

“ESTUDIOS DE EVACUACIÓN Y CIRCULACIÓN DE PERSONAS EN GRANDES INFRAESTRUCTURAS PUBLICAS, A TRAVÉS DEL USO DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

D. Marcos Busatto

IDOM. Ingeniería y Consultoría, S.A.

Introducción

La evacuación de edificios y espacios cerrados, particularmente de túneles, en situaciones de emergencia, tal como incendios en la que influyen las condiciones del medio, tales como gases tóxicos, humo y temperatura, es una situación de riesgo físico para los usuarios.

Esta situación de riesgo se produce debido a la degradación de la actitud de los usuarios, conforme empeoran las condiciones medioambientales en el túnel. Los usuarios requieren un tiempo de asimilación y respuesta a la nueva situación, debido al desconcierto inicial, después del cual empiezan a actuar.

De la misma forma que es necesaria la respuesta del usuario, para una exitosa evacuación, resulta imprescindible, el funcionamiento del sistema de ventilación y una correcta señalización de las rutas de evacuación, que permitan el flujo de personas

Hasta hace poco los cálculos de las evacuaciones se realizaban a mano lo que aumentaba la dificultad de distinguir los cuellos de botella en la evacuación de los usuarios. En los últimos años ha surgido software capaz de analizar los modelos de evacuación más complejos, simulando las situaciones que se dan en este proceso.

Estos modelos permiten determinar la eficiencia de los medios de evacuación; analizar de manera estocástica las variables del modelo tales como tiempo de evacuación, flujo en puntos de salida, niveles de intoxicación y afección de calor por persona, número de muertes, número de personas que salen del edificio, etc.; y analizar aspectos de diseño como: rutas de evacuación, efecto de las señales de salida, densidad en las áreas, niveles de experiencia de los ocupantes, etc.

Idom es capaz de simular y analizar el movimiento y comportamiento de personas en la evacuación de edificios, y grandes infraestructuras publicas tomando en cuenta el efecto de las condiciones medio ambientales de un incendio, tales como gases tóxicos, humo y temperatura (simulación CFD). El software utilizado es BuildingE-xodus complementado por Enterprise Dynamics para estudios de evacuación. Este software ha sido desarrollado por el grupo de trabajo de la Universidad de Greenwich, elegido por Idom como el referente a nivel mundial en cuanto a teoría de la evacuación.

De forma conjunta Idom ofrece otros servicios de valor añadido como son: estudios CFD (ADA), diseño de edificios (ARQ), sistema de transporte (CIV), instalaciones PCI (EE), logística (EC), etc.

2. Marco Historico Normativo

Antes de 1999, en España, la normativa aplicable relativa a la seguridad en los túneles era la Instrucción para el proyecto, construcción y explotación de obras subterráneas para el transporte terrestre (IOS 98). Pero el incendio del 24 de marzo de 1999 en el túnel del Mont Blanc provocó una rápida reacción del gobierno francés y una mayor sensibilidad del ciudadano europeo. A raíz de ese incidente, la vanguardia de la normativa en materia de túneles ha estado en la normativa francesa.

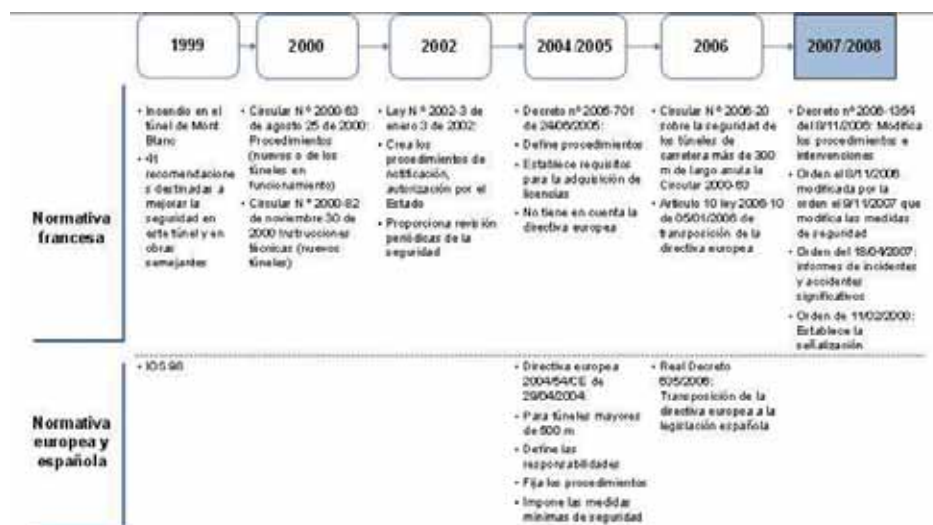


Ilustración 1: Evolución de la legislación de seguridad en túneles

El 29 de abril de 2004 el Parlamento europeo y el Consejo de la Unión. Europea adoptaron la Directiva 2004/54/CE. Esta Directiva fija un conjunto de requisitos mínimos de seguridad armonizados referidos a aspectos organizativos, estructurales, técnicos y operativos.

El objetivo de la Directiva es que todos los túneles de más de 500 metros de longitud, en fase de funcionamiento, construcción o proyecto, que forman parte de la red de carreteras transeuropea, se sometan a las nuevas exigencias de seguridad armonizadas.

Esta directiva tuvo su transposición a la legislación española con el RD 635/2006 sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de la Red de Carreteras del Estado (Ministerio de Fomento).

Algunos de los distintos documentos y estudios que deben figurar en el Manual de Explotación según el Anexo II del RD 635/2006 son:

- Estudio de las previsiones de tráfico, condiciones que se prevén para el transporte de mercancías peligrosas, y el análisis de riesgos.
- Dictamen de seguridad emitido por un experto u organización especializados en la materia.
- Plan de respuesta a situaciones de emergencia.
- Relación de simulacros de seguridad realizados y análisis de las conclusiones extraídas.
- Plan de emergencia
- Fichas de incidencias y protocolos de actuación.

