

## **Procedimientos gráficos y analíticos para validar los modelos utilizados en el estudio de la evacuación de edificios**

**Salvador Casadesús Pursals<sup>1</sup>, Federico Garriga Garzón<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Dep. de Estadística e Investigación Operativa, <sup>2</sup>Dep. de Organización de Empresas.  
Escuela Técnica Superior de Ingenierías Industrial y Aeronáutica, Universidad Politécnica de Catalunya,  
c/. Colom 11, 08222 Terrassa. salvador.casadesus@upc.edu, federico.garriga@upc.edu.

**Palabras clave:** Evacuación de edificios, optimización de la evacuación, gestión de la seguridad de las personas en los edificios

### **1. Necesidad de validar los modelos a partir de los resultados obtenidos en simulacros y en ensayos de evacuación**

Normalmente cuando se utiliza un modelo para estudiar un problema es necesario proceder a su validación. Una vez ha finalizado este proceso, el modelo puede servir para analizar otras situaciones con una cierta verosimilitud. En el problema de la evacuación de edificios las exigencias en el proceso de validación, de los modelos matemáticos utilizados en su estudio, va más allá de la estricta responsabilidad científica, al operar con la seguridad de las personas, las conclusiones y afirmaciones que se realicen deben ser formuladas con la máxima certeza.

Para estudiar la evacuación de edificios se puede recurrir a diversos modelos de locomoción de las personas, los más relevantes y utilizados actualmente son los de J. J. Fruins (1987), J. L. Pauls (1996), Predtechenskii & Milinskii (1978), H. Nelson (1996) y posiblemente en un futuro lo sean los de V. V. Kooskelnikov (2008). En un principio resulta más que razonable aceptar la validación efectuada por cada autor de su modelo, sin embargo debe verificarse que las condiciones de locomoción de las personas que dieron lugar al correspondiente modelo pueden considerarse similares a las de los ocupantes del edificio objeto de estudio. De una forma más concreta, debe verificarse si los parámetros proporcionados por el modelo reproducen de forma adecuada la situación estudiada.

### **2. Etapas y principios del proceso de validación del modelo**

La realización de ensayos y simulacros de evacuación son una actividad costosa, es evidente en edificios en los cuales se realiza una actividad productiva. También lo es en edificios de pública concurrencia, a menudo es necesario contratar gran número de personas para materializar los ensayos. En otras actividades como las escolares también suponen una notable dedicación de tiempo, por ello en todos los casos sería deseable poder verificar los resultados de la forma menos costosa posible.

La primera fórmula que se utilizó para contrastar los modelos era la coincidencia de los tiempos de evacuación teóricos (calculados a partir del modelo) y los experimentales resultantes de simulacros o ensayos, la fragilidad de esta prueba originó la búsqueda de fórmulas que ofrecieran una mayor confianza. Una opción inmediata consistió en analizar la posibilidad de repetir los ensayos o simulacros y comparar los valores teóricos con el valor medio de los mismos. Esta solución tampoco resultó viable, además del coste de cada réplica, se observó la dificultad de poder garantizar que los simulacros o ensayos se realizaban todos ellos en idénticas condiciones y que coincidían con las contempladas en el modelo. Otras

alternativas que se plantearon consisten en el análisis temporal de flujos y el estudio de la función de evacuación inversa. En ambos casos se requiere comparar una serie de valores teóricos con otros registrados en simulacros y/o ensayos. Se observó que el análisis de la función de evacuación inversa resultaba una prueba más directa, requiere menor manipulación de los datos, definitivamente esta es la propuesta que se analiza en este trabajo.

Una dificultad adicional en el proceso de validación del modelo es que se contrastan a la vez aspectos cualitativos y cuantitativos implícitos en las condiciones de locomoción. Las velocidades y los flujos normalmente se dice que dependen de las condiciones geométricas de la vía de circulación, de las densidades de ocupación (Personas por metro cuadrado) y ésta muy a menudo obedece a aspectos de comportamiento de las personas difíciles de determinar. Por ejemplo, las separaciones que se establecen entre los individuos a la salida de actos culturales de personas adultas no tienen nada que ver con la que se produce a las salidas de personas jóvenes en centros de ocio, actividades recreativas o deportivas.

