

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA**  
**Departament d'Organització d'Empreses**

**CONSIDERACIONES EN TORNO A LOS MODELOS PARA  
EL ESTUDIO DE LA EVACUACIÓN DE EDIFICIOS**

**Tesis presentada para la obtención del grado  
de Doctor Ingeniero Industrial  
por Salvador Casadesús Pursals**

**Dirigida por el Dr. Federico Garriga Garzón**

**Terrassa, 27 de Septiembre de 2005**

**A la Montserrat i la Marta**

Personalmente quisiera dar las gracias a todos los que me han ayudado en la realización de esta tesis. En este momento, materialmente me resulta imposible citar la totalidad de personas y entidades de las que he recibido colaboración y ayuda sin olvidarme de ninguna de ellas. Tengo presentes quienes me facilitaron las primeras referencias, me ayudaron en la obtención de documentos, me facilitaron la publicación de trabajos, hicieron posible experimentar en sus entidades, todos aquellos que han colaborado en resolver diferentes problemas y han puesto a mi alcance cualquier medio, los que me han ayudado directamente en las correcciones finales y todas aquellas otras personas que me han dado consejo y ánimo.

De todos aquellos que me han ayudado, necesariamente quiero hacer mención especial a mi director de tesis que con gran paciencia e interés me ha dirigido y aconsejado hasta el final, y a los profesores del Departamento de Estadística de la ETSEIAT por todos los recursos, facilidades, sugerencias y ayudas, así como su inestimable confianza.

A todos ellos, quiero manifestar mi más sincero agradecimiento.

## ÍNDICE

### CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1	EL PROBLEMA DE LA EVACUACIÓN DE EDIFICIOS .....	1
1.2	OBJETIVOS .....	2
1.3	JUSTIFICACIÓN .....	4
1.4	METODOLOGÍA .....	7
1.4.1	Hipótesis .....	7
1.4.2	Metodología utilizada .....	8
1.4.3	Síntesis de los trabajos .....	9
1.5	DEFINICIONES .....	11
1.5.1	Magnitudes que definen la ocupación de los recintos y el movimiento de las personas .....	11
1.5.2	Definiciones de construcción .....	13
1.5.3	Tiempos de evacuación .....	14
1.5.4	Definiciones comportamiento .....	15

### 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 .....	17
2.2	ANÁLISIS DE LOS DOCUMENTOS BÁSICOS .....	20
2.2.1	Estudio de casos .....	20
2.2.2	Análisis descriptivo del problema .....	21
2.3	MODELIZACIÓN DEL MOVIMIENTO DE LAS PERSONAS Y ESTIMACIONES BÁSICAS .....	24
2.3.1	Documentos preliminares .....	24
2.3.1.1	Primeras publicaciones realizadas en el Reino Unido .....	24
2.3.1.2	Primeros trabajos realizados en la URSS .....	26
2.3.1.3	Primeros modelos desarrollados en el Japón .....	28
2.3.1.4	Primeros modelos desarrollados en el Canadá .....	29
2.3.1.5	Resolución de ramificaciones y confluencias .....	30

---

2.3.2	Los Modelos desarrollados en la Unión Soviética .....	30
2.3.3	Modelos experimentales .....	36
2.3.3.1	Modelización empírico-experimental de J.Pauls .....	36
2.3.3.2	El Modelo experimental de J. J. Fruins .....	39
2.3.4	Documentos de síntesis .....	43
2.3.4.1	Modelos desarrollados en la Gran Bretaña .....	43
2.3.4.2	Modelo hidráulico .....	47
2.3.4.3	Aplicación del Modelo de Predtechenskii y Milinskii .....	51
2.3.5	Estudio de las condiciones de locomoción de personas discapacitadas .....	52
2.4	MODELOS DE OPTIMIZACIÓN .....	54
2.4.1	Modelos deterministas .....	54
2.4.1.1	Procedimiento gráfico para la optimización de la evacuación .....	55
2.4.1.2	Formulación analítica para la optimización de la evacuación .....	56
2.4.1.3	Formulación del problema mediante redes de flujo .....	56
2.4.1.4	El programa EVACNET .....	64
2.4.2	Modelos estocásticos .....	66
2.5	MODELOS DE SIMULACIÓN .....	70
2.5.1	El programa EXIT .....	72
2.5.2	Modelado discreto mediante redes de colas: EVACSIM y EVADE .....	74
2.5.3	El programa EXIT-89 .....	74
2.5.4	El programa SIMULEX .....	75
2.5.5	El programa EXODUS .....	77
2.5.6	Los programas CRISP y GRIDFLOW .....	79
2.5.7	Análisis de otras herramientas de simulación .....	80
2.6	ESTUDIO DESDE LA PSICOLOGÍA Y LAS CIENCIAS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PERSONAS .....	82
2.7	OTRAS INVESTIGACIONES .....	83
2.7.1	Análisis de diferentes aspectos del proceso de la evacuación de edificios ...	83
2.7.2	Investigaciones realizadas en National Research Council del Canadá .....	86
2.7.3	Investigaciones realizadas en Lund Institute of Thecnology .....	87
2.7.4	Investigaciones realizadas por el Fire SERT Centre .....	88
2.7.5	Investigaciones realizadas por el Fire Safety Engineering Group .....	88
2.7.6	Otras investigaciones y publicaciones .....	88

## CAPÍTULO 3: MODELIZACIÓN DEL SISTEMA

3.1	POSIBILIDAD DE ESTUDIAR EL PROBLEMA .....	91
3.1.1	Definición del sistema de evacuación .....	91
3.1.2	Análisis de los factores que determinan el sistema de evacuación .....	92
3.2	ANÁLISIS DE LA CONFIGURACIÓN DEL EDIFICIO .....	93
3.3.	ANÁLISIS DE LOS FACTORES AMBIENTALES .....	96
3.3.1	Efecto del humo, de los gases narcóticos y de los irritantes .....	96
3.3.2	Efecto del calor y de los fenómenos radiantes .....	97
3.4	ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS PERSONALES DE LOS OCUPANTES .....	98
3.4.1	Dimensiones de los individuos .....	98
3.4.2	Magnitudes de locomoción .....	100
3.5	ESTUDIO DE LA CONDUCTA DE LOS OCUPANTES .....	102
3.5.1	Efecto del sistema de alarma en la conducta de los ocupantes .....	103
3.5.2	Efecto del sistema de señalización .....	104
3.5.3	Influencia del tipo de edificio .....	104
3.5.4	Efecto de la familiaridad con el recinto y el sexo de los ocupantes en la previsión de la conducta .....	105
3.5.5	Comportamiento interactivo de los ocupantes .....	106
3.6	EXISTENCIA DE PROCEDIMIENTOS FORMALES .....	107
3.7	PRINCIPIOS PARA DETERMINAR LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE LA EVACUACIÓN DE EDIFICIOS .....	108
3.7.1	Análisis de la ocupación y de la capacidad .....	109
3.7.2	Dependencias de circulación .....	112
3.7.3	Modelado de vías de evacuación .....	115
3.7.4	Modelado de confluencia simples .....	117
3.7.5	Modelado de ramificaciones .....	119
3.7.6	Modelado de retenciones .....	121
3.7.7	Tiempo necesario para abandonar un recinto .....	122
3.7.8	Modelado de las incorporaciones a una salida .....	124
3.7.9	Capacidad del destino de evacuación .....	129
3.8	ELEMENTOS PARA EL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL PROBLEMA DE LA EVACUACIÓN DE EDIFICIOS .....	130
3.8.1	Magnitudes básicas que caracterizan la evacuación de un edificio .....	131
3.8.2	Herramientas gráficas para el análisis e interpretación de los resultados .....	133

## **CAPÍTULO 4: ESTUDIO DE LA EVACUACIÓN DE UN RECINTO**

4.1	EL PROBLEMA DE LA EVACUACIÓN DE UN RECINTO .....	139
4.2	EVACUACIÓN DE UN RECINTO EN EL TIEMPO MÍNIMO .....	143
4.2.1	Solución analítica .....	143
4.2.2	Solución gráfica .....	145
4.2.3	Solución heurística .....	146
4.3	EVACUACIÓN DE UN RECINTO EN EL TIEMPO MÍNIMO CON FLUJO CONSTANTE EN LAS SALIDAS SIN RECORRIDO .....	148
4.3.1	Solución analítica .....	148
4.3.2	Solución gráfica .....	150
4.3.3	Aplicación numérica: Evacuación de un recinto de tres salidas .....	152
4.4	EVACUACIÓN DE UN RECINTO EN EL TIEMPO MÍNIMO CON FLUJO CONSTANTE, RECORRIDO Y DEMORA EN EL INICIO DE LA EVACUACIÓN .....	157
4.4.1	Análisis y solución del problema .....	157
4.4.2	Aplicación numérica: Recorridos de evacuación .....	162
4.5	EVACUACIÓN DE UN RECINTO EN EL TIEMPO MÍNIMO CON FLUJO DE SALIDA FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE OCUPACIÓN .....	166
4.5.1	Aplicación numérica considerando los flujos función de la densidad .....	170
4.6	EVACUACIÓN DE UN RECINTO EN EL TIEMPO MÍNIMO CONSIDERANDO RECORRIDOS Y LAS MAGNITUDES DE CIRCULACIÓN FUNCIONES DE LA DENSIDAD DE OCUPACIÓN .....	174
4.6.1	Aplicación numérica .....	183
4.7	OTRAS CONDICIONES DE OPTIMIZACIÓN DE LA EVACUACIÓN DE UN RECINTO .....	188
4.8	OPTIMIZACIÓN DE LA EVACUACIÓN DE UN RECINTO CON RESTRICCIONES EN LA CAPACIDAD DE LOS DESTINOS .....	190

## **CAPÍTULO 5: LA EVACUACIÓN DE EDIFICIOS**

5.1	ESTUDIO DEL PROBLEMA MEDIANTE REDES DE FLUJO .....	195
5.1.1	Análisis de las redes estáticas de flujo utilizadas en el problema de la evacuación de edificios .....	196
5.1.2	Análisis y representación de la evacuación de los edificios mediante redes dinámicas de flujo .....	200

5.2	DEFINICIÓN DE UN MODELO DE RED PARA EL ESTUDIO DEL PROBLEMA .....	203
5.2.1	Proceso de representación de un edificio .....	205
5.2.2	Estudio de las magnitudes características de la red .....	208
5.3	ANÁLISIS DINÁMICO DE LAS ESTRUCTURAS QUE FORMAN LOS ELEMENTOS DE LA RED .....	214
5.3.1	Análisis de una vía de circulación .....	214
5.3.2	Modelado de confluencias .....	222
5.3.3	Modelado de ramificaciones .....	225
5.4	OPTIMIZACIÓN DE LA EVACUACIÓN .....	228
5.4.1	Heurística para la optimización de la evacuación de un recinto que dispone de varias dependencias ocupadas .....	228
5.4.2	Aplicación para la optimización de la evacuación de un recinto .....	228

## **CAPÍTULO 6: PROCEDIMIENTOS GRÁFICOS Y ANALÍTICOS PARA VALIDAR EL MODELO**

6.1	CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE VALIDACIÓN .....	243
6.2	VALIDAR EL MODELO A PARTIR DE LOS TIEMPOS DE EVACUACIÓN .....	244
6.2.1	Análisis de la coincidencia de tiempos de evacuación mediante una única prueba .....	244
6.2.2	Análisis de la coincidencia de tiempos de evacuación mediante pruebas repetidas .....	245
6.2.3	Análisis de las desviaciones en el tiempo de evacuación al variar las magnitudes de locomoción .....	246
6.2.4	Distribución del tiempo de salida $z'$ .....	249
6.3	VALIDAR EL MODELO A PARTIR DE LA FUNCIÓN DE EVACUACIÓN INVERSA .....	252
6.3.1	Obtención y análisis de la función de salidas $s_j(z)$ .....	252
6.3.2	Análisis gráfico de la función de evacuación inversa $p_j(z)$ .....	255
6.3.3	Intervalo de tolerancia en la función de evacuación inversa .....	257
6.3.4	Análisis de las diferencias entre la función de evacuación inversa $p_j(z)$ y la función de salidas $s_j(z)$ .....	258
6.4	VALIDAR EL MODELO A PARTIR DE LOS FLUJOS DE SALIDA .....	261
6.4.1	Implantación y análisis del proceso de comparación de flujos .....	261
6.4.2	Análisis gráfico de los flujos .....	262



6.4.3	Análisis de las diferencias de los flujos .....	263
6.5	APLICACIONES DEL ANÁLISIS GRÁFICO DE RESULTADOS .....	264
6.5.1	Semejanza de los valores de cálculo y experimentales .....	265
6.5.2	Densidad en las magnitudes de locomoción .....	266
6.5.3	Densidad de ocupación inferior a la prevista .....	269
6.6	VERIFICAR QUE LA ASIGNACIÓN REALIZADA CORRESPONDE CON LA SOLUCIÓN ÓPTIMA .....	271
6.6.1	Análisis de la solución óptima mediante las funciones de evacuación inversas .....	272
6.6.2	Análisis de la solución óptima mediante el estudio de los flujos de salida .....	273
6.7	VERIFICAR OTROS SUPUESTOS DEL MODELO .....	274

## **CAPÍTULO 7: PROPUESTAS PARA LA GESTIÓN DE LA EVA- CUACIÓN DE EDIFICIOS**

7.1	LA ORGANIZACIÓN PARA LA SEGURIDAD DE LAS PERSONAS EN LOS EDIFICIOS .....	277
7.2	FUNCIONES PARA LA GESTIÓN DE LA EVACUACIÓN .....	278
7.3	ANÁLISIS DE LAS FUNCIONES QUE DEBEN DESARROLLAR LOS RESPONSABLES DE EVACUACIÓN .....	279
7.3.1	Función del Jefe de Evacuación .....	279
7.3.2	Funciones de Coordinadores de Evacuación .....	280
7.3.3	Función del Servicio de comunicaciones y funciones auxiliares .....	281
7.4	PROCESO DE ASIGNACIÓN DE LAS FUNCIONES PREVISTAS .....	282
7.5	INSTRUCCIONES GENERALES .....	282
7.5.1	Principios generales de actuación en actividad normal .....	283
7.5.2	Atención a personas disminuidas .....	284
7.5.3	Atención a visitas y personal externo prestando servicios en el edificio .....	285
7.5.4	Principios generales de actuación en otras situaciones .....	285
7.5.5	Consideraciones sobre el servicio de comunicaciones y el punto de reunión .	286
7.6	DIVULGACIÓN Y REGISTRO DE ENSAYOS Y SIMULACROS .....	287

**CAPÍTULO 8: APLICACIONES**

8.1	APLICACIONES .....	291
8.2	ESTUDIO DE LA EVACUACIÓN DE UN EDIFICIO DE PÚBLICA CONCURRENCIA .....	291
8.2.1	Análisis de los factores característicos del problema .....	293
8.2.2	Cálculo de la evacuación .....	294
8.3	ESTUDIO DE LA EVACUACIÓN DE UN EDIFICIO INDUSTRIAL .....	298
8.3.1	Análisis de los factores que definen el sistema .....	299
8.3.2	Solución del problema .....	300
8.3.3	Validación de resultados .....	304
8.4	ESTUDIO DE LA EVACUACIÓN DE UN EDIFICIO ESCOLAR .....	308
8.4.1	Análisis de los factores que caracterizan el problema .....	310
8.4.2	Solución del problema .....	312

**CAPÍTULO 9: APORTACIONES, CONCLUSIONES FINALES Y PROPUESTAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES**

9.1	ANÁLISIS DE LAS APORTACIONES REALIZADAS.....	325
9.2	PUBLICACIONES REALIZADAS DURANTE EL PERIODO DE ELABORACIÓN DE LA TESIS .....	329
9.4	CONCLUSIONES FINALES .....	330
9.5	PROPUESTA PARA FUTURAS INVESTIGACIONES.....	332

<b>REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>335</b>
--------------------------------------	------------

**ANEXOS**

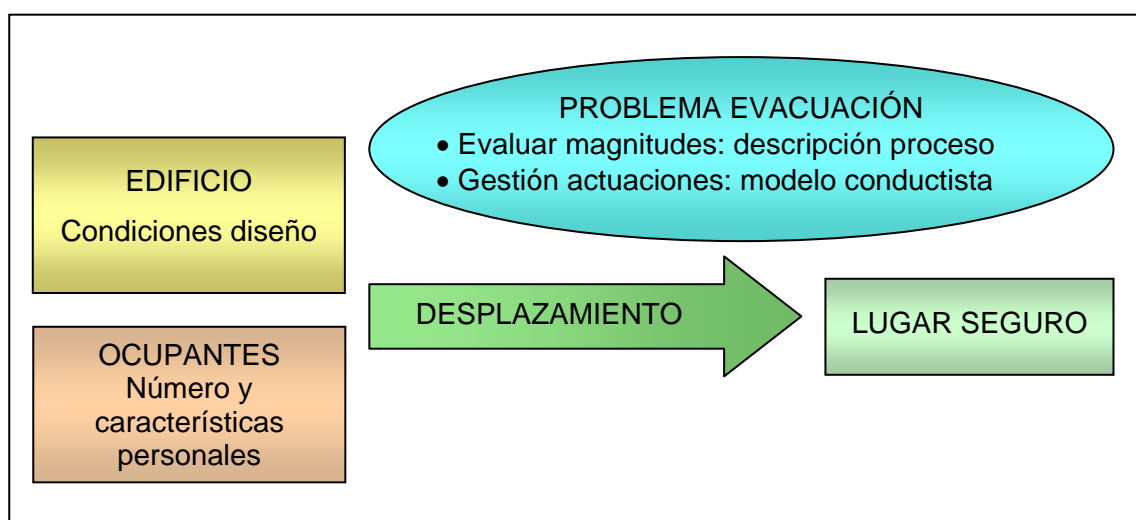
A.1	Reproducción de las tablas de J. J. Fruins .....	355
A.2	Cálculos resolución CASO7 .....	359
A.3	Herramientas para la evaluación de simulacros de evacuación .....	365
A.4	Resultados de la evaluación de un simulacro de evacuación .....	371

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 EL PROBLEMA DE LA EVACUACIÓN DE EDIFICIOS

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

En principio las normas de construcción y de seguridad propias de cada ámbito<sup>1</sup> determinan diseños que resuelven el problema en función de la ocupación y características del edificio, básicamente establecen las dimensiones de las anchuras mínimas de paso y la longitud máxima de los recorridos de las vías de evacuación. Sin embargo, en muchos casos debido al tamaño de los edificios, su distribución y el número de ocupantes entre otras circunstancias, para abordar el problema de la evacuación de los mismos resulta imprescindible la utilización de herramientas cuantitativas que faciliten la estimación de las magnitudes que aportan la información necesaria para conocer el desarrollo de éste proceso.



**Figura 1.1** Descripción del problema de la evacuación de edificios

El problema de la evacuación de edificios se resume en la figura 1.1, en ella puede observarse que en un edificio con unas determinadas condiciones arquitectónicas y de ocupación, se plantean las soluciones desde dos perspectivas distintas:

<sup>1</sup> El principal marco de referencia legal en España es la Norma Básica de la Edificación, Condiciones de Protección Contra Incendios (NBE-CPI- 96), en ella se establecen las principales condiciones de diseño de los edificios: ocupaciones máximas, el número y las dimensiones de las salidas.

- 1ª) Suponiendo una cierta actuación de los ocupantes definida por el número de personas que utilizan cada salida así como los recorridos que efectúan. Se trata de describir el posible desarrollo de la evacuación evaluando parámetros tales como el tiempo necesario para salir de los recintos, efectuar recorridos hasta destinos seguros, la localización y la magnitud de las retenciones o la ocupación de las dependencias en cada instante.
- 2ª) Gestionando la actuación de los ocupantes, asignando las salidas y detallando los recorridos que deben realizar los individuos presentes en cada una de las dependencias para cumplir ciertos objetivos, entre ellos cabe resaltar como más significativos, alcanzar tiempos de evacuación mínimos o bien el número máximo de salidas del edificio en cualquier instante.

En general la seguridad de los ocupantes se garantiza si el tiempo de evacuación de un edificio o alguna de sus dependencias es inferior al previsto para el desarrollo de cualquier incidente que pueda producirse. Es por ello que este problema a menudo se asocia a situaciones de emergencia, entendidas como cualquier situación derivada de un peligro cierto, una amenaza o un riesgo subjetivo para la totalidad o un grupo de personas. Se trata de un problema general aplicable a gran número de edificios en los que se pueden presentar situaciones de emergencia derivadas de incendios, explosiones, amenazas de bombas, actos antisociales, actuaciones colectivas incontroladas u otras situaciones peligrosas que pueden presentarse en multitud de escenarios.

Desde el punto de vista analítico, el problema resulta especialmente relevante cuando se estudian edificios de gran altura, centros comerciales, culturales y recreativos, centros de enseñanza, edificios de geometría o distribución compleja, etc... Las características comunes a todos ellos son el tamaño de dichas edificaciones, la existencia de un número importante de personas en el interior de los mismos y la dificultad de conocer las soluciones del problema.

Cabe aquí dejar constancia de que los edificios con circunstancias especiales en su estructura, distribución y características personales de sus ocupantes, como centros hospitalarios, guarderías infantiles, residencias geriátricas, centros psiquiátricos, centros de reclusión y otras dependencias singulares, todos ellos requieren un tratamiento específico y su estudio no es directamente objeto de los planteamientos generales de este trabajo de investigación.

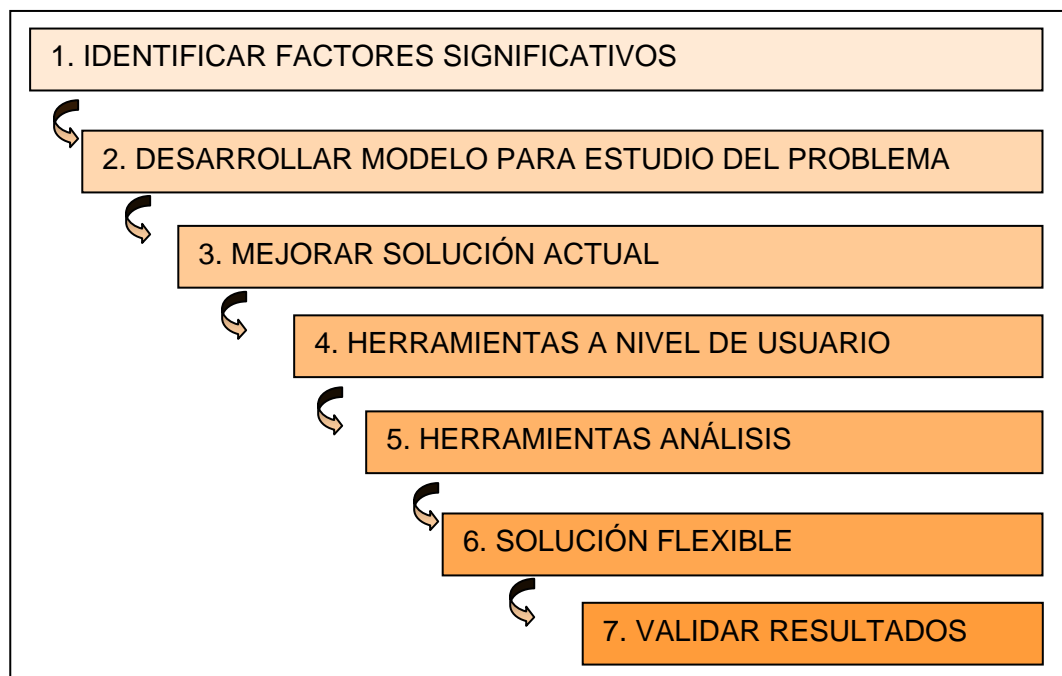
## 1.2 OBJETIVOS

Los objetivos que se plantean en la presente tesis se resumen en la figura 1.2. No se plantea un único objetivo, sino que se trata de un conjunto de propósitos generales que inciden en diferentes aspectos del problema.

En primer lugar se pretenden **identificar y enumerar todos aquellos factores significativos** que influyen en mayor o menor medida en el proceso de la evacuación de un

edificio, dando respuesta a las preguntas: ¿De qué depende la evacuación de un edificio? ¿Qué variables intervienen? y ¿Cuál es la relevancia de cada una de ellas?. A partir de los factores determinados como significativos se trata de **definir un modelo matemático para el estudio del problema**, dicho modelo debe permitir analizar situaciones comunes que pueden producirse en cualquier edificio como pueden ser demoras en el inicio de la evacuación, cambios en la capacidad de los medios de evacuación o los derivados del desarrollo de determinados siniestros como la posible generación y expansión de humos y gases tóxicos.

Seguidamente se resolverá el problema tratando de **mejorar ciertos aspectos de los procedimientos de resolución actuales**, buscando **herramientas simples**, incluso pueden resultar valiosas soluciones aproximadas si realmente cumplen esta condición de simplicidad y pueden ser utilizadas directamente por los responsables del diseño y de la gestión de la seguridad en los edificios. Otro aspecto fundamental es el formato de las soluciones del problema, la expresión analítica de ciertas magnitudes aporta suficiente información, así sucede al estimar los tiempos de evacuación, pero para conocer otros aspectos del problema será más efectivo utilizar representaciones gráficas, por ejemplo la organización de la evacuación óptima de una planta de un edificio puede ser más útil presentarla sobre un esquema de la misma que mediante una tabla que requiera una interpretación, entonces el objetivo consiste en **diseñar los formatos que faciliten la comprensión del problema, el análisis de los resultados y la toma de decisiones**.



**Figura 1.2** Resumen de los objetivos planteados

Una característica de este problema es que son frecuentes variaciones sobre el problema inicial, incluso podría hablarse de una volatilidad de los datos, suelen ser constantes los cambios en el número de ocupantes y su posición, se pueden abrir y cerrar puertas, bloquearse escaleras, cambiar la anchura de las salidas, etc... todo ello hace que se conside-

re un objetivo importante la **flexibilidad de los procedimientos de cálculo**, resultando útiles fórmulas que además de proporcionar el resultado faciliten de forma simple el estudio de estas variaciones respecto del problema inicialmente planteado.

En el presente trabajo se formula un modelo y en consecuencia se precisa su validación, la exigencia no es puramente formal dado que de los resultados del mismo depende la seguridad de las personas. Resulta necesario establecer la forma de obtener criterios rigurosos para poder comparar los resultados analíticos o gráficos obtenidos con los resultantes de ensayos y simulacros para **validar el modelo** y efectuar propuestas con la máxima credibilidad, garantía y precisión en los resultados.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

La presente tesis globalmente se justifica por la posibilidad de efectuar una serie de aportaciones en el estudio y la solución del problema de la evacuación de los edificios. En la figura 1.3 se resumen algunos aspectos más concretos, si bien la cuestión que se nos plantea en este momento es la de justificar la existencia del problema de la evacuación de edificios y que su estudio presenta un enorme interés en la sociedad actual.

País	Número de muertes por millón de habitantes
Suiza	4,3
Holanda	6,8
Austria	7,9
Italia	8,2
Alemania	9,8
Francia	10,1
Bélgica	12,4
Reino Unido	12,9
Suecia	13,8
España <sup>2</sup>	14,0
Grecia	14,3
Eslovenia	15,1
Noruega	15,6
Polonia	15,6
Dinamarca	17,1
Finlandia	20,2
Hungría	28,8

**Tabla 1.1** Número de muertes /  $10^6$  habitantes por incendio quinquenio 1992-1997

Las estadísticas sobre el número de víctimas de accidentes en los edificios e informaciones como la presentada en la Tabla 1.1 reproducida del trabajo de B. G. Liebe [91], contabilizan el número de muertes como consecuencia de incendio por millón de habitantes registrado en diferentes países de Europa en el quinquenio 1992-97, reflejan que las personas son víctimas de accidentes en los edificios, a pesar que se desconoce cuál

<sup>2</sup> Valor de referencia obtenido de fuentes no contrastadas.

es el porcentaje directamente relacionado con la problemática de la evacuación. Razonablemente puede suponerse que con unas condiciones de evacuación idóneas, a algunas de estas personas les habría sido posible abandonar la zona afectada por el siniestro, con lo que el número de víctimas hubiera sido inferior, sin embargo, la necesidad del estudio de la evacuación de los edificios se pone de manifiesto en grandes siniestros en los que se hallan implicados decenas de ocupantes. Lamentablemente estos accidentes en la actualidad todavía se producen con cierta frecuencia, siendo considerable el número de víctimas. Es en estos casos donde los planes de evacuación pueden ser determinantes.



**Figura 1.3** Justificación de los trabajos objeto de la tesis

En nuestra sociedad la seguridad de las personas se considera un hecho irrenunciable, pese a ello la realidad es que en pocos edificios se conoce el tiempo necesario para su evacuación y no se tiene capacidad operativa para organizar con cierta eficacia evacuaciones de emergencia. Los responsables de la gestión de la seguridad no disponen de procedimientos de cálculo efectivos y las evacuaciones de emergencia se organizan siguiendo criterios generales meramente intuitivos de dudosa eficacia, si en estos edificios se produjera un incidente de cierta magnitud seguramente habría que pensar en las víctimas y resulta especialmente dramático observar que algunas de ellas pudieran haberse evitado con una gestión adecuada de la emergencia.

Los estudios sobre la evacuación de los edificios pueden realizarse en la fase del proyecto para contrastar y analizar diferentes hipótesis de diseño, también pueden realizar-

se en edificios construidos una vez instalados los elementos mobiliarios y en ellos se desarrollan las actividades previstas, en este último caso dichos estudios han de servir para conocer el posible desarrollo de una evacuación de emergencia y tener capacidad para seleccionar las estrategias de evacuación más apropiadas.

Al realizar el diseño de los edificios siguiendo las correspondientes normativas en la mayoría de casos se consigue un margen suficiente para la seguridad, obteniendo tiempos de evacuación que si bien técnicamente son razonables, normalmente no son conocidos para los usuarios y los responsables de la seguridad de los mismos. No existe más alternativa que confiar “a ciegas” en quienes realizaron el proyecto, mientras que si fuera posible conocer el tiempo necesario para que los ocupantes abandonen un recinto, una planta o un edificio hasta situarse en una posición segura, y la previsión de la evolución de determinados siniestros, ello permitiría gestionar la seguridad de estos edificios de forma bastante más convincente. A menudo no se comprende el diseño de los edificios ni se aprecia la importancia de un plan de evacuación.

En el siguiente ejemplo se muestra la posible severidad de la expansión de humos en un auditorio. Para evaluar la cantidad de humo generado, se conoce que su velocidad de producción es aproximadamente igual a la velocidad del aire que entra en contacto con la columna de gases y llamas, dependiendo del perímetro del fuego, el calor desprendido, así como la elevación efectiva de la columna de gases calientes. Modelos numéricos ofrecen buenas aproximaciones, así por ejemplo 1 Kg. de humo a 500 °C. puede ocupar un volumen de 2 m<sup>3</sup>, luego si en un auditorio de 100 m<sup>2</sup> y 6 metros de altura se produjera un incendio, un fuego con un perímetro de 12 metros, el tiempo que tardaría en llenarse de humo el recinto hasta una altura de 1,5 metros del suelo de tan solo sería de 22 segundos. Resulta pues evidente que en un recinto donde pueda producirse dicho incidente, debe garantizarse la evacuación del mismo en un tiempo inferior. Si se tiene capacidad para pronosticar todo aquello que razonablemente puede suceder, puede existir una mayor complementariedad entre normativas y cálculos, pudiendo lograr diseños seguros ajustados a la realidad, no siendo necesario aplicar principios genéricos de diseño como fijar anchuras y recorridos de forma estándar y así llegar a sobredimensionados innecesarios. Es posible ajustar los diseños manteniendo o mejorando el nivel de seguridad y optimizando los recursos materiales y consecuentemente los económicos.

Los **simulacros** así como los ensayos de evacuación no eximen los estudios cuantitativos, sino que permiten verificar si se cumplen las condiciones de diseño, al tiempo que facilitan la observación del comportamiento de los ocupantes y efectúan una labor pedagógica. Los simulacros tan solo son posibles en algunos casos tales como en centros educativos, centros industriales y en algunos otros tipos, pero en edificios de otras características no son viables. No siempre es posible ocupar recintos con cientos de personas para medir tiempos y observar el desarrollo de la evacuación. Además, cuando los simulacros son factibles, existe una total ambigüedad sobre los criterios que deben utilizarse para su valoración, paralelamente a la incertidumbre sobre si la actitud adop-



tada por los ocupantes es razonablemente similar a la de una situación real de emergencia.

Otra posibilidad es el estudio del problema mediante **simulación**, su proliferación seguramente es debida a la posibilidad de efectuar modelizaciones complejas del movimiento de las personas y a la vistosidad de las animaciones gráficas. Con estas herramientas se reproduce con más o menos fidelidad el movimiento y la conducta de los ocupantes, lo que permite efectuar pruebas de forma fácil a partir de soluciones supuestamente buenas. Sin embargo, con esta técnica además de no alcanzar la solución óptima del problema, se desconoce la distribución de los ocupantes hacia cada salida para conseguir objetivos de evacuación óptimos.

## 1.4 METODOLOGÍA

### 1.4.1 Hipótesis

Inicialmente se establecen una serie de consideraciones o aspectos preliminares necesarios para formular las hipótesis de trabajo de la presente tesis. En primer lugar se considera que en la mayoría de situaciones de emergencia el conjunto de personas afectadas por la misma adopta una actitud relativamente racional, de tal forma que es posible pronosticar dentro de ciertos límites su comportamiento y pronosticar el valor de las magnitudes que definen su locomoción, si por el contrario, si se creyese que en estas circunstancias el comportamiento es totalmente irracional y anárquico carecería de sentido tratar de establecer modelos para planificar las actuaciones idóneas en estas circunstancias.

Para prever el movimiento de las personas se consideran válidos ciertos modelos experimentales, dado que no existe referencia de estudios significativos efectuados en nuestro país, se procederá a adoptar como válidos modelos de ocupación y de locomoción desarrollados en otros países, ello supone admitir que nuestras dimensiones y capacidades de locomoción son similares a las de los americanos, ingleses, rusos, japoneses o austriacos.

La modelización se sitúa en un entorno determinista, aunque las magnitudes que definen las dimensiones y el movimiento de las personas tienen un carácter marcadamente aleatorio y fuera más precisa la modelización estocástica, se considera poco viable su utilización dado que normalmente da lugar a plantear el problema mediante redes de colas cuya resolución suele ser laboriosa, por ello incluso en problemas de tamaño mediano se recurre a aproximaciones y en otros casos también se procede mediante simulaciones. La modelización determinista es más razonable, facilita el planteamiento coherente desde las magnitudes de locomoción iniciales hasta la solución final con la precisión y el realismo adecuados.

Finalmente como última consideración preliminar se considera que las redes de flujo son un instrumento válido para la representación y estudio de la evacuación de los edi-

ficios, de forma que permite su estudio sin ninguna pérdida de información siendo además una herramienta capaz de asumir plenamente los objetivos planteados.

Como primera hipótesis de trabajo se supone que la evacuación de un edificio depende de un conjunto de factores que se deben identificar, no debe limitarse el problema a suponer que las velocidades y flujos de circulación dependen exclusivamente de la ocupación a través de magnitudes como la tasa de ocupación o la densidad. La edad, el sexo, el rol, el tipo de edificio y el conocimiento del mismo que tienen los ocupantes, los sistemas de señalización de seguridad y otros aspectos se considera que pueden tener una influencia decisiva en el desarrollo de este proceso. Una vez identificados los factores significativos del problema, se presupone que será factible estudiarlo mediante un modelo matemático con la finalidad de dar solución al mismo en sus variantes descriptiva y conductista. Por una parte se supone que será posible evaluar las magnitudes que describen el proceso con la precisión deseada y por otra, la conductista, que se tendrá capacidad para hallar soluciones óptimas asignando salidas, o estableciendo rutas etc., para cumplir los objetivos que se hubieran planteado.

En determinados casos la solución del problema podrá obtenerse de la forma que se ha establecido en los objetivos, con herramientas simples de tal manera que para el cálculo y la gestión de la evacuación de los recintos con estos medios no sean precisos grandes conocimientos matemáticos. Las herramientas gráficas pueden ser un elemento válido para interpretar, analizar y estudiar los resultados del problema de la evacuación pudiendo aportar información suficiente para la toma de decisiones y la gestión de una evacuación de emergencia.

Finalmente se supone que es posible verificar si los resultados obtenidos en los modelos analíticos son coherentes con los resultantes de simulacros y ensayos, de forma que sea posible garantizar por una parte la validez del propio modelo y por otra los parámetros de cálculo utilizados.

### **1.4.2 Metodología utilizada**

La metodología utilizada es la propia del método científico, se inicia observando y formulando un problema, se propone un modelo, se aplica a unos casos concretos, se analizan los resultados y finalmente se obtienen unas conclusiones.

La identificación de los factores que se cree tienen una influencia significativa en el proceso de la evacuación de un edificio se realiza a partir de un análisis riguroso del problema y del estudio de los documentos que constituyen el “estado del arte”. Con ellos se formula un modelo matemático para el estudio del problema, estructurándose en dos propuestas, primero se procede a estudiar la evacuación del recinto y posteriormente se aplica a la evacuación del edificio, resultando dos problemas diferentes cuyo estudio se debe realizar por separado. La solución de los dos problemas se realiza mediante procedimientos exactos y algoritmos heurísticos. La solución del problema de la evacuación del recinto se basa en el procedimiento de J. R. Brown [6] y en la solución

gráfica propuesta por R. L. Francis [32]. Para el estudio de la evacuación del edificio se utilizan redes dinámicas de flujo de características propias diferentes de las utilizadas tradicionalmente en el estudio del mismo, cuya solución se obtiene mediante procedimientos heurísticos.

La validación de los resultados y la confirmación del propio modelo se efectúa mediante procedimientos gráficos similares a los que utilizan algunas técnicas estadísticas. Para verificar el propio modelo, el sistema de resolución y la validación de los valores de los parámetros utilizados se realizan aplicaciones sobre casos supuestos o problemas tipo y posteriormente se opera sobre problemas derivados de situaciones reales. Las aplicaciones realizadas en los problemas tipo se contrastan con los valores de los resultados obtenidos mediante otros procedimientos de reconocida solvencia aplicados a situaciones particulares mientras que los casos reales se contrastan con los obtenidos en simulacros y ensayos.

### 1.4.3 Síntesis de los trabajos

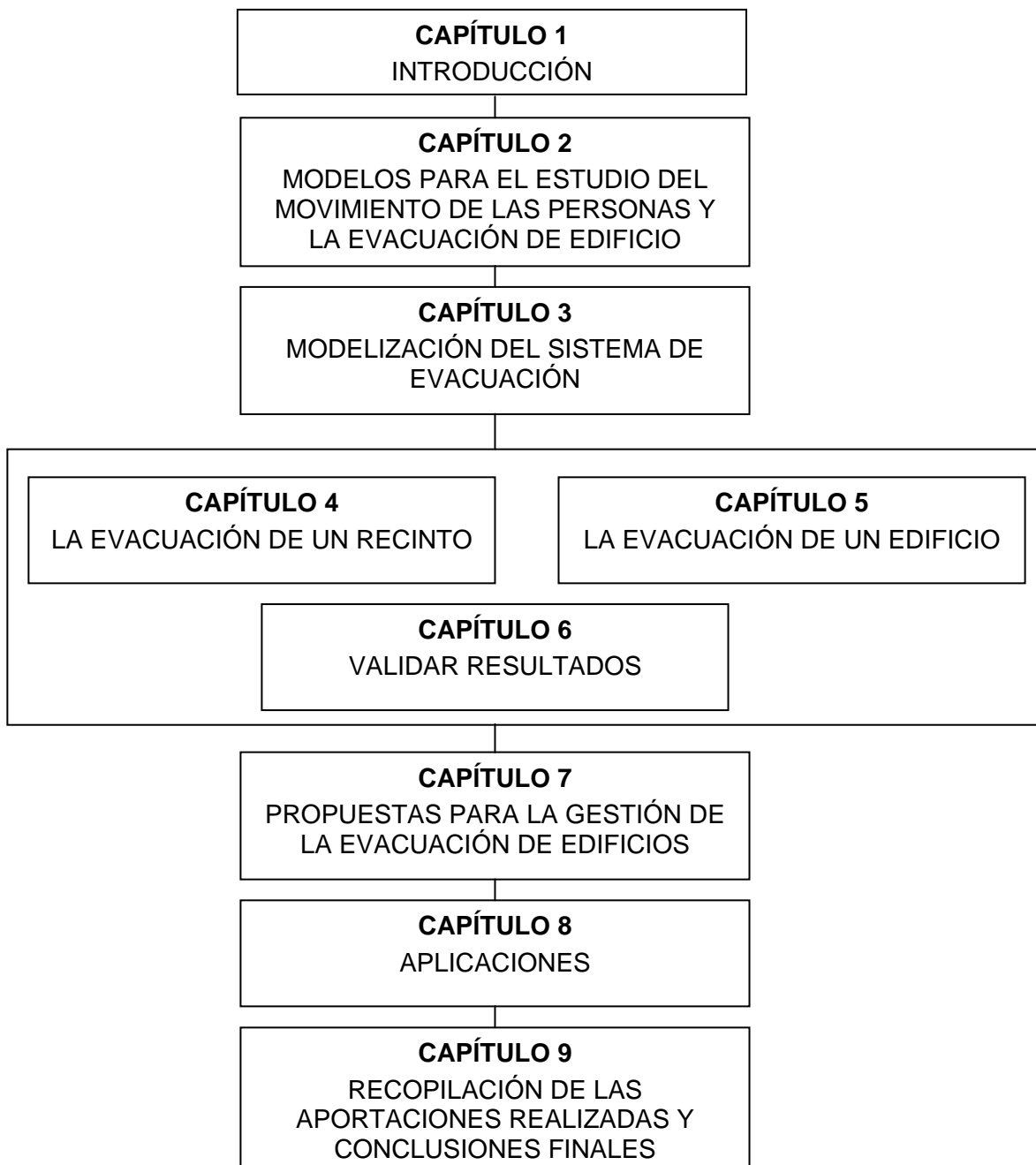
El estudio del problema según los objetivos y la metodología descritos se resume en la figura 1.4, habiéndose realizado los trabajos detallados en los siguientes apartados cuya enumeración se corresponde con la de los respectivos capítulos.

**1. Introducción.** En este capítulo se efectúa la definición y análisis del problema de la evacuación de edificios, desarrollándose los objetivos del trabajo, así como justificando el interés y la oportunidad de centrar la investigación del presente trabajo en este ámbito. Se propone además, una metodología de trabajo para la confección de la tesis.

**2. Modelos para el estudio del movimiento de las personas y la evacuación de edificios.** Existe una labor de recopilación de información, lectura, análisis, clasificación y estudio de los documentos que constituyen el “estado del arte” del problema, en dicho capítulo se resumen los documentos esenciales y detallan los aspectos que constituyen el punto de partida de la investigación realizada.

**3. Modelización del sistema de evacuación.** Se han determinado los factores que se cree tienen una incidencia significativa en el proceso de la evacuación de un edificio, para ello se ha definido el sistema de evacuación y formulado una modelización del mismo. El problema se divide en dos, el problema de la evacuación de un recinto y el de la evacuación de edificios, puede entenderse el recinto como una unidad simple y ciertos edificios pueden asimilarse a esta situación, por otra parte en el estudio de los edificios deben resolverse individualmente los problemas de los recintos y el edificio tratarlo como conjunto de recintos relacionados, ambas situaciones se resuelven de forma separada en los dos próximos capítulos. De igual forma, se definen los formatos más adecuados para la presentación de los resultados cumpliendo con los objetivos establecidos.

**4. Solución del problema de la evacuación de recintos.** Se estudia el problema en diferentes condiciones de los factores del propio modelo, la posible ubicación de los ocupantes y el comportamiento en el momento de producirse la señal de alarma, todo ello da lugar a distintas formas de la función de evacuación que constituye una herramienta básica para la solución del problema. También se utilizan diferentes modelos de locomoción, en un principio se utilizan modelos de flujo constante y posteriormente modelos en los cuales las magnitudes de locomoción son función de la ocupación.



**Figura 1.4** Esquema de los trabajos realizados

**5. Solución del problema de la evacuación de edificios.** Además del estudio de idénticas situaciones que en el problema del recinto, se contempla el estudio de las vías de evacuación, confluencias y ramificaciones, realizándose un análisis microscópico del

proceso de evacuación, para finalmente obtener la solución óptima mediante procedimientos heurísticos.

**6. Proceso de validación de los resultados.** En este apartado se desarrollan herramientas gráficas y analíticas para el estudio e interpretación de los resultados, además de fijar criterios para comparar resultados teóricos y reales. Inicialmente la validación del problema se limita a comparar los tiempos de evacuación obtenidos en los modelos teóricos con los resultantes de ensayos y simulacros, posteriormente se ha profundizado en el problema y se han desarrollado procedimientos más robustos que aportan una mayor garantía a las posibles conclusiones. A dichos procedimientos se les ha denominado, análisis de la función de evacuación y análisis de flujos.

**7. Propuestas para gestión eficaz de la evacuación de los edificios.** En este capítulo, se formulan propuestas para mejorar la gestión de la evacuación de los edificios. Se trata de una incursión fuera de las técnicas cuantitativas, presentándose algunos conceptos simples de carácter práctico con los que se piensa que puede mejorar notablemente la seguridad de las personas en los edificios.

**8. Aplicaciones.** Se utilizan los modelos y procedimientos propuestos para el estudio de la evacuación de diferentes recintos y edificios. Con estos ejemplos se trata de mostrar el potencial y el cumplimiento de los objetivos de la presente tesis. Entre las aplicaciones realizadas se documentan el estudio de la evacuación de un edificio destinado a actos sociales y congresos, uno dedicado a actividad industrial, un problema tipo y por último, el estudio de la evacuación de un edificio de uso escolar.

**9. Recopilación de aportaciones realizadas y conclusiones finales.** Se realiza una enumeración de las aportaciones realizadas en la presente tesis y finalmente se obtienen una serie de conclusiones, concretándose de forma detallada los aspectos en los cuales se considera que tendrían interés futuras investigaciones.

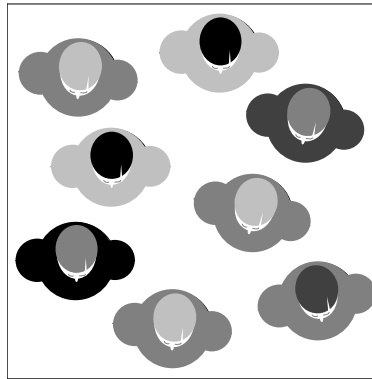
## 1.5 DEFINICIONES

Las características del problema llevan a tratar de resolverlo en el ámbito de los modelos matemáticos mientras que aspectos del mismo se encuentran en otras disciplinas, fundamentalmente construcción y seguridad contra incendios, en virtud de ello se relacionan a continuación algunos de los conceptos generales propios de dichos ámbitos.

### 1.5.1 Magnitudes que definen la ocupación de los recintos y el movimiento de las personas

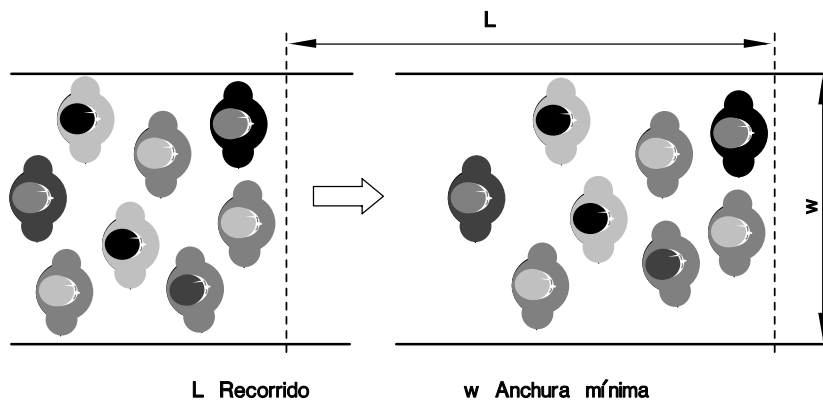
Las zonas ocupadas por las personas en los edificios tienen una determinada capacidad, que depende de las dimensiones de las mismas y de la separación que se establezca entre ellas. Es diferente un recinto ocupado por niños que por personas adultas, pero además las personas ejercen a su alrededor una zona de influencia, en la cual desean que no se encuentren otras personas, desplazándose para obtener dicho espacio. En la figura 1.5 puede observarse dicho concepto que se cuantifica con diferentes magnitudes, las

más utilizadas por los modelos experimentales para definir la ocupación de los recintos son, densidad, módulo y tasa de ocupación.



**Figura 1.5** Ocupación recintos

**La densidad de ocupación** viene dada por el número de personas que se encuentran en una unidad de superficie, así si la unidad de superficie utilizada es el  $m^2$  las unidades de esta magnitud serán personas por  $m^2$ . **El módulo de ocupación** son las unidades de superficie que le corresponden a una persona que ocupa un determinado recinto, es pues la magnitud inversa de la densidad, siendo sus unidades serán  $m^2$  por persona. Por último, **la tasa de ocupación** muestra la relación entre la ocupación existente en un recinto y su posible ocupación máxima, se trata de un número adimensional que corresponde al porcentaje de ocupación.



**Figura 1.6** Magnitudes de locomoción de las personas

Por su parte, las **magnitudes de circulación**, que pueden observarse la figura 1.6, definen la capacidad de locomoción de los individuos. Se definen tres magnitudes de circulación, la velocidad de circulación, el flujo específico y el flujo. **La velocidad de circulación** hace referencia a la distancia recorrida por una persona en una unidad de tiempo, las unidades de tiempo utilizadas habitualmente son el minuto o el segundo dando lugar a las unidades metros por minuto o bien metros por segundo. **El flujo específico** relaciona el número de personas que cruzan una unidad de anchura en una unidad de tiempo, si la unidad de longitud es el metro y la de tiempo el minuto o el segundo resultan personas por metro y minuto o bien personas por metro y segundo, respectivamente.

Finalmente, **el flujo** es el número de personas que cruzan un determinado punto de referencia en una unidad de tiempo, personas por minuto o personas por segundo.

### 1.5.2 Definiciones de construcción

Al igual que sucedía en el apartado anterior, existe un conjunto de términos del léxico propio del sector constructor utilizados habitualmente en el problema de la evacuación de edificios, algunos de ellos con una referencia precisa en la propia legislación (NBE-CPI/96) que definen aspectos generales, salidas y comportamiento al fuego.

Se entiende por **origen de evacuación**, cualquier punto que puede estar ocupado por alguna persona, la normativa permite en los recintos de densidad de ocupación baja y superficie menor de 50 m<sup>2</sup> considerar como origen de evacuación su puerta de salida. Constituye **una vía de evacuación** el conjunto de dependencias de paso que conducen los ocupantes desde un punto inicial origen de evacuación hasta un destino seguro. Por su parte, **el recorrido de evacuación** es la distancia existente entre dos puntos de una vía de evacuación medido sobre el propio eje de pasillos, escaleras y rampas. **La altura de evacuación** viene dada por la diferencia de cotas existente entre el origen de evacuación y la de salida del edificio o espacio exterior seguro, en recorrido ascendente o descendente, de forma absolutamente genérica se considera un edificio de gran altura una construcción con una altura edificada superior a 25 metros; en Alemania, Suiza, Austria y Dinamarca consideran edificios de gran altura aquellos que superan los 22 metros, en Francia y Portugal en edificios de viviendas consideran 28 metros y en España se condiciona este concepto a la posibilidad de acceder a la planta desde el exterior. El **espacio exterior seguro** es aquella zona cuya superficie es suficiente para contener los ocupantes y no estar afectado por el siniestro, en caso de incendios se indica que sus características deben facilitar una amplia disipación térmica y de los humos, así como la asistencia a los ocupantes.

Se denominan **rampas** a los pasillos con una pendiente no mayor del 12 % cuando su longitud sea menor que 3 metros, del 10 % cuando su longitud sea menor que 10 metros o del 8% en el resto de casos. A una puerta o paso que conduce directamente o no a la salida de la planta o del edificio se la conoce como **salida del recinto**. Contrariamente, una **salida de planta** puede ser el arranque de una escalera que conduce a una planta de salida del edificio siempre que reúna unas condiciones de seguridad establecidas, también puede tratarse de una puerta de acceso a una escalera o a su vestíbulo previo o bien a un pasillo protegido, siempre que cumpla con la normativa específica y que conduzca a la salida de edificio. De igual forma, puede hablarse de salida de planta en el caso de puertas de acceso a otro sector, con la condición de que el primer sector tenga otra salida de planta o una puerta de acceso a un tercer sector y finalmente a una salida de edificio, en cuyo caso las salidas del primer sector no conducirán a un sector común para los dos recorridos optativos. Por último, se entiende por **salida de edificio** cualquier puerta o hueco utilizable como paso a un espacio exterior seguro.

Se dice que un elemento es **estable al fuego** si tiene la facultad de mantener su capacidad portante durante el tiempo que se especifique bajo la acción del fuego. Siendo la **resistencia al fuego (RF)** la capacidad de un elemento para que durante el tiempo que se especifique ante la acción de un fuego, mantenga su estabilidad, ausencia de emisión de gases en la cara no expuesta al fuego, estanquidad al paso de la llama y gases calientes y evite que se produzcan en la cara no expuesta temperaturas superiores a las especificadas en la Norma UNE 23093. **Parallamas** es la capacidad de un elemento expuesto al fuego para que durante el tiempo que se determine mantenga su estabilidad, no emita gases inflamables por la cara no expuesta y sea estanco al paso de la llama y de gases calientes. Se concibe un **pasillo o una escalera protegidos** como aquellos que cumplen unas condiciones de aislamiento que se resumen en tener un comportamiento ante el fuego definido, compartimentado de otros recintos RF-120 y comunicado con los mismos mediante vestíbulo previo, siendo de uso exclusivo para la circulación, toda vez que disponen de medios adecuados para la ventilación y la extracción de humos. **El vestíbulo previo** es un recinto delimitado por elementos RF cuyas características están en función de los valores que corresponda al sector de incendio o local a independizar y que tiene como única función la circulación de las personas.

Se imagina un **sector de incendio** como un recinto delimitado por elementos resistentes al fuego del grado que en cada caso se determine y que encierra una o varias actividades definidas por un solo uso. Los **simulacros de evacuación** son un ejercicio en el cual los ocupantes de un edificio se desplazan de la posición que ocupan en el interior del mismo hasta una posición segura tratando de reproducir la forma que lo realizarían en una situación de emergencia, pudiendo estar o no avisados los ocupantes del mismo, con lo que desconocen si se trata de una situación real o bien de un simulacro. Se designan como **ensayos de evacuación**, aquellos ejercicios en los cuales un grupo de personas se desplaza desde el interior de un edificio o de un recinto hasta otra dependencia o espacio exterior, toda vez que se observan sus actitudes y se miden ciertas magnitudes como pueden ser el tiempo de evacuación, los flujos y las retenciones, entre otras. Dichas mediciones pueden realizarse directamente o bien procediendo a la grabación del ensayo y posterior análisis del mismo.

### 1.5.3 Tiempos de evacuación

En el desalojo por incendio o emergencia de un local o edificio se consideran cuatro tiempos diferenciados, detección, alarma, retardo y evacuación. El **tiempo total de evacuación** es el tiempo que transcurre desde que se produce la detección de un determinado incidente hasta que ha finalizado el proceso de la evacuación, viene dado por la suma de los tiempos de detección, alarma, retardo y el propio de la evacuación. Para la optimización del tiempo total de evacuación se debe considerar la forma de hacer mínimos todos y cada uno de los tiempos, lo que depende del número de salidas del edificio o recinto a evacuar y del recorrido que sea preciso efectuar, normalmente se considera que los ocupantes asignados a una salida deben poder traspasarla en un tiempo



máximo de 2,5 minutos. Por su parte, el **tiempo de detección** comprende el tiempo transcurrido desde el inicio de la situación de emergencia hasta que la persona responsable pone en marcha la alarma. Se desglosa a su vez en tres tiempos, percepción, verificación de la emergencia y aviso para iniciar la alarma. La percepción de la situación de emergencia puede producirse mediante sistemas de detección automáticos o bien por detección humana, en el caso de detección automática la central de alarma puede activar directamente la alarma para iniciar la evacuación. Este sistema puede utilizarse en función de su fiabilidad, si de forma repetida produjera falsas alarmas resultaría un sistema no utilizable, contrariamente, la detección humana si bien no es tan rápida puede optimizarse con la ayuda de medios de comunicación eficaces, normalmente transcurre un tiempo desde que se verifica la gravedad del suceso hasta que se activa la alarma correspondiente. El **tiempo de alarma** es el propio de la emisión de la señal de alarma, sonidos codificados (sirena de alarma), sistemas de megafonía o bien sistemas ópticos. Este tiempo depende de la bondad técnica y de la capacidad de comunicación colectiva de los citados mensajes. Por último, el **tiempo de retardo** es el que transcurre desde que el colectivo de personas percibe y asimila el mensaje de alarma hasta que inicia el movimiento hacia los itinerarios correspondientes de salida, influye en él de una manera importante, la eficacia de la comunicación de los mensajes y la buena organización del personal de ayuda para la evacuación.

#### 1.5.4 Definiciones comportamiento

Respecto al comportamiento de las personas se definen los conceptos de pánico y pánico negativo, citados en repetidas ocasiones en la presente tesis. Se conoce como **pánico** una conducta completamente irracional que puede resultar autodestructiva, de forma muy simple este comportamiento de los individuos se caracteriza por tomar decisiones irracionales que incrementan el peligro para ellas mismas y las demás. La mayoría de las personas no han tenido la experiencia de hallarse en una situación de peligro inminente, cuando esto les ocurre parece un hecho contrastado en la historia de grandes siniestros que el miedo a morir ha causado muchas más víctimas que el propio siniestro. De la misma forma debe indicarse que diferentes autores demuestran que el pánico se produce en casos reducidos, suele ir acompañado de otros factores extremos que para un conocimiento profundo del problema conviene analizar detenidamente. El **pánico negativo** consiste en una actitud completamente inmovilista e insensible al siniestro, llevada de tal forma que como consecuencia de la pasividad total puede llevar necesariamente a la autodestrucción.



## **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 Conocout 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: Predtechenski 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.

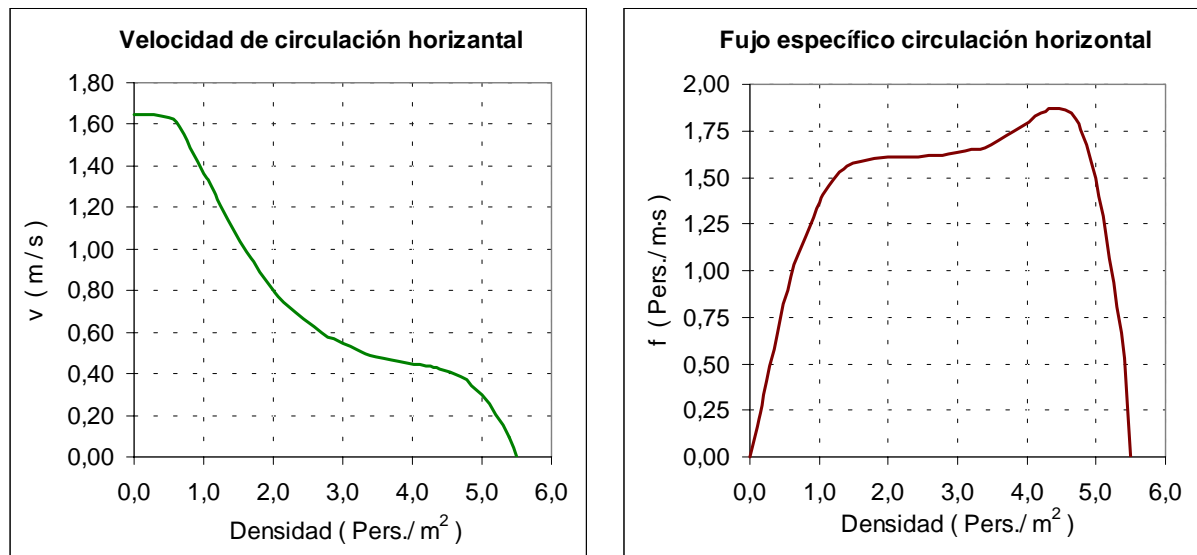
### **2.3.1 Documentos preliminares**

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.

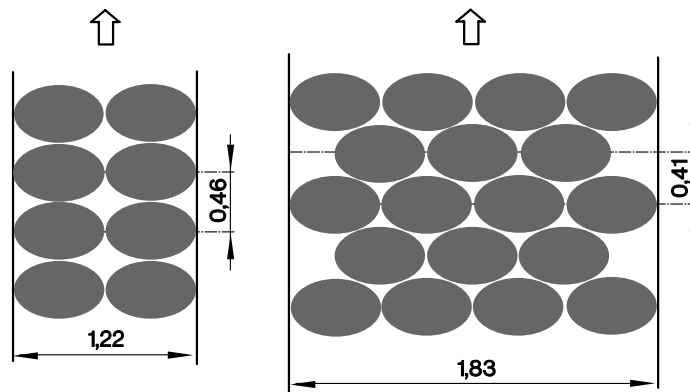
Durante bastantes años el tiempo máximo de 2,5 minutos ha sido una referencia para el diseño de las salidas, años después en el mismo Reino Unido la General Service Administration estableció que las personas expuestas en el entorno de un incendio debían poder alcanzar un área protegida en 90 segundos, 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.

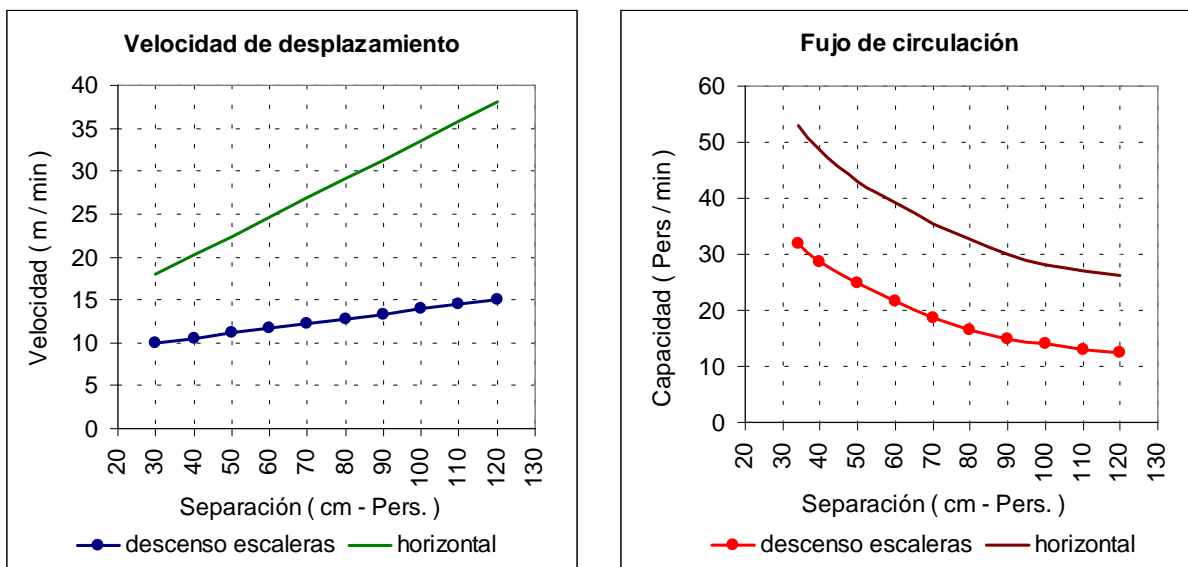
En estos modelos la capacidad de las vías de evacuación se determina considerando las dimensiones de los individuos, la proyección horizontal de una persona se representa mediante una elipse cuyos semiejes menor y mayor miden 18 y 24 pulgadas respectivamente (0,4572 y 0,6096 metros). Otro aspecto característico 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.

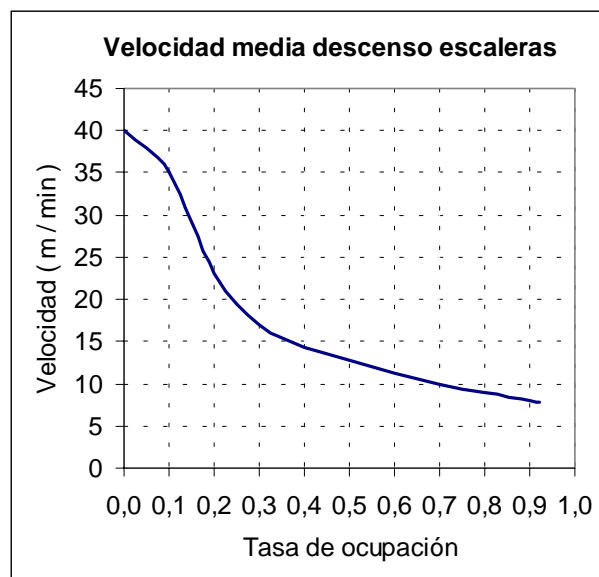
Una característica común de los modelos desarrollados en la URSS, de la misma forma que se ha descrito en los documentos preliminares del IAAA, el MISI y el VIINPO, es la definición de la ocupación de los recintos a partir de la tasa de ocupación  $\rho$ , y los flujos mediante la tasa de circulación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



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:

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

pudiendo 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.

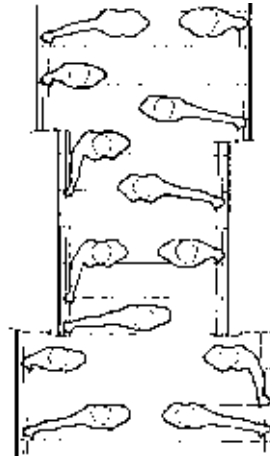
#### **2.3.3.1 Modelización empírico-experimental de J. Pauls**

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.

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

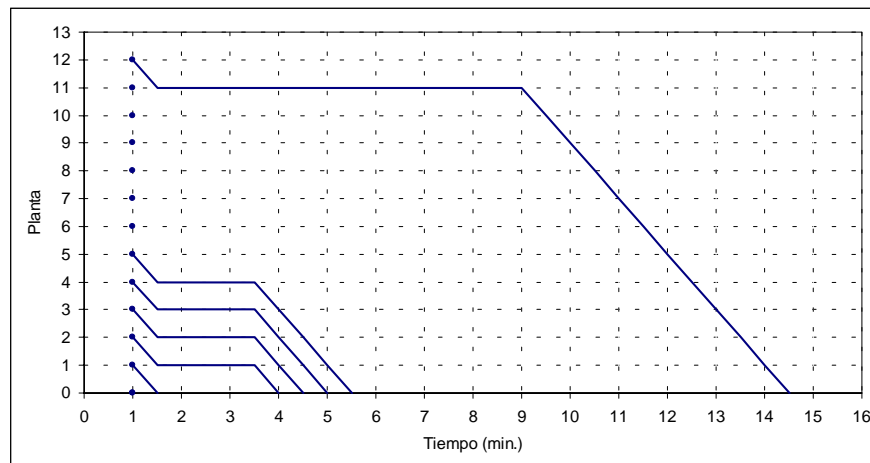
Otra de las propuestas, es una expresión que permite estimar directamente el tiempo necesario para la evacuación de grandes edificios. Se trata de una forma contrastada de la cual se asegura que ha dado excelentes resultados, consiste en las expresiones (2.38), donde  $k$  es el número de personas que 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

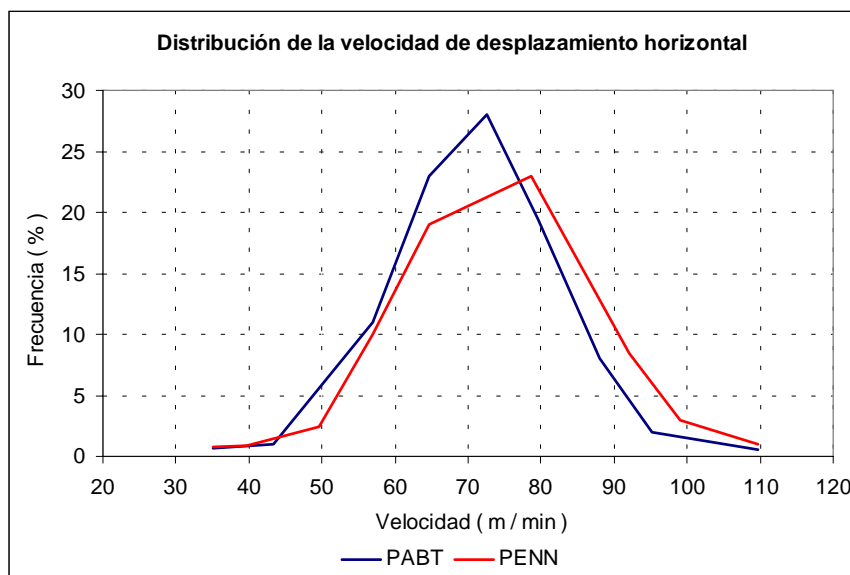
John J. Fruins desarrolló sus investigaciones en los Estados Unidos, aproximadamente en la misma época que J. Pauls realizaba las suyas en el Canadá. Globalmente en ciertos aspectos sus trabajos guardan una cierta similitud y las conclusiones son similares. La publicación más significativa es el documento "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.

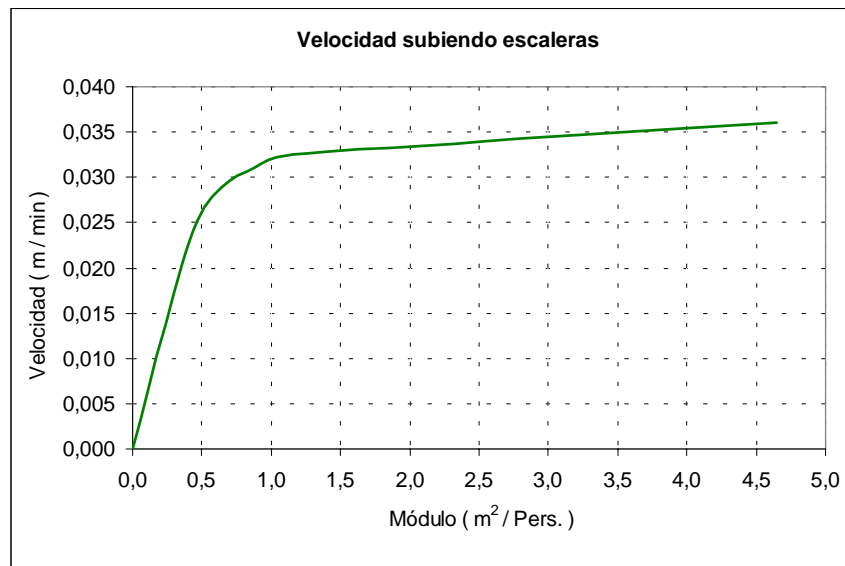
Un aspecto relevante de este autor, es su preferencia en trabajar con el módulo de ocupación, magnitud inversa de la densidad. El módulo de ocupación indica el número de metros cuadrados de superficie que le corresponden a cada persona. Dado que operar con la densidad supone en la mayoría de casos trabajar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



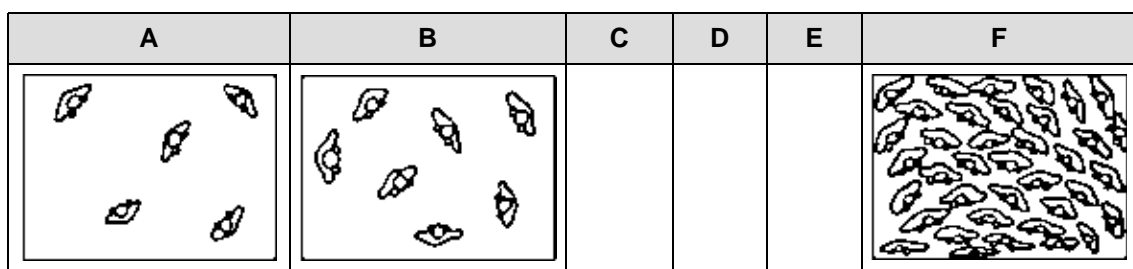
**Figura 2.8** Análisis de la velocidad de desplazamiento de las personas

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.



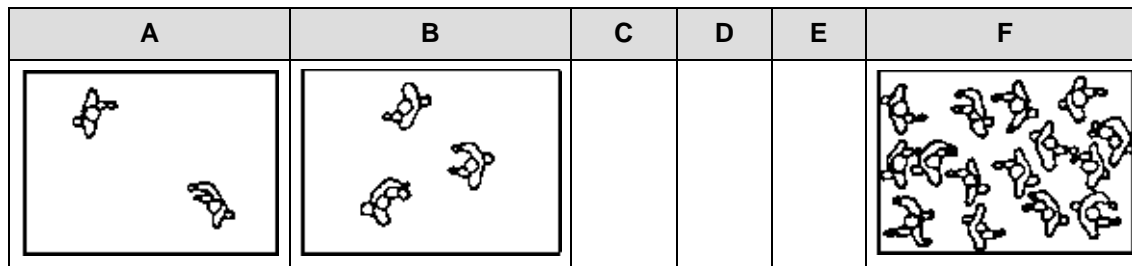
**Figura 2.10** Nivel de servicio de ocupación

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.

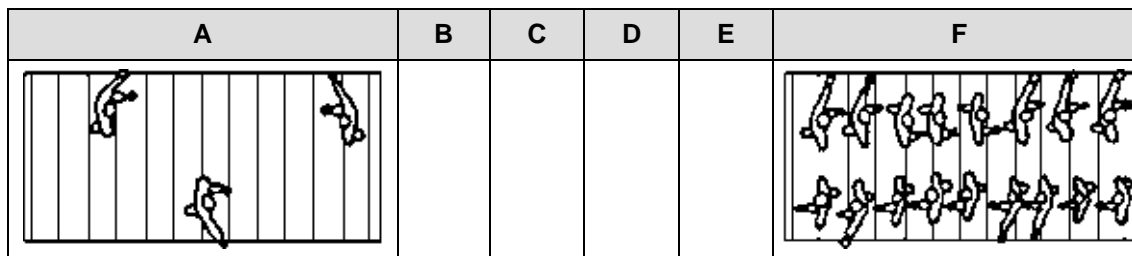


**Figura 2.11** Nivel de servicio para la circulación horizontal

Nivel de servicio	A	B	C	D	E	F
<b>Densidad (personas / m<sup>2</sup>)</b>	< 0.30	0.30 0.43	0.43 0.71	0.71 1.07	1.07 2.15	> 2.15
<b>Velocidad (metros / minuto)</b>	> 79.25	79.25 76.20	76.20 70.10	70.17 60.96	60.96 33.53	< 33.53
<b>Flujo específico (personas / m min)</b>	< 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 (personas / m<sup>2</sup>)</b>	< 0.53	0.53 0.71	0.71 1.07	1.07 1.53	1.53 2.69	> 2.69
<b>Velocidad (metros / minuto)</b>	> 38.01	38.01 36.58	36.58 35.05	35.05 32.00	32.00 25.91	< 25.91
<b>Flujo específico (personas / m min)</b>	< 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

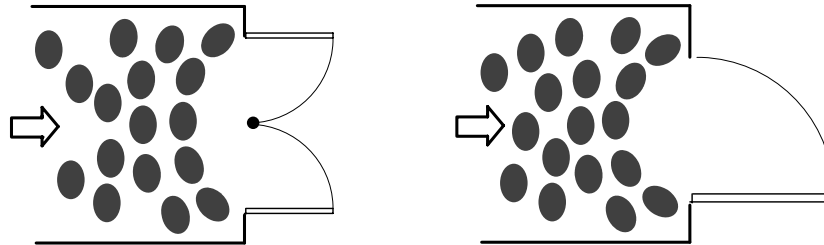
**Tabla 2.9** Magnitudes de circulación por escaleras documentado por Melinek & Booth

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  $k_j$  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



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

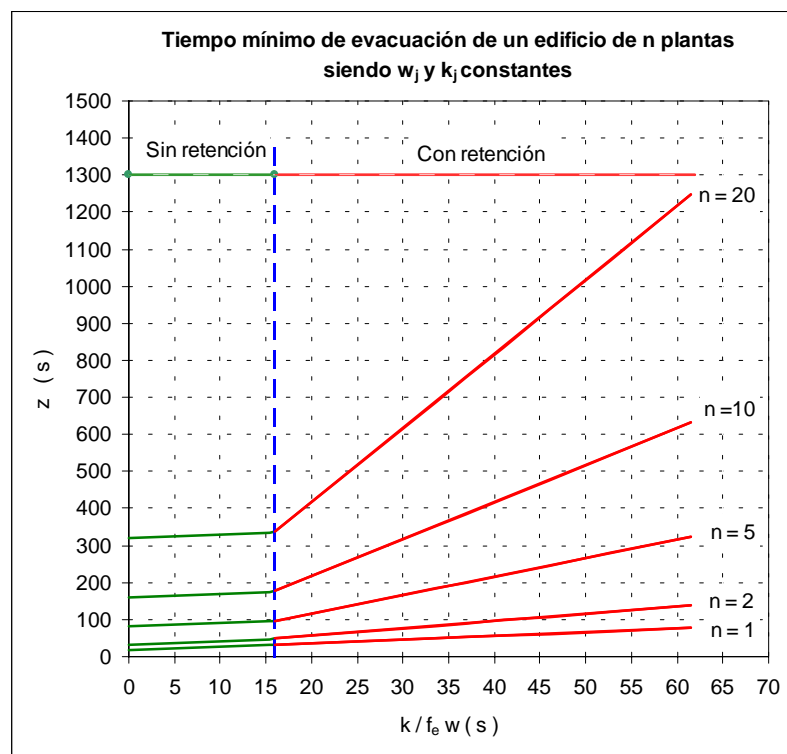
De la misma forma, cuando existe retención el tiempo de evacuación viene determinado por el tiempo de recorrido, produciéndose el máximo si  $r = n$  cuando:

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

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 efectivo 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.

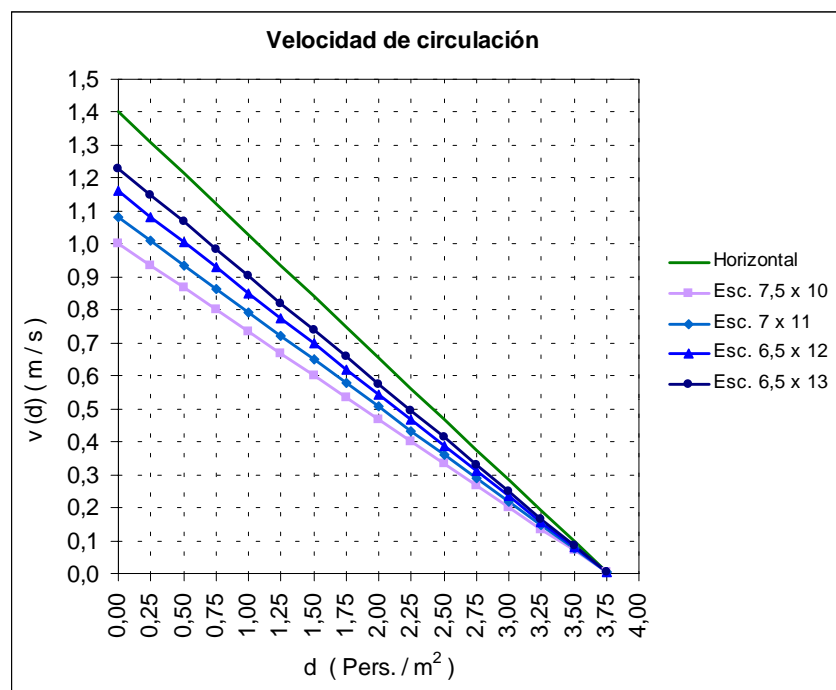
$$v(d) = \lambda(1 - \alpha d) \quad (2.54)$$

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.



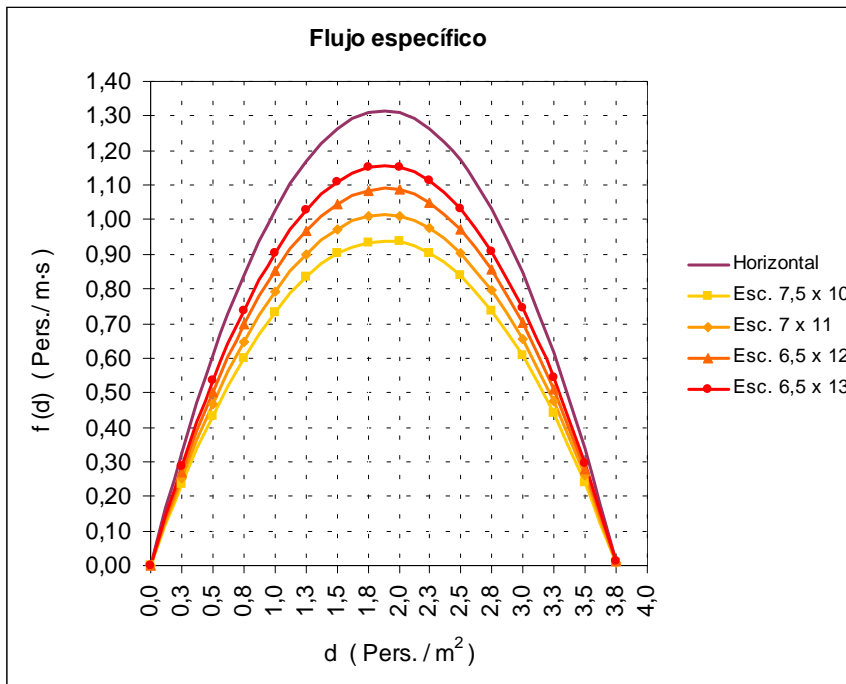
**Figura 2.15** Velocidad de circulación en función de la densidad y condiciones geométricas

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].

Circulación horizontal	Velocidad media (metros / segundo)	Coefficiente de movilidad
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

Ascenso de escaleras	Velocidad (metros / segundo)			Coefficiente de movilidad
	Intervalo		valor medio	
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.

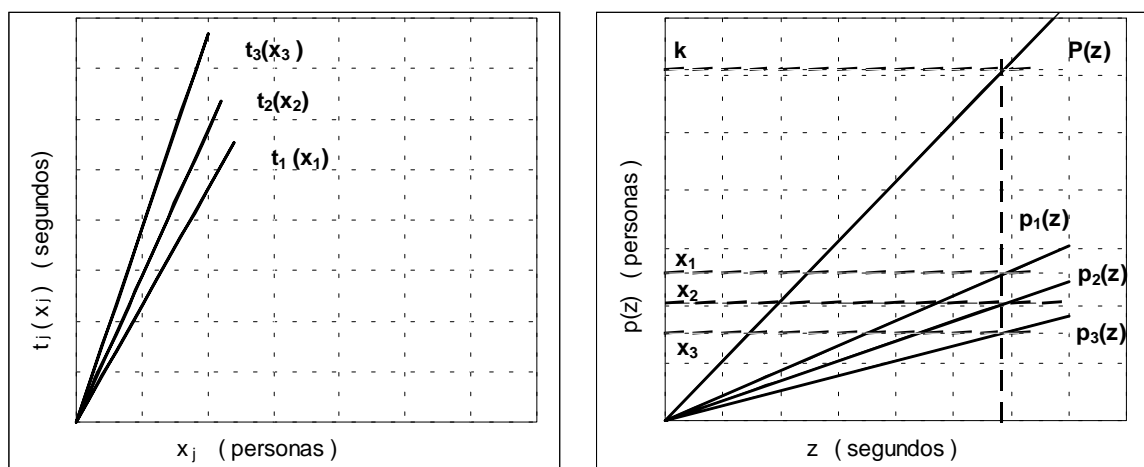
### 2.4.1 Modelos deterministas

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

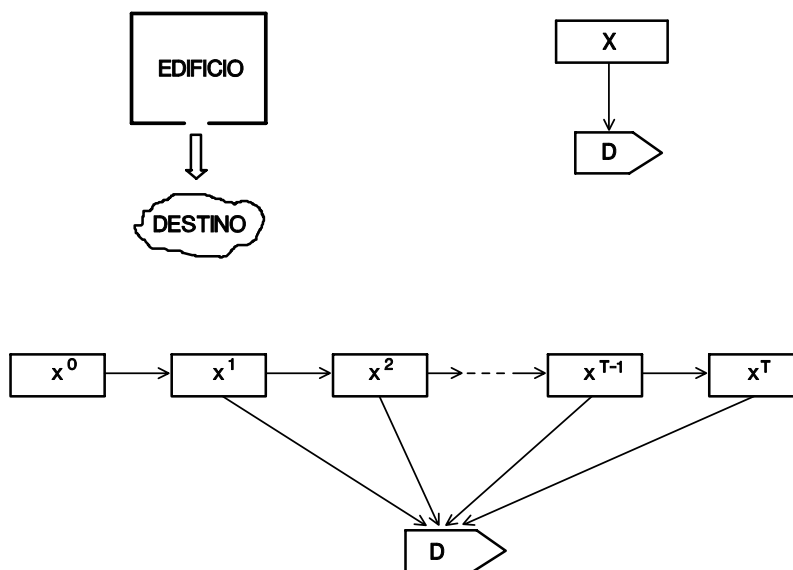
En el año 1980 se publicó el trabajo [4] de G. N. Berlin, A. Dutt y S. M. Gupta en el cual divulgaban sus investigaciones en el Center for Fire Research del National Bureau of Standards planteando la utilización de redes de flujo para el estudio del problema de la evacuación de edificios. El objetivo 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.

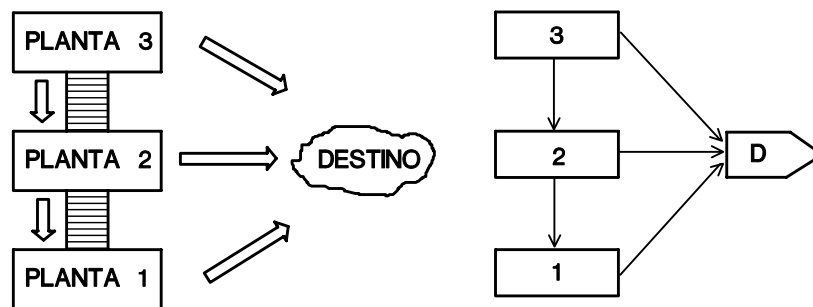


**Figura 2.18** Representación de un edificio mediante una red

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  $\bar{c}_i(q)$ , 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

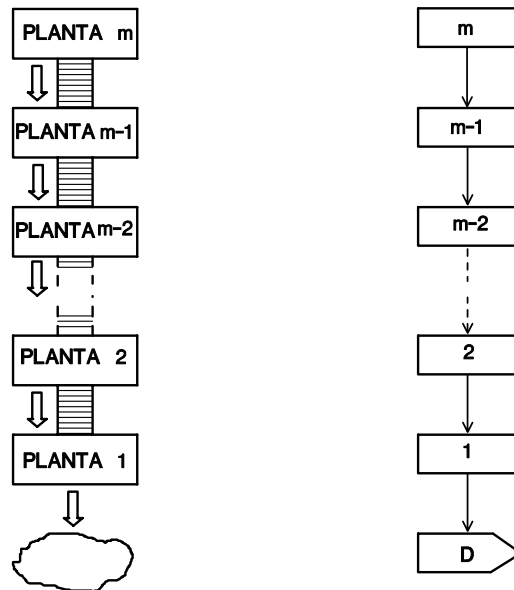
Para el estudio de la evacuación de edificios mediante el problema del coste de circulación a partir de la red estática y de la correspondiente red dinámica, según la expresión (2.69) se define la función objetivo de este problema. Puede observarse que efectivamente se trata de contabilizar el tiempo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

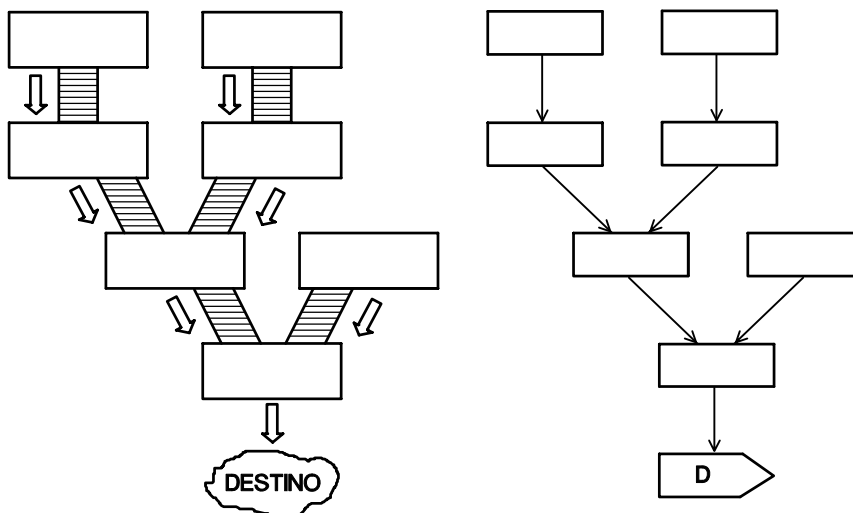
De igual forma, para una estructura de red correspondiente a una serie de nodos sucesivos como los que corresponden a una vía de evacuación como en el representado en la figura

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.

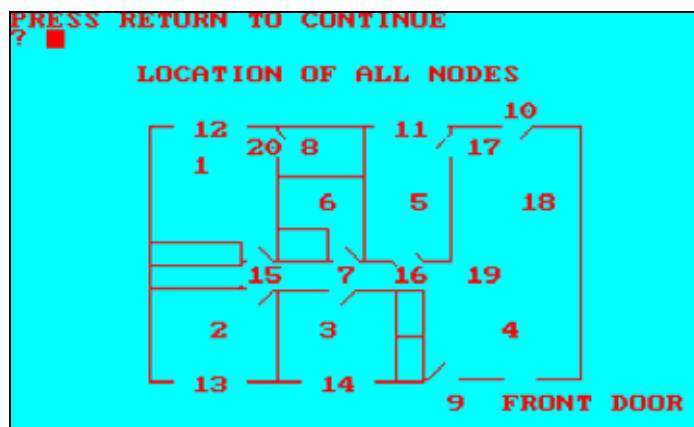
Otro de los primeros programas de destacada relevancia es el **B-FIRES II** [191], desarrollado por F. Sthal al amparo del National Bureau of Standards, el programa está escrito en FORTRAN y existe referencia del mismo en diversas publicaciones del año 1982, en él se simula la evacuación de un edificio 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.



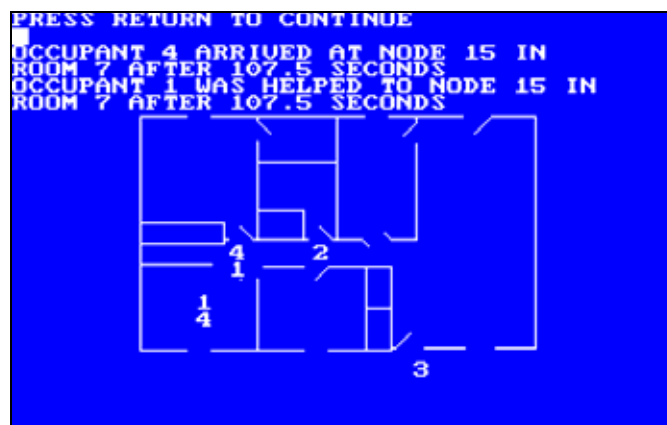
**Figura 2.26** Ubicación de los ocupantes en el edificio mediante EXITT

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.

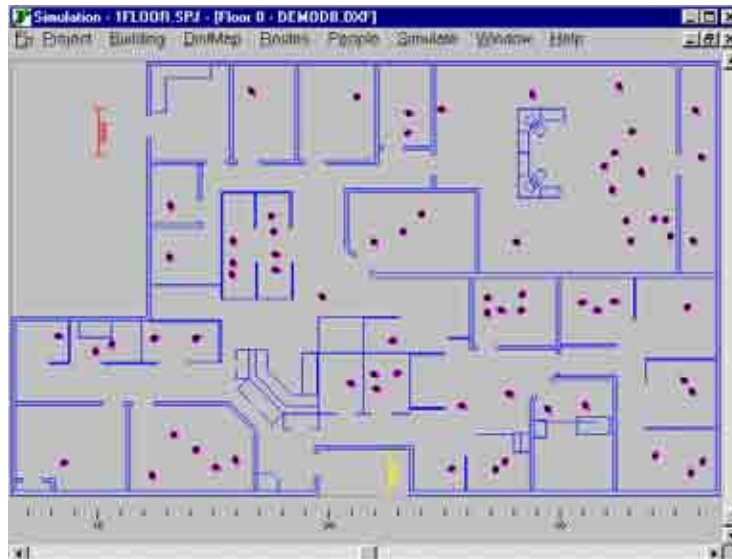
#### 2.5.4 El programa SIMULEX

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.



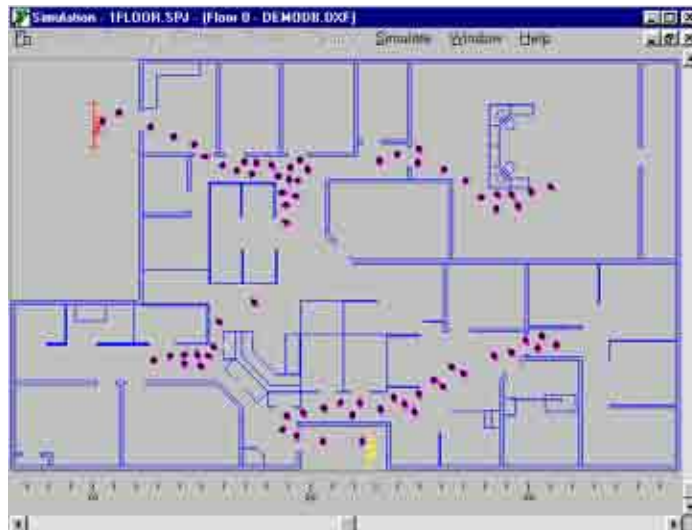
Mapa de distancia mediante SIMULEX

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.

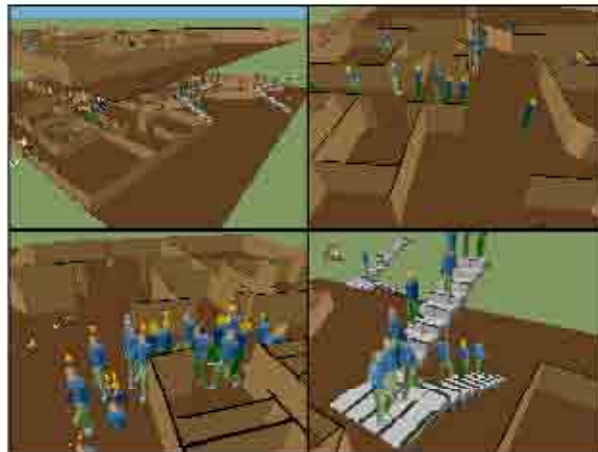
EXODUS es una herramienta informática diseñada para estudiar la evacuación de gran variedad de recintos y edificios de cualquier dimensión, simula la evacuación individual de cada uno de los ocupantes de un edificio modelando el recinto de forma detallada, analizando la interacción entre los ocupantes, 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.

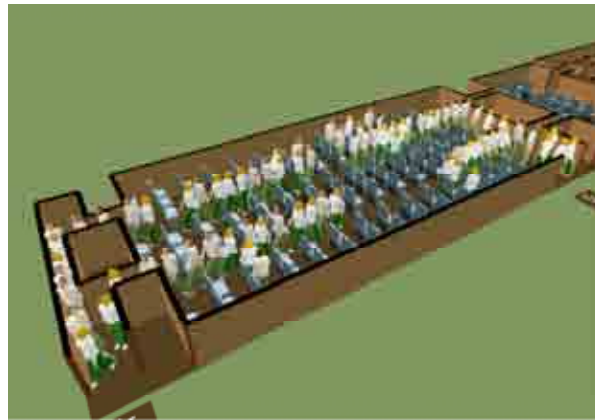


**Figura 2.33** Formato visual de las soluciones aportadas por EXODUS

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  $6^\circ$ . 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 *Per-sias* 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.



## CAPITULO 3: MODELIZACIÓN DEL SISTEMA

### 3.1 POSIBILIDAD DE ESTUDIAR EL PROBLEMA

Durante mucho tiempo ha existido la creencia que en condiciones extremas era frecuente la aparición del “pánico”, entendido como una sensación exagerada de miedo que tiene su origen en un peligro real o supuesto que buscando la propia supervivencia conduce a los individuos a actuaciones irreflexivas, esta actitud muchas veces puede resultar autodestructiva y además causar graves problemas a todo el colectivo afectado por el siniestro. Las publicaciones de D. Sime [179], J. L. Bryan [10], G. Proulx [150], R. Fahy [26] o T. Shields [174], en las que se analiza la actuación de los ocupantes de los edificios en diversos siniestros, básicamente incendios, demuestran que comportamientos inadaptados tan solo se producen en un número reducidos de casos.

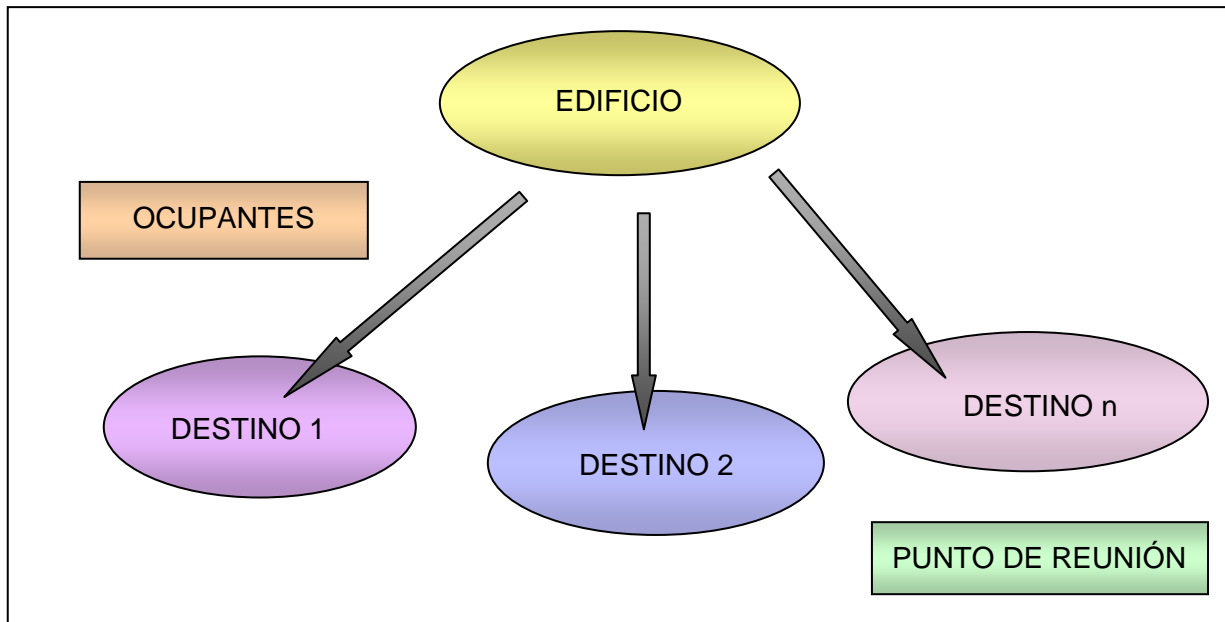
El hecho de suponer que las personas en situaciones críticas mantengan una determinada racionalidad permite estudiar con una cierta verosimilitud el proceso de la evacuación de un edificio, siendo posible pronosticar ciertos patrones de comportamiento, utilizar modelos generales de locomoción de las personas y planificar evacuaciones de emergencia como herramienta para reducir el riesgo. De considerar cierto el “pánico” y admitir como actitud habitual un comportamiento descontrolado de las personas en situaciones de emergencia resultaría mucho más complejo efectuar cualquier tipo de pronóstico, hasta el punto que posiblemente no tuviera sentido el estudio del problema.

#### 3.1.1 Definición del sistema de evacuación

Un sistema de evacuación consiste en un conjunto de dependencias comunicadas entre sí, ocupadas por un determinado número de personas con unas determinadas características individuales, que tratan de desplazarse desde unas dependencias inicialmente ocupadas hasta otras que constituyen el destino de la evacuación, en la figura 3.1 puede observarse una representación de este sistema.

Un sistema de evacuación simple sería el formado por una sola dependencia origen, una dependencia de circulación y un único destino, sin embargo el problema normalmente se presenta en edificios en los cuales hay una serie de dependencias ocupadas por un número variable de personas que se dirigen a uno o a varios destinos. Las características de las dependencias y la forma de conectarse dan lugar a los diferentes elementos de paso y unas determinadas condiciones arquitectónicas. Si bien el destino de evacuación generalmente es una zona inmediata del edificio con capacidad suficiente para albergar la totalidad de los ocupantes, en ocasiones el destino de evacuación puede ser una dependencia más del edificio que reúna unas condiciones de ubicación segura.