Estos documentos requeridos en el manual de explotación hacen que sea conveniente la realización de la simulación de los posibles riesgos del túnel.

3. Metodología de la Simulación

Para simular el proceso de evacuación y circulación, Idom emplea dependiendo de la problemática dos herramientas complementarias; buildingExodus (University of Greenwich) y Enterprise Dynamics (Holanda).

El software de buildingExodus es un simulador de bajo nivel (muy detallado) del movimiento de personas durante la circulación de estructuras. Permite incluir todas las características de la simulación de evacuación, y cuenta con elementos propios de circulación. Se aplica para resolver problemas de movimiento y comportamiento de los ocupantes de zonas de interés, así como para estudiar la congestión de puertas de entrada y salida, pasillos, etc.

El Enterprise Dynamics es un simulador de sistemas dinámicos que utiliza distribuciones estadísticas. Se caracteriza por ser un software programable, que permite la realización de experimentos, y dispone de elementos especializados en simulación de operaciones. Se emplea principalmente para el dimensionamiento de zonas, ya sean de atención, de acceso, o de espera; también se utiliza para analizar el correcto dimensionamiento de las operaciones realizadas, las necesidades de personal, la formación de colas, y los medios de transporte como vehículos, escaleras mecánicas, elevadores.

El proceso de trabajo con el buildingExodus para llevar a cabo la simulación sigue los pasos que se exponen a continuación, y se reflejan en la Ilustración 2: Metodología de trabajo.



Ilustración 2: Metodología de trabajo

3.1. Análisis de la Problemática

El objetivo de la primera etapa es definir los parámetros, especificaciones y necesidades que ha de cumplir el modelo de simulación que se desarrollará.

Esta etapa se compone de 2 tareas:

- Recolección de los datos necesarios.
- Definición de los objetivos.

3.2. Desarrollo y validación del modelo CFD

Esta etapa es opcional, pero es recomendable realizarla en aquellas situaciones en las que el medio varíe con el tiempo, e influya en la conducta de los usuarios. El objetivo es definir la geometría específica que ha de tener el modelo de simulación en función de la definida en el modelo CFD, así como la variación de la carga medioambiental a lo largo del modelo en los factores que afecten a los usuarios, como

son el humo, la temperatura, la concentración de CO, % de O₂, % de CO₂, concentración de elementos tóxicos, etc.

Esta etapa se compone de las siguientes tareas:

- Definición del modelo CFD, que luego será utilizado para desarrollar el modelo de simulación.
- Definición de los escenarios a estudiar.
- Pruebas de validación de los modelos, para comprobar la veracidad de los resultados.
- Ejecutar la simulación CFD.
- Generación de inputs, para usarlos en el desarrollo del modelo de simulación. Estos inputs son los valores de carga ambiental en el tiempo, que luego se introducirán en la simulación.

3.3. Desarrollo y validación del modelo de simulación

El objetivo de esta etapa es el desarrollar el modelo de simulación en el buildingExodus, de acuerdo con los parámetros, especificaciones y necesidades, definidas anteriormente. Las tareas que componen esta etapa son:

3.3.1. Definición de la geometría

El primer paso a realizar para desarrollar el modelo en buildingExodus consiste en establecer el espacio físico donde va a tener lugar la simulación, así como la interacción entre estos elementos del entorno. Los elementos que componen esta geometría son:

- Planos: son los elementos donde se mueven los usuarios del modelo. Esta definido por sus coordenadas y dimensiones. Se puede generar manualmente la geometría, o importar por medio de un fichero DXF, de un plano preparado para tal efecto. Puede darse el caso de la definición de varios niveles o pisos.
- Salidas principales y de emergencia: hay que introducir los elementos que actúan como puertas, tanto las puertas internas como las externas.
- Elementos especiales como escaleras, asientos, señales de salida.

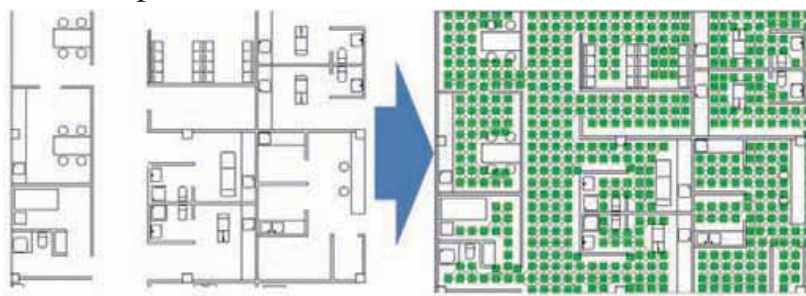


Ilustración 3: Definición de la geometría

Toda esta superficie definida por la geometría, se rellena con nodos de dimensiones 0,5 x 0,5 m, conectados por medio de arcos entre los adyacentes entre sí, que representan el espacio del suelo utilizable por los usuarios, y el posible desplazamiento de un usuario entre nodos, hasta su llegada a una salida externa.

3.3.2. Definición de los usuarios (personas)

A continuación se definen los ocupantes de la geometría en el buildingExodus, estableciendo sus características tanto físicas, como de comportamiento, permitiendo un modelo amplio y flexible.

Se establece una primera caracterización de tipos de ocupantes hombre y mujeres, para cada rango de edad (hombre mayor, niño, anciana). Dentro de estos rangos de edad y género se pueden caracterizar todos los parámetros más relevantes que influyen en el comportamiento y movimiento de cada tipo de ocupantes. De manera que se generan “poblaciones” de ocupantes combinando diversos tipos de ocupantes predefinidos.