Finalmente la situación más corriente en grandes edificios es que pueden existir diferentes salidas y vías de evacuación. Para validar el modelo de evacuación de un edificio o de un recinto deben validarse los modelos de locomoción de todas las salidas. Esta validación permitirá contrastar la bondad de las soluciones óptimas.

### **2.1. Análisis de la coincidencia de tiempos de evacuación mediante una única prueba**

Los modelos analíticos proporcionan, para un determinado un número de personas  $x_j$  que utiliza una salida  $j$  de un edificio o de un recinto, el valor del tiempo de evacuación  $z$ , dicho valor deberá compararse con el resultante de un simulacro o de un ensayo  $z'$ . Para que la prueba sea estrictamente válida, es obvio que debe existir una plena coincidencia entre 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 confirmar todas estas coincidencias.

$$z = z' \quad (1)$$

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  $j$ . 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. Debe concluirse que aceptar la bondad de un modelo a partir de la coincidencia de los tiempos de evacuación resulta una prueba muy frágil, con probabilidades de conclusiones erróneas, en un sentido u otro, realmente significativas.

### **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, debe 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. Si todo ello fuera posible superarlo, la debilidad de la prueba de la coincidencia de tiempos de evacuación mediante un único ensayo quedaría notablemente superada. Según esta propuesta, no existe otra alternativa que aceptar la validez de los modelos cuando exista una razonable coincidencia en los tiempos de evacuación teóricos con el valor medio de los resultantes de los simulacros o los ensayos de evacuación.

$$z = \bar{z}' \quad (2)$$

Una nueva dificultad surge al tratar de responder a las preguntas ¿Qué significa razonable coincidencia? ¿Cuales serían las diferencias aceptables?. Seguramente son necesarios razonamientos similares a los realizados en la solución de las pruebas de hipótesis estadísticas: Establecer unos niveles de riesgo aceptables y definir los supuestos críticos.

### 3. Validar el modelo a partir de la función de evacuación inversa

Una propuesta mucho más interesante para validar el modelo, con una aceptable viabilidad, se basa en una prueba subjetiva que compara diferentes magnitudes obtenidas en una única prueba. La solución que se plantea consiste en contabilizar el número de personas que han abandonado un recinto por una determinada salida  $j$  en determinados instantes  $s_j(z)$  y estudiar las diferencias que existen con los valores que proporciona la función de evacuación inversa del modelo analítico  $p_j(z)$ . Si en la resolución del problema se utilizan redes dinámicas de flujo, las pruebas pueden realizarse en cualquier punto de la red: Salidas de recinto o bien en nodos intermedios de una vía de evacuación.

#### 3.1. Obtención de la función de salidas $s_j(z)$ y la función de evacuación inversa $p_j(z)$

La función de salidas  $s_j(z)$  se obtiene registrando el número total de personas que han abandonado un recinto por una salida  $j$  en determinados instantes  $z$ ,  $s_j(z)$  indica las salidas que se han registrado hasta el momento en que se contabilizan, de ahí que el gráfico adopte una forma estrictamente creciente, el primer punto indica el instante en el cual los ocupantes llegan al punto de control, casi siempre cuando empiezan a abandonar el recinto, y el último corresponde al instante en el cual finaliza la evacuación. Excepto los puntos inicial  $z_1$  y final  $z'$ , normalmente las mediciones corresponderán a intervalos regulares de tiempo. En la figura 1 se muestra la representación de una función de salidas, además del desarrollo de la evacuación se observan los instantes  $z_1$  y  $z'$ .

