

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 372 945**

21 Número de solicitud: 201100724

51 Int. Cl.:

**G06Q 10/00** (2012.01)

**G08B 21/00** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN PREVIO

B2

22 Fecha de presentación: **23.06.2011**

43 Fecha de publicación de la solicitud: **30.01.2012**

Fecha de la concesión: **23.05.2012**

45 Fecha de anuncio de la concesión: **04.06.2012**

45 Fecha de publicación del folleto de la patente:  
**04.06.2012**

73 Titular/es:

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA  
PABELLÓN DE GOBIERNO, AV. DE LOS  
CASTROS S/N  
39005 SANTANDER, Cantabria, ES**

72 Inventor/es:

**CAPOTE ABREU, JORGE ARTURO;  
ALVEAR PORTILLA, DANIEL;  
ABREU MENÉNDEZ, ORLANDO;  
CUESTA JIMÉNEZ, ARTURO y  
ALONSO GUTIÉRREZ, VIRGINIA**

74 Agente/Representante:

**No consta**

54 Título: **MÉTODO Y SISTEMA INTELIGENTE PARA LA GESTIÓN DE EMERGENCIAS EN TÚNELES DE CARRETERA**

57 Resumen:

Método para la gestión de una emergencia mediante apoyo para toma de decisiones de seguridad en un túnel de carretera, que comprende las etapas de: identificar un escenario del túnel de carretera a través de una primera área de evacuación y una segunda área de evacuación, donde la primera es la zona donde se encuentran los vehículos y personas directamente involucradas en la situación de emergencia y las personas en peligro inminente; y la segunda es adyacente a la primera, donde se encuentran los vehículos atrapados; identificar la posibilidad de bidireccionalidad ( $a_{\text{sub,BIDIREC}}$ ) en el proceso de evacuación de la primera área; calcular: la distancia ( $d_{\text{sub,S1}}$ ) desde la boca contracorriente del túnel hasta el lugar de ocurrencia del incidente; la distancia ( $d_{\text{sub,I1}}$ ) desde la boca contracorriente del túnel hasta la primera área; la distancia ( $d_{\text{sub,I2}}$ ) desde la boca contracorriente del túnel hasta el final de la primera área; calcular el número de personas a evacuar; calcular el tiempo de evacuación de una; proponer una decisión adecuada. Sistema inteligente integrado y automatizado.

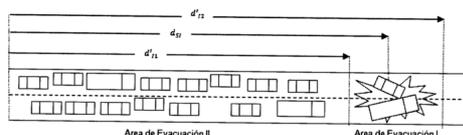


FIGURA 1

ES 2 372 945 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 40.2.8 LP.

## DESCRIPCIÓN

Método y sistema inteligente para la gestión de emergencias en túneles de carretera.

### 5 **Campo de la invención**

La presente invención pertenece al campo de la Ingeniería Industrial, y más concretamente al desarrollo de métodos y sistemas inteligentes para la gestión de emergencias.

### 10 **Antecedentes de la invención**

15 Actualmente existen Sistemas Inteligentes aplicados a diferentes ámbitos de la sociedad (sistemas de riego o de lavado, sistemas iluminación...), entendiéndose éstos como sistemas que tratan de emular las características y comportamientos asimilables a los de la inteligencia humana o artificial.

20 Dentro del campo del transporte, estos sistemas han sido aplicados para mejorar la operatividad y la seguridad en carreteras urbanas, rurales, ferrocarriles..., ofreciendo soluciones tecnológicas para el cobro automático de peajes e incluso la vigilancia automática de infracciones.

25 Es posible encontrar en la literatura información estadística no muy extensa relativa a la accidentalidad en túneles de carretera a nivel mundial. Los informes *World Tunnel Disasters since 1970* del *Institute of Advanced Motorists (IAM), 2008* y *The Future of Tunnel Testing: Serious Tunnel Accidents since 1970*, del *EuroTAP*, recogen información acerca de los más importantes incidentes ocurridos en túneles de carretera desde los años 70.

30 En lo relativo a sistemas de evacuación, tras una revisión de los modelos computacionales de evacuación existentes de sus capacidades, aplicaciones y funcionalidades a partir de la revisión realizada por el NIST (*National Institute of Standards and Technology*) (Kuligowski, E. D. and Peacock, R. D., 2005. Review of Building Evacuation Models, Technical Note 1471, Natl. Inst. Stand. Technol., Gaithersburg, MD), se concluyó que no existe en la actualidad ningún modelo de evacuación que represente las características específicas de la evacuación en un túnel de carretera.

35 En cuanto a la toma de decisiones, no se conoce ningún sistema inteligente que se aplique a túneles de carretera optimizando las decisiones a tomar por la persona encargada de gestionar una determinada emergencia.

40 Por otra parte, en el año 2006 se aprobó en España el Real Decreto 635/2006 (BOE Núm. 126 de 27 mayo de 2006), sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado. En lo relativo a la gestión de situaciones de emergencia, la normativa prescribe la elaboración de un manual de explotación en el que se especifiquen las medidas necesarias para garantizar la seguridad de los usuarios, pero sin especificar los protocolos de actuación integrados en los planes de respuesta a situaciones de emergencia.

45 Pese a los avances en los medios de prevención y protección instalados en los túneles, la toma de decisiones en las actuaciones necesarias en caso de emergencia es una tarea crítica para la seguridad de los usuarios y puede provocar en la persona encargada de gestionar dichas acciones, una situación de estrés que no le permita tomar las decisiones más óptimas o en el tiempo en el que actuaría en una situación normal.

### **Resumen de la invención**

50 La presente invención trata de resolver los inconvenientes mencionados anteriormente mediante un método y sistema inteligente, a través del cual el personal encargado de gestionar la seguridad en un túnel de carretera dispone de un sistema inteligente que trabajando a tiempo real, brinda propuestas de decisión adecuadas en dependencia de la emergencia detectada.

55 Además de la propuesta de decisiones, el sistema realiza un análisis de eventos precedentes similares, en base al análisis estadístico de la accidentalidad en túneles de carretera ofreciendo bajo una probabilidad dada, una estimación del alcance y consecuencias del incidente registrado, en relación al número y lesividad de personas involucradas en el accidente, además de las atrapadas en el túnel.

60 En el caso de decretarse la necesidad de evacuar el túnel por la gravedad del suceso, el método y sistema realiza una prognosis sobre el tiempo total necesario para proceder a la evacuación total del túnel.

65 El sistema comprende tres subsistemas independientes: un subsistema de incidentes, un subsistema de evacuación y un subsistema de toma de decisiones.

Concretamente, en un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un método automatizado de gestión de la emergencia mediante el apoyo a la toma de decisiones de seguridad en una situación de emergencia en un túnel de carretera.

El método comprende las etapas de: identificar un escenario del túnel de carretera a través de una primera área de evacuación (Área de Evacuación I) y una segunda área de evacuación (Área de Evacuación II), donde dicha primera área de evacuación es la zona donde se encuentran los vehículos y por lo tanto las personas directamente involucradas en el accidente, así como las personas que se encuentran en peligro inminente por el surgimiento de incendio o vertido de sustancias peligrosas; y dicha segunda área de evacuación es una zona adyacente a la primera área de evacuación, donde se encuentran los vehículos atrapados en el embotellamiento producido por el accidente; identificar la posibilidad de bidireccionalidad en el proceso de evacuación de la primera área de evacuación; calcular la distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el lugar de ocurrencia del incidente; calcular la distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el comienzo de la primera área de evacuación (Área de Evacuación I).

Calcular la distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el final de la primera área de evacuación (Área de Evacuación I); calcular el número de personas a evacuar en la primera área de evacuación y en la segunda área de evacuación; calcular el tiempo de evacuación de cada persona; proponer una decisión adecuada en función de la emergencia detectada.

En otro aspecto de la invención, se proporciona un sistema inteligente integrado para la gestión de la emergencia por un incidente en un túnel de carretera, que comprende: un subsistema de incidentes, configurado para realizar un análisis predictivo del posible desarrollo y consecuencias de una emergencia, donde dicho evento es cualquier accidente, provocado por uno o varios vehículos automotores que transiten por el túnel, que ocasione un daño real o potencial sobre las personas que se encuentren en su interior y eventualmente aconseje la evacuación de éstas; un subsistema de evacuación; y un subsistema de toma de decisiones. El sistema inteligente integrado está configurado para llevar a cabo las etapas del método descrito anteriormente.

Las ventajas de la invención se harán evidentes en la descripción siguiente.

### Breve descripción de las figuras

Con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica del mismo, y para complementar esta descripción, se acompaña como parte integrante de la misma, un juego de dibujos, cuyo carácter es ilustrativo y no limitativo. En estos dibujos:

La figura 1 muestra una posible caracterización de un túnel de carretera, de acuerdo con una implementación de la invención.

La figura 2 muestra un esquema de la zona muerta de la cámara del CCTV (Circuito Cerrado de Televisión) dentro de un túnel, de acuerdo con una implementación de la invención.

La figura 3 muestra un árbol de decisiones para el aviso al personal de explotación de acuerdo con una realización de la presente invención.

La figura 4 muestra un árbol de decisiones para la prevención a los servicios de emergencias, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La figura 5 muestra un árbol de decisiones para la activación de los servicios de emergencias, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La figura 6 muestra un árbol de decisiones para la necesidad de evacuación, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La figura 7 muestra un árbol de decisiones para la bidireccionalidad de la primera área de evacuación, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La figura 8 muestra un árbol de decisiones para la cantidad de carriles a cerrar, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La figura 9 muestra un árbol de decisiones para el cierre del túnel, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La figura 10 muestra un árbol de decisiones para la activación del nivel máximo de iluminación, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La figura 11 muestra un árbol de decisiones para informar a los usuarios, de acuerdo con una realización de la presente invención.

La figura 12 muestra un ejemplo de implementación de un archivo de datos de un túnel que proporciona los datos que introducen la geometría y características del túnel concreto de aplicación del sistema principal integrado.

5 La figura 13 muestra un ejemplo de implementación de la introducción de una serie de variables de entrada que definen una situación de emergencia detectada.

La figura 14 muestra un ejemplo de implementación de la propuesta de decisiones que deben tomarse por el operador del centro de control de túneles en función de la gravedad y condiciones del incidente.

10 La figura 15 muestra un ejemplo de implementación e introducción de información adicional del suceso.

La figura 16 muestra un ejemplo de implementación e introducción de información adicional del suceso, en concreto las variables de entrada para los modelos de evacuación.

15 La figura 17 muestra un ejemplo de resultados del análisis de la evacuación en la primera área de evacuación.

La figura 18 muestra un ejemplo de resultados del análisis de la evacuación en la segunda área de evacuación.

20 Las figuras 19 y 20 muestran sendos ejemplos de layout de dos posibles escenarios.

Las figuras 21 a 24 muestran los resultados obtenidos de la ejecución ejemplificada en las figuras 19 y 20, tanto en la primera como en la segunda áreas de evacuación.

## 25 **Descripción detallada de la invención**

En este texto, el término “comprende” y sus variantes no deben entenderse en un sentido excluyente, es decir, estos términos no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos.

30 Además, los términos “aproximadamente”, “sustancialmente”, “alrededor de”, “unos”, etc. deben entenderse como indicando valores próximos a los que dichos términos acompañen, ya que por errores de cálculo o de medida, resulte imposible conseguir esos valores con total exactitud.

35 Las siguientes realizaciones preferidas se proporcionan a modo de ilustración, y no se pretende que sean limitativos de la presente invención. Además, la presente invención cubre todas las posibles combinaciones de realizaciones particulares y preferidas aquí indicadas.

40 Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de la invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención.

45 A continuación se detalla el método y sistema inteligente para la gestión de una emergencia en túneles de carretera mediante el apoyo a la toma de decisiones, y en concreto, de las etapas y diferentes subsistemas que lo forman: un subsistema de incidentes, un subsistema de evacuación y un subsistema de decisiones. También se detalla la integración de los subsistemas en el sistema inteligente.

### 1 *Subsistema de Incidentes*

50 Este subsistema permite realizar un análisis predictivo del posible desarrollo y consecuencias de un incidente, entendiendo éste como cualquier accidente, provocado por uno o varios vehículos automotores que transiten por el túnel, que ocasione un daño real o potencial sobre las personas que se encuentren en su interior y eventualmente aconsejen la evacuación de éstas.

55 El subsistema ofrece unos resultados trabajando en base a los datos obtenidos acerca de los accidentes registrados en la literatura ocurridos en túneles de carretera a nivel internacional, en relación a la cantidad de personas fallecidas a causa del accidente, cantidad de heridos (lesionados) leves, cantidad de heridos graves y que se resume en la Tabla 1.

60

65

TABLA 1

Relación de víctimas de Accidentes en Túneles de Carretera entre los años 1979 y 2007.  
 (Fuente: World Tunnel Disasters since 1970. Institute of Advanced Motorists (IAM).  
 2008 y EuroTAP - The Future of Tunnel Testing:  
 Serious Tunnel Accidents since 1970)

N/O	Año	País	Túnel	Heridos	Muertos
1	2007	Australia	Burneley	3	3
2	2007	Austria	Ehrentalerberg	2	
3	2006	Alemania	Farchant		1
4	2006	Austria	Tavern	30	
5	2006	Suiza	Gothard	2	1
6	2006	Noruega	Eidsvoll	1	1
7	2006	Suiza	Viamala	5	9
8	2005	Alemania	Elba	24	
9	2005	Alemania	Eriskirch		5
10	2005	Suiza	Isla Bella	2	1
11	2005	Austria	Roppen		1
12	2004	Suiza	Baregg	5	1
13	2003	Suiza	Gottard	5	1
14	2003	Turquía	Erzincan		27
15	2003	Italia	Vicenza	38	6
16	2001	Suiza	Gothard		11
17	2001	Dinamarca	Guldborgsund	9	5
18	2001	Austria	Laingberg	2	2
19	2001	Austria	Amberg		3
20	2001	Austria	Gleinalm	4	5
21	2001	Austria	Reigersdorf	24	
22	2001	Austria	Helsbelsberg	10	2
23	1999	Austria	Tavern		12
24	1999	Francia/Italia	Mont Blanc		39
25	1996	Italia	Palermo	25	5
26	1996	Japón	Hokkaido		20
27	1995	Austria	Pfander	10	3
28	1982	Afganistán	Salang		176-978
29	1982	EEUU	Caldecott	2	7
30	1979	Japón	Nihonzaka		7

Para la obtención del subsistema de incidentes, se ha desarrollado un algoritmo matemático consistente en un conjunto de expresiones que relacionan una serie de variables de entada y salida. Dichas expresiones se basan en los Protocolos de Actuación preestablecidos para los Operadores del Centro de Control de túneles.