Ilustración 4: Caracterización de los usuarios

3.3.3. Definición de los escenarios

Una vez definida la distribución y ocupación del espacio, es necesario definir el comportamiento del medio conforme el paso del tiempo, en las diferentes zonas de la geometría, ya introducida en el buildingExodus.

El espacio se divide en compartimentos, con una evolución independiente de los valores relativos a las condiciones del túnel, tales como la temperatura, la concentración de CO₂, de O₂, etc. Estos compartimentos están divididos en 2 zonas, una zona alta, donde los usuarios circulan normalmente, y una zona baja por donde los usuarios circulan con más dificultad, por ir agachados. Los usuarios circulan normalmente por la zona alta, pero cuando esta alcanza unos valores, los usuarios pasan a circular agachados, por la zona baja, con las correspondientes limitaciones de movimiento.

BuildingExodus es compatible con software de simulación dinámica de fluidos CFD. Estos datos se pueden importar desde SMARTFIRE, CFAST, ingresar manualmente los resultados de simulaciones en otro software CFD, o ingresar manualmente los parámetros tradicionales de incendios.

Los parámetros susceptibles de introducirse en la simulación son la temperatura, la evolución de gases tóxicos, el humo, etc.

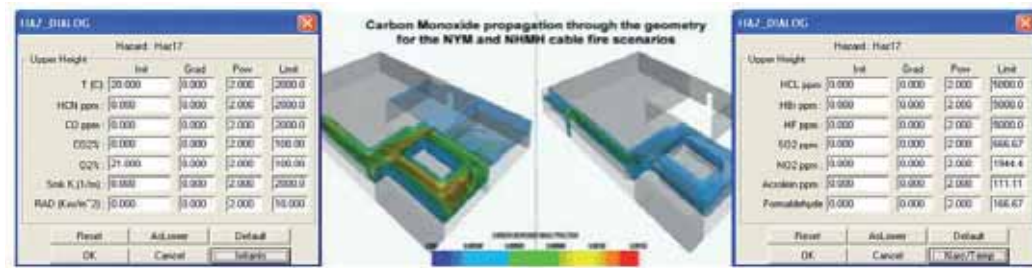


Ilustración 5: Definición de las zonas

3.4. Simulación

Las tareas de esta etapa se dividen en:

- Definición de los escenarios de simulación.
- Selección de los parámetros de simulación.
- Ejecución de la simulación.
- Recolección y tratamiento de datos.

Después del desarrollo del modelo, este se pone en marcha de manera que nos de los resultados o outputs.

Estos outputs los podemos diferenciar en varios tipos:

- Visualización 2D y 3D: La visualización de la simulación permite observar e interpretar los resultados desde un punto de vista más amplio.



Ilustración 6: Visualización 2D y 3D

- Resultados numéricos: la simulación proporciona una completa recolección de datos parametrizables, que pueden ser importados por otras aplicaciones para su análisis. Entre los mas relevantes podemos señalar:
 - o Tiempo de evacuación: total, por ocupante, por salida
 - o Camino de evacuación: total, por ocupante, por salida
 - o Distancia recorrida
 - o Evolución de los efectos de gases tóxicos, temperatura y humo por ocupante
 - o Nivel de saturación en áreas de interés
 - o Resumen de todos los parámetros de la simulación.



Ilustración 7: Análisis de resultados

- Mapas: es posible observar características como los efectos del calor, humo y densidad por medio de mapas dinámicos.



Ilustración 8: Mapas

3.5. Análisis de los resultados y propuesta de mejoras

El objetivo de esta etapa es asegurar la viabilidad del sistema analizado por medio de las simulaciones, así como de las mejoras propuestas y evaluadas por medio de las simulaciones.

En esta etapa podemos distinguir 3 tareas:

- Evaluación de los resultados obtenidos en la etapa anterior.
- Definición de nuevos escenarios, en función del análisis de los resultados realizado previamente. Esta etapa condiciona a volver a la etapa anterior, para realizar una nueva simulación con las correcciones efectuadas en el modelo.

- Realización de un informe final, con los resultados y recomendaciones, salidas de la simulación.

4. Casos de estudio

IDOM ha participado en multitud de estudios de circulación y evacuación de personas:

- Estudio de evacuación externa del nuevo estadio de San Mames
- Estudio de evacuación interna del nuevo estado de San Mames
- Estudio de circulación del parking y accesos de la nueva terminal del aeropuerto de Heathrow
- Estudio de evacuación del centro comercial Nervión (Sevilla)
- Simulación de flujos de personas en la nueva ciudad judicial de Barcelona
- Análisis de flujo en los pabellones 1-2 del recinto Gran Via II de la Fira de Barcelona
- Modelo de simulación de los filtros de seguridad de la nueva terminal sur del aeropuerto de Barcelona
- Análisis del flujo del servicio de taxis en la nueva estación de Atocha
- Dimensionamiento del nuevo complejo ferroviario de Atocha en función del flujo de viajeros
- Estudio de evacuación de un túnel transfronterizo de Bielsa

A continuación pasamos a detallar algunos de estos casos:

4.1. Evacuación externa del estadio de San Mamés

4.1.1. Problemática

Idom Consultoría participa en el diseño del nuevo estadio de San Mames Barria, este nuevo estadio tendrá una capacidad de 53.000 espectadores, 33% más que la capacidad actual, y se situará en el mismo lugar que el estadio actual pero con una configuración y diseño diferentes.

El hecho de incrementar la capacidad un 33% y tomando en cuenta las normativas establecidas por Protección Civil de Bilbao, implicaba que se debía asegurar que este diseño permita la evacuación de los espectadores, por las calles aledañas al estadio, de forma segura, en un tiempo considerable y evitando altas densidades de personas en ciertos puntos críticos.