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



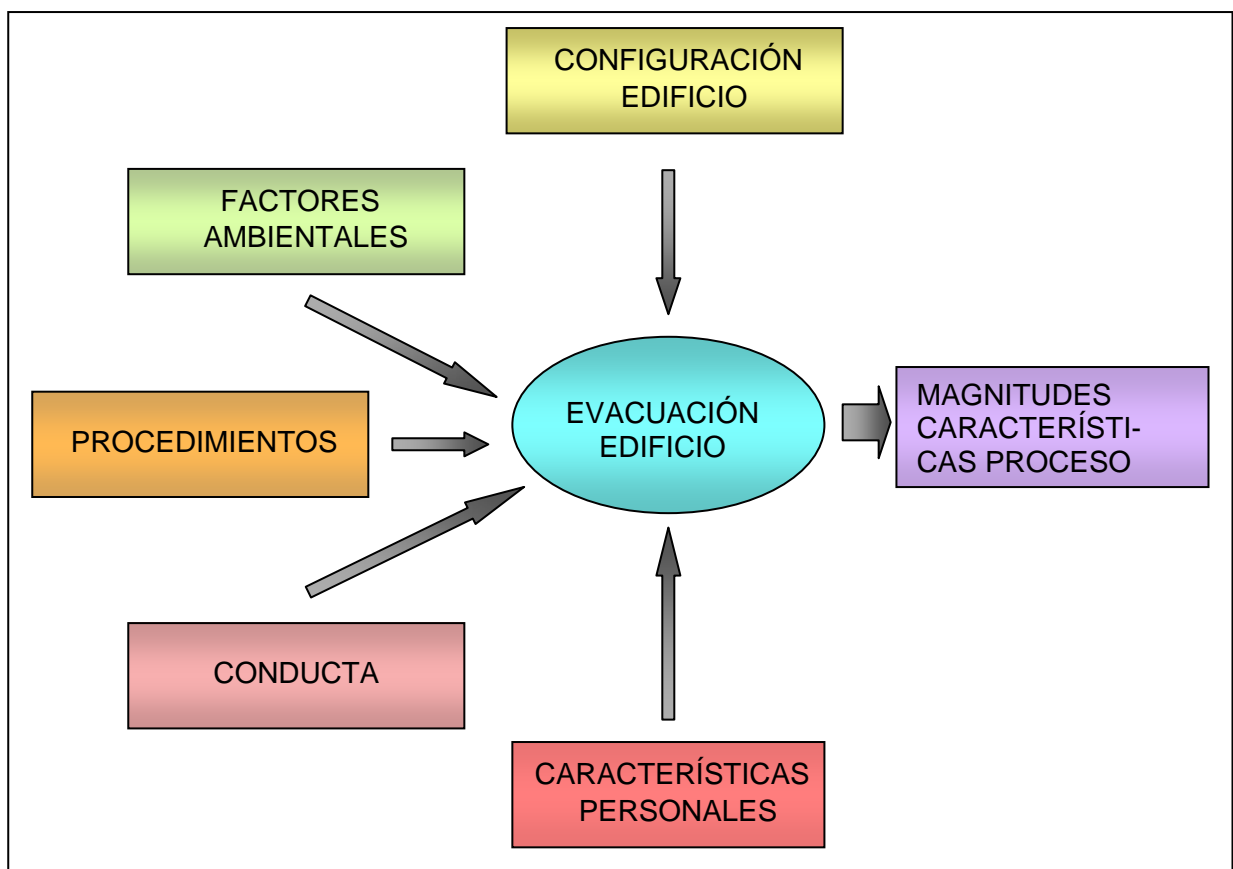
**Figura 3.1** Representación de un sistema de evacuación

### 3.1.2 Análisis de los factores que determinan el sistema de evacuación

Se deben identificar los aspectos que configuran el sistema de evacuación, el punto de partida de este proceso de identificación son los trabajos sobre la evacuación de edificios publicados en las últimas décadas. A partir de estas investigaciones ha sido posible clasificar y agrupar en diferentes conceptos los aspectos que se consideran determinantes del problema. En esta tesis, todos estos aspectos que configuran el sistema de evacuación se definen como **factores significativos** del problema y se agrupan en cinco apartados: Configuración del edificio, factores ambientales, características personales, conducta de los individuos, y procedimientos establecidos e implantados, todos ello se sintetiza en la representación de la figura 3.2. Referencias concretas sobre los aspectos globales que caracterizan el problema se han hallado en una publicación de G. Proulx [150] y en las introducciones que presentan los modelos de simulación de E. Galea, concretados en un trabajo de S. Gwyne [61].

El primer factor determinante del proceso de evacuación, **la configuración del edificio**, define el entorno en el cual se produce la emergencia. Se trata del conjunto de características arquitectónicas del edificio que determinan las condiciones de evacuación y las características del punto de reunión. Con el nombre de **factores ambientales** se indican un conjunto de efectos físicos y químicos que se desencadenan al producirse cualquier evento capaz de poner en marcha la evacuación del edificio. No existen fenómenos de estas características en una amenaza de bomba, sin embargo en caso de un incendio se desarrollan una serie de fenómenos físico-químicos que pueden afectar a las personas

provocando la expansión de humos y gases tóxicos, la transmisión del calor o la existencia de efectos radiantes. Como tercer factor significativo se consideran **las características personales** de los ocupantes, básicamente se distingue su capacidad física e intelectual. De igual forma, resulta esencial conocer la **conducta** individual y colectiva de los ocupantes al conocer una eventual situación de peligro mediante una señal de alarma, con el fin de pronosticar un desplazamiento inmediato, considerar demoras en el inicio de la evacuación o bien el mecanismo de decisión que conduce a utilizar una determinada salida. Finalmente como **procedimientos** se contempla la incidencia en el proceso de la evacuación del edificio de aspectos organizativos, como la existencia de procedimientos establecidos y conocidos por los ocupantes que deben dar lugar a actuaciones planificadas tratando de corregir la improvisación que producen estas situaciones.



**Figura 3.2** Factores que determinan el sistema evacuación

### 3.2 ANÁLISIS DE LA CONFIGURACIÓN DEL EDIFICIO

Las características arquitectónicas y las condiciones de utilización o explotación tienen una importancia decisiva en el proceso de evacuación de los edificios, ambos aspectos se hallan regulados por normativas como la “Norma Básica de la Edificación- Condiciones de Protección Contra Incendios en los Edificios (NBE-CPI-96)” y las reglamentaciones específicas que regulan las actividades que se desarrollan en los mismos por ejemplo el “Reglamento de Policía y Espectáculos Públicos” que regula las actividades en edificios de pública concurrencia, la directiva 89/654/CEE cuyo contenido está

traspuesto al estado español mediante el decreto 486/1997 en el cual se establecen las condiciones mínimas de seguridad y salud en los centros de trabajo, de igual forma podrían citarse otras normas y actividades. De este modo es posible afirmar que actualmente la práctica totalidad de actividades que se desarrollan en los edificios se hallan reguladas y existen normas que establecen de forma precisa las condiciones arquitectónicas de los edificios. Una parte del diseño se basa en la correcta aplicación de las normas existentes, los edificios que no reúnen las condiciones legalmente establecidas no se permite su utilización y explotación.

Las características arquitectónicas más relevantes desde la perspectiva del problema de su evacuación son, el número de plantas que dan lugar a la **altura de evacuación**, la superficie de cada planta, la distribución geométrica de la planta, la ubicación de las salidas, las características de los elementos de paso, las dimensiones de los pasillos, las dimensiones y la configuración de las escaleras, la existencia y características de medios mecánicos para el desplazamiento de los ocupantes como ascensores y escaleras mecánicas, la existencia y características de los sistemas de señalización, las condiciones de iluminación y alumbrado, la compartimentación y resistencia al fuego y por último, las características de los sistemas de ventilación. La ubicación **de las salidas** es un aspecto fundamental del problema, las normas establecen la situación de las mismas básicamente para garantizar recorridos mínimos, circulación independiente, la posible utilización simultánea o bien alternativa en situaciones de emergencia. De la misma forma se hallan completamente definidas las características de los elementos de paso, como las características y los sistemas de apertura de puertas en función de las peculiaridades del recinto. Las principales características de los pasillos como elementos del sistema de evacuación son, la anchura mínima de paso, su longitud y su condición para mantener la capacidad de circulación en caso de un siniestro manifestado por la resistencia al fuego, así como los sistemas de ventilación de que disponga. Cuando se reúnen unas determinadas condiciones se lo califica de **pasillo protegido**. Actualmente se considera que tiene poca incidencia en la circulación las características del piso, sin embargo, sí que tiene efecto sobre la capacidad de circulación la rugosidad de las paredes, los estudios de J. Pauls [116] determinan que se produce una significativa reducción del **ancho efectivo** cuando las paredes son rugosas.

En lo que a escaleras hace referencia, cabe citar que existen de varios tipos, de tramos rectos, circulares y de caracol. Las más habituales son las de tramos rectos, por su parte, las circulares deben cumplir determinadas condiciones para poder ser aceptadas como escaleras de evacuación. Básicamente las escaleras se caracterizan por sus condiciones geométricas, dimensiones de la huella, de la contrahuella y del bocel, la existencia de resguardos y por último, la configuración de la misma en tramos de descenso y mesetas. De la misma forma que los pasillos, las escaleras como elemento de evacuación deben garantizar una determinada resistencia al fuego, así como una capacidad de aislamiento y deben disponer de sistemas de evacuación de humos, si reúnen favorablemente estas condiciones pueden tener la calificación de **escalera protegida**. En la mayoría de edificios existen **medios mecánicos de desplazamiento**, ascensores, escaleras móviles y rampas mecánicas. Normalmente se recomienda no utilizar los ascensores en situaciones de emergencia, básicamente por la posibilidad de fallar el sistema de suministro de energía y quedar personas atrapadas en los mismos, además, los huecos destinados a su



desplazamiento pueden constituir conductos de circulación de humos, la circulación del ascensor actúa como elemento de bombeo. Sin embargo más allá de la aparente evidencia de estas posibilidades, existen estudios rigurosos que puntualizan posibles condiciones de utilización de los ascensores en situaciones de emergencia, se trata de los trabajos de J. Klote y G. T. Tamura [88]. En general los medios mecánicos constituyen un sistema eficaz de desplazamiento de las personas en los edificios, sin embargo en esta tesis no se contempla su modelización.

#### Señalización de salidas habituales



#### Señalización de salidas de emergencia



No utilizar en emergencia

**Figura 3.3** Muestra de señalización instalada en los edificios

La **señalización** instalada en las paredes y la directamente situada en las salidas sirve para indicar recorridos hacia los destinos de evacuación, la señalización acústica y los sistemas de señalización ópticos indican a los ocupantes de los edificios la existencia de una situación de emergencia. En la señalización instalada en los edificios se distinguen los paneles informativos y las señalizaciones propiamente dichas que conducen a salidas habituales, las que indican salidas de emergencia, las salidas que no deben utilizarse, así como, indicaciones generales de operatividad. En la figura 3.3 se muestran algunos símbolos correspondientes a las Normas UNE 23-033-81 “Seguridad contra incendios. Parte 1: Señalización”, UNE 23-034-88 “Seguridad contra incendios. Señalización de seguridad. Vías de evacuación” y UNE 23-035-95 “Seguridad contra incendios. Señalización fotoluminiscente. Parte 1: medida y calificación”. A su vez, las condiciones de

iluminación y en general los sistemas de alumbrado instalados deben posibilitar el desplazamiento de los ocupantes de los edificios por las vías de evacuación en cualquier circunstancia, para esta función están reglamentariamente establecidos los sistemas de alumbrado de emergencia según la norma UNE 23-035. Finalmente dentro de las **condiciones de utilización y explotación** se contempla la actividad desplegada en el edificio, la existencia de determinados productos o materiales, las características de los procesos que se desarrollan y los servicios emplazados. Todo ello configura una situación de riesgo, en función de la cual, se habrán establecido ciertas características del edificio.

### 3.3 ANÁLISIS DE LOS FACTORES AMBIENTALES

Como factores ambientales se consideran cualquier tipo de efecto físico o químico que potencialmente sea capaz de afectar el proceso de una evacuación de emergencia en un edificio. Los factores ambientales en gran medida dependen de las condiciones de utilización y explotación del edificio, los fenómenos que se producen influyen directamente en la capacidad de los ocupantes de encontrar las salidas y alteran las magnitudes de locomoción de los individuos.

#### 3.3.1 Efecto del humo, de los gases narcóticos y de los irritantes

El humo consiste en la existencia de una serie de partículas visibles dispersas en el aire producidas por un incendio que causa una dificultad de visión y afecta física y psicológicamente los ocupantes. La obscuración ocasionada por el humo depende de la concentración de partículas en el ambiente, normalmente después de la percepción de la presencia de humo existe un proceso de aclimatación hasta el instante en que se produce la reacción; en general, la velocidad de reacción será función de la gravedad del incidente percibida por las condiciones de obscuración que produce. Durante el proceso de evacuación de un edificio, el humo puede afectar en la respuesta de los ocupantes de forma diferente, en principio como efecto positivo **advierde de la existencia de un incendio** y provoca su respuesta, a su vez, afecta negativamente cuando los ocupantes deciden abandonar el recinto, dado que el nivel de humo en el ambiente **dificulta encontrar las salidas**, al tiempo que **reduce las velocidades de desplazamiento**, pudiendo incluso bloquear alguna vía de evacuación. Existen numerosos estudios del efecto del humo en la conducta de los ocupantes de los edificios, en uno de ellos Wood [213] a partir del análisis de 952 incendios identificó varios factores que motivaban el movimiento a través del humo, llegando a la conclusión que en el 60 % de los casos los ocupantes decidían desplazarse a través del humo, de forma prácticamente idéntica J. L. Bryan [8] analizando 335 incendios en edificios residenciales concluyó que en el 62,7 % de los casos también decidían desplazarse a través del humo. Proulx y Fahy [28] en el estudio del incendio del World Trade Center de Nueva York ocurrido el año 93 también concluyen que el 84 % de los ocupantes intentó desplazarse a través del humo.

Una vez se ha determinado que un porcentaje elevado de ocupantes probablemente de-

cida desplazarse a través del humo conviene analizar la forma en que el humo afecta la locomoción de las personas en los edificios, en principio depende de las **características** del humo y de la **familiaridad** que tengan los ocupantes con el recinto, pero además existen otros factores fisiológicos y psicológicos destacados que estudiaron Jin y Yamada [76], para ello estos autores efectuaron una serie de experiencias encaminadas a estudiar los efectos del humo de diferentes características en las personas. Diferenciaron el efecto del humo con propiedades irritantes y no irritantes, estudiaron el comportamiento de los individuos en un pasillo de 20 metros de longitud en el cual se visualizaba una señal de salida, estudiaron la relación entre las velocidades de circulación y las condiciones de visibilidad, y verificaron que los efectos psicológicos del humo eran distintos en los hombres y en las mujeres, de forma que los hombres tienden a tener un comportamiento más emocional, mientras que las mujeres tienden a controlar mejor el efecto psicológico y actúan de forma más racional. Sería interesante conocer de forma precisa y fiable la variación en las magnitudes de locomoción en función del tipo de humo y de su concentración.

Una vez se han citado ciertos aspectos genéricos del efecto del humo, debe contemplarse la incidencia de los gases narcóticos e irritantes, normalmente procedentes de un incendio. Los **gases narcóticos** pueden imposibilitar la circulación, y en casos extremos pueden producir la muerte. Dichos gases pueden afectar el sistema nervioso central provocando la inconsciencia y la imposibilidad de escapar. Los efectos fisiológicos de los gases narcóticos pueden analizarse a partir de la concentración en el ambiente y el tiempo de exposición debiéndose evaluar a partir del concepto de “dosis inhalada”. Estos modelos determinan el efecto que produce la dosis recibida determinando cuando se produce la incapacitación o la muerte. De forma análoga los **gases irritantes** afectan a los individuos causando una irritación sensorial, que puede producir dificultades respiratorias resultando desplazamientos más lentos en exposiciones a dosis bajas, pero puede tener resultados fatales en exposiciones a dosis más elevadas. El método de análisis se resume en identificar los materiales objeto de la posible combustión, determinar los productos generados por la misma y evaluar las dosis que pueden afectar a los ocupantes y sus consecuencias.

### 3.3.2 Efecto del calor y de los fenómenos radiantes

El estudio de la influencia de los fenómenos físicos en el proceso de evacuación resulta más complejo de analizar que los fenómenos químicos. Cuando se produce un incendio, en muchos casos, un efecto inmediato es la presencia en el ambiente de productos derivados de dicha combustión, al percibirse normalmente se desencadena el proceso de evacuación. Sin embargo en los edificios pueden existir productos de elevada potencia calorífica y combustión rápida, por ejemplo combustibles líquidos o gases, entonces antes de apreciarse la existencia de humos, el edificio se ve afectado por el calor y la evacuación condicionada por el mismo. El calor se transmite por conducción, convección y radiación, resultando difícil evaluar la cantidad de calor que puede recibir cada individuo. Una manifestación del nivel de calor que afecta una dependencia es la tempe-

ratura y en función de la misma cabría pronosticar los cambios en las magnitudes de locomoción, pero no se conocen estudios que establezcan dicha relación.

Las consecuencias de la exposición a **temperaturas elevadas** son el denominado “golpe de calor”, las quemaduras en la piel o bien en la tráquea en el sistema respiratorio. Determinados estudios revelan que las personas son capaces de soportar temperaturas realmente elevadas durante cortos espacios de tiempo, circunstancia que puede producirse en una evacuación de emergencia, en este sentido conviene tener presente que resulta más peligroso el aire saturado de humedad que el aire seco. El metabolismo humano en situaciones de aire seco tiene el recurso de la sudoración como mecanismo de adaptación y defensa a las elevadas temperaturas. Debe tenerse presente que en los edificios pueden utilizarse sistemas de extinción que provoquen la saturación de humedad del aire y la evacuación podría tener que desarrollarse en estas condiciones.

Directamente relacionado con el calor y los incendios se encuentran los **fenómenos radiantes**, si los ocupantes de un edificio deben circular en presencia fenómenos radiantes, normalmente a causa de un incendio, estarán sometidos a una fuente de energía externa que además de afectarles físicamente puede influir psicológicamente pudiendo inhabilitar las salidas próximas al foco de la radiación.

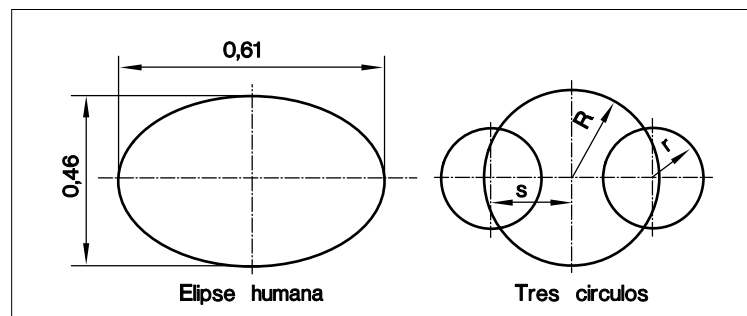
### **3.4 ESTUDIO DE LAS CARACTERÍSTICAS PERSONALES DE LOS OCUPANTES**

Mediante el concepto de características personales de los individuos se contemplan ciertas condiciones físicas y psíquicas que reúnen la mayoría de personas. Pero existen personas cuya capacidad de locomoción, auditiva o visual se halla disminuida y les impide desenvolverse normalmente en una evacuación de emergencia. No se considera que tenga importancia significativa si esta disminución de alguna facultad es temporal o permanente, aunque normalmente se admite que las personas con pérdida permanente de alguna capacidad han desarrollado habilidades substitutorias, por ejemplo personas con discapacidades visuales han realizado un proceso de adaptación a dicha situación. Merecen una consideración especial las personas cuya capacidad intelectual no les permite interpretar las indicaciones o seguir una determinada pauta de comportamiento en una situación de emergencia, en estos casos se precisa la colaboración directa de otros ocupantes para que puedan abandonar el edificio.

#### **3.4.1 Dimensiones de los individuos**

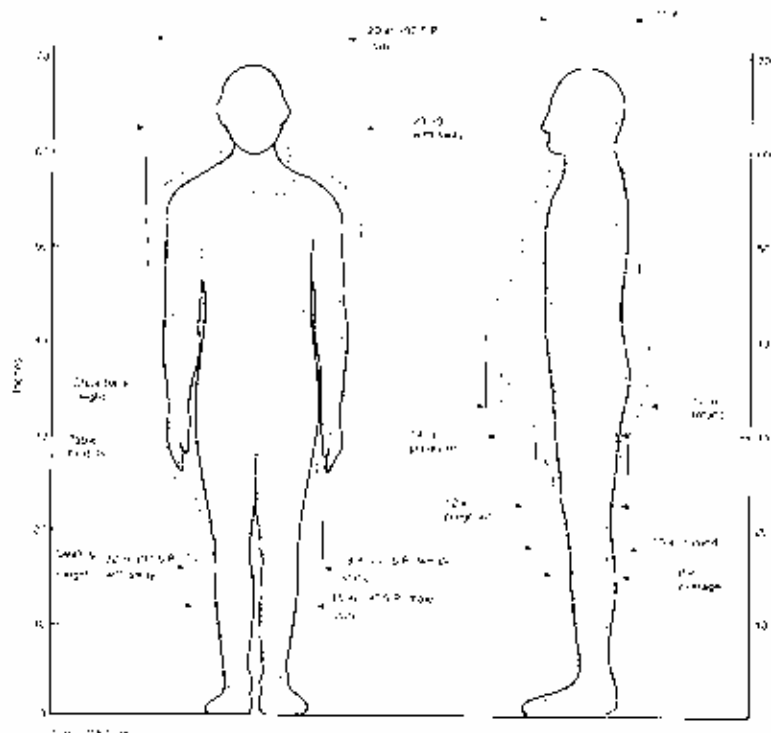
No se han realizado mediciones para determinar el valor medio de las dimensiones de los individuos en nuestro país, se adopta como válida la referencia genérica que asemeja la proyección horizontal de una persona adulta a una **elipse** en la cual el valor medio de los diámetros mayor y el menor son 0.61 y 0.46 metros respectivamente. Otra representación empleada es la propuesta por P. Thompson y E. Marchant [199] que se utiliza en el programa SIMULEX, consistente en representar las personas mediante **tres círculos**

cuyas dimensiones dependen del sexo y la edad de los individuos, dichas magnitudes se hallan en la tabla 2.13. Puede observarse en la figura 3.4 que existe una cierta equivalencia entre ambas representaciones, en esta tesis se utilizan indistintamente.



**Figura 3.4** Representación la proyección de figura humana

Valores más precisos de las medidas antropométricas de las personas se hallan recogidas en diferentes trabajos, en la figura 3.5 se presenta una reproducción de las dimensiones de la figura humana proporcionada por NFPA en “Life Safety Code”. En la tabla 2.11 se muestran los valores de las dimensiones de las personas en función de su edad y finalmente en la tabla 2.2 las magnitudes de la superficie ocupada por los individuos según la vestimenta, con niños en brazos, efectos de viaje y equipaje.



**Figura 3.5** Medidas antropométricas de personas adultas reproducida de NFPA 101

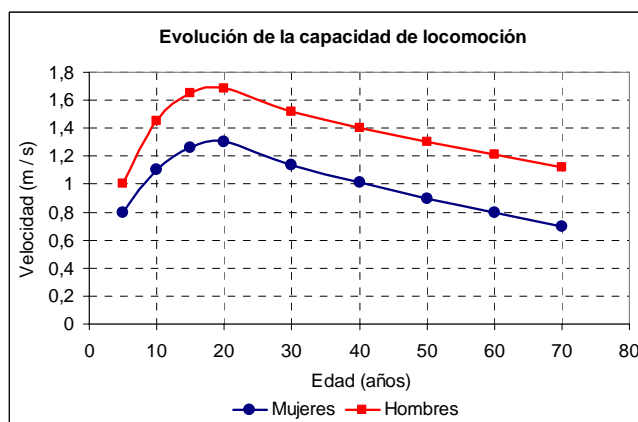
Para analizar colectivamente la ocupación de los recintos por las personas, en esta tesis se adopta como referencia las tablas proporcionadas por J. J. Fruins [45] y reproducidas en la tabla 2.5 y en el anexo 1. Este mismo autor afirma que alrededor de cada persona se establece un denominado **espacio vital** definido por un círculo de aproximadamente

107 centímetros, sobre este aspecto se ha observado que existen **aspectos socio culturales** significativos. Así por ejemplo, el comportamiento es diferente en personas adultas que guardan formalmente una separación entre ellas y que la que se produce en jóvenes en actividades recreativas. Entonces, la forma de operar que se propone consiste en pronosticar el **nivel de servicio** según las tablas de J. J. Fruins, y pronosticar modelos la **conducta** de los ocupantes y a partir de los mismos será posible estimar ocupaciones y capacidades.

### 3.4.2 Magnitudes de locomoción

En los últimos 40 años se han realizado numerosos estudios sobre el movimiento de las personas en diferentes condiciones, se considera que actualmente las magnitudes que definen la capacidad de locomoción de los individuos se hallan debidamente documentadas, sin embargo puede existir la duda sobre si la población objeto de estudio cumple razonablemente dichos estándares.

Un primera aproximación de las magnitudes de locomoción puede consistir en estimar la velocidad de circulación de los individuos en función de su edad, en la publicación de J. Ando [2] cuyos resultados se resumen en la figura 3.6, se muestra la evolución de la capacidad de locomoción tanto de hombres como de mujeres en función de la edad, la velocidad es máxima entorno a los 20 años y luego desciende paulatinamente.



**Figura 3.6** Evolución de la capacidad de locomoción según la edad de las personas

Valores más rigurosos de las magnitudes de locomoción de las personas los proporcionan los modelos que relacionan velocidades y flujos con densidades de ocupación, se trata de modelos basados en la formulación de K. Togawa. Es un hecho absolutamente aceptado y contrastado que la **velocidad de circulación** es máxima cuando no existe interferencia en el movimiento de las personas, disminuye linealmente con la **densidad de ocupación** y llega a anularse cuando se alcanzan valores de 3,5 personas por metro cuadrado, de la misma forma el valor de los flujos y la densidad de circulación se relacionan según una función cuadrática, aumentan cuando lo hace la densidad de ocupación hasta alcanzar un valor máximo en las proximidades de la densidad de ocupación de 2 personas por metro cuadrado y decrece llegando a anularse al alcanzar valores de

3,5 personas por metro cuadrado, puede observarse claramente en las figuras 2.17 y 2.18 del capítulo anterior. De forma analítica se trata de expresar que las velocidades de circulación son función de la densidad de ocupación

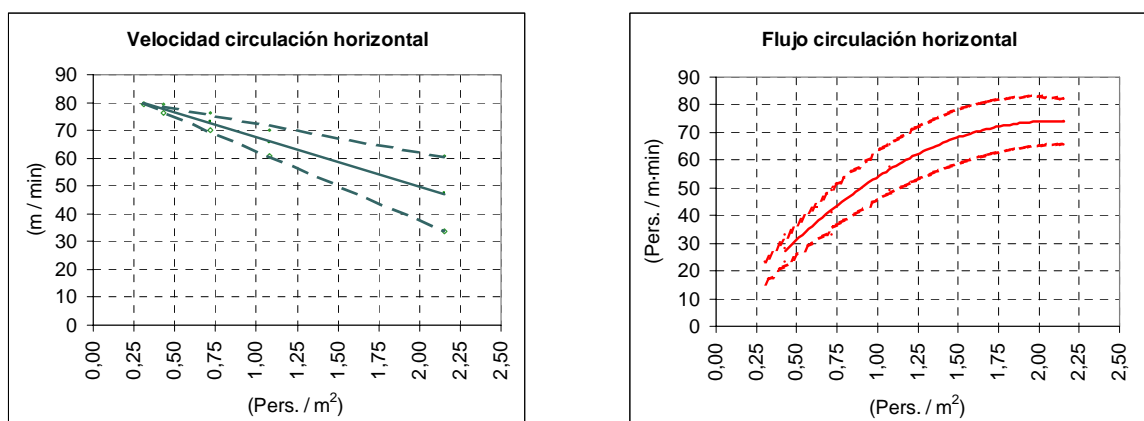
$$v(d) \quad (3.1)$$

estableciendo la relación instantánea según la cual el flujo es el producto de la velocidad por la densidad de ocupación, necesariamente éste también es función de la densidad

$$f(d) = d [ v(d) ] \quad (3.2)$$

Para determinar de una forma simple las magnitudes de locomoción a partir de la densidad, pueden utilizarse las tablas de J. J. Fruins, reproducidas en la tabla 2.6 y en el anexo 1. Guardan una cierta coincidencia con los modelos de Pauls y además se ha observado que efectuando la regresión de los valores de las mismas en la circulación horizontal, se obtiene el valor que proporcionan las ecuaciones de Nelson y McLennan. Ambas formulaciones son simples y ampliamente contrastadas.

En esta tesis como **modelo básico de trabajo** se utiliza el modelo de locomoción de J. J. Fruins, tal como se ha indicado para la circulación horizontal coincide con el de Nelson y McLennan. Las velocidades de circulación y los flujos en función de la densidad se representan en la figura 3.7, puede observarse que para cada valor de la densidad se presentan tres valores: un valor mínimo, un valor máximo y un valor medio, existiendo una mayor dispersión al aumentar la densidad, será preciso considerar de forma adecuada los valores a cada situación. En el capítulo 6, al analizar la validación del modelo se establece una posible forma de operar para utilizar valores debidamente ajustados.

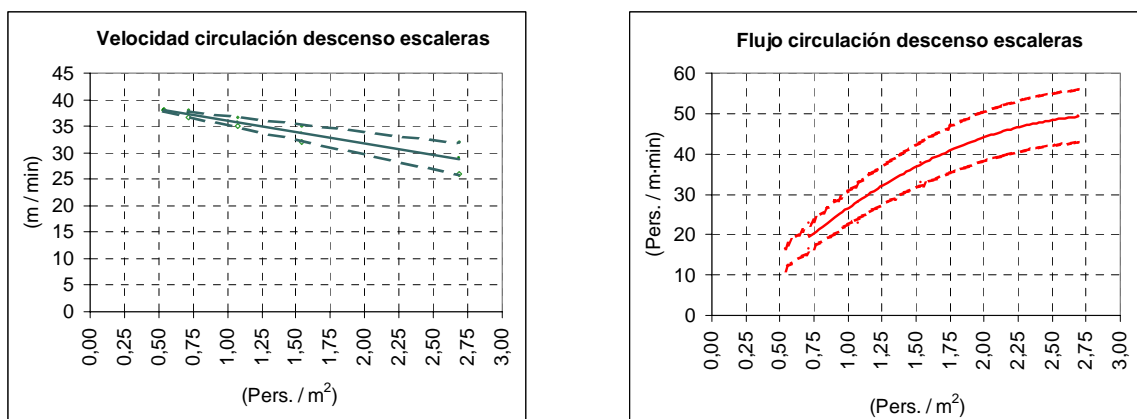


**Figura 3.7** Modelo de Fruins para la circulación horizontal

Para la circulación en escaleras existen más variables implicadas que en el desplazamiento horizontal. Además de las dimensiones físicas de las escaleras tienen un efecto determinante en la velocidad de circulación la **dirección del movimiento**, movimiento ascendente o descendente, la existencia y la disposición de resguardos. De la misma forma que en el apartado anterior en la figura 3.8 se presentan las gráficas correspondientes de velocidades y flujos obtenidas a partir de las tablas proporcionadas por J. J.

Fruins, reproducidas en la tabla 2.7 y en el anexo 1. Debe hacerse referencia a la figura 2.18 del capítulo anterior, en la cual Nelson y McLennan proporcionan las magnitudes de locomoción en escaleras en función de diferentes condiciones geométricas. Y finalmente para determinar las magnitudes de locomoción en rampas pueden utilizarse las consideraciones que realiza J. L. Posada, analizadas en el apartado 2.7.1

El movimiento de personas discapacitadas no puede ser considerado simplemente como una ralentización de lo que podría considerarse velocidad de circulación normal. Existen diferentes niveles de discapacidad que afectan el movimiento, las discapacidades físicas, las visuales, las auditivas y las de comportamiento. Para estimar las magnitudes de locomoción de las personas con discapacidades físicas se consideran los valores que proporciona la tabla 2.12, en las cuales se indica el porcentaje de reducción de la velocidad sobre lo que se considera velocidad de circulación normal en función del tipo de ayuda que se utilice. Cuando se presenta otro tipo de discapacidad, puede resultar más difícil evaluar las magnitudes de locomoción y posiblemente no exista otra fórmula que experimentar para estimar dichas magnitudes.



**Figura 3.8** Modelo de Fruins para el desplazamiento en escaleras

Finalmente debe citarse un efecto de comportamiento común, consistente en el hecho que las personas cuando cruzan la salida del edificio **ralentizan su velocidad de circulación**, pudiendo provocar retenciones en el interior del edificio, se han realizado mediciones en las cuales dicha velocidad se reduce hasta un 50% en su magnitud. Es una situación perniciososa que requiere tomar las medidas oportunas para tratar de evitarla.

### 3.5 ESTUDIO DE LA CONDUCTA DE LOS OCUPANTES

En esta sección se analiza la conducta de los ocupantes de los edificios al percibir una señal de alarma y durante el desarrollo de la evacuación. En un principio la respuesta está condicionada por **la actividad** que está desarrollando el individuo: Durmiendo, trabajando, comiendo, comprando, siguiendo una actividad educativa, viendo una película, bailando, etc.. En cualquier caso, debe considerarse que las personas **necesitan tiempo** para la toma de decisiones, ante una señal de alarma es de esperar que no se produzca una reacción inmediata, y esta reacción siempre estará condicionada por otros factores



como el tipo de edificio, los sistemas de alarma y de señalización, la familiaridad de los ocupantes con el edificio y las interacciones que se establezcan entre los ocupantes.

Se afirma que las personas dudan hasta asegurarse de la necesidad de emprender cualquier acción y pueden producirse actuaciones de difícil pronóstico, en este sentido D. Sime [179] describe el posible comportamiento como “grupo”, considera que estas situaciones propician la existencia de influencias entre las personas presentes en el recinto y la personalidad de algunas de ellas puede conducir a determinadas actuaciones colectivas: Esperar, iniciar la evacuación, seleccionar salidas, etc... Mediante investigaciones similares, McLennan [109] probó que las personas **demoran** las actuaciones al percibir una señal de peligro y concretamente en investigaciones realizadas en centros residenciales establece cuatro niveles de actuación. El primer estadio se produce cuando las personas responden creyendo que puede haber un incidente pero que realmente no es cierto, en tales circunstancias la reacción que debe esperarse es que los ocupantes soliciten más información. En el segundo estadio cuando se actúa simplemente creyendo que probablemente haya fuego existirá una mayor motivación pero existen otras actuaciones dispersas difíciles de pronosticar: Aviso a servicios de emergencia, activar sistemas de alarma, etc... y posiblemente no exista la rapidez y motivación que requiere dicha situación. Un tercer estadio se produce cuando los ocupantes responden con la certeza de que hay fuego, ven humo y piensan que el fuego puede ser peligroso, en este caso las actuaciones se dividen entre los que inician la evacuación y los que utilizan medios de extinción, luchan contra el siniestro y ayudan a todo el colectivo. Y finalmente cuando las actuaciones se inician a partir de ver las llamas, entonces la preocupación está en que el grupo mantenga una relativa racionalidad, la actuación más probable consiste en una reacción inmediata a la situación de emergencia emprendiendo la evacuación de forma espontánea.

### 3.5.1 Efecto del sistema de alarma en la conducta de los ocupantes

El efecto del sistema de alarma en la conducta de los ocupantes ha sido estudiado por Ramchandani [157]. El propósito del sistema de alarma es el de indicar a los ocupantes que deben abandonar el recinto o el edificio lo más rápidamente posible, la información que se desprende de la alarma depende del tipo de señal utilizado y la interpretación que efectúen de la misma los ocupantes. La **efectividad** del sistema de alarma es esencial para materializar con éxito una evacuación de emergencia, dicha efectividad no tan solo reduce el tiempo de reacción de los ocupantes sino que además debe ser el punto de partida de la cadena de actuaciones previstas para asegurar y facilitar la evacuación. Las principales características del sistema de alarma son la **claridad** y la **credibilidad**.

La claridad de un sistema de alarma se refiere a la información que el sistema transmite a los ocupantes, si es capaz de comunicar claramente que ha ocurrido un incidente y que es necesaria la evacuación del edificio. La utilización de sistemas de megafonía puede resultar más útil que una simple señal de alarma acústica o bien óptica. Sin embargo, la dificultad de la utilización de los sistemas de megafonía reside en la extraordinaria

complicación de transmitir los mensajes adecuados. A la claridad de la propia señal de alarma debe añadirse la **correcta interpretación**. Fácilmente puede ocurrir en los sistemas de alarmas que su localización y potencia sonora no sean las más adecuadas, se debe garantizar que todos los ocupantes del edificio van a oír la señal de alarma y que efectuarán una interpretación correcta de la misma, que reaccionarán de forma inmediata, no subestimando ni ignorando el mensaje. Existen estudios sobre las características más apropiadas de este sistema, de todos ellos destaca el trabajo de D. Bruck [7] analizado en el apartado 2.7.6.

La credibilidad del sistema de alarma básicamente depende de la frecuencia con que se hayan producido falsas alarmas, la frecuencia de los fallos afecta significativamente la forma de responder de los ocupantes a una señal de alarma, en un recinto en el que a menudo se producen falsas alarmas el sistema **pierde su credibilidad** y una señal de alarma tiene muchas posibilidades de ser desestimada. Finalmente la efectividad del sistema también puede decirse que está relacionada con la **formación y la información** que han recibido los ocupantes.

### 3.5.2 Efecto del sistema de señalización

La importancia de los sistemas de señalización está en **reducir el retraso** que puede producir el hecho que los ocupantes deban buscar la salida, y en general la vía de evacuación que les conduzca a un área segura. Este proceso es especialmente importante en edificios que dispongan de una configuración irregular y los ocupantes no estén absolutamente familiarizados con el mismo.

Cuanto mayor sea el número de ocupantes de un determinado recinto involucrados en una evacuación de emergencia, se dice que resulta menos determinante la señalización, es más probable que alguien conozca la ruta correcta y el grupo se dirija a dicha salida, sin embargo las confusiones y los errores pueden tener consecuencias mucho más graves. El sistema de señalización debe tener la capacidad de guiar las personas hacia las salidas de forma simple e inmediata. La funcionalidad del sistema de señalización no se limita a las condiciones normales de utilización, además debe mantener su capacidad en condiciones de iluminación deficiente como es el caso de oscuridad natural o bien la producida por la existencia de humo. En edificios de pública concurrencia ocupados por gran número de personas, los sistemas de señalización deben constituir un sistema absolutamente **complementario** a cualquier otra información que pudiera suministrarse a los ocupantes durante el proceso de la evacuación del mismo.

En los modelos analíticos utilizados en el estudio del problema, las características del sistema de señalización se deben contemplar en el modelo como un elemento que produce **demoras al inicio** del proceso o bien en **puntos intermedios** de las vías de evacuación. Es preciso estimar el tiempo que se tarda en seleccionar un recorrido o bien utilizar una salida, en muchos casos es una cuestión difícil de pronosticar y de evaluar.

### 3.5.3 Influencia del tipo de edificio

El tipo de edificio en el cual se produce el incidente es realmente un factor significativo. Sin tener en cuenta las condiciones del edificio, que obviamente son distintas, no es lo mismo que un incidente se produzca en un centro residencial, en un edificio de oficinas, en una fábrica, en un cine, en un centro escolar, en un recinto deportivo o en una discoteca. Se afirma que la situación es distinta fundamentalmente por las actuaciones que se generan y las relaciones que existen o bien se establecen entre los individuos afectados por el incidente. En edificios de viviendas, centros escolares o en edificios industriales existe una determinada estructura social y organizativa. Mientras que, en otros casos como en recintos deportivos o de espectáculos esta estructura organizativa no existe o es muy ambigua, entonces al tratar de estudiar evacuaciones de emergencia deberían pronosticarse estas posibles situaciones para identificar si las actuaciones serán individuales o existirán grupos de actuación.

Para definir este patrón de actuación que confieren las características del edificio, S. Gwine [61] establece dos tipos de organizaciones: **entornos familiares y entornos públicos**. En un entorno familiar debe pensarse en actuaciones de grupo difícilmente controlados por otras jerarquías organizativas y desplazamientos más lentos a causa de esta actuación en grupo, mientras que en un entorno público hay que pensar en individuos supeditados o no a una organización formal, en estos casos cuando existen procedimientos de evacuación escritos e implantados son éstos los que determinan una estructura formal para la actuación en situaciones de emergencia.

También se ha observado en simulacros de evacuación que la posición de una persona en la estructura social, la edad, y posiblemente la relevancia personal, influirán en determinadas actuaciones individuales, de tal forma que no debe sorprender si se mantiene un determinado rol en el proceso de la evacuación del edificio. Debido a esta formalidad en la evacuación de determinado tipo de edificios, de forma espontánea pueden otorgarse **preferencias de paso** en una confluencia o bien en una retención **aumentar separaciones** entre individuos o actuaciones similares de respeto o bien aversión a la proximidad de determinadas personas.

Otro aspecto destacado es el impacto emocional en un incidente en un entorno doméstico, el aprecio a los bienes propios produce determinadas actitudes: Movimientos de retroceso, intentos de apagar el fuego, rescate de objetos personales, etc... aspectos que necesariamente suponen una **demora en el inicio de la evacuación y obstaculizaciones en la circulación**. Sobre estas actuaciones existe información debidamente contrastada: J. L. Bryan [8] afirma que el 27,9 % de los ocupantes intentaban volver a entrar en el edificio para ayudar a combatir el incidente, retirar objetos personales y obtener información del desarrollo del incidente y P. G. Wood [213] afirma que las reentradas se producían en el 43 % de los casos.

### 3.5.4 Efecto de la familiaridad con el recinto y el sexo de los ocupantes en la

### previsión de la conducta

La familiaridad con el recinto determina **actuaciones tipo** que deben comprenderse al formular procedimientos de evacuación. Las personas tienden a utilizar rutas conocidas por su propia experiencia, es muy poco probable que los ocupantes utilicen rutas desconocidas en una evacuación de emergencia. Este hecho se halla descrito en un estudio sobre el incendio del aeropuerto de Dusseldorf, esta actuación tuvo una influencia decisiva en el colapso de las salidas, mayoritariamente los ocupantes trataban de utilizar las puertas por las que habían entrado y no utilizaban salidas de emergencia o pasos alternativos. Reciente en Suecia, H. Frantzich [43] ha realizado experimentos en los cuales ha investigado la incidencia de abrir las puertas que dan acceso a las salidas de emergencia y concluye que cuando los ocupantes, en una evacuación de emergencia, hallan una puerta abierta para abandonar un recinto el porcentaje de utilización aumenta significativamente, en este estudio se propone la apertura de las puertas de las salidas de emergencia para propiciar su utilización en situaciones de crisis.

Otra consideración sobre la incidencia de la familiaridad de los ocupantes con el edificio, consiste en que en determinados edificios dicha familiaridad puede ser muy dispar, por ejemplo en centros comerciales los trabajadores del mismo tienen un conocimiento del edificio que puede ayudar a los clientes a seleccionar las salidas de forma más apropiada en una evacuación de emergencia, ello tan solo es posible si se establece la adecuada relación entre los ocupantes ocasionales y el personal del propio edificio.

Finalmente se debe considerar la influencia del **sexo de los ocupantes** conjuntamente con otros factores. En simulacros de evacuación en centros escolares se ha observado que las mujeres adoptan una actitud más disciplinada, sin embargo existe una mayor tendencia a formar grupos que los hombres y con ello se ralentizan los desplazamientos. Existen estudios que avalan la naturaleza de las acciones “tipo” que emprenden uno y otro sexo tras percibir una señal de alarma, estos estudios afirman que el porcentaje de hombres que emprenden actuaciones de acción es mayor, mientras que las actuaciones tomadas por las mujeres se orientan más a la seguridad y a la cooperación.

#### 3.5.5 Comportamiento interactivo de los ocupantes

En la mayoría de casos un individuo no está aislado, interacciona con los otros miembros del grupo. La interacción entre los ocupantes puede ser **física**, así en los estudios de J. J. Fruins [45] se determina el espacio vital necesario para que los ocupantes manobren confortablemente en una muchedumbre o aglomeración. La existencia de este espacio es fundamental para que no existan conflictos ni se produzcan variaciones en la velocidad y en la dirección de la circulación. Esta interacción también puede ser social, de forma que se formen grupos que a su vez pueden propiciar actuaciones inapropiadas, G. Proulx [141] identificó este efecto en el estudio de la evacuación de edificios de apartamentos, resultando que el 62% de la población que había formado grupos en simulacros de la evacuación, resulta razonable este hecho al considerar apartamentos en

los cuales hay una estructura familiar que lógicamente se mantiene durante la evacuación tal como se ha analizado en apartados anteriores. Dentro de los trabajos de esta tesis en simulacros de evacuación se ha observado, fundamentalmente en la evacuación de edificios industriales y de centros escolares, la formación de grupos, en muchos casos rompiendo el propio grupo natural de actividad y formándose grupos por otras razones, posiblemente de amistad.

### **3.6 EXISTENCIA DE PROCEDIMIENTOS FORMALES**

La existencia de procedimientos formales debe mejorar las condiciones de evacuación de cualquier edificio, de entrada deben servir para reducir los tiempos de reacción y demora, es de esperar que los ocupantes identifiquen la señal de alarma y reaccionen de forma inmediata a la misma. El manual de evacuación es un documento en el cual, a partir de las condiciones del edificio y las características de los ocupantes, se establecen estrategias de evacuación en función de la ocupación y de la contingencia que se haya producido. Puede constituir un documento independiente, sin embargo en muchos casos se integra en un documento más general denominado “Plan de emergencia” o “Manual de autoprotección”, prácticamente en todos los países avanzados existen directrices y normativas sobre su contenido, en España existe la orden de 29 de Noviembre de 1944 por la que se aprueba el “Manual de Autoprotección para el desarrollo del Plan de Emergencia contra Incendios y de Evacuación en Locales y Edificios” y la orden del Ministerio de Educación y Ciencia de 13 de Noviembre de 1984 “Evacuación de Centros Docentes de Educación General Básica, Bachillerato y Formación Profesional”, en otros casos existen documentos que sirven de guía, están editados por entidades aseguradoras como ITSEMAP y CEPREVEN. En el ámbito internacional también existen diversas guías de este tipo editadas por FACTORY MUTUAL, NATIONAL SAFETY COUNCIL entre otras.

En el plan de evacuación además de establecer las estrategias apropiadas para la evacuación del edificio, se define una estructura formal que debe coordinar una evacuación de emergencia y garantizar unas actuaciones básicas: Organización de las salidas, facilitar la utilización de salidas de emergencia, verificar que han abandonado el edificio la totalidad de los ocupantes, emprender acciones de rescate y evitar que se produzcan retornos a la zona siniestrada, realizar recuentos, etc.. De poco serviría un plan de evacuación si no fuera conocido por todos los ocupantes del edificio y no estuvieran especialmente formadas las personas que han de participar de más forma activa, para ello debe programarse la adecuada divulgación del plan y la formación de las personas implicadas. En edificios con ocupación transeúnte, no es posible este proceso de formación y de divulgación, en estos casos resulta esencial la información que se transmite a los ocupantes que acceden a los mismos, así se realiza en determinados centros públicos, centros hoteleros y en otros centros, donde es frecuente la entrega personalizada de folletos o la existencia de paneles informativos con indicaciones básicas para actuar correctamente en situaciones de emergencia.

### 3.7 PRINCIPIOS PARA DETERMINAR LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA DE LA EVACUACIÓN DE EDIFICIOS

Una vez se han identificado los factores significativos del sistema, se trata de proponer un modelo para la solución del problema. La evacuación de un edificio se contempla como un proceso, los ocupantes del edificio emprenden una secuencia de actividades desde el instante en que se produce la señal de alarma hasta que se hallan situados en una posición segura: Perciben una señal de alarma, abren puertas, seleccionan recorridos y circulan hasta los destinos respectivos. En este intervalo de tiempo en el edificio pueden desarrollarse una serie de acontecimientos físico-químicos o derivados de la propia actuación de los individuos que pueden interferir en la actuación de los ocupantes. Esta tesis se centra en los modelos matemáticos para el estudio de la evacuación de edificios, el proceso de evacuación objeto de estudio, puede verse afectado por estos otros procesos que no son objeto de estudio. Por ejemplo, en la actualidad existen modelos matemáticos para pronosticar el desarrollo de un incendio, o la expansión de un gas tóxico, interesa el análisis del efecto del incidente en los elementos del sistema de evacuación pero no la modelización en sí de estos fenómenos. De esta forma los peligros potenciales en el propio edificio o en un entorno inmediato determinarán la rapidez con que deba materializarse una evacuación de emergencia dando lugar a un aspecto importante del problema el **tiempo disponible**, considerado como el tiempo de que disponen los ocupantes desde el instante en que se produce el siniestro hasta situarse en una posición segura en el destino de evacuación.

La solución del problema se plantea en un ámbito determinista y empieza en el estudio de los **aspectos elementales**, estos aspectos se desarrollan en este capítulo, luego se aplican al estudio de la **evacuación del recinto** y posteriormente se utilizan para el estudio de la **evacuación del edificio**. Estas dos etapas de estudio se justifican por el hecho que en muchos casos, la primera fase de una situación de emergencia exige la evacuación del recinto en que se produce el siniestro, y el estudio del problema de la evacuación de un recinto en principio, parece una operación más simple que puede ayudar a solucionar el problema planteado para todo el edificio.

Las dependencias de un edificio se clasifican en dependencias origen de evacuación, de paso, destino de evacuación e irrelevantes. Constituyen un **origen de evacuación** las dependencias inicialmente ocupadas cuando se produce la señal de alarma, aquellas en las cuales se encuentran los ocupantes del edificio en el momento en que debe iniciarse la evacuación. **Dependencias de paso** son aquellas que utilizan los ocupantes para desplazarse hasta el destino, normalmente se trata de vestíbulos, pasillos, rampas o escaleras. **Destino de evacuación** es el lugar donde se dirigen las personas presentes en el edificio. Finalmente las dependencias **irrelevantes** son aquellas que no tienen ninguna incidencia en la evacuación: Dependencias no ocupadas, que en ningún caso son vías de evacuación y no serán destino de evacuación.

La forma de distribuirse las diferentes dependencias o recintos da lugar a vías de evacuación, confluencias y ramificaciones. Una **vía de evacuación** es un conjunto de recin-

tos de circulación situados de forma sucesiva que permite el desplazamiento de los ocupantes desde la posición que ocupan inicialmente hasta situarse en la salida, las **confluencias** se producen cuando los ocupantes de varios recintos de circulación coinciden en un mismo punto y siguen su desplazamiento a través de una única dependencia, mientras que las **ramificaciones** corresponden a una situación en la cual los ocupantes circulan por una única dependencia de circulación desde la cual es posible acceder a varias dependencias para seguir su recorrido.

### 3.7.1 Análisis de la ocupación y de la capacidad

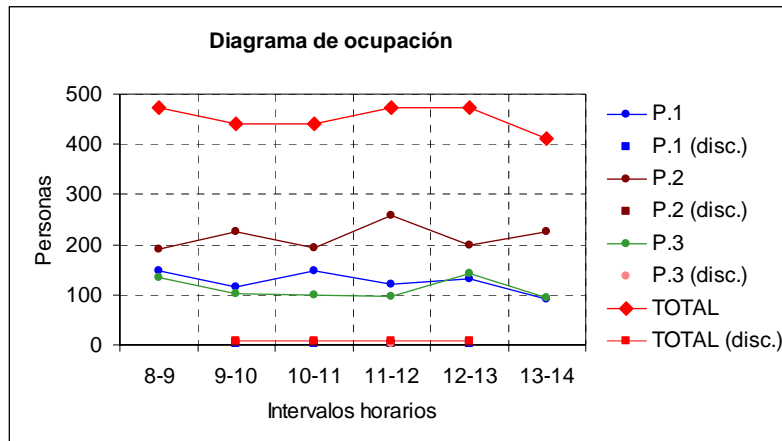
Para estudiar el problema en primer lugar es necesario realizar un análisis de la **ocupación**, normalmente la ocupación de las dependencias origen de evacuación de un edificio no es uniforme, entonces se precisa conocer para cada recinto el número de personas y sus características personales cada instante, mediante  $k_{j,i}$  se indica el número de personas presentes en la dependencia  $j$  durante el intervalo  $i$ , de la misma forma  $k^*_{j,i}$  indica el número de personas que precisan atención especial. Esta información debe servir para identificar las condiciones de ocupación potencialmente más peligrosas.

DEPENDENCIA	Intervalos horarios										Observaciones	
	1	2		i		n						
A <sub>1</sub>												
B <sub>1</sub>												
<b>Total planta 1</b>												
A <sub>2</sub>												
B <sub>2</sub>												
<b>Total planta 2</b>												
A <sub>N</sub>												
B <sub>N</sub>												
<b>Total planta n</b>												
<b>TOTAL EDIFICIO</b>												

**Tabla 3.1** Modelo de tabla para el registro de la ocupación

Una tabla como la 3.1 puede tener una gran utilidad, en situación vertical se sitúan las  $j$  dependencias de que consta el edificio y en horizontal los intervalos horarios  $i$ , en cada una de las casillas se detallan las magnitudes de ocupación  $k_{j,i}$  y  $k^*_{j,i}$  siendo necesario concretar las características de la discapacidad de estas personas. El intervalo  $i$  corresponde a una franja horaria, en general será un valor propio de cada edificio. En un edificio con una ocupación total idéntica, pueden producirse distribuciones que generan problemáticas diferentes. Para analizar los valores de la tabla e identificar las situaciones potencialmente más conflictivas pueden resultar útiles diagramas en los cuales se representa el número de ocupantes de cada planta y el total del edificio en cada uno de los

intervalos de tiempo considerados. En la figura 3.10 se muestra el ejemplo de una gráfica utilizada en el estudio de la ocupación de un edificio escolar de tres plantas, se representa la ocupación de cada planta y la ocupación total del edificio. Los intervalos horarios corresponden a los habituales de un centro escolar. Puede apreciarse la presencia de personas discapacitadas en el intervalo de 9 a 13 horas.



**Figura 3.10** Ejemplo: Diagrama de ocupación de un recinto

Otro elemento fundamental para el análisis del problema es el estudio de las superficies. En general la **superficie** de una dependencia vendrá determinada por los cerramientos que determinan sus límites, tabiques, puertas u otros elementos inmobiliarios, esta magnitud tiene poca relevancia desde el punto de vista del problema de la evacuación, la magnitud realmente significativa es la **superficie útil**, definida por la superficie que queda libre a efectos de ocupación y de circulación de las personas. Es el valor de la superficie total, menos la superficie ocupada por los elementos mobiliarios depositados en la dependencia, en la mayoría de casos está será la magnitud que debe utilizarse como la superficie de un recinto. En otras situaciones resulta que parte de la superficie útil no se utiliza, en estos casos se habla de la **superficie efectiva**, entonces puede decirse que además de las condiciones físicas del recinto se considera este tipo de conducta de los ocupantes.

En las dependencias origen de evacuación, las de circulación y en los destinos de evacuación es necesario determinar su capacidad. La **capacidad de un recinto** es el número máximo de personas que pueden ocupar el mismo. La capacidad de un recinto se puede determinar mediante la expresión (3.3) si se conocen las características físicas de los individuos y es posible estimar la densidad de ocupación máxima  $d$  que se podría producir y la superficie efectiva del mismo  $a_e$ . La magnitud  $c$  corresponde al valor de la capacidad expresado como número de personas.

$$c = a_e d \quad (3.3)$$

Existen situaciones en las cuales no se conoce directamente la ocupación y debe efectuarse un pronóstico de la misma. En este caso la **ocupación de un recinto** es el número



de personas que se pronostica van a ocupar el mismo, para su evaluación además de conocer las dimensiones de los individuos y la superficie del recinto deben considerarse efectos de comportamiento, estimar las separaciones que se van establecer entre las personas determinando así las densidades de ocupación, el proceso de cálculo es el mismo que el seguido para determinar la capacidad.

<b>ANÁLISIS RECINTOS</b>							
Dependencia	Superficie		Ocupación		Capacidad		
	total	útil	inicial	módulo	NS.	módulo	
	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	Pers.	m <sup>2</sup> /Pers.		m <sup>2</sup> / Pers.	Pers.
<b>Origen</b>							
O1	200,00	182,00	27	6,74	A	1,21	151
O2	100,00	74,00	52	1,42	A	1,21	61
O3	12,00	128,00	42	3,05	A	1,21	106
O4	10,00	83,00	20	4,15	A	1,21	69
O5	10,00	85,00	51	1,67	A	1,21	70
O6	10,00	78,00	38	2,05	A	1,21	65
<b>OCUPACIÓN TOTAL</b>			<b>230</b>				
<b>Circulación</b>							
H1	12,00	10,00			E	0,23	43
H2	8,00	7,00			E	0,23	30
H3	12,00	10,00			E	0,23	43
H4	16,00	12,00			E	0,23	52
P1	40,00	30,00			E	0,23	130
P2	60,00	50,00			E	0,23	217
E1	30,00	24,00			E	0,23	104
E2	30,00	24,00			E	0,23	104
E3	30,00	24,00			E	0,23	104
<b>CAPACIDAD TOTAL DE CIRCULACIÓN</b>							<b>827</b>
<b>Destino</b>							
DS1	200,00	140,00			D	0,46	304
DS2	200,00	150,00			D	0,46	326
DS3	200,00	200,00			D	0,46	435
<b>CAPACIDAD TOTAL DESTINO DE EVACUACIÓN</b>							<b>1065</b>

**Figura 3.11** Ejemplo: Aplicación para estimar las magnitudes características de un recinto

Para determinar la ocupación o la capacidad de un recinto, en vez de considerar la densidad de ocupación, es posible utilizar el módulo de ocupación  $m$ , resulta la expresión (3.4). Posiblemente el módulo de ocupación sea una magnitud menos intuitiva que la densidad de ocupación, sin embargo si se opera con magnitudes de densidad pequeñas, por ejemplo pies cuadrados, resulta favorable su utilización, en estos casos las densidades de ocupación son valores inferiores a la unidad y al operar con ellos fácilmente se incurre en errores numéricos y resulta más práctico operar con la magnitud del módulo de ocupación. Si la densidad de ocupación se expresa en personas por metro cuadrado y el módulo en metros cuadrados por persona, tan solo existe cierta ventaja en situaciones en las que se opera con densidades reducidas.

$$c = \frac{a_e}{m} \quad (3.4)$$

En la figura 3.11 se muestra una aplicación muy simple, puede observarse el cálculo de de ocupaciones y de capacidades de un edificio. A partir de las tablas de J. J. Fruins, cuando se conoce la ocupación de un recinto y su superficie se determina el nivel de servicio (A, B, C, D o E), luego considerando las densidades máximas que pueden producirse se estiman las capacidades, mientras que en las dependencias de circulación y en los destinos de evacuación si se conocen las superficies y se pronostica el nivel de servicio que se producirá en cada una de ellas se podrá determinar su capacidad.

### 3.7.2 Dependencias de circulación

Las dependencias de circulación son las que utilizan los ocupantes de los edificios para desplazarse desde las dependencias inicialmente ocupadas hasta los destinos de evacuación. Las personas se desplazan según una determinada **velocidad**, que depende de las características personales de los individuos, de la densidad de ocupación y de la existencia de efectos ambientales adversos, si se considera que la densidad de ocupación es una función del tiempo según un planteamiento transitorio del problema, la velocidad de circulación también lo será, dando lugar a (3.5) que expresa los valores instantáneos de la misma

$$v(t) \quad (3.5)$$

Directamente relacionado con la velocidad y la densidad existe la magnitud del **flujo** que determina capacidades de paso de las vías de circulación: número de personas por unidad de tiempo. La expresión (3.6) determina la relación instantánea que existe entre las tres magnitudes flujo, velocidad y densidad.

$$f(t) = d [ v(t) ] \quad (3.6)$$

Otra forma de ver el problema, consiste en estudiar las magnitudes de circulación directamente en función de la **separación** que se establecen entre las personas, definida como la distancia que existe entre el centro de una persona y la situada inmediatamente delante de ella, si se supone la misma distancia en sentido longitudinal que transversal la expresión (3.7) propuesta por Ando [2] relaciona ambas magnitudes.

$$e = \frac{1}{\sqrt{d}} \quad (3.7)$$

Normalmente las personas al circular por pasillos adoptan aquellas magnitudes que les resultan mas cómodas, ello supone que mantienen el espacio vital en el cual no sienten la interferencia de otras personas y les permite desplazarse sin entorpecimiento en su movimiento, esta densidad coincide aproximadamente con las condiciones de flujo máximo.

La circulación puede realizarse en las dependencias ocupadas a través de los espacios habilitados para la circulación o bien en las dependencias propiamente de circulación: pasillos, vestíbulos y escaleras. En unos casos el movimiento de las personas está perfectamente guiado no existiendo ninguna duda alguna sobre la longitud de los recorri-

dos que van a realizar los ocupantes y las anchuras mínimas de paso. Sin embargo en la circulación en espacios diáfanos puede resultar más difícil evaluar la verdadera longitud de los recorridos que se van a realizar, y normalmente conviene considerar valores superiores que los recorridos mínimos.

Otro aspecto absolutamente contrastado es el concepto de la **anchura efectiva** de las vías de evacuación desarrollado por J. Pauls [120] documentado en el capítulo anterior, según este concepto en la circulación de las personas por los pasillos existe un efecto de comportamiento por el cual las personas dejan una separación de 15 centímetros hasta las paredes o bien de 9 en los pasamanos en las escaleras, no dejan ninguna separación en los pasillos de las filas de los teatros y más de 45 en las paredes de grandes espacios, valores más detallados pueden observarse en la tabla 2.4.

Las magnitudes características de las vías de circulación son la **longitud máxima** de los recorridos  $l$ , las **anchuras mínimas** de paso  $w$ , en las que al considerar el comportamiento de los ocupantes da lugar al concepto de ancho efectivo resultando la magnitud de las **anchuras efectivas**  $w_e$ , se trata de magnitudes que dependen directamente de las características arquitectónicas del edificio.

Operar con los valores instantáneos de las velocidades  $v(t)$  y de los flujos  $f(t)$ , resulta laborioso y normalmente se opera con valores medios. Las aproximaciones que se establecen con valores medios se refieren a intervalos concretos de tiempo. Mediante la expresión (3.8) se determina el **flujo**  $F$  que se registra en una vía de circulación, expresado en función del flujo específico medio  $f$  y del ancho efectivo  $w_e$ , o bien en función de la velocidad media  $v$  y de la densidad de ocupación  $d$ .

$$F = f w_e = v d w_e \quad (3.8)$$

La expresión (3.9) proporciona el **tiempo de recorrido**  $t_1$ , el tiempo empleado en realizar un desplazamiento de longitud  $l$  si la velocidad media de circulación que se considera es  $v$ .

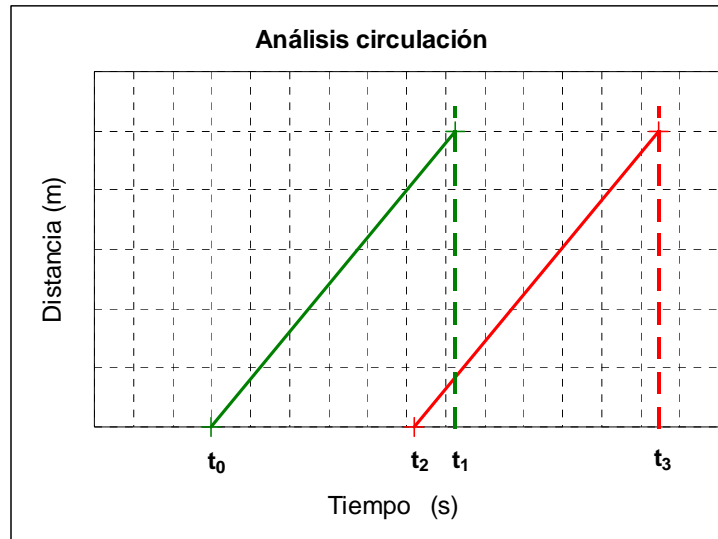
$$t_1 = \frac{l}{v} \quad (3.9)$$

De la misma forma la expresión (3.10) proporciona el **tiempo de paso**  $t_2$ , el tiempo que se necesita para que  $k$  personas puedan cruzar una anchura mínima de paso de  $w$ , en la que se estima que se registra un flujo medio  $F$

$$t_2 = \frac{k}{F} \quad (3.10)$$

Una forma útil de analizar las dependencias de circulación son los denominados gráficos  $t-l$ , es un tipo de gráfico utilizado por Predtechenskii y Milinskii, realizado a partir de las tasas de circulación y de flujo, se ha adaptado para operar con densidades de ocupación y da lugar a una representación gráfica como la de la figura 3.12, en ella en el eje de abscisas se sitúa el tiempo  $t$  y en el eje de ordenadas la longitud  $l$  de una dependencia de circulación, por ejemplo un pasillo. En la representación se observa el instante  $t_0$  en el que se inicia la evacuación, si se desplazan a una velocidad media  $v$  alcanzan el final

de la dependencia en  $t_1$  segundos, valor determinado utilizando (3.9). Si la circulación deben materializarla  $k$  personas,  $t_2$  indica el instante en que han iniciado la evacuación todos los ocupantes, se determina mediante (3.10). Si los últimos ocupantes se desplazan a la misma velocidad que los que han iniciado la evacuación llegan al final de la dependencia de circulación en el instante  $t_3$ .



**Figura 3.12** Análisis gráfico t-l de un recinto de circulación

De esta figura se deduce que el tiempo necesario para que  $k$  personas se desplacen por una dependencia de circulación de longitud  $l$ , si no se produce ninguna demora en el inicio de la evacuación, será igual al tiempo necesario para cruzar la anchura mínima del recorrido más el tiempo que emplea en el desplazamiento el último ocupante. Mientras que si se consideran demoras en el inicio de la evacuación resulta

$$z = t_3 = t_0 + \overline{t_0 t_2} + \overline{t_2 t_3} \quad (3.11)$$

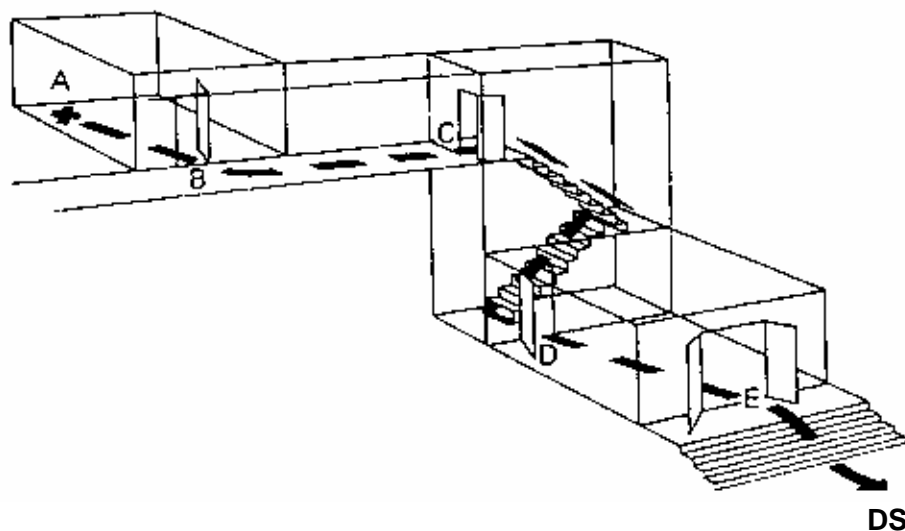
En el gráfico anterior la pendiente de las rectas es la velocidad de desplazamiento de los ocupantes, puede observarse que se ha considerado la velocidad de circulación idéntica para las personas que inician la evacuación en  $t_0$  y las últimas que acceden a la vía de circulación en el instante  $t_2$ , ello da lugar a dos líneas paralelas. En las tablas de Fruins tanto en el desplazamiento en pasillos como en escaleras, para cada posible densidad de ocupación proporcionan los valores de las velocidades de circulación mínimas y máximas, entonces una forma de operar consiste en utilizar estas dos magnitudes, suponiendo que las personas que inician la evacuación realizan el desplazamiento a velocidad máxima y los que lo realizan en último lugar a velocidad mínima, es muy razonable si son posibles adelantamientos, ello genera una representación t-l en la cual las líneas de circulación de los  $k$  ocupantes no son paralelas y en este caso el tiempo  $t_3$  será una magnitud que garantiza la evacuación de la totalidad de los ocupantes. En figura 3.13 se muestra una aplicación en la que puede observarse como se han determinado las capacidades de paso y los tiempos de recorrido en el estudio de la evacuación de un edificio de reducidas dimensiones.

ANÁLISIS CIRCULACIÓN ENTRE RECINTOS								
Recorrido origen / destino	Ancho (m)		Distancia (m)	NS	Flujo (Pers./m·min)	Veloc. (m/min)	Cap. paso (Pers./s)	Tiempo rec. (s)
	mínimo	efectivo						
O2 - H2	2,00	1,50	12,00	C	41,01	73,15	1,37	9,84
H2 - E2	2,00	1,50	12,00	D	57,42	65,53	1,91	10,99
E2 - DS2	2,00	1,50	10,00	D	57,42	65,53	1,91	9,16
O2 - P1	2,00	1,50	15,00	C	41,01	73,15	1,37	12,30
O1 - P1	2,00	1,50	12,00	D	57,42	65,53	1,91	10,99
P1 - H1	2,50	2,00	12,00	C	41,01	73,15	1,71	9,84
O6 - H4	2,50	2,00	12,00	C	41,01	73,15	1,71	9,84
O3 - H4	2,50	2,00	10,00	C	41,01	73,15	1,71	8,20
H4 - H1	2,50	2,00	10,00	C	41,01	73,15	1,71	8,20
H1 - E1	2,50	2,00	10,00	C	41,01	73,15	1,71	8,20
E1 - DS1	2,50	2,00	12,00	C	41,01	73,15	1,71	9,84
O4 - P2	2,50	2,00	15,00	C	41,01	73,15	1,71	12,30
P2 - H4	2,50	2,00	12,00	D	57,42	65,53	2,39	10,99
O5 - P2	2,00	1,50	12,00	C	41,01	73,15	1,37	9,84
P2 - H3	2,00	1,50	10,00	C	41,01	73,15	1,37	8,20
H3 - E3	2,50	2,00	10,00	C	41,01	73,15	1,71	8,20
E3 - DS3	2,00	1,50	10,00	D	57,42	65,53	1,91	9,16
-								
-								

Figura 3.13 Ejemplo: Aplicación para estimar las magnitudes características de la circulación

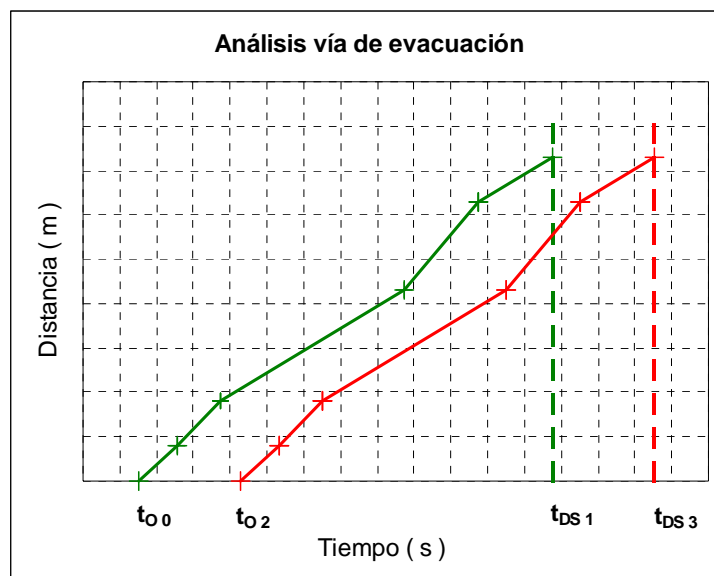
### 3.7.3 Modelado de vías de evacuación

Una **vía de evacuación** consiste en un conjunto de dependencias de circulación sucesivas por las que deben desplazarse los ocupantes, en la figura 3.14 puede observarse dicha estructura. La situación más desfavorable sería que los ocupantes se hallaran lo más alejados posible de la salida. La posición A sería el **origen de evacuación**, AB será el desplazamiento que realizan los ocupantes en la propia dependencia origen de evacuación, BC el recorrido de circulación horizontal en el pasillo, CD el de desplazamiento por la escalera, DE el recorrido horizontal por un vestíbulo de salida y finalmente EDS el recorrido hasta el destino de evacuación que supone la circulación por la escalera exterior. Efectuar el recorrido desde A hasta el destino DS, ha supuesto cruzar las puertas B, C, D y E que delimitan los recintos y presumiblemente determinan las anchuras mínimas de paso.



**Figura 3.14** Análisis de los elementos de una vía de evacuación

Si se supone que la dependencia origen de evacuación está ocupada por  $k$  personas, realizan el recorrido AB a una velocidad  $v_{AB}$ , se produce flujo  $F_{AB}$  determinado por la anchura de la puerta B, este flujo se mantiene en la circulación horizontal BC. En el tramo CD de circulación por la escalera se reduce la velocidad, pero se supone que la anchura de la escalera permite mantener las condiciones de flujo fluido de tal forma que no se produzca ninguna retención, sin embargo si el flujo  $F_{CD}$  fuera menor que el  $F_{BC}$  existiría un grupo de personas en espera en C produciéndose la consiguiente retención. Aparentemente la circulación en el tramo horizontal  $F_{DE}$  supone un flujo mayor que en la escalera, finalmente la circulación en el exterior hasta el punto de destino de evacuación, por condiciones físicas de circulación, no debe suponer ningún tipo de retención.

**Figura 3.15** Análisis gráfico t-l de una vía de circulación

Los gráficos t-l también pueden utilizarse para estudiar la circulación en una vía de evacuación, resulta una figura como la 3.15, en este caso el gráfico representa la situación más simple posible, la circulación sin ninguna retención,  $t_{00}$  corresponde al instante en que inician la evacuación los ocupantes de la dependencia A,  $t_{02}$  el instante en el cual abandona la dependencia A el último ocupante,  $t_{DS1}$  el instante en que llega al destino el ocupante que ha iniciado la evacuación en primer lugar y  $t_{DS3}$  el instante en que llega al destino el ocupante que ha iniciado la evacuación en último lugar. Cuando existen retenciones, en la línea que representa la circulación de los últimos ocupantes existen tramos horizontales cuya magnitud corresponde a los tiempos de espera en las correspondientes posiciones intermedias en las que se produce la retención.

En la figura 3.15 se observa que el tiempo necesario para que  $k$  personas se desplacen por una vía de circulación será el que proporciona la expresión (3.13) que obtiene el **tiempo de recorrido**  $t_1$ , consistente en la suma del tiempo empleado en realizar los desplazamientos en cada uno de los tramos de longitudes  $l_j$  si las velocidades medias de circulación se considera que son  $v_j$ .

$$t_1 = \sum_{\forall j} \frac{l_j}{v_j} \quad (3.13)$$

De la misma forma la expresión (3.14) proporciona el **tiempo de paso**  $t_2$ , el tiempo que se necesita para que  $k$  personas puedan cruzar un punto en el que se registra el mínimo flujo en la vía de evacuación.

$$t_2 = \frac{k}{F} \quad F = \text{Min} \{ F_j \} \quad (3.14)$$

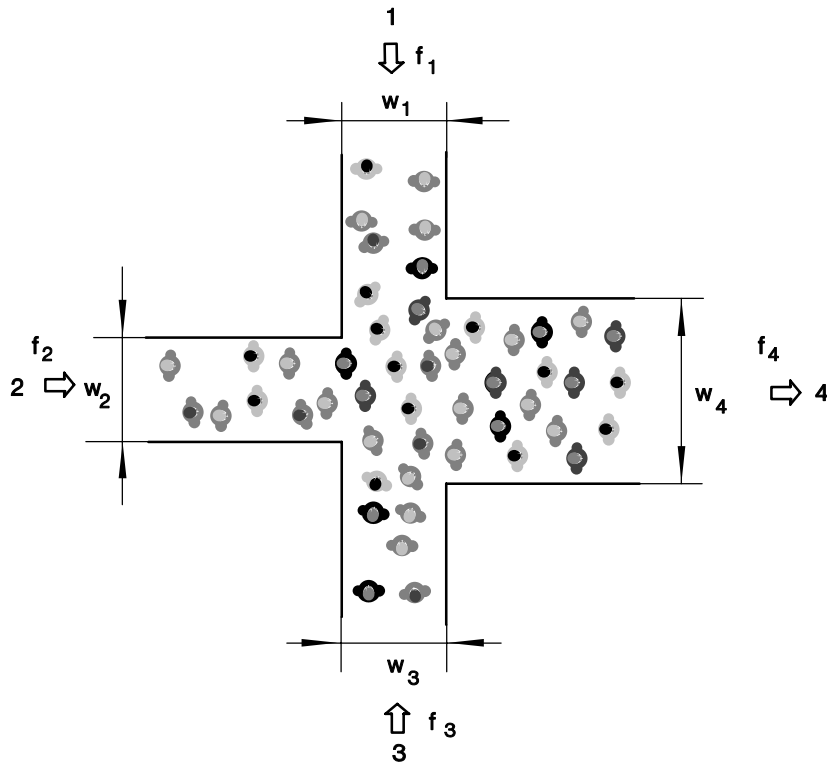
### 3.7.4 Modelado de confluencias simples

En los edificios existen ubicaciones en las cuales se produce la confluencia de la circulación de varias dependencias o bien la confluencia de varias vías de evacuación en una sola. Tras la confluencia, la circulación continúa formando un flujo único, en estos casos se habla de confluencias simples. Esta situación puede observarse en la figura 3.16, en ella se puede apreciar la confluencia de las vías de evacuación 1, 2 y 3 que continúan exclusivamente en la vía 4. En principio se considera que la mezcla entre las personas procedentes de las diferentes dependencias es fluida y no existen prioridades preestablecidas, sencillamente se produce la mezcla de flujos de entrada o de llegada y un solo flujo de salida. Mediante la expresión (3.15) se establece la condición de **continuidad de flujos** entre las entradas  $e$  y la salida  $s$ , sencillamente el número de personas que acceden a la confluencia y el que parte del punto de confluencia es idéntico.

$$F_s = \sum_{\forall j} F_{e_j} \quad (3.15)$$

Si se procede a expresar los flujos en función de los flujos específicos  $f_e$  y  $f_s$  y las anchuras efectivas de paso  $w_e$  y  $w_s$ , resulta la expresión (3.16)

$$f_s w_s = \sum_{\forall j} f_{e_j} w_{e_j} \quad (3.16)$$



**Figura 3.16** Confluencia de tres vías de evacuación

La expresión (3.16) permite determinar el flujo específico de salida  $f_s$ . Si resulta que la magnitud de dicho flujo específico de salida  $f_s$  es menor que el flujo máximo posible  $f_{MAX}$ , esta magnitud es válida, sin embargo si este valor supera el valor del máximo posible, realmente éste será físicamente imposible y el flujo que realmente se producirá será el valor correspondiente al flujo máximo, resultará la siguiente expresión

$$f_s = \begin{cases} \frac{\sum_{\forall j} f_{e_j} w_{e_j}}{w_s} & \text{si } f_s \leq f_{MAX} \\ f_{MAX} & \text{si } f_s > f_{MAX} \end{cases} \quad (3.17)$$

Si la suma de los flujos de llegada supera el valor del flujo máximo, habrá un número  $q$  de personas que permanecerán retenidas en la confluencia, la expresión (3.18) expresa esta situación según la cual el número de personas que acceden a la confluencia es igual al número que la abandona la misma más las que permanecen en retención aguardando para poder circular

$$\sum_{\forall j} f_e w_{e_j} = f_s w_s + q \quad (3.18)$$

De forma muy similar a la analizada hasta este momento, podrían estudiarse situaciones en las cuales existen varias vías de entrada y varias vías de salida, en estos casos normalmente se presenta la indeterminación de las distribuciones que dan lugar a los valores de los flujos que se producen en cada salida y debe operarse mediante suposiciones diversas en las densidades de las salidas.



Finalmente a modo de ejemplo, se plantea la resolución de la situación planteada en la figura 3.16, aplicando la expresión (3.15) para establecer la continuidad de flujos resulta que

$$F_4 = F_1 + F_2 + F_3$$

según (3.16), en función de flujos específicos y anchuras mínimas de paso se obtiene

$$f_4 w_4 = f_1 w_1 + f_2 w_2 + f_3 w_3$$

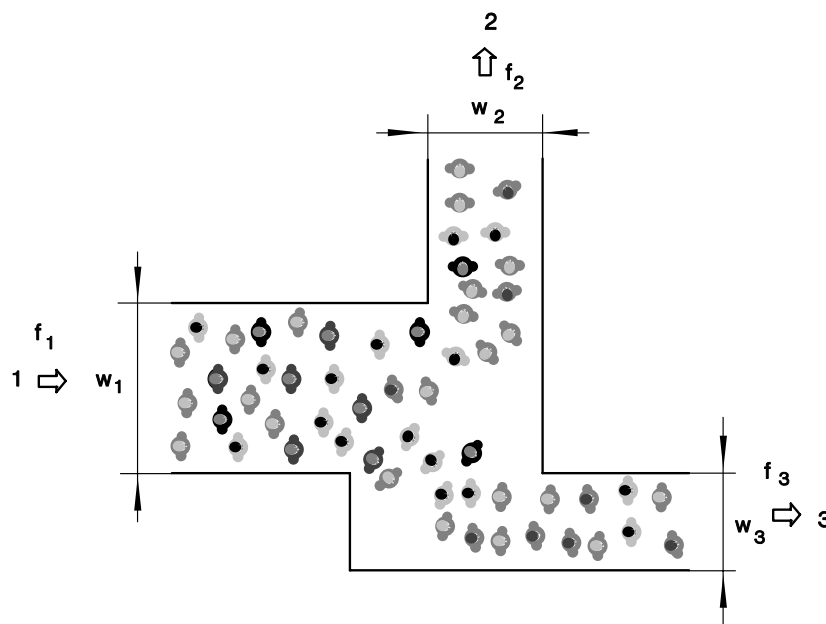
y finalmente a partir de (3.17) se determina el valor del flujo específico  $f_4$  que se registrará en la salida 4

$$f_4 = \frac{f_1 w_1 + f_2 w_2 + f_3 w_3}{w_4}$$

Si  $f_4$  cumple la condición de ser menor que el flujo máximo,  $f_4$  será su valor, en el caso de superar el valor del flujo máximo, la magnitud correspondiente al flujo máximo sería el que se produciría en la salida produciéndose la consiguiente retención.

### 3.7.5 Modelado de ramificaciones

Cuando a los ocupantes de un edificio que circulan por una vía de evacuación, se les presenta una situación en la cual tienen la opción de escoger entre varias dependencias de circulación para continuar su recorrido se define como una ramificación. Esta situación puede observarse en la figura 3.17, los ocupantes circulan por la vía 1 y en un determinado instante pueden escoger seguir el recorrido por la vía 2 ó bien por la 3.



**Figura 3.17** Ramificación en dos vías de evacuación

Las relaciones matemáticas que pueden establecerse guardan una cierta similitud con las

que se producen en las confluencias, en un principio si las dependencias de salida tienen capacidad suficiente, según (3.19) puede expresarse la condición de continuidad de flujos

$$\sum_{\forall j} F_{s,j} = F_e \quad (3.19)$$

Si se establecen los flujos  $F$  en función de los flujos específicos  $f_s$  y  $f_e$  y las anchuras efectivas de paso  $w_s$  y  $w_e$ , resulta la expresión (3.20)

$$\sum_{\forall j} f_{s,j} w_{s,j} = f_e w_e \quad (3.20)$$

La situación más simple que puede presentarse es aquella en la que la anchura de la salida de la ramificación es igual a la de entrada

$$\sum_{\forall j} w_{s,j} = w_e$$

en este caso puede pensarse que habrá continuidad en la magnitud de los flujos, en la expresión (3.21) así se indica.

$$f_{s,j} = f_e \quad \forall j \quad (3.21)$$

En las ramificaciones pueden presentarse situaciones más complejas que en las confluencias, e incluso indeterminadas en las cuales se deba optar por pronosticar la magnitud de los flujos que se van a producir en la ramificación y luego verificar si la solución adoptada se puede considerar aceptable. Una de estas situaciones se produce cuando físicamente no es posible establecer la continuidad de flujos, pero la anchura de los ramales de salida es superior a la del ramal de entrada. Cuando la anchura total de los ramales de salida sea inferior a la del ramal de entrada, en los ramales de salida se producirá un flujo mayor del que existe en el ramal de entrada, si se alcanza la condición de máximo flujo se producirán retenciones.

De la misma forma que en el caso anterior, se procede a analizar la situación presentada en la figura 3.17 según la expresión (3.19) resulta

$$F_1 = F_2 + F_3$$

al expresar los flujos en función de los flujos específicos y de las anchuras efectivas de paso según (3.20) tenemos

$$f_1 w_1 = f_2 w_2 + f_3 w_3$$

de forma que si las anchuras son razonablemente amplias, cumpliéndose

$$w_1 = w_2 + w_3$$

y las densidades de ocupación similares en cada una de las salidas, finalmente es posible establecer que la magnitud de los flujos específicos de salida de la ramificación es igual a la magnitud del flujo específico de entrada

$$f_2 = f_3 = f_1$$

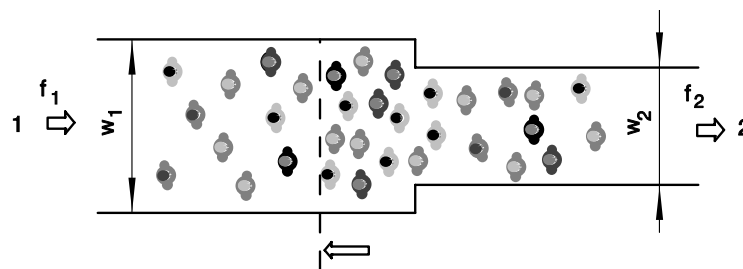
Asociado a las ramificaciones a menudo se presentan efectos de comportamiento, en un principio se supone que las personas escogen una salida sin ningún tipo de demora, dirigiéndose a una o bien a otra de forma absolutamente automática, sin embargo, por ejemplo en condiciones de señalización deficiente, pueden producirse demoras que a su vez suponen una acumulación de personas en el punto de la ramificación provocando una retención. Mediante la expresión (3.22) se indica que una parte del flujo de entrada se reproduce en la salida con una demora  $\delta$ , la proporción de flujo que se demora se expresa por la función  $\Phi$ .

$$f_1(t) = \Phi[f_2(t+\delta)] \quad (3.22)$$

Asociado a la selección de las salidas existe otros efectos significativos: La preferencia a utilizar las salidas habituales y desestimar la utilización de salidas poco conocidas, utilizar salidas de emergencia abiertas, o no utilizar determinadas salidas por cualquier otro modelo de comportamiento.

### 3.7.6 Modelado de retenciones

Cuando en una dependencia de circulación o bien en una vía de evacuación el número de personas que llegan a una determinada posición es mayor que el que la abandonan se produce una retención, normalmente se debe a la disminución de la anchura de los elementos de paso, da lugar a una situación como la representada en la figura 3.18. Al existir un estrechamiento en un pasillo, si el flujo específico que se debería producir en la salida es superior al valor del flujo máximo, se presenta una retención. Las retenciones también se producen cuando los ocupantes van a acceder a una determinada dependencia, que ya ha alcanzado su capacidad máxima y no es posible la incorporación de nuevos ocupantes a la misma.



**Figura 3.18** Proceso de formación de retenciones

Sea  $F_e$  el flujo de llegada y  $F_s$  el flujo de salida en una determinada ubicación de una vía de circulación. En general la diferencia de flujos, es función de los flujos específicos y de las anchuras mínimas de paso, entonces resulta la acumulación instantánea  $q$ , expresada como el número de personas que incrementan la ocupación de la posición en que se produce la retención en cada unidad de tiempo, este valor lo proporciona la expresión (3.23), sencillamente resulta:

$$q = F_e - F_s = f_e w_e - f_s w_s \quad (3.23)$$

En estas condiciones de flujo constante, la expresión (3.24) establece el número total de personas en la retención en el instante  $t$  suponiendo que se ha iniciado en el instante  $t_1$

$$Q(t) = q (t - t_1) = (f_e w_e - f_s w_s) (t - t_1) \quad (3.24)$$

En un planteamiento general de la situación, la acumulación de personas se expresará en función del tiempo, siendo  $q(t)$  la acumulación instantánea obtenida a partir del valor de los flujos instantáneos  $f_e(t)$  y  $f_s(t)$ , resulta la expresión (3.25) que permite determinar el número total de personas en la retención  $Q$  en el instante  $t$  si la retención se ha iniciado en el instante  $t_1$

$$Q(t) = \int_{t_1}^t q(t) dt = \int_{t_1}^t (f_e(t) w_e - f_s(t) w_s) dt \quad (3.25)$$

Mediante consideraciones geométricas simples puede determinarse la superficie ocupada por las personas que están afectadas por la retención, en cuyo caso la expresión (3.26) indica la superficie  $a^*$  expresada en metros cuadrados ocupada por la retención si la densidad de ocupación que se produce en la misma en el instante  $t$  es de  $d$  personas por metro cuadrado.

$$a^* = \frac{Q}{d} \quad (3.26)$$

También resulta inmediato conocer la longitud de la retención  $l_q$  en el instante  $t$  si se supone que la anchura del recinto es  $w_e$ , la expresión (3.27) proporciona dicha magnitud.

$$l_q = \frac{a^*}{w_e} = \frac{Q}{d w_e} \quad (3.27)$$

También puede determinarse la velocidad de desplazamiento de la retención  $v_q$  mediante la expresión (3.28) en función de la densidad  $d$  y de la anchura  $w_e$  del recinto de entrada

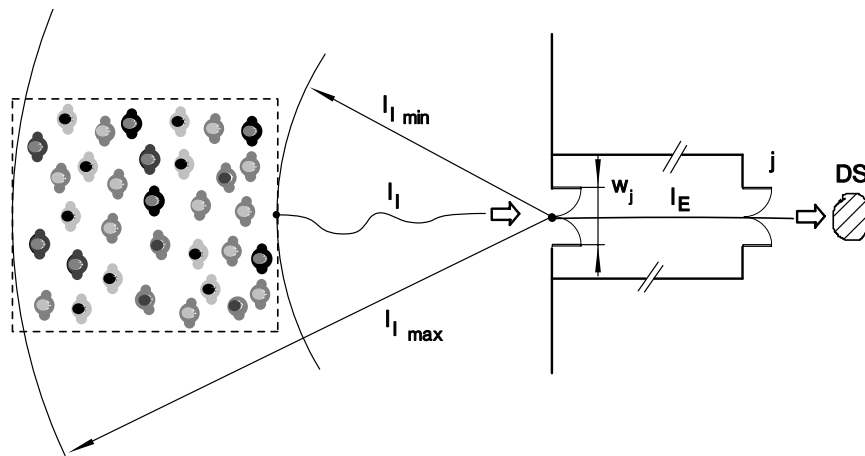
$$v_q = \frac{F_e - F_s}{d w_e} \quad (3.28)$$

### 3.7.7 Tiempo necesario para abandonar un recinto

Una forma simple de comprender el tiempo que les supone a un determinado número de ocupantes la evacuación de un recinto que dispone de una única salida, según puede observarse en la figura 3.19, consiste en suponer detrás de ellos un duende que pone en marcha un cronómetro en el momento de producirse la señal de alarma, se sitúa detrás del último ocupante, efectúa el recorrido hasta la salida y justamente en el momento de

cruzar la salida del edificio para el cronómetro. Sencillamente se trata de identificar los tiempos que ha contabilizado. Para que un determinado número de personas abandone un recinto utilizando la salida  $j$  se identifican tres fases o etapas, el tiempo de demora en el inicio de la evacuación  $t_{0j}$ , el tiempo de circulación  $t_{1j}$  y tiempo de flujo  $t_{2j}$ . Se trata del tiempo necesario para que  $k$  personas reaccionen a una señal de alarma, se desplacen hasta la salida y les sea posible de cruzar los estrechamientos que se produzcan en la vía de evacuación, resulta la expresión (3.29).

$$t_j(k) = t_{0j} + t_{1j} + t_{2j} \quad (3.29)$$



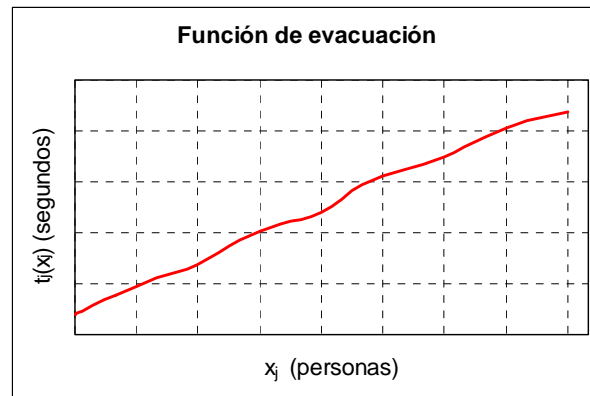
**Figura 3.19** Obtención de la función de evacuación

El tiempo de demora  $t_{0j}$  según se ha analizado en apartados anteriores, obedece a múltiples efectos que realmente pueden pronosticarse después de un minucioso estudio del problema. El tiempo de circulación  $t_{1j}$ , consiste en el tiempo que se tardará en llegar a la salida  $j$ , puede determinarse mediante la expresión (3.9) en la cual se considera que existe un recorrido hasta el destino de longitud total  $l_j$ , en el cual se produce una densidad de ocupación  $d_j$  y a partir de la misma se estima la velocidad constante  $v_j$  de desplazamiento de los ocupantes que se dirigen hacia la salida. Si en la salida  $j$ , cuya anchura mínima es  $w_j$ , a partir del instante  $t_{1j}$  hay un flujo específico  $f_j$ , y la magnitud de dicho flujo se supone constante durante todo el tiempo que dura la evacuación, hasta el instante  $t_{1j}$  el flujo es nulo y a partir del mismo la magnitud del flujo  $F_j$  que se produce en la salida  $j$  lo proporciona la expresión (3.8). Entonces el tiempo de flujo  $t_{2j}$ , se obtiene utilizando la expresión (3.10), indica el tiempo que les supone abandonar el recinto a las  $k$  personas que utilizan la salida  $j$  debido a la capacidad de paso de la misma.

Si se supone que  $x_j$  es un número cualquiera de personas que se dirigen a la salida  $j$ , siendo  $x_j \leq k$ , permite generalizar la expresión anterior para un número cualquiera de ocupantes resultando la expresión (3.30) que recibe el nombre de función de evacuación  $t_j(x_j)$  de la salida  $j$ .

$$t_j(x_j) = t_{0j} + t_{1j} + t_{2j} = t_{0j} + \frac{l_j}{v_j} + \frac{x_j}{F_j} \quad (3.30)$$

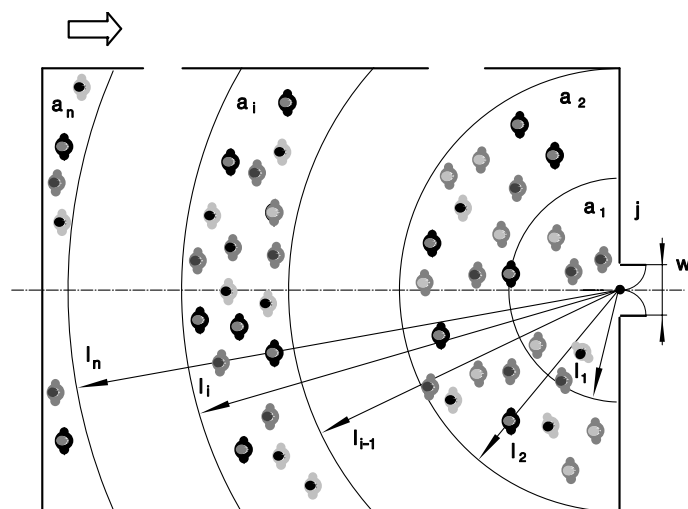
La representación gráfica de la función de evacuación en su forma más genérica adopta un aspecto como el de representación de la figura 3.20, en ella en el eje de abscisas se sitúa el número de ocupantes y en el de ordenadas el tiempo, normalmente expresado en segundos. Permite observar el tiempo de evacuación de un número cualquiera de ocupantes  $x_j$ . La ordenada en el origen, si existe corresponde al tiempo de demora y de recorrido y la pendiente el inverso del flujo.



**Figura 3.20** Forma genérica de la función de evacuación de una salida

### 3.7.8 Modelado de las incorporaciones a una salida

En la formulación realizada en el apartado anterior ha sido preciso estimar la magnitud de las velocidades y de los flujos de circulación que se van a producir en las salidas, ambas magnitudes se suponen constantes durante todo el tiempo que dura la evacuación, fácilmente puede observarse que ésta es una simplificación del problema. Una forma más precisa de operar consiste en analizar el número de personas  $q_j(i)$  que pueden hallarse en disposición de abandonar el recinto por una determinada salida  $j$  en intervalos regulares de tiempo  $i$ , se observa que básicamente depende de las condiciones geométricas del recinto y de las interferencias que puedan producirse en el movimiento de los ocupantes, este proceso de análisis puede observarse en la figura 3.21.



**Figura 3.21** Modelado de las incorporaciones a la red

Si en el recinto existen  $k$  ocupantes y  $a$  es la superficie útil del mismo, mediante la expresión (3.31) se determina el valor de la densidad de ocupación inicial  $d$ .

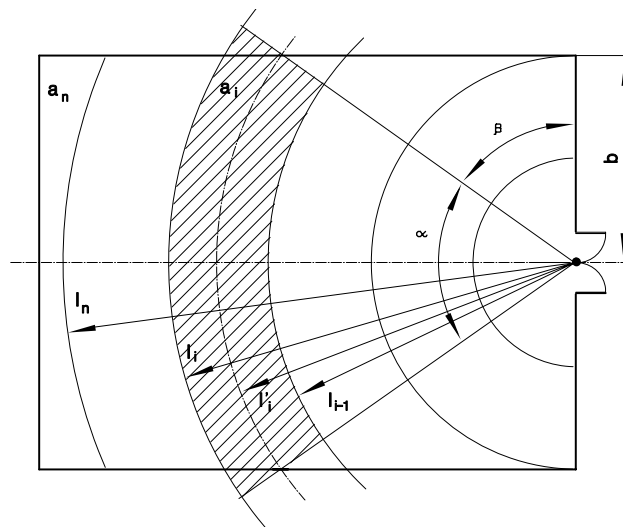
$$d = \frac{k}{a} \quad (3.31)$$

A partir de la densidad de ocupación  $d$  se estima el valor de la velocidad de circulación  $v_j$  de los ocupantes del recinto que se dirigen hacia la salida  $j$ . Si se consideran intervalos regulares de tiempo de  $\delta$  segundos, cuya magnitud normalmente es de 5, 10, 15 ó 30 segundos,  $t(1) = \delta$  corresponde al final del primer intervalo,  $t(2) = 2\delta$  el segundo y en general  $t(i) = i\delta$  el final del intervalo  $i$ .

Durante el primer intervalo, comprendido entre los instantes 0 y  $t(1)$  solamente podrán llegar a la salida las personas que se hallan situadas a una distancia menor que  $l_j(1)$ , en el segundo intervalo entre los instantes  $t(1)$  y  $t(2)$  las situadas a una distancia comprendida entre  $l_j(1)$  y  $l_j(2)$  y en general entre los instantes  $t(i-1)$  y  $t(i)$  las situadas a una distancia comprendida entre  $l_j(i-1)$  y  $l_j(i)$ , la magnitud de dichas distancias según la expresión (3.32) será el producto de la velocidad de desplazamiento por el tiempo  $\delta$  correspondiente

$$l_j(i) = v(i\delta) \quad (3.32)$$

A su vez las distancias  $l_j(1)$ ,  $l_j(2)$ , . . .  $l_j(n)$  definen las superficies  $a_j(1)$ ,  $a_j(2)$ , . . .  $a_j(n)$ , ocupadas por las personas que podrían abandonar el recinto en los intervalos 1, 2, . . .  $i$ . Las superficies  $a_j(1)$ ,  $a_j(2)$ , . . .  $a_j(n)$  estarán ocupadas por las  $q_j(i)$  personas que potencialmente pueden abandonar el recinto en el intervalo  $i$  utilizando la salida  $j$ . En la figura 3.22 puede observarse el proceso para la obtención de las superficies de evacuación de cada intervalo. En las condiciones geométricas del recinto representado en la figura 3.22,  $a_j(1)$  corresponde a la superficie de un semicírculo,  $a_j(2)$  la de una semicorona circular, mientras que desde  $a_j(3)$  hasta  $a_j(n)$  pueden aproximarse mediante trapecios circulares. Dichas superficies se obtienen resolviendo el correspondiente problema geométrico.



**Figura 3.22** Cálculo de las superficies  $a_j(i)$

La primera de ellas corresponde a la superficie de un semicírculo

$$a_j(1) = \frac{\pi}{2} [l_j^2(1)]$$

De la misma forma  $a_j(2)$ , corresponde a la superficie de la semicorona circular

$$a_j(2) = \frac{\pi}{2} [l_j^2(2) - l_j^2(1)]$$

El resto de recintos  $a_j(i) \dots a_j(n-1)$  son superficies definidas por trapezios circulares cuya magnitud se determina a partir del valor del arco abrazado  $\alpha$ , siendo  $\beta$  la mitad del valor del arco suplementario.

$$\beta = \arccos\left(\frac{2b}{l_i + l_{i-1}}\right)$$

$$\alpha = \pi - 2\beta$$

La magnitud de dichas superficies se obtiene mediante la siguiente expresión

$$a_j(i) = \frac{1}{2} \alpha [l_j^2(i) - l_j^2(i-1)]$$

Finalmente debe obtenerse la superficie  $a_j(n)$ , podría resolverse el correspondiente problema geométrico, sin embargo directamente por diferencias se aproxima el valor de dicha superficie.

$$a_j(n) = a - \sum_{i=1}^{n-1} a_j(i)$$

Una vez se han obtenido las superficies de los recintos resulta inmediato determinar la ocupación  $q_j(i)$  de cada uno de ellos mediante la expresión (3.33)

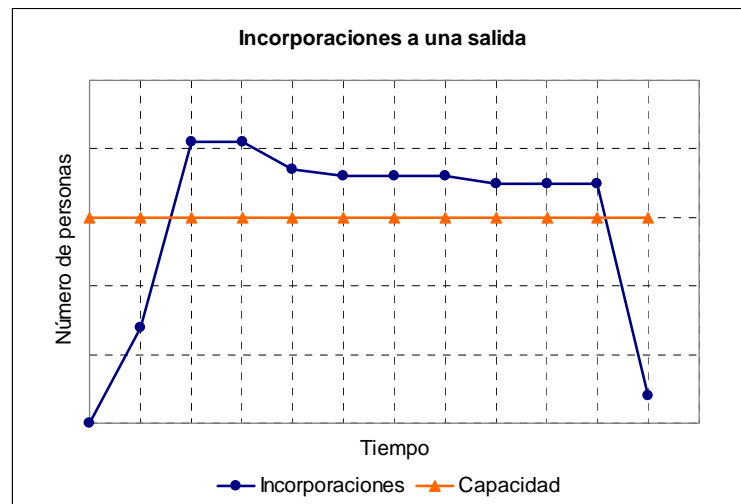
$$q_j(i) = d a_j(i) \quad (3.33)$$

Finalmente debe verificarse que se han contabilizado la totalidad de los ocupantes

$$\sum_{vi} q_j(i) = k$$

Resulta de gran interés representar y analizar la función de carga de la salida, permite observar el número de personas que pueden estar en disposición de abandonar el recinto utilizando la salida  $j$  en cada uno de los  $i$  intervalos. Si la función de carga supera la capacidad de la salida inevitablemente se producirán retenciones, aumentará la densidad de ocupación en el punto de salida y aumentará el número de personas que tratan de abandonar el mismo.



