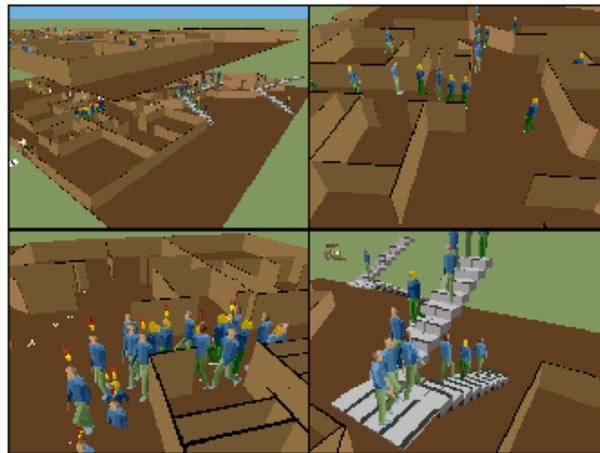
Se trata de un programa de simulación desarrollado en el Reino Unido, las primeras referencias se sitúan en el año 1994 y desde entonces se han ido actualizando sus versiones, sus autores son E. Galea, P. Lawrence y otros colaboradores en la Universidad de Greenwich, diseñado para su utilización en PC y escrito en C++ constituye una herramienta potente y contrastada. La referencia bibliográfica de este programa se halla en numerosas publicaciones, la primera de ellas [49] se sitúa en el año 1993 y la última [54] en el año 2003.

EXODUS es una herramienta informática diseñada para estudiar la evacuación de gran variedad de recintos y edificios de cualquier dimensión, simula la evacuación individual de cada uno de los ocupantes de un edificio modelando el recinto de forma detallada, analizando la interacción entre los ocupantes, la estructura social y aspectos físico-químicos del entorno que afecta a cada uno de los individuos. Para el tratamiento individualizado de los ocupantes dispone de heurísticas que modelan su comportamiento. En la figura 2.32 puede observarse un aspecto general del formato que ofrece dicho programa, donde destaca la evolución de una evacuación en formato espacial. Para proceder a representaciones espaciales, la geometría del edificio se expande en tres dimensiones representando salidas, recintos, obstáculos, etc..., según puede observarse en la figura 2.33 es posible visualizar la evacuación de varias plantas conectadas mediante escaleras, utilizando una sola imagen o bien simultáneamente visualizar diferentes zonas del edificio.



**Figura 2.32** Simulación mediante EXODUS

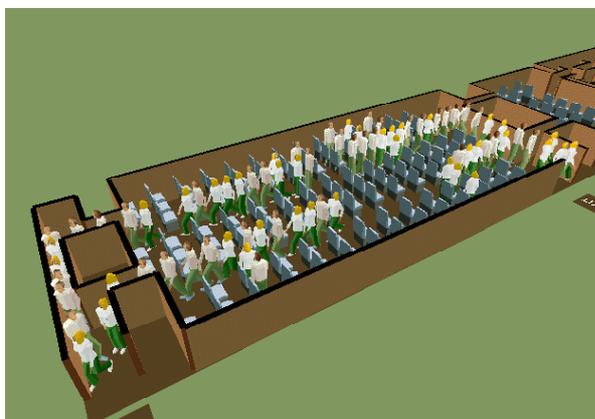
El edificio se describe mediante ficheros en formato DXF producidos por cualquier programa de CAD. La malla que permite la simulación y el desplazamiento de los ocupantes es de dimensiones muy reducidas permitiendo efectuar simulaciones precisas, el lado menor de las subzonas puede tener 0,5 metros y conectarse con las 8 subzonas adyacentes.



**Figura 2.33** Formato visual de las soluciones aportadas por EXODUS

El programa está estructurado en varios sub-modelos, mediante el sub-modelo de movimiento se establecen las condiciones de locomoción de los individuos. Mediante el de comportamiento se establece la respuesta en el momento de producirse la señal de alarma: reacción inmediata o bien después de un cierto tiempo. Dicho módulo opera a dos niveles, por un lado existe el comportamiento global y por otro el individual, mediante el módulo global se implementan las estrategias de evacuación que puede adoptar cada ocupante: La vía más corta o bien la que resulte más familiar, también es posible establecer que determinados individuos deben pasar por ciertas dependencias para efectuar operaciones de supervisión. Mediante el sub-modelo de toxicidad se determina el impacto fisiológico sobre los ocupantes de una dosis de exposición a determinados elementos contaminantes tales como CO, CO<sub>2</sub> o CNH entre otros, en tales circunstancias se modela el efecto sobre la capacidad de

locomoción, de reacción y el tiempo de incapacitación. Este sub-modelo también permite analizar el efecto del calor y las radiaciones producidas por un incendio. También es posible efectuar un análisis de riesgos en interacción con el programa CFAST.