Empleando la metodología indicada en este documento se realizó un estudio de evacuación de casi 60.000 personas. Este estudio está enfocado a dos escenarios

principales; evacuación a la salida de un partido y evacuación de emergencia. Los objetivos de dicho estudio fueron:

- Identificar los tiempos de evacuación del estadio
- Identificar la capacidad de flujo UFR (Unit Flow Rate) de cada salida del estadio medido en occ/m/s (ocupantes o personas/metro/segundo)
- Analizar el flujo de personas que salen del sistema (del modelo y de cada salida)
- Visualizar la simulación y estudiar el mapa de densidades para identificar zonas conflictivas y zonas libres de paso.

4.1.2. Tareas desarrolladas

En la elaboración del modelo de simulación destacan las siguientes tareas.

Modelo geométrico

El modelo geométrico se basa en los planos del estadio desde las puertas de salida del mismo hasta las calles aledañas que representan las posibles salidas de los espectadores hacia sus destinos finales.

El plano que delimita el alcance del modelo es el siguiente:



Ilustración 9: Alcance del modelo San Mames

Las posibles calles de salida del estadio son las siguientes:

Salida	Calle	Ancho calle(m)
1	Camino de la Ventosa	11,42
2	Felipe Serrate	27,47
3	Lodo Poza	14,56
4	Alda. Urkijo	25,98
5	Plaza Torres Quevedo	36,64
6	Escaleras Camino Ventosa	17,2
7	Salida EITB	10

Tabla 1: Calles de salida del estadio San Mames

Al final de cada calle se encuentra un sumidero que el punto en el que los ocupantes dejan de participar en la simulación.

Modelo de población

Para este modelo se consideró como ocupantes a 63.220 espectadores y personal del centro comercial.

La distribución por sexo y edad de los 63.220 espectadores es la siguiente:

Distribución	% por sexo	% por sexo y edad
Hombres 17 - 29	80,00%	10,70%
Hombres 30 - 50		40,00%
Hombres 51 - 80		29,30%
Mujeres 17 - 29	20,00%	3,50%
Mujeres 30 - 50		10,00%
Mujeres 51 - 80		6,50%

Tabla 2: Distribución poblacional San Mames

Las velocidades utilizadas en este modelo son calculadas de manera dinámica por los algoritmos propios del software de simulación. Este cálculo toma como base la variable “FAST WALK SPEED” (velocidad máxima de paso) la cual está en función de la edad y el sexo, según los estudios realizados por ANDO . Esta relación se presenta en la siguiente tabla.

Sexo	Edad	Velocidad
Hombre	2 – 5	$0,16 * \text{edad} + 0,3$
	5 – 12,5	$0,06 * \text{edad} + 0,8$
	12,5 – 18,8	$0,008 * \text{edad} + 1,45$
	18,8 -39,2	$-0,01 * \text{edad} + 1,78$
	39,2 – 70	$-0,009 * \text{edad} + 1,75$
Mujer	2 – 8,3	$0,16 * \text{edad} + 0,5$
	8,3 – 13,3	$0,04 * \text{edad} + 0,67$
	13,3 – 22,25	$0,02 * \text{edad} + 0,84$
	22,25 – 37,5	$-0,018 * \text{edad} + 1,78$
	37,5 – 70	$-0,01 * \text{edad} + 1,45$

Tabla 3: Relación sexo/edad/velocidad San Mames

Con estos datos se establecen las siguientes curvas de velocidad máxima de paso:
Según la asignación de secciones se estableció una distribución de personas por

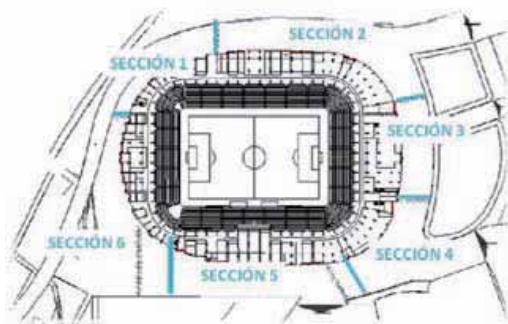


Ilustración 11: Distribución de las secciones San Mames

salidas para cada sección. Las secciones se definieron agrupando a las personas que saldrán de cada puerta según el siguiente cuadro.

4.1.3. Resultados obtenidos

Por medio de la simulación de la evacuación, se realizaron cambios de diseño en los planes de emergencia y en la infraestructura, con esto se asegura que proceso de

evacuación cumple con las expectativas de Protección Civil de Bilbao. Debido a la confidencialidad del estudio se muestran únicamente las siguientes ilustraciones, las cuales muestran la simulación de ambos escenarios en el minuto 3 de la evacuación.

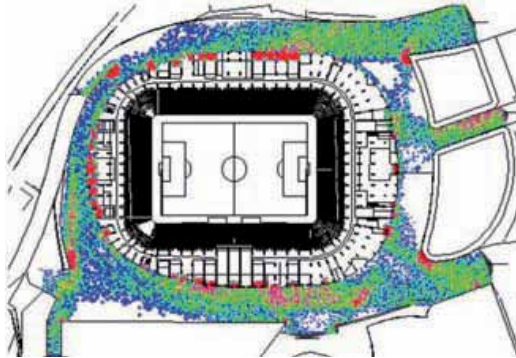


Ilustración 12: Evacuación a la salida de un partido en San Mames

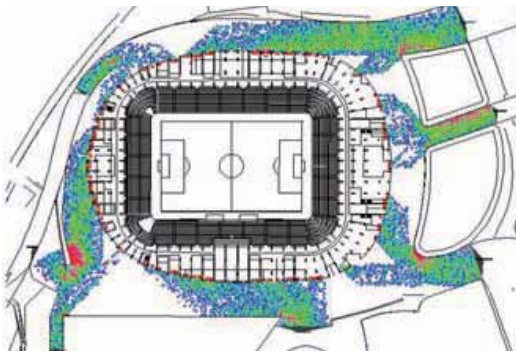


Ilustración 13: Evacuación de emergencia San Mames

4.2. Estudio de circulación de zona de orientación de personas y parking para nueva terminal aeroportuaria de Heathrow

4.2.1. Antecedentes y problemática

Toda nueva instalación destinada a ser utilizada por personas en circulación, y aún más si cabe un aeropuerto, debe garantizar el confort de los usuarios tanto respecto a la capacidad de las instalaciones para alojarlos de manera confortable así como para encontrar su punto de destino de una manera intuitiva o a través de una señalética adecuada.