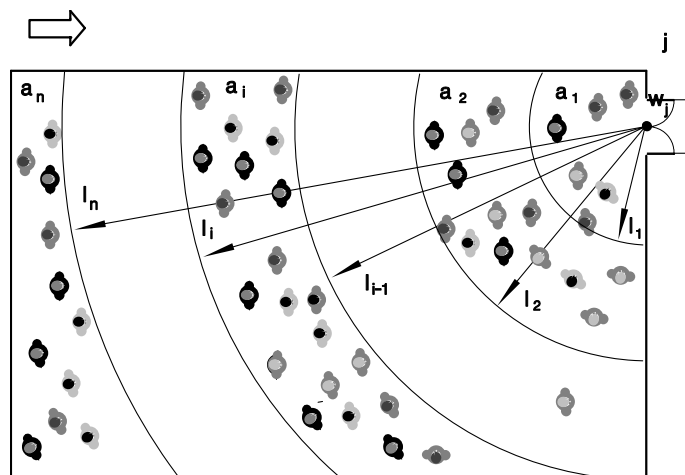


**Figura 3.23** Representación de la función de carga de una salida

El flujo  $F'_j(i)$  que podría producirse en la salida  $j$  en cada periodo  $i$ , es el que resulta de la expresión (3.34), no puede producirse un flujo mayor porque no se estima que en este intervalo de tiempo existan personas disponibles en la salida para abandonar el recinto.

$$F'_j(i) = \frac{q_j(i)}{\delta} \quad (3.34)$$

Además debe considerarse la capacidad  $c_j$  de la salida, si la anchura mínima de paso es  $w_j$ , y el flujo específico máximo que puede producirse en la misma es de  $f_{MAX}$  ambas magnitudes determina la capacidad de paso  $c_j$  según la expresión (3.35)



**Figura 3.24** Efecto de la ubicación de las salidas en el modelado de las incorporaciones

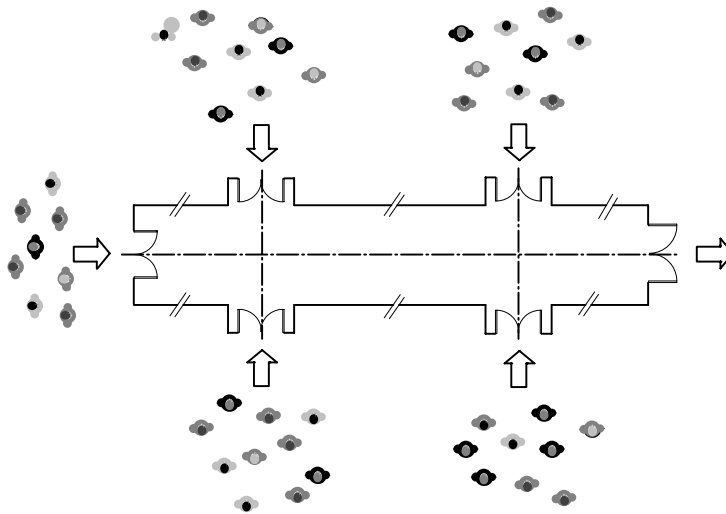
$$c_j = f_{MAX} w_j \quad (3.35)$$

Entonces el flujo  $F'_j(i)$  que se podría producir en función de las llegadas a la salida y de la capacidad  $c_j(i)$  de a salida  $j$  permite pronosticar el flujo que se producirá en la salida mediante (3.36). Si las llegadas son superiores a la capacidad de paso se van a producir retenciones en la salida.

$$\left. \begin{array}{l} F'_j(i) \geq c_j \Rightarrow F_j(i) = c_j \\ F'_j(i) < c_j \Rightarrow F_j(i) = F'_j(i) \end{array} \right\} \quad (3.36)$$

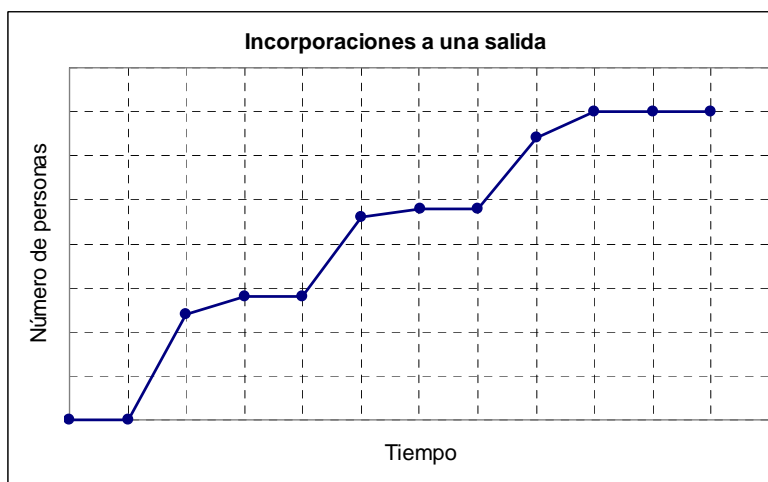
Debe insistirse en la importancia de las condiciones geométricas del recinto, por ejemplo en la figura 3.24, en la cual la salida del recinto se halla situada en una esquina del mismo puede observarse como la función  $q_j(i)$  difiere de los valores obtenidos en la situación analizada en el caso anterior.

Otra situación característica de notable interés es la obtención de la función de carga de la salida de un pasillo que dispone de varias incorporaciones situadas a distintas distancias de la salida según puede observarse en la figura 3.25.



**Figura 3.25** Modelado de las incorporaciones a la salida de un pasillo

En la figura 3.26 puede observarse el aspecto que adopta la función  $q_j(i)$ , se aprecia claramente los instantes en los cuales se producen las llegadas a la salida, en la situación representada la ocupación es creciente.

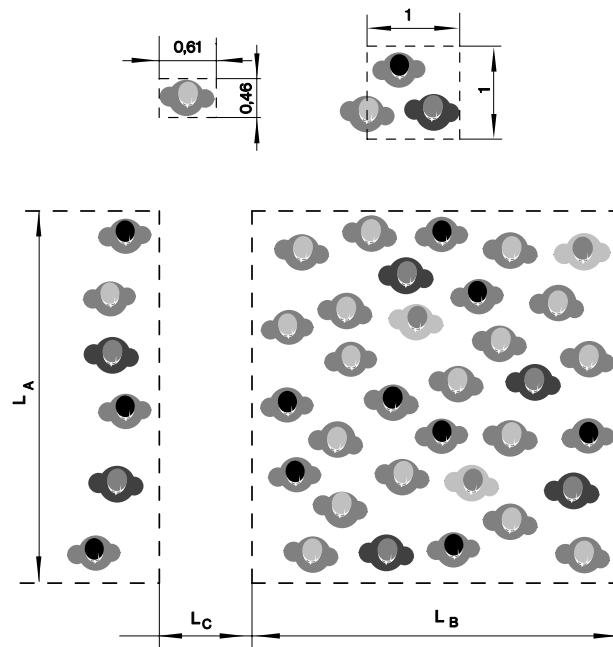


**Figura 3.26** Función de carga de una salida

### 3.7.9 Capacidad del destino de evacuación

El destino de evacuación debe ser un recinto o zona segura con capacidad suficiente para albergar la totalidad de los ocupantes del edificio, no tiene que ser necesariamente una superficie única, pueden ser varias superficies. La capacidad de un recinto es el **número máximo** de personas que pueden ocupar el mismo, si se dispone de una determinada superficie y se conoce la densidad máxima de ocupación que se va a producir puede determinarse muy fácilmente su capacidad mediante la expresión (3.3).

La otra vertiente de la situación es el problema inverso: Conocido el número de ocupantes del edificio se debe determinar la superficie que van a ocupar. En primer lugar se debe pronosticar el valor de la densidad de ocupación que se va a producir, según se ha analizado en apartados anteriores deben considerarse las dimensiones físicas de los individuos y aspectos de comportamiento que dan lugar a las separaciones que se establecerán entre ellos.



**Figura 3.27** Organización destino evacuación

En la parte superior de la figura 3.27 se representan personas adultas cuyas dimensiones corresponden a las de la elipse estándar de  $0,61 \times 0,46$  metros, y se supone como valor de referencia una densidad de ocupación de 2,5 personas por metro cuadrado. Si en un edificio ha sido posible organizar evacuaciones de emergencia es conveniente la situación en grupos para facilitar operaciones de recuento, entre cada grupo conviene establecer pequeñas separaciones de la forma que se ha representado en la figura 3.27, se supone que los individuos de un determinado grupo ocupan una superficie rectangular de  $L_A \times L_B$  y entre cada grupo se establece una separación  $L_C$ .

Las aplicaciones realizadas para determinar la organización y la superficie ocupada por diferentes grupos resulta muy simple, en la figura 3.28 se muestra el ejemplo de una tabla utilizada en el estudio del punto de reunión de un edificio industrial, puede obser-

vase el número de ocupantes de cada sección de la fábrica, la superficie que precisa cada sección y una vez se ha establecido la anchura del rectángulo que van a ocupar, se determina longitud que ocupa cada sección, entre cada grupo o sección se establece una separación de 1 metro.

PUNTO DE REUNIÓN: Cálculo de la superficie requerida					
Ocupación	2,5	( Pers. / m <sup>2</sup> )			
Ancho pasillo	5	( m )			
Separación grupos	1	( m )			
SECCIÓN	Número ocupantes	Sup.ocup. ( m <sup>2</sup> )	Long. Pas. ( m )	Separación secciones ( m )	Distancia origen ( m )
<b>Despachos</b>					
Despachos y oficinas	28	11,20	2,24	1,00	3,24
<b>Servicios generales</b>					
Cocina	8	3,20	0,64	1,00	4,88
Servicios auxiliares	4	1,60	0,32	1,00	6,20
<b>Taller producción</b>					
Corte	12	4,80	0,96	1,00	8,16
Preparación A	15	6,00	1,20	1,00	10,36
Preparación B	26	10,40	2,08	1,00	13,44
Preparación C	32	12,80	2,56	1,00	17,00
Montaje 1	64	25,60	5,12	1,00	23,12
Montaje 2	73	29,20	5,84	1,00	29,96
Montaje 3	91	36,40	7,28	1,00	38,24
Montaje 4	82	32,80	6,56	1,00	45,80
Acabado 1	12	4,80	0,96	1,00	47,76
Acabado 2	16	6,40	1,28	1,00	50,04
Control producto	5	2,00	0,40	1,00	51,44
Mantenimiento	8	3,20	0,64	1,00	53,08
<b>Logística</b>					
Almacén	7	2,80	0,56	1,00	54,64
Auxiliares almacén	3	1,20	0,24	1,00	55,88
Despacho	2	0,80	0,16	1,00	57,04
<b>TOTAL</b>	<b>488</b>		<b>39,04</b>	<b>18,00</b>	<b>57,04</b>

Figura 3.28 Tabla en la que se muestra la distribución en el punto de reunión.

### 3.8 ELEMENTOS PARA EL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL PROBLEMA DE LA EVACUACIÓN DE EDIFICIOS

Para establecer el formato de los resultados, en primer lugar se analiza la solución que aporta la simulación y herramientas como el programa EVACNET. La vistosidad y el realismo que consiguen las herramientas de simulación ha tratado de mostrarse en el capítulo anterior. Sin embargo, para un conocimiento profundo de las condiciones de evacuación a que están sometidos los ocupantes de un edificio se precisan unos valores numéricos y unas representaciones gráficas. El conocimiento de ciertas magnitudes analíticas o gráficas aporta más información que la simple observación del desarrollo de una evacuación. Si un espectador contempla una competición atlética, más allá de los aspectos plásticos o técnicos que seguramente sólo sea capaz de observar un experto, para valorar la competición son imprescindibles mediciones. En el problema de la evacuación de edificios sucede algo parecido, si se visualiza una simulación en primer lugar se debe tener una cierta garantía del realismo de la misma, pero además hace falta dis-

poner de valores cuantitativos de este proceso, la magnitud más inmediata que se debe medir es el tiempo de evacuación, si se producen retenciones no es suficiente observarlas se deben cuantificar y por lo menos globalmente se debe evaluar la eficacia del proceso mediante algún tipo de coeficiente.

### 3.8.1 Magnitudes básicas que caracterizan la evacuación de un edificio

Las magnitudes características del proceso de evacuación de un edificio son: el tiempo de evacuación, los ratios de la eficacia global del proceso, la magnitud de las retenciones, el valor de los flujos registrados, el rendimiento de las vías de evacuación y el número de personas que ocupan cada destino.

El **tiempo de evacuación** es sin ningún tipo de dudas la magnitud más inmediata que caracteriza este proceso, indica el tiempo en que un último ocupante abandona un recinto o un edificio y normalmente se expresa en segundos, el tiempo de evacuación debe referirse a cada una de las dependencias, a cada una de las plantas y a la totalidad del edificio. También existen otras posibles magnitudes como las denominadas estadísticas de la evacuación en las cuales se cuantifica el **tiempo medio empleado en la evacuación** y el **número medio de personas** que han salido en un periodo de tiempo determinado.

El **factor de congestión** según se define en la expresión (3.37) es la relación que existe entre el tiempo  $z$  que se tarda en la evacuación de un edificio, y el que resultaría si no se hubiera producido ninguna retención  $z^{\wedge}$ , o sea el tiempo de desplazamiento del ocupante situado en la posición más alejada del destino.

$$\phi_t = \frac{z}{z^{\wedge}} \quad (3.37)$$

Existen varias magnitudes que permiten evaluar las retenciones. Es preciso conocer los instantes inicial y final en que se produce la retención, además definen el **intervalo de retención**. Durante el intervalo de retención se producirá un **número máximo de personas en espera**, también es conveniente evaluar el **tiempo medio de espera** que les supone a los ocupantes una determinada retención y finalmente la **magnitud de la retención** que es una magnitud integra el tiempo total que les supone a los ocupantes la retención, se suele medir en periodos.

Otras magnitudes de interés son los valores de los flujos. El **flujo registrado** indica el número de personas que utilizan una determinada salida en cada instante, cuando se producen flujos variables conviene observar el valor de los flujos medios, y comparar los flujos instantáneos que se registran en una salida con los flujos máximos. Las vías de evacuación tienen una capacidad, definida a partir de los flujos máximos, entonces la relación entre el número de personas que las utilizan y las que podrían haberlas utilizado se llama **rendimiento de una vía de evacuación**, se define mediante la expresión (3.38)

$$\phi = \frac{p(z)}{p_{\max}(z)} \quad (3.38)$$

Finalmente cuando en un edificio existen varios posibles destinos de evacuación se debe conocer el número de personas que utilizan cada uno de ellos, se habla del **número de personas en los destinos de evacuación**. Si se establece la relación porcentual del número de personas que utilizan un destino con la capacidad del mismo se determina el **porcentaje de utilización**. De la misma forma, si la relación se establece entre las personas que utilizan un destino con el número total de personas evacuadas resulta el **porcentaje de la capacidad**.

RESUMEN RESULTADOS EVACUACIÓN							
OCUPACIÓN		Personas					
			Discap.				
Planta 4		120	0				
Planta 3		215	0				
Planta 2		176	0				
Planta 1		201	0				
Planta 0		106	0				
TOTAL EDIFICIO		818	0				
TIEMPOS EVACUACIÓN							
	calculados (s)	teóricos sin retención (s)	factor congestión %				
Planta 4	95	75	126,67				
Planta 3	135	65	207,69				
Planta 2	165	130	126,92				
Planta 1	210	80	262,50				
Planta 0	235	95	247,37				
EDIFICIO	235	130	180,77				
Estadísticas evacuación							
	tiempo medio (s)	desviación tipo seg.					
	127	26					
Valor medio evacuación							
	Pers./ periodo						
	12,3						
RETENCIONES							
Ubicación		Periodo		intervalo	%	Máxima	Magnitud
Origen	Destino	inicio (s)	fin (s)	(s)	%	(Pers.)	(Pers.-s)
A1	E1	25	95	70	29,79	34	234
B4	E2	45	110	65	27,66	18	136
E2	E3	35	70	35	14,89	45	156
A2	HL1	20	105	85	36,17	12	287
A1	HL3	45	90	45	19,15	56	76
DESTINOS EVACUACIÓN							
	Capacidad (Pers.)	Utilización (Pers.)	% utilización	% capacidad			
DS1	550	302	36,92	54,91			
DS2	600	156	19,07	26,00			
DS3	620	360	44,01	58,06			
TOTAL	1770	818		46,21			

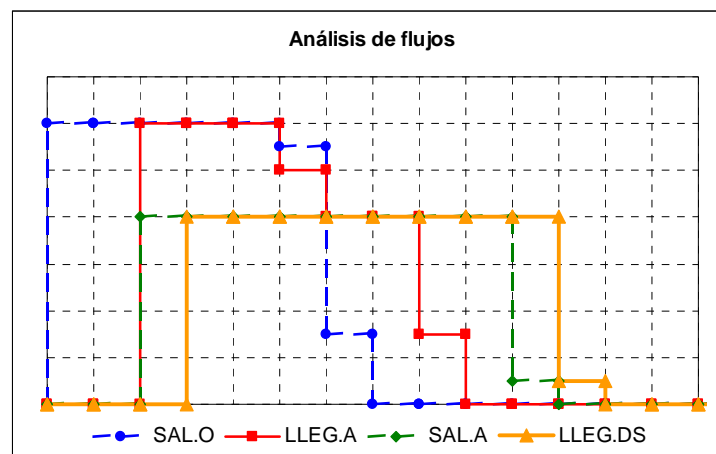
**Tabla 3.29** Ejemplo resumen de resultados de un problema de evacuación

En la figura 3.29 puede analizarse una tabla en la que se presenta el resumen de los resultados de un problema de la evacuación de un edificio de cuatro plantas, básicamente puede observarse como a partir de una determinada ocupación se obtienen tiempos de evacuación, se calculan ratios de eficacia, se identifican y cuantifican las retenciones y la ubicación de los ocupantes en el destino de evacuación. Globalmente estas magnitudes aportan un conocimiento global del problema y de las condiciones de evacuación a que se halla sujeto el edificio.

### 3.8.2 Herramientas gráficas para el análisis e interpretación de los resultados de los problemas de evacuación de edificios

La adecuada representación gráfica de ciertas magnitudes facilita su comprensión, mientras que en otros casos los gráficos se limitan a facilitar la interpretación de los resultados presentados en tablas. En el problema de la evacuación de edificios se utilizan: los diagramas de flujos, los diagramas de distribución óptima, el diagrama del perfil de la evacuación, el diagrama de ocupación, los diagramas de retenciones y el diagrama de utilización de las salidas.

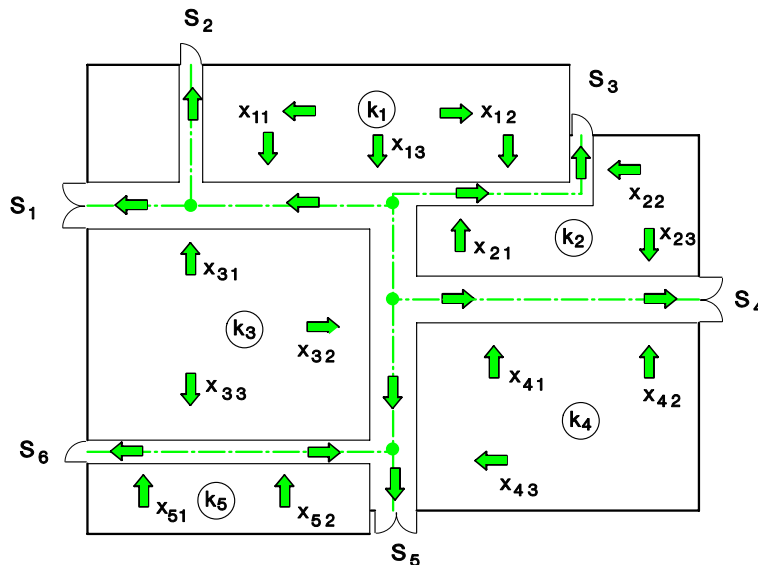
Mediante el **diagrama de flujos** se representa el flujo que se registra en las entradas y las salidas de una determinada dependencia en cada instante. En la figura 3.30 se presenta un ejemplo muy simple, corresponde al análisis de flujos de una dependencia de circulación A. Se representan los flujos de entrada y de salida de dicha dependencia, a la cual acceden los ocupantes de una dependencia origen de evacuación O. Se representan los flujos de salida de O, que al cabo de cierto tiempo constituyen incorporaciones a la dependencia A, dicha dependencia alcanza su capacidad máxima formándose una retención en la entrada de la misma y a partir de este instante, condiciona los flujos de entrada. También pueden observarse las salidas de dicha dependencia A y las llegadas al destino DS. En el diagrama de flujos el área encerrada entre la función  $f(t)$  y el eje de abscisas indica el número de personas que utilizan la salida, este valor en el caso de problemas continuos puede obtenerse integrando dicha función, en los problemas discretos se obtiene sumando los correspondientes valores y en determinados casos se obtiene simplemente multiplicando el intervalo correspondiente por el valor medio.



**Figura 3.30** Representación del flujo registrado en una salida

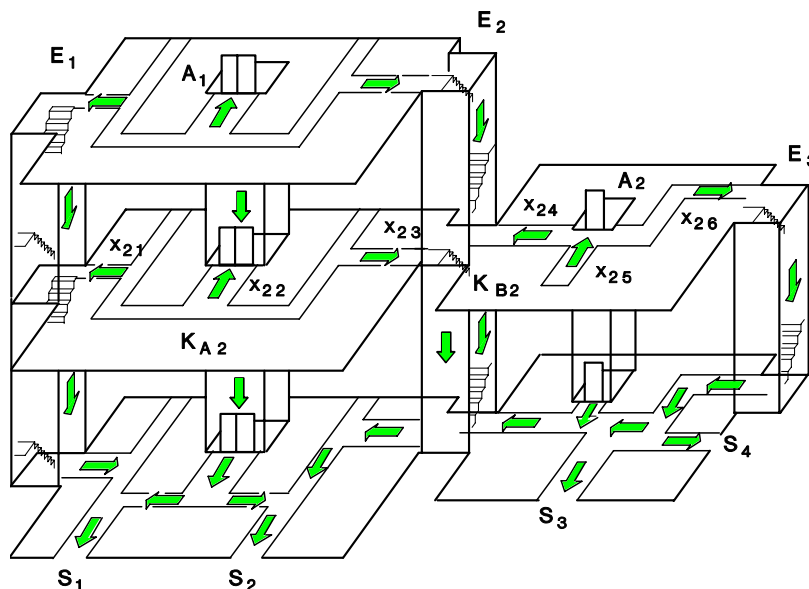
Definir de forma analítica el número de personas que deben dirigirse hacia cada salida resulta ciertamente laborioso, la solución que se propone consiste en utilizar el **diagrama de distribución hacia las salidas**, en el cual se indica la situación y el número de ocupantes de cada sección del recinto, y la dirección que deben emprender hacia las salidas para cumplir determinados objetivos, normalmente conseguir una evacuación en el mínimo tiempo. La simplicidad de esta representación es evidente, puede observarse en la figura 3.31 donde se presenta la evacuación de un edificio de una sola planta que

dispone de 6 salidas y 5 secciones ocupadas,  $k$  indica el número de personas de cada sección, y  $x_j$  indica el número de personas que deben emprender cada recorrido; ello se representa mediante flechas que indican direcciones de circulación en las propias secciones y sobre los ejes de las vías de circulación.



**Figura 3.31** Ejemplo de diagrama plano de distribución hacia las salidas

De la misma forma que existe una solución clara para la representación sobre una planta de un edificio, ésta puede realizarse en un edificio de varias plantas, para ello se utiliza una representación en perspectiva del edificio semi-hueco sobre el que deben visualizarse los elementos que constituyen las vías de evacuación, de la misma forma que en una representación plana, se deben indicar de la forma más clara posible ocupaciones y direcciones de circulación.



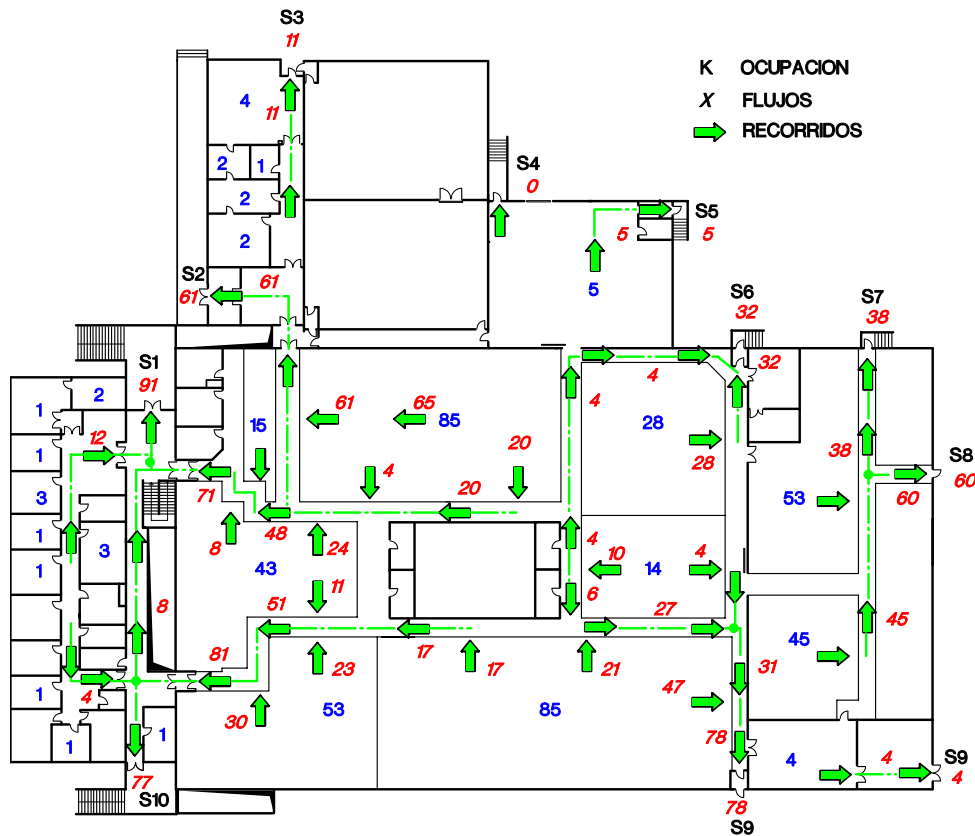
**Figura 3.32** Ejemplo de diagrama tridimensional de distribución hacia las salidas

En la figura 3.32 puede observarse la distribución hacia las salidas en un edificio de varias plantas, corresponde al estudio de un edificio de dos volúmenes de tres y dos plan-



tas, que dispone de tres escaleras, como medios mecánicos dispone de una batería de ascensores y un ascensor simple y cuatro salidas desde la planta baja. De la misma forma que en el caso de la distribución en planta cada ocupación  $k$  da lugar a una distribución  $x_j$  hacia las salidas.

Finalmente respecto el diagrama de distribución hacia las salidas, en la figura 3.33 se muestra una aplicación correspondiente a la distribución óptima de los ocupantes de un recinto industrial. En esta aplicación los valores numéricos cursivos indican el número de personas que se dirigen hacia cada salida.

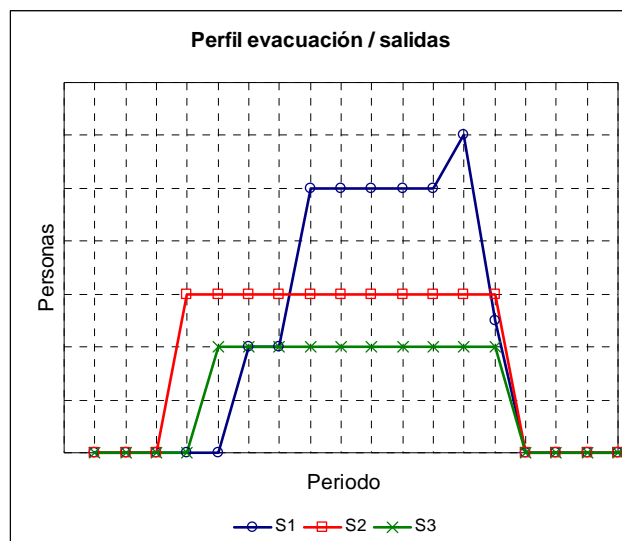


**Figura 3.33** Aplicación del diagrama de distribución hacia las salidas

Para gestionar situaciones críticas, este tipo de diagramas pueden resultar una herramienta valiosa, especialmente si se dispone de medios capaces de situar en tiempo real ocupaciones, calcular evacuaciones y situar sobre la representación de la planta las distribuciones apropiadas.

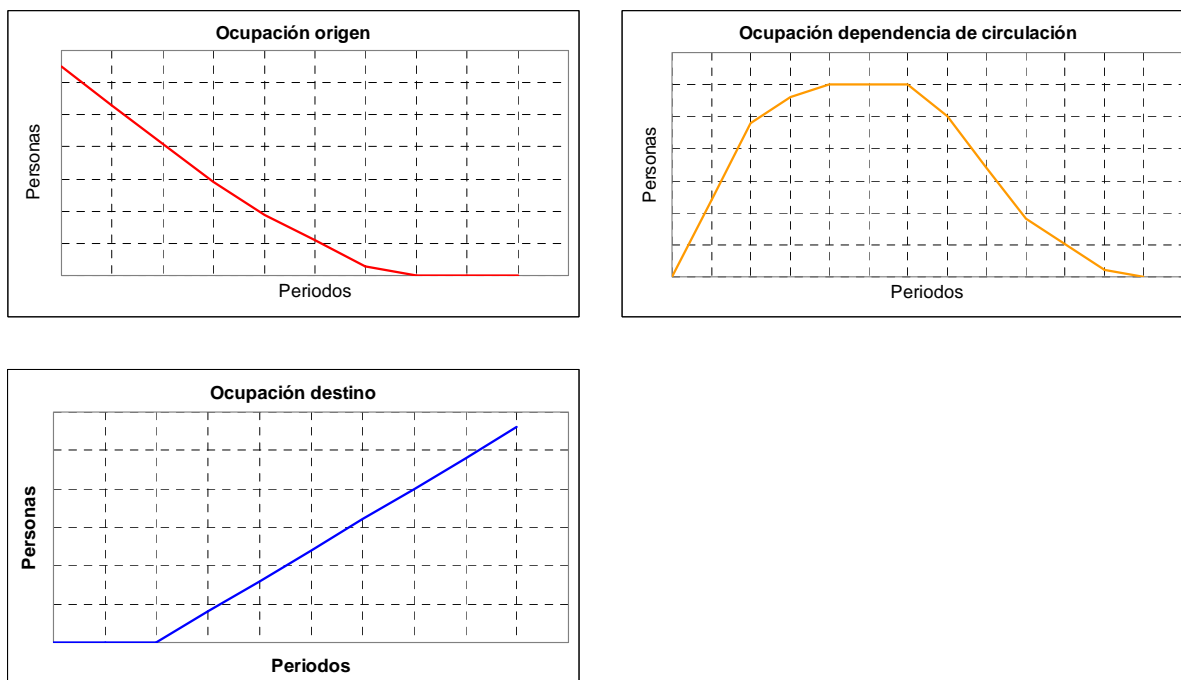
La representación del **perfil de evacuación** consiste en la representación instantánea del número de personas que abandonan un recinto, cruzan una puerta o llegan a un destino de evacuación. Es una gráfica absolutamente complementaria a la anterior, en el diagrama de utilización de las salidas se conoce el número total de personas que deben dirigirse a cada salida pero se desconoce que sucede en cada instante, la información temporal puede facilitar esta representación. En la figura 3.34, se ha procedido a mostrar como ejemplo de perfil de evacuación, el correspondiente a la evacuación de un recinto que dispone de tres salidas S1, S2 y S3, puede observarse la representación conjunta del

número de personas que alcanzan cada una de ellas en cada instante. Este mismo diagrama puede utilizarse para representar el número total de personas que han abandonado, un edificio en este caso se llama **diagrama de evacuación total**.



**Figura 3.34** Perfil de evacuación de un recinto de tres salidas

El **diagrama del perfil de ocupación de una dependencia** indica el número de personas que ocupan la misma en cada instante, visualmente se observa la evolución de la ocupación y el tiempo necesario para su evacuación. Ciertamente, también es una herramienta importante para el estudio del problema.

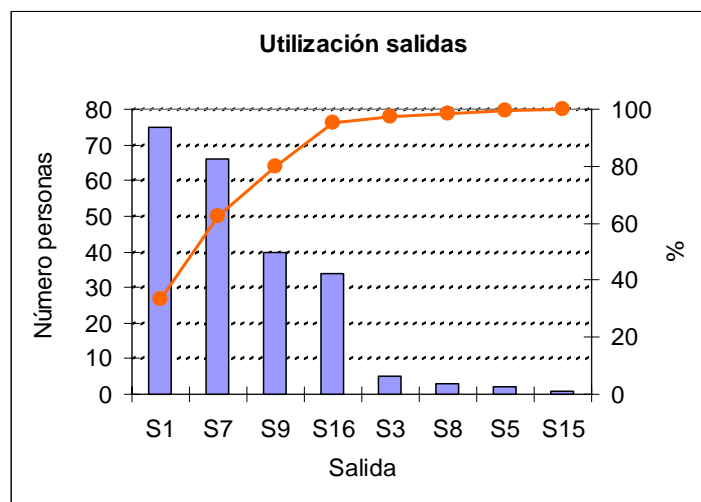


**Figura 3.35** Ejemplos de perfiles de ocupación

La forma que adopta esta representación obviamente depende del tipo de dependencia,

en la figura 3.35 se ha representado el perfil de evacuación correspondiente a una dependencia origen de evacuación, una dependencia de circulación y un destino de evacuación. En la dependencia origen de evacuación se observa que el número de ocupantes decrece constantemente, en dependencias destino de evacuación la situación que resulta es absolutamente contrapuesta, el número de ocupantes debe crecer constantemente, mientras que en la dependencias de circulación el perfil de ocupación presenta tres etapas, la inicial en la cual la ocupación crece, un zona intermedia cuando la dependencia alcanza su capacidad de ocupación y necesariamente se mantiene constante, y cuando han entrado todos los ocupantes esta ocupación decrece de forma progresiva hasta haber desalojado completamente la dependencia.

**El diagrama de utilización de las salidas** trata de cuantificar la importancia de cada una de las salidas en el proceso de evacuación de un edificio, considerando exclusivamente como criterio de valoración el número de personas que las utilizan. Es posible contrastar la importancia de cada una de ellas mediante una representación de Pareto, en el cual deben efectuarse ciertas reflexiones. Con este diagrama se clasifican las salidas, pero no refleja que una salida utilizada exclusivamente una persona, porque no dispone de otra alternativa, esta salida es muy importante. Puede observarse el ejemplo de la figura 3.36, en el cual se observa que de las ocho salidas de que dispone el recinto, dos de ellas las utilizan más del 60% de los ocupantes, se trata de las salidas S1 y S7, de la misma forma puede analizarse que las salidas S1, S7, S9 y S16 las utilizan más del 90% de los ocupantes. Si las personas que utilizan las otras salidas S3, S8, S5 y S15 pueden utilizar las otras salidas en cualquier hipótesis de suceso, podría pensarse en una cierta trivialidad de las mismas, sin que suponga cuestionar en absoluto su existencia, seguramente necesaria por consideraciones de diseño arquitectónico o de seguridad.



**Figura 3.36** Ejemplo de diagrama de utilización de las salidas

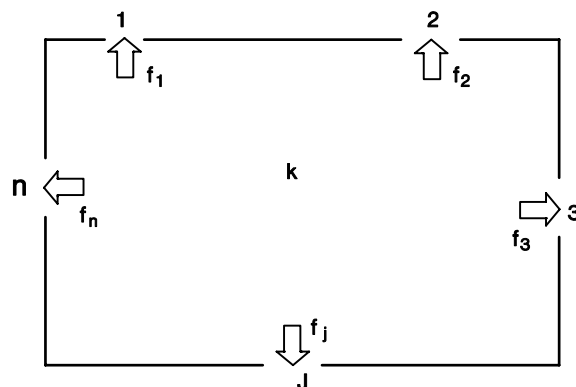


## CAPÍTULO 4: LA EVACUACIÓN DE UN RECINTO

### 4.1 EL PROBLEMA DE LA EVACUACIÓN DE UN RECINTO

El término “recinto” se utiliza habitualmente para indicar una dependencia o una parte de un edificio ocupada por un determinado número de personas que dispone de varias salidas, de la misma forma también puede observarse que edificios de determinadas características para realizar un estudio básico de las condiciones de evacuación pueden asimilarse a dicha definición de recinto.

Sea un recinto con  $k$  ocupantes uniformemente distribuidos (figura 4.1), que dispone de  $n$  posibles salidas situadas de tal forma que no exista interferencia en el movimiento de los ocupantes que se dirigen a cada una de ellas. Existe además una vía de evacuación hacia cada una de las salidas. La evacuación del recinto habrá finalizado cuando hayan salido del mismo todos sus ocupantes. Si existen  $n$  salidas, habrá  $n$  recorridos o rutas de evacuación diferentes. El tiempo de evacuación del recinto será la duración del recorrido más largo, determinado por el instante en el cual el último ocupante alcanza el exterior.



**Figura 4.1** Recinto de  $n$  salidas

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

Los objetivos de los problemas de evacuación se establecen para todo el colectivo, y tratan de lograr la máxima seguridad de las personas que ocupan el recinto desde una perspectiva global, se trata de definir magnitudes que cuantifiquen este propósito. Aunque parezca contradictorio, es posible que las estrategias de evacuación que resultan de la optimización global, aparentemente no supongan individualmente para cada uno de los ocupantes el tiempo mínimo de evacuación, en estas condiciones a algunos individuos podría corresponderles abandonar el edificio por una determinada salida, existiendo algún recorrido que supuestamente pudiera situarles en el destino en un tiempo menor.

Desde esta óptica colectiva, históricamente se han formulado varios objetivos: **Minimizar el tiempo** necesario para que la totalidad de los ocupantes puedan salir del recinto para dirigirse hasta un destino seguro, **maximizar** en cualquier instante el número de personas que han abandonado el recinto y **minimizar el tiempo total** empleado por todos los ocupantes en salir del recinto, se trata del coste de tiempo que supone la evacuación de la totalidad de los ocupantes.

A simple vista los tres objetivos parecen necesarios, sin embargo cabe preguntarse: ¿Cuál es más importante? o bien, ¿Cuál de ellos comporta mayor seguridad para los ocupantes?. A menudo se presentan problemas en los cuales varios objetivos son antagónicos, en este caso existe la fortuna, que en determinadas condiciones del problema, es posible poderlos cumplir simultáneamente.

El objetivo que la totalidad de los ocupantes pudieran estar situados en un destino seguro lo antes posible parece muy razonable. Si midiéramos el tiempo que transcurre desde que se produce la señal de alarma hasta que el último ocupante abandona el edificio, se trata de minimizar dicha magnitud.

El modelo que permite determinar el número de personas que deben utilizar cada ruta, con el fin de minimizar el tiempo total de evacuación ( $z$ ), es el siguiente:

$$\text{Min } z = \text{Max} \left[ t_j(x_j) \right] \quad j = 1 \dots n \quad (4.1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j = k \quad (4.2)$$

$$0 \leq x_j \leq k \quad (4.3)$$

donde  $j$  indica el número de la salida,  $x_j$  el número de personas que abandonarán el recinto por la salida  $j$ , y  $t_j(x_j)$  es la función de evacuación que proporciona el tiempo que tardarán en abandonar el recinto  $x_j$  personas.

La restricción (4.2) fuerza que salgan del recinto las  $k$  personas ocupantes del mismo, mientras que la (4.3) imposibilita que el número de personas que utilizan una determinada ruta sea negativo o mayor que los ocupantes de dicho recinto.

Las hipótesis que subyacen en el modelo son que los ocupantes se hallan uniformemente distribuidos en el recinto e inician la evacuación en el mismo momento, siendo independiente su movimiento en dirección a cada una de las salidas y conociéndose además la función de evacuación para cada salida.

Otro posible objetivo, tan razonable como el anterior, consiste en que el número de personas que han abandonado el recinto en cualquier instante  $z$  sea máximo, o la situación equivalente que el número de personas que todavía permanecen en el interior del edificio en cualquier instante sea mínima.

La función de evacuación inversa  $p_j(z)$ , indica el número de personas que abandonan el recinto utilizando la salida  $j$  en un tiempo  $z$ , esta función se define para cada una de las salidas.

Si en la salida  $j$  existe un flujo  $F_j(z)$ , variable y función del tiempo, la función de evacuación inversa de una salida  $j$  es posible obtenerla directamente a partir de la expresión

$$p_j(z) = \int_0^z F_j(z) d(z) \quad (4.4)$$

Si el flujo de circulación que se produce en cada una de las salidas es exclusivamente en el sentido de salida, resulta.

$$F_j(z) \geq 0$$

entonces en la función de evacuación inversa siempre se cumplirá que

$$p_j(z) \geq 0 \quad \forall z$$

La función de evacuación inversa total  $P(z)$ , indica el número personas que pueden abandonar el recinto en un tiempo  $z$  utilizando todas las salidas. Si no existen demoras en el inicio de la evacuación y no se consideran recorridos, la función de evacuación total es estrictamente la suma de las funciones de evacuación inversa de cada una de las salidas:

$$P(z) = p_1(z) + p_2(z) + \dots + p_j(z)$$

De esta forma, se pretende que en cualquier instante la función de evacuación total  $P(z)$  sea máxima. El objetivo será que el número total de personas que han abandonado el recinto en un tiempo  $z$  sea máximo para cualquier valor de  $z$ , resultando la función objetivo

$$\text{Max } [ P(z) ] \quad (4.5)$$

Otro planteamiento equivalente al enunciado, consiste en definir la ocupación que existe en el recinto en cualquier instante  $z$ , en este caso corresponde obtener la mínima ocupación

$$\text{Min } [ ( k - P(z) ) ] \quad (4.6)$$

El problema definido por los objetivos (4.5) ó (4.6) presenta las mismas restricciones que las del apartado anterior, el número de personas que utilizan cada una de las salidas debe ser un valor comprendido entre 0 y  $k$ , el número total entre todas las salidas debe ser igual a  $k$ , se halla definido en las expresiones (4.2) y (4.3).

Otro posible objetivo a plantear en el problema de la evacuación, similar a los dos anteriores, consiste en contabilizar el tiempo empleado por todos los ocupantes en abandonar el recinto. Se trata de definir una función de los costes de evacuación, una forma simple de medir dichos costes consiste en sumar el tiempo que le supone a cada individuo en la evacuación.

Se define la función  $r_j(x_j)$  que contabiliza el tiempo que tardan en abandonar el recinto las  $x_j$  personas que utilizan la salida  $j$ . Mediante (4.7) o bien (4.8) se obtiene dicha función para cada una de las salidas.

$$r_j(x_j) = \sum_{j=1}^{x_j} t_j(x_j) d(x_j) \quad (4.7)$$

La situación anterior resulta para un planteamiento discreto del problema, necesario en situaciones de ocupaciones reducidas, mientras que la expresión (4.8) obedece a un planteamiento más general en el cual  $x_j$  corresponde a una variable real.

$$r_j(x_j) = \int_0^{x_j} t_j(x_j) d(x_j) \quad (4.8)$$

Si el recinto dispone de  $n$  salidas, el coste total de la evacuación será el proporcionado por  $R(x)$ , que corresponde a la suma de los costes de evacuación de  $x_j$  personas por cada una de las  $j$  salidas

$$R(x) = r_1(x_1) + r_2(x_2) + \dots + r_j(x_n)$$

siendo  $x$  el número total de personas que deben abandonar el recinto:

$$x = x_1 + x_2 + \dots + x_n$$

Se trata de obtener la estrategia de evacuación que consiga un mínimo coste, es decir aquella cuya suma de tiempos invertidos en la evacuación sea mínimo, se define en la función objetivo (4.9), función de  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

$$\text{Min } [ R(x) ] \quad (4.9)$$

De forma similar, puede obtenerse la función de coste de la evacuación en función del tiempo  $z$  a partir de la función de evacuación inversa, ello presenta algunas ventajas. Nuevamente se debe obtener el coste de la evacuación, efectuando la suma del número de personas que abandona el recinto en cada instante por el tiempo  $z$  que les supone.

En la forma que se ha definido la función inversa  $p_j(z)$ , se trata de conocer la función  $\rho_j(z)$ , definida como la tasa unitaria de circulación una salida

$$\rho_j(z) = \frac{d(p_j(z))}{d(z)} \quad (4.10)$$

La función de coste  $r_j(z)$  de la salida  $j$  (4.11) indica el coste de la evacuación de  $p_j(z)$  en un tiempo  $z$ .

$$r_j(z) = \int_0^z z (\rho_j(z)) d(z) \quad (4.11)$$

Se halla la función  $R(z)$  que contabiliza el coste total de la evacuación, utilizando las  $n$  salidas, función de una única variable  $z$ .

$$R(z) = r_1(z) + r_2(z) + \dots + r_n(z)$$

Se trata de obtener la estrategia de evacuación que consiga un mínimo coste, para ello se define la función objetivo (4.12).



$$\text{Min } [ R(z) ] \quad (4.12)$$

En cualquier caso se trata de minimizar la función objetivo, definida en (4.9) y (4.12), en ambos casos sujetas a las restricciones definidas en (4.2) y (4.3).

## 4.2 EVACUACIÓN DE UN RECINTO EN EL TIEMPO MÍNIMO

Para la solución del problema de la evacuación de un recinto se ha desarrollado la solución analítica, un procedimiento de solución gráfica y finalmente se presenta una solución heurística.

### 4.2.1 Solución analítica

La formulación básica del problema de la evacuación de un recinto se fundamenta en el trabajo de J. R. Brown [6] y en el desarrollo de la misma realizado por R. L. Francis [32]. Esta formulación inicial resulta válida para los casos en los cuales las rutas de evacuación son independientes, con una función  $t_j(x_j)$  conocida para cada ruta  $j$  siendo posible encontrar su función inversa  $p_j(z)$  y no se consideran las capacidades de las rutas de evacuación ni de los destinos.

Para cada ruta  $j$  existe una función inversa de  $t_j(x_j)$  que se denomina  $p_j(z)$ . Si  $t_j(x_j)$  es el tiempo en que tardan  $x_j$  personas a salir del recinto por la ruta  $j$ , su función inversa  $p_j(z)$ , será el número de personas que pueden salir del recinto por la ruta  $j$  en un tiempo  $z$ .

Sustituyendo en  $t_j(x_j)$  resulta la expresión:

$$z = t_j(p_j(z))$$

La función  $z$  que se ha obtenido es válida para el intervalo:

$$0 \leq z \leq t_j(k)$$

siendo  $t_j(k)$  el tiempo que tardarían en salir la totalidad de los ocupantes por la ruta  $j$ . Si fuera  $z > t_j(k)$  resultaría que el tiempo de evacuación obtenido es mayor que el necesario para la evacuación de la totalidad de ocupantes del recinto por la ruta  $j$ , cuando justamente el número de personas que pueden cruzar la ruta  $j$  en un tiempo  $z$  es  $k$ .

$$p_j(z) = k \quad \forall t_j(k) < z$$

Mediante las expresiones anteriores se determina  $p_j(z)$ , dependiendo de si

$$p_j(z) = \begin{cases} t_j^{-1}(x_j) & 0 \leq z \leq t_j(k) \\ k & t_j(k) < z \end{cases} \quad (4.13)$$

Se puede interpretar  $p_j(z)$  como el mayor número de personas que pueden utilizar la ruta  $j$  en un tiempo  $z$ . Sin embargo, si  $x_j$  personas utilizan la ruta  $j$  y resulta que  $x_j > p_j(z)$ , utilizando la función del tiempo de evacuación de una ruta,  $t_j(x_j)$  es una función estrictamente creciente, entonces tendremos que:

$$t_j(x_j) > t_j(p_j(z)) = z$$

el tiempo necesario para salir es mayor que el del número de personas que pueden utilizar la ruta  $j$  en un tiempo  $z$ .

Si tenemos  $j$  salidas independientes, tendremos la capacidad total de salida del recinto

$$P(z) = p_1(z) + p_2(z) + \dots + p_n(z) \quad (4.14)$$

$P(z)$  es la función que indica el número total de personas que pueden salir del recinto en un tiempo  $z$ .

Si en el recinto existen  $k$  ocupantes, ello nos permite encontrar el tiempo mínimo  $z^*$  necesario para la salida de  $k$  ocupantes del recinto, resolviendo:

$$k = P(z^*) \quad (4.15)$$

Resulta que  $k$  será el mayor número de ocupantes, que pueden de salir del recinto en un tiempo total  $z$ . Entonces  $z^*$  será el tiempo óptimo.

Ahora puede concluirse que en un tiempo total  $z'$

$$z' < z^*$$

no será posible la evacuación de  $k$  ocupantes del recinto, definitivamente será  $z^*$  el tiempo mínimo para evacuar  $k$  ocupantes del recinto. Conocido  $z^*$  será posible calcular la asignación  $x_j^*$  para cada ruta de evacuación

$$x_j^* = p_j(z^*) \quad \forall j \quad (4.16)$$

necesariamente debe garantizarse que:

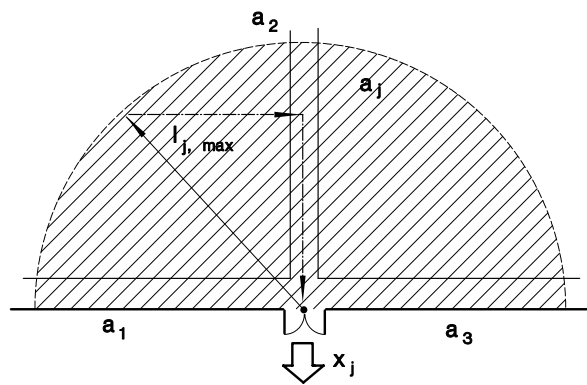
$$x_1^* + x_2^* + \dots + x_n^* = p_1(z^*) + p_2(z^*) + \dots + p_n(z^*) = P(z^*) = k$$

En estas condiciones, la distribución obtenida produce la evacuación de la totalidad de ocupantes  $k$ . Para la cual, finalmente debe verificarse que el tiempo necesario para evacuar  $x_j^*$  personas por la ruta  $j$  será el tiempo óptimo.

$$t(x_j^*) = t(p_j(z^*)) = z^*$$

Se obtiene para cada ruta o recorrido un tiempo  $z^*$  similar. Si no existen restricciones de capacidad en los destinos para una evacuación óptima, los tiempos de evacuación en las diferentes rutas son uniformes. De otra forma el tiempo de evacuación de cada ruta es aproximadamente el mismo cuando el recinto es evacuado en el mínimo tiempo. Decimos aproximadamente el mismo ya que consideramos  $x_j$  una variable continua cuando necesariamente es una variable discreta.

Finalmente es necesario comprobar la coherencia de los resultados, verificando la factibilidad de los valores de las velocidades y de los flujos supuestos inicialmente con los valores óptimos del tiempo de evacuación y las asignaciones  $x_j$  de cada una de las salidas. Estos aspectos se pueden observar en la figura 4.2.



**Figura 4.2** Proceso de verificación

Las velocidades de circulación y los flujos, se producen como consecuencia de la densidad de ocupación que resulta de la asignación óptima  $x_j^*$ . Si  $a_j$  es la superficie de vía de evacuación, y  $x_j$  el número de personas que utilizan la salida  $j$  será

$$d_j = \frac{x_j}{a_j} \quad (4.17)$$

a partir de  $d_j$  se procede a revisar el valor de las magnitudes de circulación  $v_j$  y  $f_j$ .

De la misma forma, el tiempo de evacuación  $z^*$  no puede ser menor que el tiempo  $t_j$  necesario para llegar a la salida  $j$  los  $x_j$  ocupantes asignados a la misma:

$$t_j = \frac{l_{j \max}}{v_j} \quad (4.18)$$

Efectuadas dichas operaciones se repite el proceso de cálculo hasta la obtención de la solución definitiva, en la cual las magnitudes de circulación razonablemente deben coincidir con las inicialmente supuestas.

#### 4.2.2 Solución gráfica

Un procedimiento gráfico para la solución del problema cuando las funciones de evacuación son monótonas se debe a R. L. Francis [34]. Dicho procedimiento es posible generalizarlo para considerar efectos de comportamiento que dan lugar a demoras y se consideran recorridos de evacuación, y además se ha transformado el proceso para la utilización de herramientas de cálculo. El proceso a seguir para la solución gráfica del problema es el siguiente:

**Primer paso.** Determinar para cada salida  $j$  la función de evacuación  $t_j(x_j)$ .

**Segundo paso.** Obtener la función de evacuación inversa  $p_j(z)$ , basta con representar la función de evacuación  $t_j(x_j)$  situando los tiempos de evacuación  $z$  en el eje de abscisas y el número de personas  $p_j(z)$  en el eje de ordenadas.

**Tercero paso.** Obtener y efectuar la representación gráfica de la función  $P_T(z)$ . Si las salidas son independientes, se suman los valores correspondientes de cada una de ellas representados por las funciones  $p_j(z)$ .  $P_T(z)$  indica el número total de personas que pueden salir en un tiempo  $z$ .

**Cuarto paso.** Se sitúa el valor  $k$  en el eje de ordenadas. Desde este punto se traza una línea horizontal hasta la intersección con la línea  $P_T(z)$ .

**Quinto paso.** Desde este punto de intersección se traza una línea vertical, en el eje de abscisas se lee el tiempo necesario para la evacuación de los  $k$  ocupantes, resulta el tiempo de evacuación mínimo  $z^*$ .

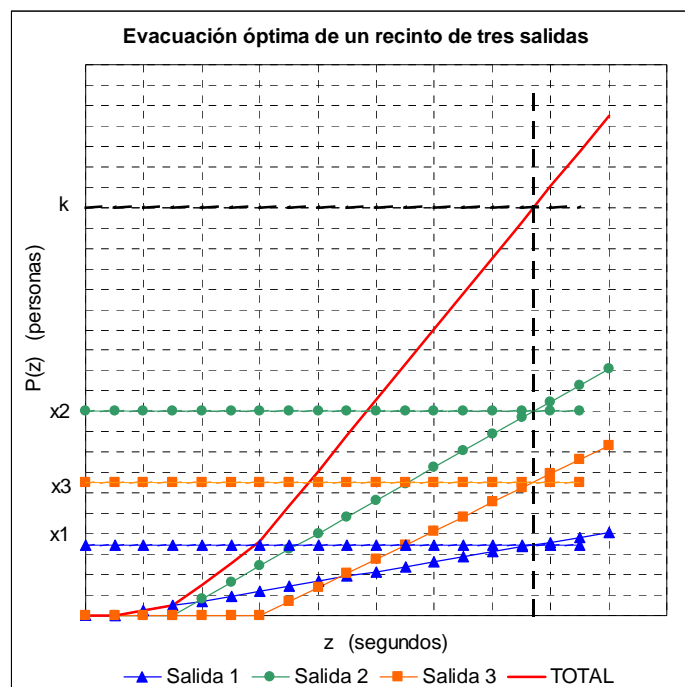
**Sexto paso.** A partir de las intersecciones de la línea vertical con las funciones  $p_j(z)$  de cada salida, se trazan líneas horizontales, en el eje de ordenadas se efectúa la lectura de la asignación  $p_j(z^*)$  que corresponde a cada salida  $j$ .

$$p_j(z^*) = x_j^*$$

**Séptimo paso.** Finalmente de forma analítica debe verificarse que se ha producido la evacuación de la totalidad de ocupantes:

$$x_1^* + \dots + x_n^* = p_1(z^*) + \dots + p_n^*(z^*) = k$$

En la figura 4.3 puede observarse un ejemplo de solución gráfica en la cual se hallan representadas las funciones de evacuación inversas de cada una de las salidas y la función de evacuación total y mediante las correspondientes líneas horizontales y verticales se completa el procedimiento gráfico descrito para hallar la distribución óptima y el tiempo mínimo de evacuación. Se trata de una situación en la cual se producen distintos flujos en las salidas, de la misma forma que existen distintos recorridos de evacuación.



**Figura 4.3** Ejemplo: Procedimiento gráfico para la optimización de la evacuación

### 4.2.3 Solución heurística

Para la resolución del problema se han utilizado diferentes procedimientos heurísticos, en este apartado se presenta un algoritmo incremental muy simple que ha proporcionado

buenos resultados. La rapidez en encontrar la solución es función del paso de cada iteración, cuando el número de ocupantes es reducido puede utilizarse como valor del paso la unidad. El proceso a seguir es el siguiente:

**Primero.** Se establece el paso de resolución  $x_p$

**Segundo.** Se determina la función  $t_j(x_j)$  de evacuación de cada salida.

**Tercero.** Se considera que  $x_p$  ocupantes pretenden abandonar el recinto utilizando una determinada salida  $j$ .

**Cuarto.** Se evalúa el tiempo que supondría a los  $x_p$  ocupantes abandonar el recinto por cada una de las salidas.

**Quinto.** Se asignan los  $x_p$  ocupantes a la salida que supone un tiempo de evacuación menor.

**Sexto.** El proceso se repite hasta la iteración  $n$  en la que se verifique

$$\left( k - \sum_{i=1}^n x_p \right) \leq x_p$$

**Séptimo.** Se adopta como paso de resolución la unidad hasta la evacuación de los  $k$  ocupantes del recinto.

### EXITRV\*

#### Datos

<b>Ocupación total</b>	k					
	<b>RUTA</b>					
	<b>1</b>	<b>2</b>		<b>j</b>		<b>n</b>
<b>Anchura efectiva mínima (m)</b>	$w_1$	$w_2$				$w_n$
<b>Superficie útil (m<sup>2</sup>)</b>	$a_1$	$a_2$				$a_n$
<b>Recorrido (m)</b>	$l_1$	$l_2$				$l_n$
<b>Densidad estimada (Pers./ m<sup>2</sup>)</b>	$d_1$	$d_2$				$d_n$
<b>Flujo específico (Pers./ m min)</b>	$f_1$	$f_2$				$f_n$
<b>Demora en el inicio evac. (s)</b>	$t_{0\ 1}$	$t_{0\ 2}$				$t_{0\ n}$

#### Resultados

	<b>RUTA</b>					
<b>Asignación (Pers.)</b>	$x_1$	$x_2$				$x_n$
<b>Densidad resultante (Pers./ m<sup>2</sup>)</b>	$d_1$	$d_2$				$d_n$
<b>Velocidad (m min)</b>	$v_1$	$v_2$				$v_n$
<b>Flujo específico (Pers./m min)</b>	$f_1$	$f_2$				$f_n$
<b>Flujo (Pers./ m min)</b>	$F_1$	$F_2$				$F_n$
<b><math>t_{1j}</math> (s)</b>	$t_{1\ 1}$	$t_{1\ 2}$				$t_{1\ n}$
<b><math>t_{2i}</math> (s)</b>	$t_{2\ 1}$	$t_{2\ 2}$				$t_{2\ n}$
<b><math>t_{TOTAL}</math> (s)</b>	$t_1$	$t_2$				$t_n$

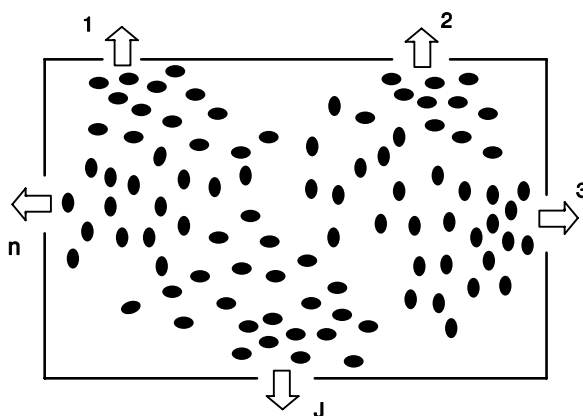
**Tabla 4.1** Tabla de resultados de la solución heurística

Para la aplicación de la heurística propuesta se ha desarrollado la aplicación **EXITR**, en la tabla 4.1 puede observarse la entrada de datos y el formato de los resultados a que da lugar dicha aplicación en la cual  $t_{0j}$  corresponde a la demora en el inicio de la evacuación de los ocupantes que se dirigen a la salida  $j$ ,  $t_{1j}$  es el tiempo de circulación,  $t_{2j}$  al tiempo de flujo y  $t_{TOTAL}$  el tiempo de evacuación.

La demora  $t_{0j}$  en el inicio de la evacuación para los ocupantes que utilizan la salida  $j$  se trata de un valor estimado que depende de diversos factores: El tipo de edificio, las características de los ocupantes, los sistemas de comunicaciones y de señalización instalados en el edificio, etc..

### 4.3 EVACUACIÓN DE UN RECINTO EN EL TIEMPO MÍNIMO CON FLUJO CONSTANTE EN LAS SALIDAS SIN RECORRIDO

Existen situaciones en las cuales se considera que las salidas se encuentran en los límites del recinto, no se tienen que considerar recorridos y no se producen demoras en el inicio de la evacuación de tal forma que en el momento de producirse la señal de alarma,  $x_j$  ocupantes se dirigen de forma absolutamente automática hacia cada salida  $j$ , además se supone que el flujo  $F_j$  que se registra en las salidas durante el tiempo que se produce la evacuación es constante.



**Figura 4.4** Evacuación de un recinto sin recorridos

#### 4.3.1 Solución analítica

Si se supone que los flujos  $F_j$  que se registran en cada una de las salidas son constantes, unidireccionales, resulta que las funciones de evacuación  $t_j(x_j)$  únicamente serán función del número de personas  $x_j$  que utilizan la ruta  $j$ . En principio es preciso pronosticar el flujo específico  $f_j$  que va existir en cada una de las salidas, según se trate de un recorrido horizontal, circulación por una escalera, una rampa u otro elemento de circulación, la magnitud del flujo puede estimarse a partir del modelado del movimiento de las personas de J. Fruins. Aplicando (3.8) si la anchura mínima de paso es  $w_j$  resulta

$$F_j = f_j w_j$$

según (3.30) aplicada a este caso, la función de evacuación  $t_j(x_j)$  será una función lineal que carece de término independiente cuya pendiente será el inverso del valor del flujo  $F_j$ .

$$t_j(x_j) = \frac{x_j}{F_j} = \left( \frac{1}{F_j} \right) x_j \quad 0 \leq x_j \leq k \quad (4.19)$$

De la misma forma puede obtenerse directamente la función de evacuación inversa de cada una de las salidas  $p_j(z)$ , el número de personas que pueden salir será el producto del tiempo  $z$  por el valor del flujo

$$p_j(z) = zF_j \quad z \geq 0 \quad (4.20)$$

Si en un recinto existen  $n$  salidas independientes, cada una de ellas con un flujo  $F_j$  constante en el intervalo de evacuación, el número total de personas capaces de abandonar el recinto en un tiempo  $z$ , vendrá dado por  $P(z)$

$$P(z) = p_1(z) + p_2(z) + \dots + p_n(z) = \sum_{j=1}^n p_j(z)$$

Sustituyendo las expresiones de las funciones de evacuación resulta

$$P(z) = F_1 z + F_2 z + \dots + F_n z = z \left( \sum_{j=1}^n F_j \right)$$

Si  $F$  es el flujo total de salida del recinto

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{j=1}^n F_j$$

El número de personas que pueden abandonar el recinto en un tiempo  $z$  será

$$P(z) = zF$$

Si dicho número corresponde con el de ocupantes

$$P(z) = k$$

Resolviendo es posible obtener el tiempo mínimo  $z$ , necesario para la evacuación de  $k$  ocupantes

$$z^* = \frac{k}{F} \quad (4.21)$$

Conocido el tiempo de evacuación del recinto  $z^*$ , el tiempo correspondiente a la evacuación de cada una de las salidas será

$$z^* = t_j(x_j)$$

Permite determinar a partir de la ecuación (4.16) la asignación óptima de ocupantes hacia cada salida

$$x_j^* = t_j(x_j)F_j = (z^*)F_j = \left( \frac{k}{F} \right) F_j = k \left( \frac{F_j}{F} \right) \quad (4.22)$$

Puede observarse, que ésta será una asignación crítica, en el sentido que asignar más ocupantes a una determinada salida supone incrementar el tiempo de evacuación  $z$ , por ello si  $z > z^*$ ,  $z$  deja de ser un tiempo óptimo de evacuación.

Con esta observación se ha obtenido que si en un recinto se registra un determinado flujo específico en cada una de las salidas, el número de ocupantes que debe asignarse a cada salida  $j$ , será proporcional a la relación que existe entre el flujo  $F_j$  que se registra en la salida  $j$  y el flujo total de salida del recinto  $F$ .

La formulación anterior puede llevar a una propuesta más simple, si se supone que el flujo específico  $f_j$  que se registra en cada una de las salidas del recinto es el mismo, válido cuando se trata de salidas que tienen unas condiciones físicas idénticas, entonces el flujo  $F_j$  que se registra en la salida  $j$  depende única y exclusivamente de la anchura mínima de paso  $w_j$

$$f_j = \text{cte.} \quad \forall j$$

Entonces resulta

$$F = f w_1 + f w_2 + \dots + f w_n = f \left( \sum_{j=1}^n w_j \right)$$

Siendo  $w$  la anchura mínima total

$$w = \sum_{j=1}^n w_j$$

Permite expresar la asignación óptima como

$$x_j^* = k \left( \frac{F_j}{F} \right) = k \left( \frac{f w_j}{f w} \right) = k \left( \frac{w_j}{w} \right) \quad (4.23)$$

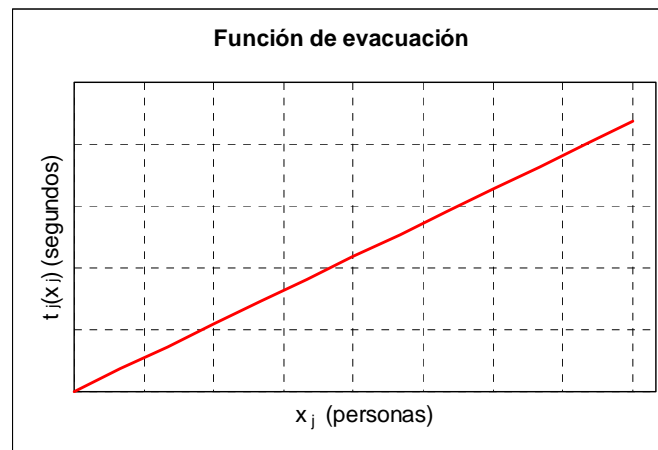
Dicha expresión indica que si en todas las salidas se ha considerado que los flujos son idénticos y proporcionales a la anchura de paso mínima, el número de ocupantes que debe asignarse a cada salida  $j$ , será proporcional a la relación que existe entre la anchura mínima  $w_j$  de la salida  $j$  y la total del recinto  $w$ .

### 4.3.2 Solución gráfica

Para obtener la solución gráfica del problema para esta situación se sigue el proceso descrito en el apartado 4.2.2.

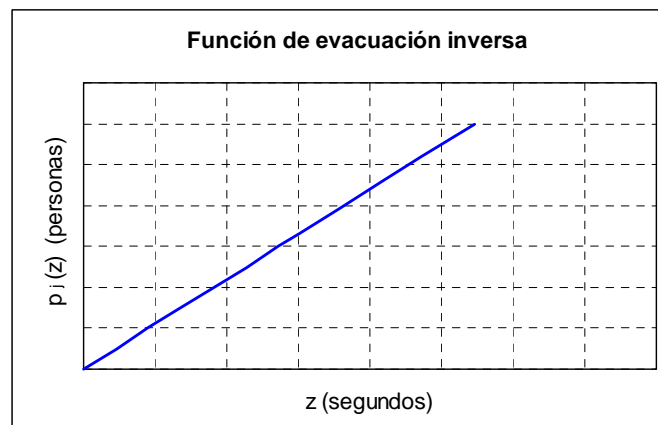
**Primer paso.** La función de evacuación  $t_j(x_j)$  de cada una de las  $j$  salidas se determina directamente mediante la expresión (4.6). En la figura 4.5 puede observarse que efectivamente se trata de una función lineal que pasa por el origen cuya pendiente es el inverso del flujo.





**Figura 4.5** Forma de la función de evacuación en flujo constante sin recorrido ni demora

**Segundo paso.** La función de evacuación inversa  $p_j(z)$ , se halla directamente mediante la expresión (4.7), en la figura 4.6 puede observarse que es una función lineal sin ordenada en el origen cuya pendiente es el flujo



**Figura 4.6** Forma que adopta la función de evacuación inversa en este modelo

**Tercer paso.** En este caso  $P_T(z)$  puede obtenerse directamente realizando la suma algebraica de las funciones de evacuación de cada una de las salidas según la expresión (4.12), luego se procede a su representación.

**Cuarto paso.** Se sitúa el valor  $k$  correspondiente al número de ocupantes en el eje de ordenadas, desde este punto se traza una línea horizontal hasta la intersección con  $P_T(z)$ .

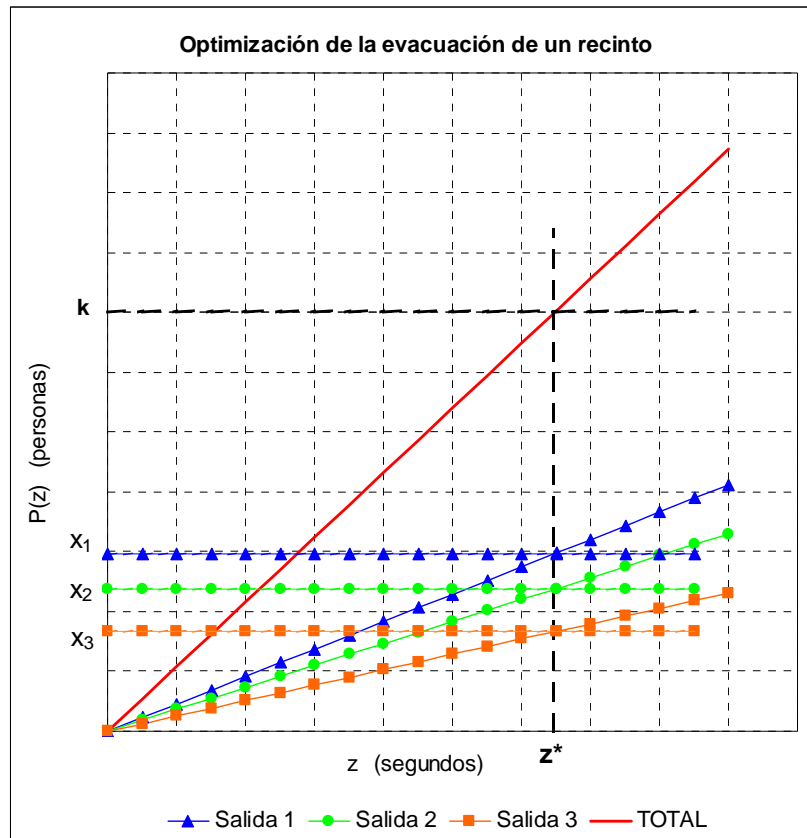
**Quinto paso.** Desde este punto de intersección de  $k$  con  $P_T(z)$  se traza una línea vertical, en el eje de abscisas se lee el tiempo mínimo  $z^*$  necesario para la evacuación de los  $k$  ocupantes del recinto.

**Sexto paso.** Las intersecciones de la línea vertical con las funciones  $p_j(z)$  de cada salida determinan los puntos, desde los cuales se trazan líneas horizontales, en el eje de ordenadas se efectúa la lectura de la asignación  $p_j(z^*)$  que corresponde a cada salida  $j$ .

$$p_j(z^*) = x_j^*$$

**Séptimo paso.** Finalmente se verifica que se ha producido la evacuación de la totalidad de ocupantes:

$$x_1^* + \dots + x_n^* = p_1(z^*) + \dots + p_n^*(z^*) = k$$



**Figura 4.7** Proceso para la obtención de la solución gráfica

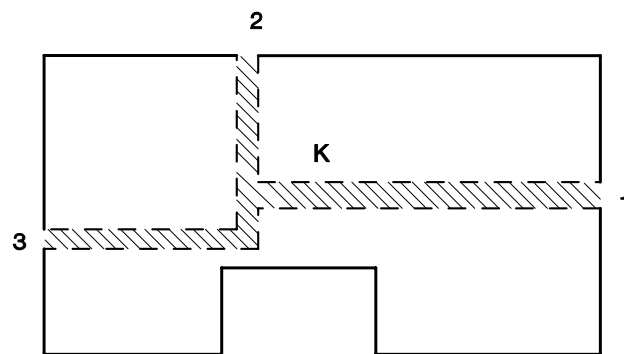
### 4.3.3 Aplicación numérica: Evacuación de un recinto de tres salidas

Sea una dependencia con una forma rectangular de  $60 \times 40$  metros con una inserción en la cara inferior de  $16,5 \times 18$  metros, resulta aproximadamente una superficie de  $2100 \text{ m}^2$  y una ocupación máxima de 610 personas, existen 3 salidas independientes identificadas como 1, 2 y 3 cuyas anchuras efectivas de paso son 2, 1,6 y 1,2 metros. Este recinto se representa en la figura 4.8 y se supone que los ocupantes inician la evacuación en el instante en que se produce la señal de alarma.

En este caso, si la totalidad de los ocupantes ocupan de forma inmediata las vías de evacuación se estima que se producirá en cada una de ellas una densidad de ocupación 2,6 Personas por metro cuadrado, situación que corresponde al nivel D de las tablas de ocupación de Fruins y al nivel F de las de circulación, en tales circunstancias es inevitable el contacto físico entre los ocupantes y no es posible efectuar adelantamientos.

Se supone que el flujo específico será constante durante todo el tiempo en que dura la evacuación, se estima que será de 65 personas por metro y minuto.

Se van a utilizar cuatro procedimientos para la resolución de este ejemplo: La solución analítica, la solución gráfica, la solución heurística y directamente a partir de la proporcionalidad de las anchuras mínimas de paso de las salidas.



**Figura 4.8** Ejemplo de recinto

Las soluciones analítica y gráfica aportarán procedimientos generales de resolución del problema, su valor resulta más instrumental, en la situación concreta que se ha planteado el problema, con los supuestos que se han efectuado la solución más eficaz consiste en aplicar directamente la proporcionalidad.

La **solución analítica** se inicia determinando la función  $t_j(x_j)$ , se obtiene a partir del flujo específico  $f_j$  que se registra en la salida  $j$  y de la anchura mínima de paso  $w_j$ .

Se estima que en las salidas se registran los siguientes flujos:

$$F_1 = 65 \times 2,0 = 130 \text{ Pers./min} = 2,17 \text{ Pers./s}$$

$$F_2 = 65 \times 1,6 = 104 \text{ Pers./min} = 1,73 \text{ Pers./s}$$

$$F_3 = 65 \times 1,2 = 78 \text{ Pers./min} = 1,30 \text{ Pers./s}$$

Entonces la función de evacuación  $t_j(x_j)$  de cada salida será:

$$t_1(x_1) = \frac{x_1}{F_1} = \frac{1}{2,17} x_1$$

$$t_2(x_2) = \frac{x_2}{F_2} = \frac{1}{1,73} x_2$$

$$t_3(x_3) = \frac{x_3}{F_3} = \frac{1}{1,30} x_3$$

El problema a resolver será encontrar el valor Min  $z$

$$z = \text{Max} \begin{cases} t_1(x_1) = \frac{1}{2,17} x_1 \\ t_2(x_2) = \frac{1}{1,73} x_2 \\ t_3(x_3) = \frac{1}{1,30} x_3 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}x_1 + x_2 + x_3 &= 610 \\x_1 \geq 0, \quad x_2 \geq 0, \quad x_3 \geq 0\end{aligned}$$

Se hallan las funciones inversas de  $t^{-1}(x)$  para cada una de las salidas, indican el número de personas que pueden abandonar el recinto por cada salida en un tiempo  $z$

$$\begin{aligned}p_1(z) &= 2,17z \\p_2(z) &= 1,73z \quad z \geq 0 \\p_3(z) &= 1,30z\end{aligned}$$

Si las salidas son independientes resulta

$$P_T(z) = p_1(z) + p_2(z) + p_3(z) = 5,20z \quad z \geq 0$$

El flujo total de salida del recinto será  $F = 5,20$  Pers./ s

Es posible determinar el tiempo mínimo de evacuación  $z^*$  sustituyendo en la ecuación anterior, para la ocupación del recinto 610 ocupantes.

$$z^* = \frac{610}{5,20} = 117,31 \text{ segundos}$$

Igualando el tiempo de evacuación en cada ruta

$$t_j(x_j) = z^*$$

Resulta la asignación óptima de ocupantes. Número de personas que pueden utilizar la salida  $j$  en el tiempo  $z^*$

$$\begin{aligned}x_j &= t_j(x_j) F_j = (z^*) F_j \\x_1 &= 117,31 \times 2,17 = 254,55 \cong 255 \text{ Pers.} \\x_2 &= 117,31 \times 1,73 = 202,94 \cong 203 \text{ Pers.} \\x_3 &= 117,31 \times 1,30 = 152,5 \cong 152 \text{ Pers.}\end{aligned}$$

Se ha efectuado la correspondiente aproximación para transformar en números enteros el número de personas que utilizan cada salida. Finalmente se debe verificar la evacuación de la totalidad de los ocupantes:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 610$$

En este caso no ha sido preciso efectuar ajustes en la aproximación antes efectuada.

Una alternativa habría sido resolver el problema directamente utilizando números enteros.

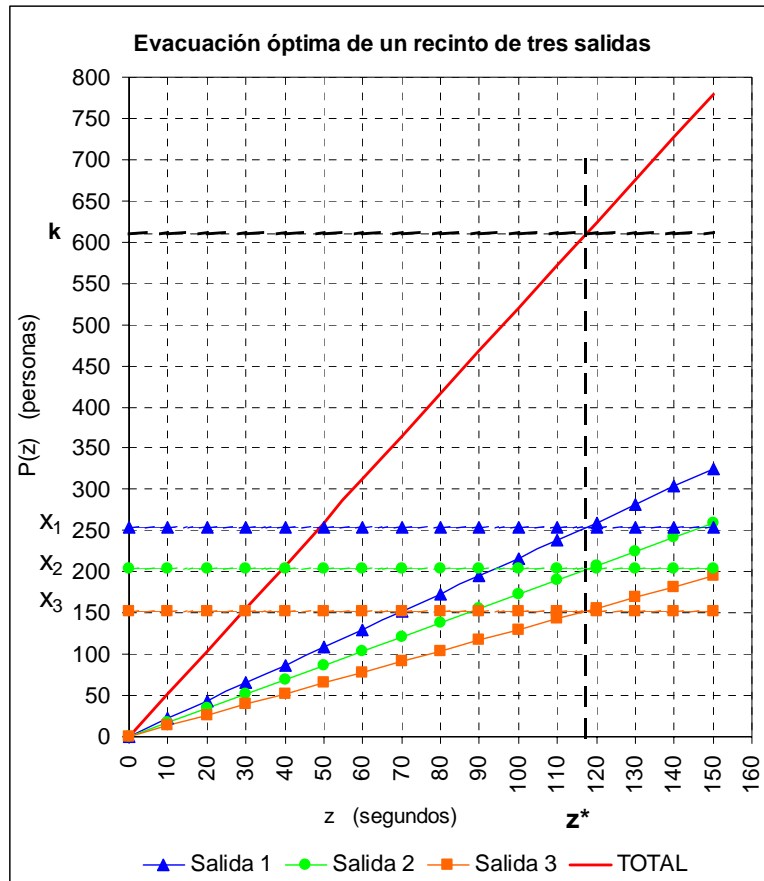
**La solución gráfica del problema** se apoya en la solución analítica del apartado anterior, por ello directamente se procede a la representación gráfica de las funciones de evacuación inversas de cada una de las salidas  $p_1(z)$ ,  $p_j(z)$ ,  $p_n(z)$  y la función de evacuación total  $P_T(z)$ .

Se utiliza un rango de representación, entre 0 y 750 ocupantes resultando el gráfico de la figura 4.9, el proceso de solución directamente se sitúa en el segundo apartado

**Segundo paso.** Se representan las funciones de evacuación inversa  $p_j(z)$  de cada una de las salidas.

**Tercer paso.** Se representa la función de evacuación total  $P_T(z)$

**Cuarto paso.** Se sitúa el valor  $k = 610$  en el eje de ordenadas y desde este punto se traza una línea horizontal paralela al eje de abscisas hasta el punto de intersección con la línea  $P_T(z)$ .



**Figura 4.9** Solución gráfica de la aplicación propuesta

**Quinto paso.** Desde este punto se traza una línea vertical perpendicular al eje de abscisas, en el eje de abscisas se lee el tiempo necesario para la evacuación de los 610 ocupantes, resulta  $z = 118$  s

**Sexto paso.** A partir de las intersecciones de la línea vertical con la función  $p_j(z)$  se trazan líneas horizontales que cortan el eje de ordenadas.

En los puntos de intersección con dicho eje se efectúa la lectura de la asignación que corresponde a cada salida. En un gráfico más ampliado se determina

$$P_1(z) = 254 \text{ Pers.}$$

$$P_2(z) = 204 \text{ Pers.}$$

$$P_3(z) = 152 \text{ Pers.}$$

**Séptimo paso.** Se verifica que se ha realizado la evacuación de la totalidad de los ocupantes.

$$x_1 + x_1 + x_1 = 254 + 204 + 152 = 610$$

En este ejemplo, en el cual no se han considerado los recorridos de evacuación y se ha considerado la identidad de los flujos específicos que se registran en cada salida, se podría haber resuelto directamente a partir de **la proporcionalidad** de las mismas.

Si las anchuras mínimas de paso de cada una de las salidas y la total del edificio son:

$$w_1 = 2,0 \quad w_2 = 1,6 \quad w_3 = 1,2 \quad w_T = 4,8$$

entonces la asignación que resulta en cada una de las salidas será:

$$x_1 = 610 \frac{2}{4,8} = 254,17 \cong 254 \text{ Pers.}$$

$$x_2 = 610 \frac{1,6}{4,8} = 203,33 \cong 203 \text{ Pers.}$$

$$x_3 = 610 \frac{1,2}{4,8} = 152,5 \cong 153 \text{ Pers.}$$

En esta situación se valida aquello que intuitivamente parece razonable, el número de ocupantes asignado a cada salida: Proporcional a la anchura mínima de la salida. Este “principio” queda totalmente invalidado cuando el valor del flujo que se registra en las salidas es distinto o bien se consideran recorridos de evacuación.

El tiempo de evacuación óptimo  $z^*$  puede determinarse directamente sustituyendo la asignación obtenida en una salida en la expresión de la función de evacuación

$$z^* = t_j(x_j) = \left( \frac{1}{F_j} \right) x_j$$

Por ejemplo operando con las magnitudes correspondientes de la primera salida resulta

$$z^* = \left( \frac{1}{2,17} \right) \times 254,55 = 117,30 \text{ segundos}$$

**La solución heurística** se obtiene mediante la aplicación denominada EXITR, en la cual se utiliza en este ejemplo se emplea el paso de resolución de valor 1 y la solución resulta inmediata obteniendo idénticos resultados que mediante los otros procedimientos descritos.

### EXITRV1

#### Datos

<b>Ocupación total</b>	610		
	<b>RUTA</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Anchura efectiva mínima (m)</b>	2	1,6	1,2
<b>Densidad estimada (Pers./ m<sup>2</sup>)</b>	2,6	2,6	2,6
<b>Flujo específico (Pers./ m min)</b>	65	65	65

Resultados

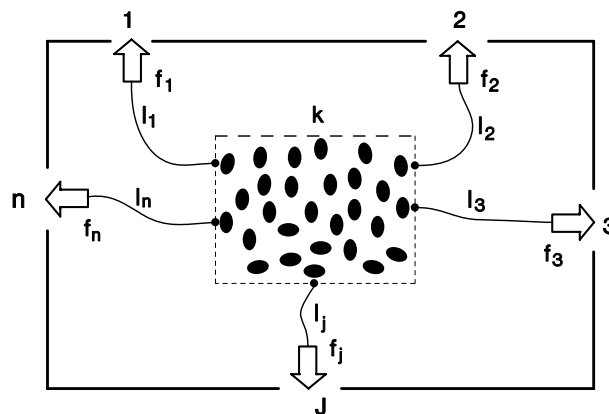
Asignación ( Pers.)	RUTA		
		255	203
$t_{2i}$ (s)	117,69	117,11	116,92
$t_{TOTAL}$ (s)	117,69		

**Tabla 4.2** Tabla de resultados de la solución heurística en el ejemplo propuesto

#### 4.4 EVACUACIÓN DE UN RECINTO EN EL TIEMPO MÍNIMO CON FLUJO CONSTANTE, RECORRIDO Y DEMORA EN EL INICIO DE LA DE EVACUACIÓN

##### 4.4.1 Análisis y solución del problema

Una situación más general que la estudiada en el caso anterior consiste en considerar los recorridos que deben efectuar los ocupantes del recinto para llegar hasta la salida y las demoras en el inicio de la evacuación. En el momento de producirse la señal de alarma  $x_j$  ocupantes, después de un tiempo  $t_{0j}$  se dirigen hacia cada salida  $j$ . Los flujos de circulación se supone que son unidireccionales y constantes durante todo el tiempo que dura la evacuación. En función de la densidad de ocupación de la vía de evacuación la magnitud del flujo puede estimarse a partir del modelado del movimiento de las personas realizado por J. Fruins [45].



**Figura 4.10** Ejemplo de recinto

Para obtener la **solución analítica** en la salida  $j$ , cuya anchura mínima es  $w_j$ , existe un recorrido hasta el destino de longitud total  $l_j$ , se produce una densidad de ocupación  $d_j$ , se estima que los ocupantes que se dirigen hacia la salida lo harán con una velocidad  $v_j$  y habrá un flujo específico  $f_j$ , ambas magnitudes se suponen constantes durante todo el tiempo que dura la evacuación.

El tiempo  $t_{1j}$  que se tardará en llegar a cada destino según la expresión (3.8) vendrá dado por

$$t_{1j} = \frac{l_j}{v_j}$$

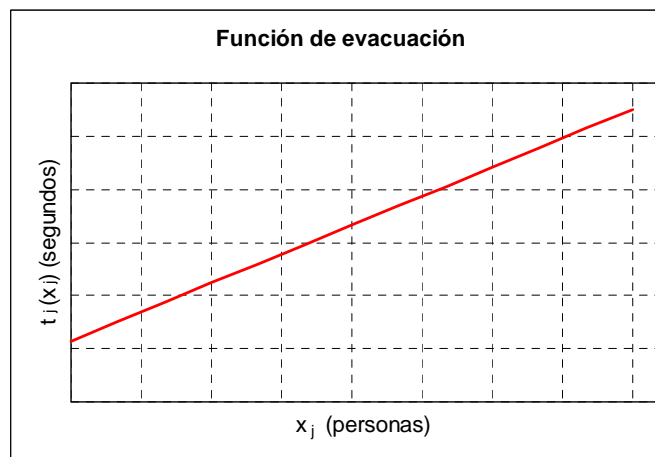
hasta este instante  $t_{1j}$  el flujo de llegada en el destino es nulo, y a partir del mismo la magnitud del flujo  $F_j$  resultante de la salida  $j$  lo proporciona la expresión (3.10) y resulta

$$F_j = f_j w_j$$

Si los ocupantes que se dirigen a la salida  $j$  demoran el inicio de la evacuación un tiempo  $t_{0j}$ , la función de evacuación  $t_j(x_j)$  de la salida  $j$  a partir de la expresión (3.30) definitivamente

$$t_j(x_j) = t_{0j} + \frac{l_j}{v_j} + \left( \frac{1}{F_j} \right) x_j \quad 0 \leq x_j \leq k$$

En la función de evacuación se contabiliza la demora en el inicio de la evacuación, el tiempo de recorrido y el flujo por el punto de anchura mínima. En este caso, un modelo de flujo constante, la función de evacuación adopta la forma representada en la figura 4.11. La ordenada en el origen corresponde a la suma de tiempos de demora en el inicio de la evacuación y de recorrido, mientras que la pendiente de la función corresponde al inverso del flujo.



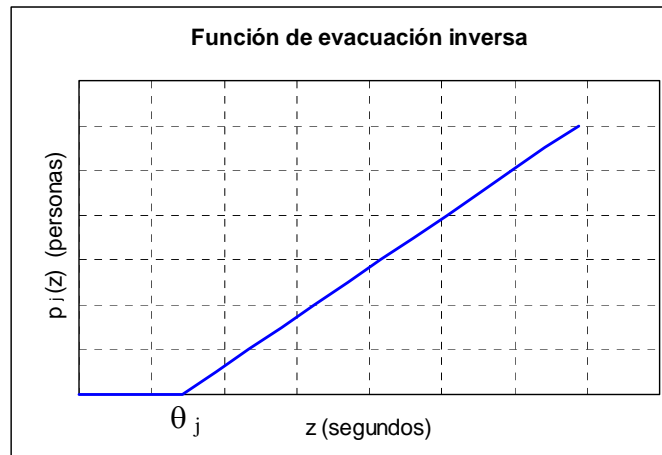
**Figura 4.11** Forma de la función de evacuación en flujo constante recorrido y demora

Si el flujo es constante, se producen demoras al inicio de la evacuación, y se contabilizan los tiempos de recorrido hasta las salidas, la forma analítica de la función de evacuación inversa viene dada por la siguiente expresión:

$$p_j(z) = \begin{cases} 0 & z < (t_{0j} + t_{1j}) \\ \left[ z - (t_{0j} + t_{1j}) \right] F_j & z \geq (t_{0j} + t_{1j}) \end{cases} \quad (4.23)$$

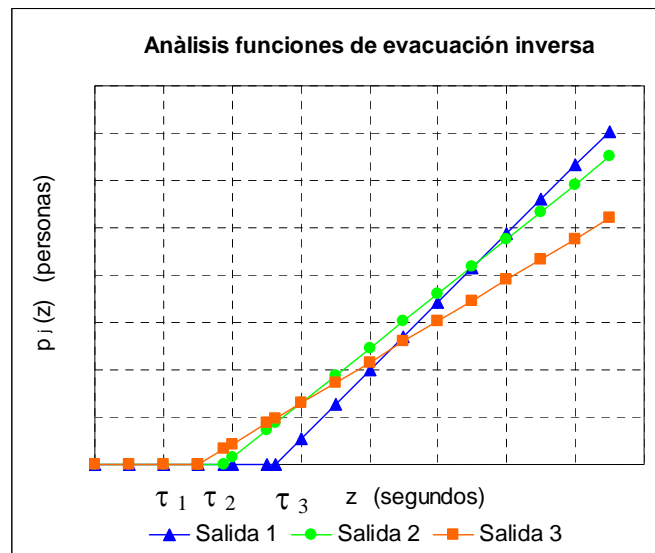
La forma que adopta esta función es la representada en la figura 4.12, si analizamos detenidamente esta función se aprecia como hasta que ha transcurrido el tiempo de demora y recorrido  $\theta_j$ , ningún ocupante es capaz de abandonar el recinto y a partir de este instante, el número de personas por unidad de tiempo que abandonan el recinto por la salida  $j$  en cada instante se refleja en la pendiente de la función, corresponde a la magnitud del flujo de la salida  $F_j$ .





**Figura 4.12** Forma que adopta la función de evacuación inversa

Si en un recinto existen  $n$  salidas independientes, el número total de personas capaces de abandonar el recinto en un tiempo  $z$ , vendrá dado por  $P(z)$  obtenida considerando de forma adecuada las discontinuidades de cada  $p_j(z)$ . En la figura 4.13 puede observarse la representación de las funciones de evacuación inversa de un recinto que dispone de tres salidas, mediante  $\tau_j$  se indican los puntos de discontinuidad  $\theta_j$  ordenados, según la figura  $\tau_1 = \theta_3$ ,  $\tau_2 = \theta_2$  y  $\tau_3 = \theta_1$ . Se observa que hasta el instante  $\tau_1$  ningún ocupante habrá llegado hasta la salida, en el intervalo comprendido entre  $\tau_1$  y  $\tau_2$  sólo pueden abandonar el recinto los ocupantes que utilizan la salida 3 en la cual se registra un flujo  $F_3$ , en el instante  $\tau_2$  llegan a la salida los ocupantes que utilizan la salida 2 y desde este instante  $\tau_2$  hasta  $\tau_3$  se utilizan conjuntamente las salidas 3 y 2 siendo los flujos de salida  $F_3$  y  $F_2$ , finalmente a partir de  $\tau_3$  se utilizan las tres salidas siendo los flujos de salida la suma de  $F_1$ ,  $F_2$  y  $F_3$ .



**Figura 4.13** Función de evacuación inversas recinto tres salidas

Esta situación puede generalizarse, en principio mediante la expresión (4.24) se definen los puntos de discontinuidad de cada una de las salidas

$$\theta_j = t_{0j} + t_{1j} \tag{4.24}$$

Sea  $\Theta_1$  el conjunto inicial formado por los puntos de discontinuidad de las funciones  $p_j(z)$ . Si el recinto dispone de  $n$  salidas:

$$\Theta_1 = \{\theta_1, \dots, \theta_j, \dots, \theta_n\} \tag{4.25}$$

Se obtiene el primer punto de discontinuidad  $\tau_1$  y la función  $\pi_1$  asociada al mismo:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \text{Min} \{ \Theta_1 \} \\ \pi_1 &= [ p_j(z_j) \mid z_j = \tau_1 ] \end{aligned} \tag{4.26}$$

Sea  $\Theta_2$  el conjunto de puntos de discontinuidad pendientes de ordenar:

$$\Theta_2 = \{ \theta_j \mid \theta_j > \tau_1 \} \tag{4.27}$$

Se obtiene el segundo punto de discontinuidad  $\tau_2$  y la función  $\pi_2$  asociada al mismo:

$$\begin{aligned} \tau_2 &= \text{Min} \{ \Theta_2 \} \\ \pi_2 &= [ p_j(z_j) \mid z_j = \tau_2 ] \end{aligned} \tag{4.28}$$

En general, dado el conjunto de todos los puntos de discontinuidad no ordenados  $\Theta_j$ :

$$\Theta_j = \{ \theta_j \mid \theta_j > \tau_{j-1} \} \tag{4.29}$$

Se obtiene el  $j$ -ésimo punto de discontinuidad  $\tau_j$  y la función correspondiente  $\pi_j$ :

$$\begin{aligned} \tau_j &= \text{Min} \{ \Theta_j \} \\ \pi_j &= [ p_j(z_j) \mid z_j = \tau_j ] \end{aligned} \tag{4.30}$$

Con ello se ordenan las funciones inversas de evacuación según sus puntos de discontinuidad:

$$\begin{aligned} &\{ \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n \} \\ &\tau_1 < \tau_2, \dots < \tau_j < \dots, \tau_n \\ &\{ \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n \} \end{aligned} \tag{4.31}$$

Para determinar la función de evacuación inversa global  $P(z)$ , basta sumar las funciones de evacuación inversa de cada salida considerando de forma adecuada las discontinuidades.

$$P(z) = \begin{cases} 0 & 0 \leq z < \tau_1 \\ \pi_1 & \tau_1 \leq z < \tau_2 \\ \pi_1 + \pi_2 & \tau_2 \leq z < \tau_3 \\ \dots & \dots \\ \pi_1 + \dots + \pi_{n-1} & \tau_{n-1} \leq z < \tau_n \\ \pi_1 + \dots + \pi_{n-1} + \pi_n & \tau_n \leq z \end{cases} \tag{4.32}$$

Hasta que se utilizan todas las salidas existe un periodo transitorio, a partir del instante  $\tau_n$  cuando se utilizan todas las salidas resulta el período estacionario.

En el intervalo  $0 < z < \tau_1$  ningún ocupante habrá alcanzado una salida, mientras que en el intervalo  $\tau_1 < z < \tau_2$  solamente se utiliza una, en el intervalo  $\tau_2 \leq z < \tau_3$  se utilizan las

dos salidas, y así sucesivamente hasta utilizarse todas las salidas y resulta el período estacionario.

En la función  $P(z)$  existen dos zonas: Un período transitorio  $z \leq \tau_n$  y un periodo estacionario  $z > \tau_n$ . Normalmente el periodo transitorio es corto y en el estudio de problemas de evacuación reales tiene escasa trascendencia, la evacuación de recintos tiene interés con grandes ocupaciones que se sitúan en la zona estacionaria.

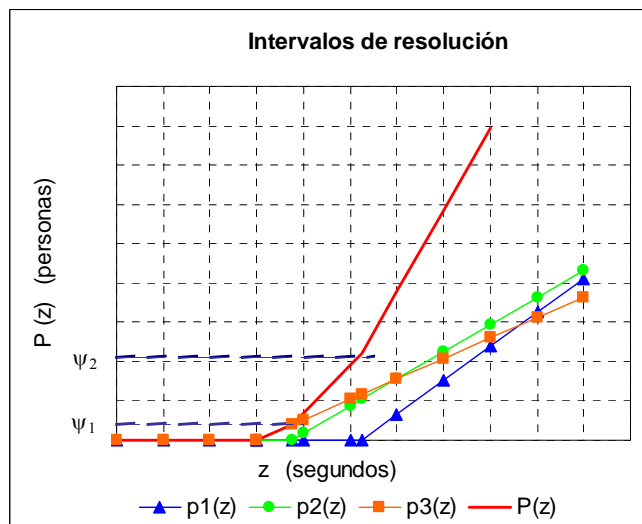
Para resolver el problema se debe situar el número de ocupantes  $k$  en el tramo correspondiente para ellos se debe acotar  $P(z)$  y conocer los puntos de discontinuidad.

$$\begin{aligned}
 z = \tau_1 &\Rightarrow P(z=\tau_1) = \psi_1 \\
 z = \tau_2 &\Rightarrow P(z=\tau_2) = \psi_2 \\
 &\dots\dots\dots \\
 z = \tau_n &\Rightarrow P(z=\tau_n) = \psi_n
 \end{aligned}
 \tag{4.33}$$

Con ello quedan definidos los tramos de ocupación  $\{ 0-\psi_1, \psi_1-\psi_2, \dots\dots\dots \psi_{n-1}-\psi_n, \}$  e identificados los tramos en los cuales se debe resolver la función de evacuación inversa global  $P(z)$ . Resultan las siguientes situaciones:

$$\begin{aligned}
 0 \leq k \leq \psi_1 &\Rightarrow P(z) = 0 \\
 \psi_1 < k \leq \psi_2 &\Rightarrow P(z) = \pi_1 \\
 \psi_2 < k \leq \psi_3 &\Rightarrow P(z) = \pi_1 + \pi_2 \\
 &\dots\dots\dots \\
 \psi_n < k &\Rightarrow P(z) = \pi_1 + \pi_2 + \dots + \pi_n
 \end{aligned}
 \tag{4.34}$$

En el ejemplo planteado puede observarse la situación de los valores  $\psi_1$  y  $\psi_2$ , efectivamente se trata de unos valores en el eje de ordenas que sitúan el tramo de resolución de  $P(z)$ .



**Figura 4.14** Situación de los tramos de resolución

Definida  $P(z)$  el proceso de solución es equivalente al descrito en el apartado 4.3.1. La función de evacuación adopta la forma

$$P(z) = F_1 z + F_2 z + \dots + F_n z = z \left( \sum_{j=1}^n F_j \right)$$

El flujo total  $F$  de salida del recinto será la suma de los flujos registrados en cada una de las salidas utilizadas, todas en el intervalo estacionario y un número menor en el transitorio

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n = \sum_{j=1}^n F_j$$

resolviendo

$$P(z) = zF$$

se obtiene el valor del tiempo mínimo  $z$ , necesario para la evacuación de  $k$  ocupantes

$$z^* = \frac{k}{F}$$

Conocido el tiempo de evacuación del recinto  $z^*$ , se determina la asignación óptima de ocupantes hacia cada salida

$$x_j^* = t_j(x_j)F_j = (z^*)F_j = \left( \frac{k}{F} \right) F_j = k \left( \frac{F_j}{F} \right)$$

Ciertamente, prácticamente la totalidad de problemas de evacuación de recintos se sitúan en la zona estacionaria.

**Solución gráfica.** El proceso a seguir para obtener la solución gráfica del problema es el mismo que se ha seguido en casos anteriores, el único aspecto diferente que debe considerarse de forma adecuada radica en la obtención de la función de evacuación  $P(z)$ . Realmente la composición gráfica de  $P(z)$  puede resultar más simple que la resolución analítica.

**Solución heurística.** También la solución heurística coincide con la descrita en el apartado anterior con los correspondientes ajustes en la función de evacuación al considerar los recorridos de circulación.

#### 4.4.2 Aplicación numérica: recorridos de evacuación

Se trata de resolver el ejemplo planteado en el apartado 4.3.3, la situación es notablemente distinta cuando los ocupantes no se hallan en disposición de abandonar el recinto, se considera que los ocupantes que se dirigen a la salida 1 deben efectuar un recorrido de 35 metros, 20 metros los que se dirigen a la salida 2 y 25 metros los que utilizan la salida 3. Se supone que no se registran demoras en el inicio de la evacuación. Se estima que la velocidad de circulación de los ocupantes es de 40 m / min y se supone constante durante todo el intervalo de tiempo que dura la evacuación del recinto.