**Figura 2.34** Modelización de la evacuación de una aeronave

Finalmente debe comentarse que actualmente existen versiones de EXODUS adaptadas para estudiar la evacuación de buques y aeronaves. En la figura 2.34 puede observarse el aspecto que adopta dicho programa para la simulación de la evacuación de una aeronave.

### 2.5.6 Los programas CRISP y GRIDFLOW

Estos dos programas fueron desarrollados en el Reino Unido por la división FRS del Building Research Establishment, el más simple trata las personas como un conjunto de partículas de fluido homogéneas mientras que el más complejo considera las personas individualmente con un comportamiento explícito de cada una de ellas. Ambos programas permiten modelados en tres dimensiones.

**GRIDFLOW** dispone de una rutina para efectuar un modelado simplificado del comportamiento de las personas, permite suponer para cada individuo actuaciones como demoras en el inicio de la evacuación y capacidad para dirigirse hacia un destino de evacuación siguiendo una ruta prefijada, también se les otorga capacidad para seleccionar la ruta más corta o bien seleccionar los recorridos de forma aleatoria. Los autores afirman que se obtienen aproximaciones razonables.

**CRISP** permite modelar por completo un escenario de un incendio, diseñado como una herramienta de gestión del riesgo, se afirma que efectúa simulaciones mediante el método de Monte-Carlo. Permite analizar el efecto del comportamiento de forma más detallada que en el programa GRIDFLOW, en este caso no se contemplan demoras en el inicio de la evacuación si no que incorpora efectos de comportamiento como investigar que está sucediendo, avisar a otras personas y luego iniciar la evacuación.

## **Análisis de otras herramientas de simulación**

Se presentan otros programas de características diversas utilizados en la simulación de la evacuación de edificios de los cuales se dispone de poca información para su valoración.

**THE ESCAPE AND RESCUE MODEL** es un programa de simulación discreta de acontecimientos para el estudio de la evacuación de edificios ocupados por personas con diferentes grados de discapacidad física o mental, el programa es del año 1983 y está escrito en SIMSCRIT II.5, el modelo está realizado para simular un determinado edificio definido por el usuario con capacidad para 100 personas y 50 dependencias.

**CRISP-II** es un programa de simulación desarrollado por Fraser y Michell en el año 1994, el edificio se divide en su estructura natural de dependencias: pasillos, escaleras, vestíbulos, etc... y la red se forma mediante la conexión entre estos elementos y los ocupantes se desplazan de un elemento a otro.

**VEGAS** es un modelo que aplica técnicas de realidad virtual. Presenta gráficos en tres dimensiones e ilustra el desarrollo del incendio en tiempo real. Modela el comportamiento del grupo, la alarma y el efecto del humo. Cada persona escoge una ruta de salida de las posibles que tiene predeterminadas. Se simula la evolución de los fenómenos físico-químicos y la evacuación se inicia cuando uno de los indicadores alcanza un determinado nivel.

**BGRAF** es un programa de simulación desarrollado por F. Ozel en la Universidad de Michigan, cuyas referencias se sitúan entorno al año 1992, está escrito en FORTRAN, utiliza una red de flujo precisa y el desarrollo de la evacuación se realiza desde la perspectiva individual, permite estudiar diferentes hipótesis de comportamiento de las personas afectadas por un incendio.

**EVACS** es un programa de simulación desarrollado por Tanaka y Takahaski en el Japón, realizado en FORTRAN 7. Se utiliza como red las propias dependencias del edificio, se establece la ocupación de las mismas y la velocidad de desplazamiento y el programa proporciona la ocupación de cada dependencia en cada instante y tiempos de evacuación.

**WAY OUT** es un programa de simulación desarrollado por V. Shestopal en Australia, las primeras referencias del mismo se sitúan en el año 1994. Way-Out es uno de los 18 programas que forman el paquete Fire Wind. El modelo se basa en el modelo de locomoción de Predtechenskii y Milinskii, se determina el tiempo necesario para realizar los desplazamientos y modelan mezclas de flujos. El desplazamiento se realiza entre dependencias o zonas de desplazamiento, las cuales pueden dividirse hasta en 400 unidades de superficie. Los datos necesarios para la simulación son las características del recinto, las anchuras mínimas de paso y la longitud de los recorridos y el número de personas ubicadas en cada elemento de superficie, el resultado es la visualización de los desplazamientos.