En la nueva terminal del aeropuerto de Heathrow actualmente en fase de proyecto, se tomó la decisión de alojar la mayor parte de los movimientos a través del edificio auxiliar “Spine”. Éste será una pastilla vertical de la misma altura que la terminal y del mismo número de plantas que esta a la que confluirán la mayor parte de ascensores, escaleras mecánicas y parkings de la terminal. Este edificio está conectado mediante corredores con las respectivas plantas de la terminal. Por todo lo anterior, tanto el edificio como los corredores y ascensores deben garantizar la capacidad de

alojar un alto nivel de usuarios (más de 7000 personas circulan por este edificio cada hora), ser capaz de gestionar la simultaneidad de movimientos multidireccionales y a la vez ofrecer el nivel de confort adecuado.

Con el fin de garantizar la capacidad del edificio para ofrecer el servicio adecuado a los usuarios, se procedió a utilizar técnicas de simulación de circulación de personas (simulación de movimientos horizontales mediante building Exodus y simulación de movimientos verticales en ascensores y escaleras Enterprise Dynamics) como soporte para el correcto dimensionamiento de las instalaciones.

4.2.2. Tareas desarrolladas

Con el fin de desarrollar un modelo de simulación representativo de las instalaciones y de su utilización, se toman como datos de partida planos de plantas, previsiones de ocupación, tráfico y movilidad de individuos. Esta última vendrá caracterizada por el volumen de equipaje que es estimado porten. En el proceso de desarrollo del estudio de simulación se completaron las siguientes etapas:

- Desarrollo de modelo geométrico.
- Modelo Poblacional.
- Simulación e interpretación de resultados.

Modelo Geométrico:

Se importan a buildingExodus los planos de cada planta a analizar. En concreto:

- Lay-Out de una planta de parking
- Lay-Out de una planta del Spine.

La elección de las plantas a analizar se hizo en base a su nivel de ocupación o utilización prevista. Como tanto las dimensiones del parking como del Spine serán iguales en todas sus plantas, se elige analizar la planta más saturada en cada caso para así dimensionar tanto ésta como el resto.

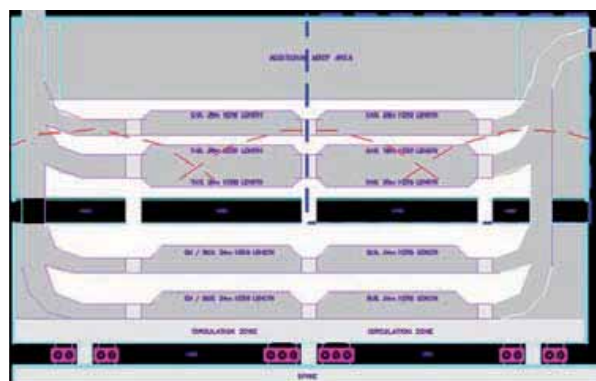


Ilustración 14: Plantas parking aeropuerto

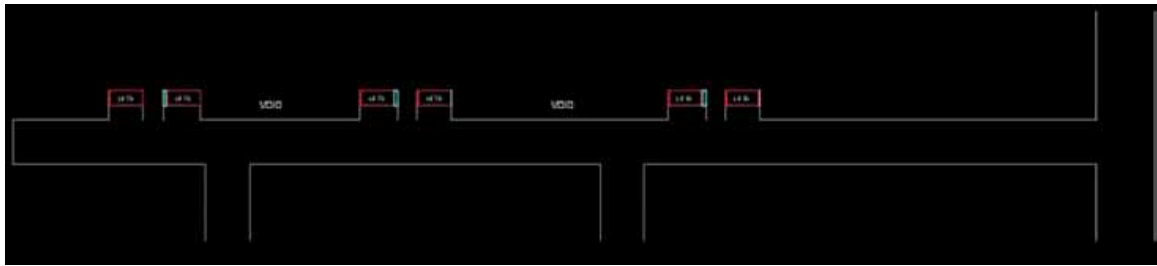


Ilustración 15: Planta Spine aeropuerto

Una vez completada la importación se procede a definir puntos de acceso y de salida de personas así como al mallado de la superficie susceptible de alojar algún individuo en un instante.

Modelo Poblacional:

Se cuenta con datos de tráficos de personas en Spine y parking cada 5 minutos, así como su caracterización en función de la cantidad de equipaje que van a portar. En base a esto, y conociendo sus puntos de entrada y de salida de las instalaciones, podemos determinar las rutas que seguirán los usuarios para llegar a su destino en función de las instalaciones y de la señalética instalada.