**Solución analítica.** En primer lugar se determinan los puntos de discontinuidad en las funciones  $p_j(z)$ , al no considerar demoras simplemente se trata de conocer el instante en el cual los ocupantes alcanzan cada una de las salidas. Según la expresión (3.8) resulta

$$t_{1,1} = \frac{35}{40} \times 60 = 52,5$$

$$t_{1,2} = \frac{25}{40} \times 60 = 37,5$$

$$t_{1,3} = \frac{20}{40} \times 60 = 30$$

La función  $t_j(x_j)$ , considerando para cada ruta  $j$ , los flujos  $f_j$  y las velocidades  $v_j$  constantes será:

$$t_1(x_1) = 52,5 + \frac{1}{2,17} x_1$$

$$t_2(x_2) = 37,5 + \frac{1}{1,73} x_2$$

$$t_3(x_3) = 30 + \frac{1}{1,30} x_3$$

$t_{ij}(x_j)$  es el tiempo que tardarán en llegar a la salida los ocupantes que utilizan la ruta  $j$ , se trata de encontrar el mínimo valor de  $z$ , siendo  $z$  el valor máximo de las funciones de evacuación de cada salida

$$z = \text{Max} \begin{cases} t_1(x_1) = 52,5 + \frac{1}{2,17} x_1 & x_1 \geq 0 \\ t_2(x_2) = 37,5 + \frac{1}{1,73} x_2 & x_2 \geq 0 \\ t_3(x_3) = 30 + \frac{1}{1,30} x_3 & x_3 \geq 0 \end{cases}$$

Se hallan las funciones de evacuación inversa de cada una de las salidas

$$p_1(z) = \begin{cases} 0 & 0 \leq z < 52,50 \\ 2,17z & z \geq 52,50 \end{cases}$$

$$p_2(z) = \begin{cases} 0 & 0 \leq z < 37,50 \\ 1,73z & z \geq 37,50 \end{cases}$$

$$p_3(z) = \begin{cases} 0 & 0 \leq z < 30 \\ 1,30z & z \geq 30 \end{cases}$$

Según la expresión (4.25) se determina el conjunto inicial formado por los puntos de discontinuidad  $\Theta_1$

$$\Theta_1 = \{ 52,5; 37,5; 30 \}$$

Según (4.26) se obtiene el primer punto de discontinuidad  $\tau_1$  y la función  $\pi_1$  asociada al mismo:

$$\tau_1 = \text{Min} \{ \Theta_1 \} = 30$$

$$\pi_1 = \left[ p_j(z_j) \mid z_j = \tau_1 \right] = p_3(z)$$

Sea  $\Theta_2$  el conjunto de puntos de discontinuidad pendientes de ordenar:

$$\Theta_2 = \{ z_{j1} \mid z_{j1} > \tau_1 \} = \{ 52,5; 37,5 \}$$

Se obtiene el segundo punto de discontinuidad  $\tau_2$  y la función  $\pi_2$  asociada al mismo según la expresión (4.28), resultando:

$$\tau_2 = \text{Min} \{ \Theta_2 \} = 37,5$$

$$\pi_2 = \left[ p_j(z_j) \mid z_j = \tau_2 \right] = p_2(z)$$

Finalmente

$$\tau_3 = 52,5$$

$$\pi_3 = p_3(z)$$

Se han ordenado las funciones inversas de evacuación según sus puntos de discontinuidad:

$$\{ 30; 37,5; 52,5 \}$$

$$\{ \pi_1 = p_3(z), \pi_2 = p_2(z), \pi_3 = p_1(z) \}$$

Al suponer la independencia entre las vías de evacuación y considerar de forma adecuada los puntos de discontinuidad resulta

$$P_T(z) = \begin{cases} 0 & 0 \leq z < 30 \\ \pi_1 = 1,30z - 39 & 30 \leq z < 37,5 \\ \pi_1 + \pi_2 = 3,03z - 103,875 & 37,5 \leq z < 52,5 \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 = 5,20z - 217,8 & 52,5 \leq z \end{cases}$$

Se debe situar el número de ocupantes  $k$  en el tramo correspondiente para ellos se debe acotar  $P(z)$  y conocer los puntos de discontinuidad.

$$z = 30 \Rightarrow P(z=30) = \psi_1 = 0$$

$$z = 37,5 \Rightarrow P(z=37,5) = 9,75$$

$$z = 52,5 \Rightarrow P(z=52,5) = 55,2$$

Con ello quedan definidos los tramos de ocupación, resultan las siguientes situaciones:

$$0 \leq k \leq 9,75 \quad \Rightarrow P(z) = 1,39z - 39$$

$$9,75 < k \leq 55,2 \quad \Rightarrow P(z) = 3,03z - 103,875$$

$$55,2 < k \quad \Rightarrow P(z) = 5,20z - 217,8$$

En este caso si la ocupación es de 610 personas se trata de resolver  $P_T(z) = 610$  en el último tramo

$$5,20z - 217,8 = 610$$

resultando

$$z^* = \frac{610 + 217,8}{520} = 159,19 \text{ segundos}$$

Igualando  $t_j(x_j) = z^*$

es posible determinar la asignación óptima. Resulta la siguiente distribución hacia cada una de las salidas:

$$x_1 = p_1(z) = 2,17(159,19 - 52,50) = 231,52 \cong 231$$

$$x_2 = p_2(z) = 1,73(159,19 - 37,50) = 210,53 \cong 211$$

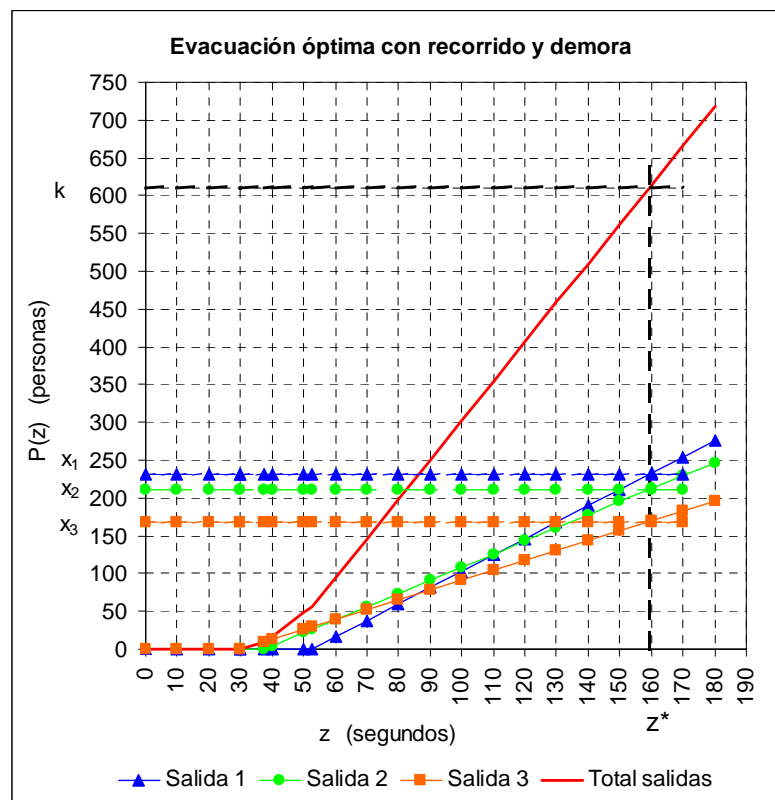
$$x_3 = p_3(z) = 1,30(159,19 - 30) = 167,95 \cong 168$$

Necesariamente debe verificarse que se cumple la condición de la evacuación de la totalidad de ocupantes.

$$x_1 + x_2 + x_3 = 231 + 211 + 168 = 610$$

En este caso no es preciso efectuar ninguna corrección en las aproximaciones efectuadas.

**Solución gráfica.** La función  $t_j(x_j)$  es una función lineal con término independiente, que corresponde al tiempo necesario para que los ocupantes lleguen a la salida.



**Figura 4.15** Optimización de la evacuación

Se procede a la representación gráfica de las funciones inversas para cada vía de evacuación  $p_1(z)$ ,  $p_j(z)$ ,  $p_n(z)$  y el total del recinto  $P_T(z)$ . Se representa el tiempo en el eje de abscisas y el número de ocupantes en el eje de ordenadas.

La gráfica permite efectuar la lectura del tiempo mínimo de evacuación para un determinado número de ocupantes dentro del intervalo de la representación. También resulta inmediato conocer la distribución óptima.

Se obtiene el gráfico de la figura 4.15, los resultados se obtienen de la misma forma que en el apartado 12.1.3.

En el gráfico se efectúa la lectura del tiempo de evacuación de 159 segundos y una asignación:

$$x_1 = 230 \text{ Pers.}$$

$$x_2 = 210 \text{ Pers.}$$

$$x_3 = 170 \text{ Pers.}$$

Valores cuya suma corresponde a la evacuación de la totalidad de los ocupantes.

**Solución heurística.** Se ha utilizado la aplicación EXITR, en este caso se ha considerado el recorrido hasta los destinos en la función de evacuación, la solución resulta inmediata obteniendo los mismos resultados que mediante el procedimiento analítico y la solución gráfica.

EXITRV2			
<u>Datos</u>			
<b>Ocupación total</b>	610		
	RUTA		
	1	2	3
<b>Anchura efectiva mínima (m)</b>	2	1,6	1,2
<b>Distancia hasta la salida (m)</b>	35	25	20
<b>Densidad estimada (Pers./ m<sup>2</sup>)</b>	2,6	2,6	2,6
<b>Velocidad circulación (m / min)</b>	40	40	40
<b>Flujo específico (Pers./ m min)</b>	65	65	65
<u>Resultados</u>			
	RUTA		
<b>Asignación ( Pers.)</b>	232	211	167
<b>t<sub>i</sub> (s)</b>	159,58	159,23	158,46
<b>t<sub>TOTAL</sub> (s)</b>	159,58		

**Tabla 4.3** Tabla de resultados de la solución heurística

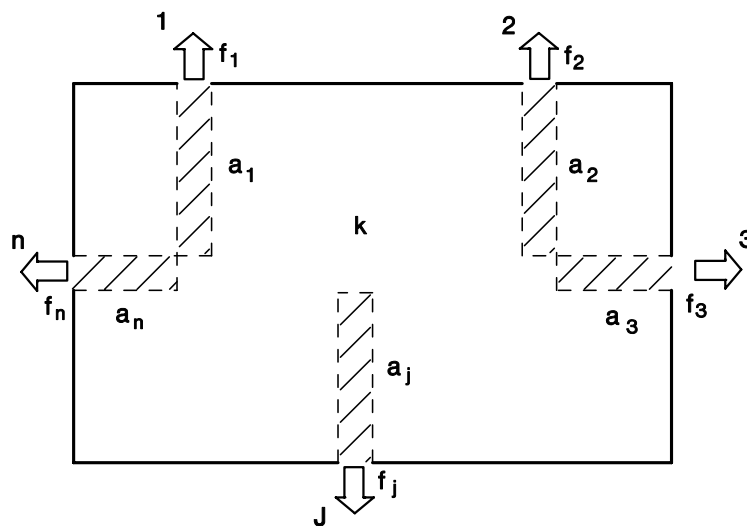
#### 4.5 EVACUACIÓN DE UN RECINTO EN EL TIEMPO MÍNIMO CON FLUJO DE SALIDA FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE OCUPACIÓN

En el modelo inicial propuesto en apartados anteriores, los valores de los flujos de salida se obtienen a partir del modelo de circulación de J. Fruins. La utilización de los modelos



de circulación de Fruins para definir la ocupación y las magnitudes de circulación (flujos y velocidades), exige predecir en primera instancia las densidades de ocupación que se van a producir en cada salida y en función de la geometría de la misma efectuar la lectura de los valores de los flujos en la tabla correspondiente. Pronosticar a priori los flujos y las velocidades, además de resultar complejo en la mayoría de ocasiones, supone condicionar el resultado del problema a estos valores ya que a partir de estos valores se determina la asignación óptima de cada salida. El resultado del problema queda condicionado por los valores del flujo supuestos inicialmente, dependiendo la validez de los resultados del acierto en el pronóstico de los valores iniciales.

Por el contrario, si se utilizan las ecuaciones propuestas en los años 90 por H. Nelson y H. McLennan [107] para el modelado del movimiento de las personas, no se establece ninguna condición previa a los valores de la velocidad y de los flujos de circulación que se van a producir en cada salida; sencillamente son función del número de personas que las utilizan y de las características geométricas del recinto.



**Figura 4.16** Modelo de flujo función de la densidad de ocupación

Esta situación puede observarse en la figura 4.16, en ella puede suponerse que hacia cada salida  $j$  existe una zona de circulación cuya superficie es  $a_j$  en la cual la densidad de ocupación que se produzca  $d_j$ , será función del número de ocupantes  $x_j$  que utilicen la salida y ello determina las magnitudes de circulación, en este caso no se consideran los recorridos.

$$d_j = \frac{x_j}{a_j}$$

En función de la densidad resultarán las velocidades y los flujos de circulación. Magnitudes éstas, definidas según el modelado del movimiento de las personas formulado por Nelson y McLennan [107]. La principal característica de este modelo de circulación es la relación lineal existente entre la velocidad de circulación y la densidad. Así cuando la densidad de ocupación está comprendida entre 0,5382 y 3,5 personas por metro cuadrado, la velocidad de circulación y el flujo son función de la densidad de ocupación. En

cambio, cuando la densidad de ocupación es inferior a 0,5382 personas por metro cuadrado el movimiento de los individuos depende de sus características personales. En este caso las magnitudes que lo definen tienen una gran variabilidad, es por ello que se toma una velocidad media constante e independiente de la densidad, de 1,1996 metros por segundo para el caso de circulación horizontal.

$$v(d_j) = \begin{cases} 1,1996 & 0 < d_j \leq 0,5382 \\ \lambda(1 - \alpha d_j) & 0,5382 < d_j \leq 3,5 \end{cases}$$

donde  $v$  es la velocidad de circulación,  $d$  la densidad,  $\alpha$  y  $\lambda$  son valores constantes. Así por ejemplo el parámetro  $\lambda$  se halla tabulado para distintas geometrías y toma el valor 1,40 metros por segundo en el caso de circulación horizontal y operando con unidades decimales  $\alpha$  toma el valor de 0,266 metros cuadrados por persona.

Luego el flujo viene determinado por el producto de la velocidad de circulación y la densidad:

$$F_j(d_j) = \begin{cases} d_j w_j v(d_j) = 1,1996 d_j w_j & 0 < d_j \leq 0,5382 \\ d_j w_j v(d_j) = \lambda(1 - \alpha d_j) d_j w_j & 0,5382 < d_j \leq 3,5 \end{cases}$$

donde  $w_j$  es la anchura mínima de la salida  $j$ .

Expresando las velocidades y los flujos en función de las personas  $x_j$  que utilizan la salidas y de las superficies de los recintos  $a_j$  que conducen a las mismas, resultan las expresiones:

$$v(x_j) = \begin{cases} 1,1996 & 0 < x_j \leq 0,5382 a_j \\ \lambda \left( 1 - \alpha \frac{x_j}{a_j} \right) & 0,5382 a_j < x_j \leq 3,5 a_j \end{cases} \quad (4.35)$$

$$F_j(x_j) = \begin{cases} \left( 1,1996 \frac{w_j}{a_j} \right) x_j & 0 < x_j \leq 0,5382 a_j \\ \lambda w_j \left( 1 - \alpha \frac{x_j}{a_j} \right) \frac{x_j}{a_j} & 0,5382 a_j < x_j \leq 3,5 a_j \end{cases} \quad (4.36)$$

Las expresiones (4.35) y (4.36) deben interpretarse como los valores que resultan de la velocidad y del flujo de circulación si utilizan la salida  $x_j$  personas.

Puede hallarse para cada salida el valor de la asignación  $x_j$  que produce el flujo máximo en la correspondiente salida, sencillamente se trata de resolver

$$\frac{d(F_j(x_j))}{d(x_j)} = 0$$

los flujos máximos se producirán en el intervalo  $0,5382 a_j < x_j \leq 3,5 a_j$ , entonces resulta

$$x_j = \frac{a_j}{2\alpha} \quad 0,5382 a_j < x_j \leq 3,5 a_j \quad (4.37)$$

En esta situación, en la cual no se consideran los recorridos de evacuación, la función de evacuación  $t_j(x_j)$  consiste simplemente en el tiempo de flujo

$$t_j(x_j) = \frac{x_j}{F_j(x_j)}$$

se obtiene

$$t_j(x_j) = \begin{cases} \frac{x_j}{F(x_j)} = \frac{a_j}{1,1996 w_j} & 0 < x_j \leq 0,5382 a_j \\ \frac{x_j}{F(x_j)} = \frac{(a_j)^2}{\lambda w_j (a_j - \alpha_j x_j)} & 0,5382 a_j < x_j \leq 3,5 a_j \end{cases} \quad (4.38)$$

y se definen los intervalos  $x_{jI}$  y  $x_{jS}$  de la función de evacuación

$$\begin{aligned} x_{jI} &= 0,5382 a_j \\ x_{jS} &= 3,5 a_j \end{aligned} \quad (4.39)$$

Se observa que si la utilización de la salida  $j$  está comprendida entre  $0 < x_j \leq 0,5382 a_j$  el tiempo de evacuación es constante.

Se obtiene la función de evacuación inversa  $p_j(z)$  para cada una de las  $j$  salidas, que determina el número de ocupantes que pueden salir en un tiempo  $z$  por  $j$

$$p_j(z) = \frac{a_j}{\alpha \lambda} \left( \lambda - \frac{a}{z w_j} \right) \quad z_{jI} < z \leq z_{jS} \quad (4.40)$$

siendo  $z_{jI}$  y  $z_{jS}$  los valores asociados a las ocupaciones  $x_{jI}$  y  $x_{jS}$

$$\begin{aligned} z_{jI} &= \frac{a_j}{1,1996 w_j} \\ z_{jS} &= \frac{(a_j)^2}{\lambda w_j (a_j - \alpha_j x_{jS})} \end{aligned} \quad (4.41)$$

Dado que existen varias salidas se definen los valores  $\theta_I$  y  $\theta_S$  que corresponden a los valores máximos y mínimos de  $z_{jI}$  y  $z_{jS}$  con el objetivo de establecer un intervalo estacionario de definición de  $P(z)$

$$\begin{aligned} \theta_I &= \text{Max} \{ z_{jI} \} \quad \forall j \\ \theta_S &= \text{Min} \{ z_{jS} \} \quad \forall j \end{aligned} \quad (4.42)$$

Si las salidas son independientes resulta

$$P(z) = \frac{1}{\alpha} \left( \sum_{j=1}^n a_j \right) - \frac{1}{\alpha \lambda z} \left( \sum_{j=1}^n \frac{(a_j)^2}{w_j} \right) \quad \theta_I \leq z \leq \theta_S \quad (4.43)$$

En estas condiciones la solución óptima del problema vendrá dada por (4.44) expresión en la cual resulta el tiempo mínimo  $z^*$  ( segundos ) en que pueden salir los  $k$  ocupantes del recinto

$$z^* = \frac{\frac{1}{\alpha \lambda} \left( \sum_{j=1}^n \frac{(a_j)^2}{w_j} \right)}{\frac{1}{\alpha} \left( \sum_{j=1}^n a_j \right) - k} \quad \theta_1 \leq z \leq \theta_s \quad (4.44)$$

#### 4.5.2 Aplicación numérica considerando los flujos función de la densidad

En el ejemplo descrito en el apartado 4.33 se considera que hacia cada salida existen unos pasillos cuyas superficies son 90, 75 y 70 metros cuadrados respectivamente siendo las anchuras mínimas de paso de 2, 1,6 y 1,2 metros. En este caso no es preciso efectuar suposición alguna, directamente según la expresión (4.36) se determinan los flujos que resultarían en las salidas en función de la asignación.

$$F_1(x_1) = \begin{cases} 0,0267 x_1 & 0 < x_1 \leq 48,44 \\ 0,0311 x_1 - 9,195 \cdot 10^{-5} (x_1)^2 & 48,44 < x_1 \leq 315 \end{cases}$$

$$F_2(x_2) = \begin{cases} 0,0256 x_2 & 0 < x_2 \leq 40,37 \\ 0,0299 x_2 - 1,059 \cdot 10^{-4} (x_2)^2 & 40,37 < x_2 \leq 262,50 \end{cases}$$

$$F_3(x_3) = \begin{cases} 0,0206 x_3 & 0 < x_3 \leq 37,67 \\ 0,0240 x_3 - 9,120 \cdot 10^{-5} (x_3)^2 & 37,67 < x_3 \leq 245 \end{cases}$$

Para cada una de las salidas mediante (4.37) puede determinarse las asignaciones que produce el valor de los flujos máximos

$$\begin{aligned} x_1 &= 169,17 \\ x_2 &= 140,98 \\ x_3 &= 131,58 \end{aligned}$$

Según (4.38) resulta la función de evacuación  $t_j(x_j)$  para cada una de las salidas indicando el tiempo necesario para salir  $x_j$  personas por el recorrido  $j$  considerando que no hay demoras ni recorridos

$$t_1(x_1) = \begin{cases} 37,513 & 0 < x_1 \leq 48,44 \\ \frac{1}{0,0311 - 9,195 \cdot 10^{-5} x_1} & 48,44 < x_1 \leq 315 \end{cases}$$

$$t_2(x_2) = \begin{cases} 39,076 & 0 < x_2 \leq 40,37 \\ \frac{1}{0,0299 - 1,059 \cdot 10^{-4} x_2} & 40,37 < x_2 \leq 262,50 \end{cases}$$

$$t_3(x_3) = \begin{cases} 48,627 & 0 < x_3 \leq 37,67 \\ \frac{1}{0,0240 - 9,120 \cdot 10^{-5} x_3} & 37,67 < x_3 \leq 245 \end{cases}$$

Seguidamente conviene determinar los valores  $z_{jI}$  y  $z_{jS}$  los valores asociados a las ocupaciones  $x_{jI}$  y  $x_{jS}$ , según la expresión dada en (4.41) resulta

$$\begin{aligned} z_{1I} &= 37,513 & z_{1S} &= 465,839 \\ z_{2I} &= 39,076 & z_{2S} &= 485,248 \\ z_{3I} &= 48,627 & z_{3S} &= 603,865 \end{aligned}$$

Una cuestión más compleja que se analiza en próximos apartados está en interpretar las situaciones en las cuales  $x_j$  es menor que  $x_{jI}$  y ello da lugar a un tiempo de evacuación  $z_I$ , entonces cuando  $z = z_I$  cabe pensar en la falta de definición de  $p_j(z)$ .

La función de evacuación inversa  $p_j(z)$  de cada una de las salidas en el intervalo de definición, que indica el número de ocupantes que pueden salir en un tiempo  $z$  por la ruta  $j$ , resulta:

$$\begin{aligned} p_1(z) &= 338,35 - \frac{10875,40}{z} & 37,513 \leq z \leq 465,839 \\ p_2(z) &= 281,95 - \frac{9440,45}{z} & 39,076 \leq z \leq 485,248 \\ p_3(z) &= 263,16 - \frac{10964,91}{z} & 48,627 \leq z \leq 603,865 \end{aligned}$$

La acotación que resulta de  $P(z)$  será

$$\begin{aligned} \theta_I &= \text{Max} \{ 37,513 \ 39,076 \ 48,627 \} = 48,627 \\ \theta_S &= \text{Min} \{ 465,839 \ 485,248 \ 603,865 \} = 465,839 \end{aligned}$$

definido el intervalo estacionario definitivamente resulta

$$P_T(z) = 883,46 - \frac{31280,76}{z} \quad 48,627 \leq z \leq 465,839$$

El tiempo mínimo  $z^*$  en que pueden salir los 610 ocupantes del recinto aplicando la expresión (4.44) será

$$z^* = \frac{31280,76}{883,46 - 610} = 114,39 \text{ segundos}$$

Permite encontrar la asignación óptima  $x_j$  a cada salida

$$\begin{aligned} x^*_{1I} &= p_1(z) = 338,35 - \frac{10875,40}{114,39} = 243,27 \cong 243 \text{ Personas} \\ x^*_{2I} &= p_2(z) = 281,95 - \frac{9440,45}{114,39} = 199,42 \cong 199 \text{ Personas} \end{aligned}$$

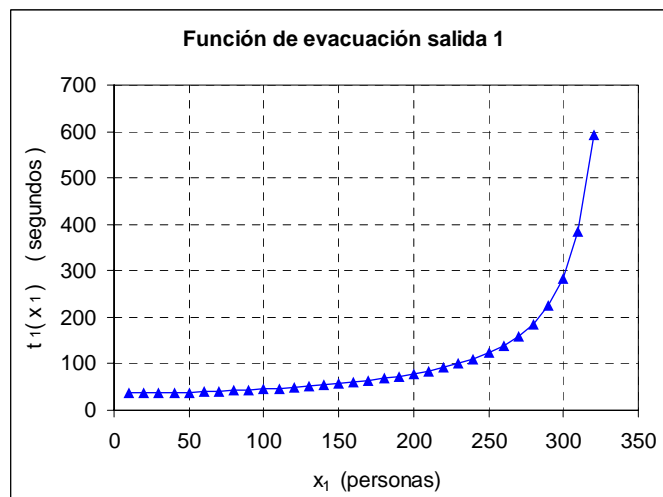
$$x_3^* = p_3(z) = 263,16 - \frac{10964,91}{114,39} = 167,30 \cong 167 \text{ Personas}$$

Necesariamente debe cumplirse que

$$x_1^* + x_2^* + x_3^* = 610$$

Resulta necesario ajustar la asignación realizada, para ello se asigna  $x_2^* = 200$

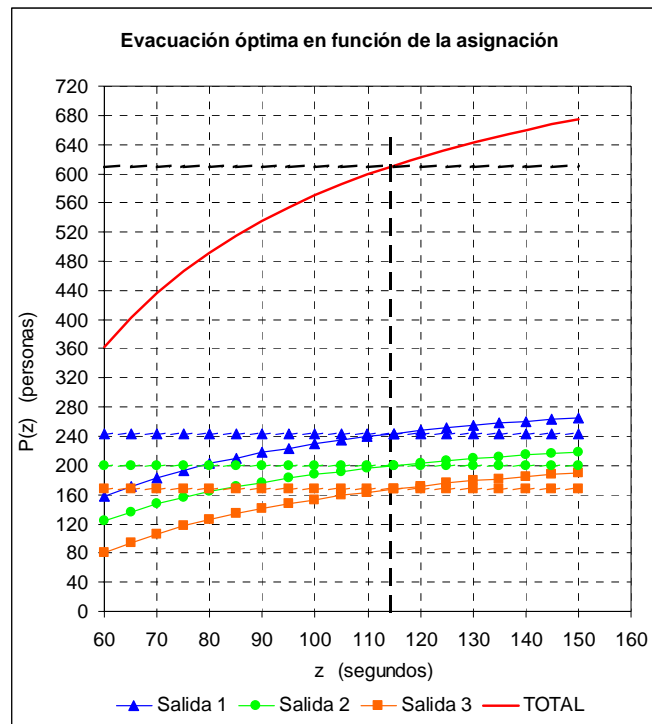
**Análisis y solución gráfica del problema.** Representando la función de evacuación para cada una de las salidas resultan los tiempos de evacuación en función del número de personas asignadas, este análisis resulta muy interesante porque se aprecian de forma inmediata las asignaciones que producen flujos máximos y tienden a la saturación de las salidas. Por ejemplo en la figura 4.17 correspondiente a la representación de la función de evacuación de la salida 1, se observa que si las asignaciones superan las 275 personas pueden resultar realmente peligrosas, el intervalo razonable de utilización de la salida está comprendido entre las 50 y las 275 personas.



**Figura 4.17** Representación de la función de evacuación de una salida

Realizando la misma representación en las otras dos salidas se determina que en la salida 2 tenemos los valores de 75 y 225 Personas y en la salida 3 tenemos 60 y 180 Personas. En ningún caso conviene superar estos valores máximos ello materialmente supone bloquear salida.

La solución gráfica del problema, si se limita al intervalo estacionario, realmente es similar a la realizada en los modelos de flujo constante y el proceso de resolución es idéntico. En la figura 4.17 se procede a mostrar la solución de la aplicación numérica, puede verificarse que los resultados resultan prácticamente idénticos.



**Figura 4.18** Optimización de la evacuación intervalo estacionario

En la gráfica puede efectuarse la lectura del tiempo de evacuación, aproximadamente 114 segundos, y la lectura de las asignaciones a cada salida:

$$P_1(z) = 240 \text{ Pers.}$$

$$P_2(z) = 200 \text{ Pers.}$$

$$P_3(z) = 170 \text{ Pers.}$$

Realmente puede destacarse la razonable coincidencia de los resultados obtenidos con este procedimiento gráfico y la solución analítica propuesta.

Se ha utilizando la aplicación EXITR, en este caso adaptada a esta situación en la cual los flujos se ha considerado que son directamente función de la asignación, la solución resulta inmediata obteniendo los mismos resultados que mediante el procedimiento analítico y la solución gráfica.

### EXITRV3

#### Datos

Ocupación total	610
-----------------	-----

	RUTA		
	1	2	3
Anchura efectiva mínima (m)	2	1,6	1,2
Distancia hasta la salida (m)	35	25	20
Densidad estimada ( Pers./ m <sup>2</sup> )	2,6	2,6	2,6
Velocidad circulación (m / min)	40	40	40
Flujo específico (Pers./ m min)	65	65	65

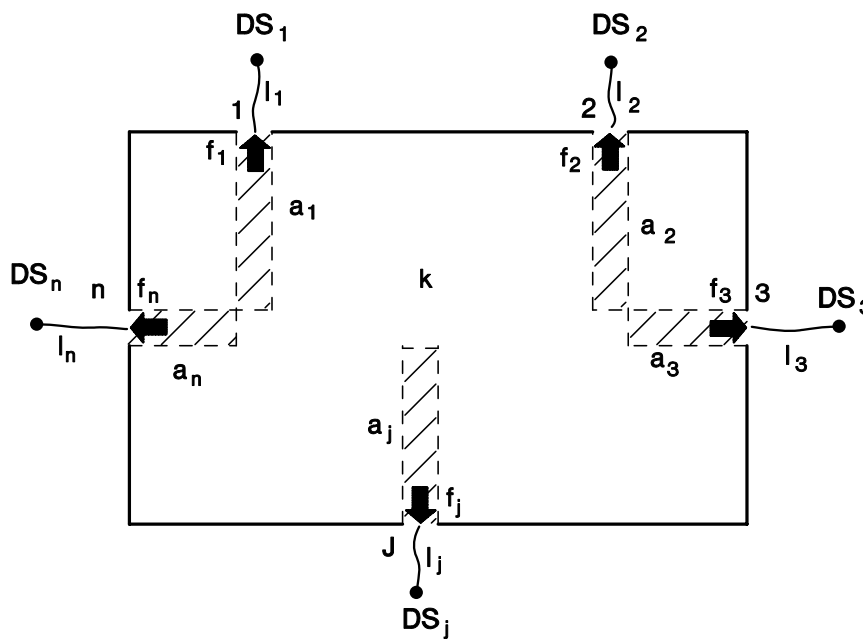
Resultados

Asignación (Pers.)	RUTA		
		243	200
$t_j$ (s)	114,06	115,19	114,03
$t_{TOTAL}$ (s)		115,19	

**Tabla 4.4** Tabla de resultados de la solución heurística

#### 4.6 EVACUACIÓN DE UN RECINTO EN EL TIEMPO MÍNIMO CONSIDERANDO RECORRIDOS Y LAS MAGNITUDES DE CIRCULACIÓN FUNCIONES DE LA DENSIDAD DE OCUPACIÓN

Una generalización de la situación analizada en el apartado anterior consiste en considerar los recorridos hasta los destinos de evacuación, donde cabe suponer que existen unas zonas de paso que ocupan las personas presentes en el recinto. Según sea su distribución dará lugar a la densidad de evacuación que configurará las magnitudes de circulación en el recorrido hasta el destino de evacuación. Puede observarse en la figura 4.19.



**Figura 4.19** Modelo de flujo función de la densidad de ocupación y del recorrido

De la misma forma que en el modelo anterior, según el modelado del movimiento de las personas formulado por Nelson y McLennan, la velocidad de circulación horizontal y los flujos responden a las siguientes expresiones

$$v(d_j) = \begin{cases} 1,1996 & 0 < d_j \leq 0,5382 \\ \lambda(1 - \alpha d_j) & 0,5382 < d_j \leq 3,5 \end{cases}$$

$\alpha$  y  $\lambda$  son valores constantes que se hallan tabulados, el parámetro  $\lambda$  toma el valor 1,40 metros por segundo en el caso de circulación horizontal y  $\alpha = 0,266$  utilizando magnitudes decimales.



$$F_j(d_j) = \begin{cases} d_j w_j v(d_j) = 1,1996 d_j w_j & 0 < d_j \leq 0,5382 \\ d_j w_j v(d_j) = \lambda(1-\alpha_j d_j) d_j w_j & 0,5382 < d_j \leq 3,5 \end{cases}$$

#### 4.6.1 Solución del problema

El tiempo necesario para alcanzar la salida vendrá dado por la expresión:

$$t_{1j}(d_j) = \begin{cases} \frac{l_j}{v(d_j)} = \frac{l_j}{1,1996} & 0 < d_j \leq 0,5382 \\ \frac{l_j}{v(d_j)} = \frac{l_j}{\lambda(1-\alpha_j d_j)} & 0,5382 < d_j \leq 3,5 \end{cases} \quad (4.45)$$

donde  $x_{jI}$  es el límite inferior del número de ocupantes asignados a la salida  $j$  y  $x_{jS}$  el límite superior del número de ocupantes asignados a la salida  $j$ .

De la misma forma el tiempo de flujo será:

$$t_{2j}(d_j) = \begin{cases} \frac{x_j}{F(d_j)} = \frac{x_j}{1,1996 d_j w_j} & 0 < d_j \leq 0,5382 \\ \frac{x_j}{F(d_j)} = \frac{x_j}{\lambda(1-\alpha_j d_j) d_j w_j} & 0,5382 < d_j \leq 3,5 \end{cases} \quad (4.46)$$

Sustituyendo en la expresión (3.30) se obtiene la función de evacuación que determina el tiempo que tardan  $x_j$  individuos en salir del recinto a través de la ruta  $j$ :

$$t_j(x_j) = \begin{cases} \frac{1}{1,1996} \left[ l_j + \frac{x_j}{d_j w_j} \right] & 0 < d_j \leq 0,5382 \\ \frac{1}{\lambda(1-\alpha_j d_j)} \left[ l_j + \frac{x_j}{d_j w_j} \right] & 0,5382 < d_j \leq 3,5 \end{cases} \quad (4.47)$$

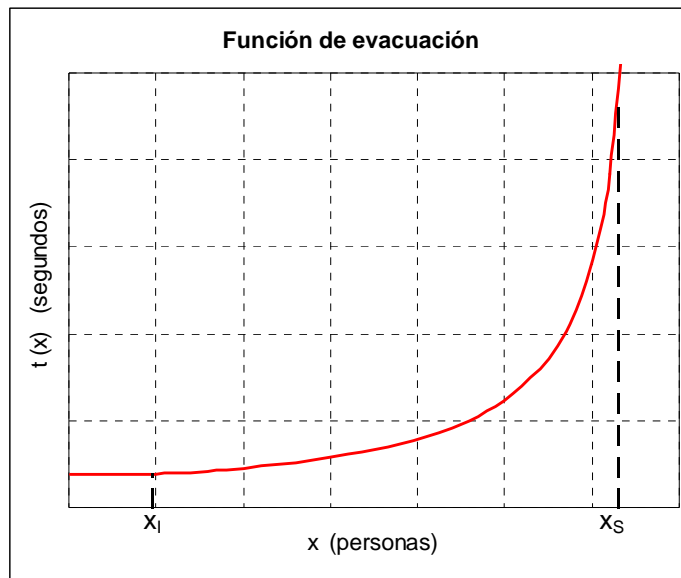
Siendo la densidad directamente proporcional al número de ocupantes asignados a la salida e inversamente proporcional a la superficie de la misma, la anterior expresión se transforma en la siguiente:

$$t_j(x_j) = \begin{cases} \frac{1}{1,1996} \left[ l_j + \frac{a_j}{w_j} \right] & 0 < x_j \leq x_{jI} \\ \frac{a_j}{\lambda(a_j - \alpha_j x_j)} \left[ l_j + \frac{a_j}{w_j} \right] & x_{jI} < x_j \leq x_{jS} \end{cases} \quad (4.48)$$

donde  $a_j$  indica la superficie de la salida  $j$ . En la Figura 4.20 se representa la función de evacuación, en ella puede observarse que cuando  $x_j < x_{jI}$  el tiempo de evacuación es constante e independiente de la ocupación  $x_j$  del recinto, en este tramo la densidad de ocupación es inferior a 0,5382 con lo que se produce una velocidad de circulación constante. Si la velocidad de circulación es constante la variación de flujo depende exclusivamente de la densidad, entonces los tiempos de evacuación resultan iguales como con-

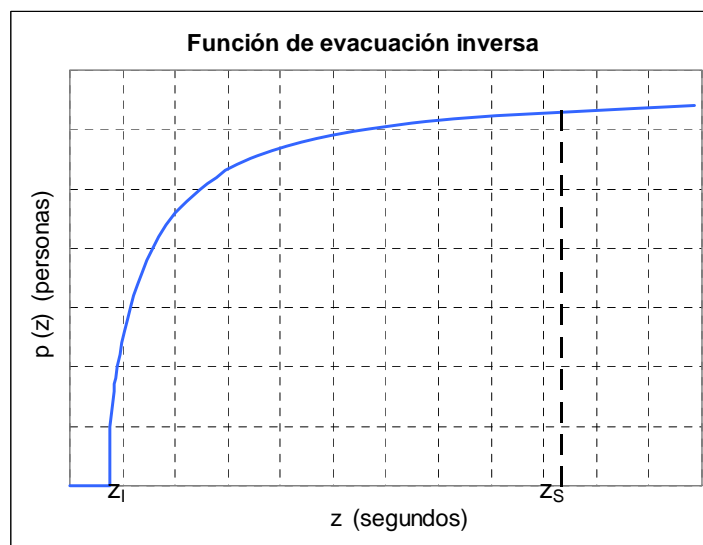
secuencia de la enorme diferencia que existe en los flujos de salida en uno y otro caso. El siguiente tramo  $x_{jI} - x_{jS}$  el crecimiento de la función es hiperbólico.

El tramo inicial, en el cual podrían salir del recinto hasta  $x_{jI}$  personas en el mismo tiempo, lo denominamos “intervalo de fluencia de la función de evacuación”. Este nombre se propone por la similitud que existe con el fenómeno que se produce en el ensayo mecánico de tracción, donde en el gráfico de esfuerzos-deformaciones, una vez se ha superado el periodo elástico, existe un tramo horizontal en el cual sin incrementar la tensión se produce un alargamiento del material.



**Figura 4. 20** Función de evacuación en los modelos función de la densidad

**Función de evacuación inversa.** La función de evacuación inversa  $p_j(z_j)$  de la salida  $j$  establece el número de personas que pueden salir del recinto en un tiempo  $z_j$  utilizando la salida  $j$ . Viene dada por la siguiente expresión 4.49.



**Figura 4. 21** Función de evacuación inversa en los modelos función de la densidad

$$p_j(z_j) = \begin{cases} 0 & 0 \leq z_j < z_{jI} \\ 0 < p_j(z_j) \leq p_{jI} & z_j = z_{jI} \\ \frac{a_j}{\alpha} \left( 1 - \frac{l_j w_j + a_j}{z \lambda w_j} \right) & z_{jI} < z_j \leq z_{jS} \end{cases} \quad (4.49)$$

para el instante  $z = z_{jI}$  se utiliza la denominación de “tiempo de fluencia”. En la Figura 4.21 se puede observar la función de evacuación inversa.

En la función de evacuación inversa  $p_j(z_j)$ , el tiempo  $z_j$  es la variable independiente y el número de individuos asignados a una salida  $x_j$  la variable dependiente:

$$z_j = t_j(x_j) \quad p_j(z_j) = x_j$$

Sustituyendo los valores  $x_{jI}$  y  $x_{jS}$  en la función de evacuación se obtienen los valores  $t_{jI}$  y  $t_{jS}$  a los que se designa  $z_{jI}$  y  $z_{jS}$ .

$$\begin{aligned} z_{jI} = t_j(x_{jI}) &= \frac{a_j}{\lambda(a_j - \alpha x_{jI})} \left( 1_j + \frac{a_j}{w_j} \right) \\ z_{jS} = t_j(x_{jS}) &= \frac{a_j}{\lambda(a_j - \alpha x_{jS})} \left( 1_j + \frac{a_j}{w_j} \right) \end{aligned} \quad (4.50)$$

Siendo  $z_{jI}$  el tiempo necesario para llegar hasta la salida  $j$  y abandonar el recinto un número de ocupantes  $x_j$  que constituyan una densidad de ocupación de 0,5382 personas por  $m^2$ . De la misma forma  $z_{jS}$  indica el tiempo necesario para alcanzar la salida  $j$  y abandonar el recinto un número de ocupantes  $x_j$  cuya densidad de ocupación sea de 3,5 personas por  $m^2$ .

**Algoritmo.** El algoritmo propuesto para resolver el problema de la evacuación de un recinto a través de rutas independientes y conocidas se fundamenta en el trabajo de Brown [4]. La consideración de los recorridos de evacuación y la utilización de las ecuaciones de Nelson&McLennan supone cambios notables en la forma de las funciones de evacuación y de evacuación inversas, por lo que ha sido preciso adaptar el procedimiento de resolución propuesto de J. R. Brown. En la realidad, se ha procedido a una generalización del mismo, resultando el algoritmo siguiente:

**Paso 1.** Determinar para cada salida los intervalos de aplicación de las ecuaciones de Nelson & McLennan [107] utilizadas para modelar el movimiento de las personas.

Teniendo en cuenta que la densidad de la salida  $j$  es directamente proporcional al número de ocupantes asignados a la misma e inversamente proporcional a su superficie, resulta que el número de ocupantes asignados a una salida es directamente proporcional a la densidad y a la superficie de la misma.

$$x_j = d_j a_j \quad (4.51)$$

Como los límites de la densidad son 0,5382 y 3,5 el número de ocupantes asignados a una salida debe situarse en el intervalo:

$$\begin{aligned} x_{j\ I} &= 0,5382 a_j \\ x_{j\ S} &= 3,5 a_j \end{aligned} \tag{4.52}$$

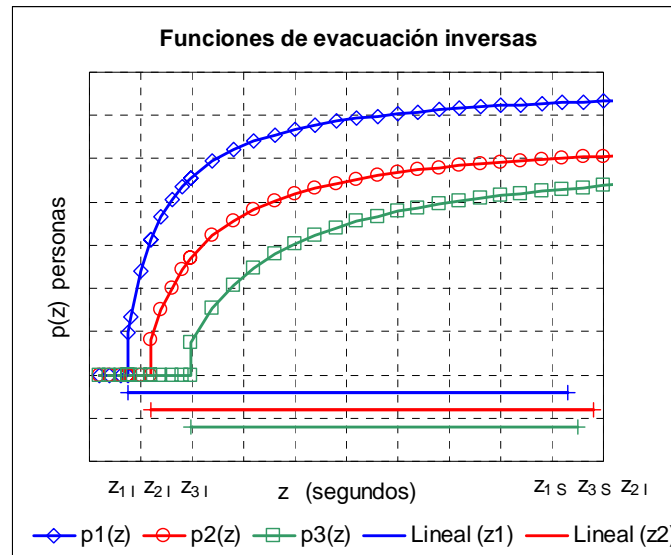
**Paso 2.** Determinar para cada ruta  $j$  la función de evacuación  $t_j(x_j)$ .

**Paso 3.** Determinar los puntos singulares  $z_{j\ I}$  y  $z_{j\ S}$  de la función de evacuación inversa  $p_j(z_j)$ .

**Paso 4.** Obtener la función de evacuación inversa de cada salida.

**Paso 5.** Ordenar la función de evacuación inversa de cada salida según los puntos de discontinuidad  $z_{j\ I}$  siguiendo el criterio de menor a mayor tiempo de fluencia  $z_{j\ I}$

Se puede observar en la Figura 4.22 el caso de un recinto que dispone de tres salidas



**Figura 4.22** Funciones de evacuación inversas de un recinto de tres salidas

Sea  $\Theta_1$  el conjunto inicial formado por los puntos de fluencia  $z_{j\ I}$  de cada una de las salidas. Si el recinto dispone de  $n$  salidas:

$$\Theta_1 = \{ z_{1\ I}, \dots, z_{j\ I}, \dots, z_{n\ I} \} \tag{4.53}$$

Se obtiene el primer punto de fluencia  $\tau_1$  y la función  $\pi_1$  asociada al mismo:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \text{Min} \{ \Theta_1 \} \\ \pi_1 &= [ p_j(z_j) \mid z_j = \tau_1 ] \end{aligned} \tag{4.54}$$

Sea  $\Theta_2$  el conjunto de puntos de fluencia pendientes de ordenar:

$$\Theta_2 = \{ z_{j\ I} \mid z_{j\ I} > \tau_1 \} \tag{4.55}$$

Se obtiene el segundo punto de fluencia  $\tau_2$  y la función  $\pi_2$  asociada al mismo:

$$\begin{aligned} \tau_2 &= \text{Min} \{ \Theta_2 \} \\ \pi_2 &= \left[ p_j(z_j) \mid z_j = \tau_2 \right] \end{aligned} \tag{4.56}$$

En general, dado el conjunto de todos los puntos de fluencia no ordenados  $\Theta_j$ :

$$\Theta_j = \{ z_{j1} \mid z_{j1} > \tau_{j-1} \} \tag{4.57}$$

Se obtiene el j-ésimo punto de fluencia  $\tau_j$  y la función correspondiente  $\pi_j$ :

$$\begin{aligned} \tau_j &= \text{Min} \{ \Theta_j \} \\ \pi_j &= \left[ p_j(z_j) \mid z_j = \tau_j \right] \end{aligned} \tag{4.58}$$

Con ello se ordenan las funciones inversas de evacuación según sus puntos de fluencia:

$$\begin{aligned} &\{ \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n \} \\ &\tau_1 < \tau_2, \dots < \tau_j < \dots < \tau_n \\ &\{ \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n \} \end{aligned} \tag{4.59}$$

**Paso 6.** Obtener el valor máximo  $z_s$  para el cual estará definida la función de evacuación inversa global  $P(z)$ .

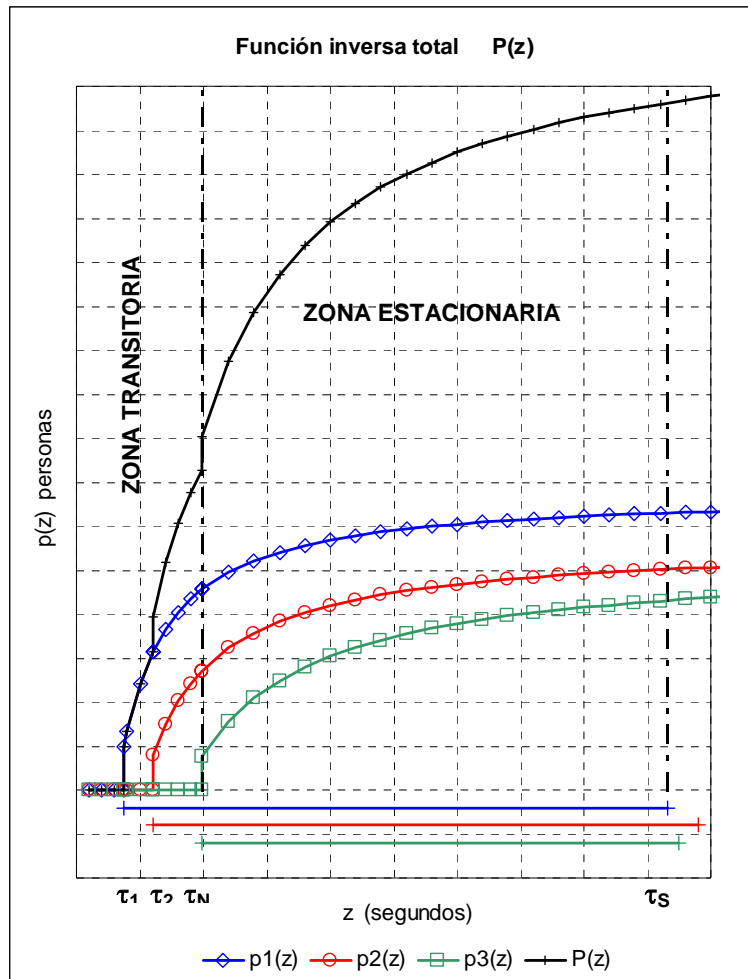
$$z_s = \text{Min} \{ z_{1s}, \dots, z_{js}, z_{js} \} \tag{4.60}$$

**Paso 7.** Determinar la función de evacuación inversa global  $P(z)$ , para ello basta sumar las funciones de evacuación inversa de cada salida considerando de forma adecuada las discontinuidades.

$$P(z) = \begin{cases} 0 & 0 \leq z < \tau_1 \\ \pi_1 & \tau_1 < z < \tau_2 \\ \pi_1 + \pi_2 & \tau_2 < z < \tau_3 \\ \dots & \dots \\ \pi_1 + \dots + \pi_{n-1} & \tau_{n-1} < z < \tau_n \\ \pi_1 + \dots + \pi_{n-1} + \pi_n & \tau_n < z \leq \tau_s \end{cases} \tag{4.61}$$

Se observa que no se ha definido  $P(z)$  en los instantes  $\tau_1$  en los que se producen las discontinuidades y en el tramo inicial mientras ningún ocupante ha alcanzado ninguna salida, entonces  $P(z) = 0$ .

En el intervalo  $\tau_1 < z < \tau_2$  solamente se utiliza la salida 1, en el intervalo  $\tau_2 \leq z < \tau_3$  se utilizan las salidas 1 y 2, y así sucesivamente hasta que a partir del tiempo  $\tau_n$  se utilizarán todas las salidas. Cuando se utilizan todas las salidas resulta el período estacionario. La situación aquí descrita puede observarse en la Figura 4.23



**Figura 4.23** Análisis de las zonas de representación

En la función  $P(z)$  existen dos zonas: Un período transitorio  $z \leq \tau_n$  y un periodo estacionario  $\tau_n < z \leq \tau_s$ . Normalmente el periodo transitorio es corto y en el estudio de problemas de evacuación reales tiene escasa trascendencia, la evacuación de recintos tiene interés con grandes ocupaciones que se sitúan en la zona estacionaria.

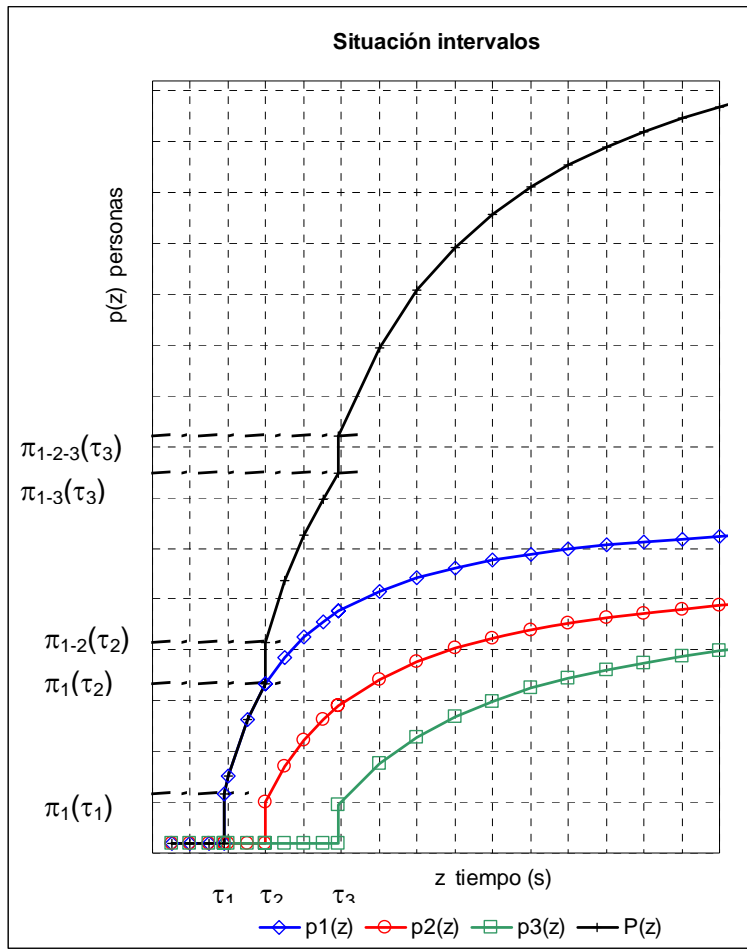
**Paso 8.** Acotar  $P(z)$  en los puntos de fluencia.

$$\begin{aligned}
 z = \tau_1 &\Rightarrow 0 \leq P(z) \leq \pi_1(z = \tau_1) \\
 z = \tau_2 &\Rightarrow \pi_1(z = \tau_2) \leq P(z) \leq \pi_{1-2}(z = \tau_2) \\
 &\dots \\
 z = \tau_n &\Rightarrow \pi_{1-2-\dots-(n-1)}(z = \tau_n) \leq P(z) \leq \pi_{1-2-\dots-n}(z = \tau_n)
 \end{aligned}
 \tag{4.62}$$

Con ello queda definida la función de evacuación inversa global  $P(z)$ .

**Paso 9.** Calcular el tiempo de evacuación óptimo  $z^*$

Para hallar  $z^*$  debe analizarse la situación del valor del número de personas ocupantes del recinto ( $k$ ) para conocer el tramo de la función  $P(z)$  en el que vamos a trabajar. Puede observarse la Figura 4.24 donde se muestra el caso de un recinto con tres salidas.



**Figura 4.24** Análisis de las zonas de representación

La situación de  $k$  da lugar a tres escenarios posibles:

1. **El valor  $k$  se sitúa en un intervalo de fluencia**, en este caso el valor del tiempo de evacuación  $z^*$  se corresponde con un tiempo de fluencia. Resultan las siguientes situaciones:

$$\begin{aligned}
 0 \leq k \leq \pi_1(z = \tau_1) & \Rightarrow z^* = \tau_1 \\
 \pi_1(z = \tau_2) \leq k \leq \pi_{1-2}(z = \tau_2) & \Rightarrow z^* = \tau_2 \\
 \dots\dots\dots \\
 \pi_{1-2-\dots-(n-1)}(z = \tau_n) \leq k \leq \pi_{1-2-\dots-n}(z = \tau_n) & \Rightarrow z^* = \tau_n
 \end{aligned}$$

2.  **$k$  se sitúa en los diferentes intervalos del periodo transitorio**

$$\begin{aligned}
 \pi_j(z = \tau_j) < k < \pi_j(z = \tau_{j+1}) & \Rightarrow k = \pi_j(z) & z^* = z \\
 \dots\dots\dots \\
 \pi_{1-2-\dots-(n-1)}(z = \tau_{n-1}) < k < \pi_{1-2-\dots-(n-1)}(z = \tau_n) & \Rightarrow k = \pi_{1-2-\dots-(n-1)}(z) & z^* = z
 \end{aligned}$$

3. **El número de ocupantes del recinto  $k$  se sitúa en el periodo estacionario**

$$k > \pi_{1-2-\dots-n}(z = \tau_n) \Rightarrow k = \pi_{1-2-\dots-n}(z) \quad z^* = z$$





$$\pi_{j-1}(z = \tau_{j-1}) < k < \pi_{j-1}(z = \tau_j) \Rightarrow x_j = \pi_j^*(z^*)$$

### 3. El número de ocupantes del recinto k, se sitúa en el periodo estacionario

$$k > \pi_{1-2-\dots-n}(z = \tau_n) \Rightarrow x_n = \pi_n^*(z^*)$$

Se utilizan todas las salidas, no produciéndose fluencia en ninguna de ellas.

#### 4.6.1 Aplicación numérica

Se estudia el caso descrito en el apartado 4.3.3 correspondiente a un recinto con tres salidas independientes, y representado en la figura 4.8 en el cual se hallan 610 personas uniformemente distribuidas. Existen unas zonas de paso de superficie  $a_j$  hacia cada una de las salidas, estas zonas se hallan libres de obstáculos, se considera una anchura mínima  $w_j$ . Las principales características del recinto respecto a la optimización de la evacuación del mismo se resumen en la siguiente tabla 4.5

Salida	Anchura mínima de la salida w (metros)	Longitud del recorrido de evacuación de la salida l (metros)	Superficie del recorrido de la vía de evacuación a (m <sup>2</sup> )
1	2,0	0	90
2	1,6	25	75
3	1,2	60	70

**Tabla 4.5** Resumen características recinto

#### Solución

Considerando que la circulación hacia las salidas se efectúa por un pasillo horizontal y se opera con unidades decimales el valor de las de las constantes será de:

$$\lambda = 1,40 \text{ (metros/segundo)} \quad \alpha = 0,266 \text{ (m}^2 \text{ / personas)}$$

**Paso 1.** Intervalos de aplicación de las ecuaciones de Nelson&McLennan.

$$\begin{aligned} x_{1I} &= 48,44 & x_{1S} &= 315,00 \\ x_{2I} &= 40,36 & x_{2S} &= 262,50 \\ x_{3I} &= 37,67 & x_{3S} &= 245,00 \end{aligned}$$

**Paso 2.** Función de evacuación de cada salida.

$$t_1(x_1) = \begin{cases} 37,51 & 0 < x_1 \leq 48,44 \\ \frac{4050}{126 - 0,3724 x_1} & 48,44 < x_1 \leq 315 \end{cases}$$

$$t_2(x_2) = \begin{cases} 59,92 & 0 < x_2 \leq 40,36 \\ \frac{5390,63}{105 - 0,3724 x_2} & 40,36 < x_2 \leq 262,5 \end{cases}$$

$$t_3(x_3) = \begin{cases} 98,65 & 0 < x_3 \leq 37,67 \\ \frac{8283,33}{98-0,3724x_3} & 37,67 < x_3 \leq 245 \end{cases}$$

**Paso 3.** Puntos singulares de las funciones de evacuación inversa.

$$\begin{aligned} z_{1I} &= 37,51 & z_{1S} &= 465,84 \\ z_{2I} &= 59,92 & z_{2S} &= 744,05 \\ z_{3I} &= 98,65 & z_{3S} &= 1.225,0 \end{aligned}$$

**Paso 4.** Función de evacuación inversa de cada salida.

$$p_1(z_1) = \begin{cases} 0 & 0 \leq z_1 < 37,51 \\ 0 < p_1(z_1) \leq 48,44 & z_1 = 37,51 \\ 338,35 - \frac{10875,403}{z_1} & 37,51 < z_1 \leq 465,84 \end{cases}$$

$$p_2(z_2) = \begin{cases} 0 & 0 \leq z_2 < 59,92 \\ 0 < p_2(z_2) \leq 40,36 & z_2 = 59,92 \\ 281,955 - \frac{14475,363}{z_2} & 59,92 < z_2 \leq 744,05 \end{cases}$$

$$p_3(z_3) = \begin{cases} 0 & 0 \leq z_3 < 98,65 \\ 0 < p_3(z_3) \leq 37,67 & z_3 = 98,65 \\ 263,16 - \frac{22243,11}{z_3} & 98,65 < z_3 \leq 1225 \end{cases}$$

**Paso 5.** Ordenar las funciones de evacuación inversa según los puntos de discontinuidad  $z_{j,I}$

$$\Theta_1 = \{ 37,51 \quad 59,92 \quad 98,65 \}$$

$$\tau_1 = \text{Min}\{ \Theta_1 \} = 37,51$$

$$\pi_1 = p_1(z_1)$$

$$\Theta_2 = \{ 59,92 \quad 98,65 \}$$

$$\tau_2 = \text{Min}\{ \Theta_2 \} = 59,92$$

$$\pi_2 = p_2(z_2)$$

$$\Theta_3 = \{ 98,65 \}$$

$$\tau_3 = \text{Min}\{ \Theta_3 \} = 98,65$$

$$\pi_3 = p_3(z_3)$$

**Paso 6.** Valor máximo  $z_S$  para el cual estará definida la función de evacuación inversa global.

$$z_S = \text{Min} \{ z_{1S}, z_{2S}, z_{3S} \} = \text{Min} \{ 465,84 \quad 744,05 \quad 1.225 \} = 465,84$$

**Paso 7.** Función de evacuación inversa.

Periodo transitorio  $0 \leq z \leq 98,65$

Periodo estacionario  $98,65 < z \leq 465,84$

$$P(z) = \begin{cases} 0 & 0 < z < 37,51 \\ 338,35 - \frac{10875,403}{z} & 37,51 < z < 59,92 \\ 620,305 - \frac{25350,766}{z} & 59,92 < z < 98,65 \\ 883,465 - \frac{47593,876}{z} & 98,65 < z < 465,84 \end{cases}$$

El número máximo de personas que pueden salir del recinto es de 465,84 s.

**Paso 8.** Resolver  $P(z)$  en los puntos de discontinuidad o puntos de fluencia.

$$z = \tau_1 = 37,51 \Rightarrow 0 \leq P(z) \leq 48,44$$

$$z = \tau_2 = 59,92 \Rightarrow 156,85 \leq P(z) \leq 197,23$$

$$z = \tau_3 = 98,65 \Rightarrow 363,33 \leq P(z) \leq 401,01$$

Si la ocupación del recinto es inferior a 48,44 personas solamente se utiliza la salida 1 y el tiempo de evacuación será de 37,51 segundos. Se produce la fluencia de la salida 1. Si la ocupación del recinto está comprendida entre 156,85 y 197,23 personas, se utilizarán las salidas 1 y 2. Se producirá la fluencia de la salida 2 y el tiempo de evacuación óptimo será de 59,92 segundos. Por último, si la ocupación está comprendida entre 363,33 y 401,1 personas, se utilizarán todas las salidas. Se producirá la fluencia de la salida 3 y el tiempo de evacuación óptimo será de 98,65 segundos.

**Paso 9.** Obtener el tiempo de evacuación óptimo  $z^*$

Si el valor  $k$  se sitúa en un intervalo de fluencia:

$$0 \leq k \leq 48,44 \Rightarrow z^* = 37,50$$

$$156,85 \leq k \leq 197,23 \Rightarrow z^* = 59,92$$

$$363,33 \leq k \leq 401,01 \Rightarrow z^* = 98,65$$

Si  $k$  se sitúa en los diferentes intervalos del periodo transitorio:

$$48,44 < k < 156,85 \Rightarrow k = 338,350 - \frac{10875,403}{z^*}$$

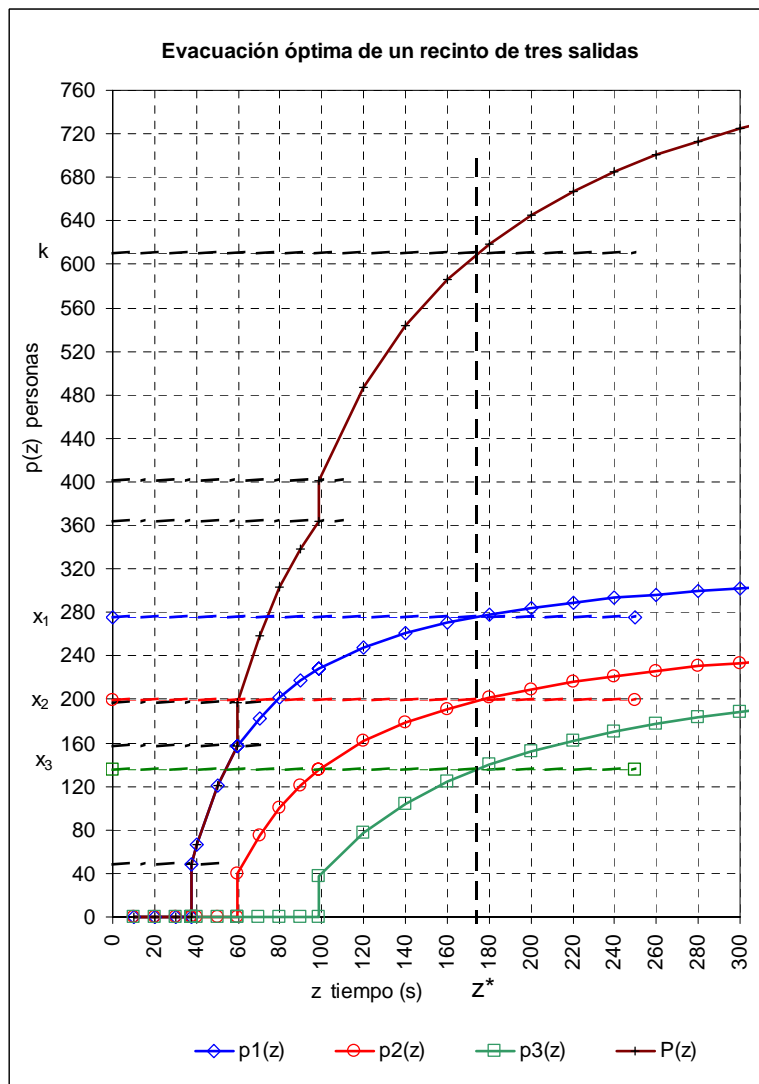
$$197,23 < k < 363,33 \Rightarrow k = 620,305 - \frac{25350,766}{z^*}$$

Si el número de ocupantes del recinto se sitúa en el periodo estacionario:

$$401,01 < k \Rightarrow k = 883,465 - \frac{47593,876}{z^*}$$

Dado que el número de ocupantes del recinto es de 610 personas, nos hallamos en el caso de que el número de ocupantes se sitúa en el periodo estacionario (610 > 401). En dicho periodo se utilizan las tres salidas.

$$k = 883,465 - \frac{47593,876}{z} \Rightarrow 610 = 883,465 - \frac{47593,876}{z^*} \Rightarrow z^* = 174,04 \text{ segundos}$$



**Figura 4.26** Solución gráfica de la aplicación propuesta

**Paso 10.** Determinar el número de personas  $x_j$  que deben utilizar cada salida. Para ello se resuelve la función de evacuación inversa de cada salida para  $z^* = 174,04$  segundos.

$$x_1 = 338,350 - \frac{10875,403}{174,04} = 276 \text{ personas}$$

$$x_2 = 281,955 - \frac{14475,363}{174,04} = 199 \text{ personas}$$

$$x_3 = 263,160 - \frac{22243,110}{174,04} = 135 \text{ personas}$$

Una alternativa a la solución analítica consiste en la solución gráfica, para facilitar la visualización de los resultados la escala de tiempos que se ha utilizado está comprendida entre 0 y 300 s, puede observarse en la figura 4.26.

También se ha hallado la solución del problema mediante la aplicación EXITR, en este caso se ha considerado el recorrido hasta los destinos siendo tanto las velocidades de circulación como los flujos función de las asignaciones realizadas, la solución resulta inmediata obteniendo los mismos resultados que mediante el procedimiento analítico y la solución gráfica.

EXITRV4			
<u>Datos</u>			
<b>Ocupación total</b>	610		
	<b>RUTA</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>Anchura efectiva mínima (m)</b>	2	1,6	1,2
<b>Distancia hasta la salida (m)</b>	0	25	60
<u>Resultados</u>			
	<b>RUTA</b>		
<b>Asignación (Pers.)</b>	276	199	135
<b>t<sub>2i</sub> (s)</b>	174,44	174,49	173,56
<b>t<sub>TOTAL</sub> (s)</b>		174,49	

**Tabla 4.6** Tabla de resultados de la solución heurística

## 4.7 OTRAS CONDICIONES DE OPTIMIZACIÓN DE LA EVACUACIÓN DE UN RECINTO

Según demuestran J. Jarvis y D. Ratliff [75] son objetivos equivalentes minimizar tiempos de evacuación, ocupaciones en cualquier instante y costes de la evacuación si las funciones que definen el problema de evacuación cumplen determinadas condiciones. Estas condiciones se aplican al problema de la evacuación de un recinto considerando el caso en el cual la función de evacuación  $t_j(x_j)$ , depende exclusivamente del flujo  $f_j$  registrado en la salida  $j$  y del número de personas  $x_j$  que utilizan la ruta  $j$ , y no existen recorridos de evacuación.

Si el flujo  $f_j$  que se registra en la ruta  $j$ , es constante durante todo el tiempo que dura la evacuación, resulta que  $t_j(x_j)$  será una función lineal cuya pendiente será el inverso del valor del flujo  $f_j$ .

$$t_j(x_j) = \left( \frac{1}{f_j} \right) x_j$$

Conocida la función de evacuación  $t_j(x_j)$  y existiendo su función inversa  $p_j(z)$ , obtenida directamente

$$p_j(z) = z f_j$$

El número total de personas capaces de abandonar el recinto en un tiempo  $z$  será  $P(z)$ , entonces es posible conocer el tiempo mínimo necesario para la evacuación de  $P(z)$  personas en un tiempo  $z$

$$z = \frac{P(z)}{\left( \sum_{j=1}^n f_j \right)}$$

Si en un recinto existen  $n$  salidas independientes, cada una de ellas con un flujo  $f_j$  constante, el flujo total de salida del recinto  $F$ , será la suma de los flujos

$$F = f_1 + f_2 + \dots + f_n$$

El conocimiento del flujo total de salida  $F$ , permite obtener una estimación del tiempo mínimo de evacuación  $z^*$ , para un número de  $k$  ocupantes resulta

$$z^* = \frac{k}{F}$$

El conocimiento del tiempo de evacuación del recinto, permite determinar la asignación óptima de ocupantes hacia cada una de las salidas

$$x_j^* = t_j(x_j) f_j = (z^*) f_j = \left( \frac{f_j}{F} \right) k$$

Puede observarse, que asignar más ocupantes a una determinada salida supone incrementar el tiempo de evacuación  $z$ , por ello si  $z > z^*$ ,  $z$  deja de ser un tiempo mínimo

de evacuación del recinto, entonces la asignación  $x_j$  no puede ser mayor que la asignación óptima  $x_j^*$ .

En un recinto, en condiciones de flujo constante, para lograr el tiempo mínimo de evacuación, el número de ocupantes  $x_j$  que debe asignarse a cada salida  $j$ , será proporcional a la relación que existe entre el flujo  $f_j$  que se registra en la salida  $j$  y el flujo total de salida del recinto  $F$ .

En la segunda propuesta cuyo objetivo era “Minimizar la ocupación del recinto en cualquier instante” (4.5) o el objetivo equivalente de “Maximizar directamente el número de personas que han abandonado el recinto en cualquier instante” (4.9) conduce a la misma solución que el objetivo anterior.

Sea  $z$  un valor de tiempo cualquiera, cuando dicho tiempo  $z$  se iguala al correspondiente con el valor óptimo  $z^*$

$$z = z^*$$

se trata de determinar el número máximo de personas capaces de abandonar el recinto, entonces se observa que si  $f_j(z)$  es constante, el número de personas capaces de abandonar el recinto por la salida  $j$ , si  $P(z)$  está definida por la suma de las funciones de evacuación inversa de cada una de las salidas y  $p_j(z)$  un conjunto de funciones definidas positivas

$$\text{Max}(P(z)) = \text{Max}(p_1(z^*) + p_2(z^*) + \dots + p_j(z^*)) \quad (4.63)$$

entonces para maximizar  $P(z)$ , necesariamente debe cumplirse que sean máximas las funciones de evacuación inversa de cada una de las salidas

$$\forall j \text{ Max}(p_j(z^*)) \quad (4.64)$$

Obteniéndose que el número máximo de personas que pueden abandonar el recinto por cada una de las salidas, resulta  $x_j^*$ . Siendo el número máximo de ocupantes que pueden abandonar el recinto en un tiempo  $z^*$  igual a  $k$ .

$$x_1^* + x_2^* + \dots + x_n^* = k$$

Sencillamente se ha encontrado que en el tiempo de evacuación óptimo  $z^*$ , el número máximo de personas capaces de abandonar el recinto es  $k$ , el número total de ocupantes.

Finalmente para la tercera propuesta, cuyo objetivo era “Minimizar el coste total de la evacuación” según la función objetivo (4.8) se trata de hallar la coincidencia con los resultados anteriores.

En esta situación, en la cual el flujo en cada una de las salidas es constante, sustituyendo la expresión de la función de evacuación de una salida en la expresión de la función del coste de la evacuación se obtiene

$$r_j(x_j) = \int_0^{x_j} t_j(x_j) d(x) = \frac{(x_j)^2}{2f_j}$$

Si el recinto dispone de  $n$  salidas, el coste total de la evacuación será la suma de los costes de evacuación de cada una de las salidas

$$R(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = r_1(x_1) + r_2(x_2) + \dots + r_j(x_n) = \frac{(x_1)^2}{2f_1} + \frac{(x_2)^2}{2f_2} + \dots + \frac{(x_n)^2}{2f_n}$$

Si además existe la restricción definida (4.2), concretamente:

$$x_1 + x_2 + \dots + x_n = k$$

Se procede a hallar el valor mínimo de  $Q(x_j)$ , en este caso la función lagrangiana, será

$$Q(x_j, \lambda) = \frac{(x_1)^2}{2f_1} + \frac{(x_2)^2}{2f_2} + \dots + \frac{(x_n)^2}{2f_n} + \lambda(x_1 + x_2 + \dots + x_n - k)$$

aplicando Kuhn-Tucker y resolviendo se llega a obtener la solución final. Resulta para cada una de las  $j$  salidas.

$$x_j^* = \left( \frac{f_j}{F} \right) k$$

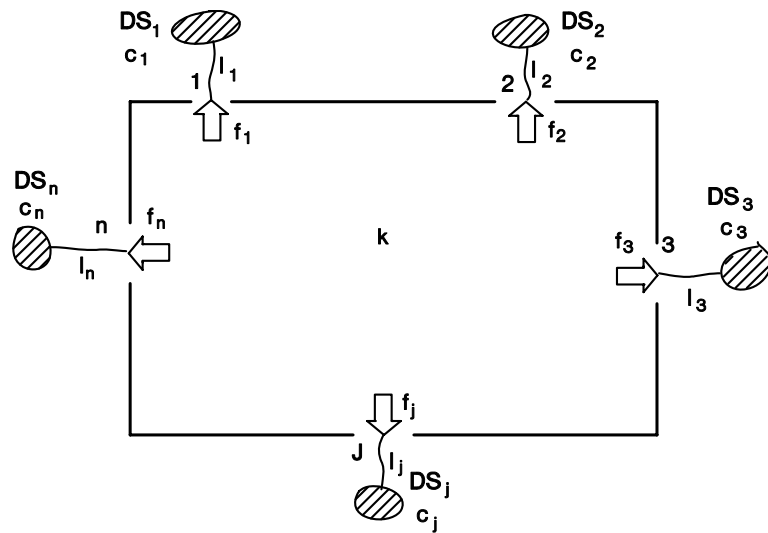
Con ello resulta la coincidencia de objetivos en los tres casos considerados. La solución del problema del coste de la evacuación es idéntica a la correspondiente minimización del tiempo de evacuación, y en este tiempo mínimo se ha probado que el número de individuos capaces de abandonar el recinto es exactamente el número de ocupantes  $k$ .

#### 4.8 OPTIMIZACIÓN DE LA EVACUACIÓN DE UN RECINTO CON RESTRICCIONES EN LA CAPACIDAD DE LOS DESTINOS

Normalmente en los problemas de evacuación de edificios el destino de evacuación es un espacio exterior de dimensiones suficientes para albergar la totalidad de los ocupantes del recinto, sin embargo existen determinadas situaciones en las cuales la evacuación se realiza a dependencias contiguas que constituyen sectores de incendio distintos de los orígenes de evacuación, en estos casos surge el problema de la evacuación de un recinto con restricciones de capacidad en los destinos. Puede observarse en la siguiente figura 4.27.

Sea un problema de evacuación de un edificio que dispone de  $n$  salidas, en el cual los ocupantes que abandonan el edificio lo realizan por una salida hacia un destino que tiene una determinada capacidad  $c_{DS}$ , los ocupantes que abandonan el recinto por la salida 1 se dirigen al destino 1 cuya capacidad será de  $c_{DS1}$  personas, en general los que utilizan la salida  $j$  se dirigen al destino  $j$  y finalmente los de la salida  $n$  se dirigen al destino  $n$ .





**Figura 4.27** Recinto de n salidas y capacidad en los destinos

Necesariamente debe cumplirse la condición que la capacidad de los destinos sea suficiente para albergar la totalidad de los  $k$  ocupantes

$$\sum_{j=1}^n c_{DSj} \geq k \quad (4.52)$$

Si  $x_j$  es el número de ocupantes que abandonan el recinto por la salida  $j$  hacia el destino  $j$  de capacidad  $c_{DSj}$  debe cumplirse

$$x_j \leq c_{DSj} \quad (4.53)$$

Con estas dos nuevas restricciones la formulación final del problema es la siguiente:

$$\text{Min } z = \text{Max} \left[ t_j(x_j) \right] \quad j = 1 \dots n$$

$$\sum_{j=1}^n x_j = k$$

$$\sum_{j=1}^n c_{DSj} \geq k$$

$$x_j \leq c_{DSj}$$

$$0 \leq x_j \leq k$$

El problema tiene una solución analítica ya planteada por R. L. Francis [34], la cual podría desarrollarse en las diversas situaciones planteadas, sin embargo dada la laboriosidad del proceso se opta por la solución heurística, consiste en contemplar la capacidad de los destinos siguiendo el mismo proceso que en los casos anteriores.

**Primero.** Se establece el paso de resolución  $x_p$

**Segundo.** Se determina la función  $t_j(x_j)$  de evacuación de cada salida.

**Tercero.** Se considera que  $x_p$  ocupantes pretenden abandonar el recinto utilizando una determinada salida  $j$ .

**Cuarto.** Se evalúa si se cumple la condición de capacidad de los destinos.

**Quinto.** Se evalúa el tiempo que supondría a los  $x_p$  ocupantes abandonar el recinto por cada una de las salidas.

**Sexto.** Se asignan los  $x_p$  ocupante a la salida que supone un tiempo de evacuación menor y cumple la condición de capacidad de los destinos.

**Séptimo.** El proceso se repite hasta la iteración  $n$  en la que se verifique

$$\left( k - \sum_{i=1}^n x_p \right) \leq x_p$$

**Octavo.** Se adopta como paso de resolución la unidad hasta la evacuación de los  $k$  ocupantes del recinto.

Para la aplicación de la heurística propuesta se ha desarrollado la aplicación **EXITRC**, en la tabla 4.7 puede observarse la entrada de datos y el formato de los resultados a que da lugar dicha aplicación en la cual  $t_{0j}$  corresponde a la demora en el inicio de la evacuación de los ocupantes que se dirigen a la salida  $j$ ,  $t_{1j}$  es el tiempo de circulación,  $t_{2j}$  al tiempo de flujo y  $t_{TOTAL}$  el tiempo de evacuación.

## EXITRC

### Datos

Ocupación total	k					
	RUTA					
	1	2		j		n
<b>Anchura efectiva mínima (m)</b>	$w_1$	$w_2$				$w_n$
<b>Superficie útil (m<sup>2</sup>)</b>	$a_1$	$a_2$				$a_n$
<b>Recorrido (m)</b>	$l_1$	$l_2$				$l_n$
<b>Densidad estimada (Pers./ m<sup>2</sup>)</b>	$d_1$	$d_2$				$d_n$
<b>Flujo específico (Pers./ m min)</b>	$f_1$	$f_2$				$f_n$
<b>Demora en el inicio evac. (s)</b>	$t_{1\ 1}$	$t_{1\ 2}$				$t_{1\ n}$
<b>Capacidad destinos</b>	CDS1	CDS2		CDSj		CDSn

### Resultados

	RUTA					
<b>Asignación ( Pers.)</b>	$x_1$	$x_2$				$x_n$
<b>Densidad resultante( Pers./ m<sup>2</sup>)</b>	$d_1$	$d_2$				$d_n$
<b>Velocidad (m. min)</b>	$v_1$	$v_2$				$v_n$
<b>Flujo específico (Pers./m min)</b>	$f_1$	$f_2$				$f_n$
<b>Flujo (Pers./ m min)</b>	$F_1$	$F_2$				$F_n$
<b><math>t_{1j}</math> (s)</b>	$t_{1\ 1}$	$t_{1\ 2}$				$t_{1\ n}$
<b><math>t_{2j}</math> (s)</b>	$t_{2\ 1}$	$t_{2\ 2}$				$t_{2\ n}$
<b><math>t_{TOTAL}</math> (s)</b>	$t_1$	$t_2$				$t_n$

**Tabla 4.7** Tabla de resultados de la solución heurística

Finalmente se realiza una aplicación numérica en las condiciones de la situación descrita en el apartado 4.3.3, se consideran las siguientes capacidades  $c_1= 150$ ,  $c_2= 350$  y  $c_3= 300$  personas. En primer lugar se verifica que la capacidad del destino de evacuación es de 800 personas, magnitud que supera la ocupación de 610 personas y con estas condiciones la solución óptima del problema es la proporcionada en la tabla 4.8, en la que puede observarse como el destino 1 alcanza su capacidad máxima y los ocupantes se distribuyen hacia los dos destinos restantes.

### EXITRV5

#### Datos

<b>Ocupación total</b>	610		
	RUTA		
	1	2	3
<b>Anchura efectiva mínima (m)</b>	2	1,6	1,2
<b>Distancia hasta la salida (m)</b>	35	25	20
<b>Densidad estimada (Pers./ m<sup>2</sup>)</b>	2,6	2,6	2,6
<b>Velocidad circulación (m / min)</b>	40	40	40
<b>Flujo específico (Pers./ m min)</b>	65	65	65
<b>Capacidad destino (Pers.)</b>	150	350	300

#### Resultados

	RUTA		
<b>Asignación ( Pers.)</b>	150	258	202
<b>t<sub>i</sub> (s)</b>	121,73	186,35	186,15
<b>t<sub>TOTAL</sub> (s)</b>		186,35	

**Tabla 4.8** Tabla de resultados de la solución heurística



## **CAPITULO 5: LA EVACUACION DE EDIFICIOS**

### **5.1 ESTUDIO DEL PROBLEMA MEDIANTE REDES DE FLUJO**

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

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

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

Las redes estáticas ofrecen una visión global de las características arquitectónicas del edificio, necesaria en primera instancia e importante para planificar actuaciones rápidas en tiempo real, mientras que las redes dinámicas proporcionan más información y faci-

litan el estudio de aspectos más concretos del problema como variaciones de capacidad, tiempos de recorrido, flujos o retenciones, sin embargo la dimensión que adquiere el problema, hace que prácticamente en todos los casos no sea viable esta representación gráfica como herramienta visual de análisis.

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

Una red puede definirse como un grafo, de tal forma  $G(U,V)$  representa un conjunto  $U$  de puntos  $j$  y  $V$  de parejas de puntos  $(j, j')$  que establecen una relación entre los mismos. Los puntos  $j$  constituyen los nodos y las parejas  $(j, j')$  los arcos. Una formulación matemática del problema de la evacuación en la cual el edificio se representa mediante un grafo se halla publicada en el trabajo [21] de W. Choi, S. Hamacher y S. Tufekcy. En estas redes de flujo, denominadas “clásicas”, el diseño arquitectónico del edificio se representa mediante un grafo en el cual los nodos  $j$  son las dependencias y los arcos son la conexión entre las mismas. Los nodos se sitúan en el centro de las dependencias y cada arco  $v \in V$  en la red representa el paso desde un componente  $j$  a otro  $j'$ , asociado a esta transición existe el tiempo  $\tau(v)$ .

Las dependencias que inicialmente están ocupadas constituyen los nodos origen, otras dependencias de paso son los nodos intermedios o de circulación y el punto de reunión, al que se dirigen las personas que abandonan el edificio, son los nodos destino. Existen nodos intermedios en los cuales puede existir una ocupación inicial. Las personas presentes en el edificio, en el momento de iniciarse la evacuación se desplazan desde los nodos origen a través de una serie arcos, desde el centro de las dependencias origen  $O_j$  por las dependencias de circulación  $H_j$ ,  $P_j$ , y  $E_j$  hasta las dependencias destino  $DS_j$ . Las redes de flujo a que dan lugar los problemas de evacuación se caracterizan por tener múltiples orígenes y varios destinos. En un edificio pueden existir dependencias que no están ocupadas y que no son elementos de paso, en cuyo caso pueden considerarse irrelevantes y normalmente no se procede a su representación.

Una serie de **magnitudes caracterizan las redes estáticas**, la magnitudes propias de los nodos origen son la **ocupación**, definida por el número  $k_j$  de personas presentes en el momento de iniciarse la evacuación, mientras que los nodos de circulación los caracterizan la capacidad de ocupación  $c_j$  definida como el **número máximo de personas** que son capaces de albergar. La capacidad  $c_j$  de un nodo depende de la superficie efectiva del recinto  $a_{ej}$ , las dimensiones de los ocupantes y de la relación de separación que se establezca entre los mismos, reflejada mediante la magnitud densidad de ocupación  $d_j$ , estos aspectos han sido analizados en el capítulo 3, en el análisis sobre la ocupación y capacidad de las dependencias. Según la expresión 3.3 resulta

$$c_j = a_{ej} d_j$$

La **capacidad de paso**  $c_{j,j'}$  de un arco o flujo máximo indica el número máximo de personas que pueden desplazarse desde un nodo  $j$  hasta otro  $j'$  en una unidad de tiempo, y

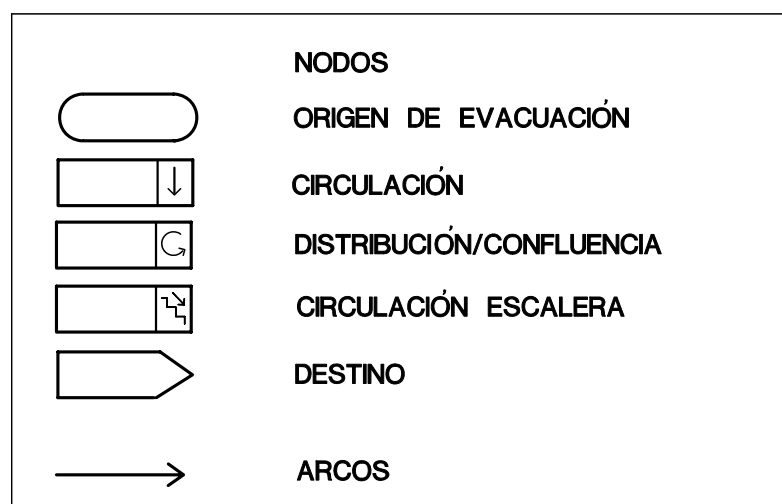
el **tiempo de circulación**  $t_{j-j'}$  indica el tiempo necesario para desplazarse desde el centro del nodo  $j$  hasta el centro de  $j'$ . La capacidad de paso  $c_{j-j'}$  depende de la anchura efectiva mínima  $w_{j-j'}$ , definida según Pauls [116], del recorrido que existe entre las dependencias  $j$  y  $j'$  y del flujo máximo que se registre en dicho recorrido

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

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

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

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

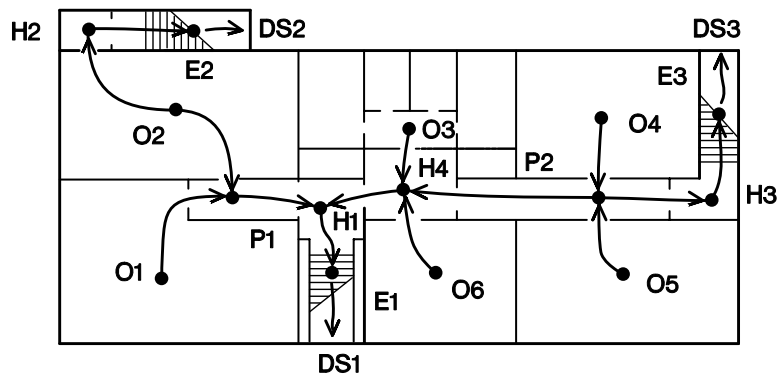


**Figura 5.1** Símbolos para la representación de la red

Para representar un edificio mediante una red, se establecen dos fases, en la primera fase se opera directamente sobre el plano de la planta del edificio y en la segunda se procede propiamente a su representación. Sobre un esquema de la planta, en primer lugar se identifican los nodos origen  $O_j$  y los destinos  $DS_j$ , se trata de las dependencias que inicialmente están ocupadas y las posiciones definidas como seguras a las cuales deben dirigirse la totalidad de ocupantes que se disponen a abandonar el edificio. Seguidamente se identifican los nodos intermedios y se trazan los arcos que unen dichas dependencias  $j-j'$ . Normalmente las dependencias de paso se designan por  $H_j$ ,  $P_j$ ,  $E_j$ , se identifican respectivamente como vestíbulos, pasillos o escaleras, genéricamente se utiliza la denominación  $j$  y los arcos se designan por el nombre de las dependencias origen y destino  $j-j'$ . Finalmente se determinan las magnitudes que caracterizan la red: Ocupa-

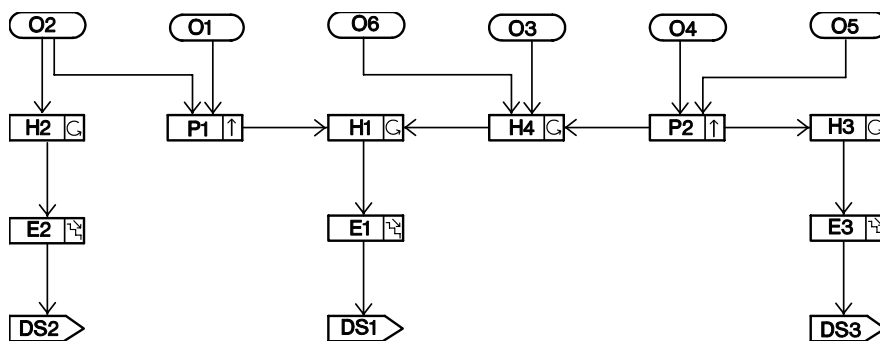
ción de los nodos origen  $k_j$ , anchuras mínimas de paso  $w_{j-j'}$  y la longitud de los recorridos de circulación  $l_{j-j'}$ .

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



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

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

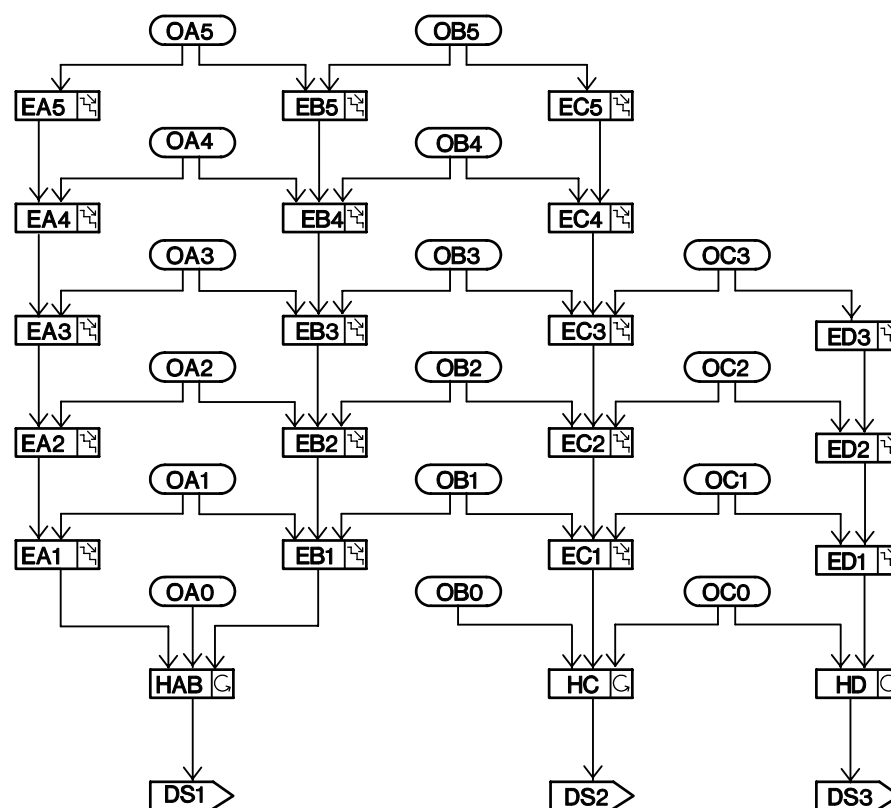


**Figura 5.3** Representación del diagrama estático de flujo



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

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



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

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

El modelo dinámico permite representar el desplazamiento de las personas y la evolución de la ocupación en intervalos regulares de tiempo de forma razonablemente simple. La red estática que representa el edificio se expande en periodos de tiempo, para convertirse en el modelo dinámico según el procedimiento de Ford&Fulkerson, descrito por R. L. Francis y L. Chalmet [35].

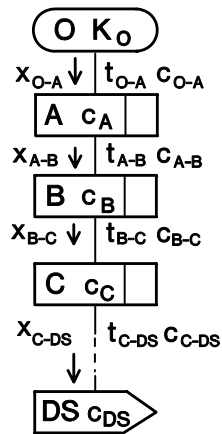


Figura 5.5 Ejemplo de red estática simple

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

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

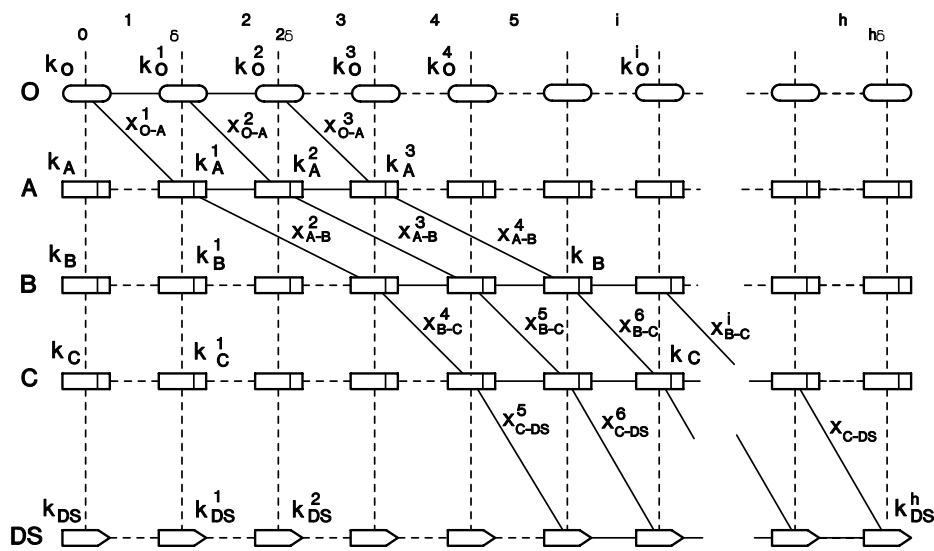


Figura 5.6 Ejemplo de red dinámica

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

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

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

Para analizar la dimensión del problema es posible verificar que si la red estática tiene  $n$  nodos y  $m$  arcos, y la red dinámica tiene  $h$  periodos, entonces  $(n+m)*h$  es una cota superior del número de arcos en la red dinámica, mientras que  $n*(h-1)$  es una cota inferior en el número de nodos de la red. Esta cota puede reducirse enormemente cuando se eliminan los arcos que no son esenciales. El número de periodos  $h$  necesarios para modelar de forma adecuada el problema, se determina a partir de

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

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

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

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

De la misma forma que en la representación gráfica de la red dinámica el punto de partida es el modelo estático, la formulación matemática de la red dinámica también se basa en el modelo estático. Si la red estática nos viene dada por el grafo  $G = (U, V)$ , siendo  $U$  la serie de nodos y  $V$  la serie de arcos entonces cada arco  $v \in V$  en la red representa el paso desde un componente a otro, asociada a esta transición existe el tiempo  $\tau(v)$ . Consideramos la red dinámica  $G_T = (U_T, V_T)$ , que es la expansión temporal de la red a partir de la red estática  $G = (U, V)$  de la siguiente forma:

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

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

De forma similar el arco  $V_T$  viene dado por

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

entonces  $G_T$  recibe el nombre de red dinámica. Los arcos  $(j^i, j^{i+1}) \in V_T$  se llaman arcos de retención. El contenido de cada arco viene representado por el **número de personas** que permanecen quietas en el componente del edificio representado por el nodo  $j$ . Mientras que los arcos  $(j^i, j^{i'})$  reciben el nombre de arcos de circulación. Representan el movimiento de personas de un componente a otro del edificio. Este movimiento empieza en el instante  $i$  en el componente  $j$ , y termina en el componente  $j'$  y en el instante  $i'$ .

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

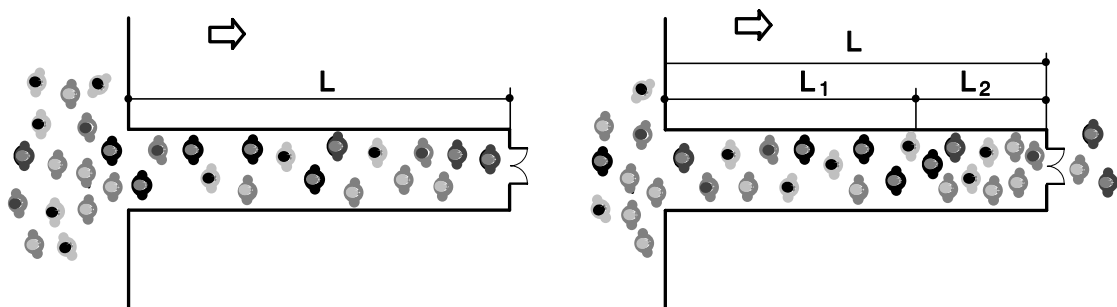


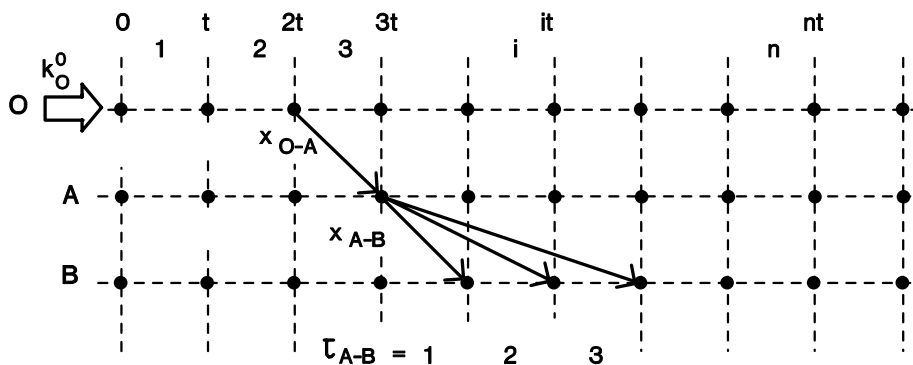
Figura 5.7 Efecto pasillo

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

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

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

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



**Figura 5.8** Tiempos de circulación variables en la red dinámica

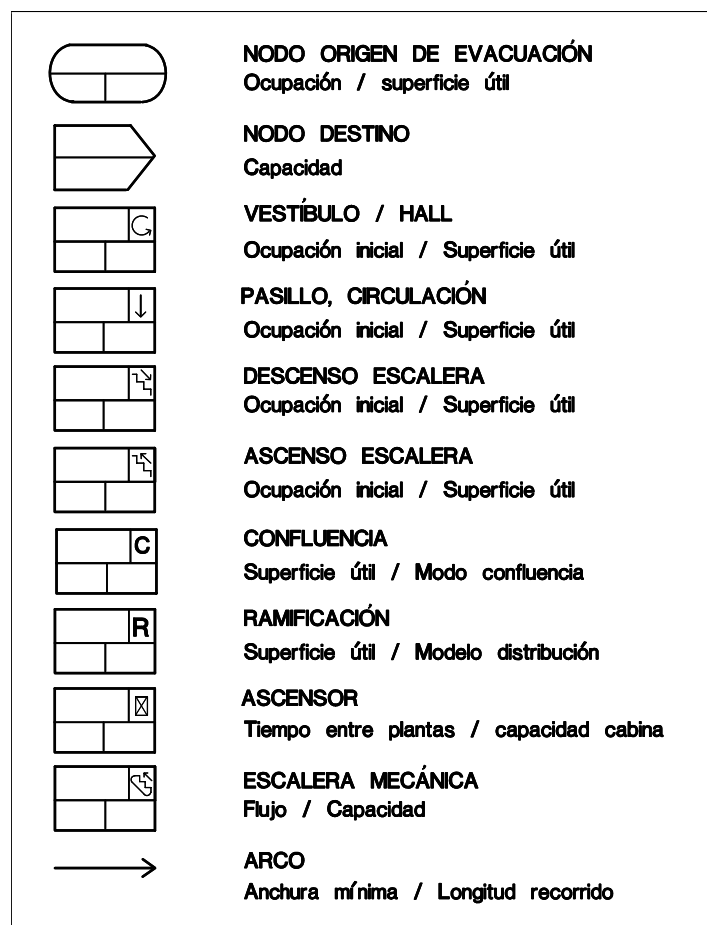
Otra consideración son los **tiempos de circulación variables**. Operar con tiempos de circulación constantes simplifica la resolución del problema, pero diversas causas pueden producir un tiempo de circulación variable: La densidad de ocupación en el recorrido y la retención que puede producirse en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

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

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

### 5.2.1 Proceso de representación de un edificio

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



**Figura 5.9** Símbolos para la representación de la red

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

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

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

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

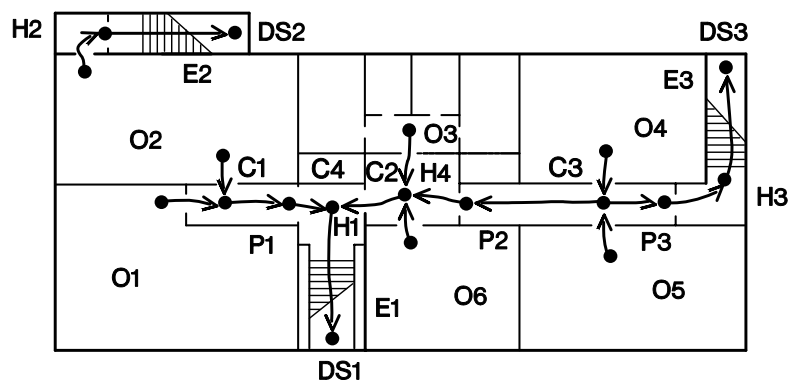
**Cuarto paso:** Se identifican los nodos destino  $DS_j$ . Posición a la cual se dirigen las personas que abandonan el recinto.

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

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

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

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



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

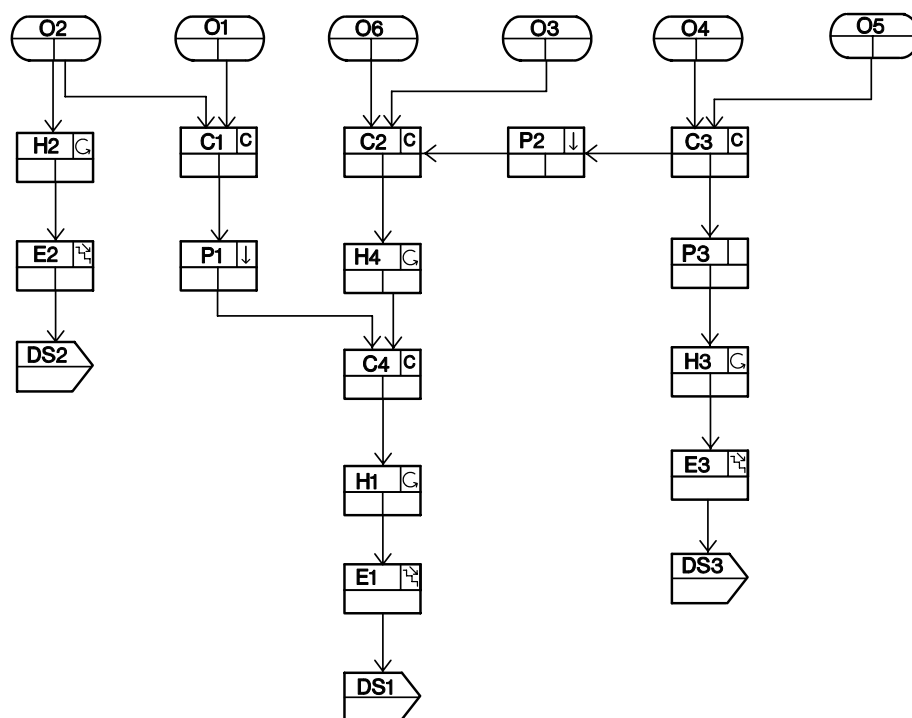
En la misma planta del edificio de la figura 5.2, utilizada para describir la denominada red de flujo clásica, se efectúa la representación de la red de flujo incorporando los cambios propuestos. El proceso se inicia en la figura 5.10, en ella pueden observarse las operaciones realizadas sobre la planta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



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

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

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



**Figura 5.11** Ejemplo de representación de una red estática mejorada

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

### 5.2.2 Estudio de las magnitudes características de la red

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

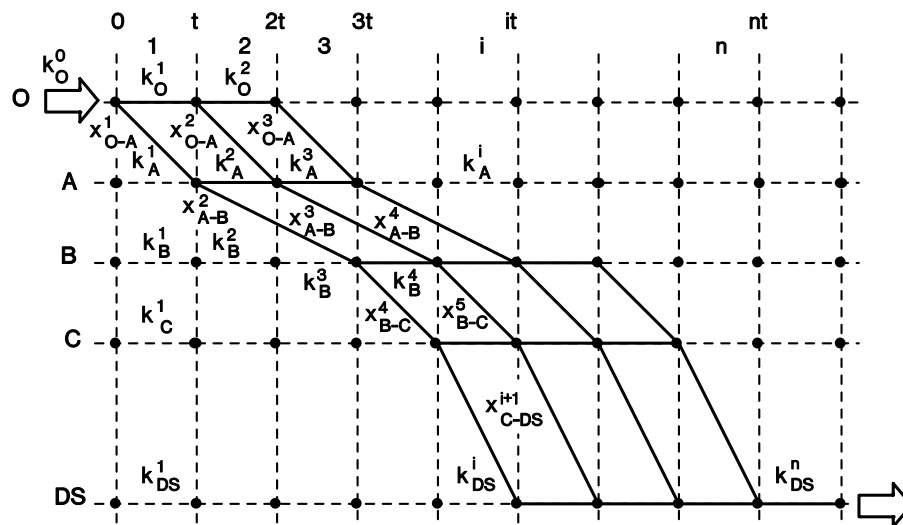


Figura 5.12 Red dinámica de una vía de circulación

Los **nodos origen de evacuación** se caracterizan por tener una ocupación inicial  $k_j^0$  desde la cual las personas presentes se incorporan a la red según diferentes modelos de comportamiento. En principio se pueden producir demoras en el inicio de la evacuación de  $t_0$  segundos o bien de  $\tau_0$  periodos, pero además es posible modelar las incorporaciones a la red según las funciones  $q(t)$  o  $q(i)$  que indican el número de personas en posición inmediata a una determinada salida en función del tiempo  $t$  o bien del periodo  $\tau$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$F_{j-j'}^i = f_{j-j'}^i w_{j-j'} \tag{5.18}$$

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

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

Mediante la matriz de flujos se indica el número de personas que abandonan cualquier nodo  $j$  para dirigirse a un nodo destino  $j'$  en cada periodo, para todas las dependencias del edificio.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 5.3 ANÁLISIS DINÁMICO DE LAS ESTRUCTURAS QUE FORMAN LOS ELEMENTOS DE LA RED

Las estructuras más habituales que se presentan en las redes utilizadas en los problemas de evacuación de edificios son las vías de circulación, las confluencias y las ramificaciones. Estos elementos permiten configurar el sistema en un entorno dinámico y analizar el proceso de evacuación que se desarrolla en el mismo.