**EGRESS** es un programa versátil para el estudio de la evacuación de edificios desarrollado en el Reino Unido por N. Ketchell, las primeras versiones del mismo son del año 1993. Este programa asigna a cada persona un determinado rol de comportamiento y unas variables

de decisión a partir de conceptos de inteligencia artificial. El espacio del edificio se representa mediante hexágonos que pueden estar ocupados o vacíos, un hexágono ocupado representa el espacio correspondiente a una persona y las personas acceden de un hexágono al contiguo en el cual la velocidad depende de la actitud del grupo. El sistema puede servir para cualquier tipo de edificios. EGRESS ha sido utilizado en el estudio de la evacuación de gran variedad de instalaciones, centros comerciales, plantas petrolíferas, plantas químicas, medios de transporte, edificios públicos y recreativos.

**ALLSAFE** es un programa desarrollado en Noruega, cuya versión 1.0 se realizó en el año 1998, determina en un entorno determinista el tiempo necesario para la evacuación considerando la reacción y la influencia de decisiones que adoptan las personas. Tiene un módulo estocástico que permite obtener intervalos de confianza en los tiempos de evacuación.

**FIERACAM** y **FIERAsystem** son dos programas para la gestión del riesgo y estudio de la seguridad en edificios desarrollados por el National Research Council del Canadá, que incorpora un módulo para estudiar la evacuación de edificios y su interacción con otros modelos como la expansión de humos, gases tóxicos, etc... se trata de un modelo completamente determinista de propósito general comercializado por el NRCC.

**SGEM** es un programa de simulación realizado en Hong Kong cuya primera referencia es del año 2004, ha sido desarrollado por S. M. Lo, Z. Fang, P. Lin y G. S. Zhi, el programa está completamente realizado en C++, realmente es un programa moderno en la línea de EXODUS y SIMULEX, permite introducir las características del edificio directamente de CAD, SGEM constituye el módulo de simulación y VR constituye un módulo para la visualización del proceso de evacuación. La red natural del edificio incorporada desde CAD se transforma en una red más fina para la resolución del problema. Se realiza un tratamiento individual de los ocupantes cuya velocidad depende de las características del propio individuo, la densidad de ocupación del nodo que ocupa y de la ocupación en nodos inmediatos a los cuales pretende desplazarse.

También deben citarse los trabajos de diferentes autores que para el estudio de la evacuación de edificios utilizan herramientas de **simulación discreta de propósito general**. MOBILIZE es una aplicación realizada a finales de los ochenta mientras que las otras aplicaciones realizadas en nuestro país son mucho más recientes.

**MOBILIZE** (Model of Occupant Behaviour and Exit Utilization) es un estudio que utiliza el lenguaje de programación GPSS/PC, desarrollado por J. Weinroth en la Universidad de Kent, las referencias del mismo se sitúan en la publicación [208] del año 1989. Se presenta como una herramienta para planificar la evacuación de emergencia en edificios de estructura compleja, una dependencia ocupada se representa como un generador de salidas que se realizan según una determinada distribución de probabilidad, las personas que abandonan una dependencia utilizan un elemento de circulación en el cual el desplazamiento es contemplado como un elemento servidor que les presta un servicio, de la misma forma que una salida es un elemento que presta un servicio con una determinada capacidad, se consideran otros elementos para modelar confluencia, esperas, etc. Se obtienen tablas de resultados con

valores medios y desviaciones de tiempos de evacuación, recorrido y espera.

En esta línea de trabajos que utilizan herramientas de simulación estándar, A. Guasch en la Universitat Politècnica de Catalunya desde el año 1998 ha realizado planes de evacuación de diferentes edificios como el Hospital de Terrassa, el Teatre Nacional de Catalunya y el Aeropuerto de Barcelona en estos estudios la simulación discreta se ha completado mediante la incorporación de herramientas gráficas que permiten visualizar el desarrollo del proceso ofreciendo resultados técnicamente muy interesantes y notablemente vistosos, en este proceso de resolución se utilizan las herramientas de simulación ARENA y CINEMA.

**SIMUDES** es un programa de simulación desarrollado en la Universidad de Valladolid por A. Gento, J. López y M. Posada, existe referencia del mismo en el documento [57] del año 2003. Se describe como una herramienta desarrollada para facilitar la simulación y el análisis de un edificio genérico a partir de sus características constructivas, se muestra un aplicación en el estudio de la evacuación del edificio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Valladolid donde para la evacuación de 3.338 ocupantes se obtiene un tiempo de 12 minutos y 57 segundos.