En primer lugar, se caracteriza un escenario del túnel de carretera de la siguiente manera (ver figura 1):

- Definición o identificación de una primera área de evacuación (Área de Evacuación I) o zona donde se encuentran los vehículos y por lo tanto las personas directamente involucradas en el accidente, así como las personas que se encuentran en peligro inminente por el surgimiento de incendio o vertido de sustancias peligrosas.
- Definición o identificación de una segunda área de evacuación (Área de Evacuación II) o zona adyacente a la primera área de evacuación, hasta la boca entrada del túnel, donde se encuentran los vehículos atrapados en el embotellamiento producido por el cierre del mismo a causa del accidente.

La figura 1 ilustra estas dos áreas de evacuación. En la figura 1 se muestra además la distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el lugar (centro) aproximado de ocurrencia del incidente  $d_{SI}$ , la distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el final de la segunda área de evacuación  $d'_{I1}$  y la distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el final de la primera área de evacuación  $d'_{I2}$ . Las expresiones que comprenden el algoritmo matemático del subsistema de incidentes son las siguientes:

1. La cantidad de carriles del túnel que se cierran a la circulación  $m_{CAR}$  debe ser igual a la cantidad de carriles obstruidos producto del accidente  $m'_{CAR}$ :

$$m'_{CAR} = m_{CAR}$$

2. La necesidad de aviso al personal de explotación para que acudan al sitio del suceso, representada por la expresión  $a'_{APE}$ , debe estar condicionada por la propia ocurrencia de un incidente, representada por la expresión  $a_{SI}$ :

$$a'_{APE} = a_{SI}$$

3. La necesidad de prevenir a los servicios de emergencia, representada por la expresión  $a'_{PSE}$ , se define por el cierre de al menos un carril del túnel, siempre que el túnel tenga más de un carril:

$$a'_{PSE} = (m_{CAR} \geq 1) \wedge (m_{MAX} > 1)$$

donde  $m_{MAX}$  representa la cantidad máxima de carriles del túnel y  $m_{CAR}$  es la cantidad de carriles del túnel que se cierran a la circulación.

4. La necesidad de activar a los servicios de emergencia, representada por la expresión  $a'_{ASE}$ , está condicionada por el cierre total del túnel (cuando la cantidad de carriles del túnel que se cierran a la circulación  $m_{CAR}$  es igual a la cantidad máxima de carriles del túnel  $m_{MAX}$ ), la detección de un incendio en el mismo (representada por la expresión  $a_{FIRE}$ ), o de un vertimiento (escape) de una sustancia peligrosa (representada por la expresión  $a_{VSP}$ ) o la sospecha de que haya al menos un herido producto del accidente (representada por la expresión  $n_{HER}$ ):

$$a'_{ASE} = (m_{CAR} = m_{MAX}) \vee (a_{FIRE}) \vee (a_{VSP}) \vee (n_{HER} \neq 0)$$

5. La necesidad de evacuación inmediata del túnel, representada por la expresión  $a'_{EVAC}$ , se determina por el surgimiento de un incendio en el mismo (representado por la expresión  $a_{FIRE}$ ) o el vertimiento o escape de una sustancia peligrosa (representado por la expresión  $a_{VSP}$ ), como resultado del incidente:

$$a'_{EVAC} = (a_{FIRE}) \vee (a_{VSP})$$

6. La bidireccionalidad de la posible evacuación inmediata del túnel, representada por la expresión  $a'_{BIDIREC}$  (variable booleana que indica la posibilidad de bidireccionalidad en el proceso de evacuación), se define por la obstrucción total o parcial del mismo. Si la obstrucción es total (cuando la cantidad de carriles del túnel que se cierran a la circulación  $m_{CAR}$  es igual a la cantidad máxima de carriles del túnel  $m_{MAX}$ ) la bidireccionalidad es falsa:

$$a'_{BIDIREC} = m_{CAR} < m_{MAX}$$

7. La distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el comienzo de la primera área de evacuación puede calcularse mediante una serie de expresiones que detallamos a continuación:

5 Inicialmente se calcula la distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el lugar (centro) aproximado de ocurrencia del accidente  $d_{SI}$ :

$$10 \quad d_{SI} = d_{CAM}(n_{CCTV}) + \delta_{ZM} + \frac{\delta_{CCTV} + 1}{6} \cdot \Delta_{CAM}$$

donde:

15  $d_{SI}$  - Tal como puede verse en la Figura 1, es la distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el lugar aproximado de ocurrencia del incidente;

20  $d_{CAM}(n_{CCTV})$  - distancia desde la boca de entrada del túnel hasta la cámara del CCTV (Circuito Cerrado de Televisión) número  $n_{CCTV}$  (el número de cámara que detecte el incidente de manera automática en el Centro de Control);

$\delta_{ZM}$  - distancia de la zona muerta de la cámara;

25  $\delta_{CCTV}$  - lugar aproximado del sector del túnel captado por la cámara del CCTV donde ha ocurrido el incidente. Este sector es comúnmente menor o igual a 150 m y es conocido para cada túnel. Si por ejemplo  $\delta_{CCTV} = 1$ , el suceso ha ocurrido en la primera mitad del túnel.

$\Delta_{CAM}$  - distancia entre cámaras.

30 Las distancias desde la boca contracorriente hasta cada una de las cámaras del túnel se pueden calcular mediante la expresión:

$$35 \quad d_{CAM}(i) = d_{CAM1} + i \cdot \Delta_{CAM} \quad \text{para } 0 \leq i \leq m_{CAM}$$

40 donde:

$d_{CAM1}$  - distancia entre la boca contracorriente del túnel hasta la primera cámara del CCTV;

45  $\Delta_{CAM}$  - distancia entre las cámaras del túnel.

La figura 2 muestra un esquema de la zona muerta de la cámara del CCTV (circuito cerrado de televisión) dentro del túnel. De la figura 2 se infiere:

50

$$\delta_{ZM} = h_{CAM} \cdot \tan(\gamma)$$

55 donde:

$h_{CAM}$  - la altura de las cámaras desde el plano de la calzada en el interior del túnel;

60  $\beta_{EF}$  - ángulo del eje focal de la cámara con respecto al plano horizontal;

$\alpha_{VIS}$  - ángulo de visión de la cámara.

65

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \beta_{EF} - \frac{\alpha_{VIS}}{2}$$

por lo que se obtiene:

$$\delta_{ZM} = h_{CAM} \cdot \cot\left(\beta_{EF} - \frac{\alpha_{VIS}}{2}\right)$$

donde:

$h_{CAM}$  - altura de las cámaras desde el plano de la calzada en el interior del túnel;

$\beta_{EF}$  - ángulo del eje focal de la cámara con respecto al plano horizontal;

$\alpha_{VIS}$  - ángulo de visión de la cámara;

$\gamma$  - ángulo de la zona muerta de la cámara;

$\delta_{ZM}$  - distancia de la zona muerta de la cámara;

Entonces la distancia  $d'_{I1}$  desde la boca contracorriente del túnel hasta el final de la segunda área de evacuación (distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el comienzo de la primera área de evacuación):

$$d'_{I1} = \begin{cases} d_{GALi} & \text{si } A_G = (i \geq 1) \wedge [(d_{SI} - d_{GALi}) < (d_{SI} - d_{GALj})] \wedge (j < i) \\ 0 & \text{si } \overline{A_G} \end{cases}$$

donde:

$d_{GALi}$  - distancia desde la entrada contracorriente del túnel hasta la i-ésima galería;

$d_{GALj}$  - distancia desde la entrada contracorriente del túnel hasta la j-ésima galería;

$d_{SI}$  - distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el lugar (centro) aproximado de ocurrencia del incidente;

$A_G$  - variable que indica si existe una galería anterior a la galería i.

La expresión anterior indica que se debe elegir la distancia  $d'_{I1}$  igual a la distancia hasta la galería inmediata anterior contracorriente al lugar de ocurrencia del incidente, si existiese. De lo contrario, esta distancia se asume igual a cero (entrada del túnel).

Las distancias hasta las distintas galerías del túnel se calcula como:

$$d_{GALj} = d_{GAL1} + j \cdot \Delta_{GAL} \quad \text{para } 0 \leq j \leq m_{GAL}$$

donde:

$d_{GAL1}$  - distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta la primera galería;

$\Delta_{GAL}$  - distancia entre las galerías del túnel;

$m_{GAL}$  - cantidad total de galerías del túnel.

8. La distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el final de la primera área de evacuación se calcula mediante la expresión  $d'_{I2}$ :

$$d'_{I2} = \begin{cases} d_{GAL_k} & \text{si } A_{G1} \wedge a'_{BIDIREC} \\ L_T & \text{si } A_{G1} \wedge a'_{BIDIREC} \\ d_{SI} + \frac{\Delta_{CAM}}{3} & \text{si } a'_{BIDIREC} = false \end{cases}$$

donde:

$$A_{G1} = (k \geq 1) \wedge [(d_{GAL_k} - d_{SI}) < (d_{GAL_j} - d_{SI})] \wedge (j > k)$$

y donde:

$d_{GAL_k}$  - distancia desde la entrada contracorriente del túnel hasta la k-ésima galería;

$L_T$  - longitud del túnel;

$d_{SI}$  - distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el lugar (centro) aproximado de ocurrencia del incidente;

$\Delta_{CAM}$  - distancia entre las cámaras del túnel;

$A_{G1}$  - indica la existencia de una galería posterior al incidente;

$a'_{BIDIREC}$  - bidireccionalidad de la evacuación del túnel.

La expresión refleja que la distancia  $d'_{I2}$  es, para los casos de posibilidad de evacuación bidireccional, igual a la distancia hasta la galería inmediata posterior contracorriente del lugar de ocurrencia del suceso, si existiese tal galería, o igual a la longitud del túnel en caso contrario. Si la evacuación tiene que ser unidireccional se asume la distancia  $d'_{I2}$  igual a la distancia hasta el accidente más un margen espacial igual al tercio de la distancia entre cámaras del CCTV.

9. La cantidad total de personas a evacuar de la primera área de evacuación  $n'_{IT}$  es preferentemente un estimado pesimista que ha de realizarse sobre la base de la cantidad de vehículos directamente implicados en el accidente y sus tipos.

El carácter pesimista de este estimado supone asumir valores máximos razonables que impliquen tiempos de evacuación simulados igualmente máximos razonables. Por ello la expresión de esta variable puede ser:

$$n'_{IT} = k_{VL} \cdot n_{VLDI} + k_{VP} \cdot n_{VPDI} + k_{VA} \cdot n_{VADI}$$

donde:

$k_{VL}$  - ocupación de pasajeros asumida por vehículo ligero;

$k_{VPP}$  - ocupación de pasajeros asumida por vehículo pesado;

$k_{VA}$  - ocupación de pasajeros asumida por autocar;

$n_{VLDI}$  - número de vehículos ligeros directamente involucrados en el incidente;

$n_{VPDI}$  - número de vehículos pesados directamente involucrados en el incidente;

$n_{VADI}$  - número de autocares directamente involucrados en el incidente.

10. Las cantidades de personas a evacuar con diferentes tipos de movilidades de la primera área de evacuación también se basan preferentemente en estimados pesimistas. Se diferencian dos situaciones: si un incidente es grave o si no lo es. Pero esto puede asumirse con las probabilidades bayesianas. Para el caso de suceso grave:

5

$$\left. \begin{aligned} n'_{IMN} &= P(MN|A_{GSI}) \cdot n'_{IT} \\ n'_{IMR} &= P(MR|A_{GSI}) \cdot n'_{IT} \\ n'_{IMA} &= P(MA|A_{GSI}) \cdot n'_{IT} \end{aligned} \right\}$$

10

15

donde:

$n'_{IMN}$  - número de personas con movilidad normal;

20

$n'_{IMR}$  - número de personas con movilidad reducida;

$n'_{IMA}$  - número de personas con movilidad asistida;

25

$P(MN|A_{GSI})$  - probabilidad que tras la ocurrencia de un incidente grave, la movilidad de una persona sea normal;

$P(MR|A_{GSI})$  - probabilidad que tras la ocurrencia de un incidente grave, la movilidad de una persona sea reducida;

$P(MA|A_{GSI})$  - probabilidad que tras la ocurrencia de un incidente grave, la movilidad de una persona sea asistida;

30

$n'_{IT}$  - número total de personas atrapadas en el Área de Evacuación I.

Si se considera falsa la hipótesis de gravedad del incidente, que por definición presume la ausencia de heridos graves, la expresión anterior toma la forma siguiente:

35

$$\left. \begin{aligned} n'_{IMN} &= P(MN|\bar{A}_{GSI}) \cdot n'_{IT} \\ n'_{IMR} &= P(MR|\bar{A}_{GSI}) \cdot n'_{IT} \\ n'_{IMA} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

40

45

donde:

$P(MN|\bar{A}_{GSI})$  - probabilidad de que la movilidad de una persona sea normal en caso de que el incidente no sea grave;

50

$P(MR|\bar{A}_{GSI})$  - probabilidad de que la movilidad de una persona sea reducida en caso de que el incidente no sea grave;

55

Por otra parte, se relacionan las probabilidades condicionales empleadas con las probabilidades de ocurrencia de heridos leves, graves y fallecidos cuando tiene lugar un accidente grave en un túnel de carretera. Esto quiere decir que:

$$P(MR|A_{GSI}) = P(HL|A_{GSI})$$

60

donde:

$P(MR|A_{GSI})$  - probabilidad que tras la ocurrencia de un Incidente Grave, la movilidad de una persona sea reducida;

65

$P(HL|A_{GSI})$  es la probabilidad de que los implicados en un accidente sufran heridas leves si la hipótesis de que el suceso fue grave.