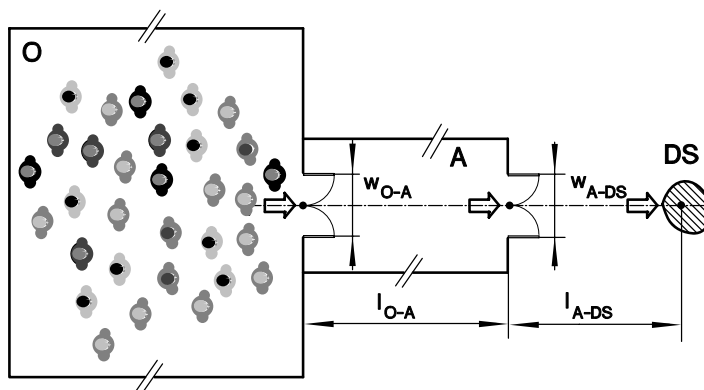
Tal como se ha analizado en el capítulo 3, una vía de circulación simple es como un conjunto de  $n$  dependencias, necesariamente ( $n \geq 3$ ), situadas sucesivamente desde un nodo origen hasta un destino unidas mediante  $n-1$  arcos. La estructura mínima será la formada por un nodo origen, un nodo de circulación y un nodo destino unidas mediante dos arcos. La unión de varias vías de circulación o de salidas de dependencias que convergen en una sola da lugar a una confluencia y, de forma análoga a la definida en el apartado anterior, cuando una sola dependencia o vía de circulación diverge en varias vías de circulación independientes da lugar a una ramificación. El análisis dinámico de estos elementos facilita un análisis más preciso del problema que el realizado en el capítulo 3, en el cual la solución adoptada se realizaba desde una red estática, esta solución general resultaba poco precisa e indefinida cuando se contemplan flujos transitorios.

#### 5.3.1 Análisis de una vía de circulación

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

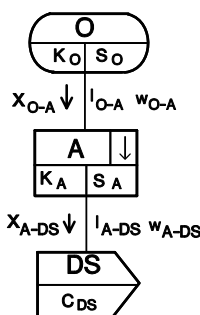
El primer objetivo es el trazado de la red dinámica, y dadas las características del recinto se supone que en el nodo origen  $O$ , los ocupantes se hallan situados justamente en la puerta de salida, de la misma forma el nodo de circulación se supone al final del pasillo de forma que la capacidad  $c_A$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





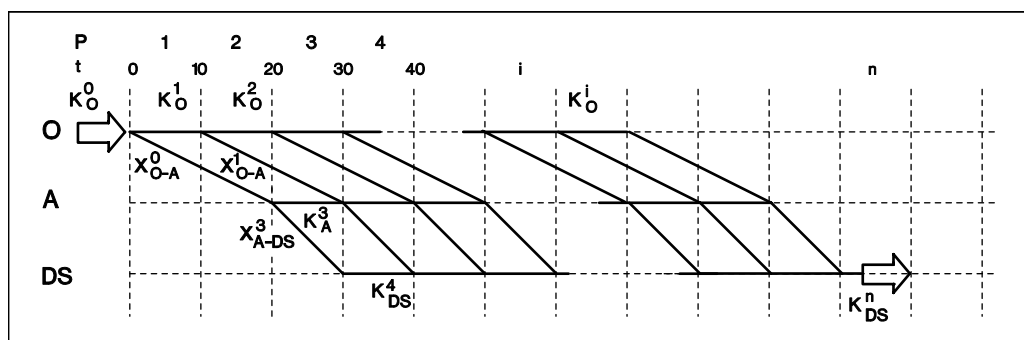
**Figura 5.13** Análisis de una vía de circulación

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



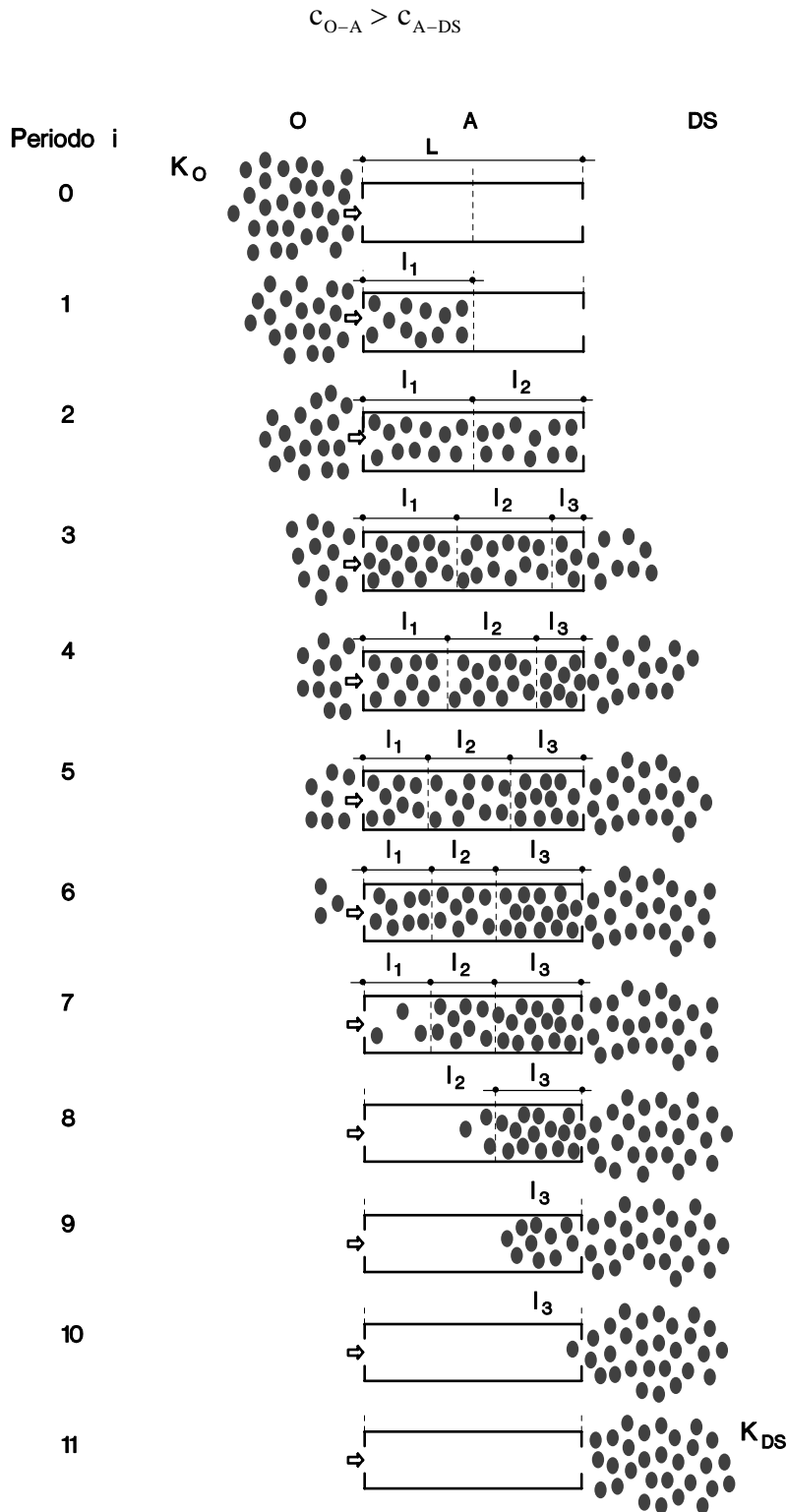
**Figura 5.14** Red estática de una vía de circulación

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



**Figura 5.15** Red dinámica de una vía de circulación

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



**Figura 5.16** Análisis microscópico de una vía de circulación

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

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

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

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

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

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

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

La ocupación de las dependencias al final del primer periodo será

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

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

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

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

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

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

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

$$k_A^2 \leq c_A$$

La capacidad del pasillo al final del periodo será:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

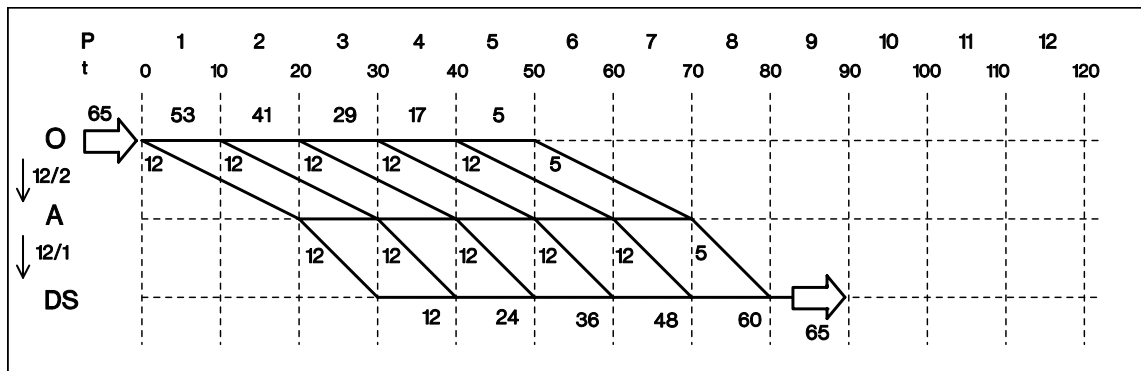
En esta situación, el tiempo de circulación  $\tau_{O-A}^3 > 1$  puede afirmarse que será mayor de un periodo, existe un grupo de personas esperando para poder abandonar el pasillo A.

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

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

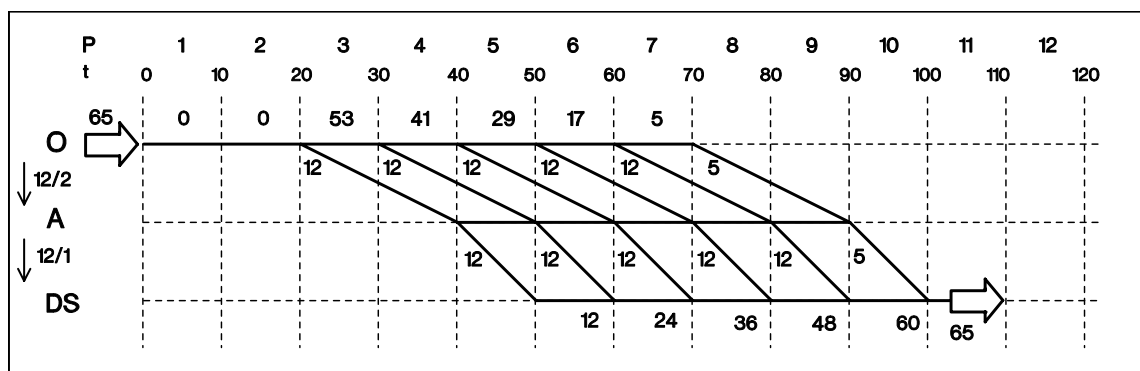
Pueden distinguirse tres fases: un periodo transitorio de llenado de la dependencia A, un intervalo estacionario y un periodo final de vaciado del pasillo. Resulta complejo ilustrar este proceso de forma genérica, por ello se analizan tres aplicaciones numéricas. En el primer caso, se presenta una situación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

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



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

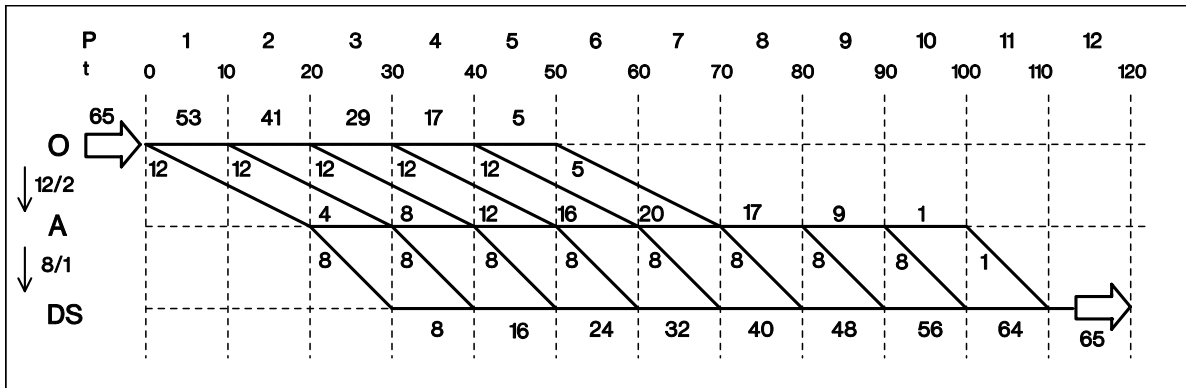
En las redes dinámicas es posible modelar determinados comportamientos de una forma muy simple, por ejemplo las demoras, en el siguiente caso se muestra la red correspondiente a **una vía de evacuación sin retención con una demora en el inicio de la evacuación**. Se supone que en las mismas condiciones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



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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

De la misma forma la matriz de flujos

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

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

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

Finalmente la matriz de tiempos de circulación sería

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

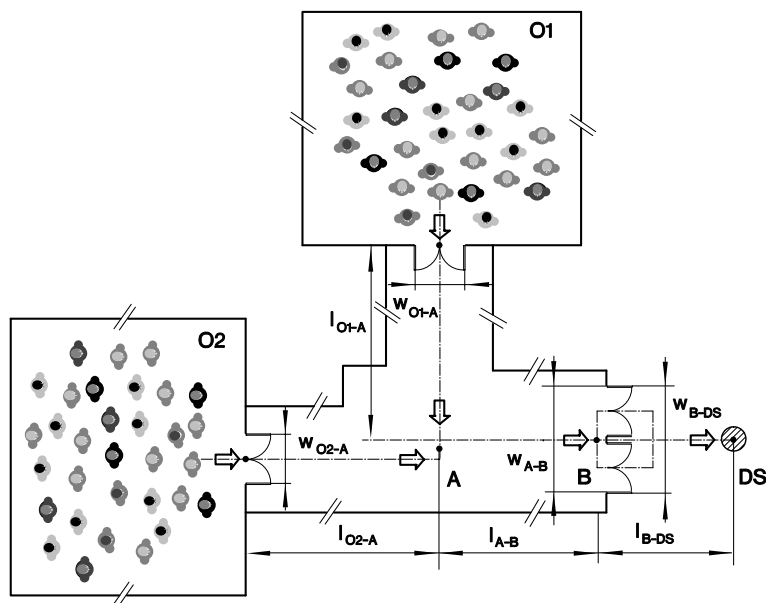
### 5.3.2 Modelado de confluencias

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



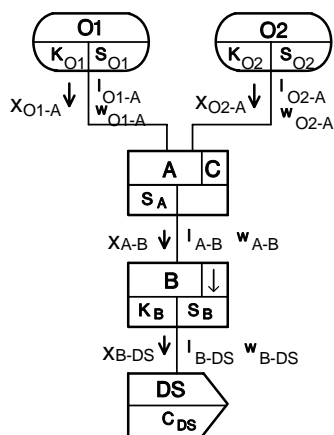
en los intervalos definidos en la red dinámica y se analiza la posibilidad de incorporar aspectos de comportamiento, obteniéndose unos resultados realmente interesantes.

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



**Figura 5.20** Análisis de una confluencia simple

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

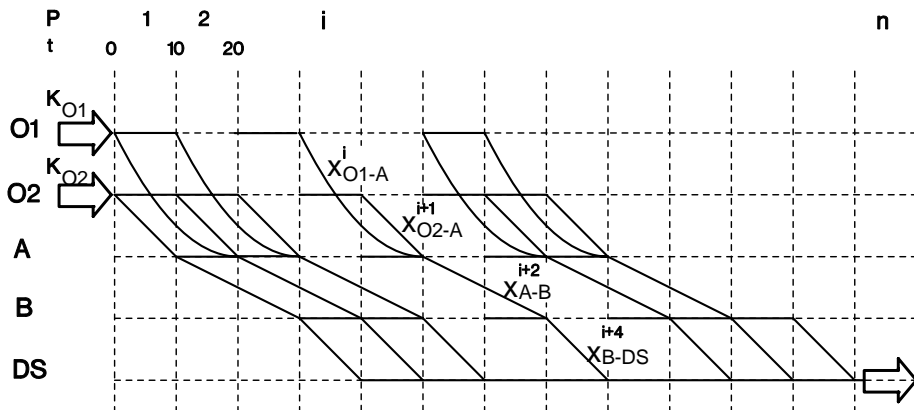


**Figura 5.21** Red estática de una confluencia simple

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

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

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



**Figura 5.22** Red dinámica de una confluencia simple

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

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

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

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

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

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

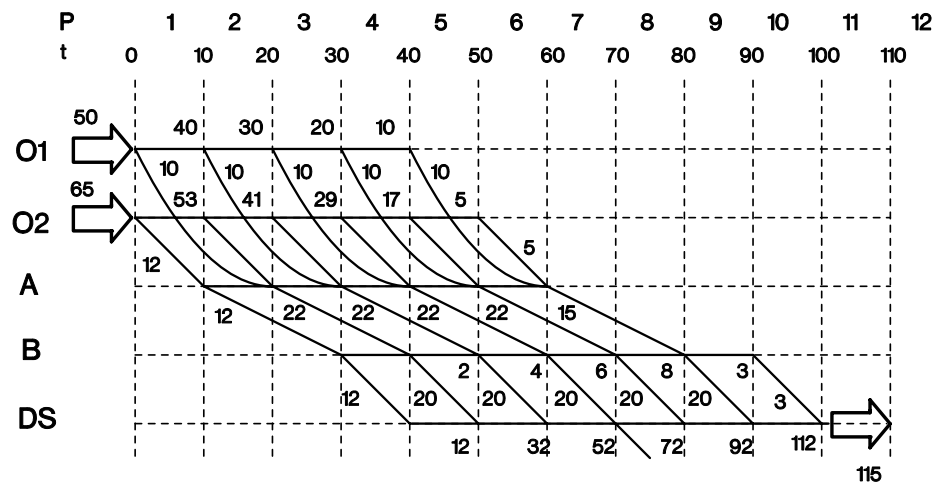


Figura 5.23 Ejemplo de red dinámica de una confluencia simple

### 5.3.3 Modelado de ramificaciones

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

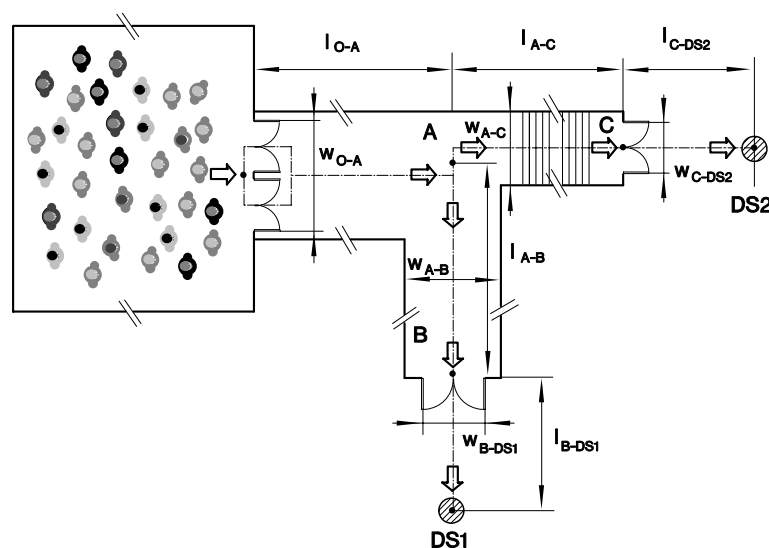
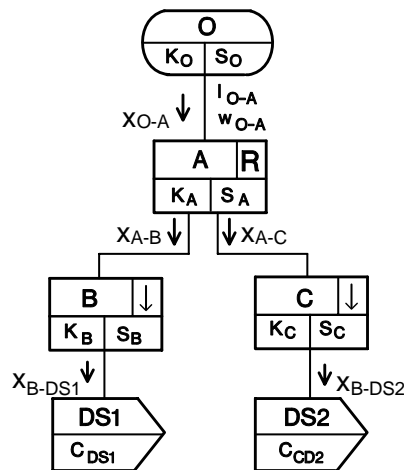


Figura 5.24 Análisis de una ramificación simple

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



**Figura 5.25** Red estática de una ramificación simple

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

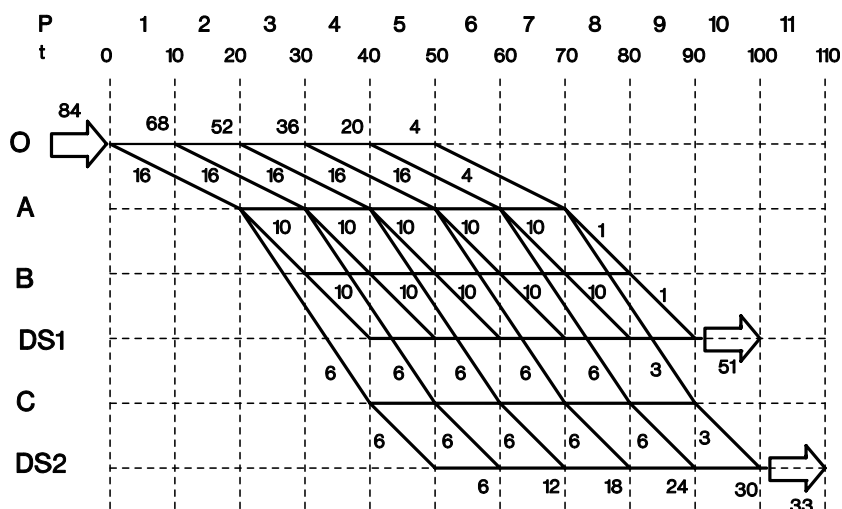


Figura 5.26 Red dinámica de una ramificación simple

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

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

### 5.4 OPTIMIZACIÓN DE LA EVACUACIÓN

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

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

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

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

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

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

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

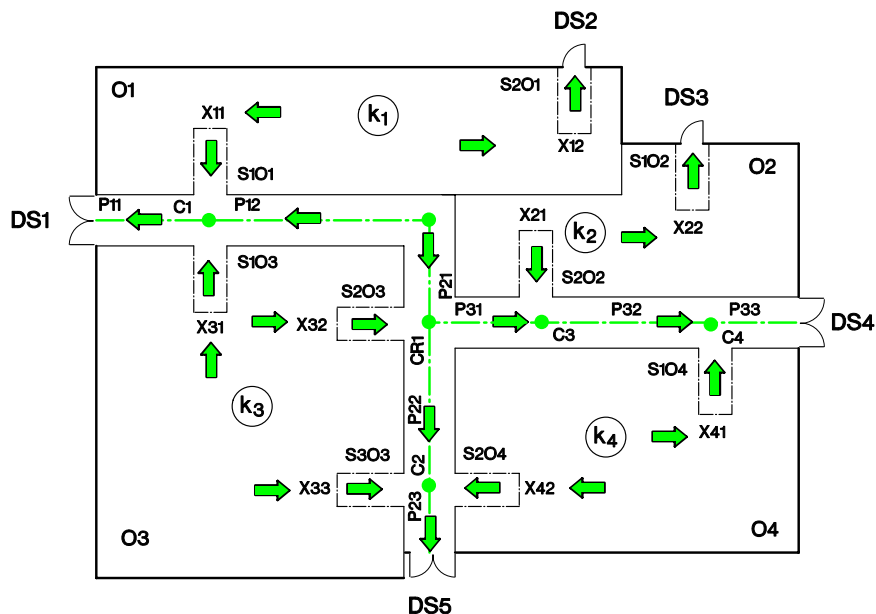
**Cuarto paso.** Repetir el proceso hasta completar la evacuación de todos los nodos ocupados.

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

#### **5.4.2 Aplicación para la optimización de la evacuación de un recinto**

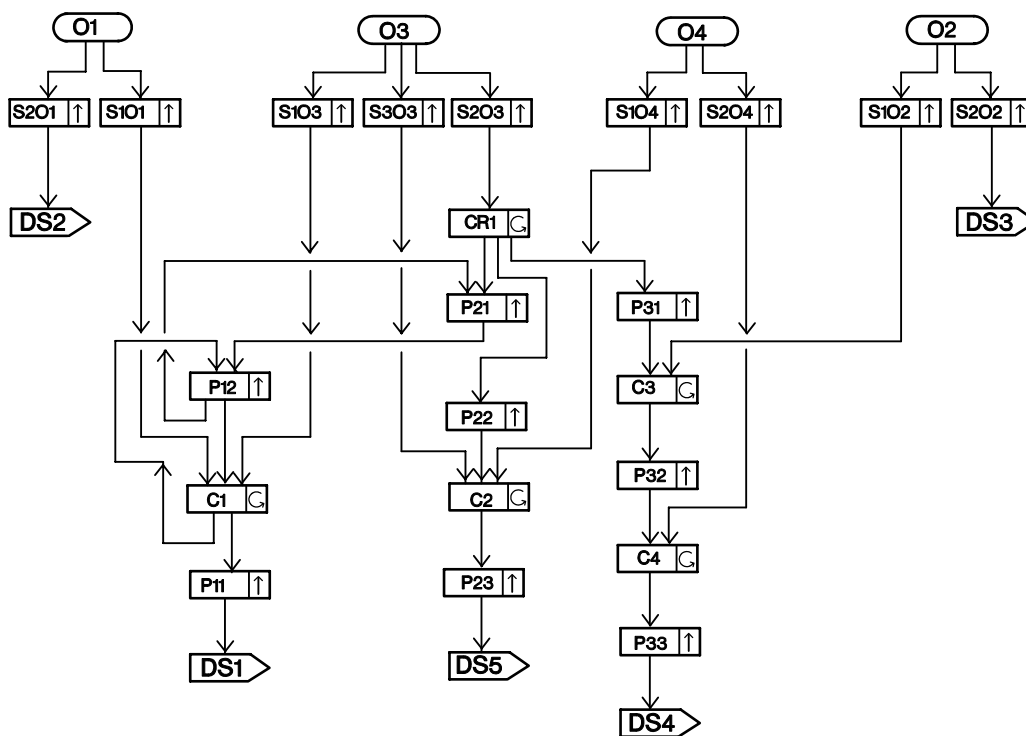
El funcionamiento de la heurística propuesta se muestra estudiando la evacuación de un edificio de una sola planta formado por varios recintos ocupados, tres vías de evacuación y que dispone de cinco salidas que conducen directamente al exterior, según puede obser-

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



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

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



**Figura 5.28** Red estática del ejemplo planteado

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

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

Figura 5.29 Entrada de datos de los nodos del ejemplo propuesto

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



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

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

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

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

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

**Figura 5.31** Primera fase de la heurística aplicada al ejemplo propuesto

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

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

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

Entonces el problema que se plantea es:

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

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

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

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

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

Resultando la función de evacuación total P(z)

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

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

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

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

Entonces el problema para dicha dependencia es:

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

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

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

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

Entonces el problema que se plantea es:

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

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

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

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

Entonces el problema que se plantea es:

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

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

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

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

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

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

Figura 5.32 Definición de estrategias de evacuación

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

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

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

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

**Figura 5.33** Resultados ejemplo

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

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

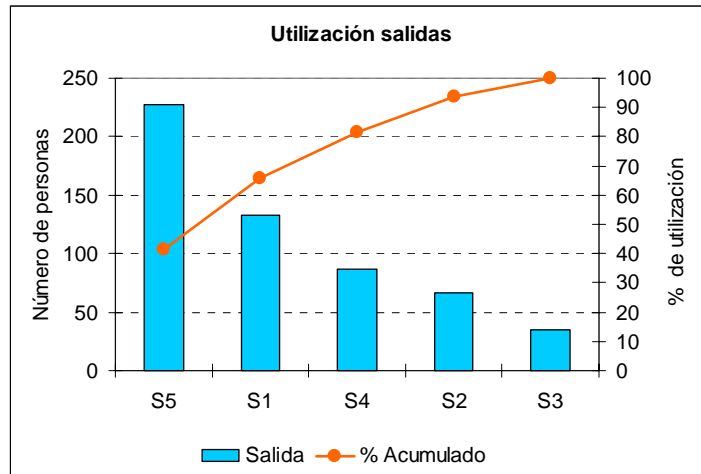


Figura 5.34 Análisis de la utilización de las salidas

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

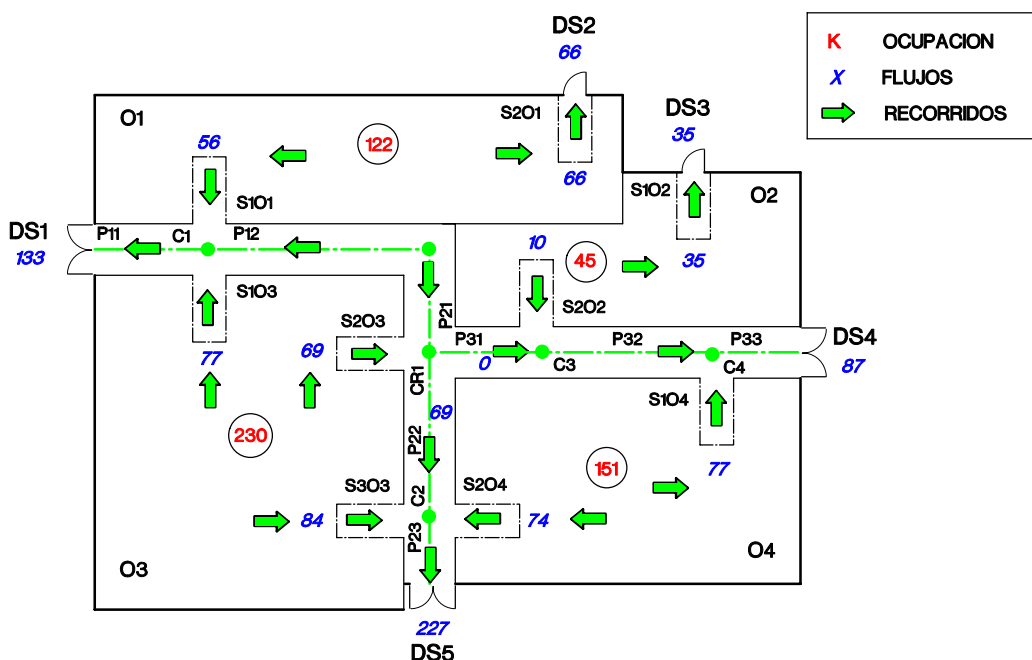


Figura 5.35 Distribución para una evacuación óptima

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

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

**Figura 5.36** Distribución de flujos para una evacuación óptima

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

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

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

Figura 5.36 Distribución de flujos para una evacuación óptima

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

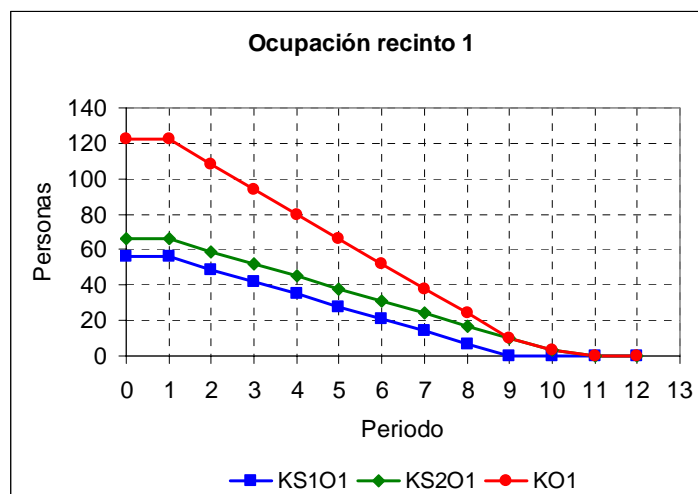
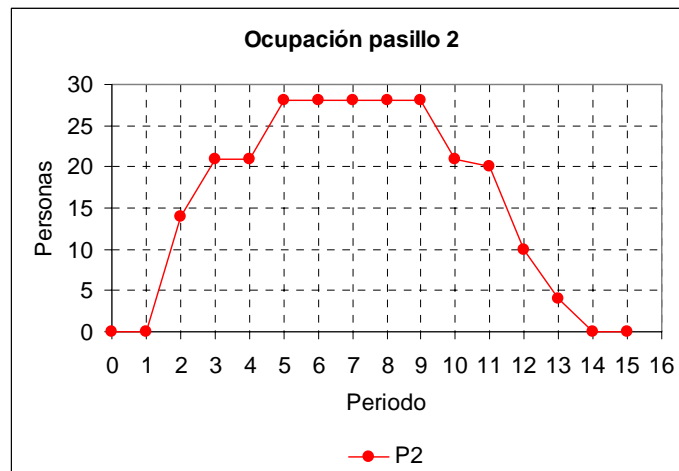


Figura 5.38 Análisis de la ocupación de una dependencia origen de evacuación

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

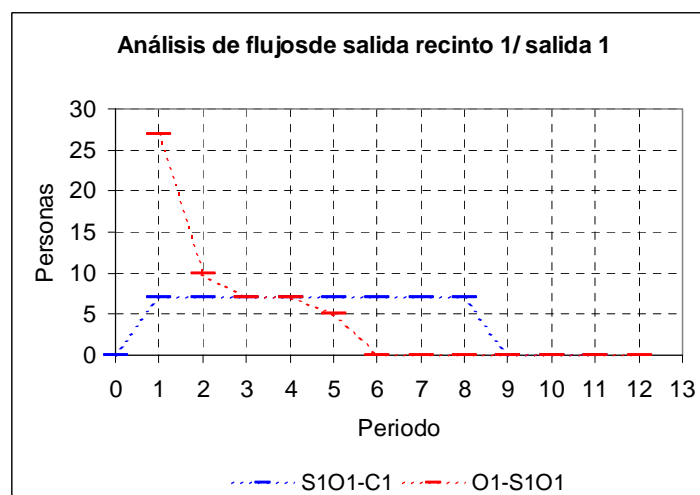


muestra su diagrama de ocupación en la figura 5.39, la ocupación crece hasta estabilizarse y luego desciende hasta el instante en que finaliza la evacuación. Este proceso de análisis se ha realizado en todas las dependencias que configuran el edificio, y no se han apreciado circunstancias especialmente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



**Figura 5.39** Análisis de la ocupación de una dependencia de circulación

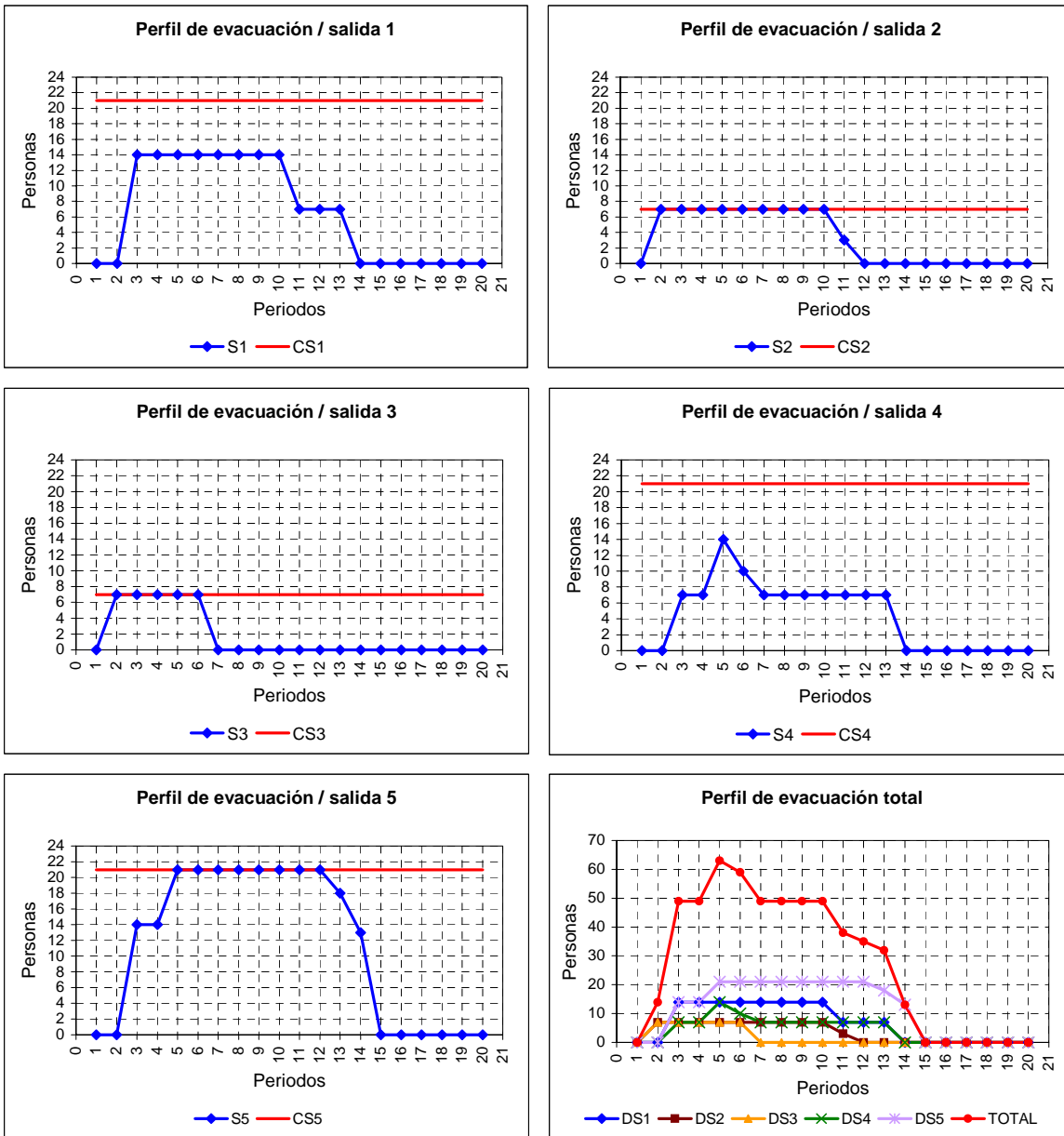
Otro elemento de estudio son los flujos que se registran en una dependencia o bien en una vía de evacuación, en la figura 5.40 se representan los flujos correspondientes a la salida 1 de la dependencia O1, son los flujos que se producen desde O1 hasta la salida 1 y desde O1 hasta la salida 2 que conduce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



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

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

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



**Figura 5.41** Análisis del perfil de evacuación

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

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

Figura 5.42 Análisis de la ocupación

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

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

Figura 5.43 Definición de estrategias de evacuación

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



## **CAPÍTULO 6: PROCEDIMIENTOS GRÁFICOS Y ANALÍTICOS PARA VALIDAR EL MODELO**

### **6.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE VALIDACIÓN**

El modelo utilizado para representar y estudiar el sistema de evacuación, conjunto de elementos que describen el proceso por el cual los ocupantes de un edificio se desplazan desde una posición inicial hasta un destino seguro, está formado por un conjunto de relaciones matemáticas, ecuaciones y representaciones gráficas caracterizadas por unos parámetros con el objetivo de aportar un conocimiento profundo del sistema.

El sistema de la evacuación de un edificio presenta una cierta complejidad, existen elementos cualitativos y cuantitativos cuya integración resulta engorrosa. En un sistema de estas características resulta difícil obtener una reproducción exacta de la realidad, se debe determinar si la información que proporciona el modelo es suficiente para tomar en consideración los resultados y evaluar si las diferencias son aceptables para el propósito del problema. Así, desde esta perspectiva puramente formal, resulta necesario comparar los resultados obtenidos mediante este modelo y los resultantes de ensayos y simulacros de evacuación.

Otro aspecto característico de este problema es que se opera con la seguridad de las personas, por ello la exigencia en el proceso de “validación del modelo” va más allá de aspectos formales y de la estricta responsabilidad científica, sería deseable ofrecer en cualquier afirmación las debidas garantías. Cuando el responsable de la seguridad de un edificio ocupado por cientos de personas establezca posibles estrategias de evacuación, a partir de cálculos o estudios realizados con los elementos propuestos en este trabajo, debería garantizarse que se toman las decisiones con absoluta responsabilidad dado que sus propuestas se hallan debidamente validadas.

En el proceso de validación del modelo por una parte se deben contrastar los aspectos cualitativos que describen las actuaciones de los ocupantes y por otra parte los cuantitativos implícitos en las condiciones de locomoción de los individuos.

Cuando en un recinto o bien en un edificio existen varias vías de evacuación los aspectos cualitativos y cuantitativos citados se deben verificar en cada una de ellas, el proceso de validación se realizará de forma independiente en las mismas, una vez verificadas todas ellas y analizadas posibles interacciones se extraerán conclusiones globales, a partir de las mismas será posible considerar validez del modelo. De la misma forma, si se han planteado soluciones óptimas será posible verificar si realmente cumplen esta condición.

En este trabajo se han utilizado diferentes modelos de locomoción de las personas, que se consideran perfectamente válidos. En primera instancia efectuaron la oportuna validación sus autores, posteriormente han dado lugar a numerosas aplicaciones, es por ello que se acepta que ha resultado suficientemente contrastada su validez. En esta situación se encuentran los modelos de J. J. Fruins [45], Nelson&McLennan [107], J. Pauls [119] y Predtechenskii Milinskii [129]. Solamente se debería verificar si su aplicación es correcta y si los parámetros utilizados se ajustan a la situación estudiada.

Inicialmente la fórmula utilizada para validar las magnitudes de locomoción consistía en contrastar la coincidencia de los tiempos de evacuación teóricos y experimentales, con posterioridad se buscaron otras fórmulas que ofrecieran mayor garantía, comparar simplemente dos valores podía dar lugar a dudas sobre si la coincidencia era realmente cierta o bien si se debía al azar, por otro lado, resulta difícil establecer acotaciones sobre cuál es la magnitud de las diferencias aceptables. La idea básica de las nuevas propuestas consiste en comparar una serie de valores, concretamente se han utilizado dos caminos: El primero consiste en analizar la similitud entre las funciones de evacuación inversa y los valores del número de salidas que se han registrado en determinados instantes, mientras que el segundo se basa en comparar la secuencia de los flujos teóricos con los reales registrados, en ambos casos ello se realiza en cada una de las salidas durante el tiempo que dura la evacuación del edificio.

## **6.2 VALIDAR EL MODELO A PARTIR DE LOS TIEMPOS DE EVACUACIÓN**

En el proceso de investigación y desarrollo del presente trabajo se ha observado en numerosas ocasiones afirmaciones sobre la bondad de determinados modelos, limitándose a verificar que los tiempos de evacuación observados en simulacros o ensayos guardaban una cierta similitud con los valores previstos. Cronológica e históricamente puede decirse que se trata de la forma de contraste genéricamente más utilizada para validar modelos de evacuación de edificios. En los primeros trabajos de esta tesis también se consideró adecuado y también se utilizó esta forma de contraste, sin embargo a medida que avanzaba la investigación se advirtió la necesidad de profundizar en los aspectos que comporta la validación del modelo.

### **6.2.1 Análisis de la coincidencia de tiempos de evacuación mediante una única prueba**

La realización de ensayos y simulacros de evacuación son una actividad costosa, es evidente en edificios industriales o de oficinas en los cuales se realiza una actividad productiva. En otras actividades como las escolares también suponen una notable dedicación de tiempo que también es importante, por ello en todos los casos tiene una gran importancia poder verificar los resultados mediante una única prueba.

Los modelos analíticos proporcionan el valor del tiempo de evacuación  $z$  de un determinado número de personas  $x_j$  que utiliza una salida  $j$  de un edificio o de un recinto, dicho valor deberá compararse con el resultante de un simulacro o de un ensayo. Para que la prueba sea estrictamente válida es obvio que deben coincidir las condiciones de cálculo y las físicas del recinto, deben ser idénticas las anchuras mínimas de paso, los recorridos de circulación, y deben mantenerse la ubicación y las características personales de los individuos que realizan la prueba. Normalmente no resulta fácil verificar y aceptar la estricta coincidencia de todas estas condiciones.

Al realizar el simulacro resultará la magnitud  $z'$ , entendida como el valor experimental del tiempo de evacuación. Se plantea como posible prueba para verificar el modelo de la locomoción mediante un único ensayo la estricta coincidencia de tiempos de evacuación.

$$z = z' \quad (6.1)$$

Solamente si existen pequeñas diferencias entre los valores de los tiempos de evacuación  $z$  y  $z'$ , resulta posible aceptar como válido el modelo de locomoción propuesto para la vía de evacuación  $j$ . Se entiende como exactitud proporcionada por el modelo el grado de coincidencia entre los resultados aportados por éste y el valor de referencia adoptado, en ausencia de otras mediciones no existe otra alternativa que considerar dicho valor único como una verdad absoluta.

Desde un principio debe plantearse la problemática de aceptar este modelo mediante una única prueba. Además de la dificultad práctica de garantizar la coincidencia de las condiciones de cálculo con las experimentales, si hubiera pequeñas diferencias entre las dos magnitudes supondría aceptar la bondad del modelo, debiendo admitir la posibilidad que ello fuera casual. De la misma forma cuando los valores no coincidan exactamente existe la posibilidad de formular argumentaciones que avalen las diferencias, ello da lugar a aceptar las diferencias como razonables y admitir que a pesar de las mismas el modelo es correcto. Definitivamente se considera que aceptar la bondad de un modelo de locomoción de una vía de evacuación a partir de la coincidencia de los tiempos de evacuación resulta una prueba muy frágil en muchos aspectos, con probabilidades de conclusiones erróneas, en un sentido otro, realmente significativas.

No debe olvidarse que para validar el modelo de evacuación de un edificio o de un recinto deben validarse los modelos de locomoción de todas sus vías y contrastar los aspectos de comportamiento establecidos en el sistema de evacuación.

### **6.2.2 Análisis de la coincidencia de tiempos de evacuación mediante pruebas repetidas**

Si resulta complicado realizar un simulacro o ensayo, esta dificultad se multiplica al plantear pruebas repetidas. Además de garantizar la adecuada similitud de las pruebas con los valores teóricos, prácticamente puede considerarse la extraordinaria dificultad

de realizar simulacros en idénticas condiciones, los ocupantes deben mantener la misma capacidad de locomoción, su ubicación debe ser idéntica, la motivación con que efectúan la prueba ser la misma, etc. en definitiva se debe garantizar que el conjunto de factores de definición del modelo o implícitos son idénticos.

La debilidad de la prueba de la coincidencia de tiempos de evacuación mediante un único ensayo quedaría notablemente superada si fuera posible efectuar repeticiones del proceso y pudieran compararse los valores teóricos con el valor medio de diferentes ensayos, resulta evidente que la prueba queda reforzada cuanto mayor sea el número de los mismos. Esta segunda propuesta, con todo el conjunto de observaciones formuladas sobre su dificultad y otras muchas que podrían realizarse, según lo argumentado no deja alternativa a aceptar los modelos cuando exista coincidencia en los tiempos de evacuación teóricos con el valor medio de los resultantes de los simulacros o los ensayos de evacuación.

$$z = \bar{z}' \quad (6.2)$$

¿Cuales serían las diferencias aceptables?. Tratar de responder esta cuestión conduce a un razonamiento más profundo de la situación y esencialmente sobre las características y de la naturaleza de la variable que determina el tiempo de evacuación.

### 6.2.3 Análisis de las desviaciones en el tiempo de evacuación al variar las magnitudes de locomoción

Para determinar las funciones de evacuación  $t_j(x_j)$  y de evacuación inversa  $p_j(z)$  de cada una de las salidas se realiza el pronóstico de las magnitudes de la densidad de ocupación  $d_j$ , de la velocidad  $v_j$  y de los flujos de circulación  $f_j$ . Una cuestión fundamental del problema consiste en evaluar la precisión con que han sido estimadas dichas magnitudes, se hace necesario evaluar las diferencias que pueden producirse en el tiempo de evacuación en función de las posibles diferencias o variaciones de las mismas.

Si se considera una desviación de  $\pm \eta \%$  en las magnitudes de la velocidad y de los flujos de circulación de los individuos resultan los intervalos

$$v_j \pm \Delta v_j \quad \text{y} \quad f_j \pm \Delta f_j \quad (6.3)$$

siendo los valores de las respectivas variaciones de la velocidad y del flujo

$$\Delta v_j = \eta v_j / 100 \quad \text{y} \quad \Delta f_j = \eta f_j / 100 \quad (6.4)$$

y en consecuencia la velocidad de circulación y el flujo estarán comprendidos entre unos valores máximos y mínimos

$$\left. \begin{array}{l} v_j^+ = v_j + \Delta v_j \\ v_j^- = v_j - \Delta v_j \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} f_j^+ = f_j + \Delta f_j \\ f_j^- = f_j - \Delta f_j \end{array} \right\} \quad (6.5)$$

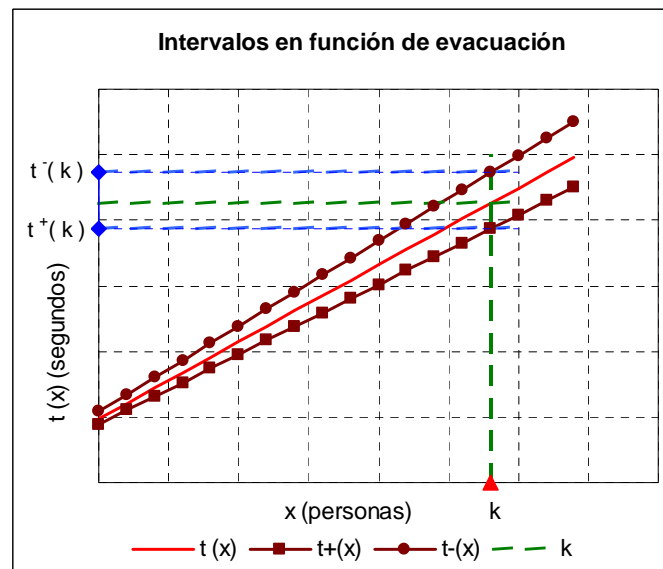


Si se suponen las magnitudes de locomoción constantes, al sustituir en la expresión que permite obtener la función de evacuación de la salida  $j$  para el problema de la evacuación de un recinto resulta

$$t_j^+(x_j) = \frac{l_j}{v_j^+} + \frac{x_j}{F_j^+} \quad t_j^-(x_j) = \frac{l_j}{v_j^-} + \frac{x_j}{F_j^-} \quad (6.6)$$

Se observa que  $t_j^+$  corresponde al tiempo de evacuación cuando  $v_j^+$  y  $F_j^+$  se hallan en el nivel alto, entonces  $t_j^+ < t_j^-$  y el tiempo  $t_j$  que van a tardar en abandonar el recinto un determinado grupo de  $x_j$  personas si el valor de las magnitudes de locomoción  $v_j$  y  $F_j$  es mayor necesariamente va a resultar menor.

La representación de  $t_j^+(x_j)$  y  $t_j^-(x_j)$  conjuntamente con la de la función de evacuación  $t_j(x_j)$  da lugar a la figura 6.1, donde puede observarse que para cada ocupación  $x_j$  se establece un intervalo para el pronóstico del tiempo de evacuación.



**Figura 6.1** Intervalo de tolerancia a partir de la función de evacuación

En el caso de un recinto con una única salida utilizada por  $k$  personas, sustituyendo en la expresión (6.6) se obtiene el intervalo

$$\left[ t_j^+(k) = \frac{l_j}{v_j^+} + \frac{k}{F_j^+}, t_j^-(k) = \frac{l_j}{v_j^-} + \frac{k}{F_j^-} \right] \quad (6.7)$$

Una vez efectuada la representación si se sitúa un valor  $k$  en el eje de abscisas, la línea de intersección trazada a partir de dicho valor con  $t(x^+)$  y  $t(x^-)$  define el intervalo de variación en el tiempo de evacuación, si se acepta una desviación en los parámetros de circulación del  $\pm\eta$  %.

Entonces el procedimiento para validar el modelo de locomoción de la vía  $j$  consiste en aceptar el modelo si para diferentes valores  $k$  es posible verificar que el tiempo de eva-

cuación  $z'$  se sitúa dentro del intervalo  $[t(k^+), t(k^-)]$  calculado, sencillamente se aceptaría el modelo si:

$$z' \in [t(k^+), t(k^-)] \quad (6.8)$$

De forma análoga puede operarse con la función de evacuación inversa

$$p_j^+(z) = \begin{cases} 0 & z < \frac{l_j}{v_j^+} \\ zF_j^+ - \left(\frac{l_j}{v_j^+}\right)F_j^+ & z \geq \frac{l_j}{v_j^+} \end{cases} \quad p_j^-(z) = \begin{cases} 0 & z < \frac{l_j}{v_j^-} \\ zF_j^- - \left(\frac{l_j}{v_j^-}\right)F_j^- & z \geq \frac{l_j}{v_j^-} \end{cases} \quad (6.9)$$

Cuya representación puede observarse en la figura 6.2. En este caso se sitúa el valor  $k$  en el eje de ordenadas, entonces serán las intersecciones con  $p^+(z^+)$  y  $p^-(z^-)$  las que definirán el intervalo del tiempo de evacuación, en cuyo caso corresponde hallar  $z^+$  y  $z^-$  resolviendo

$$k = p^+(z^+) \quad \text{y} \quad k = p^-(z^-) \quad (6.10)$$

definitivamente resulta

$$z^+ = \frac{l_j}{v_j^+} + \frac{k}{F_j^+}, \quad \text{y} \quad z^- = \frac{l_j}{v_j^-} + \frac{k}{F_j^-} \quad (6.11)$$

en cuyo caso se aceptaría el modelo si:

$$z' \in [z^-, z^+] \quad (6.12)$$

Inicialmente se han utilizado valores del coeficiente  $\eta = \pm 10\%$ , en situaciones ya experimentadas este coeficiente se ha reducido al 5%.

Así por ejemplo para validar las magnitudes de locomoción de una salida de un recinto de 2 metros de ancho y un recorrido de 13 metros, si se supone una velocidad de circulación de 40 metros por minuto y un flujo de 64 personas por metro y minuto constantes, admitiendo diferencias de  $\pm 5\%$  en las magnitudes de locomoción, resultan las siguientes funciones de evacuación e intervalo de tolerancia:

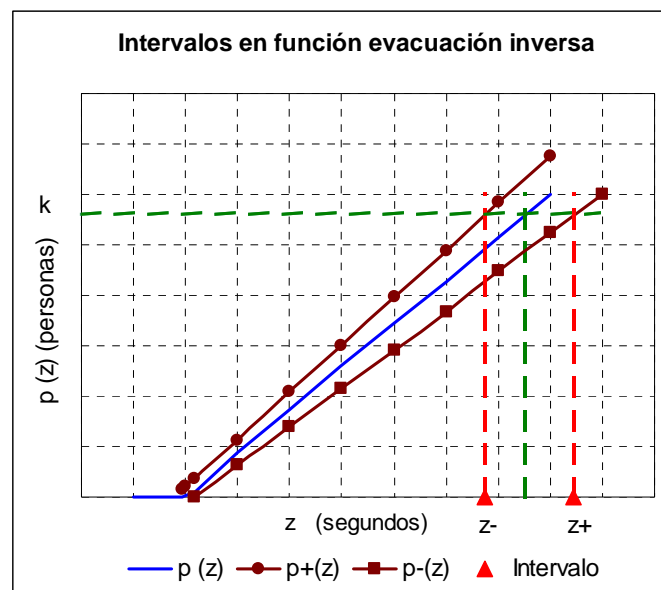
$$t(x) = 19,5 + 0,469x$$

$$t^+(x) = 18,57 + 0,446x$$

$$t^-(x) = 20,53 + 0,493x$$

Para la evacuación de 275 personas se precisa un tiempo de 148 segundos y el intervalo de tolerancia estará comprendido entre [141, 156] segundos. Sencillamente se trata de tomar como válida la función de evacuación si el resultado de utilizar 275 personas esta

salida da lugar a un tiempo de evacuación comprendido en los valores establecidos en la citada tolerancia. En caso de discrepancias deberán ajustarse las magnitudes de locomoción para lograr la estricta coincidencia de valores.

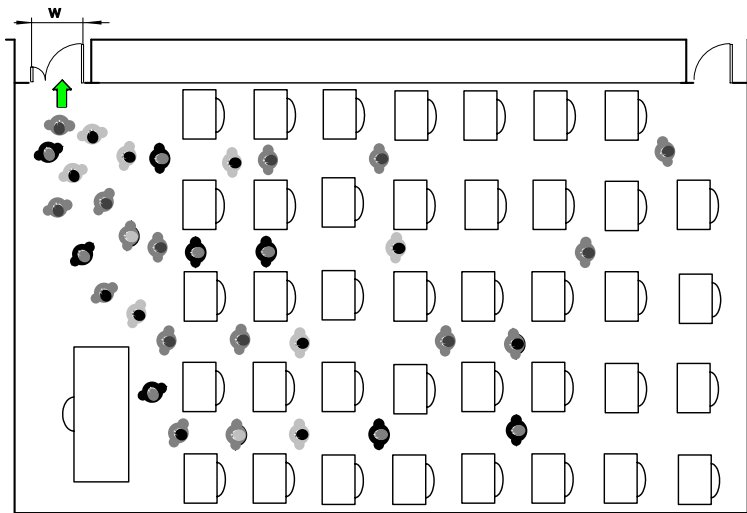


**Figura 6.2** Intervalo de tolerancia a partir de la función de evacuación inversa

Puede afirmarse que existe una incertidumbre sobre el tiempo de evacuación. El concepto de incertidumbre de una determinada magnitud, en general se asocia a la mayor o menor proximidad de los resultados a un valor de referencia, normalmente el “valor auténtico”, sin embargo en este caso ¿Cuál es el valor auténtico?, ¿Cuál es el tiempo que se tarda en salir de un recinto o de un edificio?. La referencia es una magnitud desconocida de carácter aleatorio que puede definirse mediante una determinada distribución de probabilidad.

#### 6.2.4 Distribución del tiempo de salida $z'$

Diferentes autores afirman que la distribución que modela el tiempo de salida de un recinto puede suponerse que sigue una distribución logarítmico normal, también es cierto que otros autores utilizan una distribución normal. Para posicionarse a favor de una u otra propuesta de forma objetiva se llevó a cabo el siguiente experimento: Se cronometró el tiempo que tardaban los estudiantes de un instituto de secundaria en abandonar el aula, un recinto como el representado en la figura 6.3 que dispone de dos salidas. Sin embargo para reducir efectos de actitud que pudieran dar lugar a dudas en la distribución hacia cada una de las dos salidas, solamente se utiliza la salida anterior de 1 metro de anchura efectiva. El simulacro se repitió en quince ocasiones con 32 alumnos, en las cuales no existe la certeza de que participaran exactamente las mismas personas.



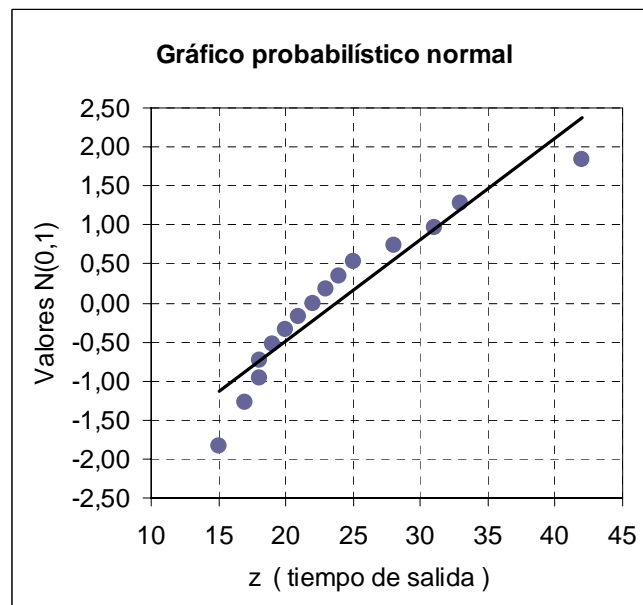
**Figura 6.3** Planta del aula en la que se realizó la experimentación

Los resultados de los tiempos de evacuación se resumen en la tabla 6.1.

Experiencia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Tiempo ( segundos )	23	21	20	17	15	24	18	33	19	25	20	28	31	42	18

**Tabla 6.1** Resultados de la experimentación de la evacuación del recinto

En primer lugar mediante un gráfico probabilístico normal se trata de observar si las observaciones se ajustan aceptablemente a dicha distribución, se obtiene la representación de la figura 6.4, donde se aprecia una cierta discrepancia sobre la misma.



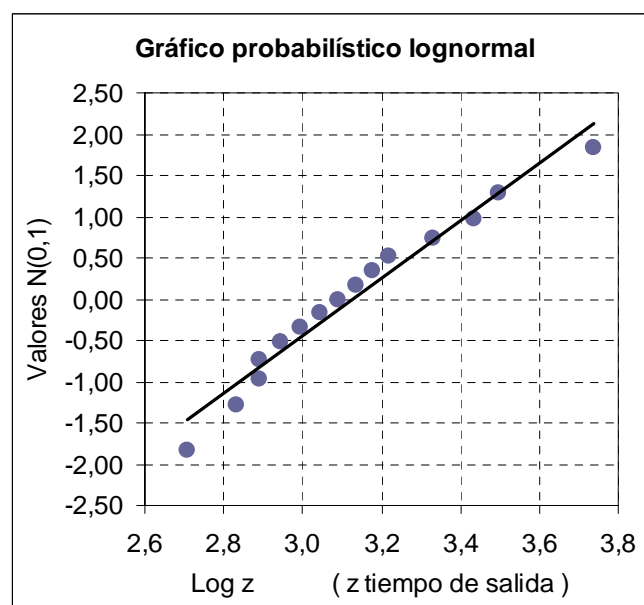
**Figura 6.4** Gráfico probabilístico normal del tiempo de evacuación

Se observa que se produce un mejor ajuste a una distribución logarítmico-normal, resultando el gráfico de la figura 6.5. En dicha representación se obtiene una clara alineación, lo que permite admitir que dichas observaciones se ajustan a dicha distribución.

Los resultados obtenidos permiten admitir razonablemente los tiempos de salida de un recinto siguen una distribución logarítmico normal. Así resulta que el  $\ln z'$  sigue una distribución normal de parámetros  $m$  y  $\sigma^2$ , que pueden obtenerse a partir de los valores experimentales de la media y de la variancia de la muestra  $E(x)$  y  $V(x)$ , resultando las expresiones:

$$\sigma^2 = \ln \left\{ 1 + \frac{V(x)}{[E(x)]^2} \right\} \quad (6.17)$$

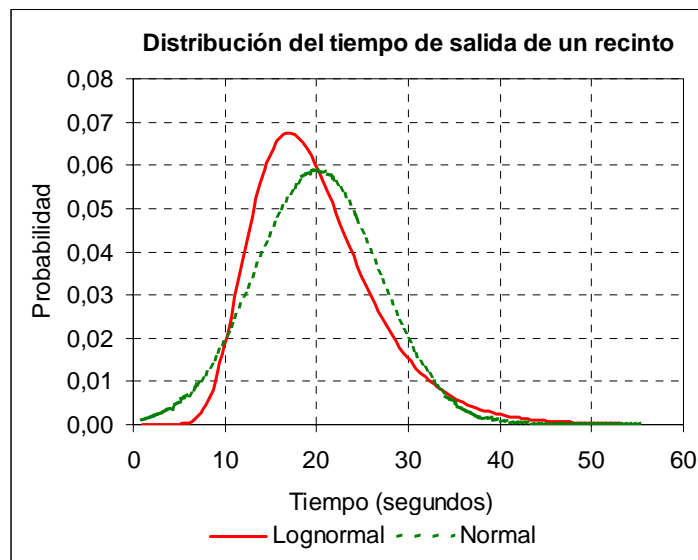
$$m = \left\{ \ln E(x) - \frac{\sigma^2}{2} \right\} \quad (6.18)$$



**Figura 6.5** Gráfico probabilístico logarítmico normal del tiempo de evacuación

En el ejemplo considerado, la media y la variancia de la muestra son respectivamente 23,6 y 52,7. Sustituyendo dichos valores en las expresiones (6.17) y (6.18) se determina que los parámetros de la distribución log-normal son 3,116 la media y 0,090 la varianza.

En general parece razonable suponer que cuando un grupo de individuos abandona un recinto con una adecuada motivación pueden reducir el tiempo de evacuación, ello se logra esforzándose y con una cierta fortuna. Sin embargo, múltiples circunstancias hacen que el tiempo de evacuación se dilate, estas circunstancias facilitan que los perfiles de distribuciones asimétricas parezcan las más adecuadas. En la figura 6.6 se representan ambas distribuciones donde puede apreciarse las diferencias resultantes.



**Figura 6.6** Diferencia en la distribución del tiempo de salida de un recinto

Finalmente si se concluye que el tiempo de evacuación de un recinto como el analizado sigue una distribución logarítmico-normal, debe admitirse que la experimentación realizada no tiene la entidad suficiente para garantizar que ello suceda en todos los casos, para ello debería experimentarse con otros colectivos y en un número más elevado de situaciones. Si se decidiera trabajar determinando intervalos de confianza del tiempo de evacuación, debería operarse con la distribución logarítmico-normal, dado que esta forma de proceder permite garantizar que el valor medio del tiempo de evacuación en un  $(1-\alpha)$  % de los casos se halla comprendido entre los valores que define el intervalo calculado.

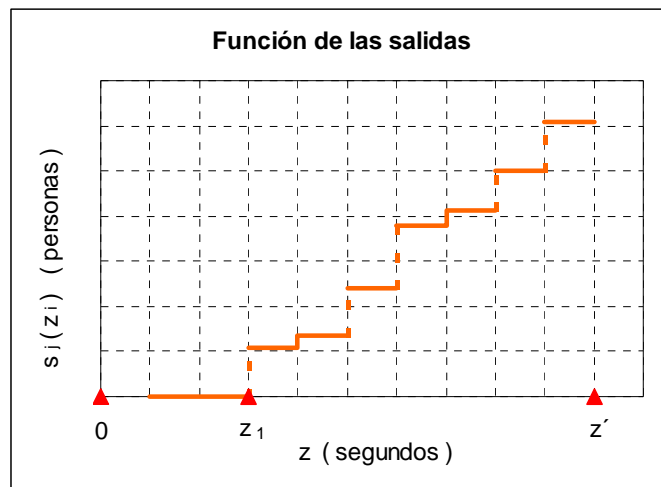
### 6.3 VALIDAR EL MODELO A PARTIR DE LA FUNCIÓN DE EVACUACIÓN INVERSA

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

#### 6.3.1 Obtención y análisis de la función de salidas $s_j(z)$

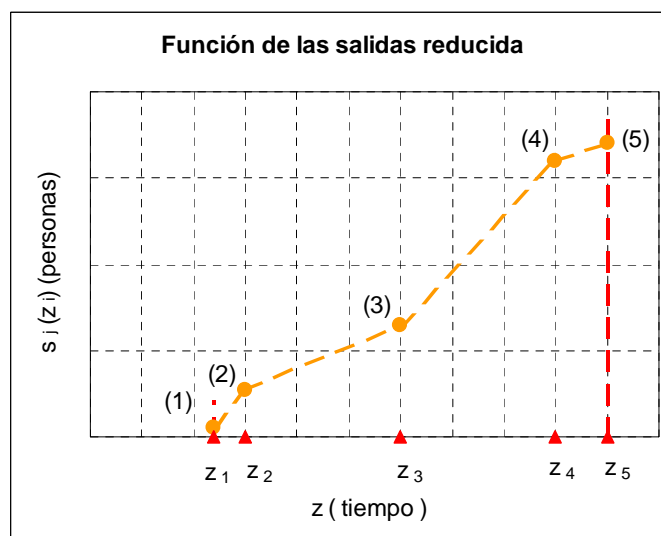
Registrando el número de personas que abandonan el edificio por una salida  $j$  en determinados instantes  $z$  se obtiene la función estrictamente creciente  $s_j(z)$ , representada en la figura 6.7. En ella se observa que las llegadas a la salida se registran en el momento que se contabilizan, de ahí que el gráfico adopte una forma escalonada, indicando el primer eslabón el instante en el cual los ocupantes empiezan a abandonar el recinto, y el

último corresponde al instante en el cual finaliza la evacuación. En este caso se representa una situación en la cual las mediciones se han realizado en intervalos regulares de tiempo, lo que necesariamente no tiene porque ser así.



**Figura 6.7** Representación de una función de salidas

Para implantar este proceso de contraste se supone que es posible efectuar mediciones del número de personas que han abandonado el recinto por la salida  $j$  en determinados periodos de tiempo, por ejemplo intervalos regulares de 5, 10, 15 ó 20 segundos, lo que dará lugar a disponer de un conjunto amplio de mediciones. Desde un punto de vista práctico la realidad es que aunque técnicamente son posibles estos dispositivos de conteo, no son habituales y normalmente no será posible disponer de tantos valores, sin embargo el procedimiento sigue siendo perfectamente válido con pocas observaciones. Una forma práctica de realizar las mediciones puede ser tan simple como situar dos personas en una salida, una mediante un cronómetro mide el tiempo y la otra contabiliza las personas que cruzan delante de las mismas y anota ambas magnitudes.



**Figura 6.8** Representación de una función de salida reducida

En la figura 6.8 se presenta una situación más viable, consistente en efectuar cuatro ó cinco mediciones, que corresponden a los instantes en los cuales los primeros ocupantes empiezan a salir, mediciones intermedias que pueden realizarse por ejemplo a los 30, 60 ó 90 segundos, y el instante en el cual los últimos ocupantes abandonan el edificio. Se observa que el punto (1) indica el instante  $z_1$  en el cual se producen las primeras salidas, el (5) indica el final de la evacuación  $z_5$  y el resto de mediciones, los puntos (2), (3) y (4), corresponden a instantes intermedios, en los que deben conocerse las dos magnitudes  $(z_i, p(z_i))$ . La representación se ha simplificado mediante puntos unidos con líneas para facilitar la comprensión de la secuencia cronológica de las mediciones.

Otra posibilidad ciertamente interesante consiste en estimar los parámetros de la función de evacuación inversa y las magnitudes de locomoción, y representar el proceso como muestra la figura 6.9. Si para la salida  $j$  se conoce el instante  $z_1$  en el cual los ocupantes llegan a la misma, la demora  $z_0$  en el inicio de la evacuación y la longitud  $l_1$  del recorrido de evacuación, la velocidad media de circulación resulta

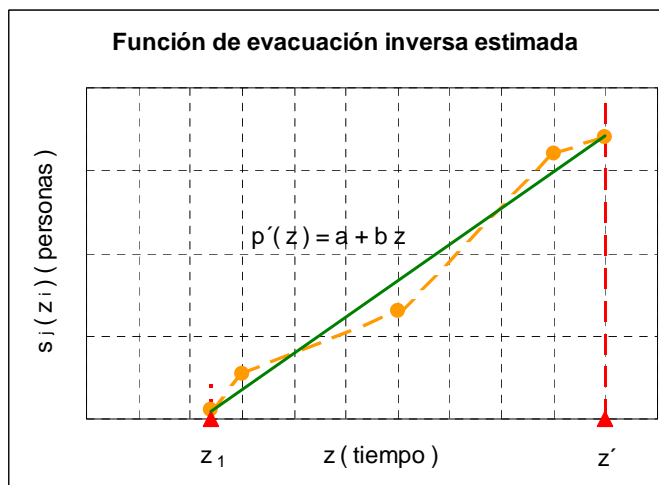
$$v'_j = \frac{l_j}{z_1 - z_0} \tag{6.20}$$

De la misma forma el valor medio del flujo estimado  $F'_j$  para la salida  $j$  será:

$$F'_j = \frac{p(z')}{z' - z_1} \tag{6.21}$$

resultando inmediato conocer el valor del flujo específico  $f'_j$  que se registra en la salida  $j$  si se conoce la anchura mínima de paso de la salida  $w_j$

$$f'_j = \frac{F_j}{w_j}$$



**Figura 6.9** Proceso para obtener  $p'_j(z)$  mediante la función de salidas



Una forma más todavía simple de proceder consiste en ajustar sobre los puntos experimentales  $s_j(z)$  la recta mínimo cuadrática cuando se está representando la función  $p'(z)$ , obteniéndose la expresión:

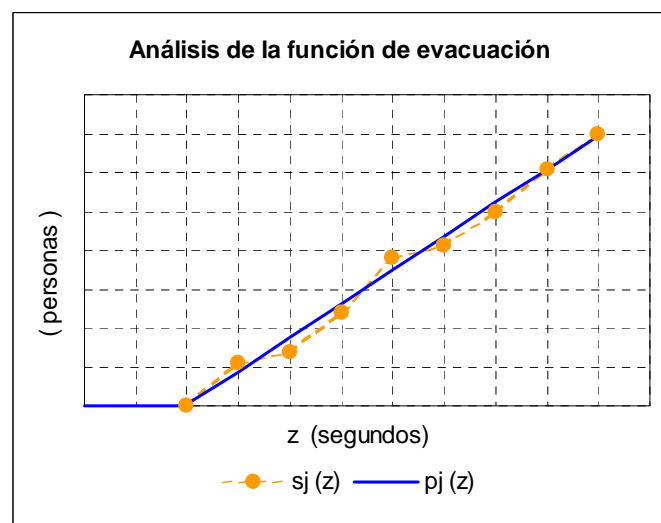
$$p'(z) = a z - b \quad (6.22)$$

$p'(z)$  puede considerarse como la expresión de la función de evacuación inversa experimental, a partir de la cual identificando términos se obtienen directamente las estimaciones de los valores del flujo y de la velocidad de circulación

$$F'_j = b \quad v'_j = \frac{l_j F_j}{a} \quad (6.23)$$

### 6.3.2 Análisis gráfico de la función de evacuación inversa $p_j(z)$

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

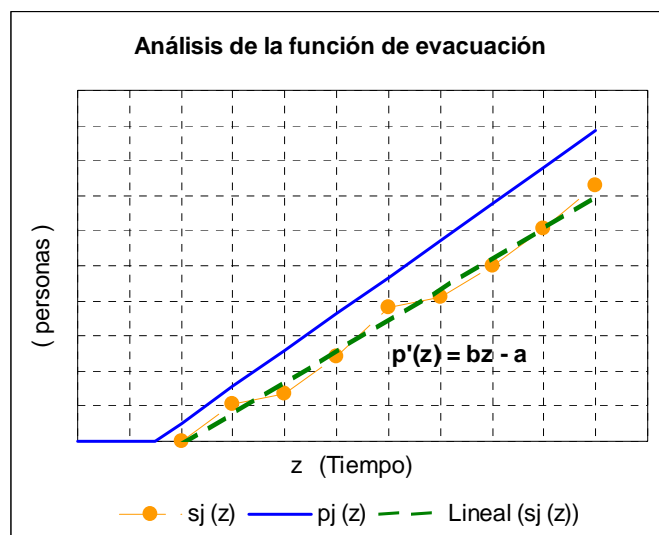


**Figura 6.10** Proceso de comparación de  $p_j(z)$  y  $s_j(z)$

Según se ha analizado en capítulos anteriores la función de evacuación inversa  $p_j(z)$  puede adoptar formas distintas según corresponda a situaciones en las cuales se estudia la evacuación de un recinto o de un edificio, pero en cualquier caso la prueba que se plantea es exactamente la misma y consiste en reconocer visualmente si las funciones de evacuación calculadas y los valores experimentales obtenidos guardan la adecuada similitud. Es una prueba muy simple mediante la cual se obtiene un procedimiento de contraste robusto que globalmente verifica la coincidencia de velocidades, flujos y tiempos de evacuación. En el caso de obtener una situación como la representada en la figura 6.10 se puede aceptar la plena coincidencia entre las magnitudes que definen el proceso de evacuación del recinto por la correspondiente salida  $j$ . El tramo inicial de la

gráfica indica el tiempo de recorrido, si son iguales en ambas funciones indica la coincidencia de las velocidades de circulación, de la misma forma la igualdad de pendientes supone aceptar la identidad de flujos.

En ocasiones se observa una cierta discrepancia entre las funciones  $p_j(z)$  y  $s_j(z)$ , existiendo algunas situaciones características. Así cuando las magnitudes de locomoción de los ocupantes son ligeramente inferiores a las utilizadas para obtener la función de evacuación inversa los resultados adoptan una forma como la representada en la figura 6.11, en ella se aprecia como el tiempo que tardan en alcanzar la salida es mayor que el calculado, luego las líneas calculada y estimada mantienen una cierta divergencia y se observa una ligera diferencia en las pendientes de las rectas y en consecuencia en la magnitud de los flujos de circulación, en este caso puede concluirse que en principio la velocidad de desplazamiento de los ocupantes es realmente inferior al valor previsto.

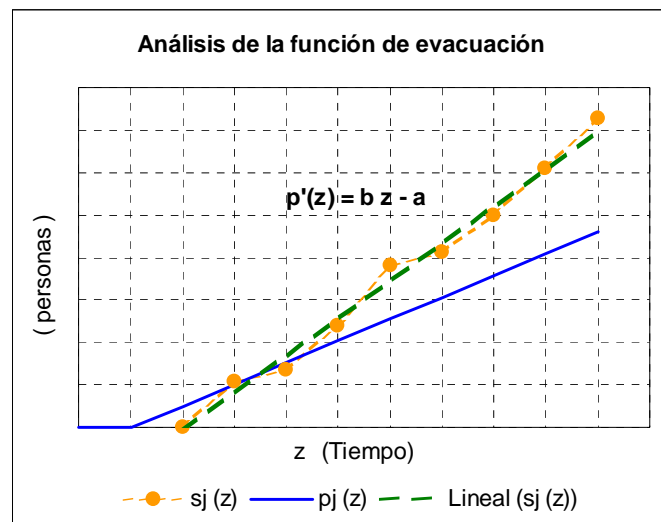


**Figura 6.11** Capacidad de locomoción inferior a la prevista

Cuando se producen diferencias entre ambas funciones, diferencias menores que las representadas en la figura 6.11, donde la función de evacuación inversa  $p_j(z)$  queda ligeramente por encima de los valores experimentales de  $s_j(z)$  resultantes de ensayos o simulacros, podría considerarse que la función de evacuación  $p_j(z)$  es la adecuada para pronosticar el desplazamiento de los individuos en situaciones de emergencia. Se prevé que en estos casos las magnitudes de locomoción de los individuos sean razonablemente superiores a las consideradas inicialmente, Pretechenskii y Milinskii [129] estiman que este incremento oscila entre un 10 y un 20 %.

Si las magnitudes de locomoción utilizadas para obtener la función de evacuación inversa son inferiores a las resultantes de ensayos o simulacros resulta una situación similar a la analizada, en la que la función teórica  $p_j(z)$  se sitúa debajo de la experimental  $s_j(z)$ . Si el desajuste fuera en la estimación de la densidad de ocupación la situación también resulta característica, concretamente en el caso representado en la figura 6.12 se ha considerado una densidad de ocupación menor de la que realmente se produce, lo que se manifestaría en el gráfico de la siguiente forma: Al ser mayor la densidad resulta

una velocidad de circulación menor y en consecuencia el tiempo que emplean los ocupantes hasta llegar a la salida es mayor, con lo que se aprecia una discrepancia en el punto de iniciarse la evacuación. Además, al ser mayor la densidad de ocupación del valor previsto, los flujos son mayores, circunstancia que se refleja en el gráfico con una mayor pendiente de los valores experimentales. Corrigiendo de forma adecuada la densidad de ocupación en el modelo de la función de evacuación inversa  $p_j(z)$ , se logra la plena coincidencia con la función de salidas  $s_j(z)$ .



**Figura 6.12** Densidad de ocupación superior a la prevista

Si la diferencia que se produce es consecuencia de utilizar una densidad de ocupación inferior, los papeles de las funciones analizadas se intercambian, las llegadas a la salida se adelantan y los flujos descienden.

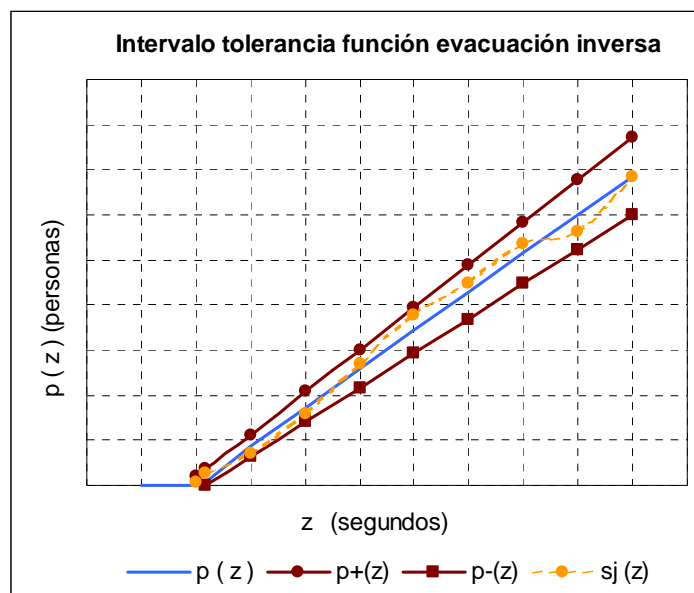
Los aspectos analizados son algunos de los más significativos, otras situaciones se presentan en el apartado de aplicaciones y existen otros casos en los cuales no se ha logrado ni coincidencia de funciones ni interpretación razonable de los resultados, estos casos se atribuyen a comportamientos anómalos de los ocupantes en los ensayos o bien en los simulacros.

### 6.3.3 Intervalo de tolerancia en la función de evacuación inversa

Según se ha detallado en el apartado 6.2.2 es posible obtener de forma muy simple un intervalo en la función de evacuación de una salida  $j$  si se admiten desviaciones de  $\pm \eta \%$  en las magnitudes de locomoción, dando lugar a una representación gráfica como la obtenida en la figura 6.13. Se trata de establecer unos límites y analizar si las observaciones de la función de salidas  $s_j(z)$  se sitúan dentro de los mismos, posiblemente parezca una forma más objetiva de contrastar las magnitudes de locomoción que la planteada en el apartado anterior donde se trataba de apreciar la alineación de las observaciones. La realidad es que a menudo han surgido situaciones en las cuales algunos valores de las observaciones iniciales se han situado fuera del intervalo establecido por este

procedimiento, mientras que el resto de puntos se ha alineado de forma correcta con la función de evacuación inversa. Como consecuencia de sobrepasar los límites establecidos se llega a la conclusión que debe rechazarse el modelo, conduciendo claramente a una conclusión errónea. Definitivamente se concluye que se ha probado un procedimiento de contraste aparentemente muy razonable pero que en la práctica existen dudas sobre su eficacia.

Otro aspecto difícil de establecer radica en adoptar el valor adecuado para el coeficiente  $\eta$  que establece la magnitud del intervalo, se ha operado con valores del 5 % y del 10 %, dando lugar a variaciones del 10 y el 20 % en el número de personas capaces de abandonar el recinto por la salida respectiva.



**Figura 6.13** Contraste por intervalo de tolerancia

En la situación que se presenta en la figura 6.13 se observa que la totalidad de observaciones quedan ubicadas en el intervalo establecido, por lo que sin lugar a dudas debe aceptarse que el modelo de locomoción de la salida  $j$  se ajusta de forma adecuada a los valores experimentales.

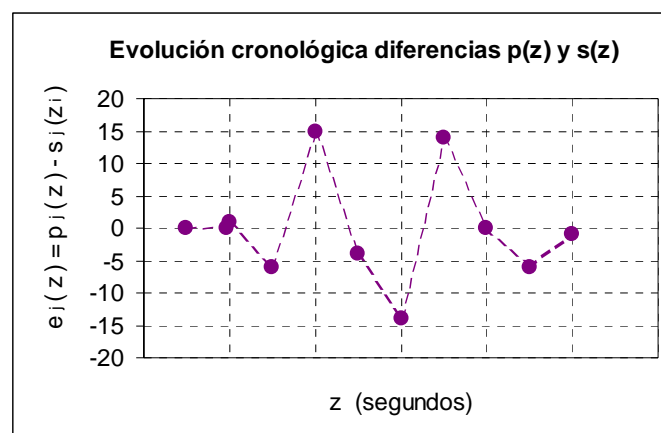
#### 6.3.4 Análisis de las diferencias entre la función de evacuación inversa $p_j(z)$ y la función de salidas $s_j(z)$

Otra posibilidad consiste en estudiar las diferencias que se producen entre el número de personas que se prevé abandonarán el recinto en intervalos de tiempo  $i$ , y los que realmente se registran definidos por  $p_j(z_i)$  y  $s_j(z_i)$  respectivamente, dando lugar a un conjunto de valores expresados por  $e_j(z_i)$ :

$$e_j(z_i) = p_j(z_i) - s_j(z_i) \quad (6.25)$$

Para analizar  $e_j(z_i)$  se han utilizado procedimientos gráficos y analíticos, en este caso nuevamente cabe destacar la importancia de los procedimientos gráficos. En primer lugar conviene analizar la estabilidad de dichas diferencias en el tiempo, al ser  $p_j(z)$  y  $s_j(z)$  valores acumulados del computo total de las salidas que se han producido, hacen que la estabilidad de las diferencias sea una prueba potente. Debe verificarse si las desviaciones que se producen se mantienen estables en todos los periodos, para ello se procede a la representación gráfica de las mismas, resultando la gráfica de la figura 6.14 denominada “Evolución cronológica de las diferencias”. En este caso se observa como las diferencias se mantienen dentro de unos márgenes reducidos y centradas entorno al valor cero, admitiendo las oscilaciones como variaciones aleatorias y aceptando la coincidencia de los parámetros de locomoción de la salida  $j$ .

Cuando las magnitudes de locomoción de los individuos son inferiores a las inicialmente supuestas esta gráfica adopta una tendencia creciente a partir de un determinado punto del eje de abscisas, que corresponde al instante en el cual se llega a la salida. No puede ser de otra forma, dado que en cada instante son mayores las diferencias entre el número de personas que se estimaba debían abandonar el recinto y las que realmente lo abandonan. Obviamente si la velocidad de desplazamiento es superior a la prevista resulta una gráfica simétrica a la anterior y a partir de un determinado punto se producirían diferencias negativas crecientes.



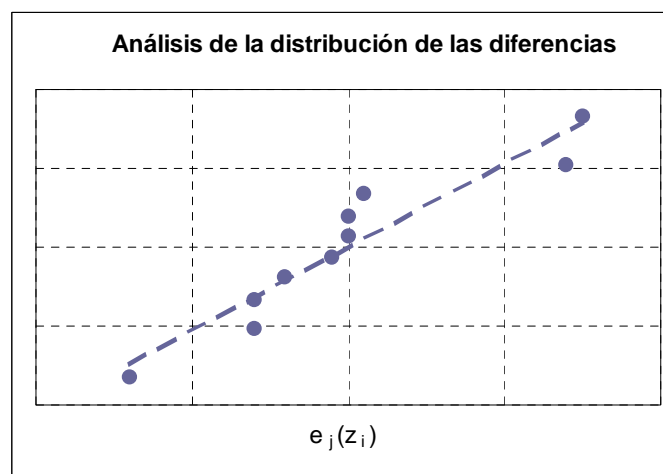
**Figura 6 14** Análisis de la estabilidad de las desviaciones

En algunos casos se ha observado que estas diferencias aumentan de amplitud, considerándose posible y admitiendo que al incrementar el tiempo resulta ampliada la magnitud de las desviaciones existiendo un incremento de la variabilidad, sin embargo en los casos estudiados se considera prematuro efectuar suposiciones al respecto. Es por ello, que éste es uno de los apartados enumerados en el capítulo 9 como aspectos en los cuales debe proseguirse la investigación. Desde un punto de vista analítico se deben evaluar globalmente la magnitud de las diferencias, determinando el valor medio  $\bar{e}_j(z_i)$  y la desviación tipo  $s_j(z_i)$  de las diferencias. Si se dispone de  $n$  observaciones resulta:

$$\bar{e}_j(z_i) = \frac{\sum_{i=1}^n e_j(z_i)}{n} \quad (6.25)$$

$$s_j(z_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [e_j(z_i) - \bar{e}_j(z_i)]^2}{n-1}} \quad (6.26)$$

De estas magnitudes necesariamente debe resultar que  $\bar{e}_j(z_i) \rightarrow 0$  y que la variabilidad debe ser lo más reducida posible. Cuando  $\bar{e}_j(z_i) > 0$  debe interpretarse que la velocidad de locomoción utilizada en el modelo es mayor de la que realmente se registra, de la misma forma que cuando  $\bar{e}_j(z_i) < 0$  indica que la velocidad es menor. En circunstancias óptimas debe suponerse que las diferencias son puramente aleatorias. Seguidamente se formula la hipótesis sobre si dichas diferencias siguen una distribución normal, aspecto que se analiza mediante un gráfico probabilístico al no disponer de suficientes observaciones para poder realizar un histograma o una prueba  $\chi^2$ . Dicha prueba se realiza con las observaciones del ejemplo representado en la figura 6.10, resultando el gráfico de la figura 6.15 en el que puede apreciarse una dudosa alineación de las diferencias, en cuyo caso se concluye que en este ejemplo la normalidad resulta cuestionable.

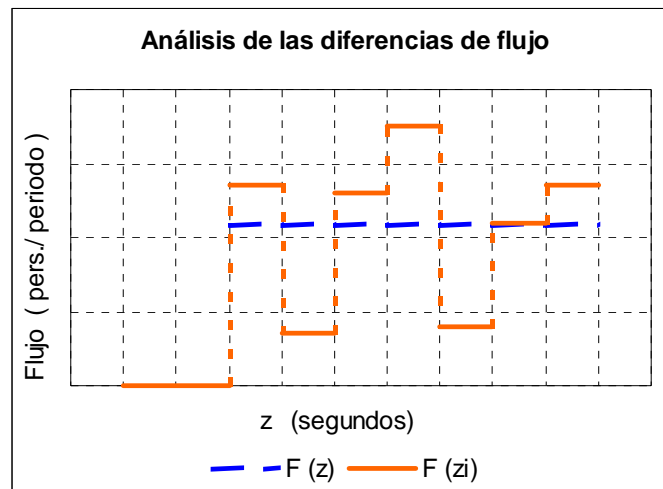


**Figura 6.15** Análisis de la normalidad de las desviaciones

Finalmente puede afirmarse que en condiciones de un modelo correcto las diferencias entre  $p_j(z_i)$  y  $s_j(z_i)$  expresadas por  $e_j(z_i)$  deben ser tales que sean estables en el intervalo de la evacuación, la media de las mismas tienda a cero, los errores sean puramente aleatorios y la variabilidad sea reducida. Sin embargo, la normalidad de las diferencias en algunos casos no ha sido posible probarla y no existe más alternativa que admitir que se desconoce si, las diferencias entre  $p_j(z)$  y  $s_j(z)$  cuando el modelo es correcto, siguen una distribución normal.

## 6.4 VALIDAR EL MODELO A PARTIR DEL VALOR DE LOS FLUJOS DE SALIDA

Una alternativa al procedimiento anterior de análisis de la función de evacuación, consiste en analizar los flujos, concretamente hallar la diferencia que existe entre los flujos inicialmente calculados y utilizados para obtener la función de evacuación con los experimentales que realmente se han registrado en ensayos o simulacros, a este procedimiento se le denomina “Análisis de los flujos”. Para la obtención del valor de los flujos registrados se requiere una simple manipulación de los valores correspondientes de las observaciones realizadas  $s_j(z)$ . El proceso puede observarse en la figura 6.16, en ella se representan los flujos supuestos inicialmente y los que realmente se producen, observándose claramente las oscilaciones aleatorias en los mismos.



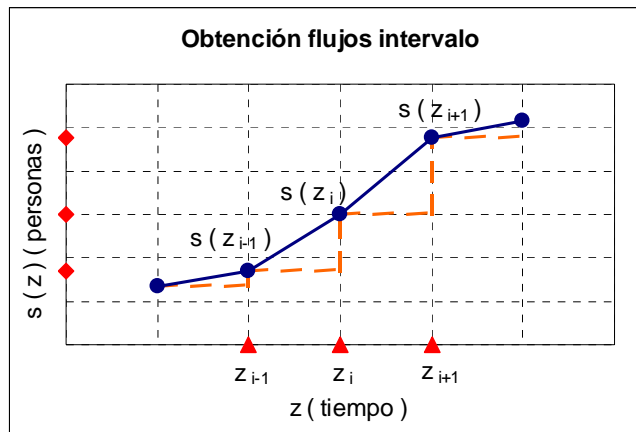
**Figura 6.16** Diferencias de flujos en una salida

### 6.4.1 Implantación y análisis del proceso de comparación de flujos

Necesariamente para implantar este proceso la primera operación que debe realizarse consiste en determinar los flujos. La magnitud de los flujos de salida en problemas de evacuación de recintos suele ser una magnitud constante y el valor de los flujos resultantes una magnitud con oscilaciones aleatorias. El valor del flujo registrado puede obtenerse de una forma muy simple determinando las personas que han abandonado el recinto por la salida correspondiente y dividiéndolo por el intervalo de tiempo que corresponda:

$$F'_j(z_i) = \frac{s_j(z_i) - s_j(z_{i-1})}{z_i - z_{i-1}} \quad (6.27)$$

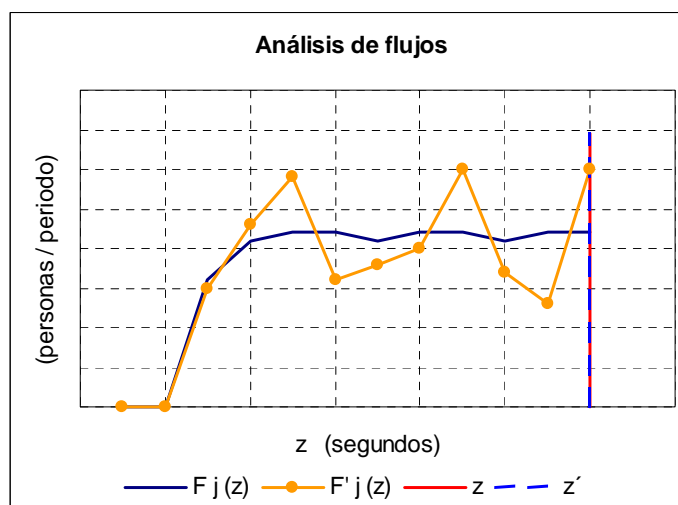
Como puede apreciarse en la figura 6.17 los flujos corresponden a las pendientes en los tramos respectivos.



**Figura 6.17** Proceso de obtención de flujos

### 6.4.2 Análisis gráfico de los flujos

El proceso que se propone consiste en observar visualmente si existen diferencias entre los flujos teóricos  $F_j(z)$  y los resultantes de ensayos o simulacros  $F'_j(z)$  que se producen en una salida  $j$ . Estas diferencias de flujo deben analizarse en representaciones como la que se presenta en la figura 6.18, en ella puede observarse que mientras los ocupantes se desplazan hasta la salida los flujos son nulos, en el instante en el cual los ocupantes empiezan a salir los flujos presentan un cierto valor de forma que si las velocidades de locomoción coinciden se inician en el mismo punto del eje de ordenadas, luego a partir de este instante existe en cada periodo un determinado flujo  $F'_j(z)$  cuyas oscilaciones se estiman aleatorias y cuyo valor medio coincide con el valor teórico  $F_j(z)$ . Todo ello conduce a una coincidencia de tiempos de evacuación, pudiendo llegar a la conclusión de que se trata de un modelo de locomoción para dicha salida perfectamente aceptable.



**Figura 6.18** Proceso de comparación de flujos

De la misma forma que en casos anteriores se han analizado diferentes situaciones, resulta inmediato observar que los flujos pueden situarse encima y debajo de los inicial-



mente supuestos, requiriendo ajustar oportunamente las magnitudes en cada una de estas situaciones. Puede observarse que la forma del gráfico depende en gran medida de la escala y el formato del mismo, en este sentido puede afirmarse que se trata de una representación más inestable que el análisis de la función de evacuación. También podría afirmarse que es una representación más sensible que permite observar con cierta facilidad aspectos que en la otra representación resultaban más complejos.

### 6.4.3 Análisis de las diferencias de los flujos

Se trata de comparar la diferencia entre la magnitud de flujos de cálculo en el correspondiente intervalo  $F_j(z)$  y los resultantes en el proceso de la evacuación:

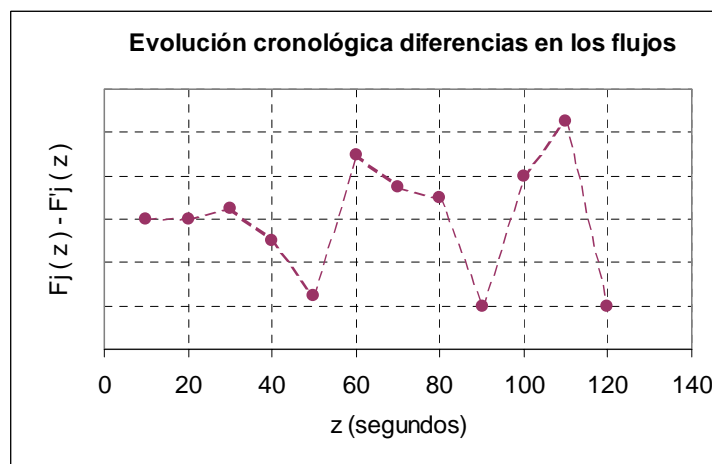
$$\varepsilon_j(z_i) = F_j(z_i) - \hat{F}_j(z_i) \quad (6.28)$$

Obtenidas las diferencias debe procederse a su análisis. Desarrollando la expresión anterior:

$$\varepsilon_j(z_i) = \frac{p_j(z_i) - p_j(z_{i-1})}{z_i - z_{i-1}} - \frac{s_j(z_i) - s_j(z_{i-1})}{z_i - z_{i-1}} = \frac{p_j(z_i) - s_j(z_i) + s_j(z_{i-1}) - p_j(z_{i-1})}{z_i - z_{i-1}}$$

$$\varepsilon_j(z_i) = \left( \frac{1}{z_i - z_{i-1}} \right) \left( [p_j(z_i) - s_j(z_i)] - [p_j(z_{i-1}) - s_j(z_{i-1})] \right) \quad (6.29)$$

Puede observarse en la expresión 6.29 que se trata de una magnitud distinta a  $e_j(z)$  utilizada para analizar las diferencias entre las funciones de evacuación  $p_j(z)$  y las salidas registradas  $s_j(z)$ , sin embargo el proceso de análisis es idéntico al utilizado entonces para  $e_j(z)$ .



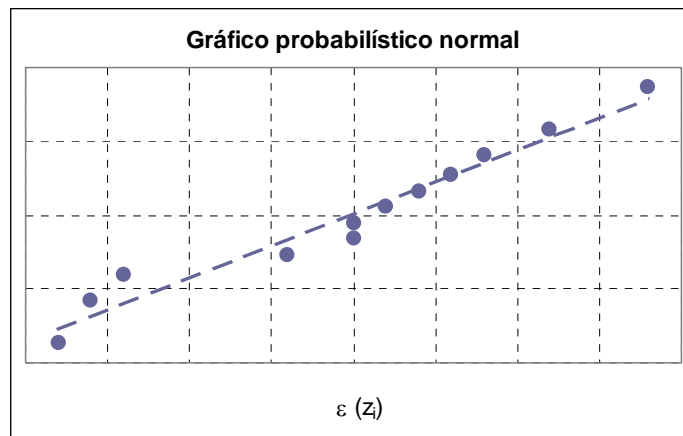
**Figura 6.19** Análisis de la evolución cronológica de las diferencias de flujo

Se considera necesario para aceptar la bondad del modelo de locomoción para una salida, verificar que no existan diferencias entre los flujos teóricos  $F_j(z)$  y reales  $\hat{F}_j(z)$ . Se consideran inevitables las oscilaciones aleatorias y las diferencias entre las mismas se

estima que deben ser estables en el tiempo, aspectos que pueden observarse al representar la evolución cronológica de  $\varepsilon_j(z)$ .

En la figura 6.19 se representa la evolución cronológica de las diferencias de flujos, en dicho gráfico, en la situación presentada, se observa la total coincidencia de los valores iniciales de los flujos teóricos y de los experimentales, en consecuencia los errores son nulos en estas mediciones iniciales, luego las diferencias que se presentan son positivas o negativas resultando unas diferencias completamente estables en valor su medio, de igual forma debe indicarse que no resulta clara la estabilidad de la amplitud de dichas diferencias.

Finalmente se trata de verificar la normalidad de las diferencias, para ello se recurre nuevamente a un gráfico probabilístico normal.



**Figura 6.20** Normalidad de las diferencias de flujo

En la figura 6.20 puede observarse como las diferencias se comportan siguiendo un patrón posiblemente normal, en dicho gráfico se ha situado en el eje de abscisas las diferencias, con los valores numéricos utilizados las diferencias oscilan entre  $\pm 10$  personas por periodo. Además en este ejemplo, el proceso de conteo se ha realizado manualmente, por lo que debe admitirse la dificultad del proceso y los posibles errores en la medición. Cuando se ha aceptado el modelo de locomoción para una determinada salida  $j$ , las diferencias  $\varepsilon_j(z)$  se han alineado razonablemente en el gráfico probabilístico suponiendo la normalidad de los mismos. El proceso analítico puede resumirse en los siguientes aspectos, que la media tienda a cero  $\bar{\varepsilon}_j(z_i) \rightarrow 0$ , que la variabilidad sea lo más reducida posible y se mantenga estable en el tiempo.