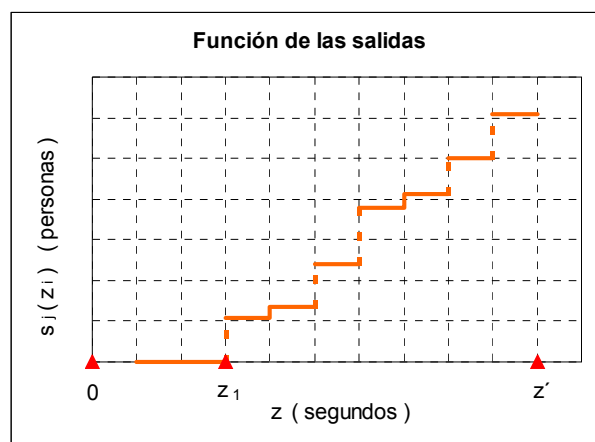
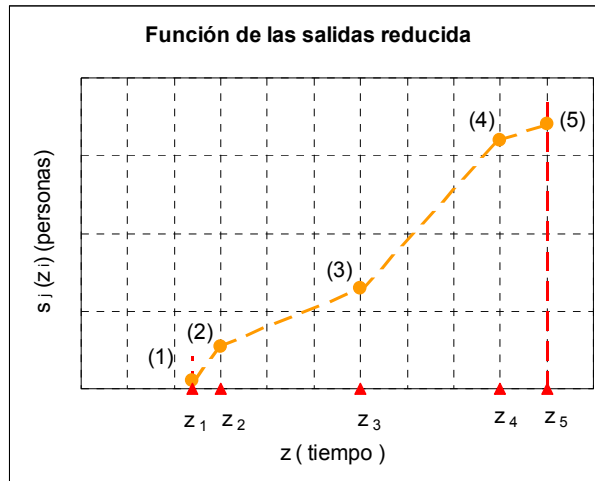


Figura 1. Representación de una función de salidas

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 menos 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 2.** Representación de una función de salida reducida

En la figura 2 se presenta una situación más viable, consistente en efectuar cuatro ó cinco mediciones, que corresponden a los instantes en los cuales los primeros ocupantes cruzan el punto de control, algunas mediciones intermedias 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  $z' = z_5$  y el resto de mediciones, los puntos (2), (3) y (4), corresponden a instantes intermedios.

Los valores experimentales  $s_j(z)$  deben compararse con los teóricos que proporciona la función de evacuación inversa  $p_j(z)$  que se obtiene a partir de la función de evacuación  $t_j(x)$ . La función de evacuación  $t_j(x)$  determina el tiempo que les supone a  $x$  personas abandonar un recinto utilizando la salida  $j$ . Según la expresión (1) resultan tres fases: el tiempo de demora en el inicio de la evacuación  $t_{0,j}$ , el tiempo de circulación que depende de la longitud del recorrido  $l_j$  y de la velocidad media de circulación  $v_j$  y tiempo de flujo que depende de las personas que utilicen la salida y del flujo medio  $f_j$ , debe observarse que las velocidades de circulación y los flujos son función de la densidad de ocupación, a sea del número de personas  $x_j$  que utilizan la salida  $j$

$$t_j(x_j) = t_{0,j} + \frac{l_j}{v_j} + \frac{x_j}{f_j} \quad (3)$$

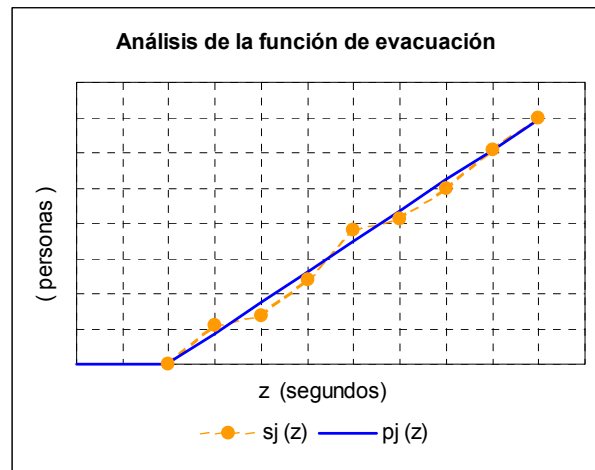
Mientras que la función de evacuación inversa expresa el número total de personas que son capaces de abandonar un recinto utilizando la salida  $j$  en un tiempo  $z$ , se determina mediante la expresión (2), consiste en la inversa de la función de evacuación  $t_j(x)$

$$p_j(z) = \begin{cases} 0 & z < (t_{0,j} + \frac{l_j}{v_j}) \\ \left[ z - (t_{0,j} + \frac{l_j}{v_j}) \right] \times f_j & z \geq (t_{0,j} + \frac{l_j}{v_j}) \end{cases} \quad (4)$$