## **2.6 ESTUDIO DESDE LA PSICOLOGÍA Y LAS CIENCIAS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PERSONAS**

En este apartado simplemente se citan y de forma muy breve, un conjunto de documentos que analizan diferentes aspectos del comportamiento de las personas, posiblemente fuera más riguroso clasificarlos en aquellos que estrictamente se elaboran desde las ciencias del comportamiento o la psicología y aquellos otros que se desarrollan desde la perspectiva de la seguridad contra incendios, sin embargo establecer dicha clasificación resulta difícil. Estrictamente en la historia del problema de la evacuación de edificios y del comportamiento de las personas en situaciones críticas, posiblemente los trabajos más relevantes se deban a J. D. Sime y D. Canter.

D. Canter en el año 1980 publicó el texto “Fire and Human Behaviour” [14], en el cual existe una recopilación de 18 documentos sobre el comportamiento de las personas y el estudio de actuaciones en evacuaciones de emergencia. Es un trabajo multidisciplinar que contempla muchos aspectos del problema, seguramente aplicables en la actualidad. Después de esta publicación, durante aproximadamente una década, este tipo de trabajos se ralentizaron, quizás a consecuencia de la recopilación de D. Canter, una serie de expertos habían tenido oportunidad de exponer sus conclusiones y habían quedado muchos aspectos resueltos.

Otro autor significativo en este ámbito es D. Sime, que realizó una destacada aportación en la recopilación de D. Canter definiendo el concepto de pánico y exponiendo que el pánico no se produce siempre de forma automática en las situaciones de emergencia, sus publicaciones [176], [177], [178] y [179] se han prodigado los últimas décadas y constituyen un referente obligado en el estudio del problema. También resulta destacada la exposición de H. McLennan en “The SFPE Handbok” [109] que establece una curiosa clasificación de los

ocupantes en una situación de emergencia: Las personas que responden a la señal de alarma creyendo que puede haber un incidente pero no es cierto, las que responden pero piensan que probablemente haya ocurrido un incidente, los que actúan con la certeza de que hay fuego y que piensan que el fuego puede ser peligroso y finalmente los que actúan viendo las llamas. Entonces se condiciona la reacción de los ocupantes a dicho nivel de preocupación.

En España en la línea de las ciencias del comportamiento el Centro Nacional de Condiciones de Trabajo, entidad vinculada al Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales, tiene dos publicaciones de significativo interés: “La conducta humana ante situaciones de emergencia: análisis de proceso en la conducta individual” y “La conducta humana ante situaciones de emergencia: La conducta colectiva” corresponden a las Notas Técnicas de Prevención 390 [30] y 395 [31] respectivamente del año 1995 cuyo autor es M. Fidalgo. Como su nombre indica, se trata de documentos desde una perspectiva de la psicología que describen los posibles modelos de actuación en situaciones de emergencia.

En los años 90 los estudios de incidentes, centrados en la óptica de las actuaciones de las personas en los mismos recobraron un cierto ímpetu, en cierto modo continuaron en la línea de los trabajos que había realizado J. L. Bryan en los años ochenta en el estudio de casos, G. Proulx del NRC del Canadá y R. Fahy de NFPA en Estados Unidos con publicaciones conjuntas, concretamente en [142] analizan el comportamiento de las personas en el atentado ocurrido el 26 de febrero del año 1993 en el World Trade Center de Nueva York.

Finalmente debe comentarse que el dinamismo de esta vertiente del problema, ha conducido a la celebración de congresos dedicados de forma específica al comportamiento de las personas en siniestros, así en el año 1998 se celebró el “First International Symposium on Human Behaviour in Fire” en Belfast y este certamen se ha ido celebrando de forma periódica en años posteriores y sus actas constituyen una fuente de información para estudiar el problema desde la perspectiva de las ciencias del comportamiento.

## **2.7 OTRAS INVESTIGACIONES**

Existen otros documentos que estudian diferentes aspectos del problema de la evacuación de edificios o bien la actuación de las personas en situaciones de emergencia que por causas diversas no han sido analizados en los apartados anteriores, de la misma forma existe una serie de centros con destacadas investigaciones y se considera absolutamente necesaria su mención.

### **2.7.1 Análisis de diferentes aspectos del proceso de la evacuación de edificios**

En España existen diversos trabajos [127] y [128] de cuyo autor J. L. Posada, resulta especialmente significativo el trabajo titulado “Los medios de evacuación en los edificios”, en el momento de su publicación divulgó en España las investigaciones de J. J. Fruins, J. Pauls y Melinek&Booth entre otros autores, constituyendo un trabajo de valor extraordinario.