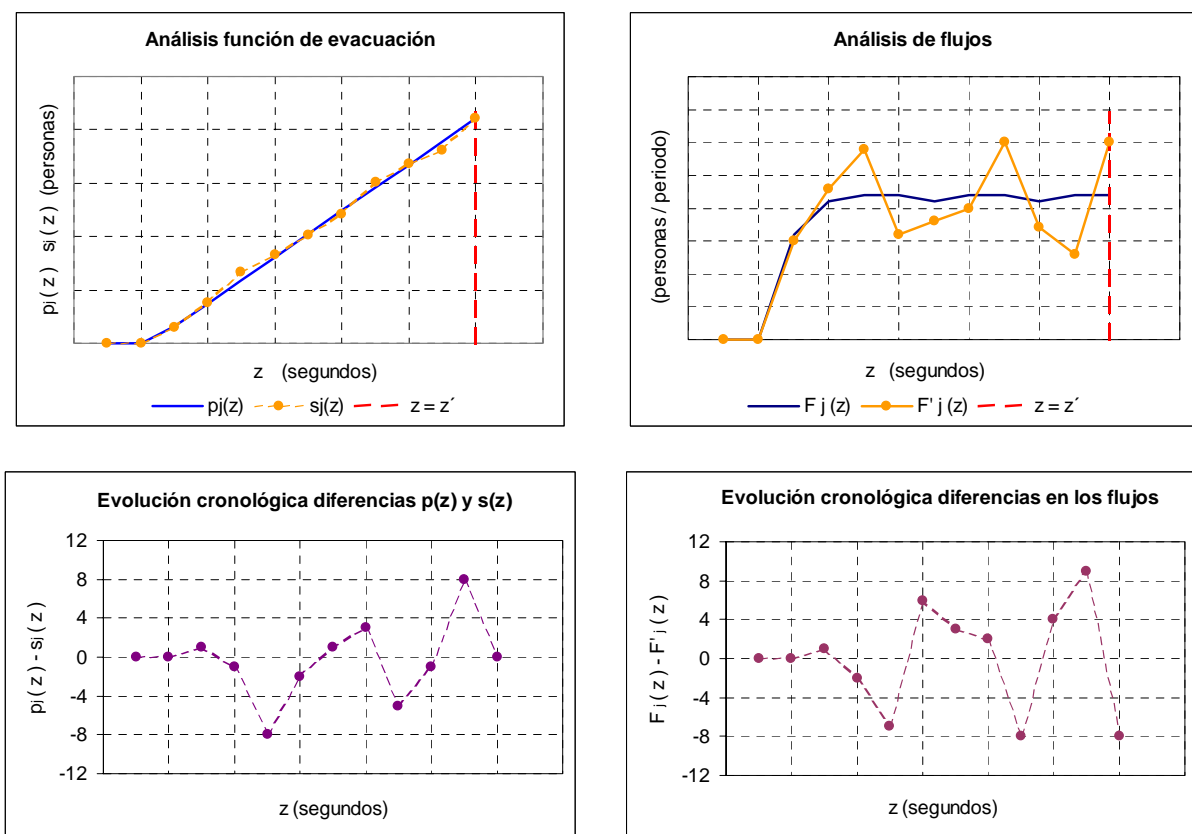
## 6.5 APLICACIONES DEL ANÁLISIS GRÁFICO DE RESULTADOS

Para validar resultados y justificar determinadas funciones de evacuación en algunos casos ha existido la necesidad de realizar un esfuerzo considerable, llegando a la conclusión de que mediante las herramientas descritas en los apartados 6.2 y 6.3 se puede obtener un notable conocimiento del problema. Es por ello, que se presentan algunas

situaciones concretas y se esbozan los aspectos más importantes del problema desde esta perspectiva. Con la finalidad de presentar las posibilidades así como las limitaciones de esta propuesta, sobre la base de determinadas situaciones observadas se plantean en los casos sucesivos algunas aplicaciones. Para que estos ejemplos sean lo más ilustrativos posible se han modificado algunos datos y se opera con valores simulados, ciertamente se pierde realismo y en contrapartida se gana claridad en la exposición.

### 6.5.1 Semejanza de los valores de cálculo y experimentales

En la figura 6.21 se presentan conjuntamente las cuatro herramientas gráficas introducidas en apartados anteriores, para mostrar la posible equivalencia en las conclusiones así como la oportunidad que ofrece cada una de ellas. Así, en la gráfica del análisis de la función de evacuación se observa la razonable coincidencia de  $p_j(z)$  y  $s_j(z)$ , puede apreciarse la coincidencia de los instantes en que se inicia la salida, lo que permite dar por buenas las velocidades de locomoción supuestas, así mismo, la coincidencia de pendientes valida los flujos y finalmente la coincidencia en el tiempo de evacuación  $z'$  de las  $x_j$  personas que utilizan la salida  $j$ , valida globalmente y prueba que, con unos parámetros estrictamente ajustados, se producen tiempos de evacuación idénticos.



**Figura 6.21** Semejanza de las magnitudes de locomoción

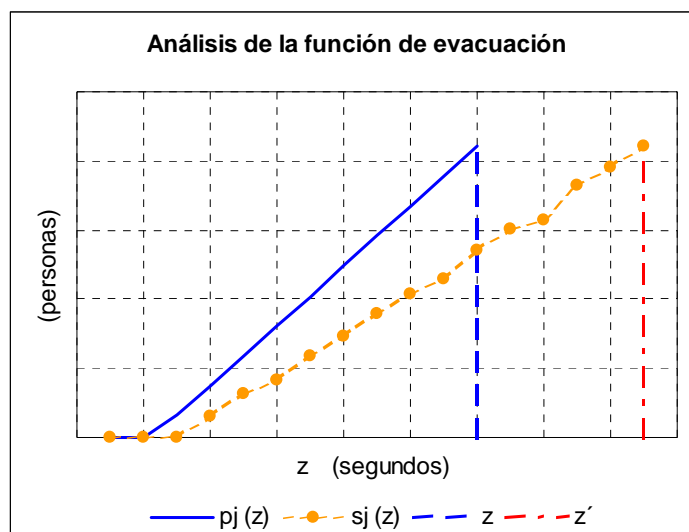
A las mismas conclusiones conduce el análisis de flujos. Se observa la coincidencia del instante en el cual se inicia la evacuación, hasta dicho instante no se producen flujos de

salida y a partir del mismo los flujos resultan razonablemente similares con oscilaciones aleatorias. Sobre este aspecto se ha observado que si la densidad de ocupación no es muy elevada y las dimensiones de los elementos de paso permiten adelantamientos, las variaciones en los flujos registrados en intervalos regulares de tiempo se consideran inevitables. Se admite que cada individuo tiene sus propias magnitudes de locomoción y de comportamiento que, si son físicamente posibles, dan lugar a oscilaciones en los flujos. Cuando la densidad de ocupación es muy elevada esta elasticidad se pierde y las demoras resultan permanentes, lo que no se ha producido en este caso. De igual forma, resulta importante observar la coincidencia en los tiempos de evacuación.

Cuando existe coincidencia en las magnitudes de locomoción analíticas y experimentales, los gráficos de análisis de las diferencias adoptan forma propia. En primer lugar se analiza el gráfico  $e_j(z)$  correspondiente a la diferencia entre la función de evacuación inversa  $p_j(z)$  y las salidas registradas  $s_j(z)$  en diferentes periodos, observándose que las diferencias se mantienen estables alrededor del eje de abscisas, con variaciones aleatorias probando la concordancia de las magnitudes de locomoción. Finalmente en el gráfico  $\varepsilon_j(z)$  correspondiente a la evolución cronológica de las diferencias en los flujos  $F_j(z)$  y  $F'_j(z)$ , de la misma forma que en el caso anterior, las diferencias están centradas entorno al eje de abscisas con ordenada nula.

### 6.5.2 Diferencia en las magnitudes de locomoción

Se analizan dos situaciones en las cuales las magnitudes que definen la locomoción de los ocupantes difieren del valor de los parámetros utilizados en la obtención de las funciones. En el primer caso se analiza una situación en la que las magnitudes son inferiores a las previstas y en el segundo cuando son mayores.



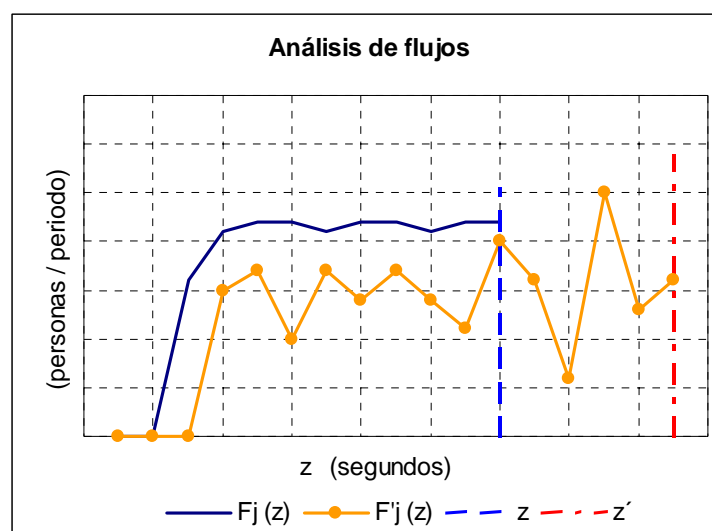
**Figura 6.22** Diferencias función de evacuación primer caso

En el diagrama de análisis de la función de evacuación representado en la figura 6.22 correspondiente al primer caso puede observarse el punto de discontinuidad inicial que

indica el instante en que se producen las primeras salidas. Resulta evidente la existencia de discordancia en ambas funciones, indicando la posible diferencia entre las velocidades de circulación teóricas y reales, de la misma forma que la diferencia de pendientes en las funciones  $p_j(z)$  y  $s_j(z)$  indica que los flujos de salida son distintos, como consecuencia, para la evacuación de un mismo número de personas da lugar a un tiempo de evacuación mayor. El instante en que finaliza la evacuación es el punto final de las funciones, visualizado en el gráfico mediante el trazado de una línea discontinua hasta cortar el eje de abscisas.

Existen oscilaciones en las salidas en todos los intervalos, estas oscilaciones se manifiestan de forma más pronunciada en los últimos periodos, si bien se observa que se produce el “efecto tapón”, sencillamente en la vía de evacuación un determinado grupo de personas se desplaza a una velocidad inferior a la del resto de ocupantes impidiendo su paso y originando un flujo escaso a lo largo de uno o varios periodos que se recupera de forma inmediata en los periodos siguientes, esto se observa en esta representación mediante desviaciones en forma de apéndices como el que se ha mostrado en los instantes finales de la evacuación, en la parte superior del gráfico.

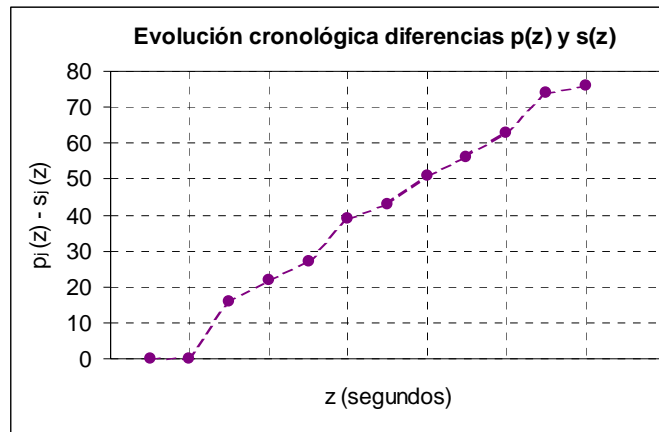
En la figura 6.23, en el diagrama de análisis de flujos, se observa que el instante en el que se inicia la evacuación supera el valor calculado, con ello se prueba que la velocidad de desplazamiento de los ocupantes es inferior a la utilizada en los cálculos. En la segunda observación el flujo en los periodos que dura la evacuación es inferior al supuesto, en cuyo caso, el tiempo necesario para salir  $x_j$  personas será mayor al calculado  $z' > z$ , el tiempo de evacuación viene determinado por el instante final del periodo con un valor de flujo positivo. Finalmente en esta figura se observa una oscilación aleatoria en todos los periodos, y el “efecto tapón”, existiendo en un periodo muy pocas salidas que se recuperan de forma inmediata en los periodos siguientes.



**Figura 6.23** Comparación de flujos primer caso

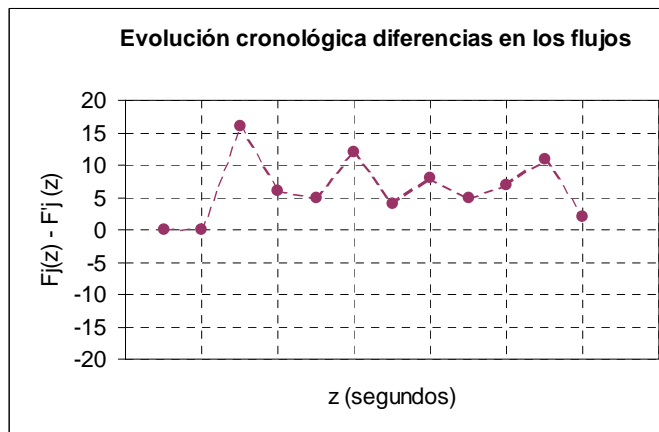
El gráfico 6.24 corresponde a la evolución cronológica de las diferencias entre  $p_j(z)$  y  $s_j(z)$ , en él puede observarse que se trata de una función creciente que en cada periodo

va incrementando la diferencia entre las salidas previstas y las que realmente se han producido.



**Figura 6.24** Análisis de diferencias en la función de evacuación inversa primer caso

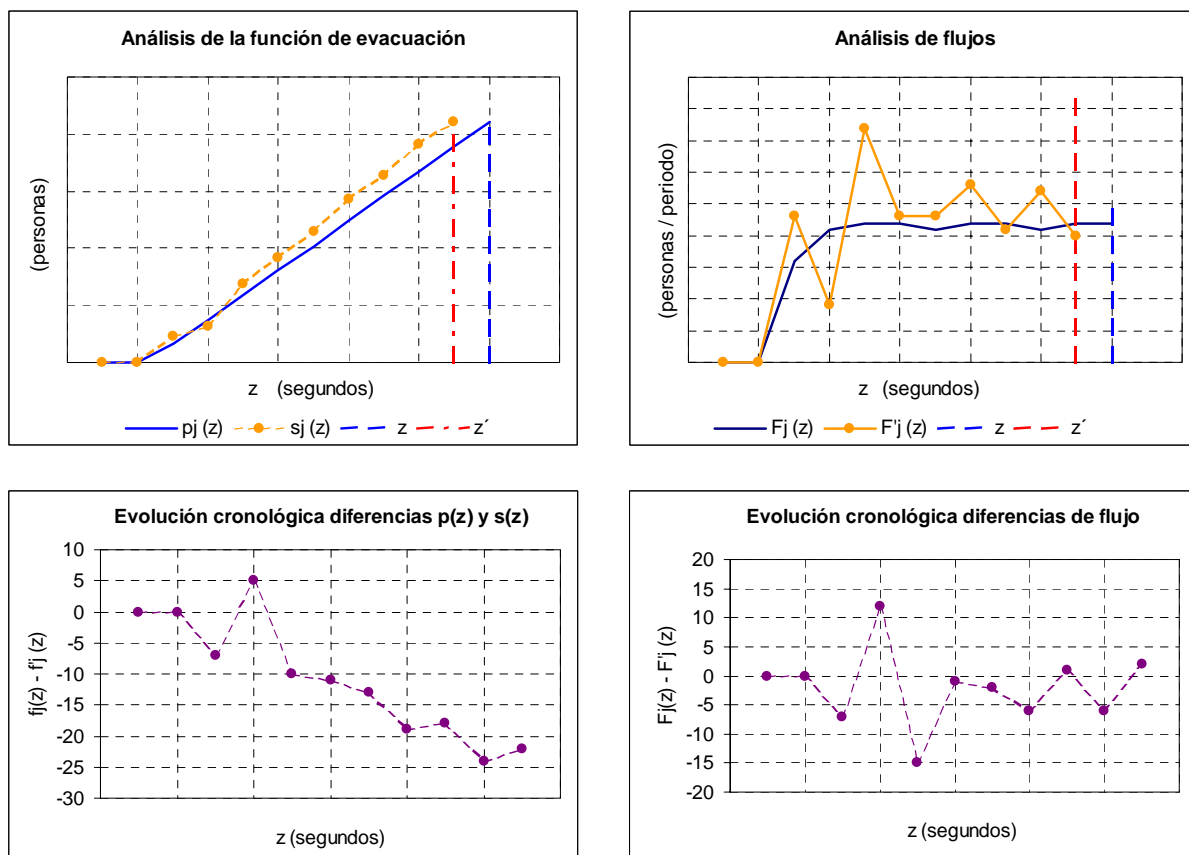
El último de los gráficos correspondiente al análisis de la evolución cronológica de las diferencias  $F_j(z)$  y  $F'_j(z)$  muestra una desviación constante y positiva en los flujos, indicando que el flujo de salida en todos estos periodos es inferior al supuesto inicialmente en los cálculos.



**Figura 6.25** Análisis de diferencias de flujos primer caso

Para el segundo caso se utiliza la representación compacta de la figura 6.26, lo que facilita la observación conjunta de las cuatro herramientas gráficas, en ellas puede observarse como la velocidad de circulación y los flujos que se producen son superiores a los previstos, con lo que el tiempo de evacuación es sensiblemente inferior.

De igual forma, se observa al comparar la función de evacuación con las salidas registradas, que la línea correspondiente a las salidas que se producen está por encima de la línea teórica de la función de evacuación. La similitud observada entre las gráficas de ambos casos, permite establecer que el gráfico de diferencias en los flujos discurrirá como una secuencia de valores paralela al eje de abscisas centrada en un valor negativo, y la gráfica de diferencias de las salidas con la función de evacuación generará una línea de pendiente negativa situada en el cuarto cuadrante.

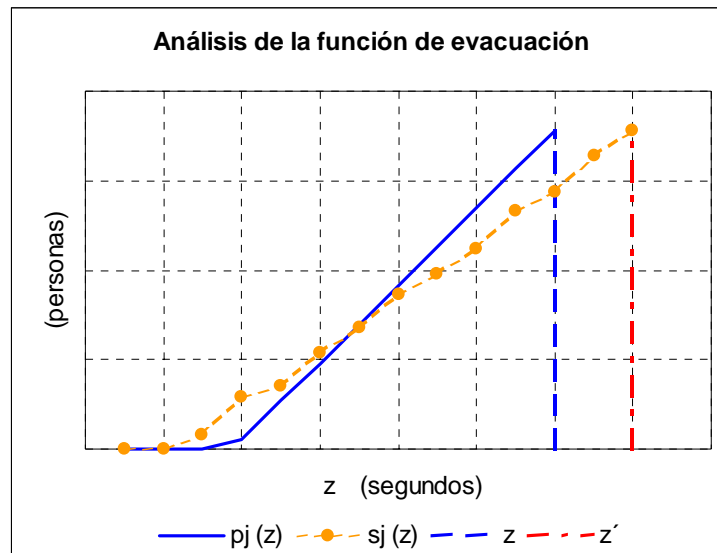


**Figura 6.26** Análisis segundo caso

### 6.5.3 Densidad de ocupación inferior a la prevista

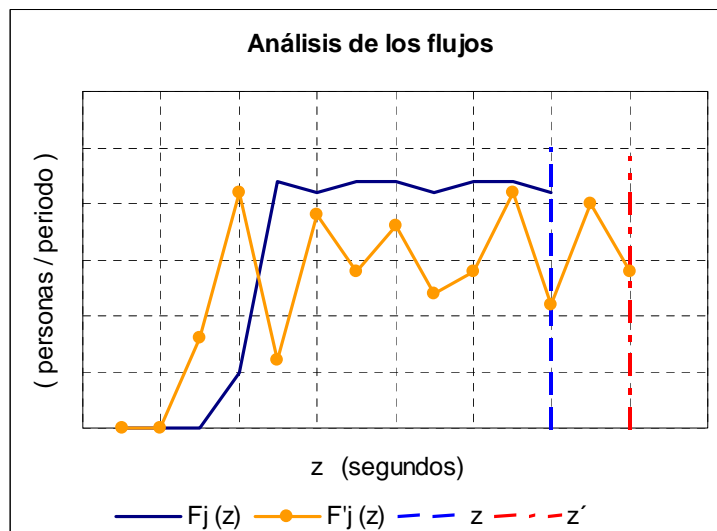
En algunos de los ensayos realizados y su posterior ajuste de las magnitudes de locomoción, velocidades y flujos, se obtenían distintos resultados. Pudo comprobarse que el problema radicaba en la estimación de la densidad, una vez ajustada la misma fue posible la realización de más ensayos, en los que se logró una absoluta coincidencia de ambas funciones.

En la figura 6.27 la gráfica de la función de evacuación muestra como las salidas del recinto se producen antes de instante previsto en la función de evacuación inversa, si bien el número de personas que abandonan el recinto periodo a periodo es inferior al valor previsto, efectivamente si para determinar la función de evacuación se realizó un pronóstico de una densidad de ocupación superior, ello dio lugar a una velocidad de circulación inferior y un valor del flujo superior de los que realmente se producen.



**Figura 6.27** Análisis función de evacuación

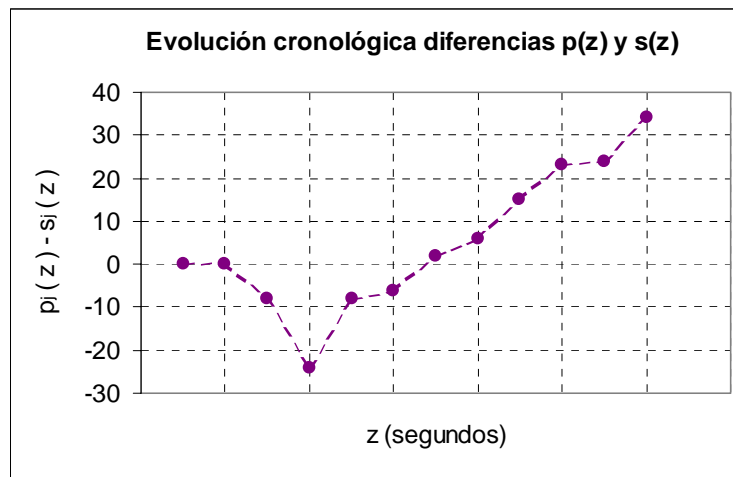
Mediante el diagrama de análisis de flujo representado en la figura 6.28 también puede identificarse esta situación al realizar el mismo análisis que en el caso anterior, sin embargo con dicha gráfica la situación posiblemente no sea visualmente tan clara como en el gráfico anterior.



**Figura 6.28** Análisis de flujos en una situación de diferencia en las densidades

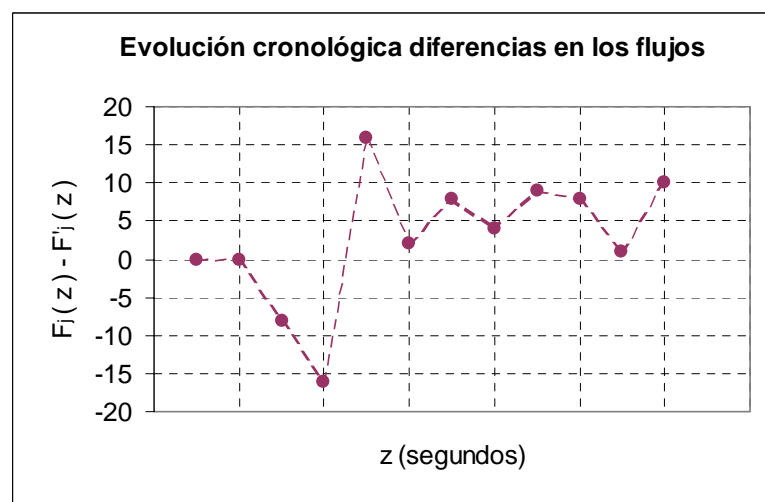
La aportación del gráfico de diferencias 6.29 posiblemente sea menos relevante, simplemente se observa que el gráfico de las diferencias  $e_j(z)$  tiene forma de “v”.





**Figura 6.29** Análisis en la función de evacuación

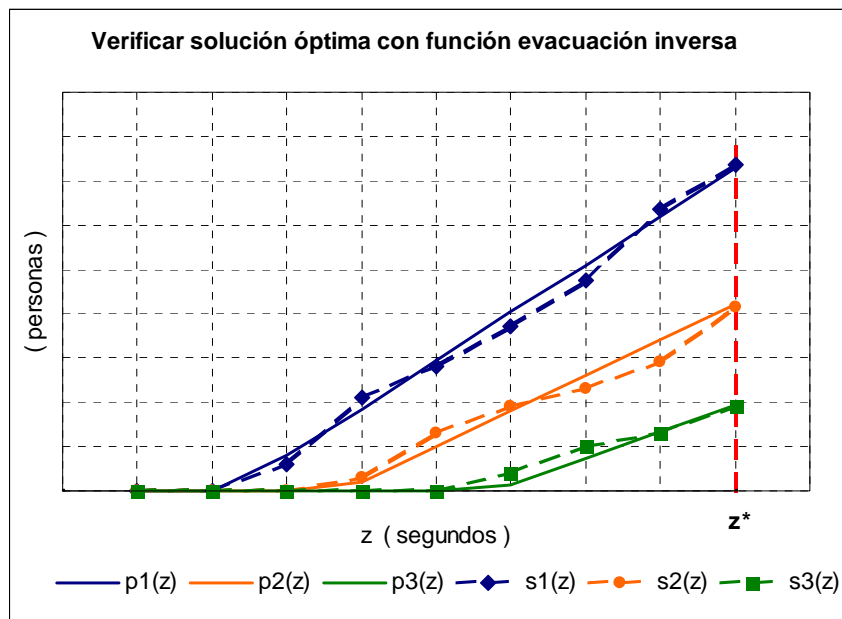
En el gráfico de diferencias  $\varepsilon_j(z)$  según figura 6.30 la situación también resulta característica, valores iniciales nulos, valores negativos y luego positivos, siendo dicha oscilación entre valores negativos y positivos lo más característico.



**Figura 6.30** Análisis en la función de evacuación

## 6.6 VERIFICAR QUE LA ASIGNACIÓN REALIZADA CORRESPONDE CON LA SOLUCIÓN ÓPTIMA

Una parte del proceso de validación consiste en verificar que el número de personas asignadas a cada una de las salidas conduce a la solución óptima del problema, para ello, se realiza la verificación sobre la prueba de coincidencia de tiempos, la función de evacuación inversa y el análisis de flujos.



**Figura 6.31** Función de evacuación inversa: Asignación óptima

Verificar que la solución óptima a partir de la **coincidencia de tiempos de evacuación** conduce a observar que los tiempos de evacuación son idénticos en cada una de las salidas cuando no existen restricciones de capacidad en las mismas o sencillamente no llegan a alcanzarse, resulta trivial dado que al realizar los cálculos ya se estableció esta condición. En cualquier caso puede reflejarse mediante la siguiente expresión:

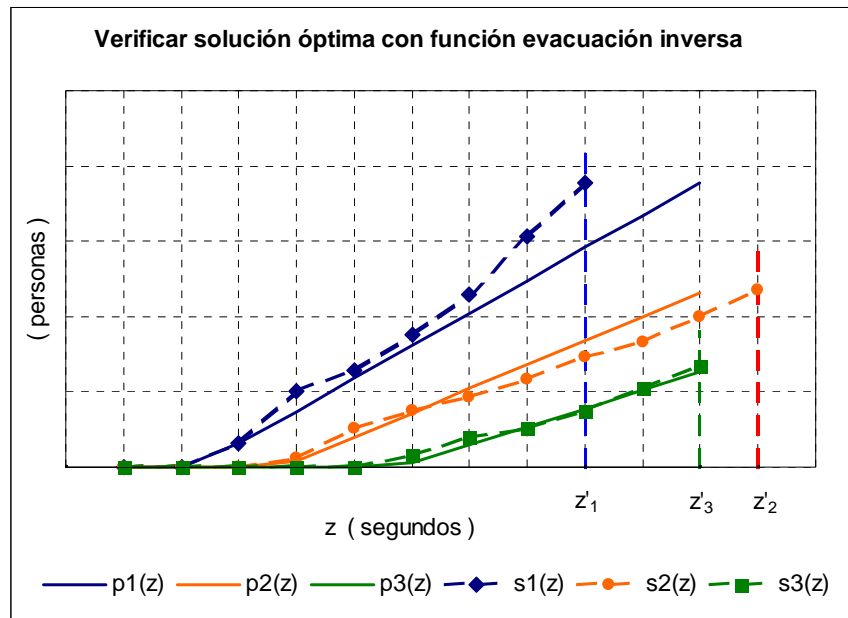
$$t_1(x_1) = t_2(x_2) = \dots = t_j(x_j) = z^* \quad (6.30)$$

### 6.6.1 Análisis de la solución óptima mediante las funciones de evacuación inversas

Para verificar que la asignación realizada corresponde a una solución óptima se representan en una misma gráfica las funciones de evacuación inversas de cada una de las salidas  $p_j(z)$  conjuntamente con las funciones de las salidas  $s_j(z)$ . A través de dicha representación debe comprobarse que la secuencia de salidas que se producen conduce a la coincidencia en el punto final de la función, verificando conjuntamente la validez de las funciones de evacuación  $p_j(z)$  y que se trata de una solución óptima.

En la figura 6.31 puede observarse como la asignación realizada a cada una de las salidas conduce a la solución óptima del problema. Un aspecto destacado de dicha gráfica es la similitud de las funciones  $s_j(z)$  y  $p_j(z)$ , tan solo se observan ciertas oscilaciones aleatorias en las salidas, en este caso debe concluirse que los modelos de locomoción de las salidas son correctos y que las asignaciones realizadas también lo son, contrariamente cuando la asignación realizada no conduce a la solución óptima y las funciones de salidas  $s_j(z)$  discrepan del modelo  $p_j(z)$  se produce una situación como la planteada en la figura 6.32. En ella puede observarse como las magnitudes de locomoción de la salida 1 son superiores a las previstas, inferiores en la salida 2 y certeramente ajustadas en la

salida 3, ésta es una situación ciertamente singular, normalmente los desajustes se manifiestan de forma similar en cada una de las salidas. La discrepancia en los tiempos de evacuación es notable, viniendo el tiempo de evacuación en cada salida  $z'_1$ ,  $z'_2$  y  $z'_3$  determinado por el punto final de la función de salidas  $s_j(z)$ .

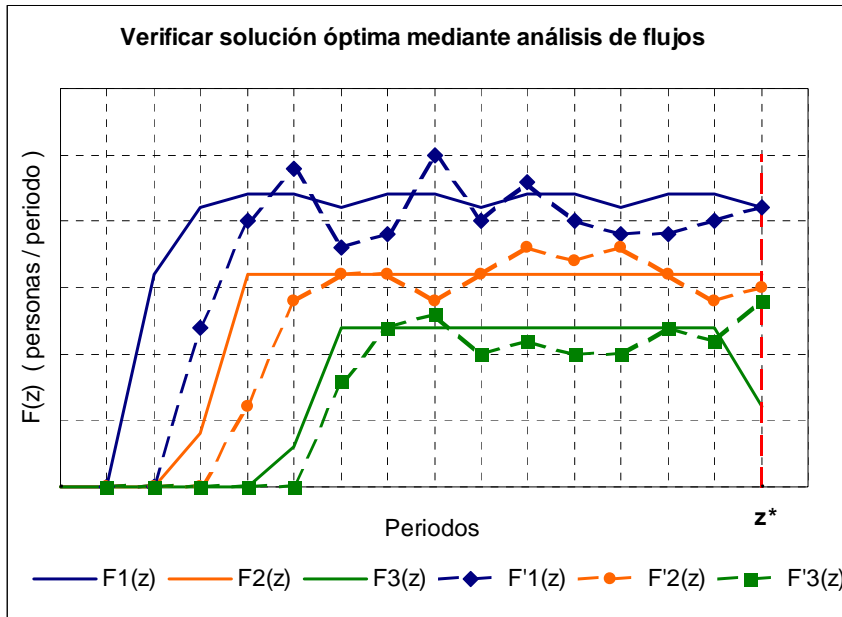


**Figura 6.32** Función de evacuación inversa: Discrepancias en la solución óptima

Es importante observar la disciplina de los ocupantes, véase que se dirigen a cada salida el número de personas establecido, lo que se observa porque existe coincidencia en las ordenadas en el punto final de las funciones experimentales  $s_j(z)$  y función de evacuación inversa  $p_j(z)$ .

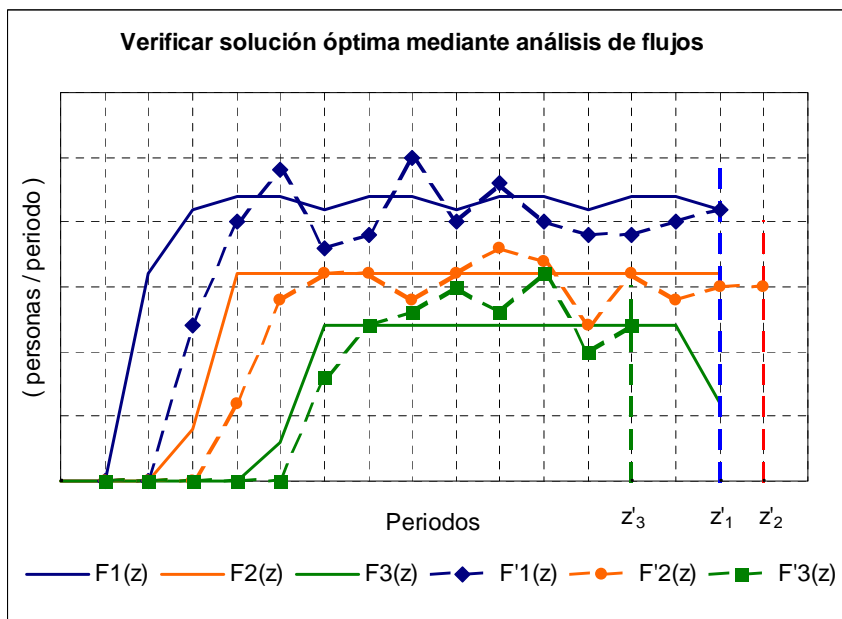
### 6.6.2 Análisis de la solución óptima mediante el estudio de los flujos de salida

Procediendo de forma similar al caso anterior, se trata de representar conjuntamente en una sola gráfica los flujos previstos  $F_j(z)$  y los que realmente se producen en cada una de las salidas  $F'_j(z)$ , mediante dicha representación se debe observar la coincidencia de la secuencia de valores hasta el punto final de ambas funciones. En la figura 6.33 puede observarse una situación en la cual dicha coincidencia prácticamente se produce. En esta representación no puede apreciarse si el número de personas que han utilizado la salida se corresponde con la asignación óptima. El total de personas que han utilizado una salida corresponde a la suma de todos los valores representados, lo que no es una magnitud inmediata, se obtiene tras la suma de los valores de cada intervalo. Nuevamente en este caso deben manifestarse las ventajas que comporta la utilización de las gráficas correspondientes al análisis de la función de evacuación.



**Figura 6.33** Análisis de flujos: Solución óptima

Cuando se producen diferencias entre la asignación realizada y el número de personas que utilizan cada salida, da lugar a una situación como la representada en la figura 6.34, en la que se observa que existen desviaciones en los flujos y no se obtiene una solución óptima.



**Figura 6.34** Análisis de flujos: Discrepancias en la solución óptima

### 6.7 VERIFICAR OTROS SUPUESTOS DEL MODELO

Al definir el sistema de evacuación se contemplan una serie de aspectos cualitativos que deberían valorarse de la forma más rigurosa posible, entre estas cuestiones pueden citarse las posibles demoras en el inicio de la evacuación, la formación de grupos, las di-

ficultades de circulación en las vías de evacuación, la actitud adoptada por lo ocupantes en los simulacros, etc. se trata pues de un conjunto de incidencias que influyen decisivamente en las evaluaciones cuantitativas descritas en los apartados anteriores, se puede pensar que una función de evacuación es válida y sin embargo opinar las personas que han participado en un simulacro y los responsables de la evacuación del recinto, que el desplazamiento hacia la salida ha sido muy lento, asegurando que podría haberse realizado de forma mucho más efectiva. En estos casos habría que analizar si la función de evacuación inicialmente considerada como aceptable realmente lo es. Una forma de conocer estos aspectos son las encuestas a las personas que participan en los simulacros así como los informes de los responsables de coordinación de los mismos.

Existen otras formas de estudiar el desarrollo de los simulacros, una de ellas es la filmación de la situación y posteriormente analizar el desenlace del simulacro, es indudablemente una forma que posibilita un estudio detallado de la situación ya que la valoración de la situación la realizan personas posiblemente más expertas que si se dejan las valoraciones en manos de los participantes. El problema de esta fórmula está en los medios que se precisan para implantarla ya que resulta mucho más costosa. Por el planteamiento que se hace de la situación se le concede una notable importancia a las opiniones de los participantes en los simulacros, entonces se deben contrastar en cada uno de los aspectos considerados la valoración que realizan de forma independiente los participantes y la de los responsables de la evacuación y luego proceder a analizar coincidencias y resolver posibles discrepancias. Este planteamiento de la situación se resume en la tabla 6.2, la doble entrada de la misma debe conducir a analizar los aspectos contemplados en el sistema que se ha decidido valorar.

		Valoraciones participantes simulacro				
Informe responsables coordinación simulacro	Ubicación	A	B	C	D	.....
	A					
	B					
	C					
	D					
	.....					

**Tabla 6.2** Proceso de verificación de valoraciones en simulacros de evacuación

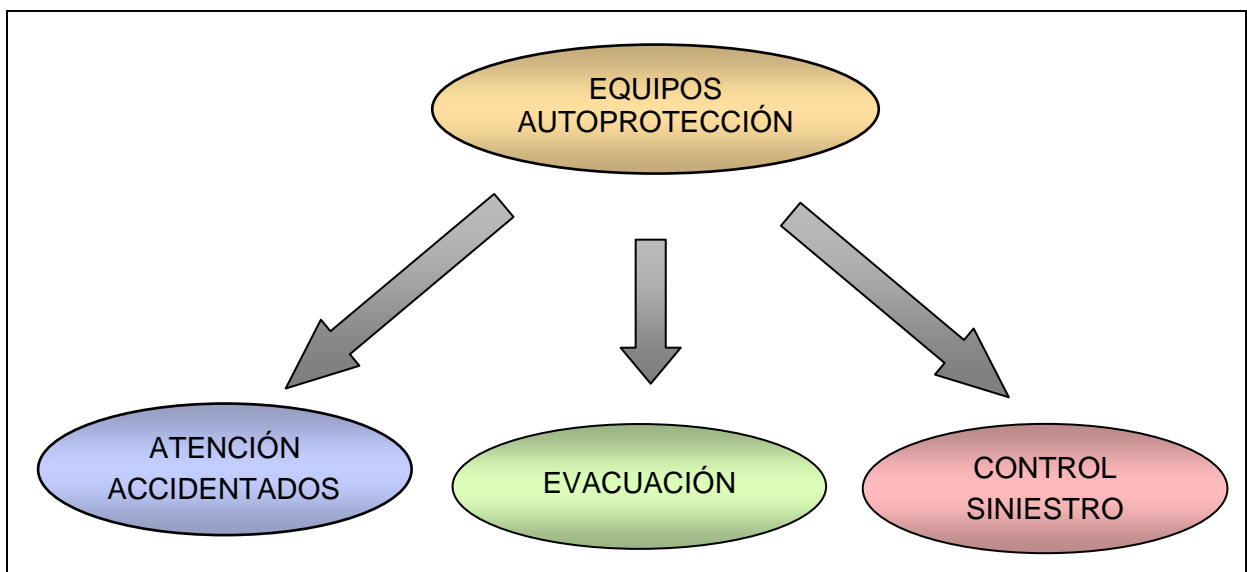
En el anexo 3 se muestra el modelo de encuestas utilizadas para valorar simulacros de evacuación y de los informes de los responsables de cada zona denominados coordinadores de evacuación.



## CAPITULO 7: PROPUESTAS PARA LA GESTIÓN DE LA EVACUACIÓN DE LOS EDIFICIOS

### 7.1 LA ORGANIZACIÓN PARA LA SEGURIDAD DE LAS PERSONAS EN LOS EDIFICIOS

En el proceso de investigación seguido en la presente tesis, mas allá de la formulación de un modelo matemático para el estudio del problema de la evacuación de edificios y de la verificación de las hipótesis formuladas, se han confeccionado e implantado planes de evacuación en diferentes edificios, ello ha exigido tener una perspectiva global del problema, que abarca desde los aspectos analíticos y cuantitativos desarrollados en capítulos anteriores hasta las cuestiones más prácticas. En este capítulo se exponen algunos aspectos básicos de dicha experiencia. Los aspectos más prácticos del problema se han obtenido de fuentes diversas [8], [17], [56], [71], [110] y [156], básicamente se trata de guías para el desarrollo de planes de evacuación y emergencia, en las cuales se formulan un conjunto de propuestas para la organización de la seguridad de las personas en los edificios.



**Figura 7.1** Análisis de las funciones que comporta la autoprotección

Uno de los aspectos que comporta la autoprotección es la organización de la evacuación, dichas funciones pueden observarse en la figura 7.1. No es posible que la evacuación de un edificio se desarrolle de una forma razonablemente eficaz si no ha sido adecuadamente preparada. Tal como se ha definido el sistema, la evacuación de un edificio depende de un amplio conjunto de factores, es prácticamente imposible que estos factores se sitúen en un nivel aceptable de forma espontánea.

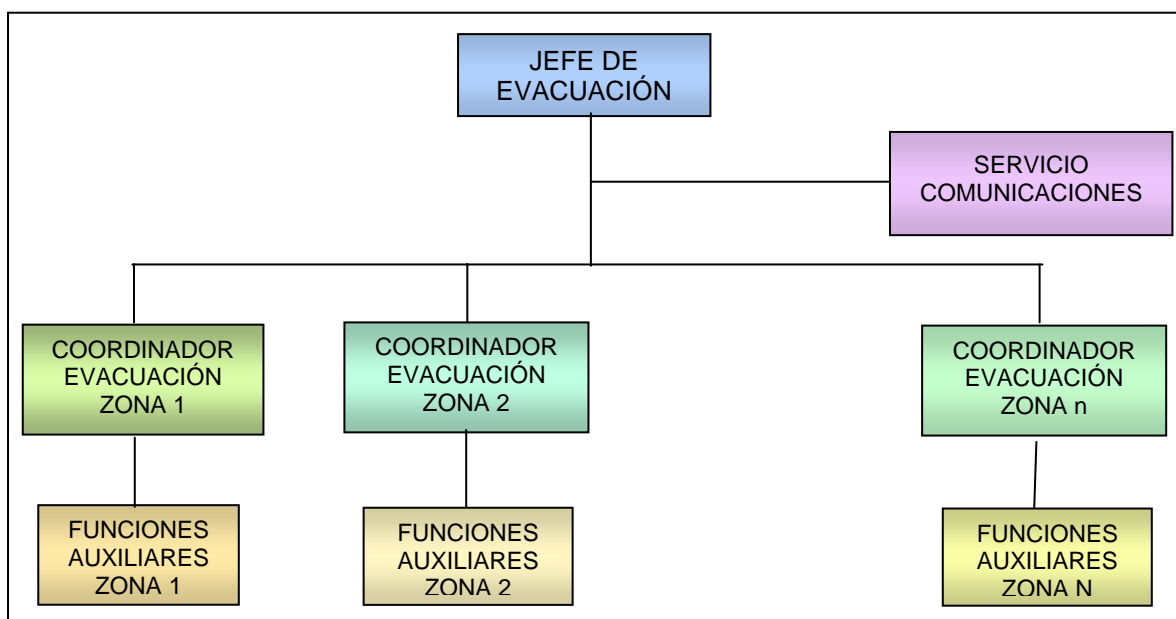
Para garantizar que una evacuación de emergencia se desarrolle de forma satisfactoria de-

bería existir una **organización formal** capaz de coordinar una evacuación de emergencia en cualquier instante, que garantizara la realización de unas determinadas funciones, además los ocupantes deberían poseer unos **conocimientos mínimos** de las condiciones de evacuación y de la estructura de la organización que tratará de ayudarles en una evacuación de emergencia y que garantizará un comportamiento adecuado de todos ellos.

La gestión de la evacuación de los edificios se divide en dos apartados: Los relativos al momento de producirse la emergencia y la acción preventiva previa. En el momento de producirse una situación de emergencia una persona de máxima responsabilidad en el edificio debe decidir cuándo y qué zonas deben evacuarse. Puede ser necesaria una evacuación general, sin embargo puede ser recomendable una evacuación inmediata de la zona más próxima al siniestro y luego proceder a la evacuación de otras dependencias. De la misma forma, otras personas deben responsabilizarse de dirigir la evacuación de unas determinadas zonas del edificio siguiendo unos criterios básicos: Salidas a utilizar para alejarse del riesgo, orden a seguir en la evacuación, etc.. Además todo el personal del edificio debe tener conocimientos básicos de actuación, es necesaria la existencia de un sistema de ayuda a las personas que por sí mismas pudieran tener dificultad en salir por incapacidad física o por simple desconocimiento del edificio y finalmente es necesario realizar un esfuerzo colectivo para tener la seguridad que han abandonado el edificio la totalidad de los ocupantes.

## 7.2 FUNCIONES PARA LA GESTIÓN DE LA EVACUACIÓN

Según se ha indicado en el apartado anterior se plantea una organización a dos niveles, por un lado se trata de gestionar de forma adecuada las situaciones de emergencia y por otro la acción preventiva para planificar y mantener las condiciones de evacuación adecuadas.



**Figura 7.2** Organigrama para la coordinación de la evacuación de un edificio

La estructura organizativa que se propone para el control y gestión de una evacuación de



emergencia de las dependencias del edificio responde a una estructura piramidal, se resume en el esquema de la figura 7.2.

El **Jefe de evacuación** desarrollará las funciones de coordinación general de una evacuación de emergencia, normalmente será una persona integrada en la estructura organizativa definida en los planes de emergencia o de autoprotección denominada como Jefe de emergencia.

Los **Coordinadores de evacuación** se encargarán de dirigir y verificar el desarrollo de la evacuación de un recinto o de una zona del edificio. Les corresponderá definir la distribución y el número de personas que deben dirigirse hacia cada salida, garantizar que nadie permanece en zonas ocultas del recinto.

El **Servicio de comunicaciones** será el responsable de recibir, transmitir y coordinar las órdenes y comunicaciones relativas a una evacuación de emergencia.

Las **Funciones auxiliares** ayudarán al Coordinador de evacuación de la zona en aquellas funciones que no pueda realizar personalmente: Conocer la ocupación del recinto, abrir puertas de salida, verificar directamente que no permanece nadie en determinadas dependencias, indicar la posición de la sección en el punto de reunión o facilitar las operaciones de recuento.

### 7.3 ANÁLISIS DE LAS FUNCIONES QUE DEBEN DESARROLLAR LOS RESPONSABLES DE EVACUACIÓN

Se describen las funciones generales previstas para los responsables de la evacuación, se trata de unas funciones meramente orientativas, resulta imposible establecer de antemano una planificación exacta de las funciones a desarrollar en una situación crítica, por ello deben ser interpretadas como unos principios absolutamente generales que deberán adecuarse a cada tipo de edificio, organización o entidad.

#### 7.3.1 Función de Jefe de evacuación

El Jefe de evacuación será el máximo responsable de la evacuación del edificio, dicha responsabilidad normalmente corresponderá a la persona que tiene asignadas las funciones de Jefe de emergencia en el manual de autoprotección.

Cuando tenga conocimiento de un determinado siniestro o de una situación de peligro determinará el momento en el que debe producirse la señal de alarma que ordena la evacuación del edificio, establecerá el punto de coordinación de las operaciones y determinará las prioridades de evacuación del edificio en función de la situación de riesgo que se ha presentado. Su conocimiento global del siniestro le permitirá indicar a los Coordinadores de evacuación las salidas que no deben utilizarse y a partir de dicha información los Coordinadores de evacuación de cada zona organizarán de forma adecuada la evacuación de la misma en función de las salidas disponibles.

Normalmente para dar operatividad a este proceso, evitar aproximaciones al riesgo y mantener el máximo nivel de seguridad de los ocupantes, en primer lugar se avisará al Coordinador o los Coordinadores de las zonas afectadas por el siniestro, antes de producirse la señal de alarma general. Tan solo en el caso de una evacuación general, en la cual no se deban producir prioridades en la evacuación, directamente se procederá a la alarma general.

Si están previstos varios puntos de reunión, determinará el punto de reunión al cual deben dirigirse. El punto de reunión en el cual se situarán los ocupantes será una posición segura y lo más próxima posible al edificio, para reducir el tiempo de recorrido, instará para que se efectúe el recuento de forma rápida y cuando tenga notificación del recuento de cada zona solicitará ayuda externa y/o organizará equipos para las operaciones de rescate si fuera preciso.

### **7.3.2 Funciones de Coordinadores de evacuación**

Los Coordinadores de evacuación ejecutarán directamente las instrucciones del Jefe de evacuación. Su actuación se iniciará de forma automática al producirse la señal de alarma o bien por haber sido avisados por algún sistema de comunicaciones interiores del edificio y serán responsables del desarrollo de la evacuación de la zona que tienen asignada.

El problema de la evacuación de un recinto se divide en dos etapas que resuelven el Jefe de evacuación y los Coordinadores de evacuación. El Jefe de Evacuación establece las salidas que no pueden utilizarse a consecuencia de un determinado siniestro y el Coordinador de evacuación de la zona conocerá la forma de materializar la evacuación con las salidas disponibles.

Los Coordinadores de evacuación al producirse la señal de alarma se situarán en la posición que tienen asignada como Coordinadores de evacuación de su zona y dirigirán la evacuación del recinto, procurando que la evacuación se realice de la forma adecuada según la disposición de las salidas libres.

En primer lugar ordenarán la evacuación de las personas que puedan verse afectadas por el siniestro y tratarán de garantizar que nadie se dirige a salidas que no deben utilizarse y asegurarán que el número de personas que se dirige a cada salida es el apropiado para realizar la evacuación de la totalidad de los ocupantes de forma segura y en el mínimo tiempo.

Darán instrucciones para que la evacuación se realice de forma ordenada cumpliendo los principios básicos para la seguridad que conoce todo el personal del edificio: tranquilidad, silencio, movimientos rápidos pero sin correr, sin movimientos de retroceso, sin recoger objetos personales, sin pararse en las inmediaciones de las puertas de salida, etc...

Garantizarán que todos los ocupantes del recinto o zona que tienen asignada han oído la señal de alarma y que de forma inmediata proceden a la evacuación y que no ha permanecido nadie en dependencias adjuntas especialmente en aquellas en las que sea más probable la no audición de la alarma tales como locales técnicos, vestuarios, servicios, etc. para ello si lo estiman preciso pedirán ayuda a otras personas que desempeñaran las funciones auxilia-

res.

Normalmente los Coordinadores de evacuación serán los que abandonarán en último término el recinto. Es importante que las operaciones que deben realizar las ejecuten de forma rápida, no deben retrasarse del grupo de salida, para ello es importante que pidan rápidamente colaboración para poder realizar las funciones asignadas si es preciso. En caso de creer que pudiera permanecer alguien en dicha zona, lo comunicarán inmediatamente al Jefe de evacuación.

Se dirigirán rápidamente al punto de reunión y efectuarán el recuento de las personas evacuadas. En tales funciones pueden colaborar otras personas responsables del control de la ocupación del recinto y todo el personal del edificio. Finalmente informarán al Jefe de evacuación sobre el desarrollo de la evacuación de su zona.

### 7.3.3 Función del Servicio de comunicaciones y funciones auxiliares

El centro de comunicaciones, será el punto desde el cual se coordinarán todas las operaciones derivadas de la situación que puede desencadenar una evacuación de emergencia, de este servicio depende la coordinación eficaz de los equipos de autoprotección.

Las personas responsables de este servicio, recibirán en primer lugar la percepción de la situación de alarma en un determinado punto del edificio y será responsabilidad de este equipo localizar y alertar al Jefe de evacuación y a los Coordinadores de evacuación. Así mismo, garantizará la comunicación de los responsables de la evacuación con otros grupos previstos para la autoprotección.

Existen otras funciones auxiliares para garantizar determinadas operaciones importantes en una evacuación de emergencia, es necesario tratar de conocer la ocupación del edificio, se debe garantizar la funcionalidad de los elementos de salida, se debe verificar que nadie permanece en ciertas dependencias y se debe realizar una ubicación ordenada en el punto de reunión, etc. para realizar estas funciones puede ser necesario disponer de personal especialmente entrenado.

La **Función de control de la ocupación** consiste en responsabilizarse de conocer la ocupación real del edificio para que en una situación de emergencia fuera posible efectuar el recuento del número de ocupantes y emprender operaciones de rescate si ello fuera preciso. A veces resulta realmente complejo este control, si es posible los responsables de cada sección del edificio deberán saber la ocupación de la zona de su competencia, de la misma forma que se pretende el control del número de ocupantes habituales debería conocerse el número de visitantes y eventuales discapacidades de cualquiera de los ocupantes. En los edificios en los cuales es posible un control estricto de la ocupación este proceso es más simple.

Las **funciones auxiliares para garantizar la máxima funcionalidad de las salidas** corresponderán a personas que ocupen un puesto de trabajo en la intermediación de una determinada salida y garantizarán que en el momento de producirse la señal de evacuación la

apertura de las puertas de la zona de su responsabilidad se abren correctamente.

Las **funciones auxiliares para control de recintos singulares** consisten en verificar que en determinados recintos como pueden ser vestuarios, servicios o bien locales de tipo técnico no permanece nadie en aquellas dependencias tras haberse producido la señal de alarma y la correspondiente evacuación de la zona.

Las **funciones auxiliares de guía hacia el punto de reunión** las desempeñaran los primeros ocupantes que abandonarán la zona y conocerán perfectamente el punto de reunión al cual deben dirigirse para facilitar las operaciones de recuento.

## 7.4 PROCESO DE ASIGNACIÓN DE LAS FUNCIONES PREVISTAS

No debe existir ningún tipo de ambigüedad en la asunción de la funciones previstas en una evacuación de emergencia, por ello se debe concretar las personas que deben desarrollarlas, un plan de evacuación puede resultar absolutamente inútil si no se halla debidamente implantado, para ello será preciso definir de forma precisa las funciones que se establecen para la gestión de una evacuación de emergencia y es necesario que las funciones establecidas se asuman con normalidad y automaticidad, de forma que si una persona no puede desarrollar sus funciones, otra la sustituya con absoluta garantía sin ningún tipo de dudas ni demoras. No debe quedar ninguna función sin cubrir y todas las funciones deben realizarse con la adecuada eficacia. Para que no quede ninguna función sin asignar es preciso que de antemano unas personas conozcan las funciones que tienen asignadas y tengan conocimientos lo más amplios posibles de lo que deberían hacer ante una situación de evacuación de emergencia. En la figura 7.3 se muestra un modelo para la asignación de funciones, en el que se detallarán los nombres de los responsables de cada operación y el criterio general de asignación.

	FUNCIÓN
Titular	
Suplente 1	
Suplente 2	
Definición de criterios generales de asignación	

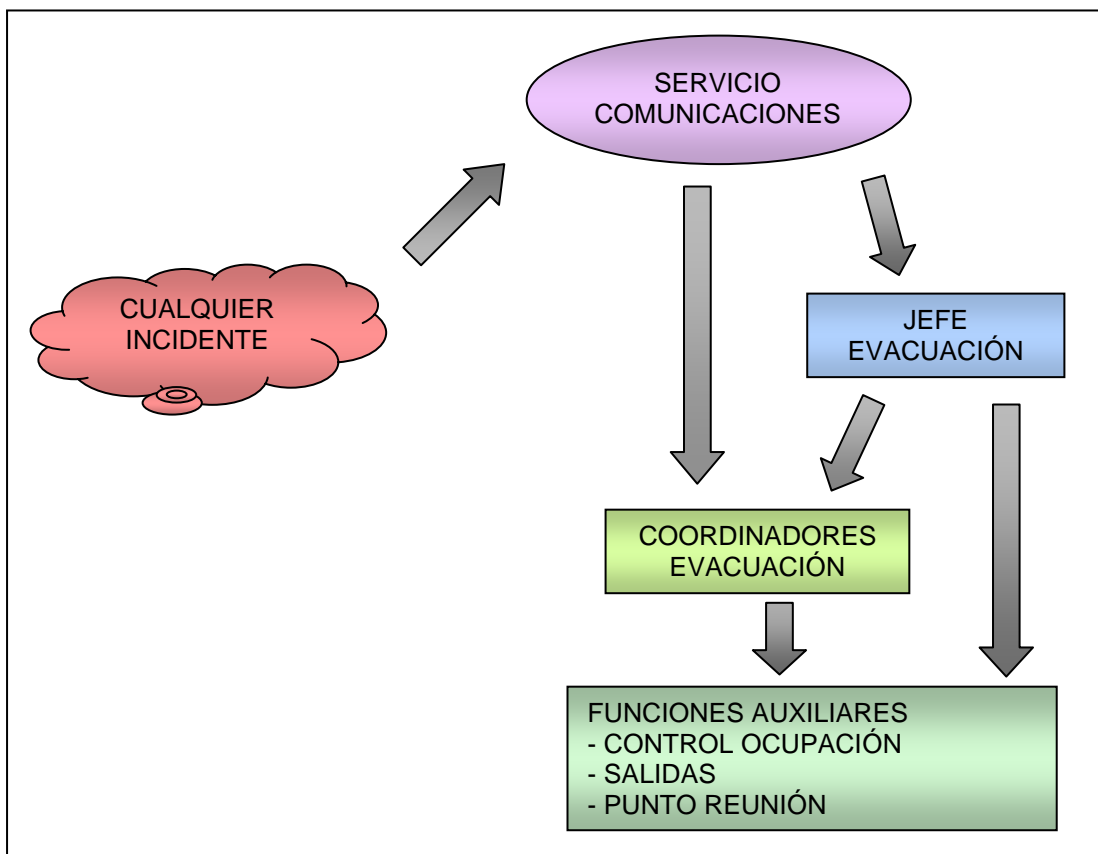
**Figura 7.3** Asignación de funciones

Si existen algunas funciones auxiliares como las de “garantizar la máxima funcionalidad de las salidas” y las de “guía hacia el punto de reunión” y no se tenga prevista una asignación formal, se debe tener la certeza que algunas personas las conocen perfectamente y pueden ayudar decisivamente en estas operaciones. Por ejemplo es conveniente que algunas personas estén entrenadas en la apertura de las puertas de salida no relevantes normativamente pero que puedan aliviar alguna salida o paso hacia el exterior. También la ubicación en el punto de reunión resulta importante para facilitar las operaciones de recuento y conocer si algunas personas pudieran permanecer en el interior del edificio.

## 7.5 INSTRUCCIONES GENERALES

Una vez definidas las funciones necesarias para la organización de una evacuación de emergencia se detallan unos "criterios generales", entendiendo que las características del edificio y la propia dinámica de los siniestros que se pudieran desarrollar los pudieran variar. La actividad más habitual puede definirse como situación normal y el resto de situaciones que tienen alguna particularidad concreta se definen por sus características. Los principios generales de las funciones implicadas pueden observarse en la figura 7.4.

Mediante los estudios de la evacuación se conocen aspectos concretos sobre la evacuación del recinto y/o del edificio, todo ello hace posible planificar y concretar algunas funciones específicas de los Coordinadores de evacuación y de los ocupantes de la zona, para este tipo de recomendaciones deberá verificarse su operatividad en los simulacros. Se trata de conocer el número de Coordinadores de cada zona y la situación de los Coordinadores en el momento de producirse la señal de alarma para organizar la evacuación del recinto sobre el que tienen su responsabilidad, determinar los recorridos a realizar para una evacuación óptima y tener estudiadas alternativas para la evacuación de la zona.



**Figura 7.4** Diagrama general de actuación en una evacuación de emergencia

### 7.5.1 Principios generales de actuación en actividad normal

En el caso de presentarse una situación de emergencia los ocupantes del edificio tendrán presente que deben comportarse de forma absolutamente serena, dado que normalmente es posible salir de los edificios de forma segura y en poco tiempo si la evacuación se realiza

de forma ordenada, y el tiempo empleado en la evacuación de los edificios será mínimo si el número de personas que se dirigen a cada salida es el adecuado, para ello la salida a la cual deben dirigirse y la forma cómo deben actuar se la facilitará el Coordinador de evacuación de la zona en que se encuentre en el momento de producirse la señal de alarma.

Los edificios suelen disponer de salidas que no se usan habitualmente y que en una situación de emergencia deben utilizarse, estas salidas son las salidas de emergencia y otras que normalmente están cerradas, pero que con suma facilidad pueden abrirse. Normalmente deberán dirigirse a la salida libre que no esté obstaculizada o afectada por el siniestro más próxima, sin embargo en cualquier caso prevalece la autoridad del Coordinador de evacuación de la zona.

La señal de alarma la dará la sirena instalada para esta función perfectamente identificable y audible en todas las dependencias del edificio, como principio general, al producirse la señal de alarma se abandonará cualquier actividad y no debe efectuarse ningún tipo de desplazamiento para recoger objetos personales, la prioridad absoluta está en abandonar el edificio.

En el desplazamiento hacia las salidas no deben formarse grupos, no se esperarán compañeros o amigos debiendo dirigirse uno a uno directamente a la salida, la formación de grupos dificulta la marcha hacia la salida y fácilmente provoca distracciones. Los grupos resultan inevitables en edificios en los cuales existen vínculos familiares.

El movimiento hacia las salidas será rápido pero con la máxima seguridad, en ningún caso deben correr, si una persona tropieza supone una pérdida importante de seguridad y de tiempo. No deben realizarse movimientos de retroceso. En todo momento deberá mantenerse la calma, no se gritará, se efectuará la evacuación en silencio, si deben realizarse algún comentario se efectuará en voz baja.

Si cree que alguna persona pudiera haber quedado en el interior de alguna dependencia, debe comunicarse inmediatamente al Coordinador de evacuación de la zona.

Al cruzar la puerta del edificio no deberán detenerse, ni andar más despacio, provoca retenciones en el interior del recinto. Una vez cruzada la puerta de salida deberán seguir andando al mismo ritmo hasta alejarse de la salida.

En edificios en los que se hayan establecido procedimientos formales, en el punto de reunión deben situarse según una situación prevista, un criterio simple pero que resulta muy efectivo consiste en situarse exactamente en la misma disposición que ocupaban en el interior del edificio. Luego con la ayuda de los responsables del control de la ocupación, el Coordinador de evacuación efectuará el recuento e informará al Jefe de evacuación del desarrollo de la evacuación. Todo el personal deberá colaborar en detectar ausencias al efectuarse el recuento. En el caso que alguna persona pudiera permanecer en el interior se emprenderán acciones de rescate.

Si el personal del edificio está organizado en grupos, en recinto escolares cursos o grupos y en recintos industriales secciones de trabajo, y en el momento de producirse la señal de

alarma se hallan en una posición diferente a la que corresponde a su puesto habitual deben abandonar el edificio con el personal del recinto en que se encuentren en el momento de producirse la alarma y una vez en el exterior del edificio comunicarán a los compañeros con los que han salido que se incorporan con el personal de su sección rápidamente para facilitar el recuento.

### **7.5.2 Atención a personas disminuidas**

En el caso de que existan personas con algún tipo de disminución en el edificio debe garantizarse su evacuación. Será responsabilidad del Coordinador de evacuación de la sección en la que se encuentren la atención a dichas personas y todo el personal de la zona tendrá la obligación de colaborar en su ayuda.

El Jefe de evacuación, si conoce la existencia de alguna persona que tenga alguna dificultad en salir de la fábrica por sí misma, lo comunicará al Coordinador de evacuación de la zona. De la misma forma que cualquier persona que advierta o conozca la existencia de un compañero, una persona externa o en general cualquier visita con dificultades para salir de la fábrica deberá comunicarlo obligatoriamente en el instante de la alarma al Coordinador de evacuación de la zona, éste asumirá la responsabilidad de la evacuación de dichas personas y para ello solicitará la ayuda a otras personas para proceder a su ayuda.

Para facilitar la evacuación de una persona con un problema físico podrá ser necesaria la ayuda de una o varias personas. Si por cualquier circunstancia existieran personas con disminuciones psíquicas en el interior del recinto deberán asignarse por lo menos tres personas para la ayuda de cada una de ellas, siempre y cuando sea posible esta asignación, en caso contrario la asignación será más reducida.

### **7.5.3 Atención a visitas y personal externo prestando servicios en el edificio**

Otro colectivo que merece una atención especial por su posible desconocimiento del edificio y de la situación planteada son los visitantes. Siempre que se produzca una emergencia mientras se esté atendiendo a una visita, la persona que la esté atendiendo tiene la obligación de permanecer junto a los visitantes para indicarles la salida a la cual deben dirigirse y situarse en el punto de reunión, y en el mismo les rogará que permanezcan en esta situación hasta que haya finalizado el recuento.

Si la persona que está atendiendo la visita debe realizar otras funciones, presentará a los visitantes otra persona que realizará las funciones de acompañante procediendo de la forma detallada en el apartado anterior. Existirá un punto de reunión fijado para visitas y deberá verificarse que el personal de visita ha abandonado correctamente el edificio.

El personal externo que esté prestando servicio en el edificio habrá recibido un folleto de instrucciones de actuación. El responsable de la contratación, de la misma forma que es responsable de los trabajos que realiza dicho personal, deberá responsabilizarse de acompañar personalmente o asignar un acompañante hasta situarse en una posición segura.

#### 7.5.4 Principios generales de actuación en otras situaciones

Al estudiar la ocupación del edificio pueden resultar diferentes situaciones de actuación, una de ellas ha sido definida como la situación más común sin embargo pueden presentarse otras ciertamente singulares e incluso peligrosas para la integridad de los ocupantes, estas situaciones deben analizarse detenidamente y establecer los correspondientes criterios básicos de la misma forma que se han establecido para las situaciones comunes. Cualquier actividad extraordinaria debería desencadenar un estudio para conocer las condiciones de evacuación que comporta.

De forma genérica deberán existir las mismas funciones de coordinación que en una situación de actividad normal, si los titulares no estuvieran presentes deberán asumir las funciones los suplentes y la evacuación se desarrollará de la forma planificada para esta zona.

Todo el personal deberá agruparse en el punto de reunión que tiene asignado, el que corresponde a la posición que ocupa en actividad normal. Si existen personas fuera de las dependencias en el interior del recinto en el momento de la alarma deberán dirigirse al punto de reunión que corresponde a su grupo.

Deberá observarse en esta situación que no se realicen movimientos de retroceso para recoger objetos personales, encontrarse con compañeros, etc... si existiese circulación en más de un sentido en los pasillos se complicaría la evacuación y retardaría el recuento. En estas situaciones puede que las operaciones de agrupación en el punto de reunión y recuento puedan resultar notablemente más complejas.

En edificios en los cuales no se desarrolla una actividad continua una situación a tener en cuenta son las situaciones derivadas del **inicio y finalización de las actividades**, en estos momentos pueden producirse situaciones singulares que a veces pueden resultar peligrosas. Por ejemplo en edificios industriales pueden duplicar la ocupación, existe el personal operativo normal y personas ocupando vestuarios, en estos casos la organización puede resultar más compleja.

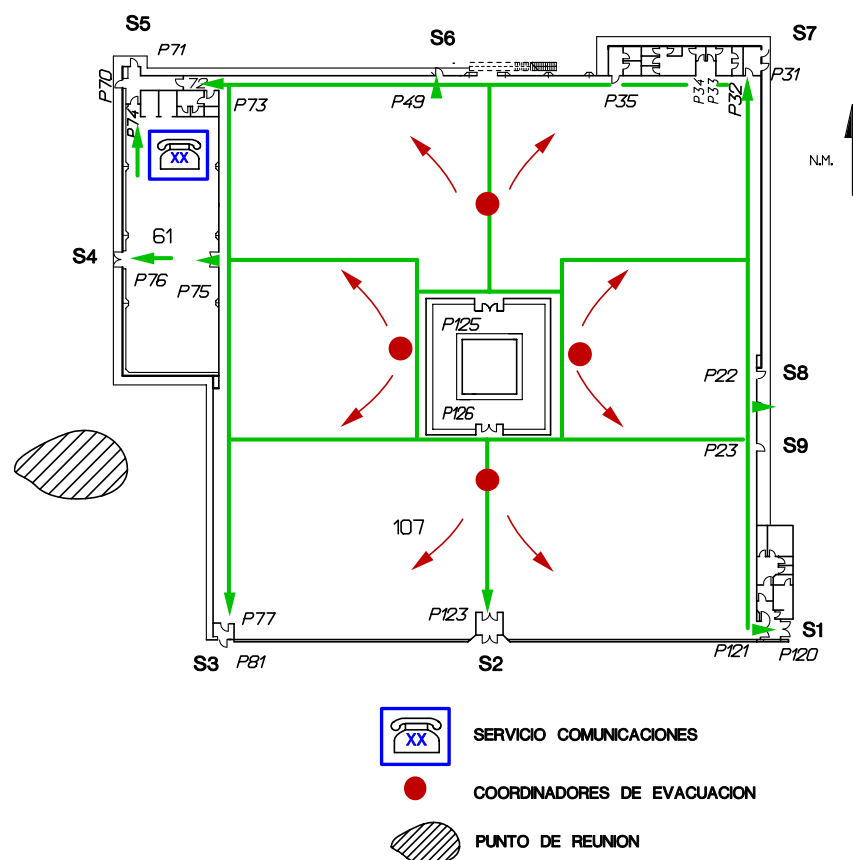
Para estas situaciones se analizan algunas posibilidades, en principio la evacuación de los respectivos recintos se realizará según se tiene establecido. En algunas dependencias puede ser que no exista ninguna persona que pueda ejercer las funciones de coordinación, de forma responsable deberá colaborar un Coordinador de una zona inmediata. La persona que asume una coordinación lo deberá indicar al Jefe de evacuación en el momento de recuento que ha efectuado la coordinación de la zona, es especialmente importante que los movimientos de los ocupantes sean siempre hacia las salidas, no se realizará ningún movimiento hacia el interior de los edificios. Un aspecto realmente problemático en estos casos será la operación de recuento ya que resultará sumamente complejo saber el número de personas que se habían incorporado a la actividad.

#### 7.5.5 Consideraciones sobre el servicio de comunicaciones, el punto de reunión y los Coordinadores de evacuación



Como criterio general el servicio de comunicaciones corresponderá al punto establecido para que los ocupantes del edificio comuniquen cualquier posible situación de emergencia, será un puesto de control ocupado de forma permanente que corresponda a un lugar físico y a un número telefónico conocido por todo el personal del edificio. En edificios de uso docente puede ser la conserjería y en industriales la recepción o la centralita de comunicaciones.

El servicio de comunicaciones en caso de una emergencia contactará con el Jefe de emergencia y desde ésta, u otra posición establecida coordinará actuaciones, y especialmente la evacuación de emergencia. Afortunadamente la telefonía móvil permite trasladar esta ubicación a cualquier punto del edificio e incluso del recinto exterior, garantizando la comunicación con los Coordinadores de evacuación.



**Figura 7.5** Ejemplo de organización de una evacuación de emergencia

El punto de reunión deberá fijarse en aquella posición que siendo segura, no dificulta otras operaciones y sea lo más próxima posible al edificio. El punto de reunión debe ser una posición aislada del riesgo que ha ocasionado la evacuación y de otros que pudieran derivarse a consecuencia del mismo y debe garantizarse que la situación no dificulta otras operaciones en el edificio como podría ser el acceso de los servicios de extinción y otros servicios de ayuda, también como concepto general es interesante que esté lo más próxima posible para reducir los recorridos, efectuar la operación de recuento de forma rápida y poder emprender operaciones de rescate si son necesarias. En la figura 7.5 puede observarse sobre la planta de un edificio la ubicación de los coordinadores, el servicio de comunicaciones y un

único punto de reunión.

Es necesario que se tengan previstas varias posibles ubicaciones del punto de reunión y en el momento de la situación de emergencia el Jefe de evacuación decidirá el más apropiado. La situación de los ocupantes en el punto de reunión será la que se ha planificado y la superficie aproximada que ocuparán los grupos de le edificio serán los correspondientes según el diseño del punto de reunión.

Finalmente debe indicarse que resulta complejo generalizar sobre el número de Coordinadores de evacuación necesarios en un recinto. Algunos autores recomiendan un Coordinador hacia cada una de las salidas, en otros casos, posiblemente sea más realista consiste en plantear áreas de barrido desde una posición central del recinto dirigiéndose hacia zonas de salidas, de esta forma se plantea en la figura 7.5.

## 7.6 DIVULGACIÓN Y REGISTRO DE ENSAYOS Y SIMULACROS

El concepto de divulgación del plan de evacuación puede ser complejo, un aspecto determinante son las características de los ocupantes. Resulta completamente diferente la situación, si la mayoría de ocupantes son personas de paso o bien su ocupación es estable, como mínimo son precisos dos niveles de información. Por un lado **los responsables de la dirección de la evacuación**, Jefe de evacuación y los Coordinadores de evacuación de cada zona, es preciso que dispongan de conocimientos suficientes de sus funciones a través de información general e información específica de las zonas de su responsabilidad. Luego la totalidad de ocupantes debe disponer de **instrucciones generales**, en el caso de edificios ocupados habitualmente existirá una información general con los criterios precisos para la evacuación del edificio, esta información podrá facilitarse de forma escrita o bien analizarse mediante reuniones. En edificios de un cierto nivel de riesgo es posible facilitar a los ocupantes un folleto informativo, pero en otros casos debe considerarse que no es viable esta información.

Los ensayos son otra actividad formativa, con ellos se trata de poner en práctica determinadas actividades que se realizan pocas veces y en una situación de emergencia puede resultar importante realizarlas, por ejemplo ejercicios de apertura de puertas que constituyen posibles salidas y normalmente no se utilizan, la identificación de la señal de alarma, los sistemas de alumbrado de emergencia, etc... Los ejercicios de apertura de puertas permiten verificar que las puertas abren correctamente y que el personal de la zona es capaz de realizar de forma eficiente dichas operaciones. También verificar el correcto funcionamiento de la sirena de alarma permite verificar que el personal del edificio lo identifica correctamente como una señal de alarma, para ello conviene avisar del día y la hora exacta en la que se va a efectuar la prueba para no dar lugar a confusiones y generar dudas.

Los expertos afirman que el comportamiento de los ocupantes mejora notablemente con la realización de simulacros. Una evacuación de emergencia en un edificio en el que no se ha realizado jamás un ejercicio de evacuación produce una gran angustia a los ocupantes, existe la duda de si será posible salir, mientras que si se han realizado diferentes simulacros los

ocupantes saben perfectamente que en un espacio de tiempo relativamente corto estarán en un lugar seguro. Los simulacros de evacuación pueden efectuarse para cumplir determinados objetivos: Cumplir con normativas vigentes, que exigen la realización periódica de simulacros de emergencia y evacuación, verificar cómo se desarrolla una evacuación de la fábrica. Observar posibles problemas para adoptar las medidas correctoras oportunas, valorar la forma de actuar del personal de la fábrica en estas situaciones, verificar que los cálculos de evacuación coinciden razonablemente con los reales obtenidos en el simulacro. Los simulacros también sirven para aprendizaje del personal del edificio: Salir de la fábrica en el mínimo tiempo, situarse en el punto de reunión, efectuar recuento, coordinar la evacuación, etc....

<b>REGISTRO ENSAYO EVACUACIÓN / SIMULACROS</b>	
Fecha:	Hora:
Descripción del ensayo/ simulacro:	
Resumen resultados:	
Observaciones:	
Personas que atestiguan haber participado en el ensayo/ simulacro	
Nombre:	
Firma:	

**Figura 7.6** Modelo para el registro de ensayos y simulacros

La realización de simulacros en cualquier edificio tiene un coste elevado, por ello es necesario planificarlos de la forma más adecuada y obtener la máxima información cuando se realizan: Deben servir para adiestrar la totalidad del personal del edificio, tanto los Coordinadores de evacuación y funciones auxiliares, además de verificar la operatividad de los criterios establecidos en los correspondientes manuales. En caso de observarse anomalías en los procedimientos establecidos, deberá procederse a la revisión al nivel que sea necesario. Para el registro de ensayos podrá utilizarse un modelo como el de la figura 7.6, en el cual se trata de registrar los aspectos más relevantes del mismo.



## **CAPÍTULO 8: APLICACIONES**

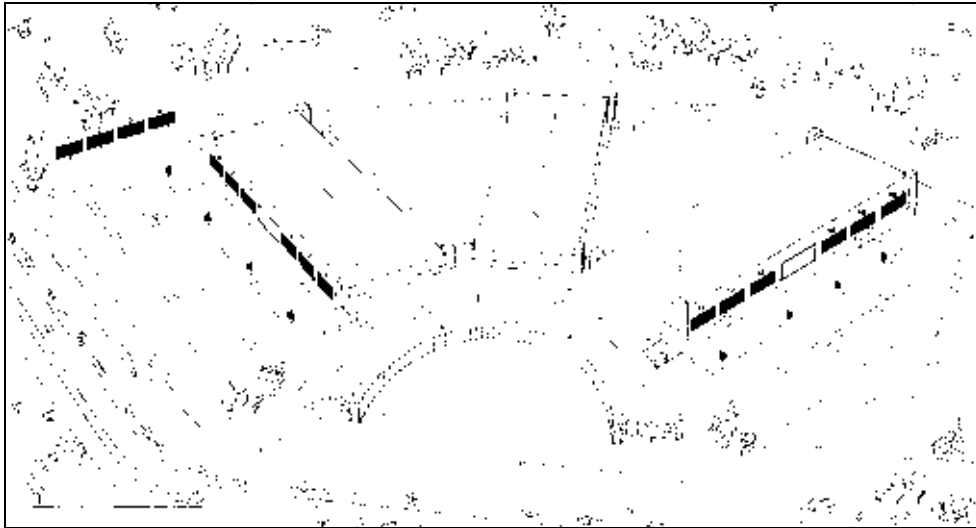
### **8.1 APLICACIONES**

En este capítulo se pretende mostrar la viabilidad de las propuestas realizadas en capítulos anteriores desde una perspectiva global, para ello se van a estudiar tres aplicaciones consistentes en resúmenes de estudios de evacuación en edificios de diferentes características. El primer caso corresponde al estudio de un edificio de pública concurrencia, el segundo al estudio de la evacuación de un recinto industrial y finalmente el estudio de un edificio escolar.

En el estudio de la evacuación de un edificio de pública concurrencia se pretende mostrar como en determinadas situaciones, aunque resulte complejo conocer las características de locomoción de los ocupantes, los procedimientos gráficos permiten obtener aproximaciones razonables para gestionar evacuaciones de emergencia. En el caso de un edificio industrial la situación que se plantea resulta mucho más controlada, en primer lugar se conocen las características de los ocupantes, el tipo de edificio permite que se hayan implantado procedimientos formales, lo que facilita que se puedan pronosticar determinados aspectos de comportamiento, los resultados es posible someterlos a un verdadero proceso de validación y finalmente la situación planteada se resuelve como un problema de evacuación de un recinto. En el estudio de la evacuación de un edificio escolar se trata de mostrar la utilidad de las redes dinámicas de flujo para obtener un conocimiento profundo del problema, y especialmente la posibilidad de realizar ajustes en las características que definen el sistema, así como considerar cambios en las condiciones arquitectónicas del edificio. De la misma forma que en el caso de un edificio industrial, corresponde a una situación en la cual existe un conocimiento ajustado de los factores del sistema.

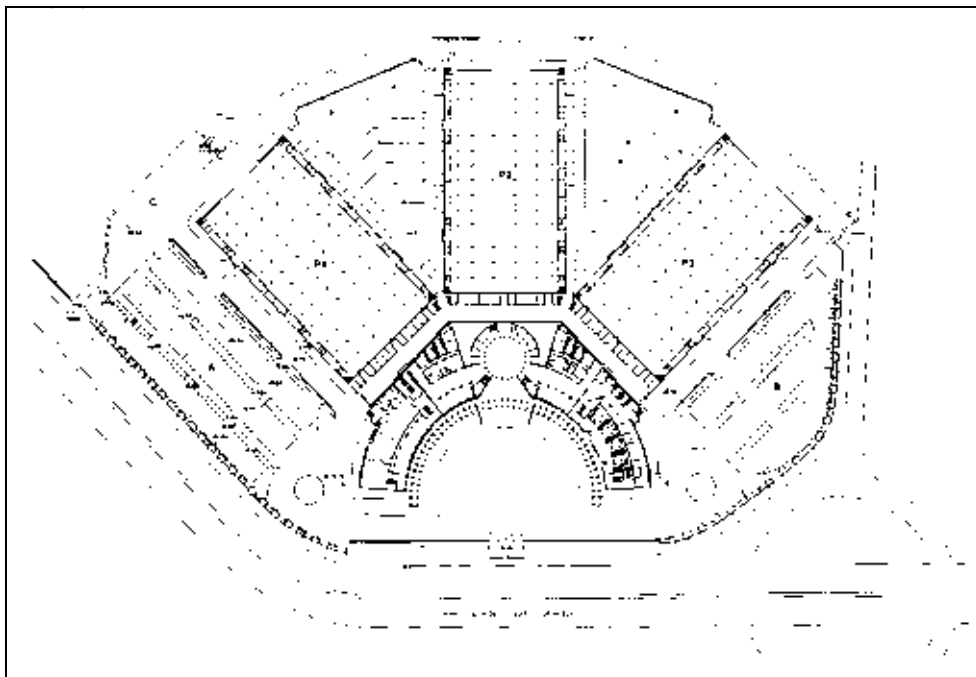
### **8.2 ESTUDIO DE LA EVACUACIÓN DE UN RECINTO DE PÚBLICA CONCURRENCIA**

Se debe estudiar la evacuación de un recinto destinado actos públicos: Ferias, convenciones, congresos y otros actos de características similares, caracterizados por la asistencia de gran número de personas que de forma espontánea u organizada acceden al recinto para participar en las actividades que se desarrollen en el mismo. Los responsables de la seguridad del recinto estaban muy interesados en conocer, aún que fuera de forma aproximada, el tiempo que podía suponer la evacuación de la totalidad de los ocupantes en función la disposición y/o la configuración física de las salidas. Los actos que se organizan dan lugar a una determinada configuración del espacio y distribución de la planta, siendo una circunstancia común que no resulten hábiles la totalidad de las salidas, de la misma forma en función de la afluencia de visitantes no se habilitan todos los accesos y en consecuencia tampoco resultan disponibles la totalidad de las salidas. Los responsables de la seguridad del recinto manifestaron el interés en disponer de herramientas que proporcionaran estimaciones de tiempos de evacuación y permitieran conocer la distribución adecuada hacia las salidas en situaciones de emergencia.



**Figura 8.1** Vista general de un recinto de pública concurrencia

En la figura 8.1 puede observarse en una vista general del conjunto la existencia de tres pabellones, por ello se realizará el estudio por separado en cada una de estas tres dependencias. Los tres pabellones comunican con un pasillo central, en principio la evacuación de los mismos se puede suponer independiente. Aspectos más concretos del recinto pueden apreciarse en la figura 8.2 correspondiente al plano de la planta de la totalidad del conjunto.

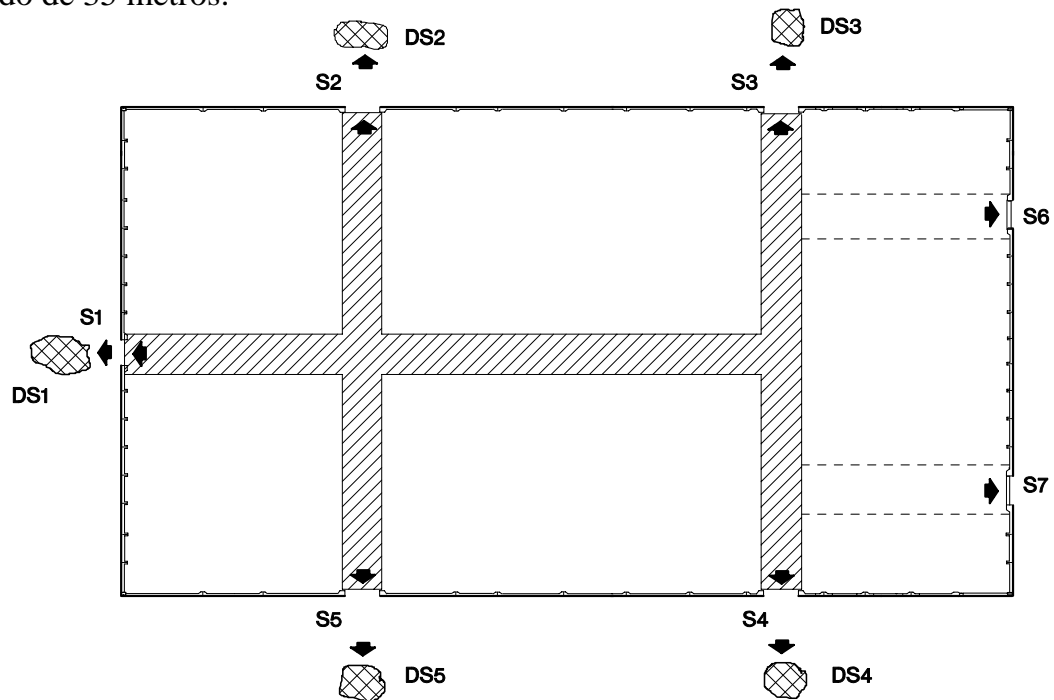


**Figura 8.2** Planta del conjunto

### 8.2.1 Análisis de los factores característicos del problema

En primer lugar se analizan los factores que definen el sistema de evacuación. En cuanto a **la configuración del edificio** se puede observar que se trata de un recinto de una sola planta desde el que se accede directamente al exterior. Por tratarse el exterior de

una amplia zona ajardinada se considera un espacio seguro. Las salidas se hallan distribuidas en toda la planta, por lo que resulta razonable admitir la inexistencia de interferencia en el movimiento de los ocupantes que se dirigen a cada una de ellas. No existen medios mecánicos de desplazamiento, la señalización indica de forma razonablemente clara la ubicación de las salidas, y las actividades que se desarrollen no deben alterar esta característica del recinto. Las condiciones de iluminación deben permitir la evacuación en condiciones de luz diurna y en las condiciones de alumbrado habitual, por otro lado las luminarias de emergencia proporcionan alumbrado suficiente en caso de fallo del sistema de alumbrado habitual para salir del edificio, sin embargo no se hallan definidas las condiciones de evacuación hasta el punto de reunión. En la figura 8.3 puede observarse la planta correspondiente de cada uno de los tres pabellones, puede comprobarse que cada planta dispone de cinco salidas y hacia las mismas se hallan configuradas amplias zonas de paso, si bien en condiciones excepcionales podrían habilitarse otras dos salidas, las salidas 6 y 7. En las salidas 1, 2, 3 y 4 la circulación se efectúa por una rampa de pendiente del 5% y de longitud 20, 22, 30 y 35 metros, siendo la circulación hacia las salidas 5, 6 y 7 completamente horizontal con un recorrido de 35 metros.



**Figura 8.3** Planta de un pabellón

Los **factores ambientales** vienen condicionados por los factores mobiliarios y materiales depositados en el recinto, que dependen de las actividades que temporalmente se desarrollen. Los factores inmobiliarios se consideran irrelevantes, luego será la propia actividad la que dará lugar a las características de la combustión, del humo y del tipo de gases que pudieran desprenderse, resultando la altura del edificio favorable para la expansión de humos y gases derivados de la combustión. Difícilmente se considera que el humo pueda obstaculizar la circulación de las personas hacia las salidas en el tiempo que puede durar el proceso de una evacuación de emergencia.

Los **ocupantes del edificio** pueden ser cualquier tipo de personas por lo que sus dimensiones y características de locomoción deben considerarse las estándar, por ello directamente pueden utilizarse las tablas de J. J. Fruins. La velocidad de circulación hacia las

salidas 1, 2, 3, y 4 se supone de 42 metros por minuto, mientras que hacia la salida 5 la velocidad que se supone es de 55 metros por minuto por tratarse de un tramo completamente horizontal. En el recinto se efectúa un estricto control de accesos, permitiendo conocer en cualquier momento su ocupación. Al ser un recinto de pública concurrencia no puede suponerse que los ocupantes tengan ninguna familiaridad con el recinto. Así mismo, cabe pronosticar que las personas presentes rehúsen el contacto físico en las retenciones, en cuyo caso las densidades de ocupación de las salidas no serán excesivamente elevadas, pudiéndose suponer valores máximos de 3 personas por metro cuadrado.

La previsible actitud o **conducta de los ocupantes** al recibir una señal de alarma será la de esperar ciertas indicaciones que debe proporcionar el personal del recinto. En principio la tendencia de los ocupantes sería de abandonar el edificio por la puerta que han entrado, ello daría lugar a grandes retenciones que deberían corregirse mediante una adecuada distribución hacia otras salidas utilizables y salidas de emergencia. La señalización acústica y óptica de que dispone el edificio debe tener una total credibilidad, por lo que no se prevén demoras en el inicio de la evacuación. El entorno personal en que puede producirse una evacuación no se halla definido, puede ser un entorno familiar o bien de un entorno público, posiblemente en días festivos deba pensarse en un entorno familiar, en otros casos pueda pensarse más en un entorno público, sin embargo no pueden descartarse otros efectos de grupo.

Existen **procedimientos formales** perfectamente desarrollados en el manual de autoprotección del edificio, en dicho plan se planifican las actuaciones del personal responsable de la gestión y de los servicios del establecimiento en situaciones de emergencia. La dificultad radica en la transmisión de las instrucciones a todos los ocupantes en tiempo real, especialmente para abandonar el recinto utilizando la totalidad de salidas disponibles.

### 8.2.2 Cálculo de la evacuación

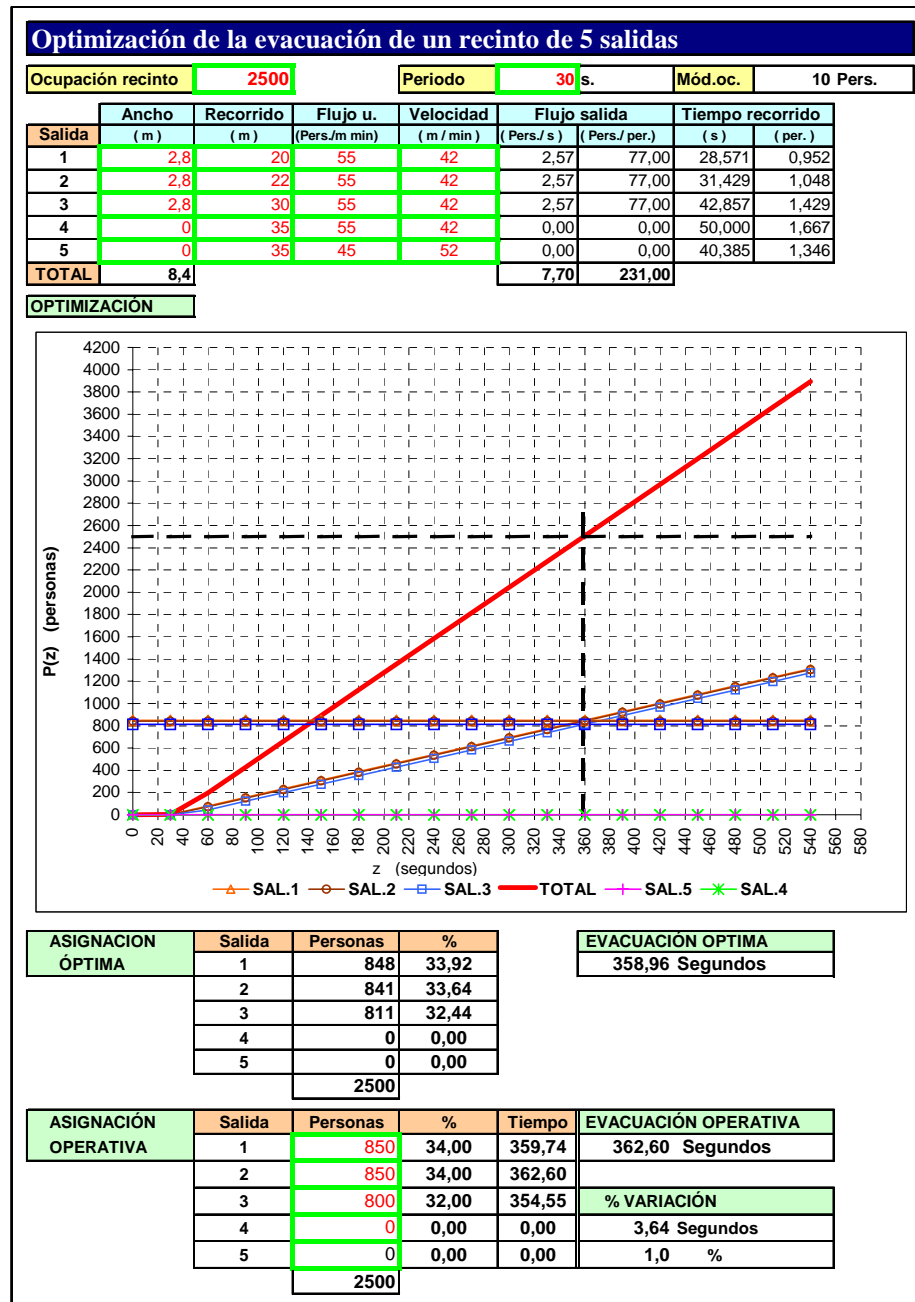
Para la solución del problema se pone a disposición de los responsables de la gestión de la seguridad una aplicación para que en cualquier instante de tiempo, en función del número de ocupantes presentes en el recinto puedan conocer los tiempos de evacuación así como la distribución óptima hacia las salidas.

En el desarrollo analítico de la aplicación se observó que a menudo resultaba conveniente efectuar ajustes en el número de personas asignadas a una salida, por ejemplo, si la asignación óptima de una salida eran 234 personas, resultaba interesante evaluar las consecuencias de asignar 250 personas a dicha salida, dando lugar el resultado de estos ajustes a la denominada **asignación operativa**, a partir de la cual se obtienen las desviaciones absolutas y porcentuales respecto el tiempo de evacuación total y el de cada una de las salidas. Realmente, en un edificio de pública concurrencia carece de sentido hablar de asignaciones exactas y se considera muy razonable redondear si se evalúan correctamente las diferencias que suponen dichas aproximaciones.

En el primer caso analizado, se supone que el recinto tiene una ocupación de 2500 personas y tan sólo se utilizan tres salidas de una anchura mínima de paso de 3,0 metros, lo que da lugar a un ancho efectivo de 2,8 metros. Los recorridos de evacuación hasta las



salidas 1, 2 y 3 son respectivamente de 20, 22 y 30 metros. Con estos valores se procede al cálculo de la evacuación resultando los valores de la figura 8.4.



**Figura 8.4** Optimización de la evacuación de un recinto de tres salidas

La distribución óptima hacia las salidas 1, 2 y 3 es respectivamente de 848, 841 y 811 personas, suponiendo un tiempo de evacuación de 359 segundos. Aproximadamente unos 6 minutos, un tiempo de evacuación excesivamente alto si se considera que a partir de los 2,5 minutos pueden tener lugar fenómenos de nerviosismo en los ocupantes. Si se redondea el valor de las asignaciones, en caso de una evacuación de emergencia se asignarían aproximadamente 850 personas a las salidas 1 y 2 y 800 personas a la salida 3, resultando razonable esta asignación ya que el recorrido de evacuación de esta tercera salida resulta mayor, ello supone una variación de 3,6 segundos lo que da lugar a un incremento del 1% en el tiempo de evacuación.

La magnitud del tiempo de evacuación exige replantear la situación del recinto, resulta obvia la utilización de cinco salidas, así como el incremento de las anchuras de paso de las salidas 2 y 3. La salida 1 mantiene la anchura efectiva de paso de 2,8 metros y las salidas 2, 3, 4, y 5 una anchura efectiva mínima de 3,6 metros, estos valores dan lugar a los resultados proporcionados por la solución gráfica de la figura 8.5.

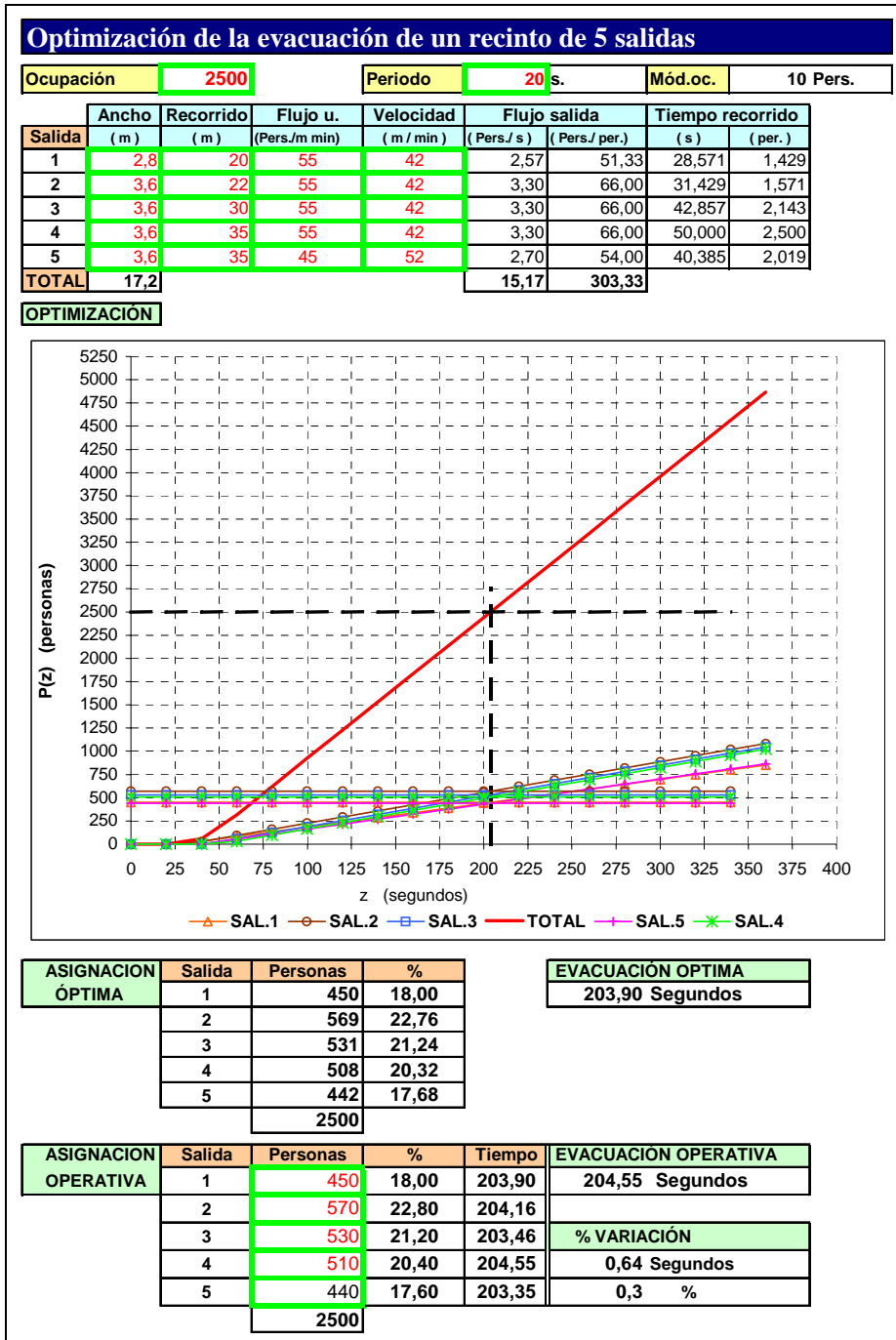


Figura 8.5 Optimización de la evacuación de un recinto de cinco salidas

En este segundo análisis el resultado del tiempo de evacuación obtenido resulta más razonable, sin embargo todavía supera los 3 minutos. En estas circunstancias si la asignación operativa fuera de 450 personas hacia la salida 1, 570 hacia la salida 2, 530 hacia la 3, 510 hacia la 4 y las 440 restantes hacia la salida 5, tan solo produciría un incremento de unos 0,64 segundos en el tiempo de evacuación, es decir, un incremento por-

centual del 0,3 %. Seguramente esta asignación operativa todavía no reúne la adecuada simplicidad, por lo que serían precisos nuevos tanteos.

Cuando la ocupación fuera de 2500 personas la alternativa más razonable consiste en habilitar la totalidad de las posibles salidas, concretamente utilizar las siete salidas de que dispone el recinto, las salidas seis y siete tienen una anchura efectiva de paso de 2,8 m y comportan circulación horizontal. Los resultados analíticos son los que se presentan en la figura 8.6. Se logra un tiempo de evacuación de unos tres minutos, siendo posible una distribución operativa que produce incrementos en el tiempo de evacuación de tan solo el 3,2 %. Si bien es la mejor solución obtenida, todavía deberían buscarse aspectos que aportaran alguna mejora.

