



**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 EVACUACIÓN 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