Otra particularidad destacada de estos trabajos de J. L. Posada está en el detalle de aspectos concretos sobre la locomoción de las personas y de los elementos constructivos directamente implicados en la evacuación de los edificios, en los siguientes apartados se reproducen algunos aspectos realmente importantes aunque se trata de valores sujetos a aspectos normativos, se reproducen algunos valores originales no actualizados a la legislación vigente.

En apartados anteriores se ha analizado la circulación horizontal, sin embargo no se ha realizado ninguna referencia en la circulación por rampas, cuando las personas deben desplazarse por pasillos que tienen una determinada pendiente su velocidad cambia, concretamente para ascender por pasillos esta reducción se cuantifica en el 2% por cada grado de pendiente, de forma similar sucede al descender por los pasillos, con ligeras pendientes se produce un incremento de velocidad mientras que en pendientes pronunciadas la velocidad se reduce, se determina que la velocidad de circulación resulta máxima cuando la pendiente es de 6°. Se concluye que la pendiente de las rampas no debe superar el 10% cuando constituyan un medio de evacuación de zonas destinadas a uso sanitario, en los demás usos la pendiente puede alcanzar el 12%.

En este mismo documento se determinan las condiciones de diseño de las escaleras, el primer elemento que se analiza son las condiciones de diseño de los peldaños desde la perspectiva de la seguridad, la comodidad y la capacidad de evacuación en régimen de uso intensivo, como sería el que se produciría en una situación de emergencia. Diferentes investigaciones establecen como magnitudes óptimas desde el punto de vista de la comodidad y de la seguridad las dimensiones comprendidas entre 100-180 milímetros para la tabica y más de 280 milímetros para la huella. En la tabla 2.14 se proporcionan una serie de valores de referencia.

Tipo de escalera	Tabica max. ( milímetros )	Huella min. ( milímetros )
Escaleras de uso común, en viviendas Utilización no intensiva en caso de evacuación de emergencia ( menos de 250 personas )	190	245
Escaleras de uso común, en viviendas Utilización intensiva	190	260
Escaleras evacuación de público	190	280
Escaleras uso privado o restringido	220	245

**Tabla 2.14** Diseño peldaños de escaleras

Se considera que las escaleras curvas no deben considerarse como medios de evacuación si el valor mínimo de la huella no supera los 250 mm y su radio no es por lo menos dos veces el doble del ancho de la escalera. También haciendo referencia a un análisis antropométrico, se cita que la altura óptima de los pasamanos debe estar comprendida entre 915 y 965 milímetros, valores medidos desde la línea de pendiente que une los puntos más salientes de cada peldaño. De igual forma los pasamanos deben distanciarse al menos 50 milímetros del paramento respectivo y la sección más adecuada es la circular comprendida entre 40 y

50 milímetros. Las escaleras de anchura superior a 1,4 metros deben disponer de pasamanos a ambos lados y la anchura máxima entre dos pasamanos es de 1,8 metros.

Respecto las anchuras de las escaleras se establece que la anchura mínima que permite un doble sentido de circulación, sin que exista riesgo de bloqueo es de 1,40 metros. La anchura mínima de una escalera común de un edificio para un conjunto de plantas que deba ser utilizada a efectos de evacuación para una ocupación inferior a 50 personas debe ser de 0,9 metros, mientras que si la ocupación es superior a las 50 personas debe ser de 1,1 metros y si el edificio tiene una altura superior de 28 metros entonces la anchura mínima es de 1,4 metros. De una forma absolutamente general, se establece que la anchura óptima de una escalera considerando el flujo y la seguridad es de 1,55 metros.

También se proporcionan detalles de las características de las puertas, así las puertas que constituyen medio de evacuación deben tener una anchura libre de paso mínima de 0,8 metros teniendo las hojas una anchura máxima y mínima respectivamente de 1,2 y 0,6 metros siendo la altura mínima libre de 2,05 metros. Las puertas deben ser abatibles respecto del eje vertical situado en uno de los bordes de la hoja y el giro realizarse en el sentido de la evacuación cuando deben ser utilizadas por más de 60 personas, cuando la apertura se realiza hacia una vía de evacuación no debe reducir la anchura de paso de la misma, en posición de plena apertura dicha reducción no debe ser superior a 0,1 m. si se trata del descansillo o meseta de una escalera y 0,2 metros si se trata de un pasillo.