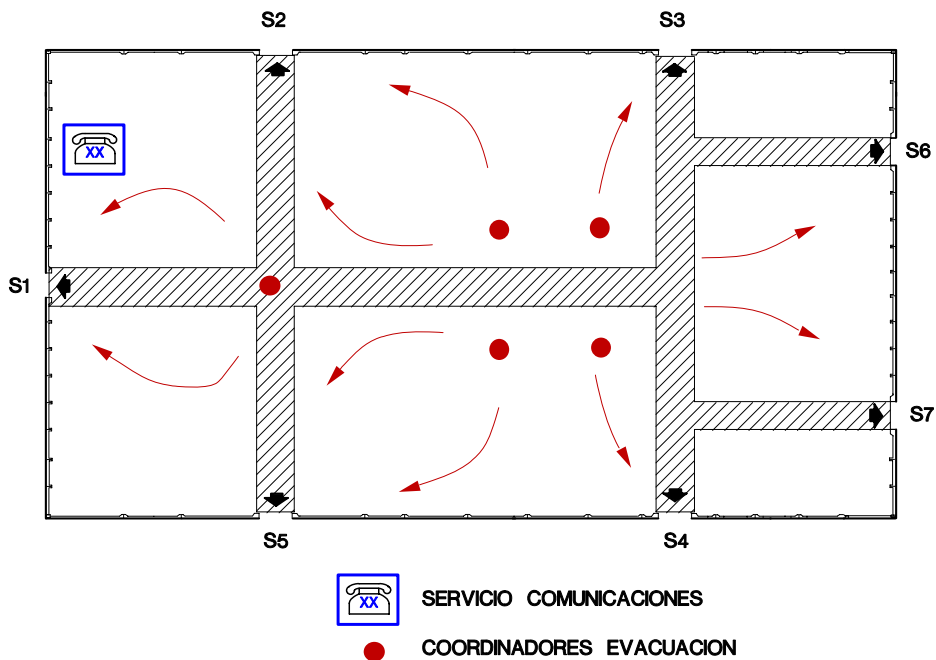
Optimización de la evacuación de un recinto de 7 salidas							
Ocupación recinto		2500		Periodo		15 s.	
Salida	Ancho (m)	Recorrido (m)	Flujo u. (Pers./m min)	Velocidad (m/min)	Flujo salida (Pers./s) (Pers./per.)		Tiempo recorrido (s) (per.)
1	2,8	20	55	42	2,57	38,50	28,571 1,905
2	3,6	22	55	42	3,30	49,50	31,429 2,095
3	3,6	30	55	42	3,30	49,50	42,857 2,857
4	3,6	35	55	42	3,30	49,50	50,000 3,333
5	3,6	35	45	52	2,70	40,50	40,385 2,692
6	2,8	35	45	52	2,10	31,50	40,385 2,692
7	2,8	35	45	52	2,10	31,50	40,385 2,692
<b>TOTAL</b>	<b>22,8</b>				<b>19,37</b>	<b>290,50</b>	
<b>OPTIMIZACIÓN</b>							
<b>ASIGNACIÓN ÓPTIMA</b>	<b>Salida</b>	<b>Personas</b>	<b>%</b>	<b>EVACUACIÓN ÓPTIMA</b>			
	1	359	14,36	<b>168,44 Segundos</b>			
	2	452	18,08				
	3	414	16,56				
	4	391	15,64				
	5	346	13,84				
	6	269	10,76				
	7	269	10,76				
		<b>2500</b>					
<b>ASIGNACIÓN OPERATIVA</b>	<b>Salida</b>	<b>Personas</b>	<b>%</b>	<b>Tiempo</b>	<b>EVACUACIÓN OPERATIVA</b>		
	1	360	14,40	168,83	<b>173,72 Segundos</b>		
	2	450	18,00	167,79			
	3	410	16,40	167,10			
	4	400	16,00	171,21			
	5	350	14,00	170,01			
	6	280	11,20	173,72			
	7	250	10,00	159,43			
		<b>2500</b>					
					<b>VARIACIÓN</b>		
					<b>5,28 Segundos</b>		
					<b>3,13 %</b>		

**Figura 8.6** Optimización evacuación de un recinto de siete salidas

En este caso no se considera el diseño del punto de reunión, en este tipo de edificios resulta compleja la agrupación de las personas que han abandonado el recinto y no son posibles operaciones de recuento.

Para la gestión de la evacuación además del Jefe de evacuación, sería idónea la existencia de cinco Coordinadores de evacuación por considerarse cinco zonas de influencia, se trata de zonas diáfanas inmediatas a una o a dos salidas, en la figura 8.7 se muestra su posible ubicación con sus respectivas zonas de influencia de forma que detrás del último individuo que se dirige a la salida se pueda garantizar la evacuación de la totalidad de los ocupantes. Otras funciones auxiliares recomendables para esta situación son las funciones de apertura de puertas, dado que el personal que visita al recinto no tiene conocimiento de actuación sobre las mismas, el personal que desempeña las funciones auxiliares una vez haya dotado a las puertas de su máxima capacidad de paso, deben

actuar de forma que los ocupantes no permanezcan junto a las salidas y se dirijan a zonas exteriores, con la finalidad de evitar que no obstaculicen el paso de las personas que permanecen en el interior del recinto y tratan de salir.



**Figura 8.7** Esquema para la gestión de la evacuación

Para validar las magnitudes de locomoción de los ocupantes podrían realizarse ensayos, sin embargo resulta complejo hallar fórmulas que proporcionen la adecuada credibilidad a los mismos. Resulta complejo poder afirmar que las características de locomoción de las personas que participan en el ensayo son similares a las de las personas que asisten al recinto, luego en este caso no se ha realizado ninguna validación de resultados.

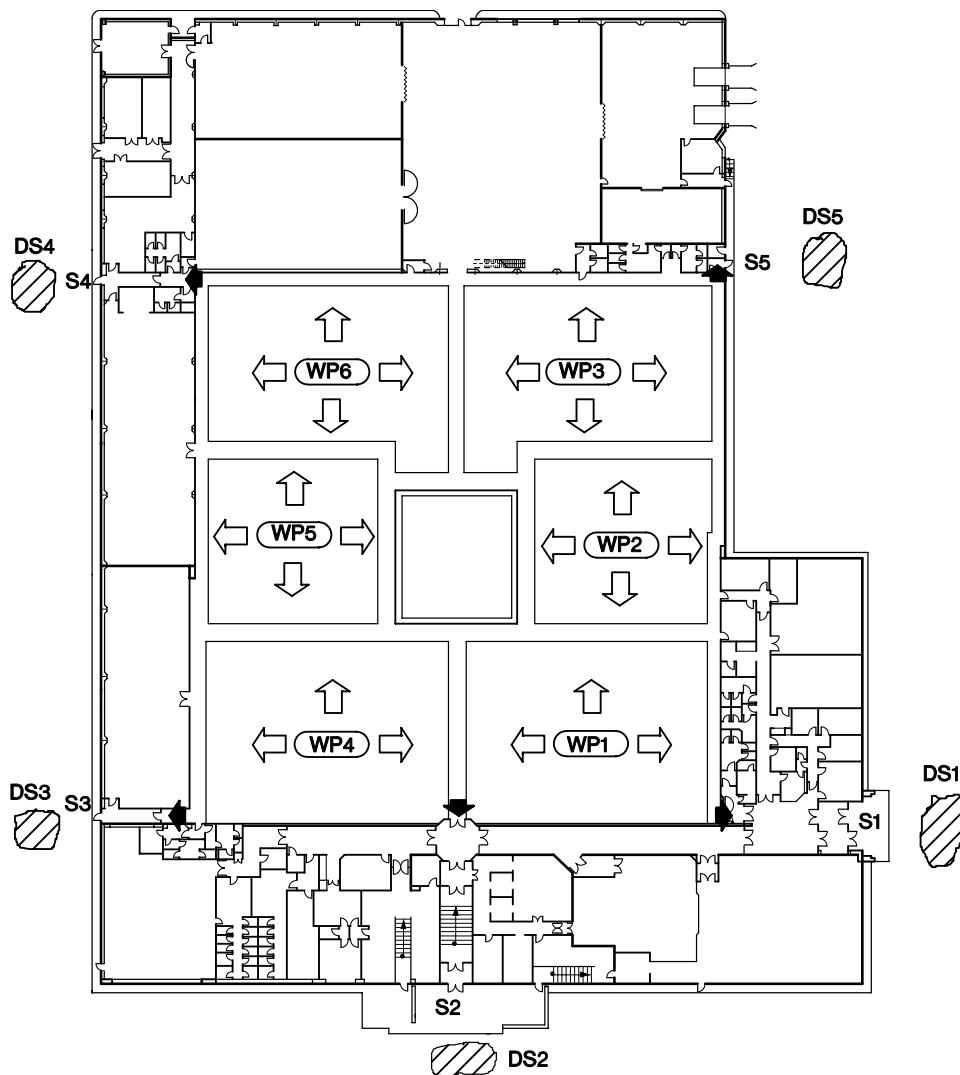
A modo de conclusión puede observarse como de forma razonablemente simple es posible obtener estimaciones de los tiempos de evacuación de un recinto de las características del presentado, analizar las distribuciones óptimas hacia las salidas y estudiar otras decisiones que deben ayudar a gestionar evacuaciones de emergencia, mejorando substancialmente la seguridad de los ocupantes.

### 8.3 ESTUDIO DE LA EVACUACIÓN DE UN EDIFICIO INDUSTRIAL

En este caso se estudia la evacuación de un recinto situado en un edificio de uso industrial. Existen otras zonas de la fábrica con una ocupación reducida de forma que la evacuación de la zona industrial se considera independiente de las otras zonas del edificio. En este caso se va a detallar el proceso de cálculo seguido para la obtención de las soluciones así como el proceso de validación de resultados, contabilizando las salidas en simulacros y analizando aspectos de comportamiento, y de eficacia de la organización propuesta mediante encuestas y formularios a los coordinadores de evacuación.

La superficie total es de unos 7500 metros cuadrados, la forma de la planta como puede observarse en la figura 8.8 puede definirse como la de un rectángulo principal con otros dos rectángulos menores adosados, uno de ellos transversal situado en la parte inferior mientras que el otro se sitúa en posición longitudinal a la derecha. La longitud de la

planta es de 105 metros y una anchura media de 71 metros, la edificación de la fábrica está formada por cuatro volúmenes de forma rectangular, el principal corresponde a la zona de fabricación, una zona de oficinas, una de vestuarios y servicios diversos y otra zona longitudinal al recinto principal destinada a locales y servicios técnicos.



**Figura 8.8** Planta para el estudio de la evacuación de un recinto industrial

### 8.3.1 Análisis de los factores que definen el sistema

El recinto objeto de estudio corresponde a la zona central de la planta en el cual se encuentran las secciones WP1, WP2, WP3, WP4, WP5 y WP6, puede considerarse un recinto aislado del resto del edificio, las salidas se realizan por vestíbulos o pasillos de independencia de tal forma que la zona de fabricación constituye un único sector de incendio, la salida se realiza por puertas resistentes al fuego de características diversas, las puertas de salida del recinto normalmente se hallan abiertas mediante sistemas automáticos que se cierran en caso de alarma. Los recorridos de evacuación hacia las salidas S1, S3, S4 y S5 son horizontales, mientras que la salida hacia S2 se realiza a través de una escalera de un solo tramo en recorrido descendente, dicha escalera dispone de resguardos. Todas las salidas se hallan señalizadas y existe alumbrado de

emergencia. Las zonas de paso se hallan perfectamente definidas, cada una de ellas tiene una superficie  $a_j$ . El recinto dispone de 5 salidas con una anchura mínima  $w_j$  (m.) y desde el origen de la evacuación hasta una posición exterior segura denominada destino (DS), debe efectuarse un recorrido de  $l_j$  metros. Las magnitudes que definen el problema se hallan en la tabla 8.1. La zona de fabricación tiene aproximadamente una superficie de 3800 metros cuadrados.

SAL.	$w_j$ (metros)	$l_j$ (metros)	$a_j$ ( m <sup>2</sup> )	$v_j$ ( m / min )	$f_{e,j}$ (Pers. / m min)
S1	1,2	25,0	79,0	48	65
S2	1,2	30,0	36,5	34	46
S3	0,8	15,0	79,0	48	65
S4	0,8	15,0	63,8	48	65
S5	0,8	5,0	63,8	48	65

**Tabla 8.1** Condiciones geométricas recinto y magnitudes de circulación

En cuanto a las **características de los ocupantes** del recinto, se consideran personas adultas en condiciones de movilidad normal, capaces de reaccionar de forma inmediata al producirse la señal de alarma para la evacuación y dirigirse a la salida que les corresponde para una evacuación óptima según un plan de formación seguido por la totalidad de los ocupantes. La ocupación habitual es de 540 personas repartidas en 6 áreas de trabajo, la distribución puede observarse en la tabla 8.2.

WP1	WP2	WP3	WP4	WP5	WP6	TOTAL
108	76	82	104	78	92	540

**Tabla 8.2** Ocupación recinto

La distribución de los ocupantes en el recinto se supone uniforme. También se supone que no se producen demoras al inicio de la evacuación cuando se produce la señal de alarma, la totalidad de ocupantes se dirige hacia los pasillos de circulación que conducen a las salidas, razonablemente los pasillos centrales serán menos utilizados, la superficie utilizada se estima en unos 402 m<sup>2</sup>, con lo que la densidad de ocupación que determina las magnitudes de circulación vendrá dada por

$$d = \frac{k}{\sum_{j=1}^r a_j} = \frac{540}{402} = 1,34 \text{ (Pers./m}^2\text{)}$$

Mediante las tablas de Fruins del anexo 1, a partir de la densidad obtenida se estiman las velocidades de circulación  $v_j$  y los flujos  $f_j$ , obteniéndose los valores mostrados en la tabla 8.2, estas magnitudes se suponen constantes durante todo el tiempo que dura la evacuación.

### 8.3.2 Solución del problema

La solución del problema se obtiene gráficamente tal como puede observarse en la figura 8.9. El proceso seguido es el descrito a continuación:

1. Se ha determinado para cada salida  $j$  la función de evacuación  $t_j(x_j)$  para ello se ha calculado previamente el tiempo de recorrido mediante la expresión (3.9), así como el flujo registrado en cada salida mediante (3.10):

$$t_{1,1} = \left(\frac{25}{48}\right) \times 60 = 31,25 \quad t_{1,2} = \left(\frac{30}{34}\right) \times 60 = 52,94 \quad t_{1,3} = \left(\frac{15}{48}\right) \times 60 = 18,75$$

$$t_{1,4} = \left(\frac{15}{48}\right) \times 60 = 18,75 \quad t_{1,5} = \left(\frac{5}{48}\right) \times 60 = 6,25$$

$$f_1 = \frac{65 \times 1,2}{60} = 1,30 \quad f_2 = \frac{46 \times 1,2}{60} = 0,92 \quad f_3 = f_4 = f_5 = \frac{65 \times 0,8}{60} = 0,87$$

$$t_1(x_1) = 31,25 + \frac{x_1}{1,30} \quad t_2(x_2) = 52,94 + \frac{x_2}{0,92} \quad t_3(x_3) = 18,75 + \frac{x_3}{0,87}$$

$$t_4(x_4) = 18,75 + \frac{x_4}{0,87} \quad t_5(x_5) = 6,25 + \frac{x_5}{0,87}$$

2. Se ha procedido a la representación gráfica de las funciones de evacuación inversa  $p_j(z_j)$  de cada salida, situando el tiempo en el eje de abscisas y el número de personas en el eje de ordenadas.
3. La función de evacuación total del recinto  $P_T(z)$  se obtiene sumando de las funciones de evacuación inversa, considerando las discontinuidades.
4. Situando en el eje de ordenadas el valor del número total de ocupantes del recinto, en este caso 540 personas, se traza una línea paralela al eje de abscisas hasta el punto de intersección con la función  $P_T(z)$ .
5. Desde este punto de intersección, se traza una línea vertical que corta al eje de abscisas en el valor de 138 segundos. Este es pues el tiempo mínimo  $z^*$  requerido para evacuar los 540 ocupantes del recinto.

$$z^* = 138 \text{ s.}$$

6. A partir de las intersecciones de la línea vertical con las respectivas funciones  $p_j(z_j)$  se han trazado líneas horizontales hasta cortar al eje de ordenadas. En los puntos de intersección con dicho eje se efectúa la lectura de la asignación correspondiente a cada una de las salidas:

$$x_1 = 139 \quad x_2 = 79 \quad x_3 = 104 \quad x_4 = 104 \quad x_5 = 114$$

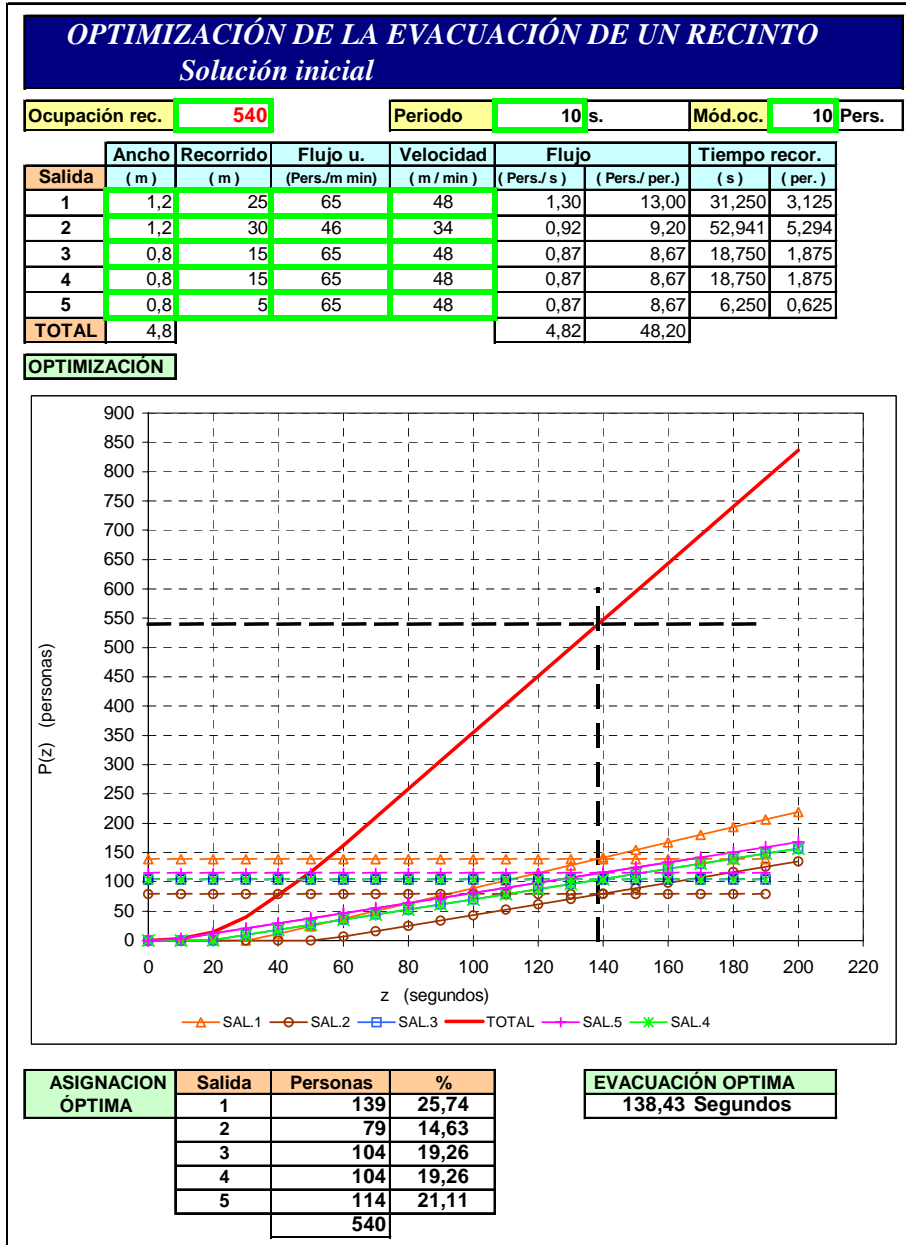
7. Se verifica que se ha producido la evacuación de la totalidad de los ocupantes del recinto:

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 = 139 + 79 + 104 + 104 + 114 = 540 \text{ Personas}$$

8. A partir de la asignación óptima se han analizado las densidades de ocupación que resultan en cada salida:

$$d_1 = \frac{139}{79} = 1,76 \quad d_2 = \frac{79}{36,5} = 2,16 \quad d_3 = \frac{104}{79} = 1,32$$

$$d_4 = \frac{104}{63,8} = 1,63 \quad d_5 = \frac{114}{63,8} = 1,79$$



**Figura 8.9** Optimización de la evacuación recinto industrial solución inicial

Estos resultados muestran que la densidad de ocupación que se produciría en las salidas, manteniendo la condición que todos los ocupantes se incorporan de forma inmediata a las vías de evacuación, es ligeramente mayor al supuesto inicialmente. Por ello resulta necesario efectuar el correspondiente ajuste y la posterior repetición del proceso de cálculo. Los nuevos valores de la velocidad de circulación y el flujo específico se muestran en la tabla 8.2.



SALIDA	$d_j$ (Pers. / m <sup>2</sup> )	$v_j$ ( m / min)	$f_{ej}$ (Pers. / m min)
1	1,76	42	74
2	2,16	30	65
3	1,32	54	71
4	1,63	47	77
5	1,79	41	74

Tabla 8.2 Flujos corregidos

Resolviendo con estos nuevos valores del flujo, se obtiene un tiempo de evacuación de 124 segundos y una distribución muy similar a la obtenida en la primera iteración, tal y como puede analizarse en la figura 8.10.

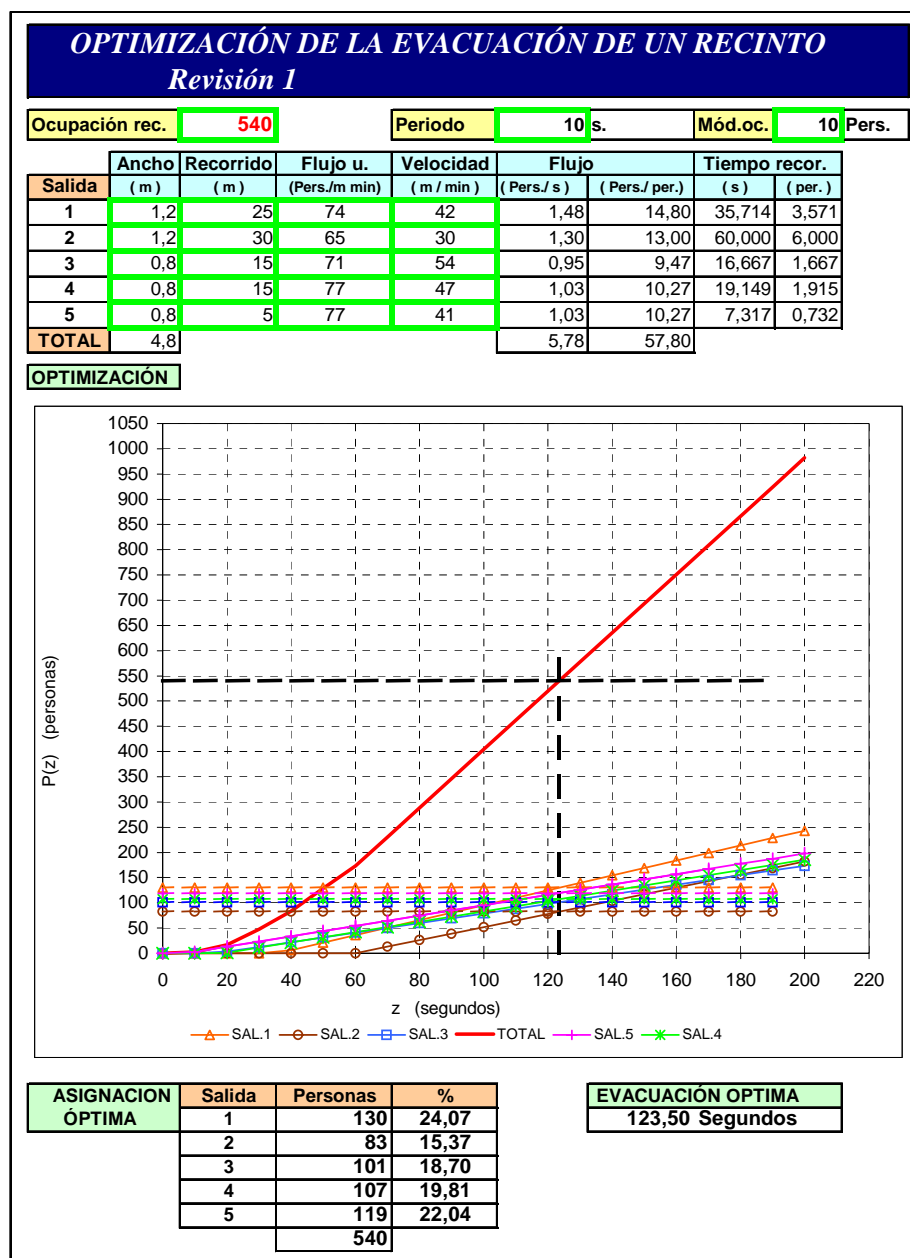


Figura 8.10 Cálculos definitivos

La distribución hacia las salidas resultante es la siguiente:

$$x_1 = 130 \quad x_2 = 83 \quad x_3 = 101 \quad x_4 = 107 \quad x_5 = 119$$

Sería posible plantear la asignación operativa aunque en este tipo de casos tiene poco sentido, los ocupantes de un recinto son los que son y puede resultar más complejo efectuar agrupaciones arbitrarias.

ASIGNACION OPERATIVA	Salida	Personas	%	Tiempo	EVACUACION OPERATIVA
	1	130	24,07	123,55	126,29 Segundos
	2	85	15,74	125,38	
	3	100	18,52	122,30	% VARIACION
	4	110	20,37	126,29	2,80 Segundos
	5	115	21,30	119,33	2,3 %
		540			

**Figura 8.11** Tabla de la asignación operativa

En este ejemplo se ha presentado una resolución gráfica, con el fin de no extender el proceso de cálculo se considera aceptable la solución obtenida y no se efectúan más iteraciones. Incluso en el caso de soluciones perfectamente ajustadas debe admitirse la incertidumbre que existe en las magnitudes que definen el movimiento de las personas, y son el punto de partida del problema.

Para la gestión de una evacuación de emergencia del edificio, según se ha analizado en el capítulo 7 se aconseja la existencia de 7 coordinadores de evacuación, cinco de los cuales estarían en la zona del recinto de fabricación que ha sido directamente objeto de estudio.

### 8.3.4 Validación de resultados

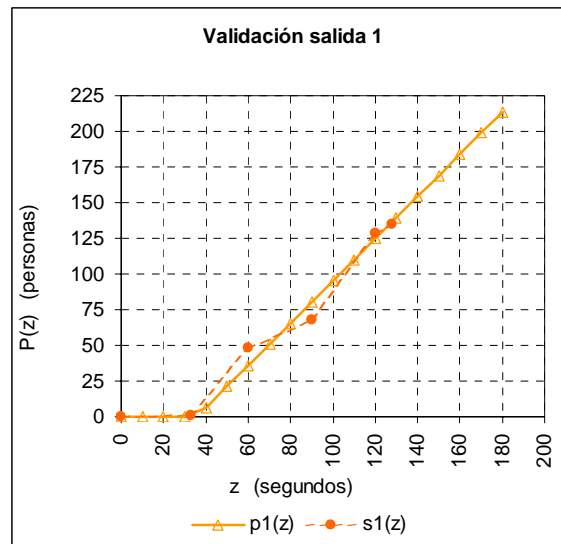
Se ha realizado un simulacro de evacuación, se han realizado mediciones para validar magnitudes de locomoción y se ha distribuido una encuesta para analizar aspectos de comportamiento. La encuesta ha sido contestada por todo el personal de la fábrica que ha participado en el simulacro, es decir el del recinto objeto del cálculo de la evacuación y el de otras dependencias.

Para verificar si las magnitudes de locomoción utilizadas en el cálculo de la evacuación se ajustan a los que realmente se registran para los ocupantes del recinto se han controlado las salidas que se han producido en las salidas S1, S2 y S4, en ellas se han contabilizado los instantes en que han empezado a abandonar el recinto, el final de la evacuación y el número de personas que habían abandonado el recinto por la salida respectiva en intervalos de 30 segundos, o sea a los 30, 60, 90, 120, 150 y 180 segundos. No ha sido posible efectuar mediciones en la totalidad de las salidas.

Tiempo (segundos)	Salida 1 (Pers.)	Tiempo (segundos)	Salida2 (Pers.)	Tiempo (segundos)	Salida 4 (Pers.)
33	1	71	1	35	1
60	48	60	35	60	36
90	68	90	74	90	82
120	129	131	80	120	110
128	135			131	114

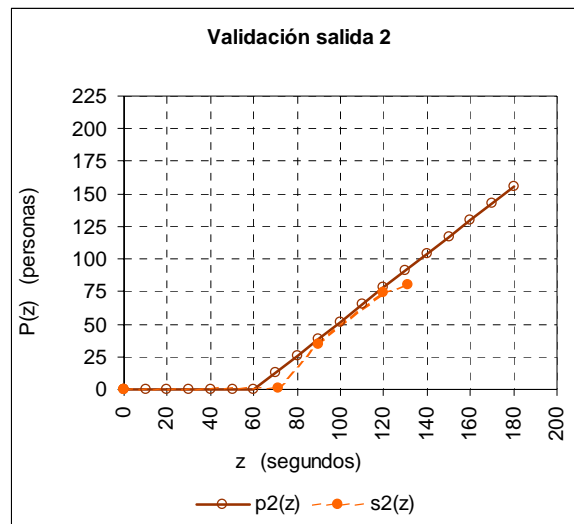
**Tabla 8.3** Resultados del proceso de verificación

En la figura 8.12 puede observarse como los tiempos de evacuación medidos coinciden razonablemente con la función de evacuación de esta salida  $p_1(z)$ , luego no existe otra posibilidad que concluir que las magnitudes de locomoción consideradas son correctas. Las discrepancias que se aprecian pueden considerarse absolutamente normales, existiendo además una coincidencia en el tiempo total de evacuación calculado para dicha salida.



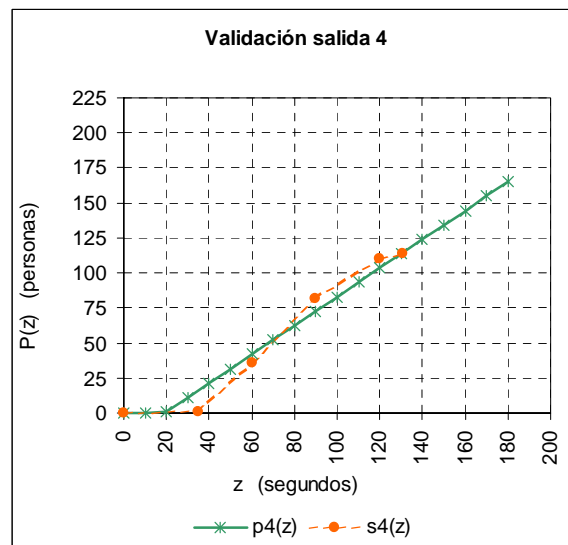
**Figura 8.12** Análisis de la función de evacuación de la salida 1

En el análisis de la salida 2, representado en la figura 8.13, se aprecia una ligera discrepancia entre las funciones  $p_2(z)$  y  $s_2(z)$ . Es posible que exista alguna diferencia entre el valor de las magnitudes de locomoción que se registran y las supuestas. Analizando las características de la vía de evacuación es posible que la diferencia pueda atribuirse a la circulación por la escalera que conduce al destino DS2. Se ha revisado el proceso de cálculo suponiendo una velocidad de circulación inferior, lo que da lugar a una asignación óptima en la cual 11 ocupantes deben utilizar otras salidas. Por ello se concluye que la diferencia resultante de efectuar dichos ajustes es poco relevante.



**Figura 8.13** Análisis de la función de evacuación de la salida 2

En la salida 4, representada en la figura 8.14, también se registra una ligera diferencia, especialmente significativa en el momento de inicio de la evacuación, que posiblemente pueda atribuirse al hecho que para abandonar el recinto deben abrirse tres puertas que disponen de barra antipánico, o bien a las características personales o de comportamiento de las personas que han utilizado la salida.



**Figura 8.14** Análisis de la función de evacuación de la salida 4

Por otro lado, los ocupantes que han participado en el simulacro de evacuación se han sometido a una encuesta que se reproduce en el anexo 2. En cuanto a la población encuestada el 62 % de las personas son mujeres, de las cuales el 45% tienen una edad comprendida entre 20 y 29 años y el 34 % de 30 a 39 años. Ningún individuo presenta algún tipo de discapacidad. El 97% de los ocupantes tiene más de un año de antigüedad en la fábrica y el 83% había participado en otros simulacros de emergencia. En el momento de producirse la señal de alarma el 84% de los trabajadores ocupaban su puesto de trabajo. Los siguientes párrafos analizan las conclusiones extraídas de la encuesta.

La organización de la evacuación de emergencia y la formación realizada ha resultado razonablemente eficaz, el 93% de los ocupantes ha seguido la ruta de evacuación que tenía asignada. No se han producido demoras en el inicio de la evacuación dado que el 100% de los ocupantes ha oído la señal de alarma, el 90 % considera adecuada la intensidad de la señal de alarma y el 66 % ha identificado que se trataba de un simulacro de evacuación, tan solo el 17 % ha pensado que se trataba de un incendio u otra emergencia real y el 73% de las personas encuestadas afirma que ha salido de la fábrica rápidamente.

Las velocidades de desplazamiento pueden ser consideradas normales dado que el 83% de los ocupantes considera que los desplazamientos han sido rápidos, en todos los casos la circulación ha sido en un solo sentido y no ha sido preciso ayudar a ninguna persona a abandonar la fábrica. El 90% afirma que ha seguido andando rápido al salir de la fábrica. Las retenciones que se han producido han sido moderadas y coinciden en cuanto a ubicación y magnitud con las previstas, justamente en las salidas.

Los aspectos organizativos durante el desarrollo de la evacuación presentan resultados más mediocres, tan solo el 66% de los ocupantes ha identificado el Coordinador de evacuación de su zona, que teóricamente debía dirigir la evacuación del recinto y efectuar el recuento en el punto de reunión, en el cual el 62% afirma que le ha sido fácil situarse y el 83 % cree que se ha efectuado correctamente el recuento.

También se utilizan los informes de los Coordinadores de evacuación para analizar la actuación de los ocupantes, en este sentido conviene observar que los Coordinadores tratan de ofrecer una perspectiva global mientras que en las encuestas las personas encuestadas tratan de expresar sus experiencias, el modelo de informe utilizado en este caso corresponde con el mostrado en el anexo 2. Se extraen las siguientes conclusiones:

Consideran que mayoritariamente se ha identificado la señal de alarma, sin embargo la reacción a la señal de alarma no ha sido inmediata, en general han preguntado a compañeros sobre lo que estaba sucediendo y se producían ciertas conversaciones, la mayoría han advertido que se trataba de un simulacro. No se han observado demoras para recoger objetos personales, el comportamiento en varias zonas ha sido dispar, en unos casos la evacuación ha sido rápida y en otros se han formado grupos. Los coordinadores consideran que ocupantes de la zona de su responsabilidad se han dirigido a la salida asignada, en varios casos han debido indicar la salida a utilizar, pero mayoritariamente se dirigían a la salida adecuada sin ningún tipo de indicación. Globalmente los desplazamientos han sido rápidos, pero algunas personas han tenido excesiva tranquilidad, en las vías de evacuación no se han observado obstáculos, de tal forma que se estima que las anchuras de paso teóricas coinciden con las reales en el momento del simulacro y en determinadas salidas se han producido ligeras retenciones. Los desplazamientos en el exterior hacia el punto de reunión se han ralentizado ligeramente, se califican simplemente como correctos. En el punto de reunión ha sido posible efectuar recuento y mayoritariamente han colaborado de forma activa.

Como conclusión cabe resaltar, que se ha mostrado un procedimiento gráfico que permite de una forma sencilla, analizar cuantitativamente la evacuación de un edificio, ob-

teniendo estimaciones del tiempo de evacuación así como la distribución de los ocupantes del mismo para un tiempo mínimo de evacuación. Deben destacarse las posibilidades del procedimiento utilizado para estudiar el efecto de cambios en la ocupación o bien en la geometría del edificio al igual que introducir factores de comportamiento.

#### 8.4 ESTUDIO DE LA EVACUACIÓN DE UN EDIFICIO ESCOLAR

Se trata estudiar la evacuación de un edificio de tres plantas en el que se desarrollan actividades educativas. En primer lugar se realiza un análisis detallado de la ocupación, cuyos valores pueden observarse en la tabla 8.4. En las columnas señaladas con “\*” se indicaría el número de personas que presentan algún tipo de discapacidad.

DEPENDENCIA	Intervalos horarios											
	8.00-8.50		8.50-9.40		9.40-10.30		11.00-11.50		11.50-12.40		12.40-13.30	
PLANTA 0	*		*		*		*		*		*	
Aula Informática	40		40						40		40	
Cafetería/ Bar	80											
Biblioteca	40		40		40		40		40		40	
Gimnasio	40		40		40		40		40		40	
Departamentos	35		35		35		35		35		35	
Secretaria	8		8		8		8		8			
Despachos	10		10		10		10		10		10	
Sala profesores	10		10		10		10		10		10	
<b>Total planta 0</b>	263		183		143		143		183		175	
PLANTA 1												
Aula 111	40		40		40		40		40		40	
Aula 112	40		40		40		40		40		40	
Aula 113	40		40		40		40		40		40	
Aula 114	40		40		40		40		40		40	
Aula 115	40		40		40		40		40		40	
Lab. ciencias					40		40					
Dep. Cienc.	15		15		15		15		15		15	
<b>Total planta 1</b>	215		215		255		255		215		215	
PLANTA 2												
Aula 121	40		40		40		40		40		40	
Aula 122	40		40		40		40		40		40	
Aula 123	40		40		40		40		40		40	
Aula 124	40		40		40		40		40		40	
Aula 125	40		40		40		40		40		40	
Aula Admva. 1	40		40		40		40		40		40	
Aula Admva. 2	20		20		20		20		20		20	
Dep Admvo	10		10		10		10		10		10	
Dep AO	5		5		5		5		5		5	
<b>Total planta 2</b>	275		275		275		275		275		275	
<b>TOTAL EDIF.</b>												

Tabla 8.4 Ocupación edificio escolar



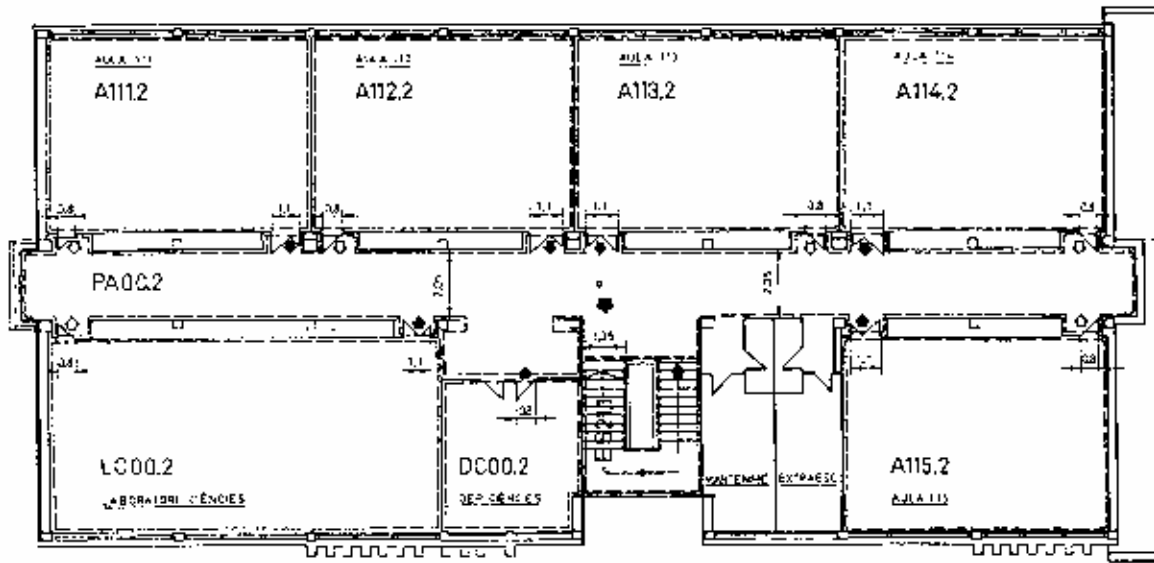


Figura 8.16 Edificio escolar planta 2

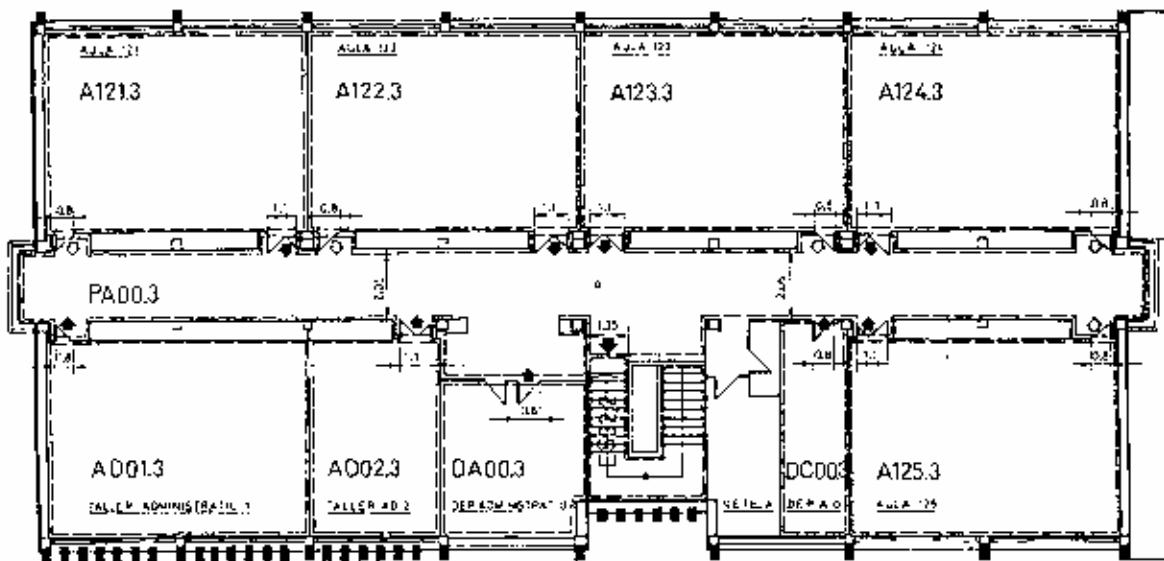


Figura 8.17 Edificio escolar planta 3

#### 8.4.1 Análisis de los factores que caracterizan el sistema de evacuación

Se trata del estudio de la evacuación de un edificio de tres plantas cuya altura de evacuación es de 10 metros, la planta baja tiene una superficie de 1160 m<sup>2</sup> y la primera y segunda planta 690 metros cuadrados cada una de ellas. Las plantas tienen forma rectangular, existe un pasillo longitudinal en el centro de las mismas, a ambos lados de forma totalmente geométrica se sitúan las dependencias constituyendo dicho pasillo una única vía de evacuación que conduce a una escalera situada en el centro del pasillo.

La evacuación entre plantas se realiza por la escalera que está formada por dos tramos rectos y una meseta, la escalera tiene una anchura mínima de paso de 2,05 metros y so-



lamente dispone de resguardos en la cara interior, los escalones se consideran de medida estándar, y la rugosidad tanto de las paredes interiores como exteriores hace que se deba considerar de forma estricta el concepto de ancho efectivo. La escalera comunica directamente las tres plantas sin ningún tipo de cierre ni compartimentación, y desemboca en un hall de salida de la planta baja desde el cual se accede al exterior. Por efecto de tiro, los humos de la planta baja fácilmente pueden llegar a la segunda planta.

Las salidas de cada una de las plantas y del edificio desde la planta baja están señalizadas, por lo que no resulta previsible ralentización alguna en los desplazamientos debido a esta causa. El estudio se realiza en condiciones de alumbrado normal, aunque sería conveniente verificar las condiciones de alumbrado de la vía de evacuación y ajustar las magnitudes de locomoción a dichas circunstancias.

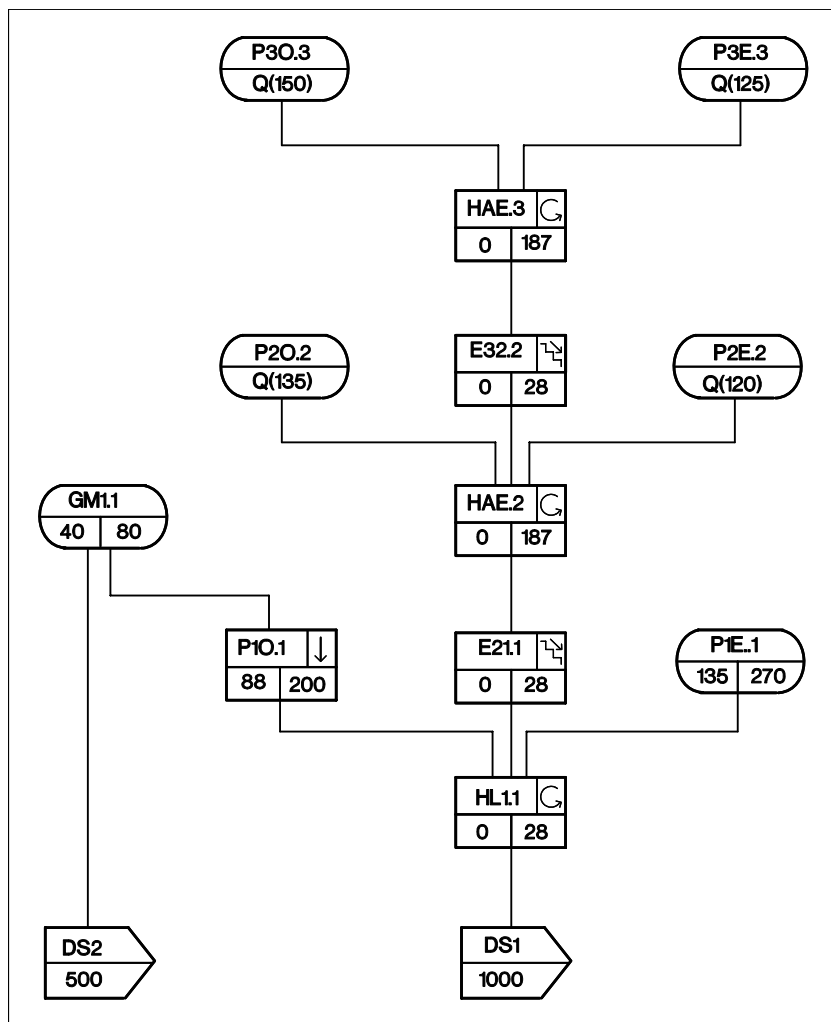
Los **factores ambientales** son poco relevantes, se trata de un edificio de utilización docente, no existiendo materiales ni procesos que aporten condiciones especiales de riesgo. Los recintos destinados a laboratorios no contienen cantidades de materiales especialmente peligrosos. Lo más significativo son los locales técnicos de la planta baja que se hallan debidamente compartimentados en recintos resistentes al fuego, por lo cual aunque la escalera no sea un recinto aislado en cuanto a este apartado se refiere, no se consideran cambios ni correcciones respecto las magnitudes de locomoción debidas a la existencia de humo, gases tóxicos, calor o fenómenos radiantes.

La ocupación total prevista es de 793 personas, en principio no se contempla la existencia de ocupantes que presenten alguna discapacidad, en caso de presentarse dicha circunstancia el problema sería considerable dada la existencia de una única vía de circulación y que además se trata de una escalera. Al ser un edificio de enseñanza media la edad de los ocupantes está comprendida entre los 12 y los 20 años, por ello se considera el estándar de personas adultas. Las magnitudes de ocupación y las de locomoción se obtienen a partir de las tablas de Fruins. A priori se pronostican circulaciones densas con un nivel de servicio E, se considera una velocidad de circulación en los pasillos de 45 metros por minuto y en las escaleras de 30 metros por minuto. En cuanto a las retenciones, dado que la mayor parte de los ocupantes son personas jóvenes, se consideran admisibles densidades de ocupación tipificadas en el modelo de Fruins como nivel D. Debe considerarse que en una evacuación de emergencia real las velocidades de evacuación posiblemente fueran ligeramente mayores, pero en simulacros de evacuación las velocidades que realmente se producen son inferiores.

Respecto **la conducta**, se considera que se trata de un edificio ocupado siempre por las mismas personas, por ello no puede formularse otra hipótesis que la de un buen conocimiento del edificio. La estructura social de un grupo de personas en un recinto escolar formado por alumnos con sus respectivos profesores hace que en el momento de producirse una señal de alarma la tendencia sea abandonar la dependencia que se ocupa para dirigirse al punto de reunión, la dificultad puede estar en que los profesores o personas responsables de cada grupo no pudieran mantener la calma para realizar una evacuación perfectamente ordenada. En los centros escolares periódicamente se realizan simulacros de evacuación, además no se prevén demoras al recibir la señal de alarma, esperándose que la totalidad de los ocupantes se dirijan a las vías de evacuación. Debe destacarse que los centros escolares disponen de un “plan de emergencia” que establece las directrices básicas de actuación y se ha realizado una labor formativa que detalla actuaciones básicas en evacuaciones de emergencia y la ubicación del punto de reunión.

### 8.4.2 Solución del problema

Para la solución del problema se va a utilizar la aplicación EXITE con algunas particularidades, la primera de ellas va a consistir en modelar las incorporaciones a la red de los ocupantes de las plantas 2 y 3. No tiene demasiado sentido considerar cada una de las dependencias de la planta como un solo nodo y los consiguientes arcos que comunican dicha dependencia con el pasillo que da acceso a la escalera. Lo que se realiza consiste en modelar la incorporación de cada una de las aulas al pasillo central de cada una de las alas de la planta, y desde el mismo al vestíbulo que comunica cada una de las plantas con la escalera. Operar de esta forma simplifica sustancialmente el problema y a su vez permite realizar un análisis más preciso de las incorporaciones. Se aplican los principios establecidos en el apartado 3.8 en el que se describe el modelado de incorporaciones a una salida. En la figura 8.18 puede observarse la red estática que resulta del modelado de las incorporaciones así como de la agrupación de dependencias contiguas en la planta baja.

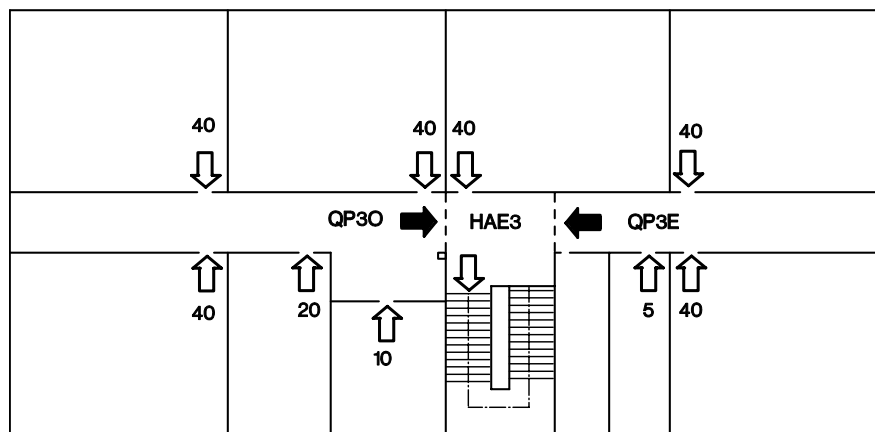


**Figura 8.18** Red estática de flujo edificio escolar

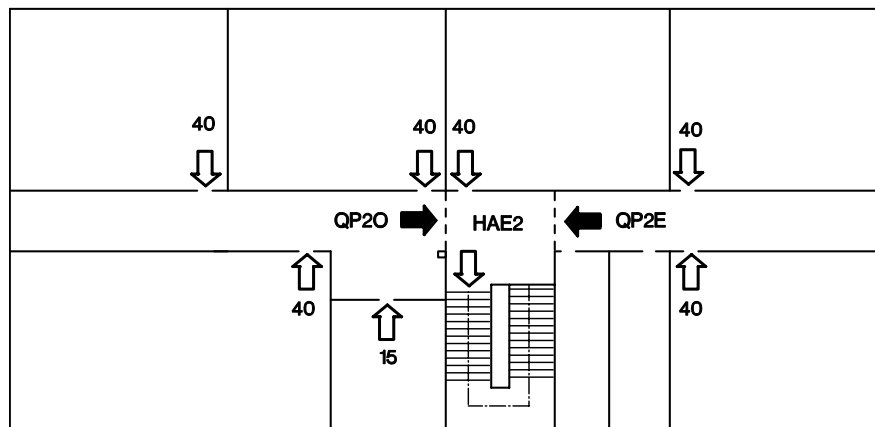
Para exponer el modelado de las incorporaciones a la red se utiliza la representación de la figura 8.19. En la tercera planta puede observarse como los ocupantes de cada una de las aulas acceden al pasillo central de la misma y las dos alas confluyen en el hall que da acceso a la escalera, el acceso de las aulas al pasillo resulta evidente que no condi-

ciona en absoluto el proceso de evacuación. El acceso al pasillo supone que se desarrolla por una anchura total de unos 9 metros mientras que la salida hacia la escalera se realiza por una anchura de 2,05 metros, entonces necesariamente los pasillos de planta van a ser unos puntos de gran ocupación que pueden razonablemente considerarse como puntos origen de evacuación. Si existiera alguna duda sobre el desarrollo de este proceso debería modelarse la circulación desde las aulas hasta el pasillo considerando el hall destino de evacuación y el perfil de evacuación del hall se correspondería con la función de incorporaciones a la red.

TERCERA PLANTA



SEGUNDA PLANTA



**Figura 8.19** Modelado de las incorporaciones a la red

Las funciones que se obtienen son las siguientes:

$$QP3O(I) = ( 0, 23, 26, 46, 27, 26, 2, 0 )$$

$$QP3E(I) = ( 0, 18, 39, 39, 27, 2, 0, 0 )$$

$$QP2O(I) = ( 0, 26, 28, 39, 27, 14, 1, 0, 0 )$$

$$QP2E(I) = ( 0, 13, 13, 39, 27, 26, 2, 0 )$$

Definidas estas funciones, el proceso sigue entrando los datos de los nodos en la aplicación EXITE, resulta la tabla de la figura 8.20. En ella se han introducido los valores correspondientes a las ocupaciones, superficies útiles de cada dependencia y las máximas densidades de ocupación posibles considerando las características personales de los ocupantes. No se considera que existan demoras en el inicio de la evacuación.

Los datos se han organizado en recintos origen, vía 1, vía 2 y destinos de evacuación. Debe observarse la particularidad que la segunda vía de evacuación no consta de ninguna dependencia dado que conduce directamente al destino DS2.

EXITE3 VALOR NODOS CASO E1							
Periodo	10 seg.						
RECINTOS	P30.3	P3E.3	P20.3	P2E.3	P10.3	P1E.3	GM1.1
Ocup. inicial ( Pers.)	150	125	135	120	88	135	40
Superficie u. ( m <sup>2</sup> )	46,5	46,5	46,5	46,5	70	29	62,5
Max.dens.oc. ( Pers./m <sup>2</sup> )	2	2	2	2	2	2	2
Capacidad ( Pers.)	93	93	93	93	140	58	125
Demora ( Periodos )	0	0	0	0	0	0	0
VIA 1	HAE.3	ES32.2	HAE.2	E21.1	HL1.1	TOTAL	
Ocup. inicial ( Pers.)	0	0	0	0	0	0	
Superficie u. ( m <sup>2</sup> )	20	14	20	14	34	102	
Max.dens.oc. ( Pers./m <sup>2</sup> )	4,35	2	4,35	2	3		
Capacidad ( Pers.)	87	28	87	28	102	332	
Demora ( Periodos )	0	0	0	0	0	0	
VIA 2							
Ocup. inicial ( Pers.)							
Superficie u. ( m <sup>2</sup> )							
Max.dens.oc. ( Pers./m <sup>2</sup> )							
Capacidad ( Pers.)							
DESTINOS	DS1	DS2	TOTAL				
Ocup. inicial ( Pers.)	0	0	0				
Superficie u. ( m <sup>2</sup> )	400	200	600				
Max.dens.oc. ( Pers./m <sup>2</sup> )	2,5	2,5					
Capacidad ( Pers.)	1000	500	1500				

Figura 8.20 Modelado de la red: Entrada de datos de los nodos

De forma similar al trabajo realizado para los nodos, el proceso sigue introduciendo los valores característicos de los arcos, en ellos las magnitudes características son las anchuras efectivas de paso, la longitud de los recorridos, las velocidades y los flujos específicos de circulación. Los resultados son flujos expresados en personas por periodo y tiempos de circulación también expresados en periodos. Los datos correspondientes a las vías de evacuación se hallan estructurados en plantas, vía 1 y vía 2. Pueden observarse en la tabla de la figura 8.21

EXITE3 VALOR ARCOS			CASO E1			
<b>PLANTA 3</b>	<b>origen destino</b>	<b>P3O.3</b> <b>HAE.3</b>	<b>P3E.3</b> <b>HAE.3</b>			
Ancho efectivo mínimo ( m )		2,05	2,05			
Recorrido ( m )		12,00	12,00			
Velocidad ( m / min )		73,15	73,15			
Flujo espec. ( Pers./ m min )		41,01	41,01			
Flujo ( Pers./ periodo )		14,00	14,00			
Circulación ( Periodos )		1,00	1,00			
<b>PLANTA 2</b>	<b>origen destino</b>	<b>P2O.2</b> <b>HAE.3</b>	<b>P2E.2</b> <b>HAE.3</b>			
Ancho efectivo mínimo ( m )		2,05	2,05			
Recorrido ( m )		12,00	12,00			
Velocidad ( m / min )		73,15	73,15			
Flujo espec. ( Pers./ m min )		41,01	41,01			
Flujo ( Pers./ periodo )		14,00	14,00			
Circulación ( Periodos )		1,00	1,00			
<b>PLANTA 1</b>	<b>origen destino</b>	<b>GM1.1</b> <b>DS2</b>	<b>P1O.2</b> <b>HAE.3</b>	<b>P1E.2</b> <b>HAE.3</b>		
Ancho efectivo mínimo ( m )		1,40	2,05	2,05		
Recorrido ( m )		14,00	12,00	15,00		
Velocidad ( m / min )		73,15	73,15	73,15		
Flujo espec. ( Pers./ m min )		41,01	41,01	41,01		
Flujo ( Pers./ periodo )		10,00	14,00	14,00		
Circulación ( Periodos )		1,00	1,00	1,00		
<b>VIA 1</b>	<b>origen destino</b>	<b>HAE.3</b> <b>ES32.2</b>	<b>ES32.2</b> <b>HAE.2</b>	<b>HAE.2</b> <b>E21.1</b>	<b>E21.1</b> <b>HL1.1</b>	<b>HL1.1</b> <b>DS1</b>
Ancho efectivo mínimo ( m )		1,35	1,35	1,35	1,35	4,00
Recorrido ( m )		8,00	8,00	8,00	8,00	10,00
Velocidad ( m / min )		65,53	65,53	65,53	65,53	65,53
Flujo espec. ( Pers./ m min )		57,42	57,42	57,42	57,42	57,42
Flujo ( Pers./ periodo )		13,00	13,00	13,00	13,00	38,00
Circulación ( Periodos )		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>VIA 2</b>	<b>origen destino</b>	<b>GM1.1</b> <b>DS2</b>				
Ancho efectivo mínimo ( m )		1,40				
Recorrido ( m )		14,00				
Velocidad ( m / min )		73,15				
Flujo espec. ( Pers./ m min )		41,01				
Flujo ( Pers./ periodo )		10,00				
Circulación ( Periodos )		1,00				

Figura 8.21 Modelado de la red: Entrada datos de los arcos

Una vez introducidos los datos se determina el tiempo de evacuación de cada una de las dependencias, resultando los valores mostrados en la figura 8.22. Ciertamente en este caso podría considerarse una situación irrelevante, de entrada es obvio que el mayor tiempo de evacuación corresponderá a la tercera planta, es la más alejada a la salida y con mayor ocupación. Según puede observarse en la representación de la red estática, la evacuación del gimnasio se realiza íntegramente hacia el destino DS2.

EXITE3 EVACUACIÓN DEPENDENCIAS ORIGEN		CASO E1					
DESTINOS	DEPENDENCIAS ORIGEN						
	P3O	P3E	P2O	P2E	P1O	P1E	GM1
Ocupación	150	125	135	120	88	135	40
DS1	150	125	135	120	88	135	0
DS2							40
Tiempo ev. (periodos)							

Figura 8.22 Primera fase del proceso de resolución

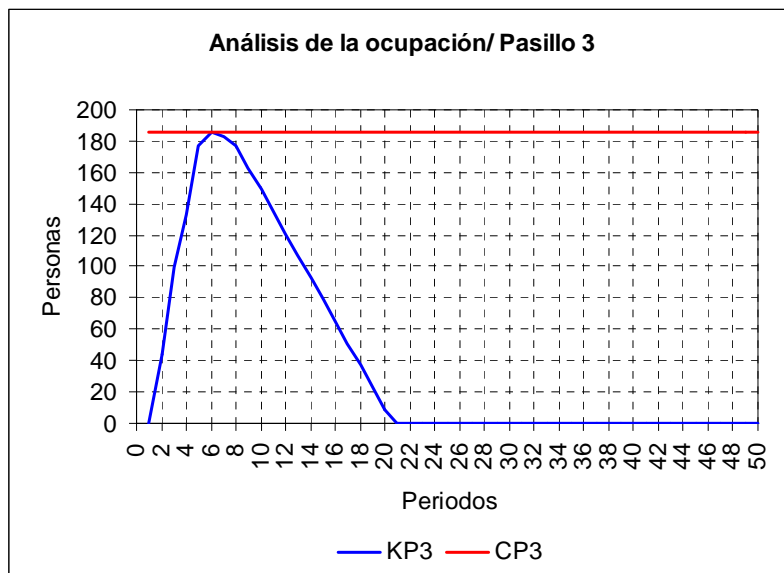
En principio se opta por una evacuación óptima, si bien podría efectuarse la evacuación de cada una de las plantas, por ejemplo podría tener prioridad la evacuación de la planta 3 o bien la 2.

EXITE3			RESULTADOS			CASO E1		
TIEMPOS EVACUACIÓN			calculados ( segundos )	teóricos sin retención ( segundos )	factor congestión			
Planta 3			200	50	4,00			
Planta 2			380	70	5,43			
Planta 1			420	90	4,67			
EDIFICIO			430	110	3,91			
			Tiempo evacuación ( segundos )	Número personas evacuadas ( Pers./ periodo )				
Valor medio			181	18.4				
RETENCIONES								
Ubicación		Periodo		intervalo		Máxima	Magnitud	
Origen	Destino	inicio ( segundos )	fin ( segundos )	( s )	%	( Pers.)	( Pers.)	
E21	HL1	35	105	70		141	22	
GM1	DS2	5	25	20		18	2	
HAE3	E32	3	30	27		160	235	
HAE2	E21	3	40	37		187	675	
ANÁLISIS DESTINOS EVACUACIÓN								
		Capacidad ( Pers.)	Utilización ( Pers.)	% utiliz.	% capac.			
DS1		1000	753	94,96	75,30			
DS2		500	40	5,04	8,00			
TOTAL		1500	793					

Figura 8.23 Análisis de resultados

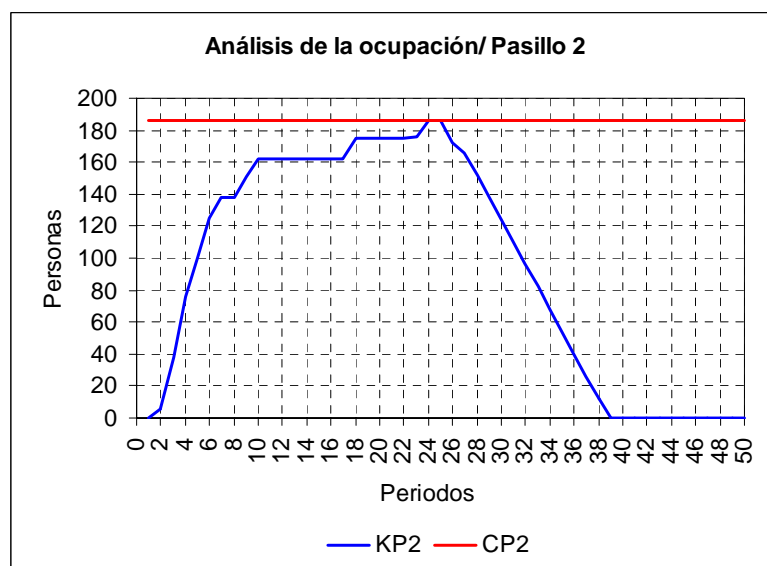
Tal como muestra la figura 8.23, el tiempo necesario para abandonar la tercera planta es de 200 segundos, la segunda 380 y la primera 420. Se observa que la evacuación del edificio resulta absolutamente condicionada por la anchura de la escalera, resultando especialmente críticos el acceso a la misma desde la tercera y la segunda planta. Al estudiar las retenciones se observa que el acceso a la escalera desde la segunda planta es de 25 periodos, o sea 250 segundos, se trata de un valor elevado dado que la escalera es un recinto que no dispone de ningún tipo de compartimentación y esta vía de evacuación única podría verse afectada por cualquier incidente en el edificio que generara humo.

El tiempo de evacuación no resulta afectado por la anchura de las puertas de salida de las aulas, debido a las retenciones que se producen en la segunda y la tercera planta, pocos segundos después de iniciarse la evacuación existen un número importante de personas que si pudieran circularían por la escalera, la ocupación de dichos pasillos puede observarse en las figuras 8. 24 y 8.25. Por su parte la salida desde el hall de la planta baja hasta el destino solamente aprovecha su capacidad cuando se produce simultáneamente la evacuación de la planta baja y el resto de plantas. Al juntarse ambos flujos de salida algunos instantes se produce una ligera retención.

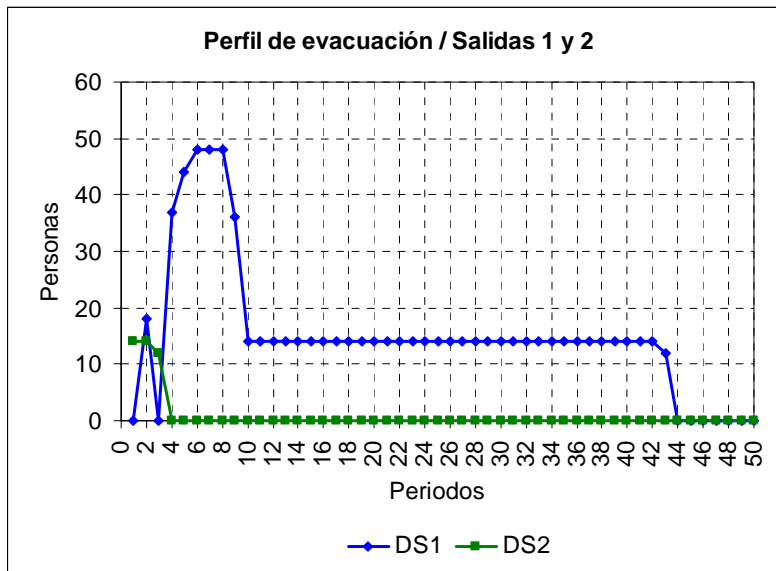


**Figura 8.24** Análisis de resultados: ocupación pasillo tercera planta

Analizando las figuras 8.24 y 8.25 puede observarse como la ocupación de los pasillos de las plantas 2 y 3 aumenta rápidamente, no puede ser de otra manera dada la capacidad de acceso que existe hacia los mismos. La salida viene condicionada por la capacidad de la escalera. En ambos pasillos puede apreciarse que durante unos instantes alcanzan su capacidad, en el tiempo que el pasillo estuviera completamente ocupado sería imposible la salida de las aulas y podría constituir una situación angustiosa para las personas que debieran permanecer en las mismas.

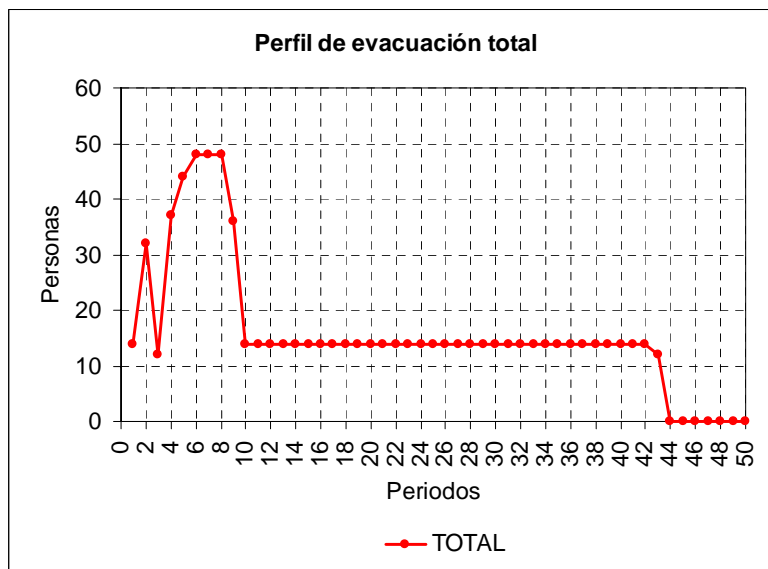


**Figura 8.25** Análisis de resultados: ocupación pasillo segunda planta



**Figura 8.26** Análisis de resultados: Perfil de evacuación registrado salidas 1 y 2

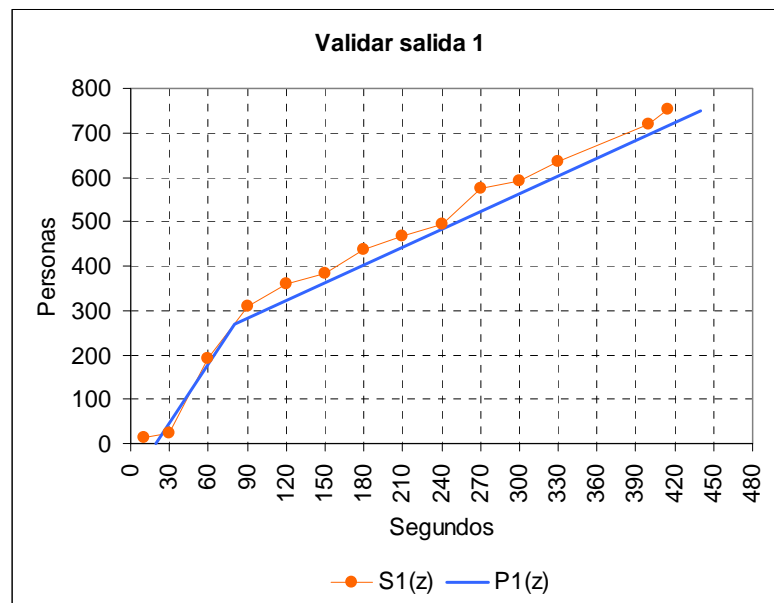
Mediante los gráficos correspondientes a la representación del perfil de evacuación, es posible analizar las salidas que se registran. En la figura 8.26 pueden apreciarse las salidas que se registran en las salidas 1 y 2, mientras que en la figura 8.27, se visualiza periodo a periodo el número total de personas que han abandonado el edificio.



**Figura 8.27** Análisis de resultados: Perfil de evacuación total

A continuación se lleva a cabo el proceso de validación de los resultados, en primer lugar se observa en la figura 8.28 que guardando un cierto paralelismo los puntos de registro de las salidas están situados encima de la función de evacuación teórica lo que puede dar lugar a pensar que la velocidad de circulación y los flujos son superiores a los considerados en el modelo.





**Figura 8.28** Verificación del modelo

Dada la problemática que presenta el edificio se realizan diferentes hipótesis con el fin de determinar las soluciones que resulten más viables.

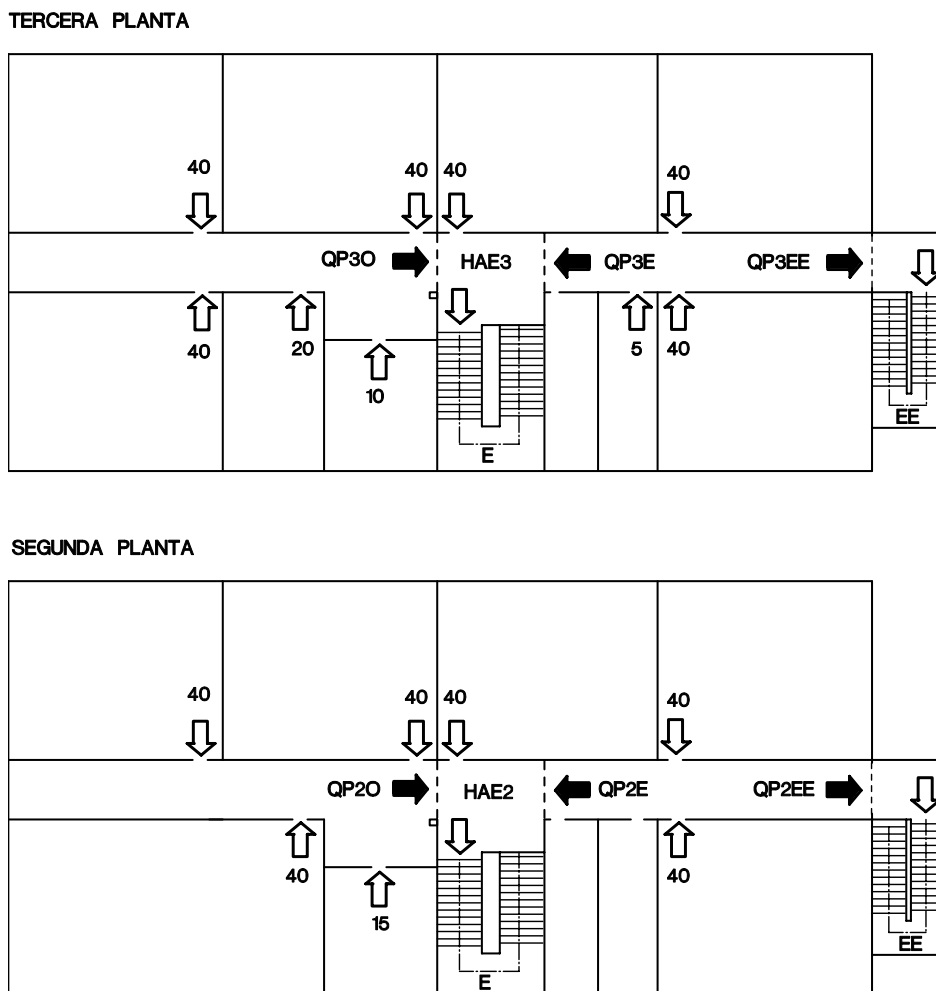
**Primera situación.** Todo parece indicar que el problema fundamental de la evacuación de este edificio viene determinado por la anchura de la escalera. Es por ello que debe analizarse la incidencia de incrementar la anchura de la misma, concretamente analizando la evacuación si la anchura de la escalera fuera de 2,80 metros, el tiempo de evacuación se reduce a 240 segundos, el tiempo medio de evacuación es de 120 segundos y abandonan el edificio 33 personas cada periodo, el factor de congestión se ha reducido a 2,2 y el tiempo necesario para desalojar cada planta es de 100, 190 y 230 segundos respectivamente. Sin lugar a dudas es una solución, pero en un edificio construido, como es el caso que nos ocupa, implica realizar obras inviables.

**Segunda situación.** Se trata de suponer en el modelo que la circulación en las escaleras, manteniendo la misma capacidad la circulación, es más rápida. A esta situación podría contribuir el organizar la evacuación de forma que el movimiento de los ocupantes se desarrollara con la máxima rapidez. Aplicando dicha hipótesis resulta un tiempo de evacuación de 390 segundos, tan solo supone reducir 30 segundos respecto la situación planteada inicialmente, el tiempo medio de evacuación es de 168 segundos y abandonarían el edificio 19,3 personas cada periodo, el coeficiente de congestión sería de 5.9 y el tiempo necesario para abandonar cada planta de 200, 380 y 400 segundos. Al aumentar la velocidad de desplazamiento se incrementa la retención en la planta 2. Puede concluirse que en este caso no resulta relevante la velocidad de desplazamiento de los ocupantes que se haya considerado.

**Tercera situación.** La salida hacia el destino 1 está formada por dos puertas que cada una de ellas aporta un capacidad de paso de 24 personas por periodo, la situación que se plantea consiste en suponer que solamente se utilizara una de ellas. Se trata pues de contemplar la hipótesis del bloqueo de una puerta de salida. En este caso el tiempo de

evacuación sería de 6,8 minutos, lo que supondría un tiempo medio de evacuación de 187 segundos y tan solo en promedio abandonarían el edificio 18,3 personas, siendo el tiempo necesario para abandonar cada planta de 240, 380 y 400 segundos. En conclusión sería una situación realmente grave para el edificio. Debe concluirse que siempre que hubiera una evacuación de emergencia debería habilitarse la salida hasta el DS1 en condiciones de máxima capacidad.

**Cuarta situación.** Finalmente se contempla la instalación de una escalera de emergencia en el extremo del ala este de una anchura de 1,10 metros, lo que da lugar a una anchura efectiva de paso de 1 metro. Puede observarse en la figura 8.29 el modelado de incorporaciones a la red que resulta al considerar la instalación de dicha escalera.



**Figura 8.29** Verificación del modelo

Los valores de las incorporaciones a la red del ala oeste es el mismo que el analizado en el primer caso, mientras que los valores a que da lugar el modelado de incorporaciones a las escaleras desde el ala este son los siguientes:

$$QP3E(I) = ( 0, 18, 39, 39, 27, 2, 0, 0 )$$

$$QP3EE(I) = ( 0, 31, 26, 39, 15, 3, 1, 0 )$$

$$QP2E(I) = ( 0 ,13 ,13 ,39 ,27 ,26 ,2, 0 )$$

$$QP2EE(I) = ( 0 ,13 ,13 ,26 ,14 ,13 ,1, 0 )$$

La existencia en la segunda y en la tercera planta de dos salidas traerá consigo una distribución de los ocupantes de la planta entre las dos escaleras. Según puede observarse en la figura 8.30 la solución empieza determinando la distribución y los tiempos de evacuación de cada una de las dependencias ocupadas.

EXITE3 EVACUACIÓN DEPENDENCIAS ORIGEN CASO E4							
DESTINOS	DEPENDENCIAS ORIGEN						
	P3O	P3E	P2O	P2E	P1O	P1E	GM1
Ocupación	150	125	135	120	88	135	40
DS1	150	6	135	47	88	135	0
DS2							40
DS3		119		73			
Tiempo ev. (periodos)	14	13	12	11	9	10	8

Figura 8.30 Primera fase del proceso de resolución

En la representación de la red estática pueden observarse las principales magnitudes que definen este caso que se representa en 8.31. Esta situación supone introducir un nuevo destino al problema, se trata de DS3 con una capacidad de 1000 personas.

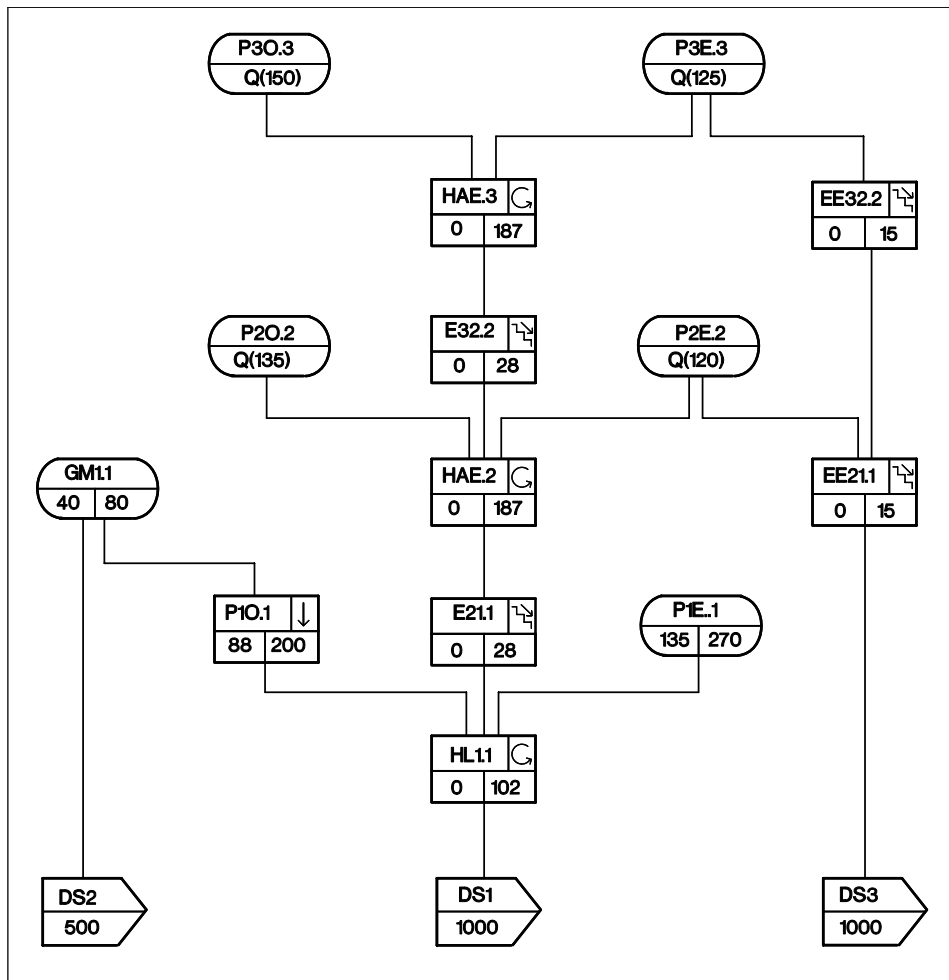


Figura 8.31 Red estática de flujo edificio escolar con salida emergencia

En 8.32 se presenta la tabla de resultados.

EXITE3 RESULTADOS				CASO E4			
TIEMPOS EVACUACIÓN		calculados ( segundos )	teóricos sin retención ( segundos )	factor congestión			
Planta 3		200	50	4,00			
Planta 2		270	70	3,86			
Planta 1		290	90	3,22			
EDIFICIO		300	110	2,73			
		Tiempo evacuación ( segundos )	Número personas evacuadas ( Pers./ periodo )				
Valor medio		127	15,3				
RETENCIONES							
Ubicación		Periodo		intervalo		Máxima	Magnitud
Origen	Destino	inicio ( segundos )	fin ( segundos )	( s )	%	( Pers.)	( Pers.)
E21	HL1			230			244
GM1	DS2			20			2
EE21	DS03			25			235
HL1	DS01			5			15
AE2	E21			26			92
WE2	EE21			2			53
ANÁLISIS DESTINOS EVACUACIÓN							
		Capacidad ( Pers.)	Utilización ( Pers.)	% utiliz.	% capac.		
DS1		1000	561	70,74	56,10		
DS2		500	40	5,04	8,00		
DS3		500	192	24,21	38,40		
TOTAL		2000	793				

Figura 8.32 Análisis de los resultados de la cuarta situación

Se observa como el tiempo de evacuación ha disminuido espectacularmente, la evacuación del edificio se reduce a 300 segundos, con ello puede observarse que resultará muy favorable la construcción de la escalera de emergencia que se propone en este caso. Debe ponerse especial atención en la organización de la evacuación en la segunda y en la tercera planta, puede observarse en las figuras 8.33 y 8.34.

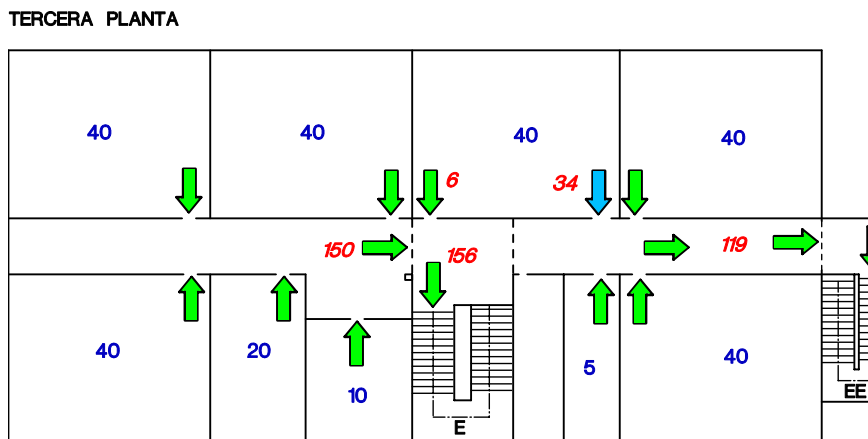
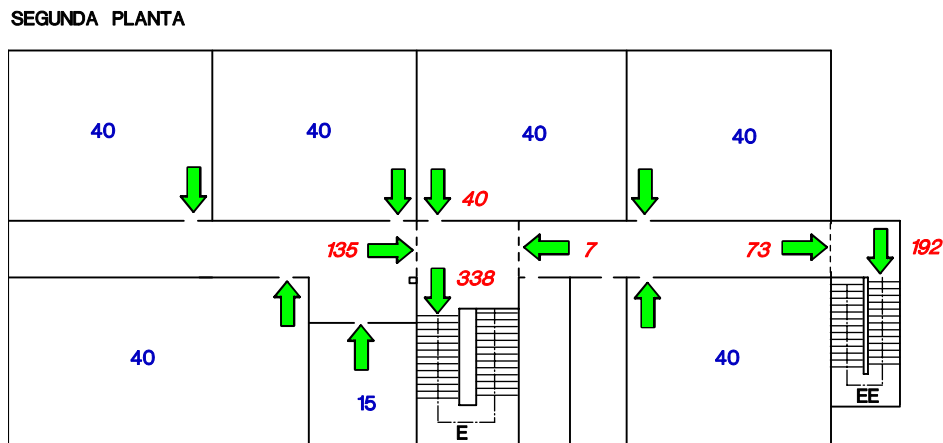


Figura 8.33 Distribución óptima de la tercera planta



**Figura 8.34** Distribución óptima de la segunda planta

Para organizar una evacuación de emergencia con las máximas garantías deberá disponerse de dos Coordinadores de evacuación por planta, que distribuyeran de forma adecuada los ocupantes de la misma y garantizaran que nadie permaneciera en las dependencias que no están habitualmente ocupadas. Finalmente, en estas líneas se concluye este análisis, sin embargo mediante los diagramas de ocupación y del perfil de evacuación podrían conocerse más detalles de esta situación.

Para mostrar el desarrollo completo del problema de la evacuación de este edificio escolar debe conocerse la organización de los ocupantes en el punto de reunión. En la situación que se presenta en la tabla 8.35, la distribución se realiza por alas de planta, normalmente la distribución en un edificio escolar debería realizarse por grupos naturales de actividad.

PUNTO DE REUNIÓN: Cálculo de la superficie requerida					
Ocupación	2,5	( Pers./m <sup>2</sup> )			
Ancho pasillo	10	( m )			
Separación grupos	2	( m )			
SECCIÓN	Número ocupantes	Sup.ocup. ( m <sup>2</sup> )	Long. Pas. ( m )	Separación secciones ( m )	Distancia origen ( m )
PLATA 3 ALA OESTE	150	60,00	6,00	2,00	8,00
PLATA 3 ALA ESTE	125	50,00	5,00	2,00	15,00
PLATA 2 ALA OESTE	135	54,00	5,40	2,00	22,40
PLATA 2 ALA ESTE	120	48,00	4,80	2,00	29,20
PLATA 1 ALA OESTE	80	32,00	3,20	2,00	34,40
PLATA 1 ALA ESTE	143	57,20	5,72	2,00	42,12
GIMNASIO	40	16,00	1,60	2,00	45,72
<b>TOTAL</b>	<b>793</b>		<b>31,72</b>	<b>14,00</b>	<b>45,72</b>

**Figura 8.35** Diseño del punto del reunión

Como conclusión final y del análisis que aporta la seguridad contra incendios, se observa que al carecer la escalera principal de un sistema adecuado de ventilación y ser la única vía de evacuación, si se produjeran humos en la planta baja se podría obstaculizar la circulación por la escalera por lo cual la solución de la escalera de emergencia resulta realmente adecuada, se considera que supondría una buena solución para el problema. Sin embargo todavía quedaría por resolver la problemática de personas que presentaran algún tipo de discapacidad, en este caso inevitablemente la solución pasaría por disponer de un medio mecánico de evacuación en el extremo de la otra ala del edificio.

## CAPITULO 9: APORTACIONES, CONCLUSIONES FINALES Y PROPUESTAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

### 9.1 APORTACIONES REALIZADAS

Labor imprescindible en el desarrollo de toda tesis resulta la recopilación de información sobre los principales aspectos que comprende el problema estudiado, en este caso, la evacuación de edificios. El resultado de dicha recopilación, desarrollado en el capítulo 2, constituye el estado del arte del problema. Tal y como puede observarse se ha realizado una exhaustiva recopilación de información, al tiempo que se han clasificado los documentos en grandes familias o apartados, además se ha formulado una descripción detallada de algunos de los modelos utilizados en el estudio del movimiento de las personas así como del cálculo de magnitudes que caracterizan la evacuación de los edificios. Así mismo, se han analizado las aportaciones de la investigación operativa a la solución del problema y se ha efectuado una amplia referencia de las herramientas que proporciona la simulación, también se ofrece un esbozo de alguno de los planteamientos que se realizan del problema desde las ciencias de comportamiento, y finalmente se hace referencia expresa a las publicaciones de destacados centros de investigación.

En el capítulo 3 se han llevado a cabo varias aportaciones, en primer lugar se ha caracterizado el concepto de **sistema de evacuación**, se han determinado los factores que definen el problema y se ha planteado una solución estructurada en tres fases: La solución del problema de la evacuación de un recinto, la solución de la evacuación del edificio y la validación de los resultados. Un elemento fundamental para obtener la solución del problema parte de estimar correctamente la **función de evacuación**, cuya formulación se realiza a partir de la propuesta realizada por K.Togawa, en la cual las velocidades y los flujos son función de la densidad de ocupación. Con posterioridad, aspectos más concretos de la locomoción humana fueron definidos en los modelos de Predtechenskii & Milinskii basándose en la tasa de ocupación. A partir de estas dos propuestas se modelan flujos de circulación, se estudian confluencias, ramificaciones y retenciones. También se realiza una propuesta para incorporar en un modelo analítico determinados aspectos de comportamiento y poder estimar de forma más precisa las principales magnitudes de locomoción que generan los individuos afectados por el problema, todo ello se ha definido como el **modelado de incorporaciones a la red**. Finalmente se aporta un análisis de las magnitudes y de las representaciones gráficas que proporcionan la información necesaria para tener un conocimiento profundo del problema y facilitar la toma de decisiones.

Las aportaciones del capítulo 4 tienen lugar directamente sobre la solución del problema de la evacuación del recinto, para analizarlas se recurre a un análisis cronológico de

los hechos. Después de utilizarse en numerosas ocasiones el procedimiento gráfico del profesor R. L. Francis, se pensó en la posibilidad de sistematizar la elaboración de las gráficas que utiliza, durante algún tiempo así se hizo, posteriormente se observó que era posible sistematizar este proceso de resolución y se efectuó una **implantación de dicho procedimiento** para su utilización mediante herramientas informáticas estándar. En una fase posterior se observó que el modelo original del profesor Francis impone la condición que la función de evacuación de cada salida  $j$  sea una función estrictamente creciente  $t_j(x_j) \geq 0$  y  $t_j(0) = 0$  si  $x_j = 0$ , lo que supone una restricción muy severa que limita notablemente el problema, cuando la realidad es que en la mayoría de las situaciones los ocupantes que se dirigen a una salida deben efectuar un determinado recorrido. De la misma forma, a partir del análisis de los factores que caracterizan el problema, se ha observado que son frecuentes las demoras en el inicio de la evacuación, ello requiere incorporar una nueva constante en la función de evacuación. Para resolver estas situaciones en las que consideran recorridos y demoras en el inicio de la evacuación se ha realizado una **generalización de la aplicación**, resultando un procedimiento mucho más realista aplicable a muchas más situaciones que en su versión inicial.

Otras aportaciones realizadas en el capítulo cuatro son la **utilización de diferentes modelos de locomoción** así como la **solución analítica del problema**. En el modelo inicial para obtener las funciones de evacuación se estiman los flujos de salida a partir de un pronóstico de la densidad de ocupación que se va a producir en la salida, a partir de estos valores se obtiene la asignación óptima  $x_j$  de cada salida. Puede observarse que el resultado del problema viene condicionado por los valores de los flujos que inicialmente se han determinado, por lo que incorporando funciones que relacionen directamente las variables que intervienen en el problema se evita establecer las condiciones iniciales. La solución se obtiene a partir de las ecuaciones de Nelson&McLennan, ello permite prescindir de las suposiciones previas en las velocidades y los flujos de circulación de las salidas, las funciones de evacuación son función del número de personas  $x_j$  que las utilizan y de las características geométricas del recinto. La consideración de los recorridos de evacuación y la utilización de las ecuaciones de Nelson&McLennan supone cambios notables en la forma de las funciones de evacuación  $t_j(x_j)$  y en las funciones de evacuación inversas  $p_j(z)$ , por lo que ha sido preciso realizar una compleja adaptación de los procedimientos de resolución iniciales. Finalmente se ha **desarrollado una heurística** para la solución del problema de la evacuación de un recinto que ofrece estimaciones del tiempo de evacuación y distribuciones óptimas de una forma razonablemente eficaz. Dicha heurística ha sido adecuadamente contrastada y probada en recintos de hasta 8.000 ocupantes. Realmente evita la laboriosa solución analítica y proporciona la solución del problema. El interés de la solución analítica, además de su valor formal, radica en su utilidad para resolver el problema de las distribuciones óptimas en las confluencias en la red dinámica.

El capítulo 5 muestra la necesidad de sistematizar la representación de los edificios desde la perspectiva de sus condiciones de evacuación, en él se aporta una **nueva definición de red**. Las redes de flujo clásicas sitúan los nodos en el centro de las dependen-



cias, lo que puede considerarse su posición natural, sin embargo relajar esta forma de operar para trazar la red, ubicando los nodos en la situación que cumpla los objetivos de la modelización, se ha observado que resulta muy favorable en la representación de un edificio si se opera de la forma adecuada, especialmente cuando los flujos de circulación se producen en un solo sentido. Mediante esta forma de representación es posible tener un mejor conocimiento del proceso de evacuación. También se considera el modelado de incorporaciones a la red, tiempos de circulación variables y se efectúa un análisis dinámico las confluencias y de las ramificaciones. Todas estas aportaciones permiten realizar un estudio más preciso del problema.

En este mismo capítulo, sobre la red estática se estructura un **modelo dinámico para la solución del problema** y paso a paso se verifica su viabilidad, se analizan las configuraciones que habitualmente se producen en los edificios: vías de circulación, confluencias y ramificaciones, se establece el marco adecuado para una utilización interactiva y finalmente se desarrolla una aplicación basada en **una solución heurística** que permite garantizar soluciones pseudo-óptimas. La aplicación desarrollada permite efectuar modificaciones en los parámetros que definen el proceso de evacuación de un edificio: Ocupaciones, capacidades, anchuras mínimas de paso, longitud de recorridos y demoras, obteniendo soluciones inmediatas y representaciones gráficas que aportan un conocimiento detallado de las ocupaciones de cada uno de los recintos, flujos de circulación y llegadas a los destinos en cada periodo.

En el capítulo 6 se ha desarrollado un proceso para validar el modelo y contrastar los resultados obtenidos. En un principio para validar los resultados se utilizó la simple coincidencia de tiempos de evacuación, pero era preciso poder garantizar que los valores calculados guardaban la adecuada similitud con los valores experimentales obtenidos en ensayos y simulacros, dicha existencia propició la investigación de procedimientos de contraste robustos que ofrecieran una garantía y generaran la adecuada confianza en el procedimiento diseñado. Existía además la necesidad de obtener el máximo rendimiento de los simulacros de evacuación, lo que dio lugar a los procedimientos basados en una secuencia de valores. Los procedimientos utilizados inicialmente se basaban en determinar los **intervalos que podían producirse en el tiempo de evacuación** en función de las magnitudes de locomoción y el contraste consistía en observar si los valores de los simulacros estaban comprendidos en dicho intervalo.

Finalmente se han diseñado y probado dos procedimientos, ambos están basados en el **análisis de la función de evacuación inversa y en el análisis de los flujos de salida** y permiten evaluar el modelo con un razonable nivel de seguridad. El procedimiento basado en la función de evacuación inversa consiste en representar dicha función  $p(z)$  y la secuencia de salidas registradas  $s(z)$  en intervalos regulares de tiempo para seguidamente analizar las diferencias, verificar la estabilidad de las mismas y su normalidad. Se concluye que este procedimiento tiene algunas ventajas respecto al procedimiento de análisis de flujos, ambos procedimientos permiten verificar si las distribuciones óptimas realmente lo son.

Por último en el capítulo 7, se sintetizan algunos de los principios que comporta la organización y gestión de evacuaciones de emergencia. Realmente no constituye ninguna aportación, se incluyen en este trabajo con la finalidad de desarrollar un procedimiento completo y tratar así de ofrecer una perspectiva global del problema, abordar los aspectos analíticos del problema y posteriormente mostrar su posible aplicación.

<b>Capítulo 2</b>	- Recopilación y clasificación de documentos sobre las dimensiones de las personas, la locomoción humana y la evacuación de los edificios
<b>Capítulo 3</b>	- Proceso de identificación de los factores que definen el sistema de evacuación - Formalización de una definición de sistema de evacuación - Formulación de los principios para el estudio del problema - Modelado de incorporaciones a las salidas - Reseña de magnitudes y formatos gráficos para el análisis del problema
<b>Capítulo 4</b>	- Desarrollo en microordenadores de procedimientos gráficos para la solución del problema de la evacuación de un recinto. - Incorporación de diferentes supuestos al modelo tradicional: Demoras en el inicio de la evacuación y recorridos, y resolución mediante procedimientos gráficos y analíticos - Formulación de modelos basados directamente en la densidad de ocupación - Solución heurística del problema y desarrollo de la aplicación EXITR
<b>Capítulo 5</b>	- Justificación de la necesidad de sistematizar la representación de los edificios desde el punto de vista de sus condiciones de evacuación - Definición de una nueva estructura de red para la definición y el estudio del edificio - Desarrollo de los elementos para el estudio de la red dinámica - Procedimiento heurístico para la solución pseudo-óptima del problema - Desarrollo de la aplicación EXITE
<b>Capítulo 6</b>	- Principios para la validación y contraste de los modelos - Aplicación de contrastes basados en cambios en las magnitudes de locomoción - Desarrollo de un proceso de validación a partir de comparar la función de evacuación y las salidas registradas en ensayos y simulacros. - Desarrollo de un proceso de validación a partir del análisis de las diferencias entre los flujos previstos y los realmente registrados - Implantación de procedimientos para verificar las soluciones óptimas a partir de la función de evacuación y el análisis de flujos
<b>Capítulo 7</b>	- Perspectiva global para el estudio y la gestión de la evacuación de los edificios

**Figura 9.1** Tabla resumen de las aportaciones realizadas

## 9.2 PUBLICACIONES REALIZADAS DURANTE EL PERIODO DE ELABORACIÓN DE LA TESIS

Se efectúa una enumeración de las principales publicaciones realizadas en el transcurso del desarrollo de la presente tesis.

1. “Modelos matemáticos para la evacuación de edificios”, Temes d’estadística, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Editorial EPOP, ISBN: 84-89877-00-9, Capítol V, 1997, 49 p.
2. “Modelos matemáticos para el estudio de la evacuación de edificios: búsqueda bibliográfica”, Departament d’Organització d’Empreses, Universitat Politècnica de Catalunya, D.I.T. 98/5, 31p.
3. “Modelos matemáticos utilizados en el estudio de la evacuación de edificios”, Revista Cuadernos de Seguridad, Enero 1998, pp 41-48.
4. “Utilización de encuestas para la evaluación de simulacros de evacuación”, Document de treball, Dep. d’Estadística, ETSEIT, UPC, Julio 1998, 12 p.
5. “Modelización de la evacuación de edificios mediante redes de flujo”, Anales de Ingeniería Mecánica, Ponencias del XIII Congreso de Ingeniería Mecánica, ISSN 0212-5070, Terrassa 2-4 Diciembre 1998, Tomo 1 pp. 13-19.
6. “Estudio de la evacuación de un recinto industrial”, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Ed. EPOP, Febrero 1999, 162 p.
7. “Referencia de documentos sobre la evacuación de edificios”, Document de treball Gener 00/1 SCP, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Enero 2000, 14 p.
8. “Estudio de la evacuación de un edificio mediante el programa EVACNET+”, Document de treball Jun 00/1 SCP, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Junio 2000, 27 p.
9. “Modelos para la optimización de la evacuación de un recinto”, Document de treball Julio 00/1 SCP, Dep. d’Estadística, ETSEIT, UPC, Enero 2004, 33 p.
10. “Optimización de la evacuación de un recinto mediante nomogramas”, Document de treball Juny 01/1 SCP, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Enero 2004, 9 p.
11. “Optimización de la evacuación de un recinto a partir de las ecuaciones de Nelson&McLennan”, Document de treball Set 01/1 SCP, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Septiembre 2001, 23 p.
12. “Procedimiento gráfico para la optimización de la evacuación de un recinto”, Actas del IV Congreso de Ingeniería de Organización, ISBN 84-88783-52-3, Universidad de Sevilla, 13-14 Septiembre 2001, p.121-123.
13. “Evacuación de un recinto en el tiempo mínimo”, Revista “Cuadernos de Seguridad” Julio/Agosto 2002, p.79-82.

14. “Aplicación de procedimientos gráficos para la optimización de la evacuación de edificios”, Actas del V Congreso de Ingeniería de Organización, ISBN 84-688-2827-0, Universidad de Valladolid-Universidad de Burgos, 4-5 Septiembre 2003, p.55-56.
15. “Objetivos equivalentes en el problema de la evacuación de recintos”, Actas del V Congreso de Ingeniería de Organización, ISBN 84-688-2827-0, Universidad de Valladolid-Universidad de Burgos, 4-5 Sep. 2003, p.57-59.
16. “Evacuación de edificios: Modelos matemáticos para el estudio del movimiento de las personas”, Document de treball Gener 04/1 SCP, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Enero 2004, 32 p.
17. “Evacuación de edificios: Modelos matemáticos para la optimización”, Document de treball: Febrer 04/2 SCP, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Febrero 2004, 21 p.
18. “Evacuación de edificios: Modelos de Simulación”, Document de treball: Juny 04/3 SCP, Departament d’Estadística, ETSEIT, UPC, Junio 2004, 13 p.
19. “Procedimiento gráfico para la optimización de la evacuación de un recinto”, Revista Montajes e Instalaciones nº 385 Julio/Agosto 2004, ISSN 0210-184X, p.79-86.
20. “Modeling the Evacuation and Entrance Function in the Problem of Building Evacuation”, Actas del IV Congreso “International Conference on Modelling & Simulation (ICMS’04)”, ISBN 84-688-7867-7, Universidad de Valladolid, 22-24 Septiembre 2004, p.37-39.