### 3.2. Análisis de la coincidencia o discrepancia entre $s_j(z)$ y $p_j(z)$

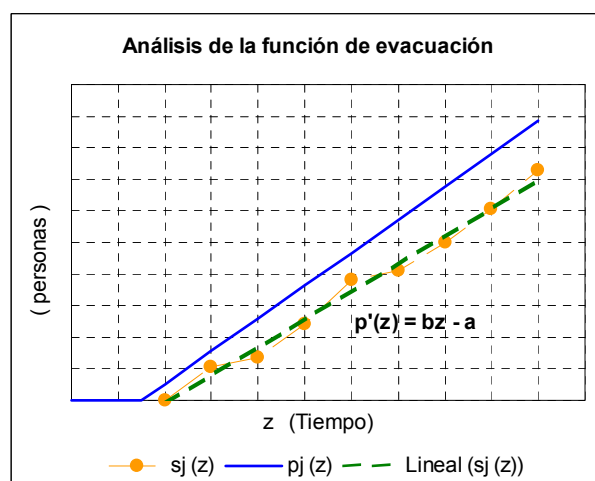
La función de evacuación inversa  $p_j(z)$  puede adoptar formas distintas, pero en cualquier caso la prueba que se plantea es exactamente la misma y consiste en reconocer visualmente si las funciones de evacuación calculadas y los valores experimentales obtenidos guardan la adecuada similitud. Es una prueba muy simple mediante la cual se verifica globalmente la coincidencia de velocidades, flujos y tiempos de evacuación.

La prueba consiste en representar los valores proporcionados por  $s_j(z)$  y los de la función  $p_j(z)$  y analizar las diferencias. En el caso de obtener una situación como la representada en la figura 3 es posible aceptar la adecuada similitud entre las magnitudes experimentales y teóricas que definen el proceso de evacuación del recinto por la 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.



**Figura 3.** Proceso de comparación de  $p_j(z)$  y  $s_j(z)$

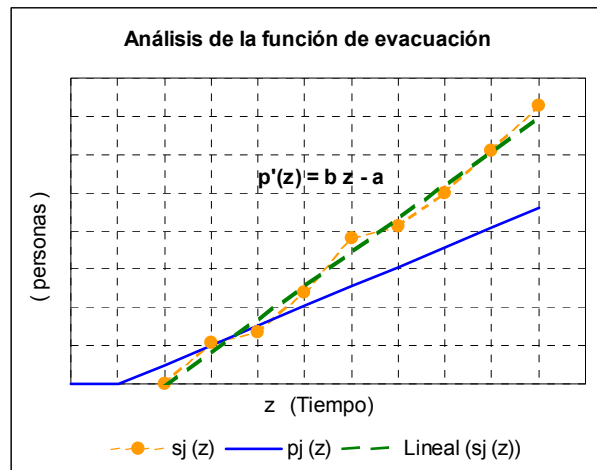
En ocasiones se observa una cierta discrepancia entre las funciones  $p_j(z)$  y  $s_j(z)$ , existiendo algunas situaciones características. Así cuando las magnitudes de locomoción de los ocupantes son ligeramente inferiores a las utilizadas para obtener la función de evacuación inversa los resultados adoptan una forma como la representada en la figura 4, en ella se aprecia como el tiempo que se tarda 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 debe concluirse que, en principio, la velocidad de desplazamiento de los ocupantes es realmente inferior al valor previsto.



**Figura 4.** Capacidad de locomoción inferior a la prevista

Cuando se producen diferencias entre ambas funciones, diferencias menores que las representadas en la figura 4, 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 reales de emergencia. En estos casos se prevé que las magnitudes de locomoción de los individuos sean razonablemente superiores a las consideradas inicialmente, W. M. Predtechenskii y A. I. Milinskii (1969-1978) estiman que este incremento oscila entre un 10 y un 20 %.