User type	Speed (m/s)
No baggage / light baggage	1
Normal baggage	0.8
Trolley user	0.7

Tabla 4: Grupos de personas aeropuerto

Definición de población:

En este caso, la diferenciación entre personas se basa en su capacidad de desplazarse a una determinada velocidad, lo que viene dado por el volumen de equipaje que porta cada individuo. Se diferencian 3 grupos de personas y 3 velocidades respectivas de desplazamiento:

Definición de nivel de utilización:

Se eligió una hora punta de tráfico en cada planta a analizar para así estudiar el flujo de personas en las instalaciones en cada instante de tiempo durante la esta hora. Basándose en los datos de tráfico cada 5 minutos se define la cadencia de accesos y de salidas de personas a las diferentes instalaciones. Esta cadencia será uniforme a intervalos de 5 minutos, y se particulariza según posibles puntos de entrada y de salida de las instalaciones Tal y como se puede apreciar en la siguiente tabla:

ESTUDIOS DE EVACUACIÓN Y CIRCULACIÓN DE PERSONAS EN GRANDES INFRAESTRUCTURAS PUBLICAS, A TRAVÉS DEL USO DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

User characterization

	Users leaving the terminal								Users arriving to the terminal							
	PTI users								PTI users							
	L	HEV	Bus	Taxi	Car Rental	LTC	STCP	Staff	L	HEV	Bus	Taxi	Car Rental	LTC	STCP	Staff
6:05	0	0	0	0	0	0	0	0	6:05	0	0	0	0	0	0	0
6:10	0	0	0	0	0	0	0	0	6:10	0	0	0	0	0	0	0
6:15	0	0	0	0	0	0	0	0	6:15	0	0	0	0	0	0	0
6:20	0	0	0	0	0	0	0	0	6:20	0	0	0	0	0	0	0
6:25	0	0	0	0	0	0	0	0	6:25	0	0	0	0	0	0	0
6:30	0	0	0	0	0	0	0	0	6:30	0	0	0	0	0	0	0
6:35	0	0	0	0	0	0	0	0	6:35	0	0	0	0	0	0	0
6:40	0	0	0	0	0	0	0	0	6:40	0	0	0	0	0	0	0
6:45	0	0	0	0	0	0	0	0	6:45	0	0	0	0	0	9	0
6:50	0	0	0	0	0	0	0	0	6:50	0	0	0	0	0	2	0
6:55	0	0	0	0	0	0	0	0	6:55	0	0	0	0	0	5	0
7:00	0	0	0	0	0	0	0	0	7:00	0	0	0	0	0	13	0

Tabla 5: Cadencia de accesos y salidas aeropuerto

4.2.3. Análisis y resultados:

Se siguieron varias etapas para poder obtener y analizar resultados.

Discretización de superficie:

Para poder conocer el número de personas que se encuentran simultáneamente cada instante de tiempo en una determinada zona, se procedió a sectorizar la superficie de los diferentes lay-outs en regiones de las cuales obtener información.

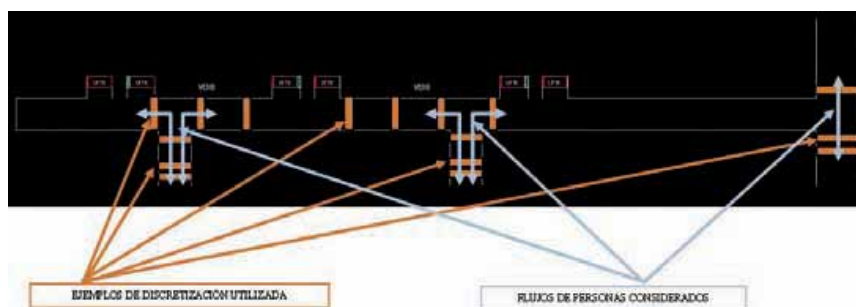


Ilustración 16: Flujo de personas y sectorización del aeropuerto

Análisis e interpretación de resultados:

En cada una de las regiones definidas en la sectorización, se tomaron valores del número de individuos presentes cada segundo. De este modo se pudo estudiar estadísticamente como de ocupada va a estar cada zona y con que frecuencia se van a alcanzar ciertos niveles de ocupación. Según la discretización aplicada, la dimensión menor de las regiones representadas gráficamente era conocida (1,5 metros), y se utilizó el número de personas presentes en estas franjas comparándolo con el nivel de ocupación recomendado según el “Highway Capacity Manual” (texto internacionalmente reconocido como referencia para el estudio de ocupaciones en diferentes instalaciones destinadas al uso de personas en movimiento). El nivel

de ocupación objetivo fue el Nivel C, o lo que es lo mismo, garantizar 2,9 m² por individuo.

Num persons	Frequency	% Accumulated
1	a	31.49%
2	b	62.01%
3	c	83.50%
4	d	94.82%
5	e	98.82%
6	f	99.86%
7	g	100.00%

Tabla 6: Análisis estadístico de la ocupación de las zonas del aeropuerto

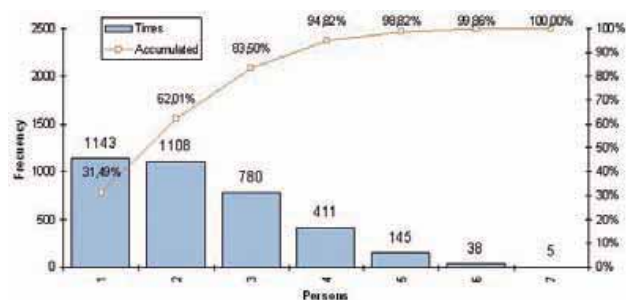


Ilustración 17: Histograma de la ocupación de las zonas del aeropuerto

Del mismo modo, se estudió el tiempo invertido por cada individuo para alcanzar su destino, ya que este valor da una idea del confort de las instalaciones y de la probabilidad de que se produzcan confusiones a la hora de buscar la ruta adecuada:

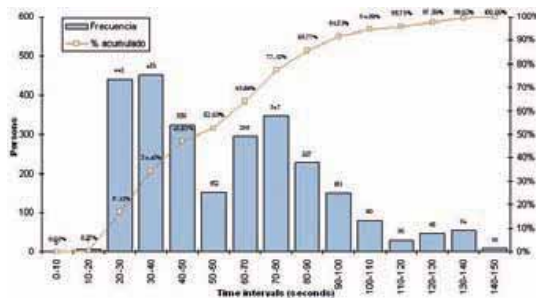


Ilustración 18: Histograma tiempo de destino en aeropuerto

Displacement times between (seconds)	Persons	Accumulated %
0-10	0	0.00%
10-20	7	0.27%
20-30	569	21.97%
30-40	344	35.06%
40-50	339	48.02%
50-60	176	54.73%
60-70	290	65.79%
70-80	326	78.22%
80-90	244	87.53%
90-100	112	91.80%
100-110	74	94.62%
110-120	34	95.92%
120-130	48	97.75%
130-140	49	99.62%
140-150	10	100.00%