De igual forma:

$$P(MA|A_{GSI}) = P(HG|A_{GSI}) + P(F|A_{GSI})$$

donde:

$P(MA|A_{GSI})$  - probabilidad que tras la ocurrencia de un Incidente Grave, la movilidad de una persona sea asistida;

$P(HG|A_{GSI})$  - probabilidad de que los implicados en un accidente sufran heridas graves si la hipótesis de que el suceso fue grave, es cierta;

$P(F|A_{GSI})$  - probabilidad de que los implicados en un accidente fallezcan si la hipótesis de que el suceso fue grave, es cierta.

En la expresión anterior está implícito el enfoque pesimista del modelo desde el punto de vista de la evacuación, ya que consideramos que tanto los heridos graves como los fallecidos, se incluyen en la categoría de potenciales evacuados con movilidad asistida. En consecuencia:

$$P(MN|A_{GSI}) = 1 - (P(HL|A_{GSI}) + P(HG|A_{GSI}) + P(F|A_{GSI}))$$

donde:

$P(MN|\bar{A}_{GSI})$  - Probabilidad de que la movilidad de una persona sea normal en caso de que el incidente no sea grave;

Por otra parte:

$$P(MR|\bar{A}_{GSI}) = P(HL|\bar{A}_{GSI})$$

donde:

$P(MR|\bar{A}_{GSI})$  - Probabilidad de que la movilidad de una persona sea reducida en caso de que el incidente no sea grave;

$P(HL|\bar{A}_{GSI})$  - es la probabilidad de que los implicados en un accidente sufran heridas leves si la hipótesis de que el suceso fue grave, es falsa.

Y finalmente:

$$P(MN|\bar{A}_{GSI}) = 1 - P\{HL|\bar{A}_{GSI}\}$$

donde:

$P(MN|\bar{A}_{GSI})$  - Probabilidad de que la movilidad de una persona sea normal en caso de que el incidente no sea grave;

11. La distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el final del Área de evacuación II se asume igual a la distancia hasta la cámara del CCTV que ha captado el incidente, es decir:

$$d'_{II} = d_{CAM}(n_{CCTV})$$

donde:

$d_{CAM}(n_{CCTV})$  - representa la distancia hasta la cámara del CCTV que ha captado el incidente.

12. La cantidad de vehículos en la segunda área de evacuación (área de evacuación II) cuyos conductores y pasajeros deban ser evacuados  $n'_{IIV}$  se puede calcular de manera simple, restando a la cantidad de vehículos atrapados en el túnel desde la ocurrencia del suceso  $n_{VAT}$ , el total de vehículos directamente implicados en el accidente  $n_{VDI}$ :

$$n'_{IIV} = n_{VAT} - n_{VDI}$$

13. El tiempo de retardo en la detección del incidente evidentemente es igual a la variable de entrada homóloga:

$$\tau'_{RDSI} = \tau_{RDSI}$$

En la Tabla 2, se describen los parámetros utilizados en las expresiones anteriormente descritas.

TABLA 2

*Resumen de los parámetros del Subsistema de Incidentes*

Parámetro	Descripción
$m_{MAX}$	Cantidad máxima de carriles del túnel
$d_{CAM1}$	Distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta la primera cámara del CCTV
$\Delta_{CAM}$	Distancia entre las cámaras del túnel
$m_{CAM}$	Cantidad total de cámaras del CCTV en el interior del túnel
$h_{CAM}$	Altura de las cámaras desde el plano de la calzada en el interior del túnel
$\beta_{EF}$	Ángulo del eje focal de la cámara con respecto al plano horizontal
$\alpha_{VIS}$	Ángulo de visión de la cámara
$d_{GALj}$	Distancia desde la entrada contracorriente del túnel hasta la j-ésima galería
$d_{GAL1}$	Distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta la primera galería
$\Delta_{GAL}$	Distancia entre las galerías del túnel
$m_{GAL}$	Cantidad total de galerías del túnel
$L_T$	Longitud del túnel
$k_{VL}$	Ocupación de pasajeros asumida por vehículo ligero
$k_{VP}$	Ocupación de pasajeros asumida por vehículo pesado
$k_{VA}$	Ocupación de pasajeros asumida por autobús
$P(HL A_{GSI})$	Probabilidad de que los implicados en un accidente reciban heridas leves si la hipótesis de que el suceso fue grave, es cierta
$P(HG A_{GSI})$	Probabilidad de que los implicados en un accidente reciban heridas graves si la hipótesis de que el suceso fue grave, es cierta

$P(F A_{GSI})$	Probabilidad de que los implicados en un accidente fallezcan si la hipótesis de que el suceso fue grave, es cierta
$P(HL \bar{A}_{GSI})$	Probabilidad de que los implicados en un accidente reciban heridas leves si la hipótesis de que el suceso fue grave, es falsa

## 2 Subsistema de Evacuación

Los incidentes en túneles de carretera conllevan tal gravedad y riesgo que con frecuencia se aconseja decretar la evacuación inmediata de las personas que se encuentran en su interior. Tal como se indicó en el epígrafe anterior, se diferencian dos escenarios en un túnel de carretera: una primera área de evacuación (Área de Evacuación I) y una segunda área de evacuación (Área de Evacuación II). Por las diferencias intrínsecas a cada una de las áreas consideradas, se ha construido un algoritmo matemático para cada uno de los escenarios, tal como se describe a continuación.

### 2.1 Subsistema para el Área de Evacuación I

Para la definición del subsistema de evacuación (SE) para la primera área de evacuación, se han identificado las distintas variables que definen el algoritmo matemático.

El SE depende directamente de los resultados del Subsistema de Incidentes (SSI) desarrollado previamente, de manera que algunas variables de salida del SSI sirven de entrada al SE, como son:

- $a'_{BIDIREC}$  - variable booleana que indica la posibilidad de bidireccionalidad en el proceso de evacuación de la primera área de evacuación.
- $d'_{I1}$  - distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el comienzo de la primera área de evacuación. Recordemos que se define como la distancia desde la boca hasta la galería inmediatamente anterior al lugar de ocurrencia del incidente, en caso que dicha galería existiese o, en caso contrario, sería igual a cero.
- $d'_{I2}$  - distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el final de la primera área de evacuación, asumida igual, para el caso en que la bidireccionalidad de la evacuación fuera falsa, a la distancia hasta el centro del incidente ( $d_{SI}$ ) más la tercera parte de la distancia entre las cámaras del CCTV ( $\Delta_{CAM}$ ).
- $n'_{IT}$  - cantidad total de personas a evacuar de la primera área de evacuación que se corresponde con la suma de las personas con movilidad normal ( $n'_{IMN}$ ), con movilidad reducida ( $n'_{IMR}$ ) y con movilidad asistida ( $n'_{IMA}$ ), involucradas directamente en el incidente.

A medida que se definió el algoritmo matemático que detalla el funcionamiento del SE, apareció la necesidad de definir nuevas variables de entrada.

El escenario definido como primera área de evacuación, resulta para el análisis que se va a llevar a cabo un escenario sumamente complejo y de alto grado de incierto por las siguientes razones:

- Desconocimiento de la ubicación de las personas a evacuar dentro de esta primera área de evacuación. El desarrollo SSI asume el conocimiento previsible de la cantidad de vehículos ligeros, pesados y autobuses dentro de la primera área de evacuación, pero resulta extraordinariamente difícil conocer la distribución de los mismos así como la cantidad y ubicación exacta de las personas dentro del escenario.
- Desconocimiento de longitudes y características de las posibles vías de evacuación. El desconocimiento de la posición de las personas en el escenario hace prácticamente imposible conocer las distancias a recorrer así como las complejidades de las vías de evacuación.

Debido a estas incertidumbres en el estudio del proceso de evacuación, el algoritmo desarrollado se presenta como un carácter estocástico y sencillo. El enfoque estocástico permite abarcar las múltiples e impredecibles situaciones que pueden encontrarse en la primera área de evacuación, mientras que un planteamiento sencillo permite soslayar la gran diversidad de situaciones posibles que pueden presentarse con respecto a las conductas humanas.

El subsistema se ocupa de realizar una estimación del proceso de evacuación con respecto al tiempo máximo necesario para que todas las personas atrapadas en el escenario alcancen un lugar seguro desde el momento de ocurrencia

del suceso, de manera que se pueda disponer de información adicional sobre las consecuencias del evento. El subsistema emplea la siguiente expresión para el cálculo del tiempo de evacuación de cada persona:

$$t_{EI_i} = t_{pm_i} + \frac{d_{mov_i}}{v_{mov_i}}$$

donde:

$t_{EI_i}$  - tiempo de evacuación de la primera área de evacuación de la i-ésima persona;

$t_{pm_i}$  - tiempo de pre-movimiento de la i-ésima persona, correspondiente al tiempo transcurrido entre el momento en que ocurre el accidente hasta que esta persona comienza el movimiento;

$d_{mov_i}$  - distancia recorrida por la i-ésima persona desde su posición de origen en el escenario hasta abandonarlo;

$v_{mov_i}$  - velocidad media de desplazamiento de la i-ésima persona durante su salida de la primera área de evacuación.

El tiempo de evacuación de la i-ésima persona,  $t_{EI_i}$ , es una variable aleatoria debido a la aleatoriedad de los parámetros de los que depende según la expresión anterior. Es lógico asumir que los tiempos de pre-movimiento y las velocidades medias de desplazamiento tengan funciones de distribución de probabilidades diferentes para los distintos grupos de movilidad. Aunque el tipo de función de distribución sea la misma, los parámetros que la caracterizan (esperanza matemática, desviación estándar) son diferentes para las personas con movilidad normal, reducida o asistida.

No sucede lo mismo con la distancia recorrida por la i-ésima persona ya que independientemente de su movilidad puede estar inicialmente en cualquier posición dentro del escenario y recorrer una ruta de escape de éste que es independiente de la movilidad.

Conociendo las funciones de distribución o funciones de densidad de probabilidad de las variables  $t_{pm_i}$  y  $v_{mov_i}$  para cada uno de los grupos de movilidad, y la función única para la variable  $d_{mov_i}$ , así como la cantidad de personas de cada grupo en el escenario, se puede simular empleando los métodos de Monte Carlo, cada caso hipotético de evacuación de todos los implicados en este proceso. La selección del mayor tiempo resultante en cada caso simulado corresponde al tiempo total de evacuación de la primera área de evacuación ( $T_{TEI}$ ).

La repetición de este proceso  $n_{iter}$  veces proporciona una muestra de volumen  $n_{iter}$  de  $T_{TEI}$  y su procesamiento estadístico permite su ajuste a una función de distribución conocida o su estimación mediante el histograma, así como el cálculo de sus principales características cuantitativas. Consideraremos que la variable principal de salida del modelo será el percentil para una probabilidad dada  $p$  (usualmente mayor o igual que 0.9) del tiempo total de evacuación de la primera área de evacuación.

Con ello se cuenta con un valor del tiempo total de evacuación tal que el valor real en cualquier caso, con una probabilidad  $p$ , será menor o igual que éste. Por las razones explicadas anteriormente, se desarrolló un algoritmo matemático de la siguiente manera:

$$T_{TEI_j} = \max \left\{ t_{EI_{ij}}^{(MN)} \Big|_{i=1, n'_{IMN}}, t_{EI_{ij}}^{(MR)} \Big|_{i=1, n'_{IMR}}, t_{EI_{ij}}^{(MA)} \Big|_{i=1, n'_{IMA}} \right\}_{j=1, n_{iter}}$$

donde:

$T_{TEI_j}$  - Tiempo Total de Evacuación del Escenario I (primera área de evacuación) para la j-ésima realización;

$t_{EI_{ij}}^{(MN)}$  - tiempo de evacuación de la i-ésima persona con movilidad normal en la j-ésima realización;

$t_{EI_{ij}}^{(MR)}$  - tiempo de evacuación de la i-ésima persona con movilidad reducida en la j-ésima realización;

$t_{EI_{ij}}^{(MA)}$  - tiempo de evacuación de la i-ésima persona con movilidad asistida en la j-ésima realización;

$\max\{...\}$  - valor máximo del conjunto.

Asimismo:

$$\left. \begin{aligned} t_{EIij}^{(MN)} &= t_{pmij}^{(MN)} + \frac{d_{movij}}{v_{movij}^{(MN)}} \\ t_{EIij}^{(MR)} &= t_{pmij}^{(MR)} + \frac{d_{movij}}{v_{movij}^{(MR)}} \\ t_{EIij}^{(MA)} &= t_{pmij}^{(MA)} + \frac{d_{movij}}{v_{movij}^{(MA)}} \end{aligned} \right\}$$

donde:

- 20  $t_{pmij}^{(MN)}$  - tiempo de pre-movimiento de la i-ésima persona con movilidad normal en la j-ésima iteración;
- $t_{pmij}^{(MR)}$  - tiempo de pre-movimiento de la i-ésima persona con movilidad reducida en la j-ésima iteración;
- 25  $t_{pmij}^{(MA)}$  - tiempo de pre-movimiento de la i-ésima persona con movilidad asistida en la j-ésima iteración;
- $d_{movij}$  - distancia recorrida por la i-ésima persona en la j-ésima iteración;
- $v_{movij}^{(MN)}$  - velocidad media de desplazamiento de la i-ésima persona con movilidad normal en la j-ésima iteración;
- 30  $v_{movij}^{(MR)}$  - velocidad media de desplazamiento de la i-ésima persona con movilidad reducida en la j-ésima iteración;
- $v_{movij}^{(MA)}$  - velocidad media de desplazamiento de la i-ésima persona con movilidad asistida en la j-ésima iteración.

A partir de las variables de entrada definidas, correspondientes con las variables de salida del SSI, así como considerando como entrada las leyes de distribución que definen las variables aleatorias correspondientes con los distintos tiempos de pre-movimiento, distancias recorridas y velocidades de desplazamiento, el subsistema genera cuatro muestras de tiempos máximos de evacuación cada una de volumen igual número de iteraciones seleccionado, tres de las muestras corresponden con los tiempos máximos de evacuación por tipo de movilidad y la cuarta recoge el tiempo máximo de evacuación en cada iteración. Cada muestra es procesada estadísticamente utilizando la siguiente metodología:

- 45 1) Se calculan las características cuantitativas principales de la muestra.
- 2) Se realiza el ajuste o estimación de las distribuciones de la variable aleatoria  $T_{TEI}$ . Para ello se trata inicialmente de ajustar la muestra a las distribuciones normal, normal logarítmica o uniforme. Se empleó las pruebas  $K^2$  de D'Agostino para las dos primeras (calculando previamente el logaritmo natural de los elementos de la muestra en el caso de comprobación de la ley normal logarítmica) y la prueba modificada de Anderson-Darling para el caso de la distribución uniforme. En caso de no satisfacer ninguna de las tres distribuciones se estima la distribución mediante su histograma, empleando la regla de Freedman y Diaconis para calcular el ancho del intervalo muestral.
- 50 3) Se calcula el percentil para una probabilidad de confianza  $p$  que puede ser representado mediante la fórmula genérica siguiente:

$$T_{TEI}^{[p]} = F_{TEI}^{-1}(p)$$

donde:

- 65  $F_{TEI}^{-1}(p)$  - función de distribución inversa de  $T_{TEI}$  evaluada para la probabilidad de confianza  $p$ .