**Figura 5.** Densidad de ocupación superior a la prevista

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 cual, la función teórica  $p_j(z)$  se sitúa debajo de la experimental  $s_j(z)$ .

Cuando el desajuste fuera en la estimación de la densidad de ocupación la situación también resulta una gráfica característica, concretamente en el caso representado en la figura 5 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 magnitud de 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  $s_j(z)$ .

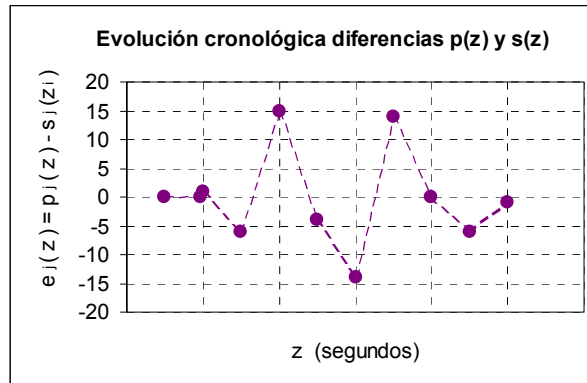
Si la diferencia que se produce es consecuencia de utilizar una densidad de ocupación inferior, los papeles de las funciones analizadas se intercambian, las llegadas a la salida se adelantan y los flujos descienden.

### 3.3. Análisis de las diferencias entre la función de evacuación inversa $p_j(z)$ y la función de salidas $s_j(z)$

El análisis gráfico de la coincidencia o discrepancia entre la función de salidas  $s_j(z)$  y  $p_j(z)$  es ciertamente una prueba subjetiva notablemente robusta, cuya validez se corrobora mediante el análisis estadístico de las diferencias que se producen entre el número de personas que se prevé abandonarán el recinto en intervalos de tiempo  $i$  (los valores de la función de evacuación inversa en el modelo dinámico) 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  $e_j(z_i)$ :

$$e_j(z_i) = p_j(z_i) - s_j(z_i) \quad (5)$$

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.



**Figura 6.** Análisis de la estabilidad de las desviaciones

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 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 pequeñas variaciones aleatorias y en consecuencia no existe más alternativa que aceptar 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.

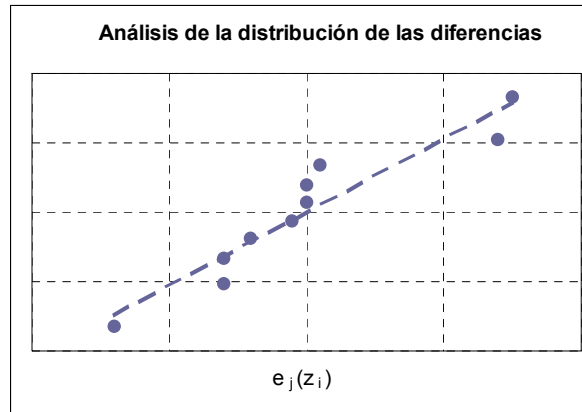
En algunos casos se ha observado que estas diferencias aumentan de amplitud, considerándose posible y admitiendo que al incrementar el tiempo resulta ampliada la magnitud de las desviaciones existiendo un incremento de la variabilidad, sin embargo en los casos estudiados se considera prematuro efectuar suposiciones al respecto, se trata de un aspectos en el cual 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:

$$\bar{e}_j(z_i) = \frac{\sum_{i=1}^n e_j(z_i)}{n} \quad (6)$$

$$s_j(z_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [e_j(z_i) - \bar{e}_j(z_i)]^2}{n - 1}} \quad (7)$$

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.



**Figura 7.** Análisis de la normalidad de las desviaciones

En circunstancias óptimas debe suponerse que las diferencias son puramente aleatorias, en cuyo caso se formula la hipótesis sobre si dichas diferencias siguen una distribución normal, este aspecto se analiza mediante un gráfico probabilístico al no disponer de suficientes observaciones para poder analizar visualmente mediante un histograma o realizar una prueba  $\chi^2$ . El gráfico probabilístico se realiza con las observaciones del ejemplo representado en la figura 6, resultando el gráfico de la figura 7 en el que puede apreciarse que no existe una estricta alineación de las mismas, concluyendo que en este caso concreto existe una cierta ambigüedad sobre la normalidad de las diferencias.