Respecto la maniobra de las puertas se establece que deben ser fácilmente accionables desde el lado a evacuar sin necesidad de llaves, dispositivos especiales de cierre o conocimientos específicos del mecanismo de cierre. La fuerza necesaria para liberar el cierre debe ser inferior a 70 Newtons y 130 Newtons para impulsar el giro de la puerta. En puertas de doble hoja cada una debe disponer de su propio mecanismo de apertura. Los sistemas de apertura antipánico son incompatibles con cualquier sistema de control físico de dicha apertura, el elemento de liberación de la misma debe cubrir la mitad de la anchura de la hoja y estar situado a una altura comprendida entre 750 y 1150 milímetros, la fuerza horizontal necesaria para su accionamiento debe ser inferior a 70 Newtons. Finalmente las puertas que tienen asignadas funciones de compartimentación deben disponer de mecanismos que su posición sea de cierre cuando no están siendo utilizadas, de igual forma pueden instalarse sistemas automáticos que las mantengan abiertas mediante retenciones mecánicas o electromagnéticas y cierren automáticamente en caso de incendio, dichos mecanismos de cierre deben poderse accionar manualmente. Cuando se utilicen puertas correderas automáticas debe ser posible su apertura manual, y esta circunstancia debe estar claramente señalizada.

En el documento de J. L. Posada se analizan los requerimientos de los sistemas de alumbrado. En cualquier situación de emergencia un nivel de iluminación insuficiente puede suponer un notable riesgo para los ocupantes, los alumbrados de seguridad o de emergencia deben proporcionar una iluminación suficiente cuando se presente un fallo en el sistema de alumbrado ordinario. Las fuentes de suministro pueden ser acumuladores incorporados en los propios aparatos, baterías centralizadas o bien generadores. En caso de fallo del suministro deben estar en funcionamiento en un tiempo inferior a 15 segundos, en este trabajo se

recomienda en los puntos de arranque, descarga de escaleras y los puntos críticos en los recorridos de evacuación (intersecciones, cambios de dirección, etc..) una iluminación de 30 lux, en general se establece un valor mínimo de 15 lux para las mediciones efectuadas en el centro de las vías de evacuación. La autonomía de dichos aparatos es función del tipo de edificio, en general 30 minutos, 60 en edificios sanitario asistenciales y 120 minutos en edificios de gran altura. Finalmente el alumbrado de señalización tiene por misión hacer permanentemente visibles las señales indicativas de la situación de los recorridos previstos para la evacuación del local.

### **2.7.2 Análisis de las investigaciones realizadas en National Research Council del Canadá**

En el National Research Council del Canadá se ha realizado y se está desarrollando una intensa actividad en investigaciones sobre la seguridad contra incendios y especialmente en la evacuación de edificios, ello da lugar a numerosas publicaciones del propio centro, en revistas especializadas y en actas de congresos, una parte importante de las publicaciones en la década de los noventa de esta institución corresponden a G. Proulx, otros autores son D. Young, N. Benichou y C. Laroche. En general se trata de estudios rigurosos y de alto nivel científico que analizan diferentes aspectos del problema. Puede observarse en la referencia bibliográfica la larga lista de documentos procedentes de esta entidad, en el siguiente párrafo se procede a comentar brevemente alguno de ellos.

En la publicación [137] del año 1994 G. Proulx estudia las etapas que constituyen el tiempo total de evacuación de edificios destinados a apartamentos. Se realiza un análisis de las etapas de demora, el proceso de inicio de la evacuación, el tiempo de recorrido, la velocidad de desplazamiento en escaleras en función de la edad, el sexo y las limitaciones personales de los ocupantes. Para realizar este análisis se utilizan diversas técnicas estadísticas. Otra destacada aportación de G. Proulx está en la publicación [145] del año 1996, en ella se muestra la utilización de encuestas para evaluar simulacros de evacuación, realmente pone de manifiesto que esta técnica de estudio pueden resultar de gran utilidad. En el año 1998 se publica un trabajo en el cual se estudia la incidencia de los mensajes por megafonía en una evacuación de emergencia. En una publicación del año 1999 se analiza la incidencia la señalización fotoluminescente en una el desarrollo de la evacuación. En el año 2000 se presenta una recopilación [151] sobre el posible comportamiento de las personas en un incendio, en el año 2001 se analiza directamente el comportamiento de las personas y la evacuación de edificios, en el año 2002 se publica un estudio [152] sobre la evacuación de personas discapacitadas. Publicaciones más recientes analizan el comportamiento y el intento de evacuación del WTC de Nueva York en los atentados del 11 de septiembre del año 2001.