Tabla 7: Análisis tiempo de destino en aeropuerto

4.3. Aplicación a los túneles autopista AP1

4.3.1. Antecedentes

La entrada en servicio en su totalidad de la autopista AP-1 (Eibar-Vitoria), el pasado 22 de mayo de 2009, supuso un gran desarrollo de las comunicaciones entre San Sebastián y Vitoria y, sobre todo entre la capital alavesa y los municipios del valle del Deba (Aretxabaleta, Mondragón, Bergara, etcétera). Es la obra pública más ambiciosa de los últimos tiempos que se ha culminado: diez años de trabajos.

Suma 46,2 kilómetros entre un extremo y otro, de los que 32,2 kilómetros discurren por Guipúzcoa y los 14 restantes por Álava. La unión entre ambas provincias se produce mediante el túnel de Isuskitza (3.415 metros), que salva el puerto de Arlabán.

Dentro del marco de la redacción del Manual de Explotación de la autopista AP-1, IDOM ha realizado un Estudio Específico de Riesgos con el fin de alcanzar los siguientes objetivos:

- Justificar la importancia de las instalaciones previstas.
- Comprobar la importancia de los tiempos de detección de la incidencia y de los tiempos de reacción de los usuarios y de los equipos de socorro.
- Comprobar la eficacia de los medios y la operativa en caso de incidente.

La casuística seleccionada para el análisis de riesgos se basa generalmente en la elección de un túnel representativo (Isuskitza en el caso que nos ocupa), una serie de eventos desencadenantes (avería, accidente e incendio) y una serie de elementos agravantes (existencia de un accidente previo, retención, presencia de autobuses e incendio en un TMP).

4.3.2. Problemática

Se produce un incendio en un vehículo pesado (30 MW) que circula por el túnel de Isuskitza, pk 114+800 en el sentido Eibar, con un autobús presente en el túnel en el momento del incendio.

La situación de los vehículos en el Exodus se muestra en la figura siguiente:



Ilustración 19: Situación de los vehículos en el túnel

Los usuarios de la simulación tienen las siguientes características:

Atributos	Media	Min	Max
Hombres	65	65	65
Mujeres	44	44	44
Edad	45.64	18	79
Agilidad	4.5	2.07	6.98
Orientación	8.2	1	14.97
Correr (m/s)	1.35	1.2	1.5
Andar (m/s)	1.22	1.08	1.35
Gatear (m/s)	0.27	0.24	0.3
Saltar (m/s)	1.08	0.96	1.2
Movilidad	1	1	1
Paciencia (s)	2.75	1	4.94
Respuesta (s)	23.39	0.15	99.62
Peso	64.34	40.3	89.96
Altura	1.74	1.51	2

Tabla 8: Características usuarios túnel

4.3.3. Resultados

Se procede realizar la simulación del escenario en el Exodus, dando los resultados que se exponen a continuación.

La simulación dura un tiempo de 7 minutos y 2 segundos, momento en el cual, es evacuada la ultima persona en el túnel.

Al final de la simulación la situación de visibilidad a lo largo del túnel, en los ejes XY es la que se muestra en las siguientes ilustraciones:

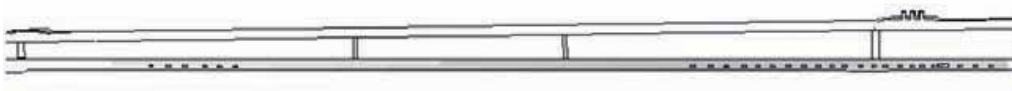


Ilustración 20: Humo en el túnel de Isuskitza



Ilustración 21: Detalle Humo en la zona del incendio



Ilustración 22: Detalle pk 113+900

De la misma forma las zonas marcadas por la temperatura al final del tiempo de simulación se muestran en las siguientes figuras.

ESTUDIOS DE EVACUACIÓN Y CIRCULACIÓN DE PERSONAS EN GRANDES INFRAESTRUCTURAS PUBLICAS, A TRAVÉS DEL USO DE HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

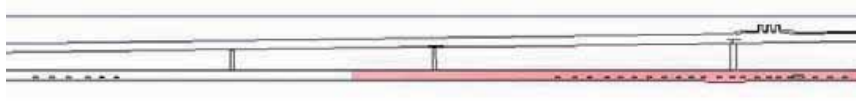


Ilustración 23: Temperatura en el túnel de Isuskitza

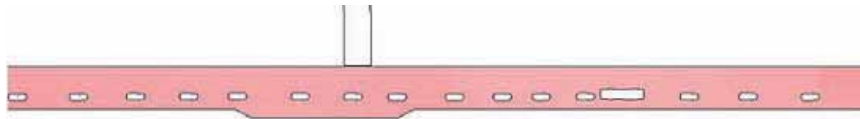


Ilustración 24: Detalle temperatura en la zona del incendio

La evacuación de los usuarios se ha dado en un tiempo de 7 minutos y 2 segundos. La galería de evacuación usada por la mayoría de los usuarios es la del pk 114+640. El último usuario en abandonar el túnel, lo hace por la galería de evacuación del pk 114+300. El primer usuario en abandonar el túnel lo hace en el instante 33,95 segundos, por la galería de evacuación del pk 114+640.