2.2 Subsistema para el Área de Evacuación II

Al igual que ocurría para la primera área de evacuación, este subsistema es dependiente del SSI, de manera que ciertas variables de entrada del SEII, se corresponden con algunas variables de salida del SSI:

- 1)  $d'_{II}$  - distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el final de la segunda área de evacuación.
- 2)  $n'_{IV}$  - cantidad total de vehículos en la segunda área de evacuación cuyos conductores y pasajeros deban ser evacuados.

En el análisis de la evacuación en este escenario se asume que la movilidad de las personas atrapadas no se ve afectada por el suceso, de modo que continuando con la metodología seguida para la primera área evacuación, el algoritmo matemático que define el subsistema de evacuación para este escenario es:

$$T_{TEII_j} = \max \left\{ t_{TEII_{ij}} \Big|_{i=1, q_j} \right\} \Big|_{j=1, n_{iter}}$$

donde:

$T_{TEII_j}$  - Tiempo Total de Evacuación del Área de Evacuación II (segunda área de evacuación) para la j-ésima realización;

$t_{TEII_{ij}}$  - tiempo de evacuación de la i-ésima persona en la j-ésima realización;

$q_j$  - cantidad de personas a evacuar en la j-ésima realización;

$n_{iter}$  - cantidad de iteraciones (realizaciones);

$\max\{\dots\}$  - valor máximo del conjunto.

La cantidad de personas a evacuar en cada realización  $q_j$  se define por la expresión:

$$q_j = \tilde{k}_{VLj} \cdot n'_{IVL} + \tilde{k}_{VPj} \cdot n'_{IVP} + \tilde{k}_{VAj} \cdot n'_{IVA}$$

donde:

$n'_{IVL}$  - cantidad de vehículos ligeros en la segunda área de evacuación (Área de Evacuación II);

$$n'_{IVA} = P(AVPA) \cdot n'_{IVPA}$$

- cantidad de autocares en el Escenario (segunda área de evacuación);

$$n'_{IVP} = n'_{IVPA} - n'_{IVA}$$

- cantidad de vehículos pesados en el Escenario (segunda área de evacuación);

$P(AVPA)$  - probabilidad de que un vehículo, del conjunto de vehículos pesados y autocares que transitan usualmente por el túnel, sea autocar;

Evidentemente:

$$n'_{IIV} = n'_{IIVL} + n'_{IIVPA} = n'_{IIVL} + n'_{IIVP} + n'_{IIVA}$$

$\tilde{k}_{VLj}$  - coeficiente de ocupación de un vehículo ligero en la j-ésima iteración, que se asume como un entero aleatorio uniformemente distribuido entre 1 y 5;

$\tilde{k}_{VPj}$  - coeficiente de ocupación de un vehículo pesado en la j-ésima iteración, que se asume como un entero aleatorio uniformemente distribuido entre 1 y 2;

$\tilde{k}_{VAj}$  - coeficiente de ocupación de un autocar en la j-ésima iteración, que se asume como un entero aleatorio uniformemente distribuido entre 20 y 40.

El tiempo de evacuación de cada persona en cada iteración se calcula mediante la fórmula:

$$t_{TEII_{ij}} = t_{pm_{ij}} + \frac{d_{mov_{ij}}}{v_{mov_{ij}}}$$

### 3. Subsistema de Toma de Decisiones

Considerando las decisiones a adoptar por el operador del centro de control de túneles, se desarrolló un algoritmo en base a árboles de decisiones para Sistemas Expertos tal como se expresa a continuación:

#### 3.1 Aviso al Personal de Explotación

Esta decisión viene condicionada por la constatación por parte del operador de la ocurrencia de un incidente:

$$a_{SI} = true, false$$

Es decir, que la variable  $a_{SI}$  sea verdadera (true). La figura 3 muestra un árbol de decisiones para el aviso al personal de explotación. La expresión lógica que expresa el aviso al personal de explotación es la siguiente:

$$a'_{APE} = a_{SI}$$

#### 3.2 Prevención a los Servicios de Emergencias (112)

Según los protocolos (fichas) de actuación de los operadores del centro de control, la prevención a los servicios de emergencia viene supeditada al cierre de cómo mínimo un carril del túnel siempre que el túnel tenga más de un carril, o lo que es lo mismo:

$$a'_{PSE} = (m_{CAR} \geq 1) \wedge (m_{MAX} > 1)$$

La figura 4 muestra un árbol de decisiones para la prevención a los servicios de emergencias.

#### 3.3 Activación de los Servicios de Emergencia

Existen una serie de eventos que conllevan a la activación de los servicios de emergencia y su personificación en el túnel: el cierre total del túnel, la ocurrencia de un incendio en su interior, un vertido de sustancia peligrosa o la sospecha de la existencia de al menos un herido a causa del accidente. La figura 5 muestra un árbol de decisiones para la activación de los servicios de emergencias, de acuerdo con una realización de la presente invención. La expresión que indica la necesidad de tomar la decisión de activar los servicios de emergencia es la siguiente:

$$a'_{ASE} = a_{ASE} = (m_{CAR} = m_{MAX}) \vee (a_{FIRE}) \vee (a_{VSP}) \vee (n_{HER} \neq 0)$$

3.4 Necesidad de Evacuación inmediata

El decreto de la necesidad de evacuación del túnel viene determinado por el surgimiento de un incendio o el vertido o escape de sustancias peligrosa. La figura 6 muestra un árbol de decisiones para la necesidad de evacuación, de acuerdo con una realización de la presente invención.

$$a'_{EVAC} = (a_{FIRE}) \vee (a_{VSP})$$

3.5 Bidireccionalidad del Escenario I (primera área de evacuación) para su evacuación

La posibilidad de evacuación en los dos sentidos (bidireccionalidad del Área de Evacuación I) viene dada por la obstrucción total o parcial del túnel. La figura 7 muestra un árbol de decisiones para la bidireccionalidad de la primera área de evacuación, de acuerdo con una realización de la presente invención. En la figura 7 se muestra el árbol de decisión al que responde la expresión matemática de la posibilidad de bidireccionalidad.

$$a'_{BIDIREC} = m_{CAR} < m_{MAX}$$

3.6 Cantidad de carriles del túnel que se cierran a la circulación

Se asume que el operador es capaz de determinar el número de carriles obstruidos mediante las imágenes del CCTV.

La figura 8 muestra un árbol de decisiones para la cantidad de carriles a cerrar, de acuerdo con una realización de la presente invención. La cantidad de carriles a cerrar es igual al número de carriles obstruidos tal como indica la expresión:

$$m'_{CAR} = m_{CAR} (m_{CAR} < m_{max})$$

3.7 Cierre total del túnel

En el caso de que el número total de carriles obstruidos sea igual al número de carriles total del túnel se debe decretar el cierre total del túnel, tal como indica la expresión:

$$a_{CERRAR} = (m'_{car} = m_{max})$$

La figura 9 muestra un árbol de decisiones para el cierre del túnel, de acuerdo con una realización de la presente invención.

3.8 Iluminación máxima en el túnel

La secuencia de iluminación máxima se activa en caso de incendio en el interior del túnel o vertido de sustancia peligrosa, tal como indica la expresión:

$$a_{ILUM} = a_{FIRE} a_{VSP}$$

La figura 10 muestra un árbol de decisiones para la activación del nivel máximo de iluminación, de acuerdo con una realización de la presente invención.

3.9 Información a los Usuarios

La necesidad de informar a los usuarios en caso de la ocurrencia de un incidente está condicionada por la detección y confirmación por parte del operador de un incidente, lo que viene definido por la expresión:

$$a_{INFOR} = a_{SI}$$

La figura 11 muestra un árbol de decisiones para informar a los usuarios, de acuerdo con una realización de la presente invención.

#### 5 4. Sistema Integrado

A partir del método y de los tres subsistemas se ha implementado un sistema inteligente para la gestión de la emergencia, que viene acompañado de un sistema secundario que genera y/o modifica los archivos de datos que introducen la geometría y características del túnel concreto de aplicación del sistema principal integrado. Un ejemplo de una herramienta de generación de estos datos se ilustra en la figura 12. La figura 13 muestra un ejemplo de implementación de la introducción de una serie de variables de entrada que definen una situación de emergencia detectada.

El sistema integrado, permite introducir una serie de variables de entrada que definen la situación de emergencia detectada. Un ejemplo de una herramienta que permite introducir estas variables de entrada se ilustra en la figura 13. En primer lugar, para que el sistema trabaje adecuadamente, se debe seleccionar el archivo de datos que define la geometría y características del túnel (generado con el sistema secundario). El usuario del sistema debe indicar mediante cinco variables booleanas, la veracidad de la ocurrencia de un Incidente, de un Incendio, de Vertido, de Herido(s) y si se trata de un incidente clasificado como grave. Se introducen otro grupo de variables numéricas.

- 20 • Cantidad de carriles obstruidos.
- Número de la cámara que muestra el incidente.
- Lugar aproximado del incidente en el sector.
- 25 • Cantidad de vehículos ligeros implicados en el incidente.
- Cantidad de vehículos pesados implicados en el incidente.
- Cantidad de autocares implicados en el incidente.
- 30 • Cantidad total de vehículos atrapados en el interior del túnel.
- Cantidad de vehículos pesados y autocares atrapados en el interior del túnel.
- 35 • Tiempo de retardo en la detección del incidente.

Una vez introducidas las variables de entrada, en primer lugar, al pulsar sobre el botón *Decisiones* de la herramienta ejemplificada, el sistema genera la propuesta de decisiones a tomar por el operador del centro de control de túneles en función de la gravedad y condiciones del incidente, de entre las siguientes, que se ejemplifican en la figura 14:

- Aviso al personal de explotación.
- Prevención de los servicios de emergencia.
- 45 • Activación de los servicios de emergencia.
- Necesidad de evacuación inmediata.
- 50 • Cierre del túnel.
- Nivel máximo de iluminación.
- Informar a los usuarios.
- 55 • Bidireccionalidad de la primera área de evacuación.
- Número de carriles a cerrar.

60 En cualquier caso, el sistema permite, a través del botón *Información adicional del suceso*, mostrar información que puede resultar útil a la hora de analizar el alcance y gravedad del incidente, tal como muestra la figura 15 y ofreciendo una serie de resultados numéricos.

- 65 • Distancia hasta el inicio del Área de Evacuación I.
- Distancia hasta el fin del Área de Evacuación II.
- Cantidad total de personas a evacuar en el Área de Evacuación I.

- Cantidad de personas con movilidad normal en el Área de Evacuación I.
- Cantidad de personas con movilidad reducida en el Área de Evacuación I.
- 5 • Cantidad de personas con movilidad asistida en el Área de Evacuación I.
- Distancia hasta el fin del Área de Evacuación II.
- Cantidad de vehículos a evacuar del Área de Evacuación II.

10

Por otro lado, en el caso de que en la propuesta de decisiones se active la *Necesidad de evacuación inmediata*, el sistema permite la opción de obtener una prognosis sobre el tiempo de evacuación para cada una de las áreas de evacuación consideradas. Al pulsar sobre el botón *Análisis de la Evacuación*, comienza a trabajar el subsistema de evacuación, requiriendo al usuario introducir una serie de *Variables de entrada para los modelos de evacuación*, tal como se muestra en la figura 16. Dichas variables pueden dividirse en tres grupo:

15

- *Variables generales de los modelos*: Número de iteraciones generadas mediante el Método de Monte Carlo, nivel de confianza o significación para el ajuste de la distribución (a elegir entre 0,1 0.05 y 0.01) y nivel de confianza para el cálculo del percentil (a elegir entre 0.9, 0.95 y 0.99).
- 20 • *Variables propias del Área de Evacuación I*: Permite al usuario introducir las variables conductuales correspondientes a las personas atrapadas en lo que se ha definido como primera área de evacuación según su movilidad. Media (*M*) y desviación estándar (*Sigma*) para los tiempos de pre movimiento y las velocidades de desplazamiento para movilidad normal, reducida y asistida.
- 25 • *Variables propias del Área de Evacuación II*: De la misma manera que para la primera área de evacuación, el programa permite introducir los valores para las variables conductuales de las personas atrapadas en la segunda área de evacuación (Media *M* y desviación estándar sigma para el tiempo de pre movimiento y velocidad de desplazamiento de los usuarios a evacuar). Se introduce el valor del tiempo de respuesta (*tpm0*) y velocidad de desplazamiento (*vmov0*) de la persona que inicia la evacuación (emisor). En este bloque también se definen los coeficientes de ocupación por tipo de vehículo (ligero VL, pesado VP y autocares VA) mediante un rango de valores, así como la probabilidad de que del conjunto de autocares y vehículos pesados sea un autocar.

25

30

Una vez introducidos todas las variables de entrada propias para los modelos de evacuación, al pulsar sobre el botón continuar subsistema de evacuación muestra de manera consecutiva los resultados obtenidos sobre el análisis de la evacuación, tal como se muestra en las figuras 17 y 18 (primera y segunda áreas de evacuación, respectivamente). Analizando las muestras obtenidas, el sistema obtiene como dato principal de salida el percentil del tiempo total de evacuación, además del tipo de ley de distribución de probabilidades a la que se ajusta la muestra correspondiente, la esperanza matemática, desviación estándar y rango de valores.

40

### Ejemplo de realización de la invención

45 El sistema inteligente se aplicó al túnel del Lantueno de la Autovía A-67 (Cantabria - La Meseta), definiendo el archivo de datos con las características del túnel. Se asumieron los siguientes dos tipos de escenarios (Escenario A y Escenario B), cuyo layout se ilustra, respectivamente, en las figuras 19 y 20.