### **2.7.3 Investigaciones realizadas en Lund Institute of Technology**

Desde mediados de los años 90 en Suecia se han seguido una serie de investigaciones en el Lund Institute of Thechnology, centro perteneciente a la Universidad de Lund y que han dado lugar a varias publicaciones de forma que puede ser considerado un centro de referen-

cia. Estas investigaciones tienen el soporte del Swedish Research Board (BRANDFORSK) y las investigaciones principalmente se hallan realizadas por H. Frantzich.

El primero de estos trabajos [40] fue publicado en el año 1994, en él se plantea una metodología para el diseño eficiente de rutas de evacuación en edificios, en la primera parte se realiza un breve estado del arte del problema y a partir del mismo se contrastan las magnitudes de locomoción obtenidas en diversos experimentos en Suecia con las propuestas por J. J. Fruins y otros autores, luego se formula una propuesta para el dimensionado y diseño de las condiciones de evacuación.

El segundo trabajo de este mismo autor [41] es el publicado en el año 1996 en el cual se estudia el movimiento de las personas durante una evacuación de emergencia a partir de filmaciones en vídeo. Se procedió a la instalación de cámaras de vídeo a una altura de unos 3 metros sobre el nivel de la escalera de forma que permitieran visualizar una determinada superficie, el análisis de la circulación por la escalera se analizó mediante el software Persias desarrollado por la Universidad de Edimburgo, se estudió la circulación en movimiento de descenso y ascenso, con diferentes geometrías en escaleras convencionales y circulares concluyendo que la velocidad de desplazamiento sigue en todos los casos una ley normal cuyos parámetros son función de las condiciones geométricas.

En otra publicación [43] del año 1996 se estudia la forma como los ocupantes de un edificio evalúan la señal de alarma y seleccionan una salida, una parte de estas experimentaciones se realizaron en el centro comercial IKEA de Helsingborg, los clientes eran informados de la experimentación, voluntariamente podían acceder a colaborar y por ello percibían una pequeña gratificación de unos 2 €. La teoría propuesta en este estudio recibe el nombre de CDF (Choice by Distance and Familiarity), en dicho documento se afirma que en general, en igualdad de condiciones de distancia se selecciona la salida más familiar, de la misma forma se observó que las salidas de emergencia abiertas resultan mucho más utilizadas que las mismas salidas si la puerta se halla cerrada, el procedimiento utilizado para indicar la alarma consistía en una señal mediante una sirena convencional e instantes después proceder a dar indicaciones por un servicio de megafonía, se valora este sistema efectivo pero presenta el problema de si hay personas que no comprenden las instrucciones dadas por el servicio de megafonía en cuyo caso puede dar lugar a confusiones.

Este grupo de trabajo ha proporcionado durante los últimos años otros estudios ciertamente interesantes, en uno de ellos H. Frantzich analiza de forma rigurosa la manera de dirigir una evacuación de emergencia [44]. En la actualidad este proceso de investigación sigue y en el futuro seguramente se ofrecerán nuevas publicaciones.

#### **2.7.4 Investigaciones realizadas en el Fire SERT Centre**

El Fire SERT Centre es una entidad vinculada a la Universidad del Ulster desde la cual T. Shiels en la última ha aportado numerosas publicaciones, algunas de ellas ya referenciadas en otros apartados en el estudio del movimiento de personas discapacitadas y en el estudio de casos. Un trabajo destacado es el publicado en el año 1992 [172] en el cual formaliza

una metodología para determinar la equivalencia en el dimensionado de los medios de evacuación. Otra investigación que resulta de gran valor es el estudio de la evacuación en grandes almacenes [173] publicado en el año 2000, mediante la instalación de un circuito cerrado de televisión se procedió al estudio de las evacuaciones de emergencia en varios centros comerciales de la firma Marks and Spencer, en las cuales no se había efectuado ningún aviso a los ocupantes del centro, se estratificaba la población en diferentes conceptos como características personales, la ubicación en el centro y finalmente debían cumplimentar un cuestionario, por las características del estudio puede comprenderse que las conclusiones obtenidas resultan extraordinariamente valiosas.

### 2.7.5 Investigaciones realizadas por el Fire Safety Engineering Group

Expresamente se quiere dedicar un apartado a las investigaciones del Fire Safety Engineering Group, sin ningún tipo de dudas es uno de los principales centros de referencia sobre la evacuación de edificios en la actualidad. Aunque en el desarrollo del presente capítulo se ha hecho referencia en diversas ocasiones a autores pertenecientes a este equipo de investigación cuya aportación más destacada es el programa EXODUS, se considera absolutamente necesario mencionar la labor realizada por este grupo de investigadores de la Universidad de Greenwich en la actualidad liderada por el profesor E. Galea, figurando en las publicaciones como colaboradores M. Owen, P. Lawrence, L. Filipidis y S. Gwyne.