Tiempo de evacuación (seg.)	
Media	136.95
Mínimo	33.95
Máximo	422.56

Tabla 9: Análisis estadístico de los tiempos de evacuación túnel



Ilustración 25: Evacuación de los usuarios túnel

En el intervalo desde el segundo 95 hasta el segundo 140 de la simulación, abandona el túnel, un 57 % de los usuarios. Como podemos observar en el siguiente histograma:

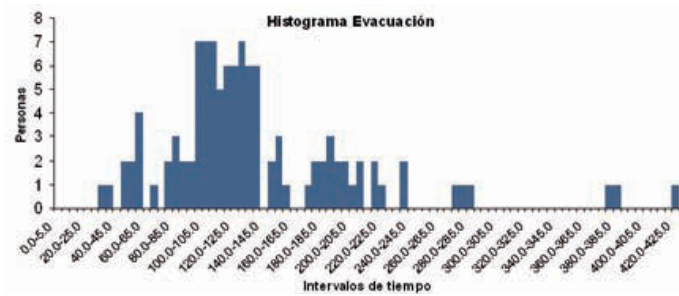


Ilustración 26: Histograma evacuación túnel

El uso de las galerías de evacuación lo podemos observar en la siguiente tabla:

Puerta Salida	Nº Usuarios	Primera salida (seg.)	Ultima salida (seg.)	Tiempo de uso (seg.)	Usuarios por minuto	Tiempo sin uso (seg.)	% sin uso
Pk 113+240	4	87.47	129.91	42.44	5.66	33.43	78.77%
Pk 113+520	0	0	0	0	0.00	0	0.00%
Pk 113+720	12	175.98	219.68	43.7	16.48	15.2	34.78%
Pk 114+080	0	0	0	0	0.00	0	0.00%
Pk 114+300	4	277.76	422.56	144.8	1.66	135.79	93.78%
Pk 114+640	89	33.95	284.59	250.64	21.31	131.1	52.31%

Tabla 10: Tiempos de evacuación túnel

Los caminos que siguen los usuarios para la evacuación se pueden observar en las siguientes imágenes. Conforme una zona es más transitada, cambia el color del camino.



Ilustración 27: Detalle camino de evacuación en la zona del incendio

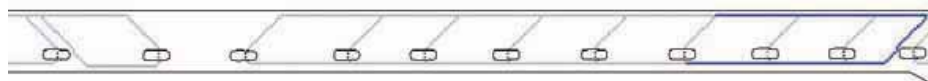


Ilustración 28: Detalle camino de evacuación en el pk 114+500

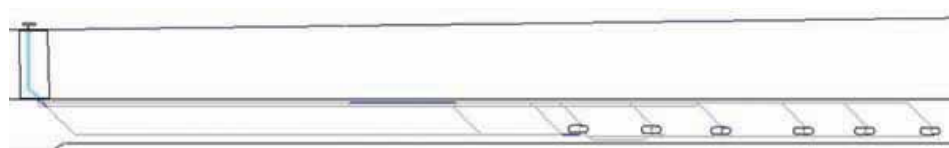


Ilustración 29: Detalle evacuación por la galería del pk 113+720

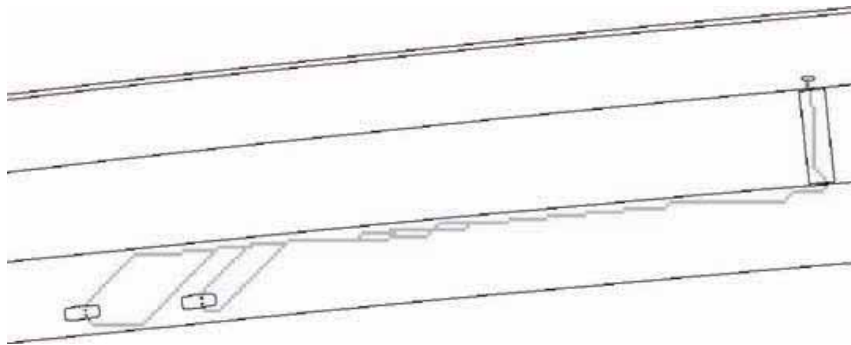


Ilustración 30: Detalle camino evacuación en la galería del pk 113+240

Así mismo existe la posibilidad de mostrar la situación, distancia y tiempos relevantes de cada uno de los usuarios.

Evaluación de la gravedad del escenario

El hecho que afecta fundamentalmente a los usuarios es el CO₂, pero su incidencia es tan pequeña, en el intervalo que los usuarios pasan en el túnel, que no afecta a la salud de los usuarios.

Para refutar las conclusiones se obtiene una tabla, donde se muestra la exposición de los usuarios a los distintos factores adversos que podrían afectar a su salud, la exposición total acumulada, la exposición que es capaz de aguantar ese usuario, y su estado de salud al finalizar la simulación.

5. Bibliografía

1. Simulation modeling and analysis; Third Edition. Averill M. Law, W. David Kelton. 2000.
2. Advanced Occupant Behavioural Features of the building Exodus Evacuation Model. M.Owen, E.R.Galea, P.Lawrence. 1996.
3. Validation of Evacuation Models. E.R.Galea. 1997.
4. Escape as a Social Response. M.Owen, E.R.Galea, P.Lawrence, L.Filippidis. 1997.
5. Validation of the building Exodus Evacuation Model. M.Owen, E.R.Galea, P.Lawrence, L.Filippidis, S. Gwynne. 1998.
6. Adaptive Decision-Making in building Exodus. M.Owen, E.Galea, P.Lawrence, L.Filippidis, S. Gwynne. 1998.
7. Modelling Occupant Interaction with fire conditions using the building Exodus Evacuation Model. P.Lawrence, L.Filippidis. 2000.
8. Principles and Practice of Evacuation Modelling. Fourth Edition. E.Galea, S. Gwynne. 2002.
9. Highway Capacity Manual. Transportation Research Board (TRB). 2000.