El escenario A corresponde con un accidente ocurrido en la zona próxima a la salida, quedando atrapados el mayor número posible de vehículos. Se consideran una serie de casos.

50

- *Caso 1.1.-* Accidente con incendio (sin vertido). Considerando la ubicación del accidente en la zona 3, dos carriles obstruidos y la existencia de heridos, se consideraron las siguientes variantes del escenario:
  - 55 ○ Caso 1.1.1. Accidente entre dos vehículos ligeros.
  - Caso 1.1.2 Accidente entre un vehículo ligero y un vehículo pesado.
  - Caso 1.1.3. Accidente entre dos vehículos pesados.
- 60 • *Caso 1.2.-* Accidente con incendio (con vertido). Considerando el resto de valores anteriormente indicados además de las siguientes variantes:
  - 65 ○ Caso 1.2.1. Accidente entre dos vehículos ligeros.
  - Caso 1.2.2. Accidente entre un vehículo ligero y un vehículo pesado.

- Caso 1.2.3. Accidente entre dos vehículos pesados.
- *Caso 1.3.-* Accidente sin incendio (con vertido). Considerando el resto de valores anteriormente indicados además de las siguientes variantes:
  - Caso 1.3.1. Accidente entre dos vehículos ligeros.
  - Caso 1.3.2. Accidente entre un vehículo ligero y un vehículo pesado.
  - Caso 1.3.3. Accidente entre dos vehículos pesados.
- *Caso 1.4.-* Accidente con incendio (con vertido). Considerando el resto de valores anteriormente indicados además de las siguientes variantes:
  - Caso 1.4.1. Accidente entre tres vehículos ligeros y un vehículo pesado.
  - Caso 1.4.2. Accidente entre un vehículo ligero y tres vehículos pesados.
  - Caso 1.4.3. Accidente entre tres vehículos pesados y tres vehículos ligeros.

El escenario B corresponde con la ocurrencia de un incidente en la zona intermedia del túnel, considerando los casos más probables según el registro de incidencias del túnel. Se consideraron una serie de casos.

- *Caso 2.1.* Accidente con incendio (con vertido).
  - Caso 2.1.1. Vehículo ligero.
  - Caso 2.1.2. Vehículo pesado.
- *Caso 2.2.* Accidente con incendio (sin vertido).
  - Caso 2.2.1. Vehículo ligero.
  - Caso 2.2.2. Vehículo pesado.
- *Caso 2.3.* Accidente sin incendio (con vertido).
  - Caso 2.3.1. Vehículo ligero.
  - Caso 2.3.2. Vehículo pesado.

*Datos de Entrada*

En la Tabla 3, se recogen los datos de entrada del sistema.

TABLA 3

*Datos de entrada para el Sistema Inteligente integrado*

Caso	Incendio	Vertido	Heridos	Lugar del SI	Nº Cámara	Carriles bloqu.	Veh. implic.		Veh. atrap.	
							Lig.	Pes.	Lig.	Pes.
1.1.1	SI	NO	SI	3	5	2	2	0	120	16
1.1.2	SI	NO	SI	3	5	2	1	1	120	16
1.1.3	SI	NO	SI	3	5	2	0	2	120	16
1.2.1	SI	SI	SI	3	5	2	2	0	120	16
1.2.2	SI	SI	SI	3	5	2	1	1	120	16
1.2.3	SI	SI	SI	3	5	2	0	2	120	16

1.3.1	NO	SI	SI	3	5	2	2	0	120	16
1.3.2	NO	SI	SI	3	5	2	1	1	120	16
1.3.3	NO	SI	SI	3	5	2	0	2	120	16
1.4.1	SI	SI	SI	3	5	2	3	1	120	16
1.4.2	SI	SI	SI	3	5	2	3	3	120	16
1.4.3	SI	SI	SI	3	5	2	1	3	120	16
2.1.1	SI	NO	NO	2	3	1	1	0	67	9
2.1.2	SI	NO	NO	2	3	1	0	1	67	9
2.2.1	SI	SI	NO	2	3	1	1	0	67	9
2.2.2	SI	SI	NO	2	3	1	0	1	67	9
2.3.1	NO	SI	NO	2	3	1	1	0	67	9
2.3.2	NO	SI	NO	2	3	1	0	1	67	9

Resultados sobre las decisiones propuestas

El sistema, ofrece las decisiones recomendadas a acometer por el operador del centro de control de túneles (Tablas 4 y 5), coincidiendo estas con las recogidas en los protocolos (fichas) de actuación según la situación de emergencia considerada:

TABLA 4

Decisiones a tomar por el operador: Escenario A

DECISIONES	CASOS											
	1.1.1	1.1.2	1.1.3	1.2.1	1.2.2	1.2.3	1.3.1	1.3.2	1.3.3	1.4.1	1.4.2	1.4.3
Aviso al P.E*	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Prevención S.E*												
Activación S.E	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Necesidad Evacuación	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Cierre Túnel	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Iluminación máxima	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Informar usuarios	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Bidirecc.												
Carriles a cerra	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

\*P.E = Personal de Explotación. \*S.E = Servicios de Emergencia

TABLA 5

Decisiones a tomar por el operador: Escenario B

DECISIONES	CASOS					
	2.1.1	2.1.2	2.2.1	2.2.2	2.3.1	2.3.2
Aviso al P.E	x	x	x	x	x	x
Prevención S.E						
Activación S.E	x	x	x	x	x	x
Necesidad Evacuación	x	x	x	x	x	x
Cierre Túnel						
Iluminación máxima	x	x	x	x	x	x

<b>Informar usuarios</b>	x	x	x	x	x	x
<b>Bidireccionalidad</b>	x	x	x	x	x	x
<b>Carriles a cerrar</b>	1	1	1	1	1	1

\*P.E = Personal de Explotación. \*S.E = Servicios de Emergencia

*Resultados sobre la información adicional del incidente*

Con respecto a los resultados numéricos sobre el incidente, el sistema permite la opción de mostrar información adicional que puede resultar útil a la hora de comunicarse con servicios externos a la hora de estimar el alcance de los sucesos.

En las Tablas 6 y 7 se muestran los resultados sobre la estimación de de personas implicadas y sus afectaciones.

TABLA 6

*Resultados numéricos del incidente: Escenario A*

Movilidad	CASOS											
	1.1.1	1.1.2	1.1.3	1.2.1	1.2.2	1.2.3	1.3.1	1.3.2	1.3.3	1.4.1	1.4.2	1.4.3
<b>normal</b>	1	1	0	1	1	0	1	1	0	2	1	2
<b>reducida</b>	2	2	1	2	2	1	2	2	1	3	2	4
<b>asistida</b>	3	2	2	3	2	2	3	2	2	4	3	5
<b>Total</b>	5	4	3	5	4	3	5	4	3	9	6	11

TABLA 7

*Resultados numéricos del incidente: Escenario B*

RESULTADOS NUMERICOS	CASOS					
	2.1.1	2.1.2	2.2.1	2.2.2	2.3.1	2.3.2
<b>Pers. mov. normal</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Pers. mov. reducida</b>	1	1	1	1	1	1
<b>Pers. mov. asistida</b>	2	1	2	1	2	1
<b>Total pers.a evacuar</b>	3	2	3	2	3	2

Con respecto a la información adicional del incidente, son resultados que varían en cada uno de los casos debido a que se trata de una variable aleatoria que depende de una probabilidad de ocurrencia obtenida. Las características del suceso son determinante a la hora de estimar el número de personas involucradas y su afectación.

*Resultados sobre la evacuación en el Escenario A y B*

En las figuras 21-24, se muestran los resultados obtenidos. Para los casos del Escenario B, debido a la gravedad que se asumido, la estimación refleja que ningún usuario tendrá una movilidad normal. Observando los resultados obtenidos en ambos Escenarios, se constata que para los casos del Escenario A, el percentil del Tiempo Total de Evacuación es superior a los casos del Escenario B, debido a la asunción de un mayor número de vehículos atrapados en el Área de Evacuación II.

En resumen con respecto a los sistemas convencionales: Actualmente existen algunos sistemas inteligentes aplicados a diferentes ámbitos entre ellos el transporte pero orientados a la favorecer la operatividad, como el caso de los sistemas de peajes automáticos, pero ninguno ha sido aplicado al estudio de la seguridad en túneles de carretera. En cuanto al subsistema de incidente, no se recoge en la literatura ningún sistema similar que realice un análisis del accidente registrado ofreciendo una estimación de las posibles consecuencias del mismo.

Por otra parte, en lo relativo a subsistemas de evacuación, por primera vez se ha propuesto un modelo de evacuación que representa las características específicas de la evacuación en un túnel de carretera. Lo mismo ocurre con el subsistema de decisiones, ya que no se conoce ningún sistema o subsistema de decisión que se aplique a entornos como los túneles de carretera.

5

Aunque en la presente memoria sólo se han representado y descrito realizaciones particulares de la invención, el experto en la materia sabrá introducir modificaciones y sustituir unas características técnicas por otras equivalentes, dependiendo de los requisitos de cada caso, sin apartarse del ámbito de protección definido por las reivindicaciones adjuntas.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Un método para la gestión de una emergencia mediante el apoyo para la toma de decisiones de seguridad en un túnel de carretera, que comprende las etapas de:

- Identificar un escenario del túnel de carretera a través de una primera área de evacuación (Área de Evacuación I) y una segunda área de evacuación (Área de Evacuación II), donde la primera área de evacuación es la zona donde se encuentran los vehículos y las personas directamente involucradas en la situación de emergencia, así como las personas que se encuentran en peligro inminente por el surgimiento de incendio o vertido de sustancias peligrosas; y la segunda área de evacuación es una zona adyacente a la primera área de evacuación, donde se encuentran los vehículos atrapados en el embotellamiento producido por la situación de emergencia;
- Identificar la posibilidad de bidireccionalidad ( $a'_{BIDIREC}$ ) en el proceso de evacuación de la primera área de evacuación;
- Calcular:
  - La distancia ( $d_{SI}$ ) desde la boca contracorriente del túnel hasta el lugar de ocurrencia del incidente;
  - La distancia ( $d'_{I1}$ ) desde la boca contracorriente del túnel hasta el comienzo de la primera área de evacuación (Área de Evacuación I);
  - La distancia ( $d'_{I2}$ ) desde la boca contracorriente del túnel hasta el final de la primera área de evacuación (Área de Evacuación I);
- Calcular el número de personas a evacuar;
- Calcular el tiempo de evacuación de cada persona;
- Proponer una decisión adecuada en función de la emergencia detectada.

2. El método de la reivindicación 1, donde dicha etapa de calcular la distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el lugar de ocurrencia del incidente ( $d_{SI}$ ) se realiza mediante la siguiente expresión:

$$d_{SI} = d_{CAM}(n_{CCTV}) + \delta_{ZM} + \frac{\delta_{CCTV} + 1}{6} \cdot \Delta_{CAM}$$

donde:

$d_{SI}$  - es la distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el lugar aproximado de ocurrencia del incidente;

$d_{CAM}(n_{CCTV})$  - distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta la cámara del CCTV número  $n_{CCTV}$  (el número de cámara que detecte el incidente de manera automática en el Centro de Control);

$\delta_{ZM}$  - distancia de la zona muerta de la cámara;

$\delta_{CCTV}$  - lugar aproximado del sector del túnel captado por la cámara del CCTV donde ha ocurrido el incidente. Este sector es comúnmente menor o igual a 150 m y es conocido para cada túnel. Si por ejemplo  $\delta_{CCTV} = 1$ , el suceso ha ocurrido en la primera mitad del túnel;

$\Delta_{CAM}$  - distancia entre cámaras.

3. El método de la reivindicación 2, donde las distancias hasta cada una de las cámaras del túnel desde la boca de entrada se pueden calcular mediante la expresión:

$$d_{CAM}(i) = d_{CAM1} + i \cdot \Delta_{CAM} \quad \text{para } 0 \leq i \leq m_{CAM}$$

donde:

$d_{CAM1}$  - representa la distancia entre la boca contracorriente del túnel hasta la primera cámara del CCTV;

$\Delta_{CAM}$  - distancia entre las cámaras del túnel.

4. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde dicha etapa de calcular la distancia ( $d'_{11}$ ) desde la boca contracorriente del túnel hasta el comienzo de la primera área de evacuación se realiza mediante la siguiente expresión:

$$d'_{11} = \begin{cases} d_{GAL_i} & \text{si } A_G = (i \geq 1) \wedge [(d_{SI} - d_{GAL_i}) < (d_{SI} - d_{GAL_j})] \wedge (j < i) \\ 0 & \text{si } \overline{A_G} \end{cases}$$

donde:

$d_{GAL_i}$  - la distancia desde la entrada contracorriente del túnel hasta la i-ésima galería;

$d_{GAL_j}$  - la distancia desde la entrada contracorriente del túnel hasta la j-ésima galería;

$d_{SI}$  - la distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el lugar (centro) aproximado de ocurrencia del incidente;

$A_G$  - variable que indica si existe una galería anterior a la galería i.

5. El método de la reivindicación 4, donde las distancias hasta las distintas galerías del túnel se calculan mediante la expresión:

$$d_{GAL_j} = d_{GAL_1} + j \cdot \Delta_{GAL} \quad \text{para } 0 \leq j \leq m_{GAL}$$

donde:

$d_{GAL_1}$  es la distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta la primera galería;

$\Delta_{GAL}$  es la distancia entre las galerías del túnel;

$m_{GAL}$  es la cantidad total de galerías del túnel.

6. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde dicha etapa de calcular la distancia ( $d'_{12}$ ) desde la boca contracorriente del túnel hasta el final de la primera área de evacuación (Área de Evacuación I) se calcula mediante la expresión:

$$d'_{12} = \begin{cases} d_{GAL_k} & \text{si } A_{G1} \wedge a'_{BIDIREC} \\ L_T & \text{si } A_{G1} \wedge a'_{BIDIREC} \\ d_{SI} + \frac{\Delta_{CAM}}{3} & \text{si } a'_{BIDIREC} = false \end{cases}$$

donde:

$$A_{G1} = (k \geq 1) \wedge [(d_{GAL_k} - d_{SI}) < (d_{GAL_j} - d_{SI})] \wedge (j > k)$$

y donde:

$d_{GAL_k}$  - es la distancia desde la entrada contracorriente del túnel hasta la k-ésima galería;

$L_T$  - es la longitud del túnel;

$d_{SI}$  - es la distancia desde la boca contracorriente del túnel hasta el lugar (centro) aproximado de ocurrencia del incidente;

$\Delta_{CAM}$  - representa la distancia entre las cámaras del túnel;

$A_{GI}$  - indica la existencia de una galería posterior al incidente;

$a'_{BIDIREC}$  - bidireccionalidad de la evacuación del túnel.

7. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde dicho número de personas a evacuar comprende el número de personas a evacuar en la primera área de evacuación y el número de personas a evacuar en la segunda área de evacuación.

8. El método de la reivindicación 7, donde el número de personas a evacuar en la primera área de evacuación ( $n'_{IT}$ ) se calcula mediante la expresión:

$$n'_{IT} = k_{VL} \cdot n_{VLDI} + k_{VP} \cdot n_{VPDI} + k_{VA} \cdot n_{VADI}$$

donde:

$k_{VL}$  - es la ocupación de pasajeros asumida por vehículo ligero;

$k_{VPP}$  es la ocupación de pasajeros asumida por vehículo pesado;

$k_{VA}$  es la ocupación de pasajeros asumida por autocar;

$n_{VLDI}$  - número de vehículos ligeros directamente involucrados en el incidente;

$n_{VPDI}$  - número de vehículos pesados directamente involucrados en el incidente;

$n_{VADI}$  - número de autocares directamente involucrados en el incidente.

9. El método de la reivindicación 7, donde el número de personas a evacuar en la primera área de evacuación ( $n'_{IT}$ ) es la suma de las personas a evacuar con movilidad normal ( $n'_{IMN}$ ), las personas con movilidad reducida ( $n'_{IMR}$ ) y las personas con movilidad asistida ( $n'_{IMA}$ ).

10. El método de la reivindicación 9, donde el número de personas a evacuar con movilidad normal ( $n'_{IMN}$ ), las personas con movilidad reducida ( $n'_{IMR}$ ) y las personas con movilidad asistida ( $n'_{IMA}$ ) se calcula de la siguiente forma:

- En caso de suceso grave:

$$\left. \begin{aligned} n'_{IMN} &= P(MN|A_{GSI}) \cdot n'_{IT} \\ n'_{IMR} &= P(MR|A_{GSI}) \cdot n'_{IT} \\ n'_{IMA} &= P(MA|A_{GSI}) \cdot n'_{IT} \end{aligned} \right\}$$

donde:

$n'_{IMN}$  - número de personas con movilidad normal;

$n'_{IMR}$  - número de personas con movilidad reducida;

$n'_{IMA}$  - número de personas con movilidad asistida;

$P(MN|A_{GSI})$  - probabilidad que tras la ocurrencia de un Incidente Grave, la movilidad de una persona sea normal;

$P(MR|A_{GSI})$  - probabilidad que tras la ocurrencia de un Incidente Grave, la movilidad de una persona sea reducida;

$P(MA|A_{GSI})$  - probabilidad que tras la ocurrencia de un Incidente Grave, la movilidad de una persona sea asistida;  
 $n'_{IT}$  - número total de personas atrapadas en el Área de Evacuación I.

5

- En caso de que el suceso no sea grave:

10

$$\left. \begin{aligned} n'_{IMN} &= P(MN|\bar{A}_{GSI}) \cdot n'_{IT} \\ n'_{IMR} &= P(MR|\bar{A}_{GSI}) \cdot n'_{IT} \\ n'_{IMA} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

15

donde:

20

$P(MN|\bar{A}_{GSI})$  - Probabilidad de que la movilidad de una persona sea normal en caso de que el incidente no sea grave;

25

$P(MR|\bar{A}_{GSI})$  - Probabilidad de que la movilidad de una persona sea reducida en caso de que el incidente no sea grave;

y donde

30

$$P(MR|A_{GSI}) = P(HL|A_{GSI})$$

donde:

35

$P(MR|A_{GSI})$  - probabilidad que tras la ocurrencia de un Incidente Grave, la movilidad de una persona sea reducida;

40

$P(HL|A_{GSI})$  es la probabilidad de que los implicados en un accidente sufran heridas leves si la hipótesis de que el suceso fue grave, es cierta.

Y:

45

$$P(MA|A_{GSI}) = P(HG|A_{GSI}) + P(F|A_{GSI})$$

donde

50

$P(MA|A_{GSI})$  - probabilidad que tras la ocurrencia de un Incidente Grave, la movilidad de una persona sea asistida;

$P(HG|A_{GSI})$  - probabilidad de que los implicados en un accidente sufran heridas graves si la hipótesis de que el suceso fue grave, es cierta;

55

$P(F|A_{GSI})$  - probabilidad de que los implicados en un accidente fallezcan si la hipótesis de que el suceso fue grave, es cierta.

11. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde dicho tiempo de evacuación de cada persona ( $t_{EI_i}$ ) se calcula mediante la siguiente expresión:

60

$$t_{EI_i} = t_{pm_i} + \frac{d_{mov_i}}{v_{mov_i}}$$

65

donde:

$t_{EI_i}$  - tiempo de evacuación de la primera área de evacuación de la i-ésima persona;

$t_{pm_i}$  - función de distribución o función de densidad de probabilidad que represente el tiempo de pre-movimiento de la  $i$ -ésima persona, correspondiente al tiempo transcurrido entre el momento en que ocurre el accidente hasta que esta persona comienza el movimiento;

5  $d_{mov_i}$  - distancia recorrida por la  $i$ -ésima persona desde su posición de origen en e escenario hasta abandonarlo;

$v_{mov_i}$  - función de distribución o función de densidad de probabilidad que representa la velocidad media de desplazamiento de la  $i$ -ésima persona durante su salida de la primera área de evacuación.

10

12. El método de la reivindicación 11, donde dicho tiempo de evacuación de cada persona se calcula estadísticamente de acuerdo con la siguiente expresión:

15

$$T_{TEI_j} = \max \left\{ t_{EI_{ij}}^{(MN)} \Big|_{i=1, n'_{IMN}}, t_{EI_{ij}}^{(MR)} \Big|_{i=1, n'_{IMR}}, t_{EI_{ij}}^{(MA)} \Big|_{i=1, n'_{IMA}} \right\}_{j=1, n_{iter}}$$

20

donde:

$T_{TEI_j}$  - Tiempo Total de Evacuación del Escenario I (primera área de evacuación) para la  $j$ -ésima realización;

25

$t_{EI_{ij}}^{(MN)}$  - tiempo de evacuación de la  $i$ -ésima persona con movilidad normal en la  $j$ -ésima realización;

$t_{EI_{ij}}^{(MR)}$  - tiempo de evacuación de la  $i$ -ésima persona con movilidad reducida en la  $j$ -ésima realización;

30

$t_{EI_{ij}}^{(MA)}$  - tiempo de evacuación de la  $i$ -ésima persona con movilidad asistida en la  $j$ -ésima realización;

$\max\{\dots\}$  - valor máximo del conjunto.

35

Y:

40

$$\left. \begin{aligned} t_{EI_{ij}}^{(MN)} &= t_{pm_{ij}}^{(MN)} + \frac{d_{mov_{ij}}}{v_{mov_{ij}}^{(MN)}} \\ t_{EI_{ij}}^{(MR)} &= t_{pm_{ij}}^{(MR)} + \frac{d_{mov_{ij}}}{v_{mov_{ij}}^{(MR)}} \\ t_{EI_{ij}}^{(MA)} &= t_{pm_{ij}}^{(MA)} + \frac{d_{mov_{ij}}}{v_{mov_{ij}}^{(MA)}} \end{aligned} \right\}$$

45

50

donde:

$t_{pm_{ij}}^{(MN)}$  - tiempo de pre-movimiento de la  $i$ -ésima persona con movilidad normal en la  $j$ -ésima iteración;

55

$t_{pm_{ij}}^{(MR)}$  - tiempo de pre-movimiento de la  $i$ -ésima persona con movilidad reducida en la  $j$ -ésima iteración;

$t_{pm_{ij}}^{(MA)}$  - tiempo de pre-movimiento de la  $i$ -ésima persona con movilidad asistida en la  $j$ -ésima iteración;

60

$d_{mov_{ij}}$  - distancia recorrida por la  $i$ -ésima persona en la  $j$ -ésima iteración;

$v_{mov_{ij}}^{(MN)}$  - velocidad media de desplazamiento de la  $i$ -ésima persona con movilidad normal en la  $j$ -ésima iteración;

$v_{mov_{ij}}^{(MR)}$  - velocidad media de desplazamiento de la  $i$ -ésima persona con movilidad reducida en la  $j$ -ésima iteración;

65

$v_{mov_{ij}}^{(MA)}$  - velocidad media de desplazamiento de la  $i$ -ésima persona con movilidad asistida en la  $j$ -ésima iteración.

13. El método de la reivindicación 7, donde el número de personas a evacuar en la segunda área de evacuación se calcula mediante la expresión:

$$T_{TEII_j} = \max \left\{ t_{TEII_{ij}} \Big|_{i=1, q_j} \right\} \Big|_{j=1, n_{iter}}$$

donde:

$T_{TEII_j}$  - Tiempo Total de Evacuación del Área de Evacuación II (segunda área de evacuación) para la j-ésima realización;

$t_{TEII_{ij}}$  - tiempo de evacuación de la i-ésima persona en la j-ésima realización;

$q_j$  - cantidad de personas a evacuar en la j-ésima realización;

$n_{iter}$  - cantidad de iteraciones (realizaciones);

$\max\{\dots\}$  - valor máximo del conjunto.

donde la cantidad de personas a evacuar en cada realización  $q_j$  se define por la expresión:

$$q_j = \tilde{k}_{VLj} \cdot n'_{IIVL} + \tilde{k}_{VPj} \cdot n'_{IIVP} + \tilde{k}_{VAj} \cdot n'_{IIVA}$$

donde:

$n'_{IIVL}$  - cantidad de vehículos ligeros en la segunda área de evacuación (Área de Evacuación II);

$n'_{IIVA} = P(AVPA) \cdot n'_{IIVPA}$  es la cantidad de autocares en el Escenario (segunda área de evacuación);

$n'_{IIVP} = n'_{IIVPA} - n'_{IIVA}$  es la cantidad de vehículos pesados en el Escenario (segunda área de evacuación);

$P(AVPA)$  - probabilidad de que un vehículo, del conjunto de vehículos pesados y autocares que transitan usualmente por el túnel, sea autocar;

$\tilde{k}_{VLj}$  - coeficiente de ocupación de un vehículo ligero en la j-ésima iteración, que se asume como un entero aleatorio uniformemente distribuido entre 1 y 5;

$\tilde{k}_{VPj}$  - coeficiente de ocupación de un vehículo pesado en la j-ésima iteración, que se asume como un entero aleatorio uniformemente distribuido entre 1 y 2;

$\tilde{k}_{VAj}$  - coeficiente de ocupación de un autocar en la j-ésima iteración, que se asume como un entero aleatorio uniformemente distribuido entre 20 y 40.

14. El método de la reivindicación 13, donde el tiempo de evacuación de cada persona en cada iteración se calcula mediante la fórmula:

$$t_{TEII_{ij}} = t_{pm_{ij}} + \frac{d_{mov_{ij}}}{v_{mov_{ij}}}$$

15. Un sistema inteligente integrado y automatizado para la gestión de una emergencia en un túnel de carretera, **caracterizado** por que comprende:

- Un subsistema de incidentes, configurado para realizar un análisis predictivo del posible desarrollo y consecuencias de un incidente, donde dicho evento es cualquier accidente, provocado por uno o varios vehículos

automotores que transiten por el túnel, que ocasione un daño real o potencial sobre las personas que se encuentren en su interior y eventualmente aconseje la evacuación de éstas;

- Un subsistema de evacuación; y
- Un subsistema de toma de decisiones;

estando dicho sistema inteligente integrado y automatizado configurado para llevar a cabo las etapas del método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14.