Para el desarrollo del programa EXODUS fue preciso un análisis profundo del problema que dio lugar a publicaciones como [61] de la cual es primer autor de S. Gwyne. Existen otros numerosos trabajos publicados en revistas y actas de congresos [52], [53] y [54], en los cuales fundamentalmente analizan las características del programa EXODUS, sus aplicaciones en diversas situaciones y otros aspectos del problema. Posiblemente corresponda a este equipo el mayor número de publicaciones sobre la evacuación de edificios realizado de los últimos años.

### 2.7.6 Otras investigaciones y publicaciones

Resultan especialmente interesantes **las investigaciones sobre las características de la señal de alarma**. Existen varios documentos que analizan la reacción de los ocupantes a la señal de alarma, un documento de especial interés es el trabajo de D. Bruck [7] publicado el año 2001 en el cual se realiza una minuciosa revisión de todo aquello que sucede cuando suena una sirena de alarma. Como principio existe una diferencia fundamental que la señal de alarma se produzca cuando las personas están despiertas o bien cuando están durmiendo, a partir de dicha consideración que en cierto modo resulta obvia, se efectúa una investigación de otros factores significativos como la edad, el sexo, la hora de la noche en que se produce, efecto de ciertos tipos de medicación que a que pudieran estar sometidos los individuos, incidencia del consumo de alcohol y otras posibles sustancias narcóticas, etc... así como la magnitud el nivel sonoro y la frecuencia acústica de la señal de alarma. Entre otros muchos aspectos realmente relevantes, se concluye que las personas adultas reaccionan rápidamente con señales de alarma cuya intensidad sonora está comprendida entre 55-60 dB,

para personas mayores de 70 años y niños de corta edad se precisan 75 dB y el valor máximo tolerado por el oído humano es de 90 dB.

Resultan curiosas las aportaciones que desde **la compañía Takenaka Corporation** realiza Y. Yoshida en diversas publicaciones, de ellas destaca el trabajo [215] publicado en la revista *Fire Technology* en el año 1995, sorprende y posiblemente la mayor importancia del mismo está en la profunda reflexión que se realiza sobre las características de los estudios de la evacuación de edificios, se afirma que más allá de las fórmulas, complejos desarrollos matemáticos y programas informáticos existe una serie de principios utilizados durante muchos años en el Japón, para los cuales Yoshida establece su divulgación en esta publicación. De forma muy resumida, el procedimiento consiste en estructurar el cálculo de la evacuación determinando primero los tiempos de evacuación de cada una de las dependencias, luego el de cada planta y finalmente del edificio. Las dependencias se representan mediante rectángulos que se conectan mediante flechas, se considera que los tiempos de evacuación dependen exclusivamente de los recorridos y de las anchuras mínimas de paso, se analiza la confluencia de flujos y las colas máximas y el tiempo que duran las retenciones, todo ello se sitúa en una gráfica en la cual en el eje de abscisas se sitúa el tiempo y en el de ordenadas el número de personas. En dicho artículo se presenta la evacuación de un edificio de dimensiones reducidas, la viabilidad en grandes edificios parece compleja.

Finalmente quiere hacerse mención a una recopilación multidisciplinar sobre **comportamiento de masas**, en el cual han participado autores como J. J. Fruins, D. Sime o P. Thompson y E. Marchant cuyos destacados trabajos sobre la evacuación de edificios han sido descritos en páginas anteriores. A partir de los dramáticos accidentes ocurridos en acontecimientos deportivos (estadio Sheffield el 15 de abril de 1989) y otros accidentes en actuaciones musicales se decide realizar un congreso para tratar específicamente el comportamiento de multitudes, así el 17 y el 18 de Marzo del año 1993 se celebra en el Reino Unido la “International Conference on Engineering for Crowd Safety”, se reúnen expertos en diferentes áreas: Gestión de emergencias, la locomoción de las personas, comportamiento de las personas en situaciones de emergencia, aspectos mecánicos en el control de multitudes, etc... Las ponencias presentadas en este congreso pueden analizarse en la publicación [24] realizada por R. A. Smith y J. F. Dickie. Una aplicación inmediata del problema de la evacuación de edificios puede estar en el control y la planificación de la seguridad en situaciones de gran concurrencia, para ir más allá de la estricta gestión de la evacuación y estudiar los aspectos que comporta la seguridad en estas situaciones de grandes aglomeraciones la publicación de R. A. Smith y J. F. Dickie puede resultar de gran utilidad.