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 no ha sido posible probarla en todos los casos, desconociendo en estos momentos si las diferencias entre  $p_j(z)$  y  $s_j(z)$  cuando el modelo es correcto, debe exigirse que siguen una distribución normal.

#### 4. Conclusiones

Actualmente existen diversos programas, disponibles comercialmente, que facilitan el estudio de la evacuación de edificios, en las aplicaciones que se realizan en muchos casos sería deseable verificar si los resultados que proporcionan se ajustan adecuadamente a la realidad. Dadas las características del problema que estudian, es necesaria una aplicación rigurosa. Por todo ello, las investigaciones que se presentan en este documento en estos momentos tienen un notable interés.

En el presente trabajo se contempla la posibilidad de contrastar de una forma minuciosa los modelos utilizados en el estudio de la evacuación de edificios y se muestra un procedimiento robusto que permite verificar diferentes modelos y en situaciones de discrepancias, proporciona de forma notablemente simple, criterios para realizar los oportunos ajustes de los parámetros de cálculo.

Finalmente debe manifestarse que el proceso de contraste es complejo y las investigaciones en esta faceta del problema de la evacuación de edificios son lentas, en primer lugar son precisos estudios de evacuación de los edificios y luego tener las mediciones de los



simulacros no es una tarea simple. Cuando se disponga de más observaciones será posible ofrecer una certera respuesta a las dudas que surgen durante el desarrollo de este trabajo.

## Referencias

- Casadesús, S.; Garriga, F. (2001). "Procedimiento gráfico para la optimización de la evacuación de un recinto", Actas del IV Congreso de Ingeniería de Organización, ISBN 84-88783-52-3, Universidad de Sevilla, 13-14, pp.121-123.
- Casadesús, S.; Garriga, F. (2003). "Objetivos equivalentes en el problema de la evacuación de recintos", Actas del V Congreso de Ingeniería de Organización, ISBN 84-688-2827-0, Universidad de Valladolid-Universidad de Burgos, 4-5 Sep. 2003, pp.57-59.
- Casadesús, S.; Garriga, F. (2004). "Modelling 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, pp.37-39.
- Casadesús Pursals, S. (2006). Tesis doctoral: "Consideraciones en torno a los modelos para el estudio de la evacuación de edificios", dirigida por F. Garriga Garzón, disponible en <http://tesisenxarxa.net>, 380 páginas.
- Casadesús, S.; Garriga, F. (2009). "Optimal time of building evacuation taking in consideration evacuation routes", European Journal of Operational Research, Volume 192, Issue 2, pp. 692-699.
- Fruins, J. J. (1971-1987). "Pedestrian planning and design", Elevator World, Library of Congress Catalogue Number 70-159312, 206 p.
- Galea, E. R.; Gwinne, S.; Lawrence, P.; Filipidis, L. (2001). "Modelling occupant interaction with fire conditions using the building EXODUS evacuation model", Fire Safety Journal Vol. 36-4, pp.327-357.
- Galea, E. R. (1997). "Validation of evacuation models", UK CMS Press, Paper 97/IM/22, University of Greenwich, London.
- Kholshenikov, V. V.; Shields, T. H.; Boyce, K. E.; Samoshin, D. A.(2008). "Recent developments in pedestrian flow theory and Research in Russia, Fire Safety Journal 43, pp. 108-118.
- Nelson, H. E.; McLennan, H. A.(1996). "Emergency Movement", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 3/Chapter 14, pp. 3.286-3.295.
- Pauls, J. L. (1996). "Movement of people", The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 3/Chapter 12, Ed. 1996, pp. 3-263/3-285.
- Predtechenskii, W.; M. ; Milinskii, A. I. (1969-1978). "Planning for foot traffic flow in buildings", Amerind Publishing Co. New Delhi, National Bureau of Standards, U.S. Dep. Commerce, PB-294 993-T, 238 p.
- Thompson, P. A.; Marchant, E. W. (1995). "Testing and application of the computer model SIMULEX", Fire Safety Journal 24, pp. 149-166.