5  
10  
15  
20  
25  
30  
35  
40  
45  
50  
55  
60  
65

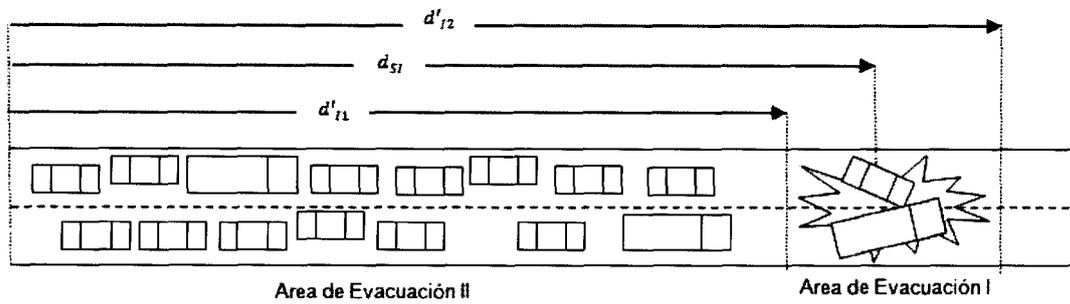


FIGURA 1

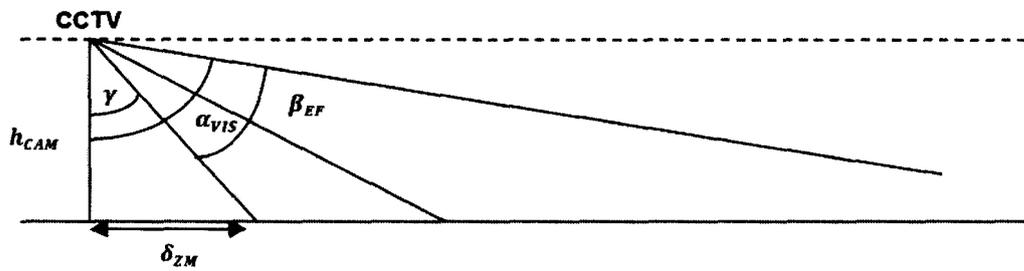


FIGURA 2

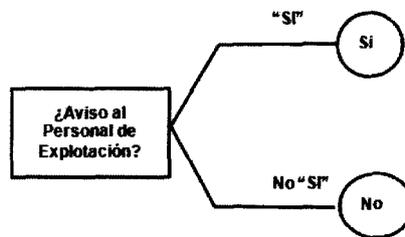


FIGURA 3

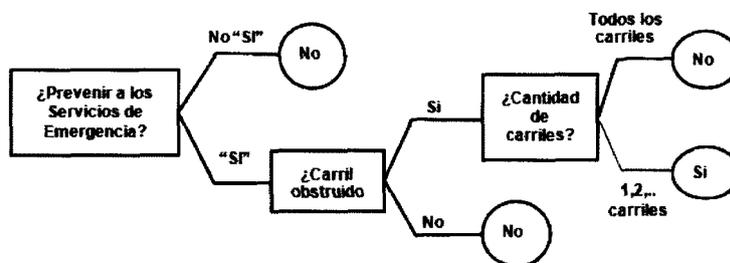


FIGURA 4

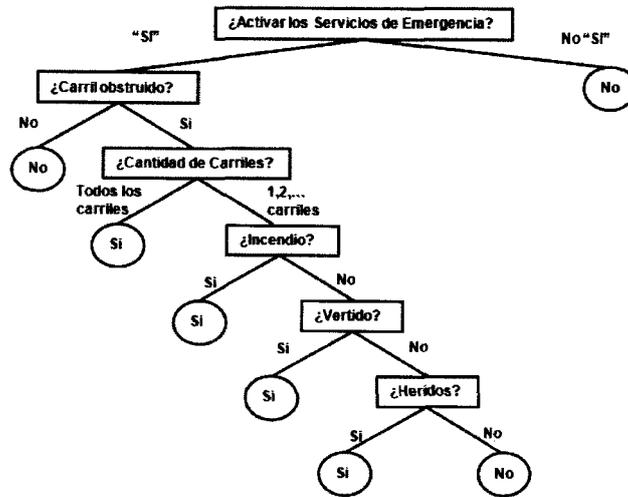


FIGURA 5

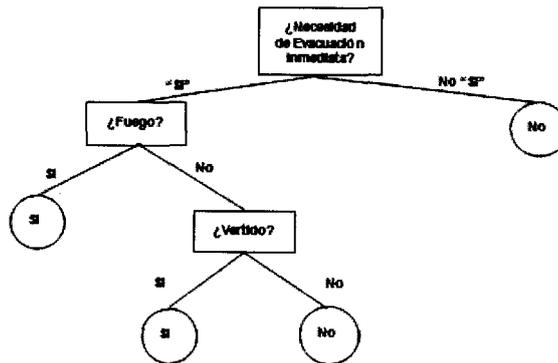


FIGURA 6

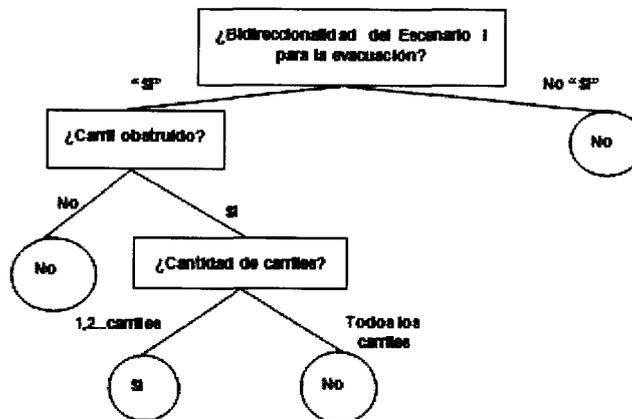


FIGURA 7

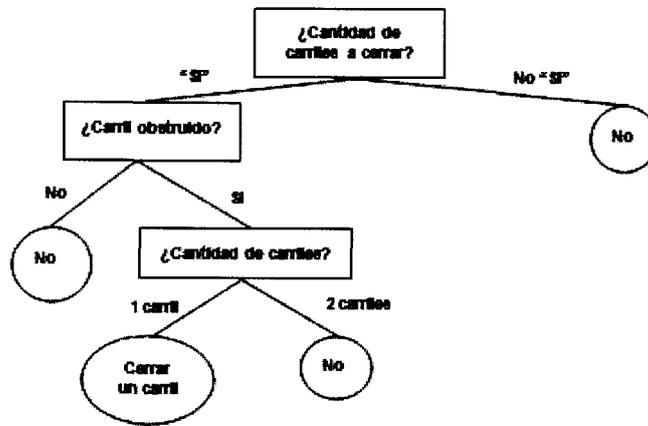


FIGURA 8

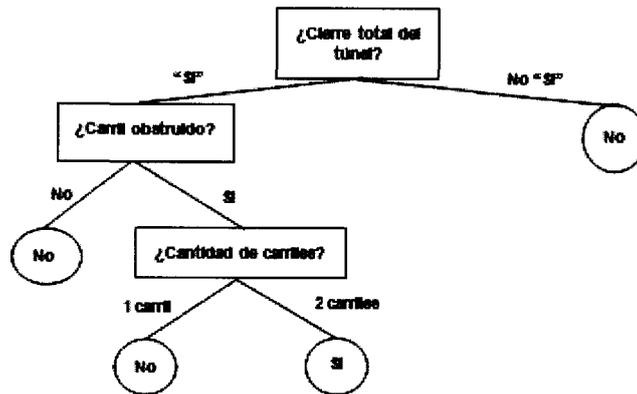


FIGURA 9

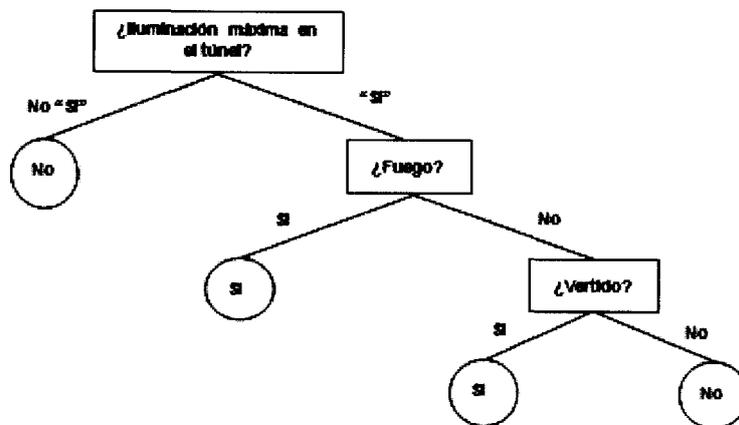


FIGURA 10

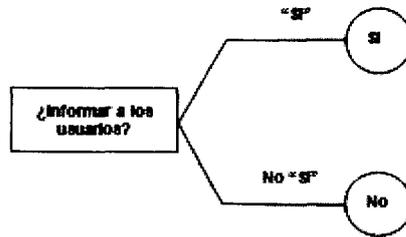


FIGURA 11

Introducción de Parámetros del Modelo de Sucesos Infrecuentes

Cantidad mínima de cámaras del túnel:	2	Ángulo de visión de la cámara (grados):	120	Ocupación de pasajeros por vehículo pesado:	1
Cantidad de cámaras del CCTV del túnel:	5	Cantidad de galerías del túnel:	1	Ocupación de pasajeros por autobús:	40
Distancia hasta la primera cámara del CCTV (m):	2	Distancia hasta la primera galería del túnel (m):	350	Probabilidad de heridas leves si suceso grave:	0.3
Distancia entre las cámaras del túnel (m):	130	Distancia entre las galerías del túnel (m):	0	Probabilidad de heridas graves si suceso grave:	0.25
Altura de las cámaras en el interior del túnel (m):	2.5	Longitud del túnel (m):	670	Probabilidad de fallecimiento si suceso grave:	0.15
Ángulo del eje focal de la cámara (grados):	29	Ocupación de pasajeros por vehículo ligero:	2	Probabilidad de heridas leves si suceso no grave:	0.3

FIGURA 12

Comprobación del Modelo de Sucesos Infrecuentes

### INTRODUCCIÓN DE LAS VARIABLES DE ENTRADA

Elige entre todo el archivo de parámetros del Túnel:

**Variables booleanas:**

SI  No
  SI  No
  SI  No
  SI  No
  SI  No

**Variables numéricas:**

Cantidad de cámaras abandonadas:	2	Vehículos ligeros implicados en el SI:	4	Total de vehículos abandonados:	41
Número de la cámara que muestra el SI:	3	Vehículos pesados implicados en el SI:	1	Veh pesados y autobuses abandonados:	11
Lugar aproximado del SI en el sector:	2	Autobuses involucrados en el SI:	0	Retardo en la detección del SI (s):	45

FIGURA 13

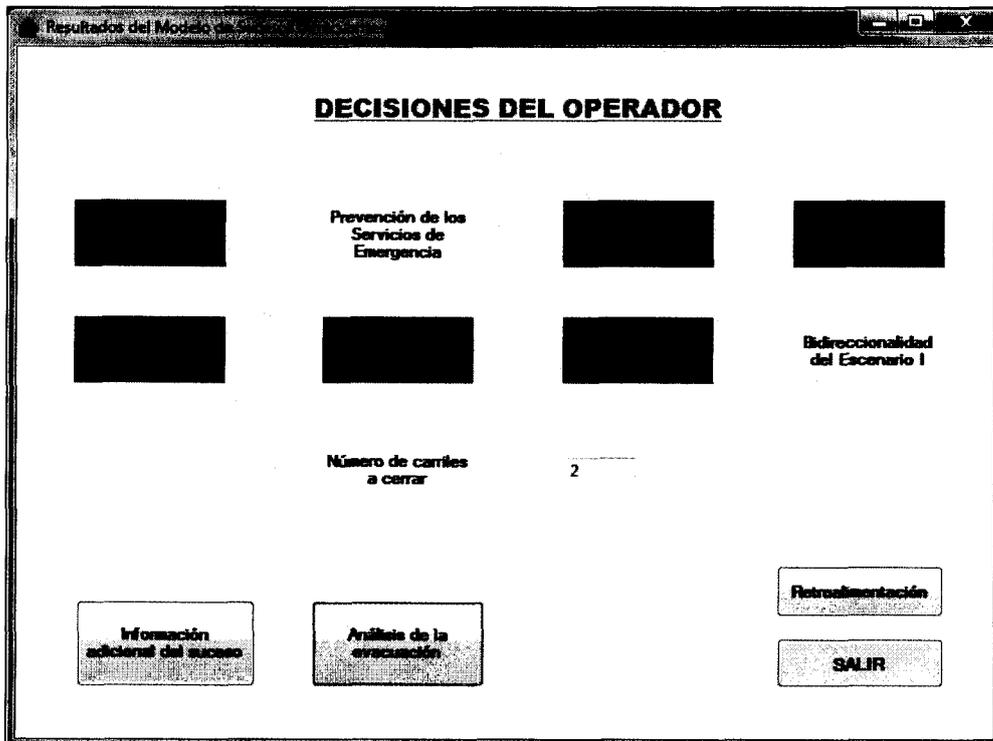


FIGURA 14

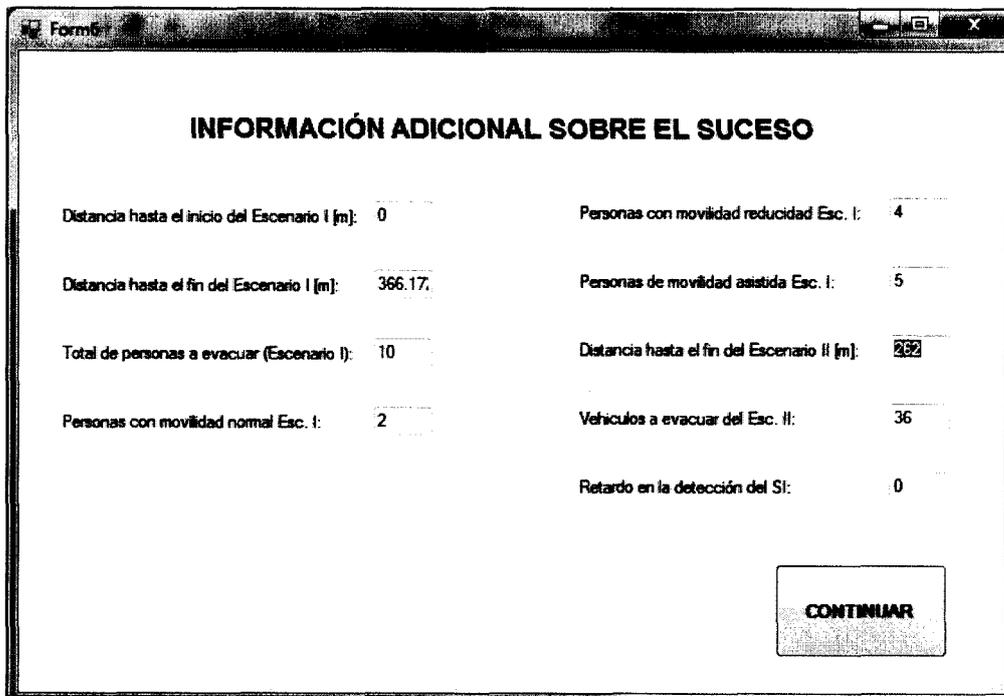


FIGURA 15

VentanaEntradaEva

### VARIABLES DE ENTRADA PARA LOS MODELOS DE EVACUACIÓN

**VARIABLES GENERALES DE LOS MODELOS**

Número de iteraciones: 100    Nivel de confianza: 0.05    Percentil: 0.95

**VARIABLES PROPIAS DEL ESCENARIO I**

M [rpm MN](s)	103.37	M [rpm MR](s)	137.32	M [rpm MA](s)	1399
Sigma [rpm MN](s)	25.36	Sigma [rpm MR](s)	37.17	Sigma [rpm MA](s)	243.7
M [rmov MN](m/s)	1.21	M [rmov MR](m/s)	0.88	M [rmov MA](m/s)	1.12
Sigma [rmov MN](m/s)	0.28	Sigma [rmov MR](m/s)	0.30	Sigma [rmov MA](m/s)	0.30

**VARIABLES PROPIAS DEL ESCENARIO II**

M [rpm] (s)	67.5	rpm0 (s)	30	kVP max	2
Sigma [rpm] (s)	17.5	rmov0 (m/s)	1.55	kVP min	1
M [rmov](m/s)	1.25	kVL max	5	kVA max	40
Sigma [rmov](m/s)	0.32	kVL min	1	kVA min	20
				P(A VPA)	0