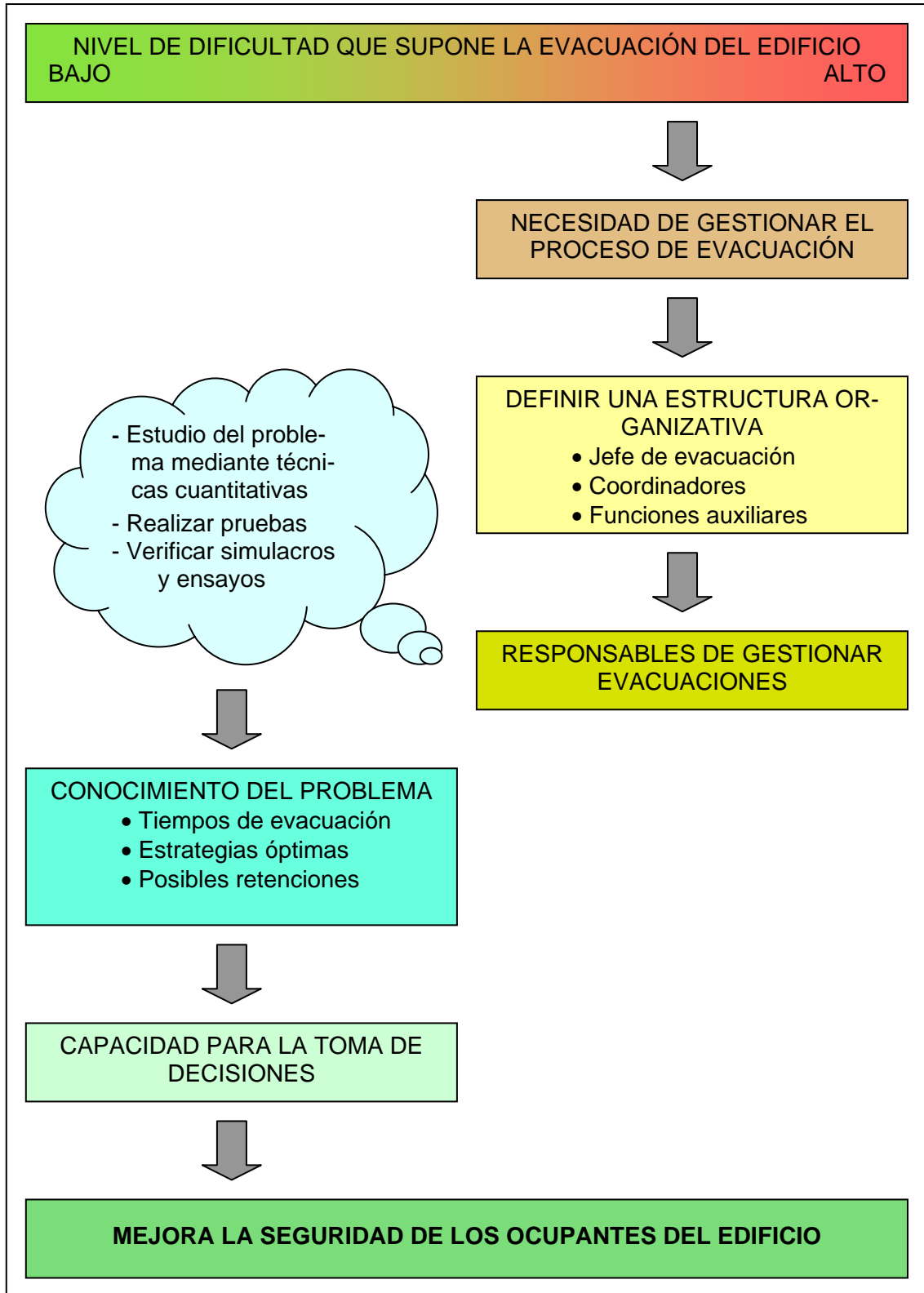
En el momento de redactar estas líneas existen varios trabajos en curso de publicación, el pasado mes de Noviembre fue aceptado para su publicación en “The Best Of AMSE 2004 Conferences” el trabajo “Modeling the Evacuation and Entrance Function in the Problem of Building Evacuation”.

### 9.3 CONCLUSIONES

En esta tesis se refleja la profunda creencia que la seguridad de las personas en los edificios en numerosas situaciones se halla seriamente comprometida; existen muchos edificios en los que si se produjera algún incidente de cierta magnitud la evacuación de las personas presentes resultaría complicada. Mediante determinadas medidas de seguridad complementarias, se logra una siniestralidad reducida y estos edificios son aparentemente seguros, sin embargo el problema de la evacuación no se halla resuelto y si existiera algún siniestro de cierta magnitud las consecuencias inevitablemente serían fatales.

Para mejorar el nivel de seguridad de los edificios sería necesario disponer de un sistema que evaluara de forma objetiva la dificultad que supone su evacuación, y a partir de un determinado nivel de riesgo, establecer las condiciones necesarias para tratar de garantizar la evacuación de todos los ocupantes. Esta garantía empieza por disponer en

cualquier instante de personas capaces de gestionar evacuaciones de emergencia, a partir de un conocimiento adecuado del problema y la forma de abordar las posibles soluciones, si éstas realmente existen, y en caso de advertir que las soluciones no existen o no son viables, actuar responsablemente para evitar las causas que las producen.



**Figura 9.2** Resumen de las conclusiones finales

La organización de la evacuación de un edificio se entiende como una actividad que presenta una cierta complejidad, el método científico y técnicas cuantitativas son herramientas que ayudan razonablemente a conocer el problema. La mayoría de planes de evacuación nunca se probarán, siendo posible que planteamientos fatales resulten completamente inadvertidos. Los responsables de la seguridad y de la evacuación de los edificios deberían conocer para cada situación de ocupación y disponibilidad de medios, de las estimaciones de los tiempos de evacuación y las estrategias óptimas. Realmente no se trata de resolver una situación única, se trata de paso a paso analizar posibles ocupaciones, posibles bloqueos de salidas o ralentizaciones en los desplazamientos y adquirir un valioso conocimiento de la situación.

El análisis de la evacuación de los edificios solamente puede realizarse con los medios adecuados. Se ha demostrado que la evacuación de un edificio es posible estudiarla a partir de modelos analíticos, efectuando un conjunto de supuestos razonables que se resumen en unas simples magnitudes de locomoción, demoras en el inicio de la evacuación y varios aspectos de comportamiento se obtiene la solución del problema. En el proceso de resolución puede observarse la extraordinaria dificultad que inicialmente supone asignar unas magnitudes de locomoción debidamente ajustadas y pronosticar determinados aspectos de comportamiento. El problema tiene multitud de aspectos y es preciso buscar procedimientos de solución flexibles de forma que les sea posible a los usuarios evaluar de forma simple todas estas circunstancias.

Finalmente la adecuada verosimilitud de las propuestas se logra validando los resultados obtenidos. Mediante los procedimientos gráficos desarrollados en esta tesis es posible contrastar de forma rigurosa la coincidencia de los valores teóricos calculados con los resultantes de ensayos y simulacros. Una vez confirmado el valor de las magnitudes fundamentales que definen el problema, las conclusiones que se hayan obtenido en el proceso de análisis del problema tendrán mayor verosimilitud. Para validar los resultados se han establecido diferentes procedimientos, concluyéndose que ofrecen mejores resultados los basados en la función de evacuación inversa. Función que es utilizada para verificar si la distribución realizada hacia cada una de las salidas se corresponde con una asignación óptima.

#### **9.4 PROPUESTAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES**

A lo largo del proceso de elaboración de la tesis se han observado una serie de posibles trabajos de investigación, en realidad existen muchos apartados en los cuales la investigación habría podido continuar por ser notable su interés, a continuación se indican algunos de ellos.

- 1ª) De forma continuada a lo largo de la presente tesis se han utilizado las magnitudes antropométricas y de locomoción obtenidas en otros países: Japón, Canadá, Estados Unidos, URSS, Reino Unido, Austria, etc... Se considera que sería necesario disponer de alguna experimentación sobre las medidas antropométricas, las ocupaciones, las velocidades y los flujos de circulación en nuestro país.

- 2<sup>a</sup>) Ligado con la primera parte del capítulo 3, en el análisis de los factores que determinan el problema de la evacuación del edificio, resultaría muy interesante desarrollar un sistema para evaluar el nivel de riesgo de los edificios en cuanto a sus condiciones de evacuación. Estas investigaciones se deberían programar en tres etapas: Primero proponer un método para evaluar el riesgo en los edificios, a continuación aplicarlo a determinados casos y contrastar con expertos los valores obtenidos, para finalmente realizar los ajustes oportunos y disponer de un método en condiciones de implantación.
- 3<sup>a</sup>) En el capítulo 4 al estudiar la evacuación de recintos y edificios no se han considerado medios mecánicos de desplazamiento, no se ha contemplado la existencia de personas desplazándose en ascensores, escaleras mecánicas o rampas móviles, resultaría de gran interés incluir en el desarrollo propuesto dichos elementos. Si bien, existe referencia de documentos que modelizan estas formas de desplazamiento, habría que adaptarlos a los modelos establecidos, efectuando las modificaciones necesarias en la función de evacuación, la función de evacuación inversa y finalmente determinar la forma de establecer las condiciones óptimas para el recinto y el edificio.
- 4<sup>a</sup>) Al estudiar la optimización de la evacuación de recintos y edificios se han considerado poblaciones homogéneas. Tendría interés considerar magnitudes de locomoción heterogéneas, la situación más simple es la que se genera al considerar en el problema de la evacuación de un recinto la restricción de paso que se produce si por ejemplo existe una silla de ruedas desplazándose por una vía de evacuación, ello supone una limitación variable de la capacidad de paso de una salida cuyo estudio resultaría de indudable interés.
- 5<sup>a</sup>) En la resolución del problema de la evacuación del recinto y de edificios se han utilizado los modelos de locomoción de J. J. Fruins y Nelson & MacLennan, un modelo que está siendo utilizado actualmente en modelos de simulación son las ecuaciones de Predtechenskii & Milinskii, matemáticamente son mucho más complejas. Resultaría de gran interés utilizarlas en los problemas de evacuación de recintos y de edificios.
- 6<sup>a</sup>) Se ha observado la existencia de diversos modelos matemáticos y programas que definen la expansión del humo, la propagación de incendios e incluso el efecto de explosiones, de hecho algunos programas de simulación de la evacuación de edificios ya contemplan dichos fenómenos. Parece que podrían incorporarse en la solución analítica del problema de la evacuación, de la forma que se ha planteado en esta tesis, sería posible considerar capacidades variables en las salidas, entonces una investigación a realizar consistiría en plantear la optimización de evacuación de un recinto y posteriormente la de edificios si la capacidad de las salidas fuera variable, la forma más simple sería mediante una función lineal.
- 7<sup>a</sup>) En la tesis se han desarrollado un conjunto de aplicaciones que resuelven el problema de la evacuación de edificios, un propósito consiste en integrar todas estas

aplicaciones para que funcionen como una herramienta informática potente que facilite el estudio de la evacuación de edificios de forma generalizada.

- 8ª) Otra cuestión que queda pendiente en el trabajo realizado en la tesis es la utilización de procedimientos de resolución de la red dinámica más eficientes que la heurística empleada. La solución del problema podría mejorar al disponer de procedimientos heurísticos de resolución más eficaces.
- 9º) Un posible trabajo de investigación consiste en determinar directamente las magnitudes de locomoción más verosímiles a partir de los valores de los tiempos de evacuación obtenidos en ensayos o simulacros. Una vez más se debe insistir en la extraordinaria dificultad de conocer las magnitudes de locomoción, una forma de obtener valores con una razonable credibilidad la proporcionaría esta forma de resolución del problema, procedimientos similares se utilizan en análisis de modelos de tráfico.
- 10ª) Finalmente otra posible investigación a desarrollar consistiría en realizar en el sistema de evacuación una especie de análisis modal de fallos y efectos, por un lado sería una propuesta mucho más simple que los análisis que plantea G. Lovas, sin embargo se cree que podrían aportar unos resultados muy interesantes para evaluar con indudable criterio la seguridad la evacuación de los edificios.

Medidas antropométricas y magnitudes de circulación ciudadanos de nuestro país
Sistema para evaluar el nivel de riesgo de los edificios en cuanto a sus condiciones de evacuación
Considerar medios mecánicos de desplazamiento
Optimización de la evacuación de recintos y edificios con poblaciones heterogéneas
Utilizar en los problemas de evacuación las ecuaciones de Predtechenskii & Milinskii
Estudiar la optimización de evacuación con capacidad de las salidas variable
Integrar las aplicaciones desarrolladas en una herramienta informática
Resolución de la red dinámica mediante heurísticas más eficientes
Estimar las magnitudes de locomoción a partir de las magnitudes de los tiempos de evacuación obtenidos en ensayos o simulacros
Análisis del sistema de evacuación mediante técnicas tipo AMFE

**Figura 9.3** Tabla resumen de propuestas para futuras investigaciones



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Alvord, D. M.**, "The escape and rescue model: A simulation model for the emergency evacuation of board and care homes", American Institute of Architects Foundation, NBS-GCR-83-453, December 1983, 141 p.
2. **Ando, K. / Ota, H.** "Forecasting the Flow of People", Railway Research Review, National Bureau of Standards, 1988, pp. 8-14.
3. **Au, S. Y. / Ryan, M. C. / Carey, M. S.**, "Key principles in ensuring crowd safety in public venues", Proceedings of Engineering for Crowd Safety, Elsevier Science Publishers, 1993, pp. 133-143.
4. **Berlin, G. N.**, "A network analysis of building egress system", ORSA/TIMS meeting Washington, 1980, 8 p.
5. **Breaux, J.**, Psychological Aspects of Behavior of People in Fire Situations", University of Surrey, Guilford, England, 1976.
6. **Brown, J. R.**, "The knapsack sharing problem", Operation Research 27(2), March-April 1979, pp. 340-355.
7. **Bruck, D.**, "The who, what, where and why of waking to fire alarms: a review", Fire Safety Journal Vol. 36 Issue 37, July 2001, pp. 623-639.
8. **Bryan, J. L.**, "Evacuación de los ocupantes" Manual de Protección Contra Incendios, NFPA Editado en España por Mapfre Ed. 24 1991, pp. 7-1/7-59.
9. **Bryan, J. L.**, "A Review of the Examination and Analysis of the Dynamics of Human Behavior in the Fire at the MGM Grand Hotel, Clark County, Nevada, as Determined from a Selected Questionnaire Population", Fire safety Journal, (5) 1983, pp. 233-240.
10. **Bryan, J. L.**, "Behavioral response to fire and smoke", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 3/Chapter 12, Ed. 1996, pp. 3-241/3-262.
11. **Building Research Establishment**, "Human Behaviour in Fire", BRE Digest, Digest-388, 1993, 4 p.
12. **Burkard, R. E. / Dlaska, K. / Klinz, B.**, "The Quiets Flow Problem", ZOR Methods and Models of Operation Research 37:1, 1993, pp. 31-58.

13. **Butler, G. W.**, "The Factors involved in evacuation and the extent to which efficient management can influence these", Proceedings Interflam 93, Interscience Comms Ltd., London, 1993.
14. **Canter, D.**, "Fire and Human Behaviour", Wiley & Sons Ltd, 1980, 333 p.
15. **Canter, D. / Tong, D.**, "The decision to evacuate: a study of motivation which contribute to evacuation in the event of fire", Fire Safety Journal 9, 1985, pp. 257-265.
16. **Cathey, B. H.**, "A Technique for analysing building evacuation plans and facilities designs", Asse Journal Vol 19 (8), 1974, pp. 26-29.
17. **CC.OO.**, "Seguridad y Evacuación en Edificios Públicos", Colección formación, segunda edición, ISBN 84-88593-90-0, 1999, 191 p.
18. **CEPREVEN**, "Manual de Autoprotección: Guía para el desarrollo del plan de emergencia contra incendios y evacuación en los locales y edificios", 1991, 33 p.
19. **Choi, W. / Francis, R. L.**, "Some optimisation models of building evacuation problems with flow dependent arc capacities", Research Report 1985#8, Department of Industrial and System Engineering, 1985, 42 p.
20. **Choi, W.**, "Network flow models of building evacuation models with flow-dependent arc capacities", Ph. Doctoral Dissertation, University of Florida, 1987.
21. **Choi, W. / Hamacher, S. / Tufekci, S.**, "Modelling of building evacuation problems by network flows with side constraints", European Journal of Operational Research, 35, 1988, pp. 98-110.
22. **DeCicco, P.**, "Evacuation from fires", Applied Fire science in Transition Series, Ed. Baywood Publishing Company, ISBN 0-89503-222-8, 2003, 188 p.
23. **Deranlot, J. C.**, "Concevoir l'évacuation", Face au risque 334, 1997, pp.31-35.
24. **Dickie, J. I., / Smith, R. A.** "Engineering for crowd safety", Proceedings of the International Conference on Engineering for Crowd Safety, Elsevier Science Publishers, 1993, 427 p.
25. **Fahy, F. R.**, "Building fire simulation model", Fire Journal, 1983, pp. 93-105.
26. **Fahy, F. R. / Proulx, G.**, "Collective common sense: A study of human behaviour during the World Trade centre evacuation", NFPA Journal Vol. 9 No.2 March/April 1995, pp. 59-67.

27. **Fahy, F. R.**, "Exit 89-An evacuation model for high rise buildings-Model description an example applications", Fire safety science-proceedings of the fourth international symposium, pp. 657-668.
28. **Fahy, F. R. / Proulx, G.**, "A Study of the New York World Trade centre evacuation", Asiaflam95, Hong-Kong, Interscience Communications Limited, 1995, pp. 199-209.
29. **Fahy, R. F. / Proulx, G.**, "Human behaviour in World Trade Centre evacuation" IAFSS 3-7, Melbourne, Australia, March 1997.
30. **Fidalgo Vega, M.**, "La conducta humana ante situaciones de emergencia: análisis de proceso en la conducta individual", NTP-390, Instituto Nacional de seguridad e Higiene en el Trabajo, 1995, pp.8.
31. **Fidalgo Vega, M.**, "La conducta humana ante situaciones de emergencia: la conducta colectiva", NTP-395, Instituto Nacional de seguridad e Higiene en el Trabajo, 1995, 9 p.
32. **Francis, R. L.**, "A simple graphical procedure to estimate the minimum time to evacuate a building", Society of Fire Protection Engineers, Technology Report 1979-5, 1979, 14 p.
33. **Francis, R. L. / Saunders, P.B.**, "EVACNET: Prototype network optimisation model for a building evacuation", J. Research National Bureau of Standards U.S. NBSIR 1979-1593, 1979, 107 p.
34. **Francis, R. L.**, "A 'Uniformity principle' for evacuation route allocation", Journal of Research of National Bureau of Standards Vol.86 September-October, 1981, pp. 509-513.
35. **Francis, R. L. / Chalmet, L. G. / Saunders, P. B.**, "Network models for building evacuation", Management Science Vol.28, January 1982, pp. 86-105.
36. **Francis, R. L. / Kisko, T. M.**, "Network models of building evacuation: Development of software system", Grant No. NB81NADA2057, 1984, 62 p.
37. **Francis, R. L. / Choi, W. / Hamacher, S. / Tufekci, S.**, "Network models of building evacuation problems with flow-dependent exit capacities", Operational Research 1984, pp. 1047-1059.
38. **Francis, R. L.**, "A negative exponential solution to an evacuation problem", Department Research Report #1984-6, 1984, 32 p.
39. **Francis, R. L. / Kisko, T. M.**, "EVACNET+: A Computer program to determine Optimal building evacuation plans", Fire Safety Journal 9, 1985, pp. 211-220.

40. **Frantzich, H.**, “Varseblivningstid och reaktionstid vid uttrimning”, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, 1993.
41. **Frantzich, H.**, “A model for performance based design of escape routes”, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, December 1994, 80 p.
42. **Frantzich, H.**, “Study of movement on stairs during evacuation using video analysing techniques”, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, March 1996, p.44.
43. **Frantzich, H.**, “Fire alarm in a public building: How do people evaluate information and choose evacuation exit?”, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, June 1996, 36 p.
44. **Frantzich, H., Benthorn, L.**, “Managing evacuating people from facilities during a fire emergency”, Facilities Vol. 17 number 9/10, September/October 1999, p.325-330.
45. **Fruins, J. J.**, "Pedestrian planning and design. Elevator World", Library of Congress Catalogue Number 70-159312, 1971-1987, 206 p.
46. **Fruins, J. J.**, "The causes and prevention de crowd disasters", Proceedings of Engineering for Crowd Safety, Elsevier Science Publishers, 1993, pp. 99-108.
47. **Galbreath, M.**, “Time of Evacuation by Stairs in High Buildings”, National research Council of Canada, Fire Research Note 8, 1969.
48. **Galea, E. R. / Galparsoro, J. M. P.**, ”Exodus: An evacuation model Mass Transport Vehicles”, UK CAA paper 93006, 1993, London.
49. **Galea, E. R. / Galparsoro, J. M .P.**,”A computer based simulation model for the prediction of evacuation from mass transport vehicles”, Fire Safety Journal Vol. 22 1994, pp.341-366.
50. **Galea, E. R. / Owen, M. / Lawrence P.**,” Computer modelling of human behaviour in aircraft fire accidents” Proceedings of combustion toxicology symposium, Oklahoma City, 1995.
51. **Galea, E. R. / Owen, M. / Lawrence, P.**, ”Emergency egress from large buildings under fire conditions simulated using the exodus evacuation“, Conference proceedings Interflam 96, 1996, pp. 711-720.
52. **Galea, E. R. / Owen, M. / Lawrence, P./ Filipidis, L.**,” The air EXODUS evacuation model and its application to evacuation certification, crew training and accident investigation” The proceedings, CABIN SAFETY, London, March 1997, 14 p.

53. **Galea, E. R. / Gwinne, S. / Lawrence, P. / Filipidis, L.**” Modelling occupant interaction with fire conditions using the building EXODUS evacuation model”, *Fire Safety Journal* Vol. 36-4, June 2001, pp.327-357.
54. **Galea, E. R. / Parke, J. / Hickson, J. / Filipidis, L.**” The Collection and Analysis of pre-evacuation Times Derived from Evacuation Trials and Their Application to Evacuation Modelling”, *Fire Technology* 39, 2003, pp. 173-195.
55. **Generalitat de Catalunya / Direcció General de Prevenció i Extinció d’Incendis i de Salvaments.**, “El plans d’evacuació i els simulacres en els centres escolars”, Dipòsit Legal B-37936, 1988, 10 p.
56. **Gento Municio, M. A. / López Rubio, B. / Posada Calvo, M.**,”Simulación del desalojo de edificios. Situación en España: E.T.S. Ingenieros Industriales (Universidad de Valladolid)” V Congreso de Ingeniería de Organización, Valladolid Burgos 4-5 Septiembre 2003, 10 p.
57. **Getachew, T.**, "An algorithm for multiple-objective path optimisation with time dependent links", *Proceedings of the 10th International conference on multi-criteria decision making*, July 1992, pp. 319-330.
58. **Getachew, T.**, "Transient behaviour in multiple-criteria path planning problems", *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, October 1992, pp. 867-873.
59. **Getachew, T. / Kostreva M. / Lancaster L.**, "A Generalization of Dynamic Programming for Pareto Optimisation in Dynamic Networks", *RAIRO Operation Research* 34, 2000, 27-47.
60. **Gupta, A. K. / Yadav, P. K.**, “SAFE-R: A new model to study the evacuation profile of a building”, *Fire Safety Journal* 39, August 2004, pp. 539-556.
61. **Gwyne, S. / Galea, E. R.**,”A Review of the Methodologies and Critical Appraisal of Computer Models used in the Simulation of Evacuation from the Built Environment”, *CMS Press Paper No. 97/IM/21*, 1998, p.42.
62. **Haessler, P. E.**, "Many factors influence design of emergency exit requirements", *Fire Engineering*, September 1977, pp. 36-39.
63. **Hagiwara, I. / Tanaka, T.**,” International comparison of fire safety provisions for means of escape”, *Fire safety science-proceedings of the fourth international symposium*, pp. 633-644.
64. **Hall, J.**, Chapter 12 “Patient Evacuation in Hospitals” in *Fire and Human Behaviour*, Wiley & Sons Ltd, 1980, pp. 181-205.

65. **Hallberg, G.**, "Defining care and residential buildings with respect to evacuation capability of occupants", The Royal Institute of Technology. Sweden. Fire Safety Science, Proceedings of Third International Symposium, 1993, pp. 825-834.
66. **Hamacher, H. W. / Tufekci, S.**, "On the use of lexicographic min cost flows in evacuation modelling", Naval Res. Logistics, Vol. 34, 1987, pp. 487-503.
67. **Hope, B. / Tardos, E.**, "Polynomial time algorithms for some evacuations problems", Proceedings of the Fifth Annual SIAM Symposium on Discrete Algorithms, Jan. 1994, pp. 433-441.
68. **Hope, B. / Tardos, E.**, "The Quickest Transshipment Problem", Proceedings of the 6th Annual SIAM Symposium on Discrete Algorithms, Jan. 1995, pp. 512-521.
69. **Horasan, H. / Bruck, D.**, "Investigation of a behavioural response model for fire emergency situations in secondary schools", Fire safety science-Proceedings of the fourth international symposium, pp. 715-726.
70. **Horiuchi, S. / Muzoraki, S. / Hokugo, A.**, "A case study of fire and evacuation in multi-propose office building", Osaka-Japan, 1984.
71. **INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO**, "Planes de autoprotección en oficinas / Guía para su elaboración", ISBN 84-7425-532-5, 2001, 117 p.
72. **ITSEMAP**, "Medios de evacuación: criterios generales de diseño", Instrucción Técnica 1.13, Instituto de Seguridad Integral de la Fundación Mapfre Estudios, Noviembre 1987, 13 p.
73. **ITSEMAP**, "Medios de evacuación: requisitos constructivos y señalización", Instrucción Técnica 1.14, Instituto de Seguridad Integral de la Fundación Mapfre Estudios, Julio 1986, 6 p.
74. **ITSEMAP**, "Manual de autoprotección", Instrucción Técnica 8.04, Instituto de Seguridad Integral de la Fundación Mapfre Estudios, Noviembre 1988, 14 p.
75. **Jarvis J. J./ Ratlif H. D.**, "Some equivalent objectives for dynamic Network Flow Problems", Management Science Vol. 28, January 1982, pp. 106-109.
76. **Jin, T./ Yamada, T.**, "Irritating Effects from Fire Smoke on Visibility", Fire Science and Technology 5.1 1985, pp. 79-90.

77. **Johnson, P. F. / Beck R. V. / Horasan, M.**, "Use of egress modelling in performance-based fire engineering design- A fire safety study at the National Gallery of Victoria", Fire safety science. Proc. of the fourth international symposium, pp. 669-680.
78. **Kagawa, M.**, "Movement of people on stairs during fire evacuation drills- Japanese experience in high-rise office building", Fire Safety Science. Proceedings of the first international symposium, 1987, pp. 533-540.
79. **Kagawa, S. / Yhosiro, Y. / Ebihara, M. / Ohtsuki, A.**, "Evaluation of fire safety measures in care facilities for the elderly by simulating evacuation behaviour", Fire safety science. Proceedings of the fourth international symposium, pp. 645-656.
80. **Kendik, E.**, "Determination of the evacuation time pertinent to the projected area factor in the event of total evacuation of high-rise office buildings via staircases", Fire Safety Journal 5, 1983, pp. 223-232.
81. **Kendik, E.**, "Die Berechnung der Personenstroeme als Grudlage for die Bemesung von Gehwegen in Gebauden und um Gebaeude", University of Viena Ph.D., 1984 Unpublished.
82. **Kendik, E.**, "Assessment of escape routes in buildings and design method for calculating pedestrian movement", Society Of Fire Protection Engineers, Technology Report 1985-4, 1985, 18 p.
83. **Kendik, E.**, "Designing escape routes in buildings", Fire Technology, vol.22, November 1986, 272 p.
84. **Kisko, T. M.**, "A Linear programming formulation for regional evacuation problems", Research report 90-10, 1990, 8 p.
85. **Kisko, T. M. / Tufekci, S.**, "Design of a Regional Evacuation Decision Support System: Integrating Simulation and Optimisation", Simulation in Emergency Management and Engineering 1991, pp. 48-53.
86. **Kisko, T. M. / Tufekci, S.**, "Regional evacuation modelling system (REMS): A decision support system for emergency area evacuations", Department of Industrial and Systems Engineering, University of Florida, 1992, pp. 96-99.
87. **Kisko, T. M. / Tufekci, S.**, "A tutorial on modelling emergency evacuation", Industrial and Systems Engineering Department. University of Florida, 1992, pp. 90-95.

88. **Klote, J. H. / Tamura, G. T.**, "Smoke control and fire evacuation by elevators", Institute for Research in Construction, (Reprinted from ASHRAE Transaction 1986 Vol.92, Pt. 1A) NRCC 27638 1988, pp. 231-245.
89. **Kostreva, M. M. / Getachew, T.**, "Optimisation models in fire egress analysis for residential buildings", Fire Safety Science: Proceedings of the Third, International Symposium 1991, Elsevier Applied Science, 1991, pp. 805-814.
90. **Liebe, B. M.**, "EXITT: A simulation model of occupant decisions and actions in residential fires: Users guide and program description", U.S. Department of Commerce, NBSIR 1987-3591, 1987.
91. **Liebe, G.** "Estadísticas comunes de incendios en Europa", Revista Prevención de Incendios, nº 11 ISSN 1575-8915, Tercer trimestre 2001, pp. 10-11.
92. **London Transport Board**, Second Report of the Operational Research Team on the Capacity of Footways, London 1958.
93. **Lovas, G. G. / Wiklund, J. / Drager, H.**, "Evacuation models and objectives", 1992 Emergency Management and Engineering Conference: Managing Risk with Computer Simulation. Society for Computer Simulation, Dec. 1992, pp. 91-97.
94. **Lovas, G. G. / Drager, H.**, "EVACSIM: A compressive evacuation simulation tool", A/S Quasar Consultants, Norway, 1993 Emergency Management and Engineering Conference: Managing Risk With Computer Simulation. Society for Computer Simulation, 1993, pp. 101-108.
95. **Lovas, G. G.**, "Modelling and simulation of pedestrian traffic flow", Transportation Research, Volume 28B, No.6, December 1994, pp. 429-443.
96. **Lovas, G. G.**, "Performance measurement of evacuation system", Fire safety science-Proceedings of the fourth international symposium, pp. 589-600.
97. **Lovas, G. G.**, "On performance measures for evacuation systems", European Journal of Operational Research 85, 1995, pp. 352-367.
98. **Lovas, G. G.**, "On the importance of Building Evacuation System Components", IEEE Transactions on Engineering Management Vol. 45, No 2 May 1998, pp. 181-191.
99. **Lovas, G. G.**, "Models of way finding in emergency evacuations", European Journal of Operational Research 105, 1998, pp. 371-389.
100. **Lu, Q. / Huamng, Y. / Shekhar, S.**, "Evacuation Planning: A Capacity Constrained Routing Approach", Department, University of Minnesota, 11 p.



101. **McLennan, H. A.**, "Towards an integrated egress/evacuation model using an open system approach", Fire safety Science. Proceedings of the first international symposium, 1984, pp. 581-590.
102. **Megiddo, N.**, "Optimal Flow in Networks with Multiple Sources and Sinks", Mathematical Programming 7, (1974), pp. 97-107.
103. **Megiddo, N.**, "Combinatorial Optimization with Rational Objective Functions", Mathematics and Operation Research, 4 (1979), pp. 414-424.
104. **Melinek, S. J. / Booth, S.**, "An analysis of evacuation times and movement of crowds in buildings", Building Research Establishment CP 96/75, 1975.
105. **Minieka, J. L.**, "Maximal, Lexicographic and Dynamic Network Flows", Operation Research Vol. 12 No 2., March-April 1973, pp. 517-527.
106. **Moro Fonseca, R.**, "Sistemas de evacuación por fachada", Cuadernos de Seguridad, Julio-Agosto 1989, pp. 103-107.
107. **Nelson, H.E./ McLennan, H. A.**, "Emergency Movement", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 3/Chapter 14, Ed. 1996, pp. 3.286-3.295.
108. **NFPA**, "Manual de Protección contra incendios", NFPA Editado en España por Mapfre Editorial, Edición 24, 1991
109. **NFPA / SFPE**, "Handbook of Fire Protection Engineering", Library of Congress Catalog Card Number: 88-61938, ISBN: 0-87765-353-4, First Edition 1988
110. **National Safety Council**, "Evacuation System for High- Rise Buildings", Data Shett I-656-81, 9 p.
111. **O'Leary, J.T. / Gratz, M. J.**, "An analysis of fire evacuation procedures using simulation", Fire Journal - May 1982, pp. 119-126.
112. **Okazaki, S. / Matsushita, S.**, "A Study of simulation model for pedestrian movement with evacuation an queuing", Engineering for Crowd Safety. Elsevier Science Publishers Proceedings of International Conference 1993, pp. 271-280.
113. **Owen, M., / Galea, E. R. / Lawrence, P.J.**, "The exodus evacuation model applied to building evacuation scenarios", Journal of Fire Protection Engineering, 1996, pp. 65-86.
114. **Owen, M. / Galea, E. R. / Lawrence, P.J.**, "Advanced occupant behavioural features of the building exodus evacuation model", CMR Press paper 96/IM/16 University of Greenwich, 1996, 20 p.

115. **Pauls, J. L. / Jones B. K.**, "Building Evacuation: Research Methods and case Studies", Fires and Human Behaviour, Ed. D. Canter, 1980, pp. 227-251.
116. **Pauls, J. L.**, "Building evacuation: Research findings and recommendations", Fires and Human Behaviour, Ed. D. Canter, 1980, pp. 251-275.
117. **Pauls, J. L.**, "International Life Safety and Egress Seminar", Maryland, (Nov. 1981), Summary of Presentations and Discussion, Fire Safety Journal, 5, 1983, pp. 213-221.
118. **Pauls, J. L.**, "The movement of people in buildings and design solutions for means of egress", Fire Technology, Vol.20, No.1, February 1984, 27 p.
119. **Pauls, J. L.**, "Calculating evacuation times for tall buildings", Fire Safety Journal 1987, pp. 213-235.
120. **Pauls, J. L.**, "Movement of people", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 3/Chapter 12, Ed. 1996, pp. 3-263/3-285.
121. **Paulsen, T.**, "The effect of escape route information on mobility and way finding under smoke logged conditions", Fire safety science-proceedings of the fourth international symposium, pp. 693-704.
122. **Perez Guerrero, A.**, "Cálculo estimativo de vías y tiempos de evacuación", NTP-436, Instituto Nacional de seguridad e Higiene en el Trabajo, 1997, 9 p.
123. **Pidd, M. / Silva, F. N. / Eglese, R. W.**, "A simulation model for emergency evacuation", European Journal of operational research, March 1995, pp. 413-419
124. **Platt, D.**, "Fire resistance of barriers in modelling fire spread", Fire Safety Journal 22, 1994, pp. 399-407.
125. **Platt, D. / Elms, D. G. / Buchanan, A .H.**, "A probabilistic model of fire spread with time effects", Fire Safety Journal 22, 1994, pp. 367-398.
126. **Poon, S. L.**, "EvacSim: A simulation model of occupants with behavioural attributes in emergency Evacuation of high-rise building fires", Fire safety science proceedings of the fourth international symposium, pp. 681-692.
127. **Posada, J. L.** "Medios de evacuación de los edificios", Jornadas técnicas Colegio Arquitectos de Madrid. Ed. Mapfre, 1987, pp. 83-121.
128. **Posada, J. L.** "Plan de evacuación en edificios", Revista Gerencia de riesgos, 1989, pp. 15-24

129. **Predtechenskii, W. M. / Milinskii, A .I.**, "Planning for foot traffic flow in buildings", Amerind Publishing Co. New Delhi., National Bureau of Standards, U.S. Dep. Commerce , 1969-1978, PB-294 993-T, 238 p.
130. **Proulx, G. / Fahy, R. L.**, "The time delay to start evacuation: review of five case studies", IAFSS 3-7, Melbourne, March 1987.
131. **Proulx, G.** "Passengers behaviour during an underground evacuation", EDRA-22 11-15 March 1991, Mexico.
132. **Proulx, G.**, "La signalisation dans le métro de Montréal", Société de Transport de la Communauté Urbaine de Montréal, Montréal, 1992, 49 p.
133. **Proulx, G.**, "Review of sub-models of NFL computer fire risk-cost Assessment Model", NFL-NRCC, Ottawa, 1992, 36 p.
134. **Proulx, G.**, "Opinion d'expert sur l'impact du nouveau garde-cops dans de l'éventualité de l'évacuation des voyageurs", Société de Transport de la Communauté Urbaine de Montréal, 1993, 15 p.
135. **Proulx, G.**, "A stress model about people facing a fire", Journal of Environmental Psychology, Vol. 13, 1993, pp.137-147.
136. **Proulx, G.**, "The time delay to start evacuating upon hearing a fire alarm", Human Factors and Ergonomics Society, Proceeding of the Human Factors and Ergonomics Society, 38 Th. annual meeting, Vol.2, 1994, pp. 811-815.
137. **Proulx, G. / McQueen, C.**, "Evacuation timing in apartment buildings", Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, IRC-IR-660 20, 1994, 11 p.
138. **Proulx, G. / Veitch, J. A.**, "Questionnaire to evaluate evacuation drills an emergency procedures", Client Report for Public Works and Government Services Canada, A-4080.1, 1994, 22 p.
139. **Proulx, G.**, "Human response to fires", National Research Council Canada, Fire Research News no. 71, winter 1994, pp. 1-3.
140. **Proulx, G.** "Human factors in fires and fire safety engineering", The Society of Fire Protection Engineers, Bulletin of SFPE, Boston Massachusetts, 1995, pp. 13-15.
141. **Proulx, G.**, "Evacuation time and movement in apartment buildings", Elsevier Science Limited, Northern Ireland, Fire Safety Journal Vol.24, 1995, pp. 229-246.

142. **Proulx, G. / Fahy, R. L.**, "A study of occupant behavior during the World Trade centre evacuation", Proceedings of Seventh International Fire Science and Engineering Conference, Interfalm 96, Cambridge, UK. Interscience Communication, 1996, pp. 793-802.
143. **Proulx, G. / Kaufman, A. / Pineau, J.**, "Evacuation time and movement in office buildings", National Research Council Canada, IRC-IR 711, 1996, 51 p.
144. **Proulx, G.**, "Lessons learned on occupant's movement times and behaviour during evacuation drills", Fire Safety Science and Engineering Conference. Interfalam 96 Cambridge UK, Interscience Communication, 1996, pp. 1007-1011.
145. **Proulx, G. / Pineau J.**, "Methodology for evacuation drills studies", Institute for Research in Construction, National Research Council Canada. IRC-IR 730, 1996, 32 p.
146. **Proulx, G. / Pineau J.**, "Revue des stratégies d'évacuation concernant les personnes handicapées", Institut de Recherche en Construction. Conseil National de Recherche du Canada, Rapport interne no. 712 F., 1996, 22 p.
147. **Proulx, G. / Yung, D.**, "Evacuation procedures for occupants with disabilities in high rise buildings, WOBO Fourth World Congress", World Organization of Building Officials, Paper no.25, Hong-Kong, 2-8 Nov. 1996, 14 p.
148. **Proulx, G.**, "Critical factors in high-rise evacuation" (1996), Borehamwood England, Fire Prevention 291 July/august 1996, pp. 24-27.
149. **Proulx, G. / Pineau, J.**, "The impact of age on occupant's behaviour during a residential fire", Human Factors and Ergonomics Society, Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 40 Th. Annual Meeting. Vol 2, 96,12 p.
150. **Proulx, G.**, "As of year 2000, what do we know about occupant behaviour in fire", NRCC Internal Report No. 44479, A version of this paper is published in Technical Basis for performance Based Fire Regulation, United Engineering Foundation Conference, San Diego, January 7-11, 2001, pp. 127-129.
151. **Proulx, G.**, "Occupant behaviour and evacuation", 9<sup>th</sup> International Fire Protection Symposium, Munich, May 25-26, 2001, NRCC-44983, pp. 219-232.
152. **Proulx, G.**, "Evacuation Planning for Occupant with Disability", NRCC Internal Report No. 843, March 2002, 22 p.
153. **Proulx, G.**, "Understanding human behaviour in stressful situations", NRCC-45394, April 2002, 5 p.

154. **Proulx, G./Laroche, C.**, "Recollection, identification and perceived urgency of the temporal-three evacuation signal", NRCC-45194, Journal of Fire Protection Engineering, v.13 no.1, Feb. 2003, pp. 67-82.
155. **Proulx, G.**, "Evacuation by elevators: who is the first?", NRC-46298, Published in Workshop on the Use of Elevators in Fires and Other Emergencies, Atlanta, Georgia, March 2-4, 2004. pp. 1-13.
156. **Puente Ballesteros, J. J.**, "Planes de Emergencia Industrial / Guía para su realización", Servicio central de publicaciones del gobierno vasco" 121 p.
157. **Ramachandran, G.**, "Probability-based building design fire safety: Part 2", Fire Technology, Third Quarter 1995, pp. 355-367.
158. **Resier, M. / Sauer, C. H.**, "Queuing network models: Methods of solution and their implementation", Current Trends in Programming Methodology, Vol III, Prentice Hall, New Jersey 1978.
159. **Resier, M.**, "Mean Value Analysis of Queuing Network Models: A new look at an old problem", IBM Research Report, Yorktown 1978.
160. **Resier, M. / Lavenberg, S.**, "Mean Value Analysis of Queuing Network Models" JACM 27, 1980, pp. 313-322
161. **Reyes Sánchez, F.**, "Escaleras de Emergencia", Cuadernos de Seguridad, Enero 1989, pp. 89-102.
162. **Richardson, J. K. / Proulx, G. / Yung, D. / Lie, T.**, "Design against fire-An introduction to fire safety engineering design", Book Reviews, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 22, 1995, pp. 842-842.
163. **Rubadiri, L.**, "A Brief review of current evacuation models". Presentation at SRD Consultants, AEA Technology, August 1992.
164. **Rubadiri, L.**, "Towards the extension of an evacuation model to ensure the safety of disabled people in fire emergency buildings", EURO-Facilities management conference", Netherlands, September 1992.
165. **Rubadiri, L. / Ndumu, T. D. / Roberts, J. P.**, "Office Evacuation observation covers levels of familiarity with building", Fire-The journal of the fire protection profession, July 1993.
166. **Rubadiri, L. / Ndumu, T. D. / Roberts, J. P.**, "Towards a coherent approach to engineering fire safety for disabled people", CIB Ulster 1994.

- 167. Rubadiri, L. / Ndumu, T. D. / Roberts, J. P.,** "Assessment of structural safety of sports grounds", IABSE Symposium, Birmingham 1994.
- 168. Rubadiri, L. / Ndumu, T. D. / Roberts, J. P.,** "Towards the strategic design of accessible buildings for disabled people-a Botswana perspective", IAPS, Stockholm Conference, July 1996.
- 169. Rubadiri, L. / Ndumu, T. D. / Roberts, J. P.,** "Predicting the evacuation capability of mobility-impaired occupants Fire Technology, First Quarter 1997, pp. 32-55.
- 170. Sato, H.,** "Computer simulations for total fire safety design of the New Japanese Sumo Wrestling Headquarters and Stadium", Fire Safety Science. Proceedings of the first international symposium, 1984, pp. 541-550.
- 171. Shestopal, V. / Grubits, S. J.,** Evacuation model for merging traffic flows in multi-room and multi-story buildings", Fire safety science-proceedings of the fourth international symposium, pp. 625-632.
- 172. Shiels, T. J.,** "Fire and disabled people in buildings", Fire Engineers Journal, March 1995, pp. 28-31.
- 173. Shiels, T. J. / Dunlop / K. E., Silcock, W. H.,** "Escape of Disabled People in Fire", Fire. A Measurement and Classification of Capability for Assessing Escape Risk", BRE Report 301, 1996, pp. 14.
- 174. Shiels, T. J., Boyce, K. E.,** "A study from large retail stores", Fire Safety Journal Vol 35 Issue1, July 2000, pp. 25-49.
- 175. Siikonen, M. L.,** "Elevator traffic simulation", Simulation, October 1993, pp. 257-267.
- 176. Sime, J. D.,** "Perceived time available: the margin of safety in fires", Fire Safety Science. Proceedings of the first international symposium, pp. 661-670.
- 177. Sime, J. D. / Proulx, G. / Kimura M.,** "Evacuation safety in sub-surface station of Tyne&Wear metro: Case study of monument station", Tyne&Wear metro passenger transport executive, Newcastle upon Tyne, 1990, U.K., 41 p.
- 178. Sime, J. D. / Proulx, G.,** "Appraisal of the information system in the sub-surface station of Tyne&Wear metro: Stage 1 of an evacuation safety evaluation study", Tyne&Wear Metro Passenger Transport Executive, Newcastle upon Tyne, U.K., 1989, 43 p.

179. **Sime, J. D.**, "Crowd psychology and engineering: Designing for people or blabbering?" Proceeding of Engineering for Crowd Safety, Elsevier Science Publishers, 1993, pp. 119-133.
180. **Smith, J. M. / Towsley, D.**, "The use of queuing networks in the evaluation of egress from buildings", Environment and Planning B8, 1981, pp. 125-139.
181. **Smith, J. M.**, "An analytical queuing network. Computer program for the optimal egress problem", Fire Technology, May 1982, pp. 19-37.
182. **Smith, J. M.**, "Queuing networks and facility planning", Building and Environment, 1982, 17 pp. 33-45.
183. **Smith, J. M. / Karbowicz, C. J.**, "A K-shortest paths routing heuristic for stochastic network evacuation models", Engineering Optimisation, 1984, Vol. 7 pp. 253-280.
184. **Smith, J. M. / Talebi, K.**, "Stochastic network evacuation models", Computers & Operations Research Vol. 12. No.6, 1985, pp. 559-577.
185. **Smith, J. M. / Yuhaski, S.**, "Modelling circulation systems in buildings using state dependent queuing models", Queuing Systems, 1989, pp. 319-338.
186. **Smith, J. M.**, "State dependent queuing models in emergency evacuation networks", Report of Department of Industrial Engineering and Operations Research, December 1990.
187. **Smith, J. M. / Bakuli, D. L.**, "Optimal routing and resource allocation within state dependent evacuation networks", Simulation in Emergency Management and Engineering, Society For Computer Simulation, 1991, pp. 112-117.
188. **Smith, J. M.**, "Multi-objective routing in stochastic evacuation networks. Simulation in Emergency", Management and Engineering, February 1992, pp. 23-30.
189. **Smith, J. M. / Bakuli, D.**, "Resource allocation in state dependent emergency evacuation networks", European Journal of Operation Research 89, 1996, pp. 543-555.
190. **Stanton, R. J. C. / Wanless, G. K.**, "Pedestrian Movement", Safety Science 18, 1995, pp. 291-300.
191. **Sthal, I. F.**, "A computer simulation of human behaviour in building fires: Interim report". U.S. Department of Commerce, NBSIR 78-1514, Washington D.C. 1978.

- 192. Sthal, I. F.**, "Final Report on the BFIREs/V1: Computer simulation of emergency egress behaviour during fire: Calibration and analysis", NBSIR 79-1713, Washington, 1979.
- 193. Sthal, I. F.**, "An examination of the BFIREs/V1 Computer program: Comparing simulated with actual fire events", Architectural science review vol. 23 n.4, December 1980, pp. 85-89.
- 194. Sthal, I. F.**, "BFIREs/V2: Documentation of program modification", U.S. Department of Commerce, NBSIR 80-1982 ", Washington D.C. 1980.
- 195. Sthal, I. F.**, "BFIREs-II: A behaviour based computer simulation of emergency egress during fires", Fire Technology 1982, pp. 49-65.
- 196. Tapia Ramos, E.**, "Cálculo y diseño de las vías de evacuación", Seguritecnia, Diciembre 1990, pp. 66-70.
- 197. Togawa, K.**, "Study of fire escape based on the observation multitude currents", Japan Building Research Institute, Report 55-14 1955.
- 198. Thompson, P. A. / Marchant, E. W.**, "Modelling techniques for evacuation", Engineering for Crowd Safety. Elsevier Science Publishers Proceedings of International Conference, 1993, pp. 259-279
- 199. Thompson, P. A. / Marchant, E. W.**, "Simulex: Developing new computer modeling techniques for evacuation", Fire safety science-Proceedings of the fourth international symposium, pp. 613-624.
- 200. Thompson, P. A. / Marchant, E. W.**, "A computer model for the evacuation of large building populations", Fire Safety Journal 24, 1995, pp. 131-148.
- 201. Thompson, P. A. / Marchant, E. W.**, "Testing and application of the computer model SIMULEX", Fire safety Journal 24, 1995, pp. 149-166.
- 202. Toshiyuki, A.**, "Prediction system of passenger flow", Engineering for Crowd Safety", Elsevier Science Publishers Proceedings of International Conference, 1993, pp. 249-258.
- 203. Tufekci, S. / Sauders, J. J. / Albusairi, A.**, "Importance of Rems in the aftermath of Hurricane Andrew", International Emergency Management, 1993, pp. 81-86.
- 204. Van Bogaert, A. F.**, "Evacuating schools on fire", Fire safety Science. Proceedings of the first international symposium, 1984, pp. 551-560.
- 205. Villanueva, J. L.**, "Análisis de factores que determinan un proceso de evacuación", Centro Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Instituto



- Territorial de Barcelona. Grupo de Estudios de Seguridad. I.T.B / 565476 (JLV/mm) 2110.
- 206. Villanueva, J. L.**, "Evacuación de Edificios", NTP-46, Instituto Nacional de seguridad e Higiene en el Trabajo, 1983, pp.4.
- 207. Watts, J.**, "Computer models for evacuation analysis", Fire Safety Journal, 12, 1987, pp. 237-245.
- 208. Weinroth, J.**, "An adaptable microcomputer model for evacuation management", Fire Technology, November 1989, pp. 291-307.
- 209. Wiecek, M.**, "Multicriteria decision making in fire egress analysis", IFAC/IFORS Workshop on Support Systems for Decision and Negotiation, June 1992, pp. 285-290.
- 210. Wiecek, T.**, "Approximation in time-dependent multi-objective path planning", Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 1992, pp. 861-866.
- 211. Wiecek, T.**, "Time dependency in multiple-objective dynamic programming", Journal of Mathematical Analysis and Applications, Vol. 173 1993, pp. 289-307.
- 212. Wiklund, J.**, "Chaos theory and the prediction of human behaviour", Imperial College, Department of Mathematics, London, 1993.
- 213. Wood, P. G.**, "The Behavior of People in Fires", Fire Research Note 953, Building Research Establishment, Boreham Wood, Hertfordshire, England, 1972.
- 214. Yoshida, Y.**, "Evaluating building fire safety thought egress Prediction: A standard application in Japan", Fire Technology, Second Quarter, 1995, pp. 159-174.
- 215. Yoshida, Y.**, "A study of evacuation behaviour in World Trade Centre explosion", Fire Technology, Second Quarter, 1996, pp. 174-189.
- 216. Yung, D. / Hadjisophocleus, G. V. / Proulx, G.**, "Cost-effective fire safety upgrade options for Canadian Government office building", Proceedings of the international Conference on Performance Based Codes and Fire Safety Design Methods. Ottawa, Canada, September 1996, p.6
- 217. Yung, D. / Hadjisophocleus, G. V. / Proulx, G.**, "Case study: The use of FIRECAM to identify cost effective fire safety design options for large 4-story office building", Proceedings of the international Conference on Performance Based Codes and Fire Safety Design Methods. Ottawa, Canada, September 1996, 10 p.

## REFERENCIAS DE DIRECCIONES DE INTERNET

- **Building Research Establishment**  
<http://www.bre.co.uk/>
- **Building & Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology**  
<http://www.bfrl.nist.gov/>
- **Institute For Research in Construction, National Research Council Canada**  
<http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/>
- **Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo**  
<http://www.mtas.es/insht/>
- **National Fire Protection Association (NFPA)**  
<http://www.nfpa.org/>
- **Networked Resources for Fire Protection (NAFED)**  
<http://www.nafed.org/>
- **Lund University, Department of Fire Safety Engineering**  
<http://www.brand.lth.se/>
- **Society of Fire Protection Engineers**  
<http://www.sfpe.org/>
- **The University of New Brunswick Fire Science Centre**  
<http://www.fsc.unb.ca/>
- **Univ. Greenwich/Fire Safety Engineering Group (FSEG)**  
<http://fseg.gre.ac.uk/>
- **Univ. Edinburgh**  
<http://www.civ.ed.ac.uk/research/fire/>
- **Worcester Polytechnic Institute: Center for Fire Safety Studies**  
<http://www.wpi.edu/Academics/Depts/Fire/>
- **ISO TC92**  
<http://projects.bre.co.uk/isotc92/>
- **World Trade Center evacuation study**  
<http://peopleandfire.com/wtcesi/>

## **ANEXOS**

**A.1 Reproducción de las tablas de J. J. Fruins**

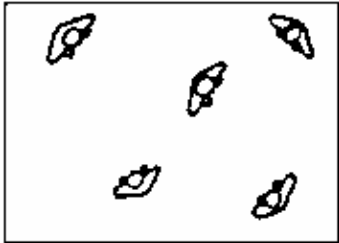

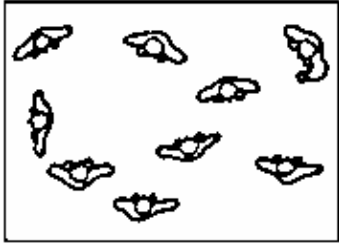



**A.2 Cálculos evacuación CASO7**

**A.3 Herramientas para la evaluación de simulacros de evacuación**

**A.4 Resultados de la evaluación de un simulacro de evacuación**

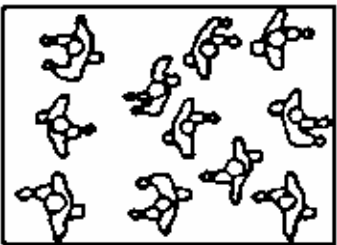
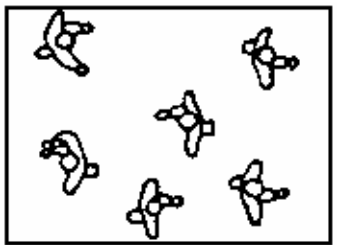
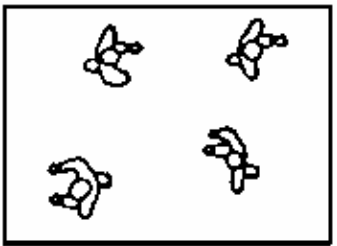
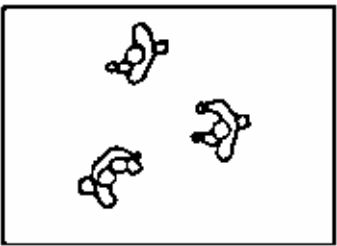
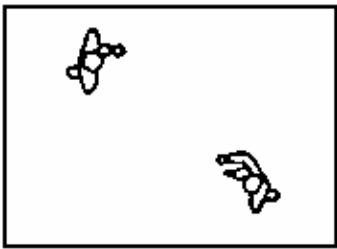


## OCUPACIÓN DE RECINTOS

<u>Modelo</u>	<u>Descripción</u>
	<p><b>A</b> Espera con libertad de circulación. No se producen interferencias en el movimiento de los ocupantes.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Módulo: 1,21 m<sup>2</sup>/Pers. o más</li> <li>- Densidad: 0,83 Pers./m<sup>2</sup> o menos</li> <li>- Separación: 1,22 m o más</li> </ul>
	<p><b>B</b> Espera con movimientos parcialmente restringidos, son probables molestias entre los ocupantes que se hallan en espera.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Módulo: 0,93 – 1,21 m<sup>2</sup>/Pers.</li> <li>- Densidad: 1,08 – 0,83 Pers./m<sup>2</sup></li> <li>- Separación: 1,07 - 1,22 m</li> </ul>
	<p><b>C</b> Espera con circulación restringida molestias entre los ocupantes de la cola, separación límite para el confort personal en espera.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Módulo: 0,65 - 0,93 m<sup>2</sup>/ Pers.</li> <li>- Densidad: 1,54 – 1,08 Pers./ m<sup>2</sup></li> <li>- Separación 0,91 – 1,07 m</li> </ul>
	<p><b>D</b> Espera con posible contacto entre ocupantes, circulación restringida, sólo es posible el movimiento en grupo. Espera en la cola poco confortable.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Módulo: 0,28 – 0,65 m<sup>2</sup>/ Pers.</li> <li>- Densidad: 3,56 – 1,54 Pers./ m<sup>2</sup></li> <li>- Separación 0,61 – 0,91 m</li> </ul>
	<p><b>E</b> Espera con contacto inevitable entre los ocupantes, circulación imposible, en esta situación las esperas deben reducirse al mínimo.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Módulo: 0,19 – 0,28 m<sup>2</sup>/ Pers.</li> <li>- Densidad: 5,38 – 3,56 Pers./ m<sup>2</sup></li> <li>- Separación: 0,61 m o menos</li> </ul>
	<p><b>F</b> Espera con contacto permanente entre los ocupantes de la cola, situación muy incómoda. Situación de angustia. Peligro de pánico.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Módulo: 0,19 m<sup>2</sup>/ Pers. o menos</li> <li>- Densidad: 5,38 Pers./ m<sup>2</sup> o más</li> <li>- Separación: Nula, contacto entre los ocupantes</li> </ul>

## CIRCULACIÓN EN PASILLOS

### Modelo

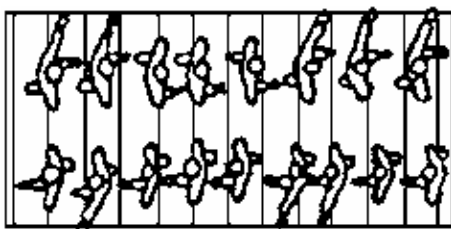
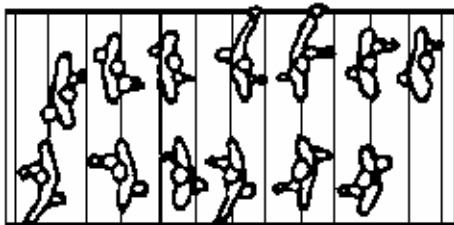
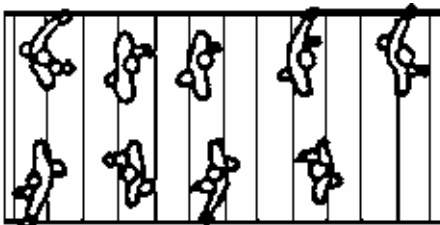
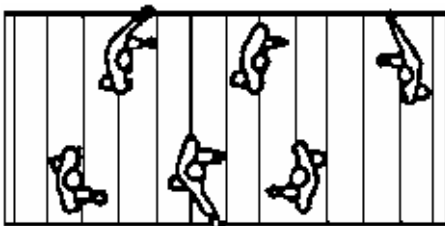
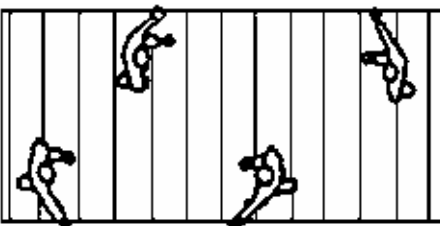
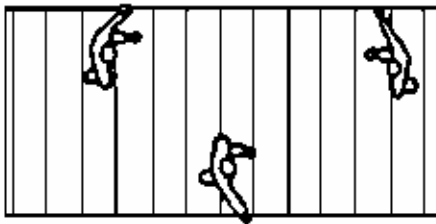


### Descripción

- A** Circulación libre sin restricciones. Movimiento rápido. Los adelantamientos no presentan dificultad.
- Módulo  $3,25 \text{ m}^2 / \text{Pers.}$  o más
  - Densidad  $0,31 \text{ Pers./m}^2$  o menos
  - Velocidad  $79,25 \text{ m/min}$  o más
  - Flujo  $22,97 \text{ Pers./m min}$  o más
- B** Velocidad de circulación normal. Circulación en ambos sentidos. Interferencias ocasionales en adelantamientos.
- Módulo  $2,32 - 3,25 \text{ m}^2 / \text{Pers.}$
  - Densidad  $0,43 - 0,31 \text{ Pers./m}^2$
  - Velocidad  $76,20 - 79,25 \text{ m/min}$
  - Flujo  $22,97 - 32,81 \text{ Pers./m min}$
- C** La velocidad de circulación condicionada entre los ocupantes. Adelantamiento con dificultades, pero son posibles.
- Módulo  $1,39 - 2,32 \text{ m}^2 / \text{Pers.}$
  - Densidad  $0,72 - 0,43 \text{ Pers./m}^2$
  - Velocidad  $70,10 - 76,20 \text{ m/min}$
  - Flujo  $32,81 - 49,21 \text{ Pers./m min}$
- D** Reducción de la velocidad de circulación. Densidad crítica. Los adelantamientos presentan dificultad y pueden resultar conflictivos.
- Módulo  $0,93 - 1,39 \text{ m}^2 / \text{Pers.}$
  - Densidad  $1,08 - 0,72 \text{ Pers./m}^2$
  - Velocidad  $60,96 - 70,10 \text{ m/min}$
  - Flujo  $49,21 - 65,62 \text{ Pers./m min}$
- E** Circulación con posibles retenciones. Máximo flujo. Adelantamientos muy conflictivos o imposibles.
- Módulo  $0,46 - 0,93 \text{ m}^2 / \text{Pers}$
  - Densidad  $2,17 - 1,08 \text{ Pers./m}^2$
  - Velocidad  $33,53 - 60,96 \text{ m/min}$
  - Flujo  $65,62 - 82,02 \text{ Pers./m min}$
- F** Velocidad reducida, contacto físico inevitable, adelantamientos imposibles.
- Módulo  $0,46 \text{ m}^2 / \text{Pers.}$  o menos
  - Densidad  $2,17 \text{ Pers./m}^2$  o más
  - Velocidad  $33,53 \text{ m/min}$  o menos
  - Flujo  $82,02 \text{ Pers./m min}$  o más

## CIRCULACIÓN EN DESCENSO POR ESCALERAS

### Modelo



### Descripción

**A** Circulación sin restricciones. Libertad de movimiento. Posible circulación en ambos sentidos.

- Módulo  $1,86 \text{ m}^2 / \text{Pers.}$
- Densidad  $0,54 \text{ Pers./m}^2$
- Velocidad  $38,1 \text{ m/min}$  o más
- Flujo  $16,40 \text{ Pers./m min}$

**B** Velocidad condicionada. Los adelantamientos crean interferencias. Flujo en sentido contrario crea conflictos

- Módulo  $1,39 - 1,86 \text{ m}^2 / \text{Pers.}$
- Densidad  $0,72 - 0,54 \text{ Pers./m}^2$
- Velocidad  $36,58 - 38,10 \text{ m/min}$  ó más
- Flujo  $16,40 - 22,97 \text{ Pers./m min}$

**C** Velocidad parcialmente restringida. Adelantamientos y flujo inverso restringido.

- Módulo  $0,93 - 1,39 \text{ m}^2 / \text{Pers.}$
- Densidad  $1,07 - 0,72 \text{ Pers./m}^2$
- Velocidad  $35,05 - 36,58 \text{ m/min}$
- Flujo  $22,97 - 32,81 \text{ Pers./m min.}$

**D** Velocidad restringida. Adelantamientos muy dificultosos. Flujo inverso complicado.

- Módulo  $0,66 - 0,93 \text{ m}^2 / \text{Pers.}$
- Densidad  $1,52 - 1,07 \text{ Pers./m}^2$
- Velocidad  $32,00 - 35,05 \text{ m/min}$
- Flujo  $32,81 - 42,65 \text{ Pers./m min}$

**E** Circulación densa. Imposibilidad de adelantamientos. Probables paradas ocasionales.

- Módulo  $0,37 - 0,66 \text{ m}^2 / \text{Pers.}$
- Densidad  $2,70 - 1,52 \text{ Pers./m}^2$
- Velocidad  $25,91 - 32,00 \text{ m/min}$
- Flujo  $42,65 - 55,77 \text{ Pers./m min}$

**F** Velocidad severamente restringida. Circulación con contacto entre los ocupantes.

- Módulo  $0,37 \text{ m}^2 / \text{Pers.}$  o menos
- Densidad  $2,70 \text{ Pers./m}^2$
- Velocidad  $25,91 \text{ m/min}$  o menos
- Flujo  $55,77 \text{ Pers./m min.}$  o más





**Tablas de cálculos proporcionados por EXITE3 en la resolución del CASO7**

**RECINTO 1**

I	Ocupación				Retención			Flujo			Tiempo	
	O1	O1/S1	S1O1	C1	O1/S1	S1O1	C1	O1/S1	S1O1	C1	O1/S1	S1O1
0	122	56	0	0								
1	68	29	27	0	29	0	0	27	0		1	1
2	48	19	30	7	19	20	0	10	7		1	1
3	34	12	30	14	12	23	7	7	7		1	1
4	20	5	30	21	5	23	14	7	7		1	1
5	8	0	28	28	0	23	21	5	7		1	1
6	1	0	21	35	0	21	28	0	7		1	1
7	0	0	14	42	0	14	35	0	7		1	1
8	0	0	7	49	0	7	42	0	7		1	1
9	0	0	0	56	0	0	49	0	7		1	1
10	0	0	0	56	0	0	56	0	0		1	1
11	0	0	0	56	0	0	56	0	0		1	1
12	0	0	0	56	0	0	56	0	0		1	1
13	0	0	0	56	0	0	56	0	0		1	1
14	0	0	0	56	0	0	56	0	0		1	1
15	0	0	0	56	0	0	56	0	0		1	1

I	Ocupación			Retención			Flujo		Tiempo		
	O1/S2	S2O1	DS2	O1/S2	S2O1	DS2	O1/S2	S2O1	O1/S2	S2O1	
0		66	0	0							
1		39	27	0	39	0	0	27	0	1	1
2		29	30	7	29	20	0	10	7	1	1
3		22	30	14	22	23	7	7	7	1	1
4		15	30	21	15	23	14	7	7	1	1
5		8	30	28	8	23	21	7	7	1	1
6		1	30	35	1	23	28	7	7	1	1
7		0	24	42	0	23	35	1	7	1	1
8		0	17	49	0	17	42	0	7	1	1
9		0	10	56	0	10	49	0	7	1	1
10		0	3	63	0	3	56	0	7	1	1
11		0	0	66	0	0	63	0	3	1	1
12		0	0	66	0	0	66	0	0	1	1
13		0	0	66	0	0	66	0	0	1	1
14		0	0	66	0	0	66	0	0	1	1
15		0	0	66	0	0	66	0	0	1	1

**RECINTO 2**

I	Ocupación				Retención			Flujo		Tiempo		
	O2	O2/S2	S2O2	C3	O2/S2	S2O2	C3	O2/S2	S2O2	C3	O2/S2	S2O2
0	45	10	0	0								
1	14	0	10	0	0	0	0	10	0		1	1
2	0	0	3	7	0	3	0	0	7		1	1
3	0	0	0	10	0	0	7	0	3		1	1
4	0	0	0	10	0	0	10	0	0		1	1
5	0	0	0	10	0	0	10	0	0		1	1
6	0	0	0	10	0	0	10	0	0		1	1
7	0	0	0	10	0	0	10	0	0		1	1
8	0	0	0	10	0	0	10	0	0		1	1
9	0	0	0	10	0	0	10	0	0		1	1
10	0	0	0	10	0	0	10	0	0		1	1
11	0	0	0	10	0	0	10	0	0		1	1
12	0	0	0	10	0	0	10	0	0		1	1
13	0	0	0	10	0	0	10	0	0		1	1
14	0	0	0	10	0	0	10	0	0		1	1
15	0	0	0	10	0	0	10	0	0		1	1

I	Ocupación			Retención			Flujo		Tiempo		
	O2/S1	S1O2	DS3	O2/S1	S1O2	DS3	O2/S1	S1O2	O2/S1	S1O2	
0		35	0	0							
1		14	21	0	14	0	0	21	0	1	1
2		0	28	7	0	14	0	14	7	1	1
3		0	21	14	0	21	7	0	7	1	1
4		0	14	21	0	14	14	0	7	1	1
5		0	7	28	0	7	21	0	7	1	1
6		0	0	35	0	0	28	0	7	1	1
7		0	0	35	0	0	35	0	0	1	1
8		0	0	35	0	0	35	0	0	1	1
9		0	0	35	0	0	35	0	0	1	1
10		0	0	35	0	0	35	0	0	1	1
11		0	0	35	0	0	35	0	0	1	1
12		0	0	35	0	0	35	0	0	1	1
13		0	0	35	0	0	35	0	0	1	1
14		0	0	35	0	0	35	0	0	1	1
15		0	0	35	0	0	35	0	0	1	1

## RECINTO 3

I	Ocupación				Retención			Flujo		Tiempo	
	O3	O3/S1	S1O3	C1	O3/S1	S1O3	C1	O3/S1	S1O3	O3/S1	S1O3
0	230	77	0	0							
1	140	47	30	0	47	0	0	30	0	1	1
2	119	40	30	7	40	23	0	7	7	1	1
3	98	33	30	14	33	23	7	7	7	1	1
4	77	26	30	21	26	23	14	7	7	1	1
5	56	19	30	28	19	23	21	7	7	1	1
6	35	12	30	35	12	23	28	7	7	1	1
7	17	5	30	42	5	23	35	7	7	1	1
8	5	0	28	49	0	23	42	5	7	1	1
9	0	0	21	56	0	21	49	0	7	1	1
10	0	0	14	63	0	14	56	0	7	1	1
11	0	0	7	70	0	7	63	0	7	1	1
12	0	0	0	77	0	0	70	0	7	1	1
13	0	0	0	77	0	0	77	0	0	1	1
14	0	0	0	77	0	0	77	0	0	1	1
15	0	0	0	77	0	0	77	0	0	1	1

I	Ocupación				Retención			Flujo		Tiempo	
	O3	O3/S2	S2O3	CR1	O3/S2	S2O3	CR1	O3/S2	S2O3	O3/S2	S2O3
0		69	0	0							
1		39	30	0	39	0	0	30	0	1	1
2		32	30	7	32	23	0	7	7	1	1
3		25	30	14	25	23	7	7	7	1	1
4		18	30	21	18	23	14	7	7	1	1
5		11	30	28	11	23	21	7	7	1	1
6		4	30	35	4	23	28	7	7	1	1
7		0	27	42	0	23	35	4	7	1	1
8		0	20	49	0	20	42	0	7	1	1
9		0	13	56	0	13	49	0	7	1	1
10		0	6	63	0	6	56	0	7	1	1
11		0	0	69	0	0	63	0	6	1	1
12		0	0	69	0	0	69	0	0	1	1
13		0	0	69	0	0	69	0	0	1	1
14		0	0	69	0	0	69	0	0	1	1
15		0	0	69	0	0	69	0	0	1	1

I	Ocupación				Retención			Flujo		Tiempo	
	O3	O3/S3	S3O3	C2	O3/S3	S3O3	C2	O3/S3	S3O3	O3/S3	S3O3
0		84	0	0							
1		54	30	0	54	0	0	30	0	1	1
2		47	30	7	47	23	0	7	7	1	1
3		40	30	14	40	23	7	7	7	1	1
4		33	30	21	33	23	14	7	7	1	1
5		26	30	28	26	23	21	7	7	1	1
6		19	30	35	19	23	28	7	7	1	1
7		12	30	42	12	23	35	7	7	1	1
8		5	30	49	5	23	42	7	7	1	1
9		0	28	56	0	23	49	5	7	1	1
10		0	21	63	0	21	56	0	7	1	1
11		0	14	70	0	14	63	0	7	1	1
12		0	7	77	0	7	70	0	7	1	1
13		0	0	84	0	0	77	0	7	1	1
14		0	0	84	0	0	84	0	0	1	1
15		0	0	84	0	0	84	0	0	1	1

**RECINTO 4**

I	Ocupación				Retención			Flujo		Tiempo	
	O4	O4/S2	S2O4	C2	O4/S2	S2O4	C2	O4/S2	S2O4	O4/S2	S2O4
0	151	74	0	0							
1	91	44	30	0	44	0	0	30	0	1	1
2	77	37	30	7	37	23	0	7	7	1	1
3	63	30	30	14	30	23	7	7	7	1	1
4	49	23	30	21	23	23	14	7	7	1	1
5	35	16	30	28	16	23	21	7	7	1	1
6	21	9	30	35	9	23	28	7	7	1	1
7	7	2	30	42	2	23	35	7	7	1	1
8	0	0	25	49	0	23	42	2	7	1	1
9	0	0	18	56	0	18	49	0	7	1	1
10	0	0	11	63	0	11	56	0	7	1	1
11	0	0	4	70	0	4	63	0	7	1	1
12	0	0	0	74	0	0	70	0	4	1	1
13	0	0	0	74	0	0	74	0	0	1	1
14	0	0	0	74	0	0	74	0	0	1	1
15	0	0	0	74	0	0	74	0	0	1	1

I	Ocupación				Retención			Flujo		Tiempo	
	O4	O4/S1	S1O4	C4	O4/S1	S1O4	C4	O4/S1	S1O4	O4/S1	S1O4
0		77	0	0							
1		47	30	0	47	0	0	30	0	1	1
2		40	30	7	40	23	0	7	7	1	1
3		33	30	14	33	23	7	7	7	1	1
4		26	30	21	26	23	14	7	7	1	1
5		19	30	28	19	23	21	7	7	1	1
6		12	30	35	12	23	28	7	7	1	1
7		5	30	42	5	23	35	7	7	1	1
8		0	28	49	0	23	42	5	7	1	1
9		0	21	56	0	21	49	0	7	1	1
10		0	14	63	0	14	56	0	7	1	1
11		0	7	70	0	7	63	0	7	1	1
12		0	0	77	0	0	70	0	7	1	1
13		0	0	77	0	0	77	0	0	1	1
14		0	0	77	0	0	77	0	0	1	1
15		0	0	77	0	0	77	0	0	1	1

VIA 1

I	Ocupación					Retención					Flujo				Tiempo				
	P13	P12	C1	P11	DS1	P13	P12	C1	P11	DS1	P13 P12	P12 C1	C1 P11	P11 DS1	P13 P12	P12 C1	C1 P11	P11 DS1	
0	0	0	0		0														
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
2	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	1	1	1	1	1
3	0	0	14	14	14	0	0	0	0	14	0	0	14	14	1	1	1	1	1
4	0	0	14	14	28	0	0	0	0	28	0	0	14	14	1	1	1	1	1
5	0	0	14	14	42	0	0	0	0	42	0	0	14	14	1	1	1	1	1
6	0	0	14	14	56	0	0	0	0	56	0	0	14	14	1	1	1	1	1
7	0	0	14	14	70	0	0	0	0	70	0	0	14	14	1	1	1	1	1
8	0	0	14	14	84	0	0	0	0	84	0	0	14	14	1	1	1	1	1
9	0	0	14	14	98	0	0	0	0	98	0	0	14	14	1	1	1	1	1
10	0	0	7	14	112	0	0	0	0	112	0	0	7	14	1	1	1	1	1
11	0	0	7	7	119	0	0	0	0	119	0	0	7	7	1	1	1	1	1
12	0	0	7	7	126	0	0	0	0	126	0	0	7	7	1	1	1	1	1
13	0	0	0	7	133	0	0	0	0	133	0	0	0	7	1	1	1	1	1
14	0	0	0	0	133	0	0	0	0	133	0	0	0	0	1	1	1	1	1
15	0	0	0	0	133	0	0	0	0	133	0	0	0	0	1	1	1	1	1

VIA 2

I	Ocupación							Retención						
	P13	P21	CR1	P22	C2	P23	DS5	P13	P21	CR1	P22	C2	P23	DS5
0	0	0	0				0							
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	7	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	7	7	21	14	14	0	0	0	0	0	0	14
4	0	0	7	7	21	21	35	0	0	0	0	0	0	35
5	0	0	7	7	21	21	56	0	0	0	0	0	0	56
6	0	0	7	7	21	21	77	0	0	0	0	0	0	77
7	0	0	7	7	21	21	98	0	0	0	0	0	0	98
8	0	0	7	7	21	21	119	0	0	0	0	0	0	119
9	0	0	7	7	21	21	140	0	0	0	0	0	0	140
10	0	0	7	7	21	21	161	0	0	0	0	0	0	161
11	0	0	6	7	21	21	182	0	0	0	0	0	0	182
12	0	0	0	6	17	21	203	0	0	0	0	0	0	203
13	0	0	0	0	7	17	220	0	0	0	0	0	0	220
14	0	0	0	0	0	7	227	0	0	0	0	0	0	227
15	0	0	0	0	0	0	227	0	0	0	0	0	0	227

I	Flujo							Tiempo						
	P13 P21	P21 CR1	CR1 P22	P22 C2	C2 P23	P23 DS5	P13 P21	P21 CR1	CR1 P22	P22 C2	C2 P23	P23 DS5		
0														
1	0	0	0	0	14	0	1	1	1	1	1	1		
2	0	0	7	7	21	14	1	1	1	1	1	1		
3	0	0	7	7	21	21	1	1	1	1	1	1		
4	0	0	7	7	21	21	1	1	1	1	1	1		
5	0	0	7	7	21	21	1	1	1	1	1	1		
6	0	0	7	7	21	21	1	1	1	1	1	1		
7	0	0	7	7	21	21	1	1	1	1	1	1		
8	0	0	7	7	21	21	1	1	1	1	1	1		
9	0	0	7	7	21	21	1	1	1	1	1	1		
10	0	0	7	7	21	21	1	1	1	1	1	1		
11	0	0	6	6	17	21	1	1	1	1	1	1		
12	0	0	0	0	7	17	1	1	1	1	1	1		
13	0	0	0	0	0	7	1	1	1	1	1	1		
14	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1		
15	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1		

VIA 3

I	Ocupación							Retención						
	CR1	P31	C3	P32	C4	P33	DS4	CR1	P31	C3	P32	C4	P33	DS4
0	0	0	0				0							
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	7	0	7	7	14	14	0	0	0	0	0	0	0	0
3	7	0	3	3	10	10	14	0	0	0	0	0	0	14
4	7	0	0	0	7	7	24	0	0	0	0	0	0	24
5	7	0	0	0	7	7	31	0	0	0	0	0	0	31
6	7	0	0	0	7	7	38	0	0	0	0	0	0	38
7	7	0	0	0	7	7	45	0	0	0	0	0	0	45
8	7	0	0	0	7	7	52	0	0	0	0	0	0	52
9	7	0	0	0	7	7	59	0	0	0	0	0	0	59
10	7	0	0	0	7	7	66	0	0	0	0	0	0	66
11	6	0	0	0	7	7	73	0	0	0	0	0	0	73
12	0	0	0	0	7	7	80	0	0	0	0	0	0	80
13	0	0	0	0	0	0	87	0	0	0	0	0	0	87
14	0	0	0	0	0	0	87	0	0	0	0	0	0	87
15	0	0	0	0	0	0	87	0	0	0	0	0	0	87

I	Flujo							Tiempo						
	CR1 P31	P31 C3	C3 P32	P32 C4	C4 P33	P33 DS4	CR1 P31	P31 C3	C3 P32	P32 C4	C4 P33	P33 DS4		
0														
1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
2	0	0	7	7	14	0	1	1	1	1	1	1	1	
3	0	0	3	3	10	14	1	1	1	1	1	1	1	
4	0	0	0	0	7	10	1	1	1	1	1	1	1	
5	0	0	0	0	7	7	1	1	1	1	1	1	1	
6	0	0	0	0	7	7	1	1	1	1	1	1	1	
7	0	0	0	0	7	7	1	1	1	1	1	1	1	
8	0	0	0	0	7	7	1	1	1	1	1	1	1	
9	0	0	0	0	7	7	1	1	1	1	1	1	1	
10	0	0	0	0	7	7	1	1	1	1	1	1	1	
11	0	0	0	0	7	7	1	1	1	1	1	1	1	
12	0	0	0	0	7	7	1	1	1	1	1	1	1	
13	0	0	0	0	0	7	1	1	1	1	1	1	1	
14	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	
15	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	





- 
- 1 B ) ¿Ha oído la señal de alarma ? SI NO
- 2 B ) La intensidad del sonido de la alarma le ha parecido:  
 - Bien de intensidad adecuada a una alarma (sonido fuerte)  
 - De intensidad moderada  
 - De intensidad baja (sonido débil, apenas se oía)
- 3 B ) Cuando ha sonado la alarma ha interpretado que se trataba de:  
 - Un incendio u otra emergencia  
 - Un ejercicio de evacuación (simulacro de evacuación)  
 - Una falsa alarma  
 - No ha sabido de que se trataba
- 
- 1 C ) Inmediatamente después de oírse la señal de alarma cuáles de las siguientes actitudes ha adoptado:  
 - Lo ha dejado todo y se ha dirigido rápidamente a una salida SI NO  
 - Ha seguido trabajando unos instantes: Parar, ordenar, etc.. SI NO  
 - Si estaba en otro lugar, ha vuelto a su puesto de trabajo SI NO  
 - Ha recogido objetos personales antes de dirigirse a la salida SI NO  
 - Ha esperado compañeros/as para dirigirse a la salida SI NO
- 2 C ) En el momento de iniciarse la evacuación después de la alarma  
 - ¿ Ha identificado el coordinador de evacuación de su zona ? SI NO  
 - ¿ Conocía la salida a la cual debía dirigirse ? SI NO  
 - ¿ Ha seguido las instrucciones del coordinador de la zona ? SI NO  
 - ¿ Cree que el coordinador dirigía los trabajadores de la zona ? SI NO  
 - ¿ Se ha limitado a seguir a sus compañeros ? SI NO
- 
- 1 D ) ¿ Considera que el desplazamiento hacia la salida ha sido rápido? SI NO
- 2 D ) ¿ Se han producido retenciones en su recorrido de evacuación? SI NO
- 3 D ) ¿Las retenciones tan solo se han producido en las puertas de salida de la fábrica que conducen directamente al exterior? SI NO
- 4 D ) ¿ En el recorrido de evacuación que Vd. ha efectuado, ha advertido dificultades para abrir alguna puerta? SI NO
- 5 D ) ¿ Ha encontrado obstáculos en la ruta de evacuación que dificultaran el paso: Carretillas, cajas, "palets" o cualquier otro objeto ? SI NO
- 6 D ) ¿ En el recorrido de evacuación ha visto a alguna persona circulando en sentido contrario al de la evacuación? SI NO
- 7 D ) ¿Vd. ha tenido que ayudar o bien ha visto a alguien que ayudaba a algún compañero a salir de la fábrica? SI NO
- 8 D ) ¿Se ha verificado que nadie ha quedado dentro de la fábrica en dependencias anexas, servicios, etc..? SI NO



- |   |    |    |
|---|----|----|
| 1 E ) ¿ Vd. conocía el punto de reunión al cual debía dirigirse?  | SI | NO |
| 2 E ) ¿ Alguien le ha preguntado a Vd. o bien ha visto que preguntaba sobre el lugar al cual debían dirigirse en el exterior de la fábrica? | SI | NO |
| 3 E ) ¿Han seguido andando rápidamente al salir de la fábrica para no producir retenciones en la salida?                                    | SI | NO |
| 4 E ) ¿ Ha sido fácil situarse en el punto de reunión en la misma posición que ocupaban en el interior de la fábrica?                       | SI | NO |
| 5 E ) ¿En el punto de reunión se ha efectuado el recuento?  | SI | NO |
| 6 E ) ¿Ha resultado fácil efectuar el recuento?   | SI | NO |
| <hr/>   |    |    |
| 1 F ) ¿Ha recibido información sobre la forma de actuar en una evacuación de emergencia de la fábrica?                                      | SI | NO |
| 2 F ) ¿ Había leído atentamente el Manual de evacuación de la fábrica en situaciones de emergencia que tiene editado la entidad ?           | SI | NO |
| 3 F ) ¿ Considera que le ha sido útil la información recibida sobre la forma de actuar en una situación de evacuación de emergencia ?       | SI | NO |

Indique cualquier aspecto que Vd. crea, o bien que haya oído comentar, que puede mejorarse en una evacuación de emergencia de la fábrica.

Otros comentarios

La dirección de la entidad le agradece su colaboración.

## MODELO DE INFORME DE LOS COORDINADORES DE EVACUACIÓN UTILIZADO PARA LA EVALUACIÓN DE UN SIMULACRO DE EVACUACIÓN DE UN EDIFICIO INDUSTRIAL

Zona: ..... Fecha: / /

<p>B) Evaluar la reacción del personal de la zona de su responsabilidad al producirse la señal de alarma: ¿Identifican la señal de alarma? ¿Reaccionan de forma inmediata? ¿Preguntan a compañeros sobre que sucede? ¿Actúan de forma excesivamente pausada?, etc.</p>
<p>C1) Evaluar la forma de actuar inmediatamente después de oír la señal de alarma: ¿Recogen objetos personales? ¿Esperan compañeros? ¿Forman grupos para salir? , etc.</p>
<p>C2) Evaluar si las funciones de coordinación de evacuación de la zona es posible efectuarlas de forma fluida: ¿Es posible dirigir la evacuación? ¿Piden su colaboración? ¿Ha indicado la salida a la cual debían dirigirse? ¿Se dirigían a la salida adecuada?, etc.</p>
<p>D1) Evaluar los movimientos de los ocupantes de su zona: ¿Los movimientos estima que han sido rápidos? ¿Han actuado de forma excesivamente relajada?, etc.</p>

D2) Evaluar la situación de los elementos de paso. ¿Han encontrado obstáculos? ¿Ha existido dificultad en abrir alguna puerta? ¿Dónde se han producido las retenciones?

E1) Evaluar la ubicación en el punto de reunión ¿Acuden correctamente al punto de reunión? ¿Se sitúan correctamente?

E2) Evaluar el proceso de recuento: ¿Ha sido posible efectuar recuento? ¿Han colaborado en el proceso de recuento? ¿Considera que el recuento ha sido rápido?

Anote otras incidencias que considere importantes

La dirección de la entidad le agradece su colaboración.



## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA ENCUESTA

### 1) Análisis de muestra: Características personales de los trabajadores

	OFICINAS	WP1 PREP. B	WP2 PREP. A	WP2 CORTE	WP3 MONTAJE 6	WP4 MONTAJE 5	WP5 MONTAJE 7	WP6 MONTAJE 1				TOTAL
Número	4	4	6	4	2	3	3	3				29
%	14	14	21	14	7	10	10	10				

### 2A Características personales

T %

MUJER	3	2	4	2	1	2	2	2			18	62
HOMBRE	1	2	2	2	1	1	1	1			11	38
<b>EDAD</b>												
MENOS DE 20	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0
DE 20-29	0	2	4	3	1	1	1	1			13	45
DE 30-39	4	1	0	1	1	1	2	0			10	34
DE 40-49	0	1	2	0	0	1	0	2			6	21
<b>DISCAPACIDAD</b>												
MOVILIDAD	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0
AUDITIVA	0	0	0		0	0	0	0			0	0
OTRAS	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0
<b>ANTIGÜEDAD</b>												
MENOS 1 MES	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0
1-3 MESES	0	0	0	1	0	0	0	0			1	3
3 MESES-1AÑO	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0
MÁS 1 AÑO	4	4	6	3	2	3	3	3			28	97

### 3A ¿Había participado en otros simulacros de emergencia?

T %

SI	3	4	4	3	2	3	2	3			24	83
NO	1	0	2	1	0	0	1	0			5	17

El 62 % de las personas encuestadas son mujeres, de las cuales el 45% tienen una edad comprendida entre 20 y 29 años y el 34 % de 30 a 39 años, sin ningún tipo de discapacidad, el 97% tiene más de un año de antigüedad en la fábrica y el 83% había participado en otros simulacros de emergencia.

## 2) Posición al producirse la señal de alarma y recorrido de evacuación.

	OFICINAS	WP1 PREP. B	WP2 PREP. A	WP2 CORTE	WP3 MONTAJE 6	WP4 MONTAJE 5	WP5 MONTAJE 7	WP6 MONTAJE 1			TOTAL
Número	4	4	6	4	2	3	3	3			29

### 4A ¿Cual era su posición en el momento de producirse la señal de alarma? T %

SU PUESTO DE TRABAJO	4	3	3	4	2	3	3	2			24	84
OTRO PUESTO TRABAJO	0	1	1	0	0	0	0	0			2	7
DESCANSO, VEST., SERVIC.	0	0	0	0	0	0	0	1			1	3
PASILLO, HALL, VES., ESC.	0	0	1	0	0	0	0	0			1	3
OTRO LUGAR	0	0	1	0	0	0	0	0			1	3

### 5A ¿Ha seguido el recorrido asignado? T %

SI	4	4	4	4	2	3	3	3			27	93
NO	0	0	2	0	0	0	0	0			2	7

## 3) Evaluación de la señal de alarma.

### 1B ¿Ha oído la señal de alarma? T %

SI	4	4	6	4	2	3	3	3			29	100
NO	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0

### 2B La intensidad del sonido de la alarma le ha parecido: T %

ADECUADA	4	4	4	3	2	3	3	3			26	90
MODERADA	0	0	2	1	0	0	0	0			3	10
BAJA	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0

### 3B Cuando ha sonado la alarma ha interpretado que se trataba de: T %

INCENCIO-EMERGENCIA.	1	1	1	1	0	0	1	0			5	17
SIMULACRO EVACUACIÓN	3	3	4	2	1	2	2	2			19	66
FALSA ALARMA	0	0	0	0	1	1	0	0			2	7
NO HA SABIDO	0	0	0	1	0	0	0	1			2	7
NO CONTESTAN	0	0	1	0	0	0	0	0			1	3

El 84% de los trabajadores ocupaban su puesto de trabajo, el 93% ha seguido la ruta de evacuación que tenía asignada, el 100% ha oído la señal de alarma y el 90 % considera adecuada la intensidad de la señal de alarma y finalmente el 66 % ha identificado que se trataba de un simulacro de evacuación, el 17 % ha pensado que se trataba de un incendio u otra emergencia. En general la intensidad de la alarma es la adecuada, pero en la zona de Preparación, el 33% afirman que la alarma era moderada.

#### 4) Actitudes básicas en una evacuación de emergencia.

	OFICINAS	WP1 PREP. B	WP2 PREP. A	WP2 CORTE	WP3 MONTAJE 6	WP4 MONTAJE 5	WP5 MONTAJE 7	WP6 MONTAJE 1				TOTAL
Número	4	4	6	4	2	3	3	3				29

#### 1C Inmediatamente después de oír la señal cuáles de las siguientes actitudes ha adoptado:

SALIR RÁPIDAMENTE .....												
SI	1	3	3	4	2	2	3	3			21	73
NO	2	0	0	0	0	1	0	0			3	10
NO CONTESTAN	1	1	3	0	0	0	0	0			5	17
SEGUIR, ORDENAR												
SI	1	1	0	0	0	0	0	0			2	7
NO	2	3	1	2	0	2	1	2			13	45
NO CONTESTAN	1	0	5	2	2	1	2	1			14	48
VOLVER PUESTO TRABAJO												
SI	0	0	0	0	0	0	0	1			1	3
NO	3	2	1	2	0	1	1	1			11	38
NO CONTESTAN	1	2	5	2	2	2	2	1			17	59
RECOGER OBJETOS PERSON.												
SI	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0
NO	3	3	1	2	0	2	1	2			14	48
NO CONTESTAN	1	1	5	2	2	1	2	1			15	52
ESPERAR COMPAÑEROS.												
SI	2	0	2	0	0	1	0	1			6	21
NO	1	3	1	2	0	1	1	1			10	34
NO CONTESTAN	1	1	3	2	2	1	2	1			13	45

El 73% de las personas encuestadas afirma que ha salido de la fábrica rápidamente, luego las respuestas a las preguntas siguientes parece ser que la encuesta resulta confusa y existe un determinado número de cuestiones sin contestar. Globalmente los resultados se estiman aceptables.

### 5) Evaluación de la coordinación

	OFICINAS	WP1 PREP. B	WP2 PREP. A	WP2 CORTE	WP3 MONTAJE 6	WP4 MONTAJE 5	WP5 MONTAJE 7	WP6 MONTAJE 1			TOTAL
Número	4	4	6	4	2	3	3	3			29

### 2C En el momento de iniciarse la evacuación después de la alarma

IDENTIFICA COOR. ZONA...												
SI	3	4	2	2	2	2	2	2			19	66
NO	1	0	0	1	0	0	1	1			4	14
NO CONTESTAN	0	0	4	1	0	1	0	0			6	20
CONOCIA SALIDA A LA.....												
SI	2	3	2	4	0	1	3	2			17	59
NO	2	1	0	0	2	1	0	1			7	24
NO CONTESTAN	0	0	4	0	0	1	0	0			5	17

INSTRUC. COORDINA .ZONA.												
SI	2	4	4	3	2	3	3	3			24	83
NO	1	0	0	0	0	0	0	0			1	3
NO CONTESTAN	1	0	2	1	0	0	0	0			4	14
COORDINADOR DIRIGÍA												
SI	2	4	2	2	2	2	3	3			20	69
NO	2	0	0	0	0	0	0	0			2	7
NO CONTESTAN	0	0	4	2	0	1	0	0			7	24
HA SEGUIDO COMPAÑEROS.												
SI	3	3	1	0	2	2	1	2			14	48
NO	0	1	2	2	0	1	2	1			9	31
NO CONTESTAN	1	0	3	2	0	0	0	0			6	21



Sólo el 66% identifica el Coordinador, el 59% conocía la salida a la cual debía dirigirse, y el 48 % admite que se ha limitado a seguir a sus compañeros. Posiblemente en la encuesta se están planteando cuestiones difíciles de valorar.

### 6) Evaluación del desarrollo de la evacuación

	OFICINAS	WP1 PREP. B	WP2 PREP. A	WP2 CORTE	WP3 MONTAJE 6	WP4 MONTAJE 5	WP5 MONTAJE 7	WP6 MONTAJE 1			TOTAL
Número	4	4	6	4	2	3	3	3			29

#### 1D ¿Considera el desplazamiento hacia la salida rápido? T %

SI	3	4	4	4	1	3	3	2			24	83
NO	1	0	1	0	1	0	0	1			4	14
NO CONTESTAN	0	0	1	0	0	0	0	0			1	3

#### 2D ¿Se han producido retenciones en su recorrido de evacuación? T %

SI	1	1	4	0	2	0	1	1			10	34
NO	3	3	2	4	0	3	2	2			19	66
NO CONTESTAN	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0

#### 3D ¿Las retenciones tan solo se han producido en las puertas de salida de la fábrica que conducen directamente al exterior? T %

SI	2	3	5	1	2	0	1	1			15	52
NO	2	1	1	1	0	2	2	1			10	34
NO CONTESTAN	0	0	0	2	0	1	0	1			4	14

#### 4D ¿En el recorrido de evacuación que Vd. ha efectuado, ha advertido dificultades para abrir alguna puerta? T %

SI	1	0	0	0	0	0	0	0			1	3
NO	3	4	5	4	2	3	3	3			27	94
NO CONTESTAN	0	0	1	0	0	0	0	0			1	3

**5D ¿Ha encontrado obstáculos en la ruta de evacuación que dificultaran el paso: Carretillas, cajas, palets o cualquier otro objeto?** T %

SI	1	1	4	1	0	0	0	0			7	24
NO	3	3	1	3	2	3	3	3			21	73
NO CONTESTAN	0	0	1	0	0	0	0	0			1	3

**6D ¿En el recorrido de evacuación ha visto a alguna persona circulando en sentido contrario al de la evacuación?** T %

SI	0	0	1	0	0	0	0	0			1	3
NO	4	4	4	4	2	3	3	3			27	94
NO CONTESTAN	0	0	1	0	0	0	0	0			1	3

**7D ¿Vd. ha tenido que ayudar o bien ha visto a alguien que ayudaba a algún compañero a salir de la fábrica?** T %

SI	0	0	1	0	0	0	0	0			1	3
NO	4	4	4	4	2	3	3	3			27	94
NO CONTESTAN	0	0	1	0	0	0	0	0			1	3

**8D ¿Se ha verificado que nadie se había quedado dentro de la fábrica en dependencias anexas, servicios, etc..?** T %

SI	2	1	5	3	1	2	2	1			17	59
NO	0	1	0	0	0	0	0	1			2	7
NO CONTESTAN	2	2	1	1	1	1	1	1			10	34

El 83% considera que los desplazamientos han sido rápidos, los ocupantes de la zona de preparación afirman que se han producido retenciones en la salida de esta sección, en otras secciones han sido moderadas las retenciones, parece que ha habido alguna retención en puntos intermedios, en la zona de preparación han encontrado obstáculos que dificultaban la salida. La circulación ha sido en un solo sentido. No han sido precisas ayudas. Se considera necesario contrastar con los informes de los Coordinadores para valorar el problema de las retenciones. Por los tiempos de evacuación de la fábrica no parece un problema importante.

## 8) Valoración de la situación en el punto de reunión

	OFICINAS	WP1 PREP. B	WP2 PREP. A	WP2 CORTE	WP3 MONTAJE 6	WP4 MONTAJE 5	WP5 MONTAJE 7	WP6 MONTAJE 1			TOTAL
Número	4	4	6	4	2	3	3	3			29

## 1E ¿Vd. conocía el punto de reunión al cual debía dirigirse?

T %

SI	2	3	2	3	0	1	1	3			15	52
NO	2	1	3	1	2	2	2	0			13	45
NO CONTESTAN	0	0	1	0	0	0	0	0			1	3

## 2E ¿Alguien le ha preguntado a Vd. o bien ha visto que preguntaba sobre el lugar al cual debían dirigirse en el exterior de la fábrica

T %

SI	1	2	2	1	2	2	1	1			12	41
NO	3	2	3	3	0	1	2	2			16	56
NO CONTESTAN	0	0	1	0	0	0	0	0			1	3

## 3E ¿Han seguido andando rápidamente al salir de la fábrica para no producir retenciones en la salida?

T %

SI	3	4	5	4	2	2	3	3			26	90
NO	1	0	1	0	0	1	0	0			3	10
NO CONTESTAN	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0

## 4E ¿Ha sido fácil situarse en el punto de reunión en la misma posición que ocupaban en el interior de la fábrica?

T %

SI	3	3	3	3	2	2	2	0			18	62
NO	0	1	3	1	0	0	1	2			8	28
NO CONTESTAN	1	0	0	0	0	1	0	1			3	10

## 5E ¿En el punto de reunión se ha efectuado el recuento?

T %

SI	4	3	4	3	2	2	3	3			24	83
NO	0	0	2	1	0	0	0	0			3	10
NO CONTESTAN	0	1	0	0	0	1	0	0			2	7

**6E ¿Ha resultado fácil efectuar el recuento?****T %**

SI	3	3	4	2	2	2	3	1			<b>20</b>	<b>69</b>
NO	1	0	1	0	0	0	0	2			<b>4</b>	<b>14</b>
NO CONTESTAN	0	1	1	2	0	1	0	0			<b>5</b>	<b>17</b>

El 56% no conocía el punto de reunión, el 90% afirma que ha seguido andando rápido al salir de la fábrica, solamente el 62% afirma que le ha sido fácil situarse en el punto de reunión, el 83 % afirma que se ha efectuado el recuento.

**9) Valoración del sistema de formación/información**

	OFICINAS	WP1 PREP. B	WP2 PREP. A	WP2 CORTE	WP3 MONTAJE 6	WP4 MONTAJE 5	WP5 MONTAJE 7	WP6 MONTAJE 1			<b>TOTAL</b>
Número	4	4	6	4	2	3	3	3			<b>29</b>

**1F ¿Había recibido información sobre la forma de actuar en una evacuación de emergencia de la fábrica?****T %**

SI	3	4	5	4	2	3	3	3			<b>27</b>	<b>93</b>
NO	1	0	1	0	0	0	0	0			<b>2</b>	<b>7</b>
NO CONTESTAN	0	0	0	0	0	0	0	0			<b>0</b>	<b>0</b>

**2F ¿Había leído atentamente el folleto de instrucciones a seguir en el caso de una evacuación de emergencia que tiene editado la empresa?****T %**

SI	2	4	3	3	1	3	3	2			<b>21</b>	<b>72</b>
NO	2	0	3	1	1	0	0	1			<b>8</b>	<b>28</b>
NO CONTESTAN	0	0	0	0	0	0	0	0			<b>0</b>	<b>0</b>

**3F ¿Considera que le ha sido útil la información recibida sobre la forma de actuar en una situación de evacuación de emergencia****T %**

SI	4	4	5	4	2	3	3	3			<b>28</b>	<b>97</b>
NO	0	0	1	0	0	0	0	0			<b>1</b>	<b>3</b>
NO CONTESTAN	0	0	0	0	0	0	0	0			<b>0</b>	<b>0</b>

Mayoritariamente se considera útil la información recibida.

## ANÁLISIS DE LOS INFORMES DE LOS COORDINADORES DE EVACUACIÓN

B) Evaluar la reacción del personal de la zona de su responsabilidad al producirse la señal de alarma

- Valoran que identifican la señal de alarma.
- La reacción a la señal de alarma no es inmediata.
- Preguntan a compañeros sobre qué está sucediendo, hablan entre ellos.
- No actúan de forma extremadamente rápida, advierten que se trata de un simulacro y se lo toman con cierta tranquilidad, dentro de una actuación perfectamente correcta.
- Utilizan las salidas correctas.

C1) Evaluar la forma de actuar inmediatamente después de oír la señal de alarma.

- No se paran a recoger objetos personales.
- Existe discrepancia entre los coordinadores de las diferentes secciones: Afirman y niegan que esperan compañeros y si se forman grupos para salir.
- En la sección de Corte se afirma que la agrupación se efectúa en la salida.

C2) Evaluar si las funciones de coordinación de evacuación de la zona es posible efectuarlas de forma fluida.

- Es posible dirigir la evacuación. WP1 tiene dificultades, por tener dos salidas muy próximas la S1 y la S2 y la distribución debe ser muy rápida
- En algunos casos piden colaboración, en otros automáticamente se dirigen a la salida.
- Cuando pedían ayuda se ha indicado la salida a la cual debían dirigirse.
- En general se dirigían a la salida adecuada.

D1) Evaluar los movimientos de los ocupantes de su zona.

- En general valoran que los movimientos han sido rápidos.
- Consideran que no han actuado de forma excesivamente relajada.

D2) Evaluar la situación de los elementos de paso.
<ul style="list-style-type: none"><li>- En la zona de preparación ha existido algún obstáculo, en el resto de zonas no han habido obstáculos que dificultaran la evacuación.</li><li>- No ha existido dificultad en abrir alguna puerta.</li><li>- Las retenciones se han producido en las puertas de salida.</li></ul>
E1) Evaluar la ubicación en el punto de reunión.
<ul style="list-style-type: none"><li>- Acuden correctamente al punto de reunión, una vez agrupados tienden a dispersarse rápidamente.</li><li>- WP5 afirma que el coordinador debe marcar el punto de reunión.</li><li>- En general se sitúan correctamente.</li></ul>
E2) Evaluar el proceso de recuento.
<ul style="list-style-type: none"><li>- Ha sido posible efectuar recuento.</li><li>- Han colaborado positiva y activamente en el proceso de recuento.</li><li>- En general consideran que el recuento ha sido rápido.</li></ul>
COMENTARIOS
<ul style="list-style-type: none"><li>- Algunos obstáculos en las salidas de prevención.</li><li>- Algunos vehículos próximos a las salidas de emergencia dificultaban la circulación.</li><li>- Muy “apiñados” en el punto de reunión y dificultaba el recuento.</li><li>- El Coordinador de evacuación en el momento del recuento tiene dificultad en saber las personas que había en la sección.</li><li>- Utilidad de efectuar periódicamente simulacros para corregir errores.</li></ul>