**Continuar**

FIGURA 16

Form

### RESULTADOS DE LA EVACUACIÓN DEL ESCENARIO I

<b>Tiempo de Evacuación para personas con movilidad normal:</b>		<b>Tiempo de Evacuación para personas con movilidad reducida:</b>	
Esperanza matemática (s)	446 63767597	Esperanza matemática (s)	822 805247369
Desviación estándar (s)	100 673448082	Desviación estándar (s)	525 973113449
Tiempo mínimo de evacuación (s)	323 349791010	Tiempo mínimo de evacuación (s)	451 594704505
Tiempo máximo de evacuación (s)	835 665443960	Tiempo máximo de evacuación (s)	4312 89356282
Percentil del Tiempo Total de Evacuación (s):	740 310893363	Percentil del Tiempo Total de Evacuación (s):	1636 08825865
Ajuste o estimación del Tiempo Total de Evacuación:		Ajuste o estimación del Tiempo Total de Evacuación:	
<input type="button" value="NORMAL"/>	<input type="button" value="LOGNORMA"/>	<input type="button" value="UNIFORME"/>	<input type="button" value="ESTIMACION"/>

<b>Tiempo de Evacuación para personas con movilidad reducida:</b>		<b>Tiempo Total de Evacuación del Escenario I:</b>	
Esperanza matemática (s)	2088 264959278	Esperanza matemática (s)	2038 23320837
Desviación estándar (s)	209 677493679	Desviación estándar (s)	331 599904963
Tiempo mínimo de evacuación (s)	1597 91421321	Tiempo mínimo de evacuación (s)	1597 91421321
Tiempo máximo de evacuación (s)	2652 50317983	Tiempo máximo de evacuación (s)	4312 89356282
Percentil del Tiempo Total de Evacuación (s):	2107 86150852	Percentil del Tiempo Total de Evacuación (s):	2515 62952915
Ajuste o estimación del Tiempo Total de Evacuación:		Ajuste o estimación del Tiempo Total de Evacuación:	
<input type="button" value="NORMAL"/>	<input type="button" value="LOGNORMA"/>	<input type="button" value="UNIFORME"/>	<input type="button" value="ESTIMACION"/>

**Continuar**

FIGURA 17

FormSalida2

**RESULTADOS DE LA EVACUACIÓN DEL ESCENARIO II**

Esperanza matemática [s]:	550.340305720
Desviación estándar [s]:	250.529572846
Tiempo mínimo de evacuación [s]:	342.887079681
Tiempo máximo de evacuación [s]:	1974.49079383
Percentil del Tiempo Total de Evacuación [s]:	898.274442390

**Ajuste o estimación del Tiempo Total de Evacuación:**

FIGURA 18

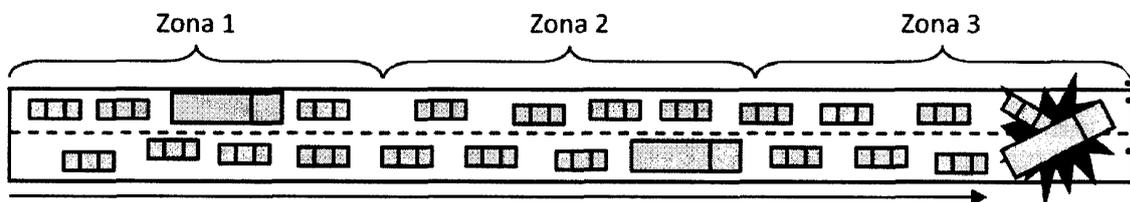


FIGURA 19

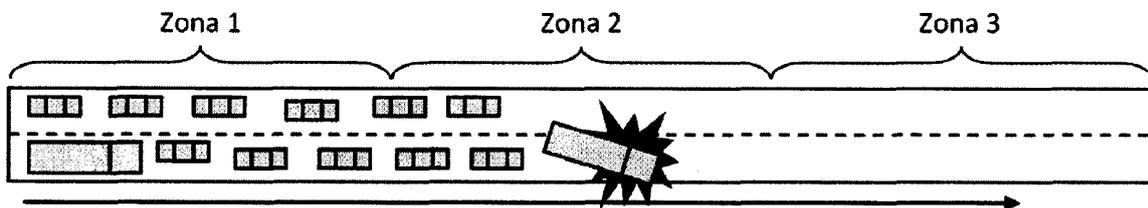


FIGURA 20

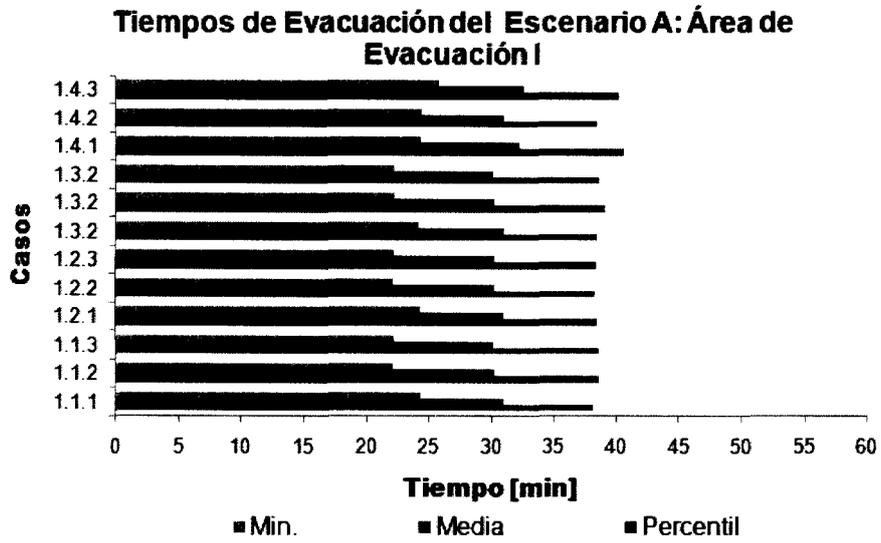


FIGURA 21

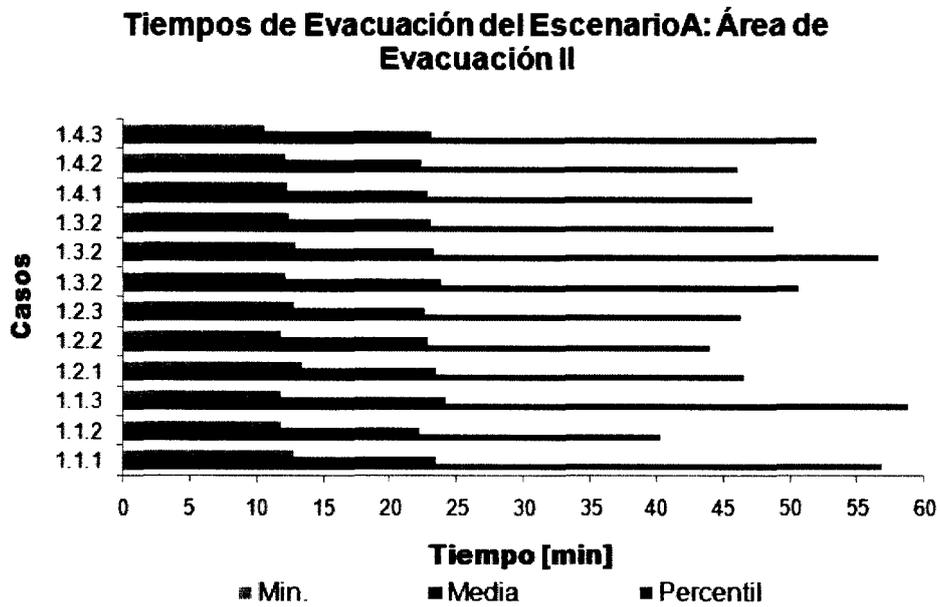


FIGURA 22

**Tiempos de Evacuación del Escenario B: Área de Evacuación I**

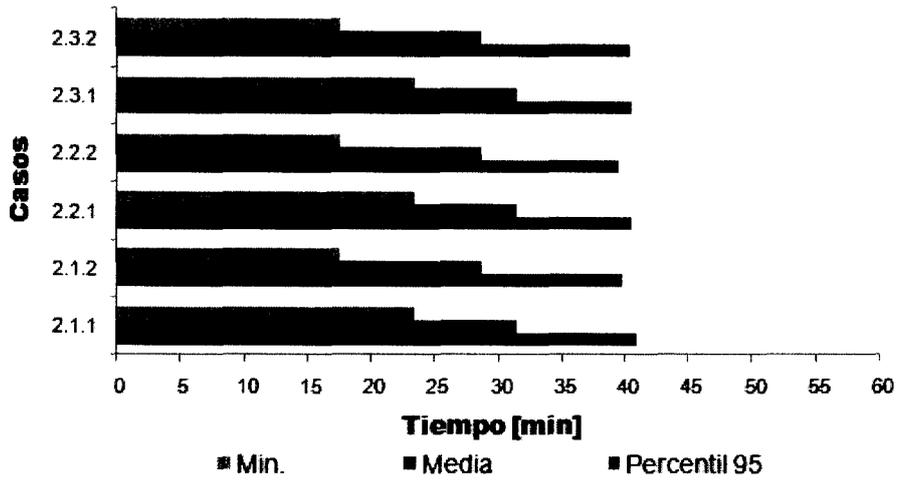


FIGURA 23

**Tiempos de Evacuación del Escenario B: Área de Evacuación II:**

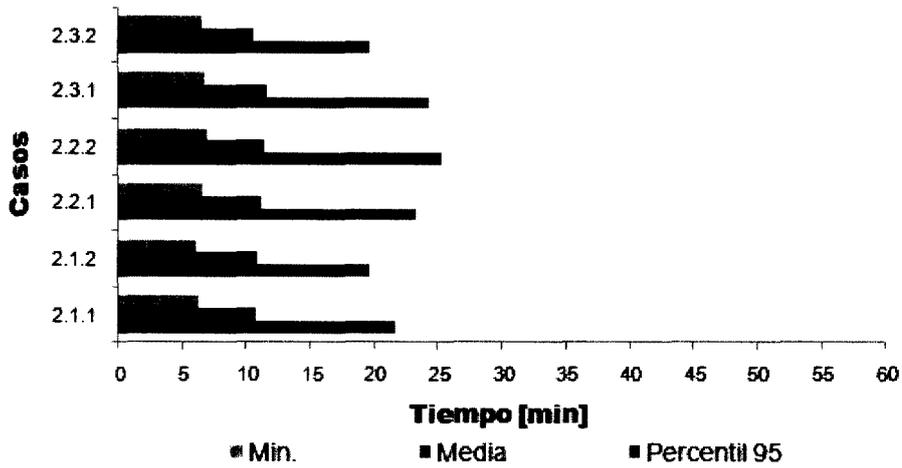


FIGURA 24



OFICINA ESPAÑOLA  
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

②① N.º solicitud: 201100724

②② Fecha de presentación de la solicitud: 23.06.2011

③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. Cl.: **G06Q10/00** (2006.01)  
**G08B21/00** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	KR 20070078333 A (SHIN HUNG INDUSTRY ACADEMY COO; BUMCHANG ENGINEERING CO LTD) 31.07.2007, párrafos [0023-0118]; figuras 1-7.	1-15
A	EP 1816764 A2 (TOSHIBA KK) 08.08.2007, todo el documento.	1-15
A	JP 10188156 A (KOCHIKI CO) 21.07.1998, resumen; figuras. Extraída de la base de datos WPI en EPOQUE	1-15
A	HÅKAN TRANTZICH & DANIEL NILSSON, "Evacuation in Complex Environments. An Analysis of Evacuation Conditions at Tunnel Construction Site", en Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security, 17-19 de marzo de 2010, Frankfurt am Main, páginas 181-190.	1-15
A	INGASON, "Design Fires in Tunnels" en Safe & reliable Tunnels, Innovative European Achievements, Second International Symposium, 2006, Lausana, páginas 1-11.	1

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

**El presente informe ha sido realizado**

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
28.11.2011

Examinador  
P. Pérez Fernández

Página  
1/4

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G06Q, G08B

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 28.11.2011

**Declaración**

<b>Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)</b>	Reivindicaciones 1-15	<b>SI</b>
	Reivindicaciones	<b>NO</b>
<b>Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)</b>	Reivindicaciones 1-15	<b>SI</b>
	Reivindicaciones	<b>NO</b>

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

**Base de la Opinión.-**

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

**1. Documentos considerados.-**

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	KR 20070078333 A (SHIN HUNG INDUSTRY ACADEMY COO; BUMCHANG ENGINEERING CO LTD)	31.07.2007

**2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración****Falta de Novedad/Actividad Inventiva****Reivindicación nº1**

Se establece el documento D01 como el más próximo del Estado de la Técnica.

Dicho documento D01 hace referencia a "un método y a un sistema de estimación del peligro de fuego en un tunel". El método comprende las siguientes etapas:

1ª) examen del escenario (ver párrafos 85-89).

2ª) análisis de la congestión de tráfico (ver párrafos 90-97).

3ª) determinación del momento de la protección (ver párrafos 98-106).

4ª) medida de la temperatura en el túnel y la concentración de gases tóxicos en el mismo (ver párrafos 107-118).

De lo expuesto se observa con claridad que el procedimiento del documento D01 es distinto al expuesto en la reivindicación nº 1. Por consiguiente, la reivindicación nº 1 posee Novedad/Actividad Inventiva (Art 6.1 LP; Art 8.1 LP).

**Reivindicaciones nº 2-14**

Las reivindicaciones nº2-14 dependen de una u otra forma de la reivindicación nº 1. Por lo tanto, las reivindicaciones nº2-14 también poseen Novedad/Actividad Inventiva (Art 6.1 LP; Art 8.1 LP).

**Reivindicación nº 15**

El documento D01 describe un sistema distinto al descrito en la reivindicación nº 15, ya que en el documento D01 no aparecen ni un subsistema de incidentes, ni un subsistema de evacuación, ni un subsistema de toma de decisiones que sí aparecen en la reivindicación nº 15. En consecuencia la reivindicación nº 15 posee Novedad /Actividad Inventiva (Art 6.1 LP; Art 8.1 LP).